



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

INVESTIGACIÓN DEL FLUJO AGUA-AIRE EN CONDUCTOS CERRADOS CON  
TÉCNICAS INTRUSIVAS Y NO-INTRUSIVAS

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
SIMÓN RENÉ ÁVILA LÓPEZ

TUTOR PRINCIPAL  
DR. OSCAR POZOS ESTRADA, INSTITUTO DE INGENIERIA

CIUDAD DE MÉXICO, MARZO DE 2022



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. OSCAR ARTURO FUENTES MARILES

Secretario: M. I. VÍCTOR FRANCO

Vocal: DR. ÓSCAR POZOS ESTRADA

1er. Suplente: DR. RAFAEL BERNARDO CARMONA PAREDES

2do. Suplente: DRA. MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ

Lugar de realización de tesis:

Instituto de Ingeniería, Ciudad de México, México.

**TUTOR DE TESIS:**  
DR. ÓSCAR POZOS ESTRADA

---

FIRMA

Dedicada a:

Mis padres, Gilberta y Simón †

## Agradecimientos

A mis padres, por impulsarme en todos los niveles de mis estudios.

A la UNAM, por darme la oportunidad de realizar mis estudios de Posgrado.

Al CONACYT, por apoyarme de manera económica.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por permitirme realizar el trabajo de investigación en sus instalaciones.

A mi tutor, Oscar Pozos, por su valioso apoyo para la realización de la presente investigación, gracias.

Mis compañeros de tesis. Marcos, por su aportación a la interpretación de un algoritmo. Valentín, gracias por los códigos de Matlab.

Mis amigos y compañeros, gracias por su amistad. Deisy, David y Rubinay. Caleb, asesorando se aprende, gracias.

## **RESUMEN**

Los sistemas de conducción presurizados de agua potable y drenaje sanitario están sujetos a la presencia de aire en el flujo. En los puntos de mayor elevación de los conductos se puede presentar una acumulación importante de aire en forma de bolsas. Aguas abajo de estas bolsas de aire se forma un salto hidráulico. Una de las características de un salto hidráulico es la mezcla de agua-aire que aparece en la turbulencia del mismo. En numerosas investigaciones se han realizado mediciones del contenido de aire, utilizando técnicas intrusivas y no intrusivas, principalmente en canales rectangulares. En este estudio se han utilizado ambas técnicas con la finalidad de comparar los resultados.

Para la presente investigación se realizaron mediciones en un dispositivo experimental que consiste en una tubería de 20 cm (8 pulgadas) de diámetro interior, que forma un circuito con una longitud aproximada de 25 metros. Con el dispositivo trabajando como un conducto a presión, se inyectó aire en el interior de la tubería. El aire inyectado se acumuló en un punto elevado de la tubería en donde se formó un sifón, desarrollándose así un salto hidráulico al final de la bolsa de aire. Se obtuvieron datos para 8 escenarios diferentes, con la combinación de distintas pendientes del tubo y caudales.

El instrumento utilizado para llevar a cabo las mediciones de forma intrusiva, consistió en una sonda de conductividad de dos puntas. Para el caso de la técnica no intrusiva se hizo uso de una cámara de alta velocidad.

Los resultados obtenidos con ambos métodos tienen una tendencia similar a los publicados por Leandro et al. (2012). Una de las ventajas de utilizar métodos de procesamiento de imágenes, como técnica no intrusiva, para medir el contenido de aire en un salto hidráulico, es que se puede analizar el flujo de forma instantánea en cierta área del perfil longitudinal del salto y en distintos periodos de tiempo.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
JUSTIFICACIÓN Y ALCANCES .....	2
1. SISTEMAS DE CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE Y LOS EFECTOS DEBIDOS AL AIRE ATRAPADO ..	3
1.1 Sistemas de conducción de agua potable .....	3
1.1.1 Conducción por bombeo .....	4
1.1.2 Conducción por gravedad.....	4
1.2 Causas por las que ingresa aire en los acueductos.....	5
1.3 Problemas causados por el aire atrapado en acueductos.....	6
1.3.1 Incremento de la pérdida de carga causado por aire atrapado .....	6
1.3.2 Retorno de bolsas de aire de gran tamaño debido a la fuerza de flotación (blowback)	9
1.3.3 Golpe de ariete provocado por la evacuación de aire.....	9
1.3.4 Reducción de la eficiencia en sistemas de bombeo causada por el aire atrapado .....	9
1.4 Mecanismos para la remoción del aire en un acueducto.....	10
1.4.1 Medios hidráulicos.....	10
1.4.2 Medios mecánicos .....	16
2. MEDICIÓN DEL CONTENIDO AGUA-AIRE EN UN SALTO HIDRÁULICO .....	26
2.1 Resalto hidráulico .....	26
2.2 Dispositivos para la medición de la concentración de agua-aire.....	30
2.3 Método intrusivo con sonda de conductividad .....	34
2.3.1 Sonda de conductividad con una punta .....	34
2.3.2 Sonda de conductividad de doble punta .....	37
2.4 Método no intrusivo usando una cámara de alta velocidad .....	38
2.4.1 Algoritmo de edición de imágenes (IE).....	39
2.4.2 Matriz de intensidad de pixel (PIM) .....	44
3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN .....	47
3.1 Dispositivo experimental .....	47
3.2 Procedimiento experimental .....	48

3.2.1	Instrumentos utilizados para las mediciones .....	50
3.2.2	Obtención y procesamiento de datos con sonda de conductividad de doble punta... 55	
3.2.3	Procesamiento de imágenes .....	62
3.2.3.1	Edición de imágenes.....	63
3.2.3.2	Definición de la superficie libre del agua .....	64
3.2.3.3	Algoritmo de intensidad de píxeles.....	67
3.2.3.4	Análisis de correlación.....	71
3.2.3.5	Coefficiente de Correlación .....	71
3.2.3.6	Coefficiente de determinación .....	72
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	74
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	93
	REFERENCIAS.....	96
A.	APENDICE .....	101
B.	APENDICE .....	109

**Lista de figuras**

Figura 1.1. Arreglo típico de una instalación de bombeo para servicio de agua..... 4

Figura 1.2. Arreglo de una instalación de bombeo por gravedad..... 5

Figura 1.3. Fuerzas que actúan en una bolsa de aire estacionaria en un tramo de tubería descendente con flujo de agua a tubo lleno (Pozos et al. 2012). .... 7

Figura 1.4. Bolsa de aire en una pendiente descendente (Edmunds, 1979) ..... 7

Figura 1.5. Bolsas de aire en un acueducto a bombeo (Pozos et al. 2012)..... 8

Figura 1.6. Bolsas de aire en un acueducto a gravedad (Pozos et al. 2012)..... 8

Figura 1.7. Aire ingresado en una tubería por un salto hidráulico (Kalinske y Robertson, 1943)..... 13

Figura 1.8. Movimiento de burbujas y bolsas de aire en conductos cerrados fluyendo llenos (Falvey, 1980). .... 15

Figura 1.9. Válvula de admisión y expulsión de aire (VAEA). .... 19

Figura 1.10. Válvula de expulsión de aire (VEA)..... 19

Figura 1.11. Válvula de aire combinada de doble cuerpo (VAC)..... 20

Figura 2.1. Esquema de un salto hidráulico ..... 27

Figura 2.2. Resalto ondulante..... 27

Figura 2.3. Resalto débil. .... 28

Figura 2.4. Resalto oscilante. .... 28

Figura 2.5. Resalto permanente o estable..... 28

Figura 2.6. Resalto fuerte. .... 29

Figura 2.7. Comportamiento de la concentración agua-aire en un salto hidráulico, Takahashi y Ohtsu (2009). .... 30

Figura 2.8. Esquema de una sonda de conductividad de una punta ..... 35

Figura 2.9. Datos obtenidos con sonda de conductividad de doble punta (velocidad: 20 kHz), Chanson (2002). .... 35

Figura 2.10. Perfiles verticales de C y F dentro del resalto hidráulico ..... 37

Figura 2.11. Señal de conductividad típica de la sonda de doble punta..... 38

Figura 2.12. Definición de las áreas de escala de grises en las imágenes, propuesta por Leandro et al. (2012) ..... 41

Figura 2.13. Primera etapa del procesamiento de imágenes, dividida en 3 etapas, Leandro et al. (2012) ..... 44

Figura 2.14. Algoritmo de Matriz de Intensidad de Píxeles (PIM), Leandro et al (2012) ..... 46

Figura 3.1. Perfil longitudinal del dispositivo experimental. .... 47

Figura 3.2. Dispositivo experimental con sus elementos principales..... 48

Figura 3.3. Caja de acrílico transparente (pecera) colocada en la sección de las mediciones..... 48

Figura 3.4. Gastos para cada alternativa en función de la velocidad de la bomba..... 49

Figura 3.5. Ingreso de aire en la tubería..... 50

Figura 3.6. Sonda de conductividad de doble punta y caja con tarjeta electrónica.....	51
Figura 3.7. Esquema del salto hidráulico, sonda de doble punta y área de captura de imágenes.....	51
Figura 3.8. Registro del flujo agua-aire con la sonda.....	52
Figura 3.9. Imagen capturada con la cámara de alta velocidad.....	53
Figura 3.10. Medidor de caudal ultrasónico.....	54
Figura 3.11. Lámpara de tungsteno.....	54
Figura 3.12. Perfil longitudinal en el salto hidráulico con los puntos donde se tomaron datos con la sonda. ....	56
Figura 3.13. Gráficas de Amplitud con datos adquiridos con la sonda de conductividad a cada 2 centímetros de altura correspondiente al escenario 3 (Q3). ....	58
Figura 3.14. Curva de amplitud de la señal_1 a una altura de 16 cm del escenario 3 y curva de umbral. ....	59
Figura 3.15. Curva de amplitud de la señal_1 a una altura de 16 cm del escenario 3 y curva de umbral, en un segundo.....	59
Figura 3.16. Concentración agua-aire obtenida con la sonda para cada punta en el escenario 3. ....	61
Figura 3.17. Concentración agua-aire promedio, obtenida con sonda de conductividad, para el escenario 3.....	61
Figura 3.18. Una de las imágenes del escenario 3. Imagen original (izquierda) e imagen con filtro (derecha).....	63
Figura 3.19. Ejemplo de recorte de imagen para aplicar algoritmo de matriz de intensidad de píxeles. ....	63
Figura 3.20. Proceso de edición de imágenes aplicado a una imagen del escenario 1.....	64
Figura 3.21. Imagen que muestra los píxeles que cambian en dos imágenes continuas. ....	65
Figura 3.22. Puntos que delimitan la superficie libre del agua en el salto hidráulico. ....	65
Figura 3.23. Ejemplo de imagen con estimación de la superficie libre del agua en el salto hidráulico. ....	66
Figura 3.24. Resultado del procedimiento de edición de imágenes definiendo la superficie libre del agua. ....	67
Figura 3.25. División de imágenes en submatrices para obtener promedios de intensidad de píxel.....	68
Figura 3.26. Imagen con promedios de píxeles en cada submatriz. ....	68
Figura 3.27. Gráfica de intensidad de píxeles en $x=32$ cm para el escenario 1.....	69
Figura 3.28. Promedio de intensidad de píxeles para el escenario 1 (Q1). ....	70
Figura 3.29. Perfiles de intensidad de píxeles a cada 5 centímetros del escenario 1, incluyendo en la posición de la sonda ( $x = 32$ cm).....	70
Figura 3.30. Interfaz gráfica de la aplicación desarrollada para el procesamiento de las imágenes. ....	71
Figura 3.31. Resultados de contenido agua-aire obtenido con sonda de conductividad y método de procesamiento de imágenes. Escenario 1 (Q1). ....	73
Figura 4.1. Perfiles de concentración de aire con 2 métodos, escenario 1, $x=32$ cm. ....	75
Figura 4.2. Perfiles de concentración de aire con 2 métodos, escenario 2, $x=30$ cm. ....	75

Figura 4.3. Perfiles de concentración de aire con 2 métodos, escenario 3, $x=27$ cm.....	76
Figura 4.4. Perfiles de concentración de aire con 2 métodos, escenario 4, $x=31$ cm.....	76
Figura 4.5. Perfiles de concentración de aire con 2 métodos, escenario 5, $x=23$ cm.....	77
Figura 4.6. Perfiles de concentración de aire con 2 métodos, escenario 6, $x=23$ cm.....	77
Figura 4.7. Perfiles de concentración de aire con 2 métodos, escenario 7, $x=32$ cm.....	78
Figura 4.8. Perfiles de concentración de aire con 2 métodos, escenario 8, $x=34$ cm.....	78
Figura 4.9. Perfil de C con mejor coincidencia para el escenario 2. ....	80
Figura 4.10. Resultado del procesamiento de imágenes para el escenario 1.....	81
Figura 4.11. Perfiles de C a cada 5 centímetros para el escenario 1. ....	81
Figura 4.12. Resultado del procesamiento de imágenes para el escenario 2.....	82
Figura 4.13. Perfiles de C a cada 5 centímetros para el escenario 2. ....	82
Figura 4.14. Resultado del procesamiento de imágenes para el escenario 3.....	83
Figura 4.15. Perfiles de C a cada 5 centímetros para el escenario 3. ....	83
Figura 4.16. Resultado del procesamiento de imágenes para el escenario 4.....	84
Figura 4.17. Perfiles de C a cada 5 centímetros para el escenario 4. ....	84
Figura 4.18. Resultado del procesamiento de imágenes para el escenario 5.....	85
Figura 4.19. Perfiles de C a cada 5 centímetros para el escenario 5. ....	85
Figura 4.20. Resultado del procesamiento de imágenes para el escenario 6. ....	86
Figura 4.21. Perfiles de C a cada 5 centímetros para el escenario 6. ....	86
Figura 4.22. Resultado del procesamiento de imágenes para el escenario 7.....	87
Figura 4.23. Perfiles de C a cada 5 centímetros para el escenario 7. ....	87
Figura 4.24. Resultado del procesamiento de imágenes para el escenario 8.....	88
Figura 4.25. Perfiles de C a cada 5 centímetros para el escenario 8. ....	88
Figura 4.26. Serie de tiempo para el escenario 1 en $x = 32$ centímetros.....	89
Figura 4.27. Serie de tiempo para el escenario 2 en $x = 30$ centímetros.....	89
Figura 4.28. Serie de tiempo para el escenario 3 en $x = 27$ centímetros.....	90
Figura 4.29. Serie de tiempo para el escenario 4 en $x = 31$ centímetros.....	90
Figura 4.30. Serie de tiempo para el escenario 5 en $x = 23$ centímetros.....	91
Figura 4.31. Serie de tiempo para el escenario 6 en $x = 23$ centímetros.....	91
Figura 4.32. Serie de tiempo para el escenario 7 en $x = 32$ centímetros.....	91
Figura 4.33. Serie de tiempo para el escenario 8 en $x = 34$ centímetros.....	92
Figura 5.1. Resultados de concentración agua-aire con métodos intrusivos y no intrusivos. Izquierda: Estudio realizado por Leandro et al. (2012). Derecha: presente estudio. ....	94
Figura A.1. Grafica de resultados de C con sonda para el escenario 1. ....	101
Figura A.2. Grafica de resultados de C con sonda para el escenario 2. ....	102
Figura A.3. Grafica de resultados de C con sonda para el escenario 3. ....	103
Figura A.4. Grafica de resultados de C con sonda para el escenario 4. ....	104

Figura A.5. Grafica de resultados de C con sonda para el escenario 5. ....	105
Figura A.6. Grafica de resultados de C con sonda para el escenario 6. ....	106
Figura A.7. Grafica de resultados de C con sonda para el escenario 7. ....	107
Figura A.8. Grafica de resultados de C con sonda para el escenario 8. ....	108

## Lista de tablas

Tabla 2.1. Estudios experimentales en resaltos hidráulicos. ....	32
Tabla 3.1. Gastos y velocidades de la bomba para cada escenario de medición. ....	49
Tabla 3.2. Distancia desde el inicio del salto hasta el punto de medición con sonda para cada escenario (distancia $x$ ). ....	55
Tabla 3.3. Concentración agua-aire ( $C$ ) para el escenario 3 (Q3), medido con sonda. ....	60
Tabla 3.4. Parámetros $Ptr$ y $Ptr2$ para los 8 escenarios medidos. ....	66
Tabla 4.1. Condiciones de flujo para los escenarios del experimento. ....	74
Tabla 4.2. Coeficientes de determinación para cada uno de los escenarios medidos. ....	79
Tabla A.1. Resultados de $C$ con sonda para el escenario 1. ....	101
Tabla A.2. Resultados de $C$ con sonda para el escenario 2. ....	102
Tabla A.3. Resultados de $C$ con sonda para el escenario 3. ....	103
Tabla A.4. Resultados de $C$ con sonda para el escenario 4. ....	104
Tabla A.5. Resultados de $C$ con sonda para el escenario 5. ....	105
Tabla A.6. Resultados de $C$ con sonda para el escenario 6. ....	106
Tabla A.7. Resultados de $C$ con sonda para el escenario 7. ....	107
Tabla A.8. Resultados de $C$ con sonda para el escenario 8. ....	108
Tabla B.1. Valores de $C$ obtenidos con sonda y procesamiento de imágenes, $x = 32$ , escenario 1. ....	109
Tabla B.2. Valores de $C$ obtenidos con sonda y procesamiento de imágenes, $x = 30$ , escenario 2. ....	109
Tabla B.3. Valores de $C$ obtenidos con sonda y procesamiento de imágenes, $x = 27$ , escenario 3. ....	110
Tabla B.4. Valores de $C$ obtenidos con sonda y procesamiento de imágenes, $x = 31$ , escenario 4. ....	110
Tabla B.5. Valores de $C$ obtenidos con sonda y procesamiento de imágenes, $x = 23$ , escenario 5. ....	111
Tabla B.6. Valores de $C$ obtenidos con sonda y procesamiento de imágenes, $x = 23$ , escenario 6. ....	111
Tabla B.7. Valores de $C$ obtenidos con sonda y procesamiento de imágenes, $x = 32$ , escenario 7. ....	112
Tabla B.8. Valores de $C$ obtenidos con sonda y procesamiento de imágenes, $x = 34$ , escenario 8. ....	112

## INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua para el consumo humano es de vital importancia para su supervivencia, de ahí la necesidad de la construcción de obras civiles para transportar este líquido, desde las fuentes de abastecimiento hasta los asentamientos humanos. Los acueductos han sido utilizados, desde hace más de 2000 años, por distintas civilizaciones para satisfacer la necesidad fundamental del consumo de agua para sus ciudades.

A lo largo de la historia los sistemas de abastecimiento de agua se han modernizado, de tal manera que en la actualidad se utilizan sofisticadas plantas de potabilización del agua y de diversos sistemas de bombeo. Por ello, la importancia del estudio del comportamiento del flujo a través de las tuberías de estos sistemas.

Los sistemas de conducción presurizados de agua potable y drenaje sanitario están sujetos a la presencia de aire en el flujo. En los puntos de mayor elevación de los conductos se puede presentar una acumulación importante de aire en forma de bolsas. Al final de las bolsas de aire se forma un salto hidráulico, por lo que es de interés conocer el comportamiento del flujo agua-aire en función de las características del sistema.

Las bolsas de aire en conductos a presión provocan problemas de pérdida de carga, turbulencia en el flujo, reducción de la eficiencia de los equipos de bombeo, incremento en las presiones máximas durante un transitorio hidráulico, efectos en los materiales de las tuberías, lo que puede modificar las propiedades del fluido y provocar situaciones ambientales no deseables en el punto de descarga, entre otros.

La mezcla de agua-aire, que se presenta en la turbulencia de un salto hidráulico al final de una bolsa de aire en un acueducto, se ha investigado por diversos autores utilizando distintas técnicas. Investigadores como Chanson et al. (2007), Leandro et al. (2012), entre otros, han realizado mediciones del contenido de aire utilizando técnicas intrusivas y no intrusivas, principalmente en canales rectangulares.

La presente investigación consiste en emplear la metodología, no intrusiva, propuesta por Leandro et al. (2012) para obtener perfiles de contenido de agua-aire en un salto hidráulico producido al final de una bolsa de aire en una tubería a presión. Según el autor, se requiere de la calibración de algunos parámetros en el proceso de cálculo, por lo que es necesario utilizar un método intrusivo para la obtención de la concentración agua-aire.

## **JUSTIFICACIÓN Y ALCANCES**

En conducciones a presión se pueden presentar tramos en donde se forman bolsas de aire. En la longitud de la bolsa, el flujo se comporta como un conducto a superficie libre. Al final de la bolsa el fluido vuelve a ocupar la totalidad del conducto y en la transición la velocidad del flujo disminuye considerablemente, formándose un salto hidráulico. Las características de un salto hidráulico consisten en que se forma una gran turbulencia, disipación de energía y arrastre de aire.

Aplicaciones prácticas de un salto hidráulico son: disipación de energía en tanques amortiguadores, permiten la entrada de aire en sifones, ayudan al mezclado de sustancias en plantas de tratamiento. Un parámetro de estudio en el salto hidráulico consiste en determinar la concentración de agua-aire en el mismo.

Las técnicas para determinar la concentración de aire en un salto hidráulico pueden ser intrusivas y no intrusivas. Las intrusivas consisten en utilizar instrumentos que invaden el flujo para realizar las mediciones, utilizando principalmente sondas de conductividad. Las técnicas no intrusivas tienen como objetivo hacer mediciones sin interferir con el flujo mediante la captura de fotografías en un conducto transparente o con equipos de velocimetría.

Varios investigadores han realizado mediciones de la concentración de aire en un salto hidráulico utilizando técnicas intrusivas y no intrusivas, principalmente en canales rectangulares. El presente estudio tiene como objetivo hacer mediciones del flujo agua-aire utilizando ambas técnicas, en el salto hidráulico que se forma al final de una bolsa de aire en conductos que transportan agua a presión, utilizando para ello un dispositivo experimental.

La finalidad de medir concentraciones de aire utilizando técnicas intrusivas y no intrusivas, consiste en comparar los resultados entre ambas, así como hacer una comparación con resultados presentados en otras investigaciones.

# **1. SISTEMAS DE CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE Y LOS EFECTOS DEBIDOS AL AIRE ATRAPADO**

El agua es un elemento esencial para la vida, por lo que las antiguas civilizaciones se ubicaron a lo largo de los ríos. Más tarde, los avances técnicos le permitieron al hombre transportar y almacenar el agua, así como extraerla del subsuelo. Gracias a esto los asentamientos humanos se han esparcido lejos de ríos y de otras fuentes superficiales de agua.

Actualmente, su uso en las poblaciones es diverso, por ejemplo: para consumo humano, en el aseo personal, la limpieza doméstica y la cocción de los alimentos. Además, se usa para fines comerciales, públicos e industriales; también en la irrigación, la generación de energía eléctrica, la navegación y en recreación.

De la misma forma en que ha evolucionado el uso del agua lo ha hecho el término 'abastecimiento de agua', que, en nuestros días, conlleva proveer a las localidades urbanas y rurales de un volumen suficiente de agua, con una calidad requerida y a una presión adecuada. Un sistema moderno de abastecimiento de agua se compone de instalaciones para la captación, almacenamiento, conducción, bombeo, tratamiento y distribución. Las obras de captación y almacenamiento permiten reunir las aguas aprovechables de ríos, manantiales y depósitos subterráneos; incluyen actividades como el desarrollo y cuidado de la cuenca de aportación, pozos y manantiales, así como la construcción de presas y de galerías filtrantes. La conducción incluye canales y acueductos, así como instalaciones complementarias de bombeo para transportar el agua desde la fuente hasta el centro de distribución. El tratamiento es la serie de procesos que le dan al agua la calidad requerida. Finalmente, la distribución es dotar de agua al usuario, para su consumo (MAPAS 2015).

## **1.1 Sistemas de conducción de agua potable**

El abastecimiento del agua, consiste en dotar de este servicio a los asentamientos humanos, para lo cual se transporta el agua desde una fuente, que puede ser superficial o subterránea, y posteriormente a un tratamiento se distribuye en la mancha poblacional.

Con la finalidad de realizar la distribución del agua, se utiliza un completo sistema de agua potable dentro del cual se encuentran todas aquellas obras de conducción que permiten desplazar el agua desde su origen hasta los usuarios, y de acuerdo al diseño de dicho sistema variará el impacto económico en la operación de éste.

Se entiende por línea de conducción al tramo de tubería que transporta agua desde la captación hasta la planta potabilizadora, o bien hasta el tanque de regularización, dependiendo de la configuración del sistema de agua potable. Una línea de conducción debe seguir, en lo posible, el perfil del terreno y debe ubicarse de manera que pueda inspeccionarse fácilmente. Esta puede diseñarse para trabajar por gravedad, bombeo o gravedad-bombeo. (Barrera, 2011).

### 1.1.1 Conducción por bombeo

La conducción por bombeo es necesaria cuando se requiere adicionar energía para transportar el gasto de diseño. Este tipo de conducción se usa generalmente cuando la elevación del agua en la fuente de abastecimiento es menor a la altura piezométrica requerida en el punto de entrega. El equipo de bombeo proporciona la energía necesaria para lograr el transporte del agua (MAPAS 2015).

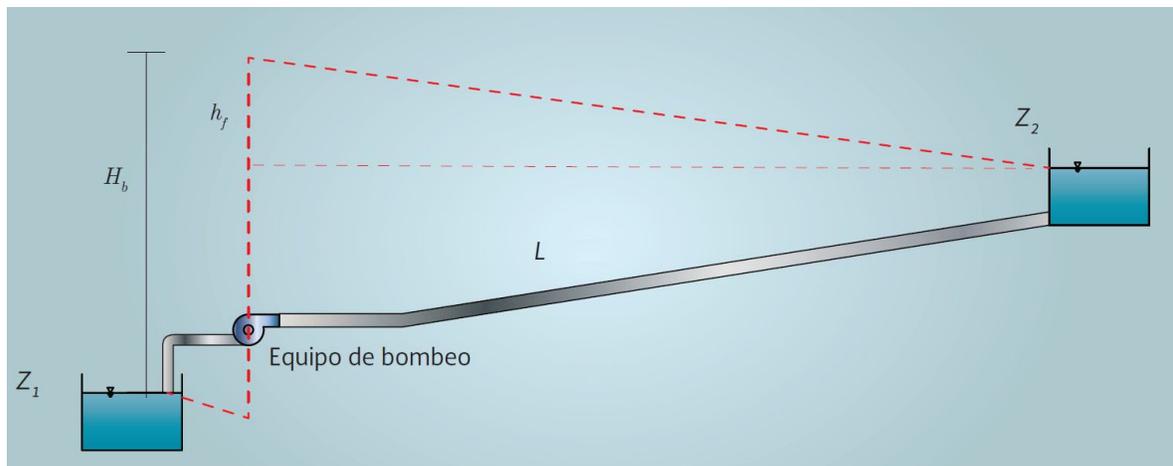


Figura 1.1. Arreglo típico de una instalación de bombeo para servicio de agua.

### 1.1.2 Conducción por gravedad

Una conducción por gravedad se presenta cuando la elevación del agua en la fuente de abastecimiento es mayor a la altura piezométrica requerida o existente en el punto de entrega del agua, el transporte del fluido se logra por la diferencia de energías disponible. Es decir, se hace uso de la topografía existente de manera que la conducción se lleve a cabo sin necesidad de bombeo y se alcanza un nivel aceptable de presión. Algunas ventajas de este esquema son la

inexistencia de costos de energía, operación sencilla, bajos costos de mantenimiento y reducidos cambios de presión (MAPAS 2015).

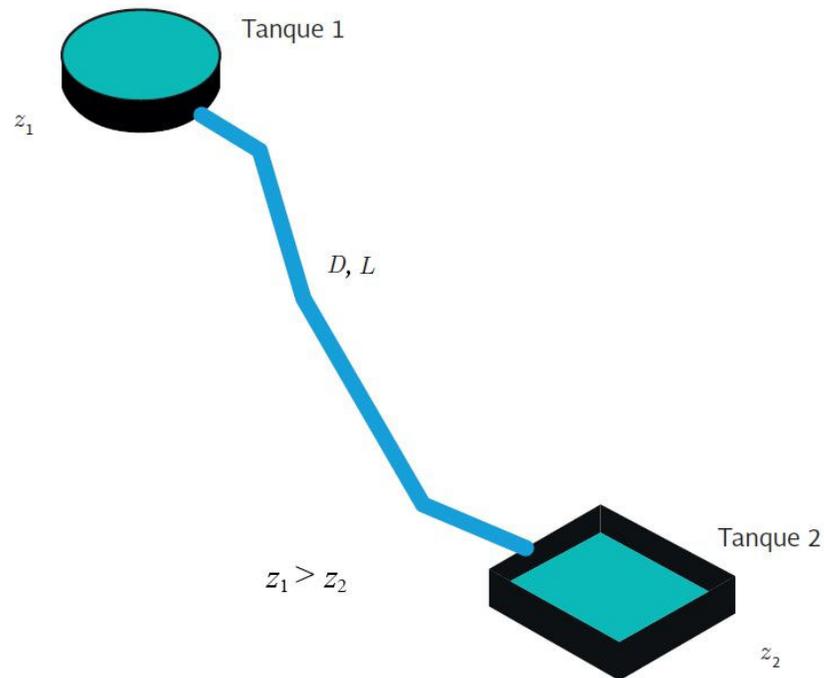


Figura 1.2. Arreglo de una instalación de bombeo por gravedad.

## 1.2 Causas por las que ingresa aire en los acueductos

El aire en las tuberías no siempre se puede eliminar por completo, pero entender las formas como se introduce, ayuda a los ingenieros a minimizar la cantidad que entra. El aire en la línea proviene de diferentes fuentes. Una tubería está llena de aire durante su llenado. Si el aire no se libera completamente a través de las válvulas de aire, y otros mecanismos, el aire puede permanecer en los puntos altos del sistema en forma de bolsas de aire (Pozos, 2007).

El aire entra también a través de equipos mecánicos, por ejemplo (Pozos et al. 2012):

- Las bombas introducen aire por la acción del vórtice de la succión en cantidades del 5% al 10% del flujo. Por lo tanto, se debe liberar aire antes de que se abra la válvula de retención.
- Cuando se produce presión de vacío en la tubería, el aire puede filtrarse a través del empaque en las juntas y válvulas.

El agua contiene más del 2% de aire por volumen y la solubilidad del aire en el agua es proporcional a la presión. El aire disuelto puede formar una fase gaseosa libre en puntos de la tubería donde la presión cae o la temperatura aumenta.

Los sistemas de conducción son sistemas complejos formados por estructuras hidráulicas, como pozos con caída, sifones, tanques, etc. El arrastre de aire se encuentra comúnmente en estas estructuras y más allá de sus entradas, el conducto cerrado a veces fluye parcialmente lleno, y si la profundidad normal es menor que la profundidad crítica se producirá un salto hidráulico. Si el aire no puede ser eliminado por el agua que fluye o por medios mecánicos como válvulas de expulsión de aire, puede permanecer en algunos puntos altos de la línea.

La caja rompedora de presión es una fuente importante de arrastre de aire debido a la acción de vórtice que se genera en su admisión. Cuando el nivel del agua en la estructura es muy bajo, el núcleo del vórtice puede ser lo suficientemente profundo como para introducir cantidades considerables de aire en la tubería (Pozos, 2007).

### **1.3 Problemas causados por el aire atrapado en acueductos**

El aire atrapado en acueductos puede conllevar gran variedad de problemas. Por ejemplo, el aire acumulado en los puntos altos de las conducciones puede reducir la sección efectiva del paso del agua, dando como resultado un incremento de la pérdida de carga. Asimismo, el aire puede acelerar el proceso de corrosión en las tuberías de fierro al aumentar la cantidad de oxígeno disponible. Por otra parte, el aire atrapado puede producir lecturas incorrectas en dispositivos de medición. La transición de tubo parcialmente lleno a tubo lleno causada por la presencia de una bolsa de aire puede generar vibraciones en la tubería. Las bolsas de aire de gran tamaño pueden regresar a contraflujo debido a su fuerza de flotación y dañar de forma importante algunas estructuras, tales como sifones o cajas rompedoras de presión (Pozos, 2007).

#### **1.3.1 Incremento de la pérdida de carga causado por aire atrapado**

El aire que se introduce a los acueductos es arrastrado por el flujo de agua y suele acumularse en puntos altos, formando bolsas de aire que incrementan su tamaño si más bolsas o burbujas de aire se les unen. Cuando una bolsa de aire se encuentra en un tramo de tubería con pendiente

descendente, el agua trata de moverla hacia aguas abajo. Si la bolsa de aire es lo suficientemente grande, la fuerza de flotación de la bolsa puede igualar la fuerza de arrastre del agua; entonces la bolsa de aire permanece estacionaria en la tubería, y así la fuerza de fricción tiende a cero. Las fuerzas actuantes sobre una bolsa de aire se muestran en la Figura 1.3.

El aire atrapado reduce la sección transversal del conducto, por lo que se presenta un flujo como canal abierto debajo de la bolsa de aire, lo cual provoca que la línea piezométrica sea paralela a la pendiente de la tubería, como puede verse en la Figura 1.4.

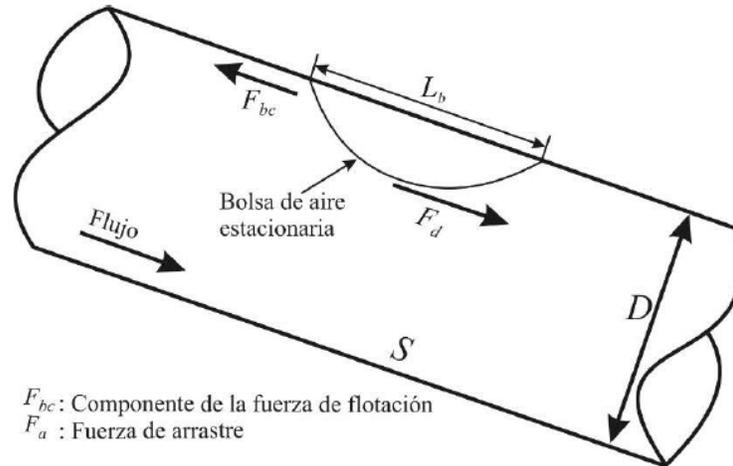


Figura 1.3. Fuerzas que actúan en una bolsa de aire estacionaria en un tramo de tubería descendente con flujo de agua a tubo lleno (Pozos et al. 2012).

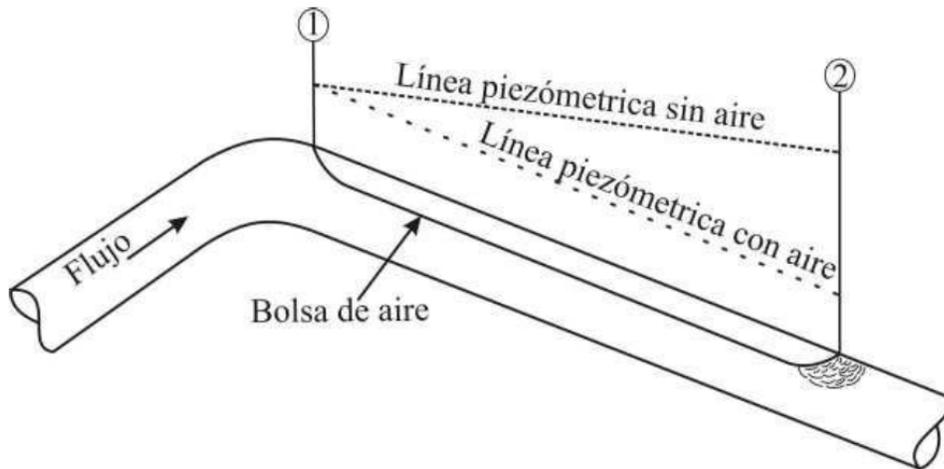


Figura 1.4. Bolsa de aire en una pendiente descendente (Edmunds, 1979)

El aire atrapado produce una pérdida de carga que reduce la capacidad del sistema. Aplicando la ecuación de la energía entre los extremos de una bolsa de aire, se puede comprobar que la

pérdida de carga es casi igual a la longitud de la componente vertical de la bolsa (Edmunds 1979, Corcos 2003, Corcos 2005; Figura 1.5 y Figura 1.6).

Richards (1962) comenta que la mayor pérdida de carga provocada por el aire atrapado se debe al cambio de la pendiente de la línea piezométrica, cuando el tubo fluye lleno y posteriormente cambia a flujo en superficie libre.

Los acueductos con pendientes descendentes en la dirección del flujo pueden acumular aire. En acueductos por bombeo a causa del aire atrapado se incrementa del consumo de energía eléctrica y se reduce el caudal, si las bolsas de aire localizadas en los puntos altos del acueducto no pueden ser removidas hacia aguas abajo. Puede ocurrir que el flujo a través de la línea se detenga por completo, debido a la pérdida de carga acumulada producida por varias bolsas de aire atrapadas. Esta pérdida puede ser mayor que la carga de la bomba.

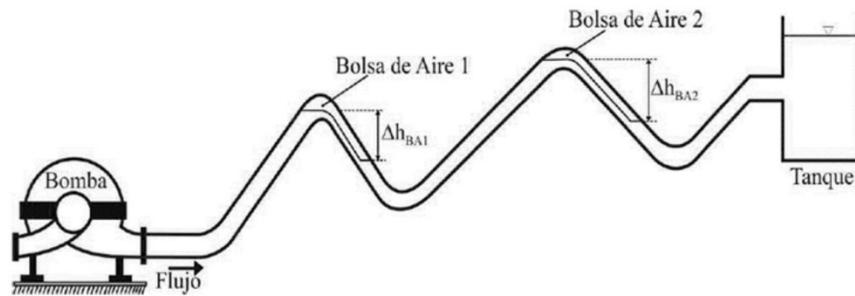


Figura 1.5. Bolsas de aire en un acueducto a bombeo (Pozos et al. 2012).

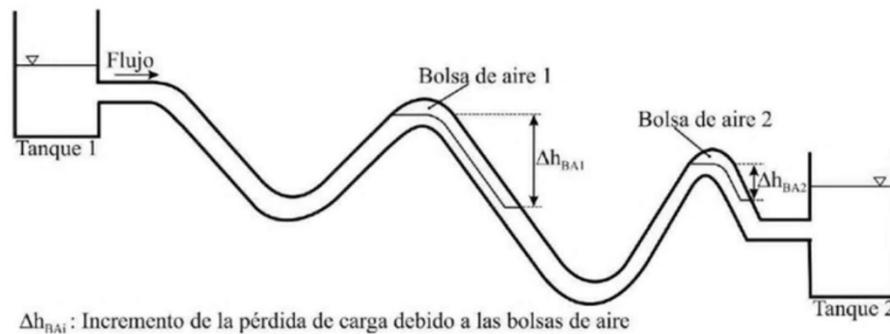


Figura 1.6. Bolsas de aire en un acueducto a gravedad (Pozos et al. 2012).

En acueductos por gravedad, la reducción de la capacidad de conducción debida al aire atrapado puede provocar derrames a través de venteos, tanques, cajas rompedoras de presión y torres de oscilación. Esto se debe a que la carga estática disponible no es suficiente para remover las bolsas de aire.

### **1.3.2 Retorno de bolsas de aire de gran tamaño debido a la fuerza de flotación (blowback)**

El aire que se acumula en los puntos altos de los acueductos puede formar grandes bolsas de aire, la longitud de las bolsas puede ser de varias veces el diámetro de la tubería. Si en algún tramo del acueducto existe un tubo con una pendiente descendente pronunciada, puede suceder que la bolsa de aire se estabilice alrededor de ésta y al mismo tiempo se presente un salto hidráulico en el extremo aguas abajo de la bolsa. La acción turbulenta del salto hidráulico causa que el aire entre y se mezcle con el agua que fluye en la tubería. Aguas abajo del salto hidráulico, el aire introducido puede formar burbujas de mayor tamaño y/o bolsas de aire y, si éstas son lo suficientemente grandes, la fuerza de arrastre del agua no podrá superar la fuerza de flotación. Entonces, las burbujas y/o bolsas permanecerán estacionarias en la tubería, incrementando su tamaño, al tiempo que más burbujas de aire llegan a unírseles. Las bolsas de aire incrementarán su tamaño al mismo tiempo que se reducirá su velocidad como resultado del aumento de la fuerza de flotación (Pozos 2007; Pozos et al. 2012).

Las bolsas de aire pueden regresar con una enorme fuerza a través del salto hidráulico (fenómeno conocido como blowback). Esta fuerza puede ser capaz de destruir parcial o completamente la base de estructuras hidráulicas, como tanques y cajas rompedoras de presión.

### **1.3.3 Golpe de ariete provocado por la evacuación de aire.**

El incremento de velocidad debajo de la bolsa de aire puede provocar el desprendimiento de una porción de la bolsa o bien su completa remoción. El cambio abrupto y rápido de la velocidad del fluido, cuando la bolsa es removida y se instala en otro punto alto, puede generar un golpe de ariete, el cual causaría un daño considerable a accesorios, uniones e incluso podría provocar la ruptura de la tubería.

### **1.3.4 Reducción de la eficiencia en sistemas de bombeo causada por el aire atrapado**

Thomas (2003) presenta una útil comparación entre la eficiencia de algunos acueductos de bombeo y el costo de remover el aire atrapado de la línea. Se estima que el 75 % del costo de operación de un acueducto es el costo por bombeo. La revisión de una variedad de acueductos

para distribución de agua potable, realizada alrededor del mundo, revela que el aire atrapado puede reducir la eficiencia de estos sistemas hasta en 30 %. La mayoría de los acueductos operan con aire atrapado, lo cual genera una disminución de entre 15 y 20 % del gasto proporcionado por el sistema. Las bolsas de aire comprimido son un enorme obstáculo para cualquier intento de bombear agua. El aire atrapado incrementa 20 % la carga de presión, lo que provoca que las bombas trabajen más forzadas y, por tanto, demanden mayor consumo de energía eléctrica.

## **1.4 Mecanismos para la remoción del aire en un acueducto**

Las causas por las cuales el aire entra en los acueductos ya fueron descritas, así como la variedad de problemas que pueden ocurrir por tener aire atrapado en ellos. En esta sección se presentan los dos medios para expulsar el aire de las tuberías. El primer medio es hidráulico, es decir, usa la inercia del flujo de agua para remover el aire de la línea. El segundo medio utiliza dispositivos mecánicos, tales como válvulas expulsoras de aire, venteos y bombas de vacío.

### **1.4.1 Medios hidráulicos**

En la actualidad no existe un método universalmente aceptado para analizar el movimiento de burbujas y bolsas de aire en acueductos. Por tanto, el diseño de estos sistemas se realiza usando fórmulas semiempíricas. La desventaja es que las recomendaciones de los autores varían ampliamente y quizá no sean adecuadas para el diseño de algunos acueductos. Las posibles causas de esta discrepancia son que las condiciones adoptadas por diferentes investigadores no son generales; además muchas de sus mediciones han sido realizadas en dispositivos experimentales con diámetros pequeños (50 mm) en comparación con los prototipos.

Hay gran variedad en los valores de velocidad de remoción obtenidos por varios autores. La velocidad de remoción se define como la velocidad mínima del agua necesaria para remover burbujas o bolsas de aire de un acueducto. Si alguno de estos valores es utilizado para diseñar un determinado acueducto, la velocidad del agua podría no remover el aire del prototipo, lo cual generaría alguno de los problemas descritos anteriormente.

Wisner et al (1975) describieron los siguientes términos, relacionados con la remoción del aire en una tubería:

- 1) *Velocidad de barrido*. Denota la velocidad mínima del agua, para transportar una bolsa y/o burbuja de aire en un acueducto.
- 2) *Generación de burbujas*. Es la acción turbulenta del salto hidráulico que se presenta en el extremo aguas abajo de una bolsa de aire, la cual genera las burbujas de aire.
- 3) *Arrastre*. Término usado para describir el movimiento en dirección del flujo de las burbujas de aire introducidas por el salto hidráulico.
- 4) *Velocidad de remoción*. Es la velocidad mínima del agua, para remover las burbujas o bolsas de aire fuera de la línea de conducción.

Los investigadores relacionados con el tema han adoptado diferentes consideraciones para obtener el valor de la velocidad de remoción. Algunos utilizan como criterio bolsas de aire estacionarias en tuberías con flujo de agua a tubo lleno; otros autores usan la velocidad de ascensión de las bolsas de aire en tubos con agua estacionaria. Las aportaciones de los principales investigadores se resumen a continuación:

Kalinske y Robertson (1943) para estudiar la cantidad de aire que introduce o drena un salto hidráulico debido a los vórtices que se generan en el mismo, llevaron a cabo experimentos en un dispositivo con tubos de acrílico de 152.4 mm de diámetro y con casi 11 m de longitud. En el dispositivo se midieron los gastos de aire  $Q_{aire}$  y agua  $Q_{agua}$ , tirantes, así como las presiones antes y después del salto hidráulico. Estas mediciones fueron hechas para diversas pendientes (de  $0^\circ$  a  $16.7^\circ$ ). Aguas arriba del salto el flujo se mantuvo a presión atmosférica. Posteriormente se realizaron en la conducción más ensayos con presiones mayores que la atmosférica, las cuales demostraron que esto no causa efecto alguno en los resultados obtenidos.

Durante los experimentos se advirtió que el aire al ser drenado por el salto hidráulico tiende a formar una gran bolsa de aire que puede extenderse hasta el extremo aguas abajo de la tubería, permanecer estable o remontar al flujo a través del salto. También pudo verse que, para gastos pequeños y pendientes suaves, no se forma una sola bolsa de aire de tamaño importante, sino una serie de bolsas relativamente largas, las cuales avanzan hacia aguas abajo.

Estos análisis indicaron que, para condiciones geométricas similares, el gasto de aire drenado por un salto hidráulico  $Q_{aire}$  en un tubo circular depende del gasto de agua  $Q_{agua}$  y de la intensidad de la turbulencia del salto, la cual depende a su vez del número de Froude,  $F_1$ , al inicio del salto hidráulico. La pendiente  $S$  de la tubería es otro de los parámetros que influye, aunque en menor grado. La relación adimensional entre los parámetros antes mencionados se puede escribir como:

$$\frac{Q_{aire}}{Q_{agua}} = f(F_1, y_1/D, S) \quad (1.1)$$

No obstante, resultados posteriores revelaron que el cociente  $Q_{aire}/Q_{agua}$  no varía con respecto a  $y_1/D$  o  $S$ , en cambio varía de manera importante con respecto a  $F_1$ , lo que se puede apreciar en la Figura 1.7.

Haciendo un análisis de regresión lineal con la información obtenida en laboratorio, Kalinske y Robertson obtuvieron la siguiente ecuación:

$$\beta = \frac{Q_{aire}}{Q_{agua}} = 0.0066(F_1 - 1)^{1.4} \quad (1.2)$$

Kalinske y Bliss (1943) presentan datos experimentales que indican el gasto de agua necesario para mantener la remoción o el barrido del aire de cualquier tubería con cualquier pendiente. La investigación experimental se realizó en tuberías de acrílico con diámetros de 102 y 152 mm. La pendiente de la tubería del dispositivo experimental fue variada en un intervalo entre 0 y 17.5°.

Para todas las pendientes de tubería, excepto las descendentes suaves, las bolsas de aire terminaban en un salto hidráulico que sellaba el conducto. En algunos casos, cuando los gastos eran pequeños y las pendientes suaves, el salto no llegaba hasta el techo del tubo; en tal caso el tirante aguas abajo del salto hidráulico se incrementaba gradualmente hasta llenar la tubería. Bajo estas condiciones el fenómeno de la remoción de aire es considerablemente diferente, comparado con el caso en el que el salto hidráulico sella el tubo.

La velocidad a la cual el salto hidráulico introduce aire al tubo que fluye lleno de agua no corresponde necesariamente con la velocidad a la cual el aire es removido de la bolsa de aire. Aguas abajo del salto el tubo fluye totalmente lleno de agua, excepto por las burbujas de aire, la velocidad a la cual el aire es removido de la conducción depende de la habilidad del flujo de agua. Para gastos de agua grandes, el salto hidráulico genera e introduce aire a velocidades mayores que las que el flujo aguas abajo del salto puede evacuar. El exceso de aire regresaba periódicamente a través del salto hasta la bolsa.

Kalinske y Bliss encontraron que para cualquier diámetro de tubería y cualquier pendiente hay un determinado gasto que es capaz de evacuar de la conducción todo el aire que introduce el salto hidráulico. Para un gasto pequeño, la remoción de aire dependerá de la velocidad del flujo aguas abajo del salto, y para un gasto grande, la velocidad del agua aguas abajo del salto será suficiente para remover todo el aire introducido por el salto.

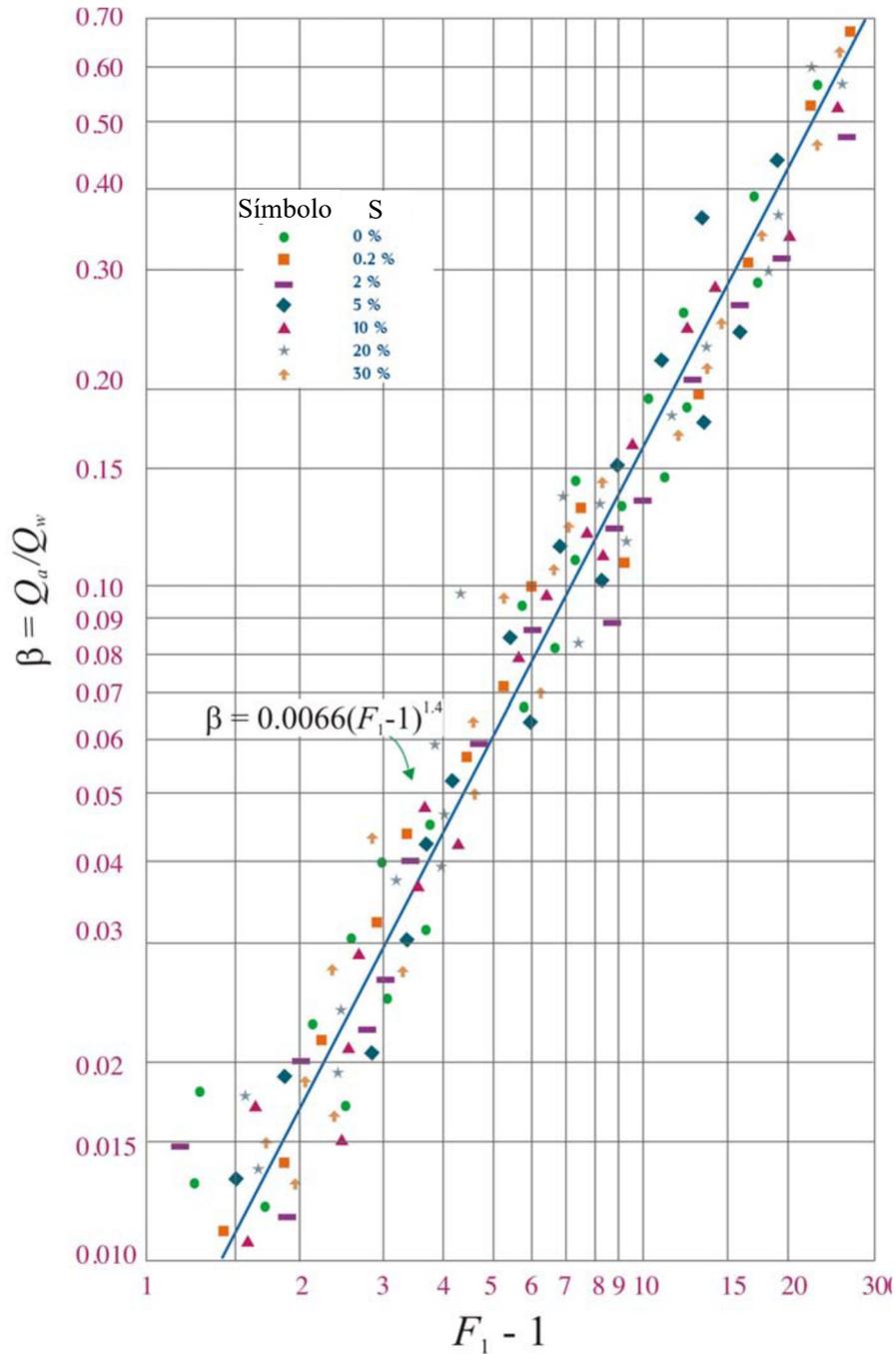


Figura 1.7. Aire ingresado en una tubería por un salto hidráulico (Kalinske y Robertson, 1943)

El análisis hecho por los autores indica que la relación del gasto de aire removido y el gasto de agua  $Q_{aire}/Q_{agua}$  está en función de la pendiente de la tubería,  $S$ , y el término denominado gasto adimensional, definido como  $Q^2_{agua} / gD^5$ , donde  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $D$  el

diámetro de la tubería. La tendencia de los datos experimentales puede ser representada por la siguiente ecuación:

$$Q_{agua}^2 / gD^5 = 0.707S \quad (1.3)$$

La ecuación anterior también puede presentarse en términos de la velocidad del agua,  $v$ , como:

$$v^2 / gD = 1.146S \quad (1.4)$$

La peculiar desviación de los datos obtenidos para pendientes suaves es totalmente diferente de lo esperado. Se encontró que, para pendientes menores de 2.5 %, los datos experimentales se desvían de la línea recta que representa la ecuación (1.3). Esto ocurre cuando el salto hidráulico no sella el conducto. Así el proceso de entrada de aire es totalmente diferente de cuando el tirante aguas abajo del salto es mayor que el diámetro del tubo. Es evidente que, para pendientes menores de 2.5 %, se requieren mayores gastos de agua para iniciar la remoción de aire.

Kent (1952) encontró que la velocidad de remoción del aire mediante un salto hidráulico al final de una bolsa de aire está relacionada con la fuerza de arrastre del agua que actúa sobre la bolsa. Según este autor existe una velocidad de remoción efectiva cuando la velocidad media del agua es igual o mayor que la velocidad mínima  $v_{min}$ . Kent desarrolló una relación semiempírica para obtener el valor de  $v_{min}$ , la cual es función de la pendiente de la tubería,  $S$ , y de su diámetro,  $D$ .

$$v_{min} = C_0^{1/2} \sqrt{gDS} \quad (1.5)$$

Aquí,  $C_0^{1/2}$  es una función de la forma de la bolsa de aire y, en datos experimentales, se encontró que su valor se vuelve constante cuando la longitud de la bolsa es mayor de  $1.5D$ . En la práctica ingenieril, la fórmula de Kent se usa comúnmente debido a su simplicidad.

Falvey (1980) elaboró una gráfica que muestra los límites de movimiento de burbujas y bolsa de aire en conductos cerrados, con base en datos presentados por Kalinske y Bliss (1943), Runge y Wallis (1965), Colgate (1966) y Martin (1976). El autor comenta que la dirección de movimiento de las burbujas y bolsas de aire puede ser analizada tomando en cuenta las magnitudes de las fuerzas de arrastre y flotación que actúan sobre una burbuja estacionaria en el flujo. Por ejemplo, las burbujas de aire se mueven perpendicularmente al eje del tubo, cuando la componente vectorial de la fuerza de flotación en la dirección aguas arriba es igual a la componente vectorial de la fuerza de arrastre. Asimismo, Falvey incluye en su gráfica los resultados obtenidos por Sailer (1955) en prototipos, donde se presentan problemas con grandes bolsas de aire que se movieron en contraflujo, destruyendo por completo las bases de concreto

reforzado de algunos tanques del acueducto San Diego. En la Figura 1.8 se muestra la gráfica propuesta por Falvey.

González y Pozos (2000) propusieron una ecuación para estudiar el comportamiento de burbujas y bolsas de aire aguas abajo de un salto hidráulico localizado al final de una gran bolsa de aire. Una investigación teórica y experimental se realizó para validar el uso de dicha ecuación. La relación propuesta se desarrolló con apoyo en la investigación llevada a cabo por Kalinske y Bliss (1943), así como en investigaciones posteriores. La ecuación propuesta es:

$$Q_{agua}^2/gD^5 = S \tag{1.6}$$

El término del lado izquierdo de la ecuación es el parámetro de gasto adimensional.

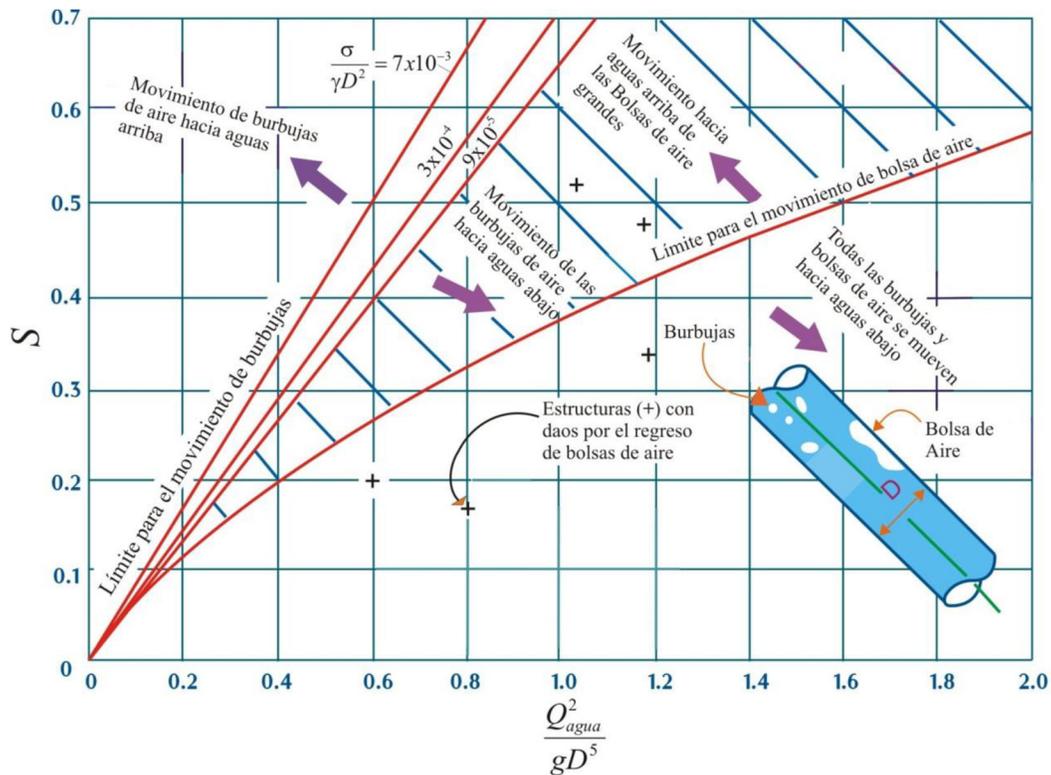


Figura 1.8. Movimiento de burbujas y bolsas de aire en conductos cerrados fluyendo llenos (Falvey, 1980).

Para analizar el comportamiento de las burbujas y bolsas de aire, el  $Q_{agua}^2/gD^5$  se debe comparar con todas las pendientes descendentes del perfil del acueducto. Cuando  $Q_{agua}^2/gD^5$  es mayor que la pendiente de la tubería, las burbujas y bolsas de aire van a ser removidas de las pendientes descendentes. Por otra parte, si el parámetro de gasto adimensional es menor a la pendiente descendente, las burbujas y bolsas de aire se moverán hacia aguas arriba.

Escarameia et al. (2005) describen estudios experimentales y numéricos efectuados para desarrollar una guía de diseño con el fin de minimizar los efectos negativos de la presencia de bolsas de aire en tuberías, particularmente para pendientes suaves.

La investigación experimental fue desarrollada en un dispositivo compuesto por tubos de 150 mm de diámetro interno, las pendientes podían ser variadas en un intervalo de 0 a 22.5°. Con base en sus resultados, estos autores proponen una ecuación para analizar el comportamiento del aire en acueductos. Escarameia et al. (2005) consideran que la ecuación (1.7) es válida para tuberías con inclinación máxima de 40° y puede ser utilizada en tubos con diámetros menores de 1.5 m.

$$v/(gD)^{0.5} = SF[0.56(\text{sen } S)^{0.5} + a] \quad (1.7)$$

donde  $a$  tiene los siguientes valores:

$$a = 0.45 \text{ para } BS < 0.06$$

$$a = 0.50 \text{ para } 0.06 \leq BS < 0.12$$

$$a = 0.57 \text{ para } 0.12 \leq BS < 0.30$$

$$a = 0.61 \text{ para } 0.30 \leq BS < 2$$

En la ecuación (1.7)  $v$  es la velocidad mínima del flujo requerida para mover una bolsa de aire definida por el parámetro  $BS = 4V/\pi D^3$  en un tubo con pendiente descendente,  $S$ , y diámetro,  $D$ . El volumen de la bolsa de aire es  $V$  y  $SF$  es un factor de seguridad igual a 1.1.

Pozos et al (2010) propusieron un método para encontrar los puntos altos de los acueductos donde las bolsas de aire podrían acumularse. La metodología presentada por los autores se basa en las investigaciones realizadas por González y Pozos (2000), y Pozos (2007).

#### **1.4.2 Medios mecánicos**

A inicios del siglo XX, los ingenieros no entendían bien el comportamiento del aire atrapado dentro de conductos por presión. Muchos de ellos proponían la colocación de venteos, compuestos de una válvula de control manual y un tubo, creyendo que el aire podía ser evacuado a través de ellos. Sin embargo, el uso de venteos para expulsar aire atrapado sólo se puede considerar cuando la línea piezométrica es cercana al nivel del terreno, entre 6 y 10 m, según Falvey (1980). La válvula de control manual localizada sobre el perfil del acueducto es usada

para colocar un tubo de forma vertical, de manera que el aire pueda ser descargado a la atmósfera.

Landon (1994) comenta que los hidrantes para incendios son una solución adoptada por algunos ingenieros para expulsar el aire de las tuberías. El hidrante es conectado a un costado de la tubería para remover el aire, pero aun así una cantidad importante de aire queda atrapada en la parte alta de la tubería.

Otra solución es la instalación de válvulas de globo y de compuerta en los puntos altos de los acueductos, para expulsar manualmente el aire del sistema. Sin embargo, en acueductos de grandes dimensiones no es posible predecir cuándo deben ser abiertas las válvulas para remover el aire de la línea. Además, este método no asegura una evacuación continua del aire, ni tampoco una protección contra presiones menores que la atmosférica durante la operación del acueducto.

### **Válvulas de aire**

Las válvulas de aire son los dispositivos más usados para expulsar el aire durante el llenado de una línea de conducción, así como para dejar entrar grandes volúmenes de aire cuando la línea está siendo drenada y para evacuar el aire acumulado al operar el sistema. Su mal funcionamiento o su falla total pueden llevar a la acumulación de aire, ya que las válvulas no serán capaces de interceptarlo y expulsarlo. Por tanto, es muy importante el correcto dimensionamiento y la colocación adecuada de las válvulas a todo lo largo de las líneas. Esto también permitirá que las válvulas funcionen adecuadamente durante transitorios, evitando así problemas relacionados con la separación de la columna líquida.

Balutto (1996) describe problemas relacionados con el mal funcionamiento de las válvulas expulsoras de aire en líneas de conducción. La operación ineficiente de las válvulas puede reducir 30 % la eficiencia del sistema, lo que conlleva mayor consumo de energía eléctrica para forzar a las bombas a evacuar el aire atrapado en la línea. Basado en investigaciones, Balutto comenta que el aire atrapado y el uso de válvulas expulsoras de aire pueden ser una causa primaria o secundaria que contribuye de forma importante al fallo de las líneas.

### **Tipos de válvulas de aire**

Las válvulas de aire son comúnmente usadas en líneas de conducción alrededor del mundo. Su modo de operación es expulsar y/o admitir el aire automáticamente sin asistencia del personal de operación. Existen muchos fabricantes que ofrecen una amplia gama de válvulas para un amplio intervalo de aplicaciones.

Por lo general las válvulas de aire se dividen en tres tipos:

- Válvulas de admisión y expulsión de aire.
- Válvulas de expulsión de aire.
- Válvulas combinadas.

### ***Válvulas de admisión y expulsión de aire (VAEA)***

Estas válvulas se usan para expulsar el aire durante la puesta en marcha de los equipos de bombeo y al llenar la conducción. La evacuación del aire se debe hacer lentamente para evitar el golpe de ariete o algún otro fenómeno destructivo. Por otra parte, las VAEA admiten grandes volúmenes de aire, para evitar posibles daños a las tuberías que pueden ocurrir por separación de columna o al drenar la línea.

Al ser removido el aire de la línea, el agua eleva el flotador de la válvula para sellar el orificio. La velocidad de expulsión del aire es función de la presión ejercida hacia el centro del orificio de la válvula. El criterio para dimensionar la válvula es muy importante, porque su tamaño definirá la presión diferencial a la cual es evacuado el aire.

Durante el paro de los equipos de bombeo, vaciado de la línea, ruptura de tubos o separación de la columna líquida, el flotador de la VAEA permitirá la entrada de aire a la tubería, para prevenir una presión de vacío y así proteger al acueducto de un colapso. Debido a que el tamaño de la válvula dicta el grado de vacío, su correcto dimensionamiento es muy importante.

Después de las situaciones antes mencionadas, el aire será removido para que el acueducto vuelva a su estado normal de funcionamiento. El flotador va a sellar el orificio de la VAEA. En figura 1.9 se muestra el esquema de una válvula de admisión y expulsión de aire.

### ***Válvulas de expulsión de aire (VEA)***

Las válvulas de expulsión de aire tienen un pequeño orificio para expulsar a la atmósfera el aire acumulado en los puntos altos de los acueductos, mientras éstos operan normalmente. Las VEA tienen un flotador hidromecánico que detecta la presencia del aire en las líneas de conducción, y permite su expulsión cuando éstas trabajan a presiones mayores que la atmosférica.

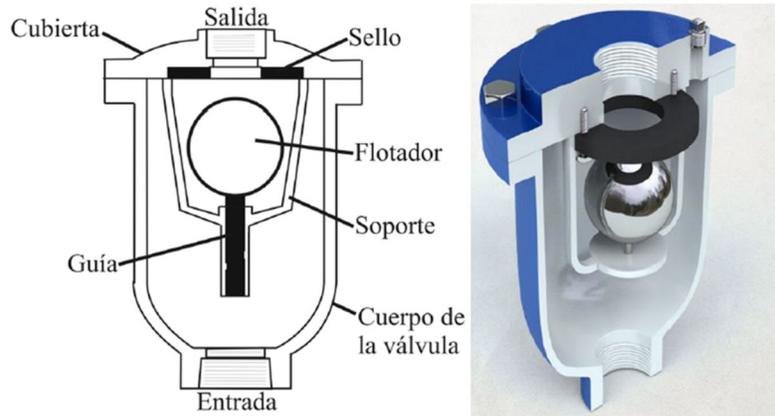


Figura 1.9. Válvula de admisión y expulsión de aire (VAEA).

Durante la operación de un acueducto, pequeñas cantidades de aire se introducen en el cuerpo de la VEA (Figura 1.10). Este aire va a desplazar el mismo volumen de líquido dentro de la válvula, produciendo que el flotador se mueva hacia abajo para permitir la expulsión del aire que, cuando es removido, hace que el flotador regrese a su posición original, moviendo el tapón para que éste selle el orificio de la válvula. Este proceso se repite si una nueva cantidad de aire se concentra en la VEA.

Las VEA tienen una capacidad limitada para expulsar y admitir aire, por tanto, este tipo de válvulas no es recomendable para evacuar grandes cantidades de aire durante el llenado de acueductos de grandes diámetros, ni para la protección contra presiones menores que la atmosférica, porque su orificio es muy pequeño, generalmente menor de 1.27 cm.

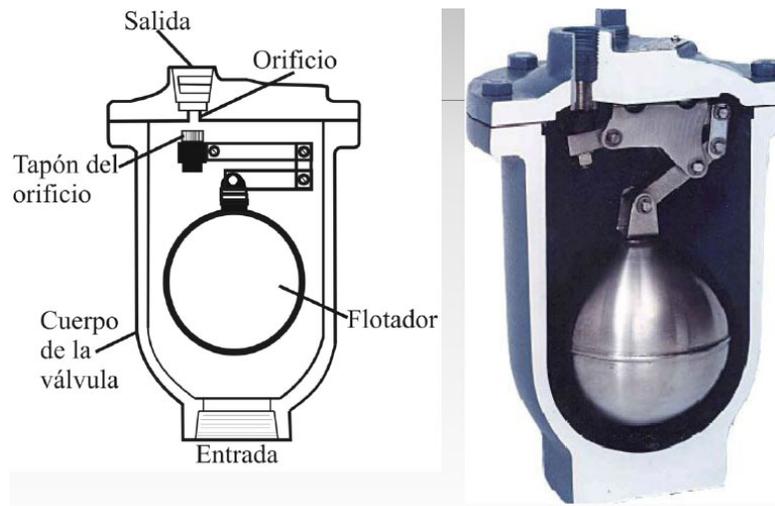


Figura 1.10. Válvula de expulsión de aire (VEA).

### ***Válvulas de aire combinadas (VAC)***

Las válvulas de aire combinadas o de doble orificio cuentan con un orificio grande y uno pequeño, ensamblados en el mismo cuerpo de la válvula. Este tipo de dispositivos son instalados en todos los puntos altos a lo largo del acueducto, donde se requieren válvulas de expulsión para evacuar el aire acumulado, y las válvulas de admisión y expulsión son necesarias para proteger a la tubería de fallas por aplastamiento. Generalmente hay dos tipos de diseños de VAC disponibles en el mercado: VAC de un cuerpo y VAC de doble cuerpo. Las válvulas de un cuerpo tienen las ventajas de ser más compactas y normalmente menos costosas. Las VAC de doble cuerpo tienen la ventaja de que se puede utilizar una variedad de VEA con un amplio intervalo de orificios. Además, durante el mantenimiento, la VAEA se encuentra en operación mientras la VEA puede ser aislada para reparación. Algunos ingenieros prefieren la utilización de VAC en los acueductos, para no dejarlos desprotegidos por errores de instalación en campo o para protección en caso de que el sistema opere incorrectamente. Uno de los tipos de válvulas de aire combinadas se muestra en Figura 1.11.

### ***Diseño convencional de las válvulas de aire***

La mayor parte de las válvulas instaladas en la actualidad fueron diseñadas a principios de 1900, y en general su diseño no ha sufrido cambios significativos. Las válvulas que más problemas presentan son VAEA, que pueden clasificarse, a su vez, como no cinéticas y cinéticas.

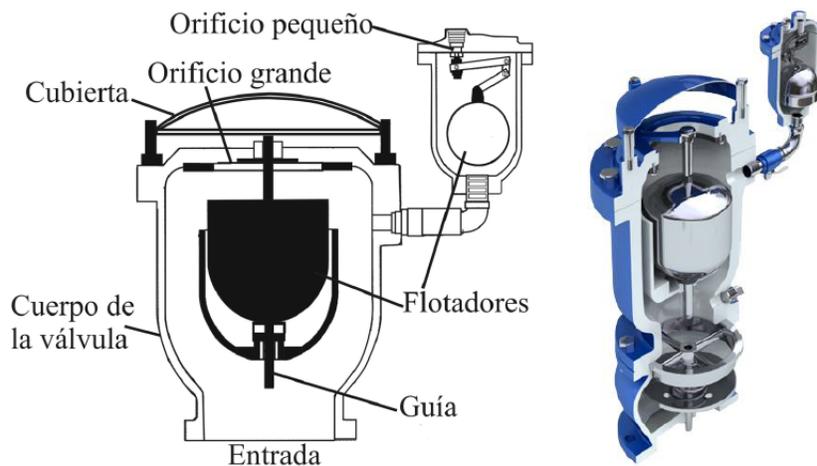


Figura 1.11. Válvula de aire combinada de doble cuerpo (VAC)

### ***Válvulas de aire no cinéticas***

Este tipo de dispositivos se componen de un flotador esférico hueco, que tiende a sellar de forma prematura el orificio de la válvula. Este fenómeno es conocido como cierre dinámico, el cual provoca que grandes cantidades de aire queden atrapadas en los acueductos durante su funcionamiento normal.

A continuación, se presentan las limitaciones de las válvulas de aire no cinéticas enumeradas por Balutto (1996 y 1998). Toda la información presentada por este autor fue recopilada durante años de investigaciones sobre el diseño de válvulas de aire.

Es muy importante considerar la problemática que presentan este tipo de válvulas, debido a que desde hace 100 años se han instalado en una gran cantidad de acueductos alrededor del mundo, provocando daños importantes y mal funcionamiento en ellos.

Las válvulas no cinéticas y cinéticas emplean un flotador esférico para sellar su gran orificio, lo cual genera importantes problemas operativos, que se presentan a continuación:

### ***Sellado deficiente***

El flotador de la válvula debe ser perfectamente esférico con el fin de sellar adecuadamente el orificio. No obstante, en la práctica no es posible la producción en masa de flotadores perfectamente esféricos, por tanto, para compensar la no uniformidad de los flotadores se utilizan sellos de materiales blandos para lograr un sellado adecuado. Sin embargo, esto produce que el flotador se adhiera al sello e impida el correcto funcionamiento de la válvula.

### ***Deformación y atascamiento del flotador***

Por ser huecos, los flotadores esféricos de este tipo de válvulas son susceptibles de sufrir deformaciones permanentes, cada vez que se presentan altas presiones en los acueductos. Un flotador que sella un orificio de 150 mm a una presión diferencial de 25 bar debe resistir una fuerza total de 4.5 toneladas y, en caso de producirse golpe de ariete en el sistema, la fuerza actuante sería todavía mayor.

En la práctica se ha observado que los flotadores se atascan dentro de los grandes orificios de las válvulas, lo que provoca que dichos dispositivos queden fuera de servicio.

### ***Cierre prematuro***

El término cierre prematuro es también conocido como cierre dinámico, y se refiere a la tendencia que tiene el flotador esférico a sellar el orificio de la válvula a diferenciales de presión muy bajos (0.02 a 0.05 bar), lo que provoca que las válvulas no puedan expulsar el aire atrapado y se acumulen grandes volúmenes de aire en los acueductos. El punto del cierre dinámico fue obtenido mediante investigación experimental realizada por el Consejo de Ciencia e Investigación para la Industria (CSIR, siglas en inglés) de Sudáfrica en 1989.

### ***Limitaciones del tamaño del orificio y su efecto en el funcionamiento de la válvula***

El diámetro del flotador no debe ser menor que tres veces el diámetro del gran orificio de la válvula, en caso contrario el flotador corre el riesgo de atascarse en el orificio. Desde el punto de vista económico, el tamaño del gran orificio de las válvulas de aire está restringido; por ejemplo, si se considera una válvula de aire combinada convencional de diámetro nominal de 80 mm (DN80), no cinética, con un gran orificio y flotador con medidas diametrales de 58 mm y 150 mm, respectivamente. En caso de incrementar el orificio de admisión y expulsión de aire a 80 mm, entonces el diámetro del flotador se tendría que incrementar a 240 mm. Es importante resaltar que el peso y tamaño del flotador se incrementa proporcionalmente, lo que genera un aumento del costo de la válvula; en este caso en particular el incremento en peso y tamaño es de 60%.

En el mercado se comercializan válvulas del mismo diámetro nominal, pero con muy diferentes diámetros del gran orificio, lo que afecta directamente a la capacidad de admisión y expulsión de aire. El CSIR probó cuatro válvulas de aire DN80 de gran orificio para verificar el volumen de expulsión de aire para una misma diferencial de presión.

### ***Efecto venturi***

Todas las válvulas de aire con orificios grandes diseñadas con flotadores esféricos huecos tienden a sellar parcialmente el orificio durante la admisión de aire hacia el acueducto. Esto se debe a la existencia de una zona de baja presión en la parte superior del flotador comparada con la que experimenta la línea. Este fenómeno ocurre a diferenciales de presión muy bajos (0.15 a 0.20 bar), lo cual restringe de forma importante el funcionamiento de las válvulas y ha causado el colapso de tuberías.

Muchos técnicos operadores de acueductos conocen el fenómeno e insertan cuñas de madera u otro material para mantener abierto el gran orificio y evitar el efecto venturi. Sin embargo, esta solución no es efectiva para acueductos con tuberías de gran diámetro.

### ***Mantenimiento***

Es muy recomendable realizar un mantenimiento regular de este tipo de válvulas, para evitar los problemas descritos anteriormente.

### ***Válvulas de aire cinéticas***

Las válvulas de aire cinéticas se diseñaron con el propósito de eliminar el fenómeno de cierre dinámico, problema que afecta a las válvulas de aire no cinéticas. Esto se logró al modificar la configuración interna de las válvulas, mejorando así sus características dinámicas para poder prevenir el cierre dinámico. Durante la evacuación del aire a través del orificio de gran diámetro, el flotador esférico hueco es empujado hacia el orificio de entrada de la válvula, lo que evita el cierre dinámico. Esto permite la evacuación del aire de la tubería y, cuando todo el aire es expulsado, el flotador sella el orificio de gran diámetro. La efectividad de las modificaciones internas de este tipo de válvulas difiere entre cada fabricante.

Cuando este tipo de dispositivos expulsan el aire a altas velocidades se pueden generar serios problemas durante la operación de los acueductos, algunos de los cuales son descritos por Balutto (1998):

### ***Golpe de ariete***

Una válvula de aire cinética que descarga aire a altas velocidades e importantes diferenciales de presión, induce un cierre que provoca fuertes presiones transitorias en acueductos. Esto se debe a la entrada abrupta del agua en el cuerpo de la válvula. El efecto producido por este fenómeno en los acueductos es similar al golpe de ariete producido por el cierre rápido de una válvula de compuerta.

La magnitud de las sobrepresiones producidas por el cierre rápido de una válvula de aire cinética depende del tamaño de la válvula, de la longitud del acueducto, del diferencial de presión a través del gran orificio y del módulo de elasticidad del agua, entre otros factores, y se puede calcular utilizando la ecuación de Joukowski (ecuación (2.1)):

$$\Delta h = -\frac{c}{g}\Delta v \quad (1.8)$$

donde

$\Delta h$  diferencia de carga hidráulica

$c$  celeridad

$g$  aceleración de la gravedad

$\Delta v$  diferencia de velocidades

Las investigaciones sobre el tema concluyen que el daño causado por este tipo de válvulas debido a la expulsión de aire a alta velocidad no debe ser ignorado durante el diseño de acueductos. Investigadores y fabricantes recomiendan limitar el diferencial de presión a 0.05 bar, con el propósito de prevenir daños causados por este fenómeno.

### ***Derrame de agua***

Este fenómeno ocurre al fallar el flotador del orificio de gran diámetro, cuando el agua entra a gran velocidad en el cuerpo de la válvula, cubriendo el flotador, empujándolo hacia abajo e impidiendo que selle el orificio. La cantidad de agua que se derrama puede ser importante y generar la inundación de la caja de válvulas. El costo de reparación y del agua desperdiciada puede superar fácilmente el valor de la válvula.

El derrame de agua produce una sobrepresión porque el agua tiene una densidad mucho mayor que el aire, lo cual causa una repentina desaceleración de la columna de agua al alcanzar ésta el orificio de salida, con un efecto similar al causado por el cierre rápido de una válvula localizada en la descarga del acueducto. La magnitud de la presión transitoria puede ser significativa y dependerá de la velocidad a la que entra el agua en el cuerpo de la válvula, así como de la longitud y el diámetro del acueducto.

### ***Falla de las juntas***

Otro fenómeno característico de las válvulas cinéticas es la falla de las juntas entre la válvula de aire y la válvula de seccionamiento, a través de la cual se produce una fuga de agua. Este problema se genera por las importantes presiones transitorias provocadas por el cierre abrupto de la válvula de gran orificio.

Una serie de pruebas indicó que este fenómeno ocurre en un intervalo de sobrepresiones de 80 a 85 bar, lo que implica que los transitorios producidos por las válvulas cinéticas al descargar a altos diferenciales de presión podrían exceder los 85 bar. Estos resultados fueron corroborados por el CSIR de Sudáfrica.

### ***Limitaciones del gran orificio***

Muchos diseños de válvulas de aire cinéticas son simples modificaciones de válvulas no cinéticas, se utilizan también flotadores esféricos huecos para cerrar el orificio de gran diámetro. Por tanto, las consideraciones económicas y de diseño tienen las mismas limitaciones que las válvulas no cinéticas.

### ***Subdimensionamiento***

Las válvulas de aire cinéticas son más susceptibles de ser subdimensionadas que cualquier otro tipo de válvulas de aire. Esto se debe a que los ingenieros se enfocan principalmente en los requerimientos de descarga, y seleccionan válvulas para expulsar aire a altos diferenciales de presión y, por otra parte, dan menos importancia a los problemas que se puedan producir por las presiones de vacío.

En muchas ocasiones la selección de las válvulas de aire se basa totalmente en la capacidad de la válvula de expulsar el aire, lo cual puede ser perjudicial para el acueducto cuando se presentan presiones de vacío. Esta situación puede ser más crítica para acueductos compuestos por tubos plásticos y para las juntas de las tuberías, debido a que estos dos elementos no pueden soportar importantes diferenciales de presión negativos.

El efecto Venturi descrito para las válvulas de aire no cinéticas es aplicable también a las válvulas cinéticas.

## 2. MEDICIÓN DEL CONTENIDO AGUA-AIRE EN UN SALTO HIDRÁULICO

Cuando en el flujo, de un sistema de abastecimiento de agua potable, ingresa un cierto volumen de aire, se convierte en un flujo bifásico liquido-gas, lo que provoca la modificación de sus propiedades como densidad y compresibilidad, debido a esto, resulta de interés el estudio del flujo agua-aire.

A lo largo de los acueductos a presión se pueden presentar puntos en donde se acumulan volúmenes de aire y el flujo funcionará a superficie libre en el interior del conducto. En función de la pendiente de la tubería se puede presentar un salto hidráulico al final del volumen o bolsa de aire, en donde, debido a la turbulencia se rompe la superficie libre y se permite la entrada de aire en el cuerpo de agua, formando un flujo bifásico (Carvalho, 2002).

La concentración de aire es un parámetro vital para caracterizar la presencia de aire en el flujo. La concentración de aire se define como el volumen de aire dentro del volumen de la mezcla de agua y aire. La concentración de aire ( $C_{aire}$ ) se puede representar como:

$$C_{aire} = \frac{V_a}{V_a + V_w} \quad (2.1)$$

donde

$V_a$  es el volumen de aire,

$V_w$  es el volumen de agua.

Cain (1978) y Chanson (1988) definen la superficie libre del agua donde  $C_{aire} = 0.9$ . Este valor está vinculado a la alta homogeneidad de la mezcla agua-aire para valores inferiores a  $C_{aire} = 0.9$ . Por encima del 90%, la velocidad del aire ya no es igual a la velocidad del agua y la medición de la concentración de aire se vuelve inexacta.

### 2.1 Resalto hidráulico

El resalto o salto hidráulico (Figura 2.1) se caracteriza por ser un flujo altamente turbulento con una capa límite de agua-aire y un área de recirculación. Se desarrollan macro vórtices en el interior que interactúan con la superficie libre produciéndose salpicaduras y formación de gotas de agua en la región del flujo bifásico.

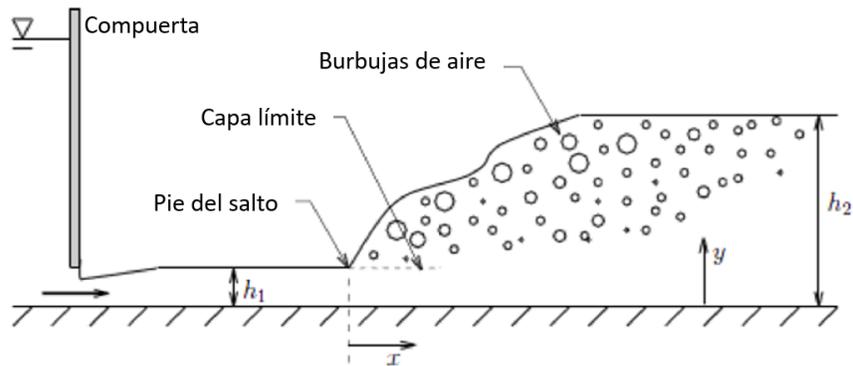


Figura 2.1. Esquema de un salto hidráulico

El parámetro principal que caracteriza el resalto hidráulico es el número de Froude, que se define como:

$$Fr = \frac{U_1}{\sqrt{gd_1}} \quad (2.2)$$

donde

$U_1$  es la velocidad de entrada (m/s),

$d_1$  es la profundidad del agua de entrada (m) y

$g$  es la aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).

El número de Froude es siempre mayor que 1.0 en los resaltos hidráulicos. Existen diferentes tipos de resaltos hidráulicos dependiendo de este número adimensional:

- Para  $Fr = 1$  a  $1.7$ , la superficie del agua muestra ondulaciones y se presenta el resalto ondulante.

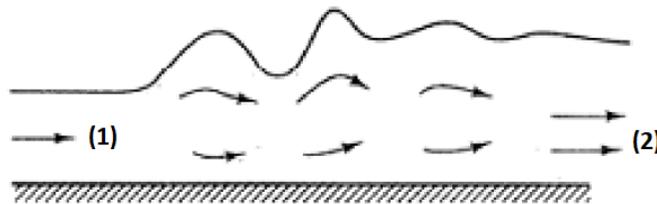


Figura 2.2. Resalto ondulante.

- Para  $Fr = 1.7$  a  $2.5$ , se desarrollan una serie de remolinos sobre la superficie del resalto, pero la superficie del agua aguas abajo permanece uniforme. La velocidad a través de la sección es razonablemente uniforme y la pérdida de energía es baja. Se presenta entonces el resalto *débil*.



Figura 2.3. Resalto débil.

Para  $Fr = 2.5$  a  $4.5$ , existe un chorro oscilante que entra desde el fondo del resalto hasta la superficie y se devuelve sin ninguna periodicidad. Cada oscilación produce una onda grande con periodo irregular, muy común en canales, que puede viajar a lo largo de varias millas causando daños ilimitados a bordos en tierra y a enrocados de protección. Se produce entonces el resalto *oscilante*.



Figura 2.4. Resalto oscilante.

Para  $Fr = 4.5$  a  $9$ , la extremidad de aguas abajo del remolino superficial y el punto sobre el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo ocurren prácticamente en la misma sección vertical. La acción y la posición de este resalto son menos sensibles a la variación en la profundidad de aguas abajo. El resalto se encuentra bien balanceado y su comportamiento es el mejor. La disipación de energía varía de  $45\%$  a  $70\%$ . Se presenta entonces el resalto *permanente o estable*.



Figura 2.5. Resalto permanente o estable.

Para  $Fr = 9$  y mayores, el chorro de alta velocidad choca con paquetes de agua intermitentes que corren hacia abajo a lo largo de la cara frontal del resalto, generando ondas hacia aguas abajo, y puede prevalecer una superficie rugosa. La acción del resalto es brusca pero efectiva debido a que la disipación de energía puede alcanzar un  $85\%$ . Se produce entonces el resalto *fuerte*.

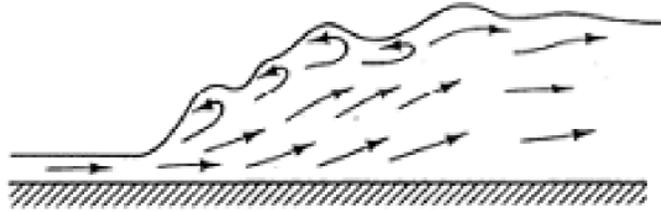


Figura 2.6. Resalto fuerte.

El estudio de Gualtieri y Chanson (2007) mostró que las propiedades del flujo de aire-agua eran similares, tanto en el flujo estable como en el resalto fuerte.

En un canal rectangular horizontal, despreciando el límite de rozamiento, la ecuación de la continuidad conduce a la ecuación de Bélanger:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8Fr^2} - 1) \quad (2.3)$$

donde

$d_1$  es la profundidad del agua de entrada (m) en el punto de choque y

$d_2$  es la profundidad del flujo aguas abajo (m) lejos del punto de choque.

El resalto hidráulico se utiliza principalmente como disipador de energía. Cuanto más fuerte es el resalto, mayor disipación de energía se produce. La pérdida de carga adimensional está dada por:

$$\frac{\Delta H}{d_1} = \frac{(\sqrt{1 + 8Fr^2} - 3)^3}{16(\sqrt{1 + 8Fr^2} - 1)} \quad (2.4)$$

Para un resalto hidráulico estable, la disipación de energía está comprendida entre un 45% y un 70%. Alcanza más de un 85% para resaltos altamente turbulentos. Aunque los resaltos hidráulicos disipan una gran parte de la energía del flujo de entrada, los altos niveles de turbulencia en estos flujos tienden a aumentar la socavación y la erosión en los pilares de los puentes o en los ríos.

Para realizar el modelado físico y análisis de semejanza, se utiliza a menudo el número de Reynolds,  $Re$  así como para caracterizar el flujo:

$$Re = \frac{U_1 d_1}{\nu} \quad (2.5)$$

donde

$Re$  es el Numero de Reynolds, y

$\nu$  es la viscosidad cinemática.

## 2.2 Dispositivos para la medición de la concentración de agua-aire

Desde la segunda mitad del siglo pasado se han llevado a cabo numerosos estudios experimentales para obtener el contenido de agua-aire en saltos hidráulicos. Se han utilizado diversas técnicas para hacer las mediciones y el procesamiento de datos. A pesar de la extensa literatura disponible acerca de los aspectos del salto hidráulico, muchas características de su flujo interno permanecen sin respuesta.

La concentración de agua-aire se define como el cociente de volumen de aire entre el volumen de agua en un cierto punto (volumen pequeño) del flujo agua aire (Figura 2.7).

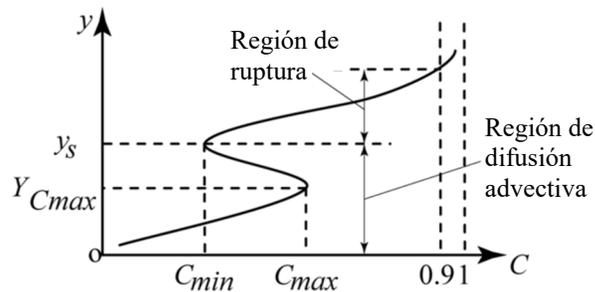


Figura 2.7. Comportamiento de la concentración agua-aire en un salto hidráulico, Takahashi y Ohtsu (2009).

El primer intento de medir la concentración de aire en un fluido fue realizado por Viparelli (1953) utilizando un tubo de Pitot modificado. Desafortunadamente, este método solo muestra buenos resultados en una zona con valores bajos de concentración de aire. Matos (2000) utilizó un tubo de Pitot modificado para caracterizar los aliviaderos escalonados y Carvalho (2002) lo utilizó para medir la concentración de aire en el salto hidráulico. Sin embargo, este método necesita conocer de antemano la dirección del flujo que, en saltos hidráulicos fuertes, no siempre es posible.

Otra metodología para medir el flujo agua-aire es la anemometría de hilo caliente. Tiene la ventaja de ser apenas un dispositivo intrusivo. Resch y Leutheusser (1972) midieron la velocidad instantánea en el salto hidráulico. Sin embargo, existen algunas dificultades en la interpretación de la señal y la calibración del equipo (Nagash, 1994). Resch et al. (1974) también

utilizaron anemometría de película caliente acoplada con sondas cónicas para obtener la relación de vacíos y el tamaño de las burbujas en el salto hidráulico.

La técnica tradicional de velocimetría de imágenes de partículas (PIV) falla debido al reflejo en las burbujas de la luz láser. Para superar la dificultad, Ryu et al. (2005) propuso la técnica Bubble Image Velocimetry (BIV) que utiliza las partículas de burbujas como rastreadores. La velocidad de la burbuja se mide correlacionando la textura de las imágenes de la burbuja. Esta técnica se aplicó en la medición de los campos de velocidad media de una ola rompiente que se hunde y que incide en la estructura.

Leandro et al. (2012), siguió el trabajo de Mossa y Tolve (1998), proponiendo un Procedimiento de Procesamiento de Imágenes (IPP) mejorado para medir las fracciones vacías instantáneas y promediadas en el salto hidráulico mediante el análisis de la intensidad de píxeles en las imágenes. Esta técnica puede proporcionar mediciones en diferentes posiciones simultáneamente, sin ninguna interferencia en las condiciones de flujo. Los resultados se compararon con las mediciones de la sonda de conductividad de doble punta. Al igual que BIV, este enfoque no puede medir el componente a lo largo del eje perpendicular a la imagen de la cámara, por lo que la aplicación en flujos en 3D no es posible, ya que la imagen capturada representa solo un plano 2D.

La forma más común de medir la concentración de aire en los flujos es utilizando sondas intrusivas. Se realizaron varios estudios con fibras resistivas o ópticas y sondas de punta simple o doble. El principio detrás de las sondas de fibra óptica es el cambio en el índice óptico entre las dos fases, mientras que en las sondas resistivas es la diferencia entre la resistividad eléctrica en el agua y el aire. La diferencia entre las sondas de punta única y de punta doble es que esta última además de permitir la medición de la relación de vacíos, también mide la velocidad de las burbujas al correlacionar los períodos de tiempo en los que la sonda está en agua o en aire.

Rajaratnam (1962) utilizó sondas resistivas para medir la concentración de aire en un salto hidráulico. Volkart (1980a) utilizó una sonda resistiva para medir la concentración de aire en una sección transversal de una tubería parcialmente llena con altas pendientes longitudinales, mientras que Afshar et al. (1994) realizaron mediciones en la zona aireada de un aliviadero escalonado con diferentes pendientes.

Chanson (2002) y Chanson (2007) utilizaron sondas de punta simple y doble para estudiar la estructura del aire en el salto hidráulico. Murzyn y Chanson (2008) realizaron un estudio similar utilizando sondas de doble punta de fibra óptica que compararon sus resultados con los de Chanson y Brattberg (2000). La principal desventaja de las sondas estándar es que la dirección preferencial del flujo debe conocerse a priori. Para superar esta dificultad, Borges et al. (2010)

desarrollaron un nuevo concepto de sondas de conductividad que combinan circuito de presión de tres orificios y retrolavado. La sonda se puede configurar de dos maneras: (1) alineada con el flujo de modo que la presión en dos orificios de presión colocados simétricamente sea igual; o (2) colocado sobre el flujo y los diferentes valores de presión de los tres orificios, define el ángulo entre la sonda y la dirección del flujo.

En la tabla 2.1 se muestran los principales estudios experimentales que se han realizado sobre resaltos hidráulicos. Aunque se han producido algunos avances, las aproximaciones numéricas y analíticas no son aún lo suficientemente precisas como para dar soluciones exactas. La complejidad del flujo y la enorme cantidad de ecuaciones a resolver, hacen que sea demasiado difícil la resolución de dichos cálculos.

Tabla 2.1. Estudios experimentales en resaltos hidráulicos.

Referencias	Fr	Re	Técnicas de medición	Comentarios
Rajaratnam 1962	2.68 – 8.72	34,000 – 110,500	Sondas de conductividad	
Rajaratnam 1965	2.68 – 9.78	52,500 – 128,000	Tubo estático de Pitot	3 mm diámetro externo, cabeza hemisférica.
Resch y Leutheusser 1972	2.98 – 8.04	33,360 – 71,760	Sonda cónica de hilo caliente	Tamaño de sensor 0.6 mm. Condiciones del flujo de entrada parcial y completamente desarrollado.
Babb y Aus 1981	6.0	122,850	Sonda cónica de hilo caliente	Tamaño de sensor 0.4 mm. Condiciones del flujo de entrada parcialmente desarrollado.
Chanson 1995	5.1 – 8.6	39,500 – 63,800	Tubo Pitot + Sonda de conductividad de una o dos puntas	Tubo Pitot: 3.3 mm diámetro externo. Sonda de conductividad de una punta (0.35 mm electrodo interior) Condiciones del flujo de entrada

Referencias	Fr	Re	Técnicas de medición	Comentarios
				parcialmente desarrollado.
Mossa y Tolve 1998	6.42 – 7.3	57,300 – 58,000	Cámara de vídeo CCD	CCD 200,000 píxeles. Condiciones del flujo de entrada parcialmente desarrollado.
Chanson y Brattberg 2000	6.33 – 8.48	36,120 – 48,580	Tubo Pitot + Sonda de conductividad de doble punta	Doble punta: 25 µm electrodo interior. Condiciones del flujo de entrada parcialmente desarrollado.
Waniewski et al 2001	11.5 – 19.3	10,940 - 16,680	Anemómetro de fase Doppler	Resolución: 1 µm.
Liu et al 2004	2.00 – 3.32	86,100 – 147,680	Velocímetro acústico Doppler	1mm diámetro, punta cónica de zafiro.
Murzyn et al 2005, 2007	2.00 – 4.8	45,990 - 88,500	Sondas de fibra óptica (una y dos puntas). Medidores de alambre	Tamaño de sensor 0,01 mm, 1mm separación entre puntas. Frecuencia de muestreo hasta 1 MHz. Dos finos alambres separados 1 mm. Condiciones del flujo de entrada parcialmente desarrollado.
Lennon y Hill 2006	1.4 – 3.0	23,930 - 27,940	Cámara de Velocimetría por Imágenes de Partículas	
Chanson 2006	5.0 – 8.1	31,500 – 51,000	Sondas de conductividad de una sola punta. Tubo Pitot (3,3	Electrodo interior: 0.35 mm de diámetro. Condiciones del flujo de entrada parcialmente desarrollado.

Referencias	Fr	Re	Técnicas de medición	Comentarios
			mm diámetro externo)	
Chanson 2007	4.60 – 8.60	25,000 – 98,000	Sondas de conductividad de una sola punta	Electrodo interior: 0.35 mm de diámetro. Condiciones del flujo de entrada parcialmente desarrollado.
Gualtieri y Chanson 2008	5.2 – 14.3	24,680 - 58,000	Sondas de conductividad de una sola punta	Electrodo interior: 0.35 mm de diámetro. Condiciones del flujo de entrada parcialmente desarrollado.
Murzyn y Chanson 2007, 2008	5.1 – 8.3	38,550 – 64,100	Sondas de conductividad de doble punta	Electrodo interior: 0.25 mm, 7 mm separación entre puntas. Condiciones del flujo de entrada parcialmente desarrollado.
Leandro et al (2012)	4.4 – 5.1	110,000 – 120,000	Sondas de conductividad de doble punta, cámara fotográfica.	Cámara 58 mm, ISO-800. f/1.4, 3072x2048 pixeles. Condiciones del flujo de entrada parcialmente desarrollado.

## 2.3 Método intrusivo con sonda de conductividad

### 2.3.1 Sonda de conductividad con una punta

El principio de las mediciones con una sonda de conductividad se basa en la diferencia entre la resistividad eléctrica entre el agua y el aire. La resistencia del agua es 1000 veces menor que las burbujas de aire. Se ha demostrado que una sonda de conductividad proporciona información

exacta respecto a fluctuaciones en un vacío local con una señal de respuesta indicando la presencia, ya sea, de agua o de aire, Herringe (1973). La concentración local de aire es la proporción entre el tiempo total de medición con respecto al tiempo que la punta de la sonda está en contacto con el aire.

Cuando la parte sensible de la sonda está en el agua, la corriente fluye entre la punta y el metal de soporte y se obtiene un valor de voltaje de salida. Se hace prácticamente nulo cuando la sonda está en aire. Debido a que el voltaje de salida está sujeto a algunas fluctuaciones causadas por el polvo que fluye en el agua, se utiliza una técnica de umbral sobre la señal de salida para definir los desfases correspondientes al aire y al agua.

En la Figura 2.8 se muestra un esquema de este tipo de sonda de una punta. Resultado de las mediciones con una sonda de doble punta se puede observar en la Figura 2.9.

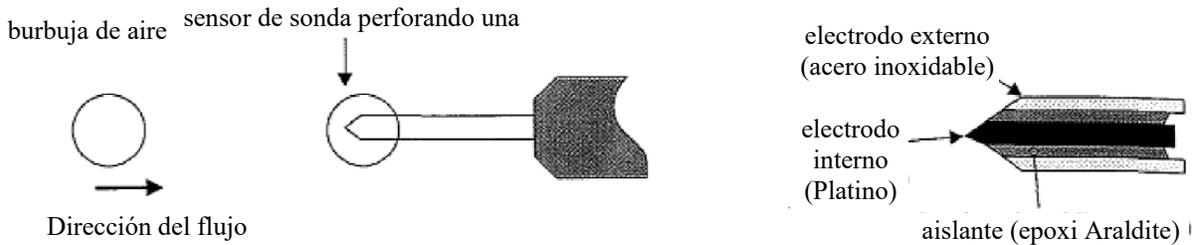


Figura 2.8. Esquema de una sonda de conductividad de una punta

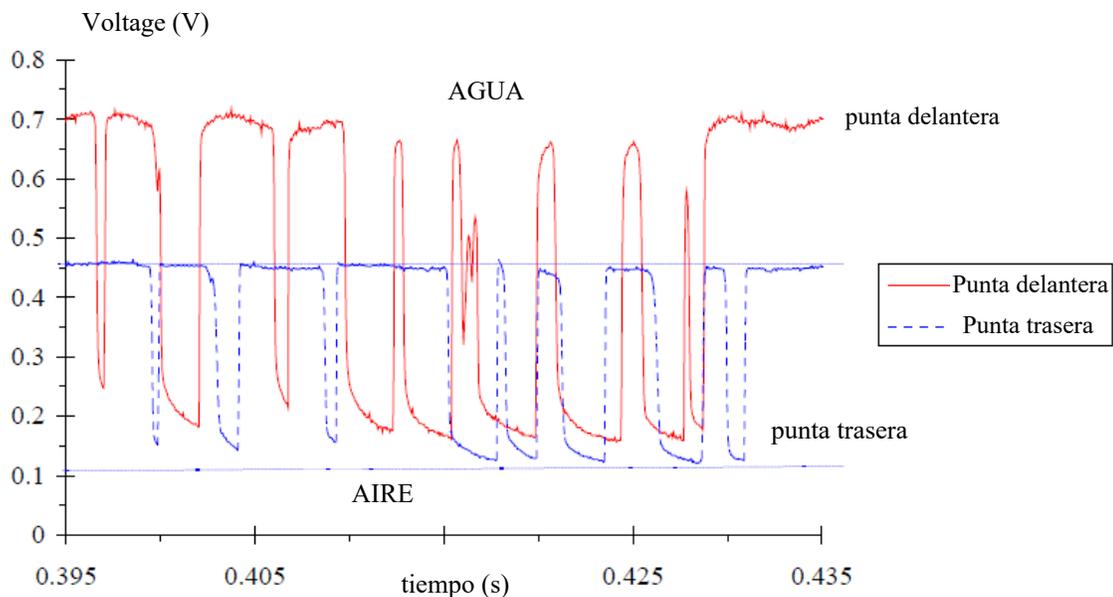


Figura 2.9. Datos obtenidos con sonda de conductividad de doble punta (velocidad: 20 kHz), Chanson (2002).

El análisis de los datos del voltaje de salida proporciona información básica del flujo burbujeante como la concentración de aire ( $C$ ), la frecuencia de paso ( $F$ ) y el tamaño de burbuja ( $d_{mbcl}$ ).

La principal ventaja de estos sensores intrusivos es su tamaño (0.35 mm o 0.25 mm). Por tanto, son bastante precisos para detectar burbujas muy pequeñas (menores al tamaño del sensor). Su tiempo de respuesta dinámica es alta (menos de 10  $\mu$ s), por lo que son precisos y adecuados para mediciones en flujos altamente turbulentos y fluctuantes como los resaltos hidráulicos.

Chanson (2007) fue el primero en describir los procesos de mezcla de aire-agua proporcionando información pertinente sobre la concentración de aire, frecuencia de paso, tamaño y velocidad de las burbujas aguas abajo del punto de choque. Sus conclusiones principales fueron:

La concentración de aire ( $C$ ): es la proporción de tiempo que la punta de la sonda se encuentra en el aire. En la capa límite turbulenta,  $C$  cumple con una ecuación de difusión. Por tanto, los perfiles verticales de  $C$  siguen una distribución gaussiana dada por:

$$C = C_{max} \exp \left( - \frac{\left( \frac{y - y_{C_{max}}}{d_1} \right)^2}{4D * \left( \frac{x - x_1}{d_1} \right)} \right) \quad (2.6)$$

donde

$D$  es la difusividad adimensional

$y_{C_{max}}$  es la distancia desde el fondo en la que  $C=C_{max}$

$d_1$  es la profundidad de entrada

La Frecuencia de Paso ( $F$ ): es el número de burbujas que impactan la punta de la sonda por segundo. En la región burbujeante del flujo, los perfiles verticales de  $F$  muestran dos picos particulares (Figura 2.10). El pico principal se encuentra en la capa límite turbulenta, mientras que el pico más pequeño se encuentra principalmente en la capa de mezcla.

Las posiciones verticales de la máxima concentración de aire ( $y_{C_{max}}/d_1$ ) y de la Frecuencia de Paso ( $y_{F_{max}}/d_1$ ): no coinciden dándose dos procesos de difusión diferentes.

La importancia de los efectos de escala: la semejanza dinámica (similitud de Froude) es importante y algunos efectos de escala pueden aparecer para números de Reynolds elevados ( $Re > 10^5$ ).

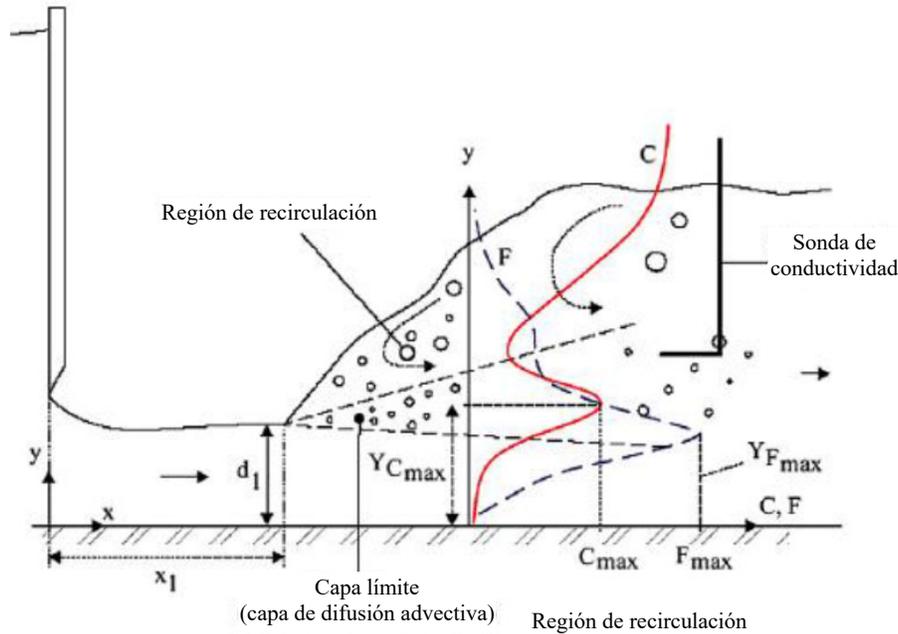


Figura 2.10. Perfiles verticales de C y F dentro del resalto hidráulico

Cuando se utiliza una sonda de conductividad de doble punta, se puede obtener información adicional como la velocidad de la burbuja ( $U$ ), niveles de turbulencia ( $Tu$ ), que corresponden a las fluctuaciones de velocidad en la interfase agua-aire, y escalas de tiempo ( $Txx$ ) y de longitud ( $Lxx, Lxz$ ) de turbulencia que representan las estructuras turbulentas del flujo.

Las escalas de tiempo y de longitud de turbulencia traen nueva información de los mecanismos físicos que se producen en dichos flujos, que pueden ser útiles para ajustar los modelos numéricos (tamaño de malla, resoluciones espaciales y temporales).

### 2.3.2 Sonda de conductividad de doble punta

La sonda de conductividad de doble punta consiste en dos puntas en el extremo de la sonda, siendo una punta más corta que la anterior por un ligero desplazamiento longitudinal ( $\Delta x \approx 7.5$  mm). Ambas puntas se alinean y se separan transversalmente a 1.33 mm una de la otra. Los efectos del sensor de la sonda en las propiedades del flujo burbujeante se asumen como insignificantes debido a que el tamaño de la punta es muy pequeño y al flujo de alta velocidad. Esta suposición es discutible, pero los resultados experimentales de Chanson (1995c), Cummings (1996) y Toombes (2002) tienden a apoyar esto. Las salidas de señal de ambas puntas se registran simultáneamente. Se espera que una burbuja que golpea la punta delantera pueda golpear la punta trasera, lo que resulta en dos señales similares con un retraso de tiempo.

Se muestra un ejemplo en la figura 2.11, donde ambas puntas detectaron estructuras idénticas de aire o agua, pero algunas estructuras aire-agua se detectaron solo con una punta. Ambas señales se utilizan para calcular las propiedades del flujo aire-agua como la concentración de aire promediada en el tiempo, la velocidad del flujo aire-agua, la frecuencia de las burbujas, la longitud de la cuerda de burbujas y la intensidad de la turbulencia del flujo aire-agua.

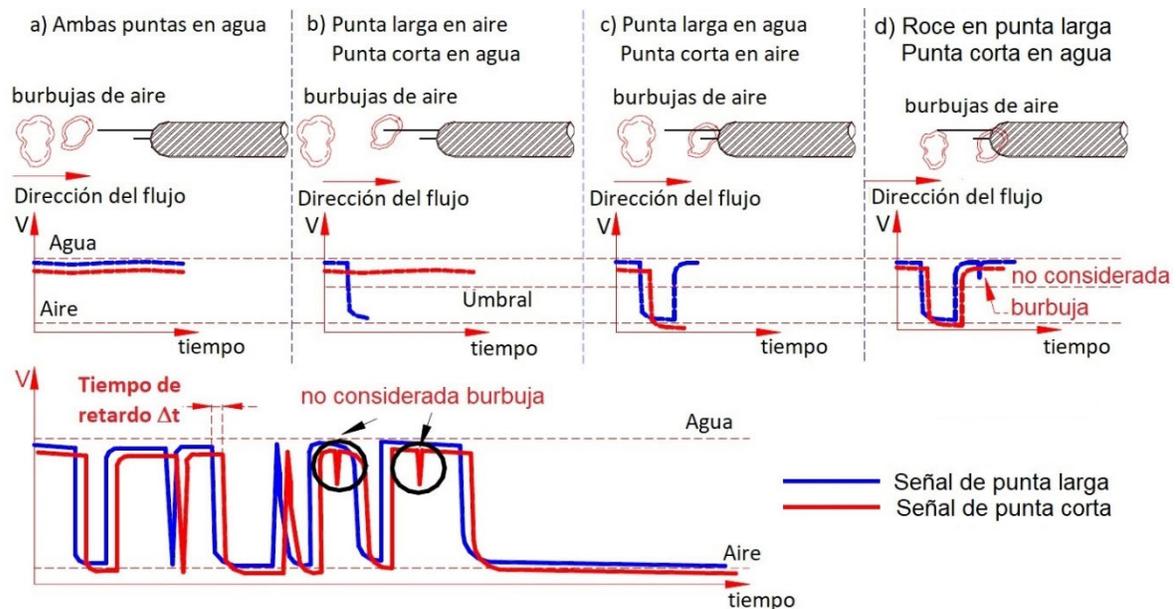


Figura 2.11. Señal de conductividad típica de la sonda de doble punta.

## 2.4 Método no intrusivo usando una cámara de alta velocidad

El procesamiento de imágenes tiene como objetivo determinar series de tiempo de concentración de aire y valores de tiempo-promedio en el resalto hidráulico. La hipótesis consiste en que la concentración de aire puede ser estimada basándose en la intensidad de píxeles de las imágenes.

A continuación, se describe el procedimiento utilizado por Leandro et al. (2012) para medir la concentración de agua-aire en un salto hidráulico aguas abajo de una compuerta en un canal de sección rectangular.

El procedimiento de procesamiento de imágenes consiste en dos algoritmos:

- Edición de imagen (IE), y
- Algoritmo de Matriz de Intensidad de Pixel.

Ambos algoritmos y subfunciones son ejecutados para todas las imágenes.

El primer algoritmo es el de mayor importancia porque permite la calibración del procedimiento de procesamiento de imágenes usando los datos obtenidos con la sonda de conductividad de doble punta. Actualmente, cualquier técnica que utilice imágenes como entrada debe recurrir a un algoritmo de calibración para explicar las sutilezas de una exposición particular a la luz del lugar, que puede variar con la ubicación del sitio de prueba y la instalación. El segundo algoritmo calcula el promedio de la matriz de intensidad de pixel necesario para obtener el perfil vertical de tiempo-promedio de concentración de aire.

#### **2.4.1 Algoritmo de edición de imágenes (IE)**

La lógica difusa ha sido ampliamente aplicada en el procesamiento de imágenes desde que fue introducida en 1965 por L. Zadeh. Su rango de aplicación abarca desde la mejora del contraste de imagen general (Vorobel y Berehulyak 2006) hasta la mejora de color específica (Sarode et al. 2008). Pruebas anteriores usando el algoritmo de matriz de intensidad de pixeles en experimentos han mostrado que no se podían explicar por sí mismos los perfiles de concentración de aire registrados con la sonda de conductividad de doble punta. Por lo tanto, fue propuesto un algoritmo para mejorar el contraste de las imágenes antes de la calibración y validación. El algoritmo de edición de imágenes se basa en los conceptos encontrados sobre sistemas de inferencia difusos tales como agrupación de funciones, umbralización y reglas *if-then* como las definidas por Bezdek et al. (1999). Estas funciones mejoran el contraste de la imagen asignando un valor transformado en cada pixel dado  $(i, j)$ .

En el experimento realizado por Leandro et al. (2012) se colocaron telas negras atrás de la pared posterior del canal, generando imágenes que muestran dos áreas distintas divididas por la superficie del agua. El área por encima de la superficie del agua donde los pixeles negros representan puntos con 100% de concentración de aire y el área por debajo de la superficie del agua donde pixeles grises representan puntos con concentración de aire menor al 100%. Debido a la naturaleza inestable de la superficie del agua, no es posible definir un límite claro entre estas dos áreas. Además, dado que un pixel negro tiene una intensidad de pixel  $p_i=0$  y un pixel blanco  $p_i=255$ , el algoritmo de edición de imágenes tiene que distinguir entre el pixel negro sobre la superficie del agua (100% aire) y el pixel negro por debajo de la superficie del agua (0% aire).

Cada imagen se define por una matriz bidimensional de intensidad de pixeles,  $PI_{ij}$ , con valores de rango desde 0 a 255, dimensiones  $(m, n)$ , y filas y columnas definidas mediante índices  $i$  y  $j$ , respectivamente.

El algoritmo de edición de imágenes (IE) trabaja corriendo todos los valores almacenados dentro de cada imagen, esto es, la matriz  $PI_{ij}$  es convertida en una nueva imagen  $PI'_{ij}$ , que es la matriz transformada. La ecuación (2.7) define el algoritmo IE.

La ecuación (2.7) es la función principal utilizada para editar el área de arriba de la imagen (ecuación superior) y debajo de la superficie del agua (ecuación inferior), así como el área de transición (ecuación media). En la ecuación (2.7)  $PI_{ij}^n$  es la  $n$ -ésima edición de  $PI_{ij}$  e  $I_{Tn}$  es la  $n$ -ésima función de umbral utilizada para la edición de calibración.

$$PI_{ij}^f = \begin{cases} \underbrace{I_{T3}(PI_{i,j}) \times (PI_{i,j}^3)}_{\text{Transición lineal } (PI_{i,j} - PI_{i,j}^1) \text{ para } (i < \text{lim}S)} + \underbrace{I_{T2}(PI_{i,j}) \times (PI_{i,j}^2)}_{\text{Aclarar } (PI_{i,j})}, & i < \text{lim}S \\ \underbrace{I_{T3}(PI_{i,j}) \times I_{T1}(PI_{i,j}) \times PI_{i,j}^1}_{\text{Oscurecer } (PI_{i,j})} + \underbrace{I_{T1}(PI_{i,j}) \times I_{T2}(PI_{i,j}) \times PI_{i,j}^4}_{\text{Transición lineal } (PI'_{ij} - PI_{ij}^2)}, & \text{lim}S \leq i < \text{lim}St \\ \underbrace{I_{T1}(PI_{i,j}) \times (PI_{i,j}^1)}_{\text{Oscurecer } (PI_{i,j})}, & i \geq \text{lim}St \end{cases} \quad (2.7)$$

Dado que el algoritmo IE distingue 3 diferentes áreas, se construye una regla *if-then* imponiendo una superficie de agua inferior ( $\text{lim}St$ ) y límite superior ( $\text{lim}S$ ). Con estos dos límites las tres áreas pueden ser claramente identificadas como: (1) el área por debajo de la superficie del agua identificada por  $i \geq \text{lim}St$ , (2) el área por arriba de la superficie del agua identificada por  $i < \text{lim}S$ , y (3) el área de transición identificada por  $\text{lim}S < i < \text{lim}St$ . La definición del área de transición es justificada por la compleja naturaleza de la interface agua-aire del salto hidráulico discutido por Mouaze et al. (2005), haciendo imposible una definición clara de los límites de la superficie del agua (Misra et al. 2006, Murzyn y Chanson 2009).

Para mayor claridad, se introduce primero la subfunción que se ocupa del área por debajo de la superficie del agua (IE-paso1), seguida de la subfunción definida por el área arriba de la superficie del agua (IE-paso 2) y se concluye con la subfunción del área de transición (IE-paso

3). La Figura 2.12 ilustra los 3 pasos en el algoritmo IE correspondiente a las 3 subfunciones de la ecuación (2.7).

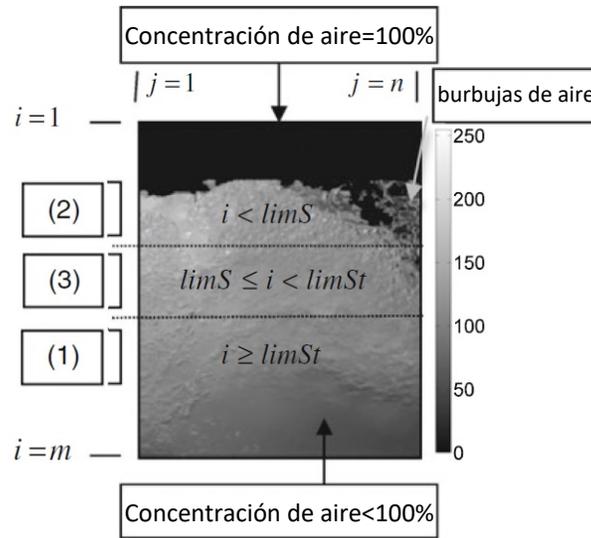


Figura 2.12. Definición de las áreas de escala de grises en las imágenes, propuesta por Leandro et al. (2012)

### Edición de imagen paso 1

En la Figura 2.12 las áreas grises oscuras por debajo de la superficie del agua deben tener una concentración de aire cercana a 0, mientras las áreas claras deben tener valores más grandes que 0. El objetivo principal de la subfunción definida por el área debajo de la superficie del agua es que oscurezca las áreas con intensidad de píxeles bajos mientras mantiene las áreas claras, con intensidad de píxel más alto, inalteradas. Esto se puede lograr con el uso de la función de lógica difusa  $S$  (Vorobel y Berehulyak 2006). La ecuación (2.8) define la función asociada  $Smf$ .

$$Smf(x, [a, b]) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ 2 \left( \frac{x-a}{b-a} \right)^2, & a < x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1 - 2 \left( \frac{x-b}{b-a} \right)^2, & \frac{a+b}{2} < x \leq b \\ 1, & x > b \end{cases} \quad (2.8)$$

En la literatura  $(a+b)/2$  es llamado el punto de cruce, esto quiere decir, que los valores de  $x$  superiores a este punto tienen una pertenencia mayor que 0.5 y los valores inferiores tienen una pertenencia menor que 0.5. En la ecuación (2.8)  $x = PI_{ij}$  y el punto de cruce es igual al punto medio de la escala de grises. Por lo tanto, los puntos mínimo y máximo se hacen iguales a  $a =$

0 y  $b = 255$  respectivamente. La función de  $Smf$  varía entre 0 y 1, por eso, para obtener la primera imagen editada  $PI_{i,j}^1$  se necesita multiplicar la  $Smf$  por la imagen original. Esto produce:

$$PI_{i,j}^1 = (PI_{i,j}) (Smf(PI_{i,j}, [0,255])) \quad (2.9)$$

Como el paso 1 especifica los límites de la función  $Smf$ , se aplica una segmentación mediante la función de umbral a la imagen resultante  $PI_{i,j}^1$  con el fin de proporcionar un parámetro de calibración para el algoritmo de edición de imagen. La ecuación (2.10) define la función de umbralización:

$$I_{T1}(x) = \begin{cases} 1, & x \geq Ptr \\ 0, & x < Ptr \end{cases} \quad (2.10)$$

donde  $Ptr$  representa el primer valor de umbral. La ecuación (2.11) define la subfunción final utilizada para el área debajo de la superficie del agua.

$$PI_{i,j}^f = I_{T1}(PI_{i,j})(PI_{i,j}^1) \quad (2.11)$$

## Edición de imagen paso 2

El área sobre el nivel del agua (Figura 2.12) muestra un área negra con una concentración de aire del 100%, así como burbujas de aire adheridas a la pared de vidrio con una intensidad de pixel muy bajo (cerca de 0). Teniendo en cuenta la hipótesis planteada anteriormente, el algoritmo de edición de imagen primero necesita alterar el área negra superior para completar el blanco y segundo para eliminar las burbujas de aire (más oscuras) que permanecen unidas a la pared para evitar una subestimación de la concentración de aire. Esto se hace con una función lineal de lógica difusa en la que los límites se han adaptado para facilitar la implementación. La ecuación (2.12) define la función de pertenencia  $lmf$ :

$$lmf(x, [a, b, y_1, y_2]) \begin{cases} y_2, & x \leq a \\ \frac{y_2 - y_1}{a - b} x + \frac{y_1 a - y_2 b}{a - b}, & a \leq x \leq b \\ y_1, & x \geq b \end{cases} \quad (2.12)$$

donde estos límites cambian para variar linealmente entre  $y_1$  e  $y_2$ , en lugar de tener valores de pertenencia limitados entre 0 y 1. Aquí,  $y_2$  se establece en el límite máximo de escala de grises 255 (blanco completo) e  $y_1$  se establece en 180.  $y_1$  se define con un valor fijo siempre mayor que la intensidad de pixel de burbujas de aire más oscuras. (Un segundo parámetro de calibración de edición de imagen se define más adelante con la introducción de dos funciones

más de segmentación por umbral). Por lo tanto, la imagen transformada se puede obtener directamente con la ecuación (2.13):

$$PI_{i,j}^2 = lmf(PI_{i,j}, [Ptr, 180, 180, 255]) \quad (2.13)$$

Para mantener una transición suave entre la imagen original y la imagen transformada obtenida en el paso 1  $PI_{i,j}^1$ , se requiere una tercera imagen transformada. La ecuación (2.14) define la tercera imagen transformada. Por lo tanto, a diferencia de la ecuación (2.13), la imagen ahora se transforma como una función de la coordenada vertical ( $i$ ), estableciendo los valores de  $a$  y  $b$  en 1 y  $limS$ , respectivamente:

$$PI_{i,j}^3 = lmf(i, [1, limS, PI_{i,j}^1, PI_{i,j}]) \quad (2.14)$$

Finalmente, se aplican dos funciones de umbral de segmentación complementarias a las imágenes resultantes, con el fin de proporcionar un segundo parámetro de calibración al algoritmo de edición de imagen cambiando el peso de las dos imágenes transformadas. Las ecuaciones (2.15) y (2.16) definen las dos funciones adicionales de umbralización:

$$I_{T2}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq Ptr2 \\ 0, & x > Ptr2 \end{cases} \quad (2.15)$$

$$I_{T3}(x) = \begin{cases} 1, & x > Ptr2 \\ 0, & x \leq Ptr2 \end{cases} \quad (2.16)$$

donde  $Ptr2$  representa el segundo valor de umbral. La ecuación (2.17) define la subfunción final utilizada para el área sobre la superficie del agua:

$$PI_{i,j}^f = \underbrace{I_{T3}(PI_{i,j})(PI_{i,j}^3)}_{\text{Transición lineal } (PI_{i,j} - PI_{i,j}^1)} + \underbrace{I_{T2}(PI_{i,j})(PI_{i,j}^2)}_{\text{Aclarar}} \quad (2.17)$$

### Edición de imagen paso 3

El área de transición es necesaria para proporcionar un cambio gradual entre las imágenes transformadas arriba y debajo de la superficie del agua, mientras se mantiene el propósito en edición de imagen del paso 1, es decir, oscurecer las áreas con bajo valor de intensidad de pixel y mantener las áreas más claras sin cambios. Por lo tanto, se recupera la subfunción utilizada en edición de imagen paso 1 (expresión izquierda en la ecuación (2.19)) y la función de pertenencia  $lmf$  para aplicar una transición lineal entre las imágenes transformadas en el paso 1  $PI_{i,j}^1$  y el paso 2  $PI_{i,j}^2$ . La ecuación (2.18) define la cuarta imagen transformada, y la ecuación (2.19) define la subfunción final utilizada para el área de transición:

$$PI_{i,j}^4 = lmf(i, [limS, limSt, PI_{i,j}^2, PI_{i,j}^1]) \quad (2.18)$$

$$PI_{i,j}^f = \underbrace{I_{T3}(PI_{i,j}) \times I_{T1}(PI_{i,j}) \times PI_{i,j}^1}_{\text{Oscurer}} + \underbrace{I_{T1}(PI_{i,j}) \times I_{T2}(PI_{i,j}) \times PI_{i,j}^4}_{\text{Transición lineal } (PI_{i,j}^1 - PI_{i,j}^2)} \quad (2.19)$$

para  $(limS \leq i < limSt)$

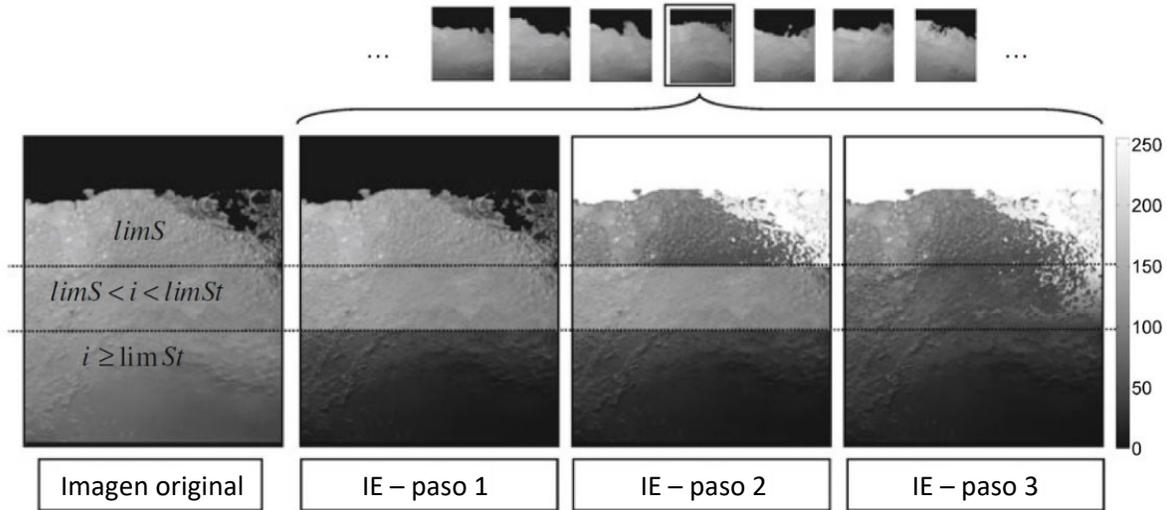


Figura 2.13. Primera etapa del procesamiento de imágenes, dividida en 3 etapas, Leandro et al. (2012)

### 2.4.2 Matriz de intensidad de pixel (PIM)

El objetivo de la Matriz de Intensidad de Píxeles (PIM) es calcular la matriz promedio de intensidad de píxeles a lo largo del tiempo, utilizada para predecir la concentración de aire en cualquier punto dado dentro de cada imagen  $PI_{i,j}^f$ . Por motivo de simplicidad, estas imágenes se denominarán PI. El algoritmo PIM consiste en tres pasos: paso 1-PIM divide la imagen en matrices más pequeñas, paso 2-PIM calcula el promedio de la matriz de intensidad de píxel para cada imagen, y el paso 3-PIM calcula la matriz de intensidad de píxel promedio en el tiempo. La Figura 2.14 ilustra los tres pasos que se explicarán con más detalle.

### **Paso 1-PIM**

En este paso, la imagen transformada obtenida en el algoritmo anterior, es decir, la matriz  $PI$  ( $m \times n$ ), se divide en  $m/p$  veces  $n/q$  matrices más pequeñas, donde  $p$  y  $q$  son números enteros y factores de  $m$  y  $n$  (Figura 2.14 imagen superior izquierda). Se crea una nueva matriz  $RPI$  formada por estas matrices más pequeñas con dimensiones  $(p \times q)_{(m/p \times n/q)}$ , tal que  $RPI(:, :, i, j)$  es la submatriz  $(i, j)$ ésima de  $RPI$ .

### **Paso 2-PIM**

De cada Matriz  $RPI(:, :, i, j)$  se obtiene un histograma de intensidad de píxel y la ocurrencia promedio se devuelve a una de matriz promedio  $AvPI$  (Figura 2.14 segunda imagen desde la izquierda). El  $AvPI$  es una matriz  $(p \times q)$  tal que  $AvPI(i, j)$  se calcula como la intensidad de píxel promedio de la submatriz  $(i, j)$ ésima del  $RPI$  (Figura 2.14, tercera imagen desde la izquierda). Este procedimiento sigue de cerca el trabajo de Mossa y Tolve (1998), donde el valor promedio también es obtenido del histograma de intensidad de píxeles. Sin embargo, mientras que Mossa y Tolve (1998) promediaron la intensidad del píxel sobre todos los perfiles verticales, en este caso se obtienen los valores medios tanto horizontales como verticales.

### **Paso 3-PIM**

El último paso calcula la matriz promedio de tiempo  $AvPIt$ . El  $AvPIt$  es una matriz  $(p \times q)$  calculada como la intensidad de píxel promedio en el tiempo de todas las matrices de  $AvPI$  obtenidas en el paso anterior (Paso 2-PIM) para una prueba determinada. La imagen de la derecha en la Figura 2.14 muestra un ejemplo de esa matriz. Cada intensidad de píxel está representada en una escala de grises por la barra de colores de la derecha y se puede traducir a un valor numérico de 0 a 255. Por lo tanto, se pueden recuperar fácilmente varios perfiles verticales de intensidad de píxeles como las columnas en la matriz  $AvPIt$ .

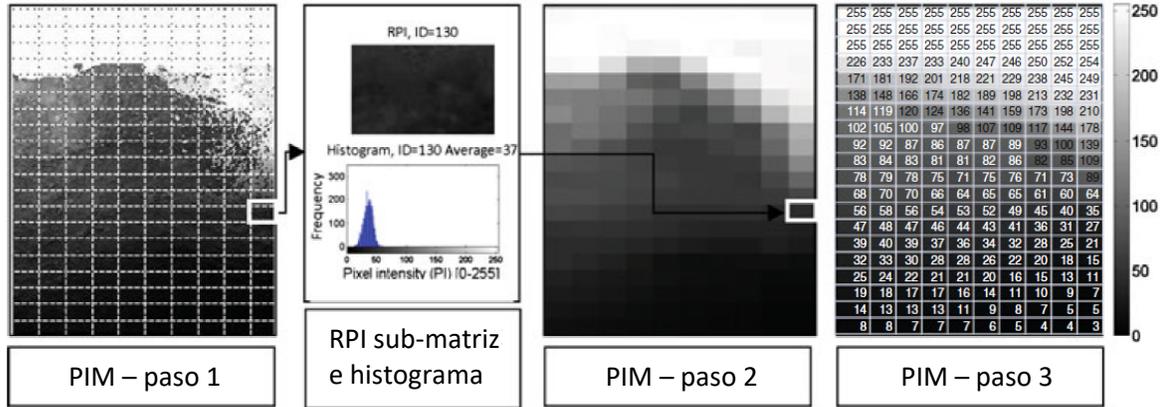


Figura 2.14. Algoritmo de Matriz de Intensidad de Píxeles (PIM), Leandro et al (2012)

### 3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1 Dispositivo experimental

Se sabe que en conductos que transportan flujo a presión se forman bolsas de aire en los puntos más elevados, siempre y cuando una válvula instalada en ese punto no funcione o no se encuentre colocada. Con la finalidad de reproducir un caso similar se utilizó un dispositivo experimental que consiste en una tubería que forma un circuito y que cuenta con un punto elevado, es decir, dos tramos continuos en donde el primero tiene una pendiente ascendente y el segundo una pendiente descendente (figura 3.1), con la posibilidad de modificar esta última.

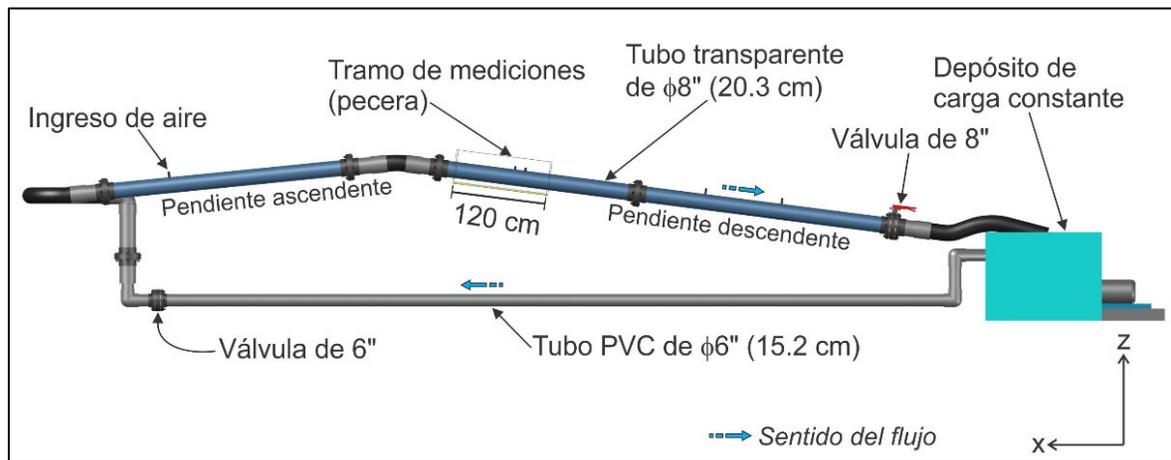


Figura 3.1. Perfil longitudinal del dispositivo experimental.

En la figura 3.2 se muestran los elementos principales del dispositivo utilizado, en donde se puede observar un tanque para almacenamiento de agua de carga constante; un equipo de bombeo con una potencia de 20 HP; un tramo de tubería de PVC de 15 cm (6") de diámetro interior, con una longitud de 1,396 cm; un tramo de tubería de PVC de 20 cm (8") de diámetro interior, con longitud de 1,444 cm. La mayor parte del tramo de tubo de 20 cm de diámetro es de PVC transparente y en una sección de 120 cm de longitud se realizaron las mediciones. La tubería de 20 cm descarga sobre el tanque de almacenamiento inicial, de esta manera se cierra el circuito.

En la sección de mediciones se colocó una caja construida con acrílico transparente (pecera, figura 3.3), que al llenarla con agua mejora la visualización de las imágenes que se capturaron, del flujo agua-aire de la conducción.

Cabe mencionar que el equipo de bombeo cuenta con un variador de velocidad, lo que permite hacer experimentos en el dispositivo con valores de caudal variable.

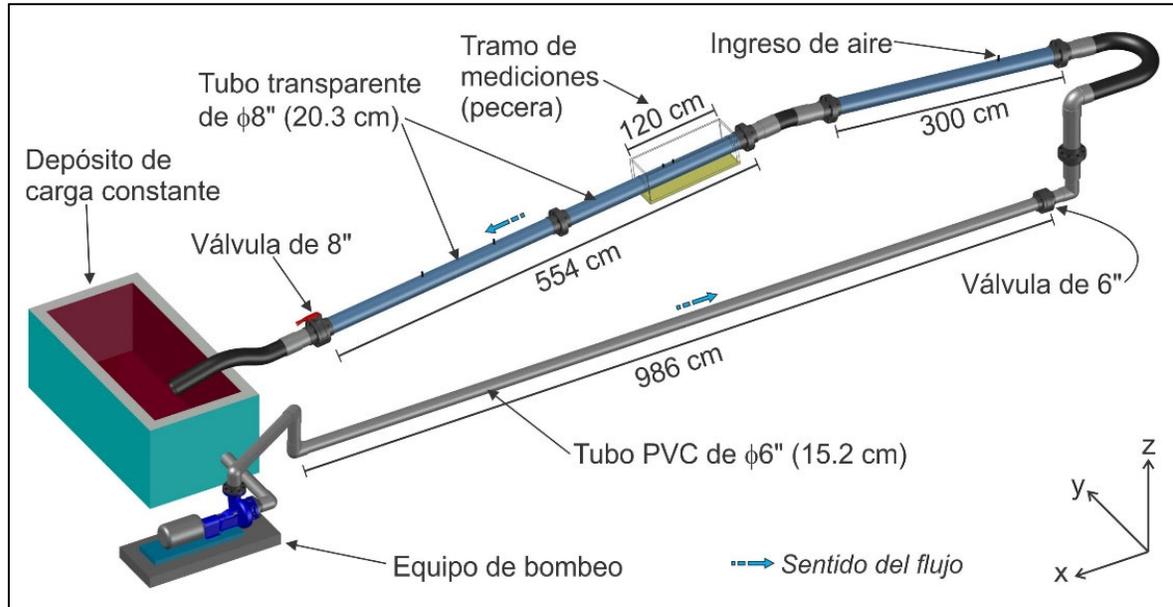


Figura 3.2. Dispositivo experimental con sus elementos principales.



Figura 3.3. Caja de acrílico transparente (pecera) colocada en la sección de las mediciones.

### 3.2 Procedimiento experimental

Inicialmente se planteó realizar el experimento haciendo mediciones con 3 pendientes, 6°, 4° y 2°, sin embargo, debido a las condiciones del dispositivo experimental, el tramo de tubería en

donde se formó el salto hidráulico se colocó en 4 posiciones, 6.4°, 5.7°, 4° y 2°. Para cada pendiente se hicieron 2 mediciones con caudales diferentes. En la tabla 3.1 se muestran las velocidades de la bomba con su respectivo gasto, para cada una de las alternativas. En la figura 3.4 se muestran gráficamente los gastos vs velocidades de la bomba.

Tabla 3.1. Gastos y velocidades de la bomba para cada escenario de medición.

Medición	S (°)	S	Q (l/s)	Vel. Bomba (rpm)
Q1	6.4	0.11	22.52	1440
Q2	6.4	0.11	26.81	1620
Q3	5.7	0.10	19.26	1260
Q4	5.7	0.10	22.55	1440
Q5	4.0	0.07	20.20	1320
Q6	4.00	0.07	22.64	1500
Q7	2.00	0.03	21.20	1380
Q8	2.00	0.03	24.86	1560

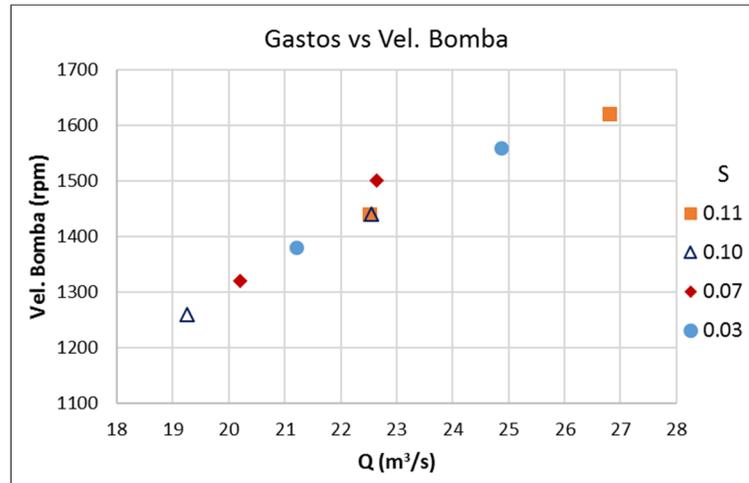


Figura 3.4. Gastos para cada alternativa en función de la velocidad de la bomba

En condiciones normales de operación del dispositivo, el último tramo funciona a tubo parcialmente lleno, por lo tanto, se cerró de forma parcial la válvula de 20 cm (8”), en la descarga, para generar la pérdida de carga necesaria y que la longitud total de la tubería funcione a presión. Posteriormente se inyecta aire en la tubería (figura 3.5), en el punto indicado en la figura 3.2, mediante un compresor, hasta lograr que se forme una bolsa de aire en el punto más alto, y así provocar un salto hidráulico al final de la bolsa de aire. El volumen de aire ingresado fue el suficiente para que el salto hidráulico se ubicara en la zona de medición.

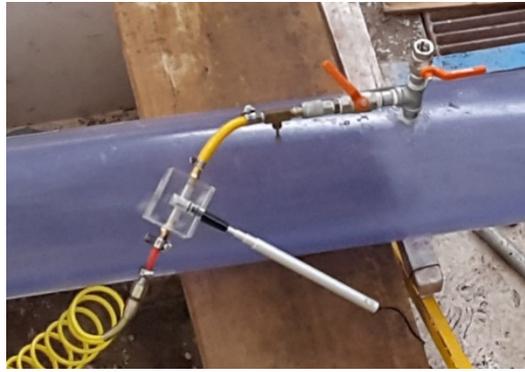


Figura 3.5. Ingreso de aire en la tubería.

### **3.2.1 Instrumentos utilizados para las mediciones**

Los instrumentos utilizados para hacer las mediciones en el dispositivo experimental consisten en: sonda de conductividad de doble punta, una cámara de alta velocidad, un medidor de gasto ultrasónico y dos lámparas incandescentes.

#### ***Sonda de conductividad de doble punta***

Las mediciones de concentración de aire fueron realizadas con una sonda de conductividad de doble punta, implementada por los académicos de instrumentación del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Dicha sonda se conecta a una tarjeta electrónica que a su vez se conecta a un equipo de cómputo en donde se almacenan los datos obtenidos para su posterior procesamiento. En la figura 3.6 se puede observar la sonda y la tarjeta electrónica que registra los datos.



Figura 3.6. Sonda de conductividad de doble punta y caja con tarjeta electrónica.

El uso de una sonda para medir la concentración de aire corresponde a una técnica de tipo intrusivo, debido a que se coloca dentro del flujo en el conducto para llevar a cabo las mediciones. Para ello, se hizo un orificio en la clave de la tubería en el punto de interés, y se tomaron lecturas a cada centímetro de forma vertical en el diámetro de la tubería para cada una de las alternativas planteadas. En la figura 3.7 se muestra un esquema donde se aprecia la sonda de conductividad instalada en el dispositivo experimental utilizado para realizar las mediciones del presente estudio.

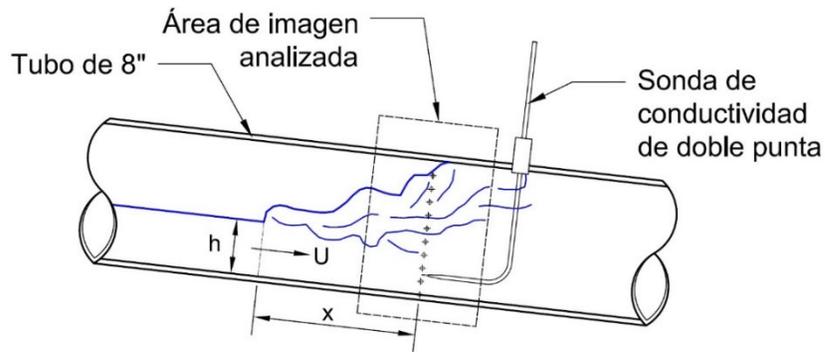


Figura 3.7. Esquema del salto hidráulico, sonda de doble punta y área de captura de imágenes

La señal de la sonda de conductividad de doble punta se registró y analizó utilizando un software desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Los datos obtenidos están formados por dos grupos, correspondientes a cada una de las puntas de la misma. Un ejemplo de los datos obtenidos se puede observar en la figura 3.8. A cada una de las puntas le corresponde una curva (blanca y roja).

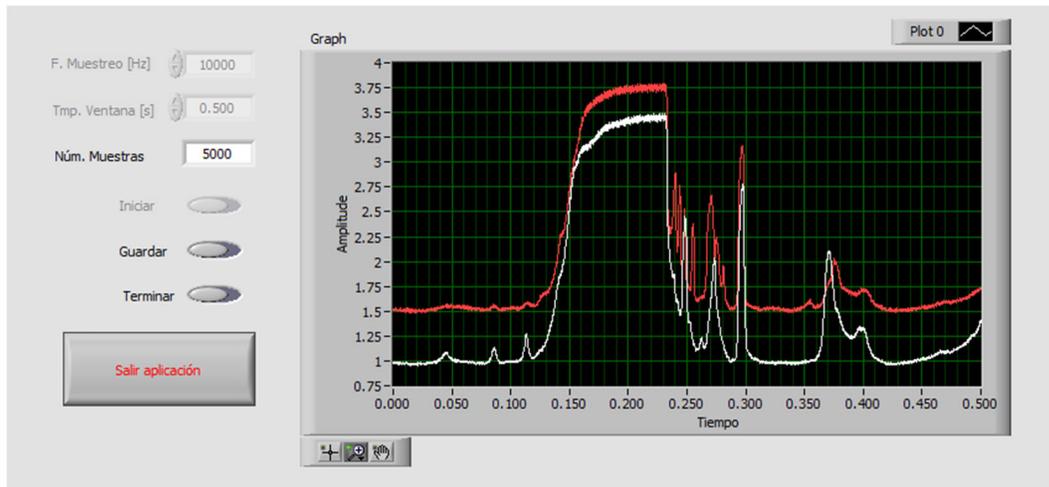


Figura 3.8. Registro del flujo agua-aire con la sonda.

### ***Cámara de alta velocidad***

Para la captura de imágenes del salto hidráulico se utilizó una cámara de alta velocidad marca FASTEC modelo IL4. Esta cámara es capaz de capturar 500 imágenes o fotogramas por segundo (fps) con un tamaño de 1280x1024 píxeles, así como velocidades mayores para resoluciones menores. Las características de la cámara son las siguientes:

- Sensor CMOS de 10 bits con píxeles cuadrados de 14  $\mu\text{m}$ , color o monocromo.
- Resolución 1280 x 1024 píxeles máximo.
- Sensibilidad de luz 3,200 ISO monocromo, 1,600 colores ISO.
- Tasa de grabación 24 a 510 fps a 1280 X 1024, hasta 60,000 a resoluciones reducidas.
- Longitud de la sesión 256 MB a 8 GB en modo de ráfaga, o hasta el tamaño de SSD completo en modo de grabación larga.
- Formatos de archivos Stacks- BMP, DNG, JPEG, TIFF; Video- AVI, CAP.
- Puertos de comunicación, dispositivo USB 2.0 (micro-B), Ethernet (10/100 / 1000Base-T).
- Potencia 10-26v @ 20W (máx).
- Entorno operativo + 5 ° C A + 50 ° C

Una vez obtenidos los datos con la sonda, inmediatamente después se capturaron las imágenes para cada uno de los casos en estudio. La cámara de alta velocidad utilizada, se configuró para almacenar los archivos en formato de escala de grises de 8 bits, por lo tanto, de forma directa se obtienen los valores de intensidad de pixel. En cada alternativa se capturaron 1000 fotos a una velocidad de 500 fps y un tamaño de 900x600 pixeles.

Un ejemplo de las imágenes capturadas con la cámara de alta velocidad se puede observar en la figura 3.9.

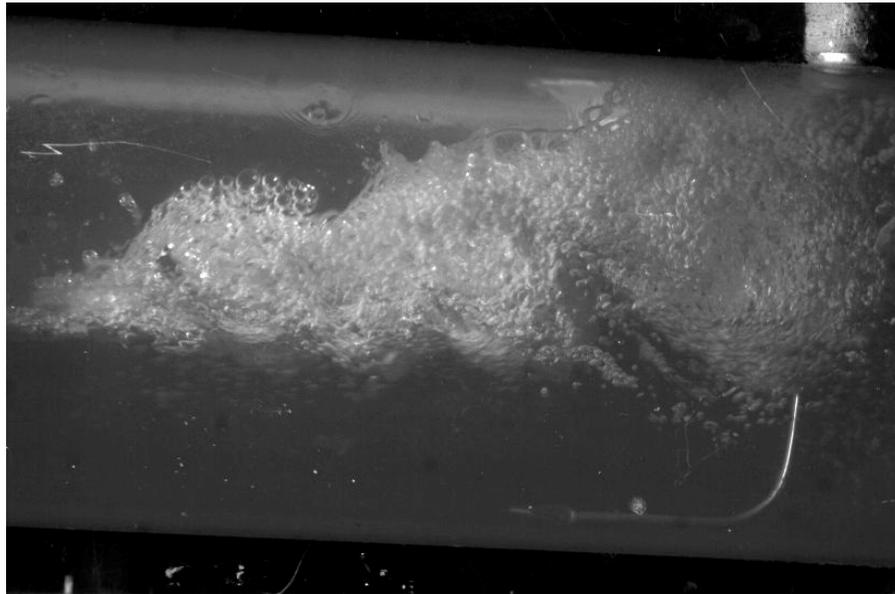


Figura 3.9. Imagen capturada con la cámara de alta velocidad.

### ***Medidor de gasto***

El caudal, para cada una de las alternativas, se obtuvo haciendo uso de un caudalímetro ultrasónico de correlación de tiempo de tránsito que emplea tecnología dual DSP. Se puede emplear en aplicaciones de agua limpia o residual. Funcionamiento en tamaños de tubería de entre 25-2500 mm. Las principales características del medidor de gasto son las siguientes:

- Rango de medición de la velocidad del flujo: 0.01 - 25 m/s
- Resolución: 0.25 mm/s
- Precisión del caudal volumétrico:  $\pm 1 - 3 \%$  del valor medio en función de la aplicación,  $\pm 5\%$  del valor medio en proceso de calibración.
- Exactitud de la velocidad del flujo:  $\pm 5 \%$  del valor medio

- Temperatura de operación: -10 a 60 °C



Figura 3.10. Medidor de caudal ultrasónico.

### *Equipo de iluminación*

Con la finalidad de obtener imágenes de mejor calidad y repetir condiciones similares se aisló la sección de estudio para evitar luz natural. Para iluminar el salto hidráulico se utilizaron dos lámparas incandescentes de tungsteno (figura 3.11) con capacidad máxima de 1000 watts (120-240VAC).



Figura 3.11. Lámpara de tungsteno

### 3.2.2 Obtención y procesamiento de datos con sonda de conductividad de doble punta

Para obtener el contenido de aire mediante la técnica intrusiva se utilizó una sonda de conductividad de doble punta, la cual fue desarrollada por el área de sistemas del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se incluye una tarjeta de adquisición de datos con interfaz USB (figura 3.6). Se hicieron mediciones para cada uno de los escenarios.

El procedimiento consistió en iniciar el equipo de bombeo para hacer circular el caudal por la tubería, cerrando parcialmente la válvula de 8" mostrada en la figura 3.2 para que el flujo trabaje a presión. Una vez que se presentó el flujo permanente se ingresó aire por un punto aguas arriba del tramo de medición (pecera) hasta formar una bolsa de aire en el punto más alto de la tubería. Al final de la bolsa de aire se generó un salto hidráulico, el cual se ubicó lo más cerca posible al orificio donde se colocó la sonda, controlando el volumen de aire ingresado. Se observó que el salto se movía hacia aguas arriba debido a que el salto hidráulico arrastra aire en forma de burbujas, para evitarlo se permitió el ingreso de una pequeña cantidad de aire de manera constante, debido a ello, en las mediciones realizadas la distancia desde el inicio del salto hasta la punta de la sonda fue variable. La distancia  $x$  mostrada en la figura 3.7 fue de 30 cm aproximadamente, aunque en dos casos se presentó una diferencia de 7 cm. En la tabla 3.2 se indica la distancia  $x$  para cada uno de los escenarios.

Tabla 3.2. Distancia desde el inicio del salto hasta el punto de medición con sonda para cada escenario (distancia  $x$ ).

Escenario	Distancia $x$ (Figura 3.7) (cm)
1	32
2	30
3	27
4	31
5	23
6	23
7	32
8	34

Se tomaron datos a cada un centímetro de altura, iniciando en el fondo de la tubería hasta los 17 cm. La curvatura de la sonda impidió tomar datos a los 18, 19 y 20 cm de altura, ver figura 3.12.

Los datos obtenidos con la sonda consisten en valores de amplitud del medio en la punta de la sonda, un valor para cada una de las puntas. Se configuró una velocidad de captura de 10 kHz,

es decir, se almacenaron 10,000 valores por segundo con una duración total aproximada de 20 segundos.

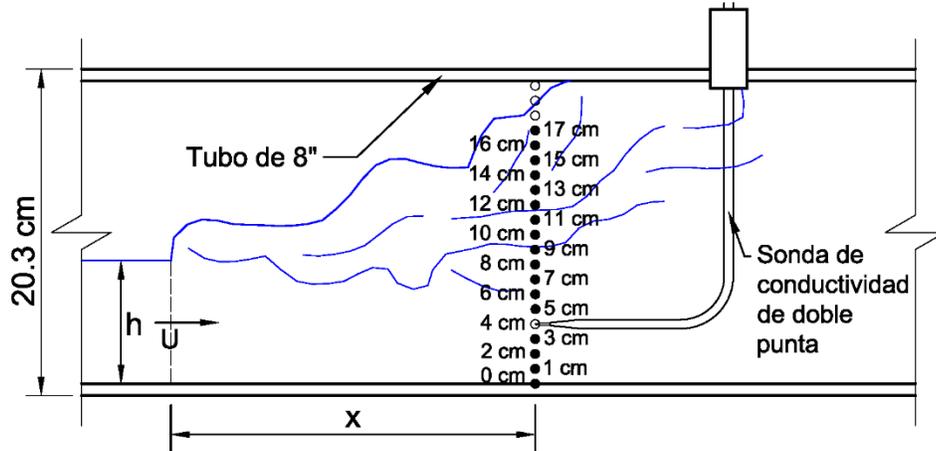
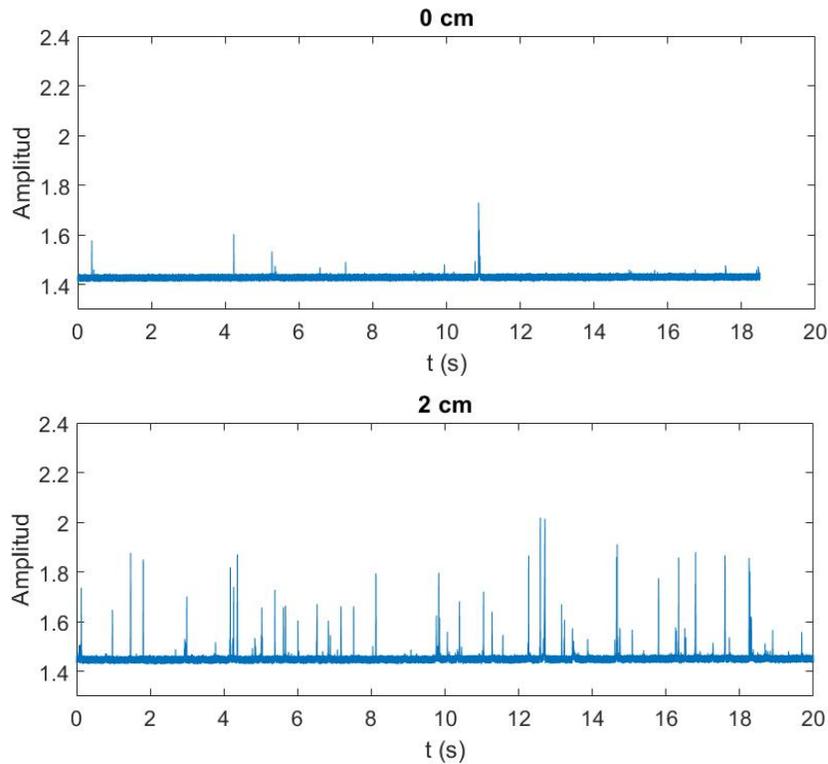
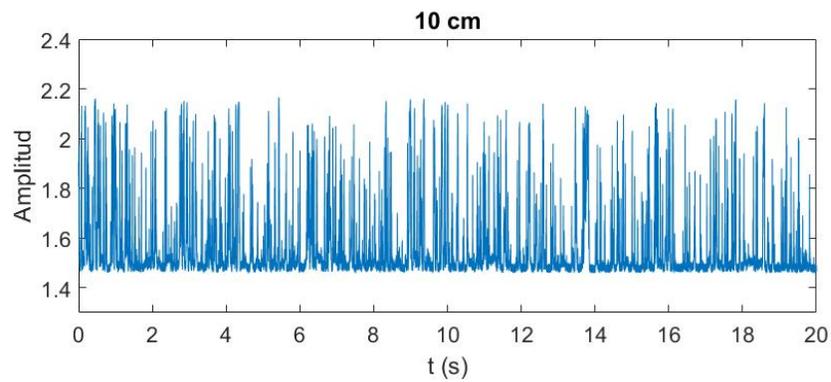
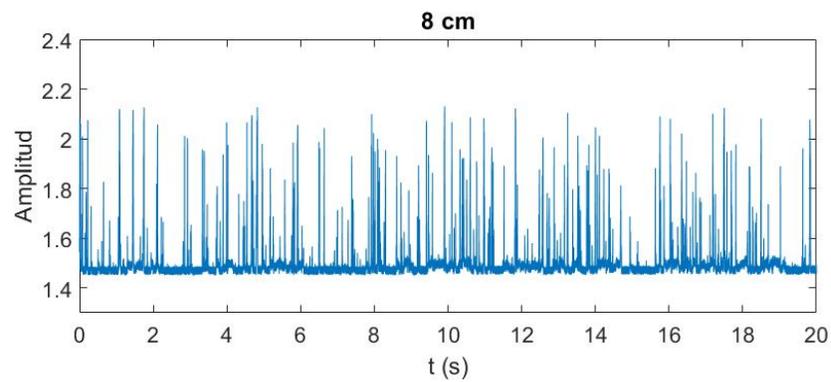
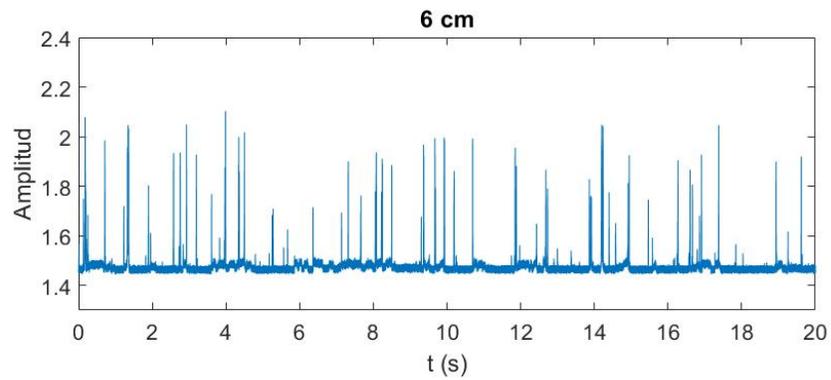
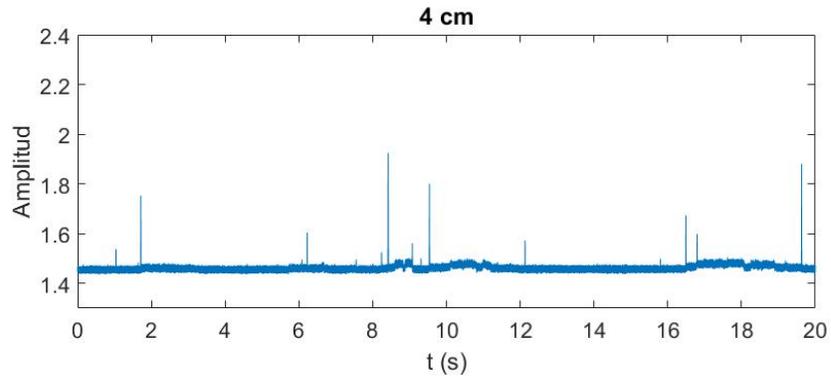


Figura 3.12. Perfil longitudinal en el salto hidráulico con los puntos donde se tomaron datos con la sonda.

En la figura 3.13 se presentan las gráficas de la señal de una de las puntas de la sonda, obtenidos para el escenario 3 a cada 2 centímetros del diámetro de la tubería.





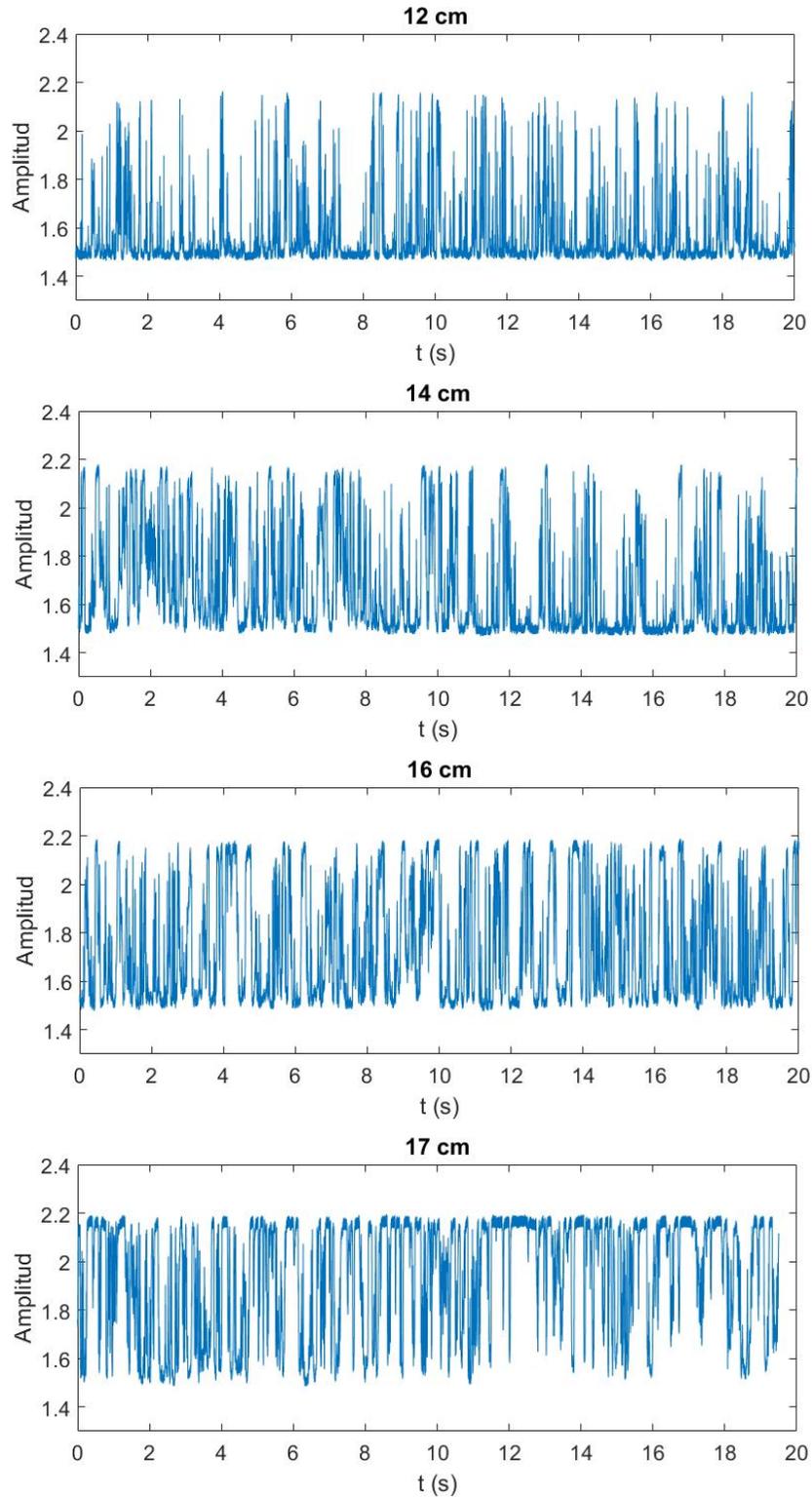


Figura 3.13. Graficas de Amplitud con datos adquiridos con la sonda de conductividad a cada 2 centímetros de altura correspondiente al escenario 3 (Q3).

En las gráficas de la figura 3.13, cuando el valor de la amplitud es menor o igual a 1.54, indica que la punta está en agua y si el valor es mayor o igual 2.03 la punta está en aire. La sonda, desarrollada por el Instituto de Ingeniería, incluye una herramienta de software escrita en Simulink de Matlab, que permite definir un valor intermedio para diferenciar si la punta está en agua o en aire, este procedimiento consiste en utilizar los valores mínimo y máximo mencionados y calcular un umbral para cada uno de los valores de amplitud. Por ejemplo, el umbral calculado para la señal 1 en el punto con una altura de 16 cm del perfil del escenario 3 (Q3) se puede observar en la figura 3.14. En la figura 3.15 se puede ver el umbral calculado en un lapso de un segundo.

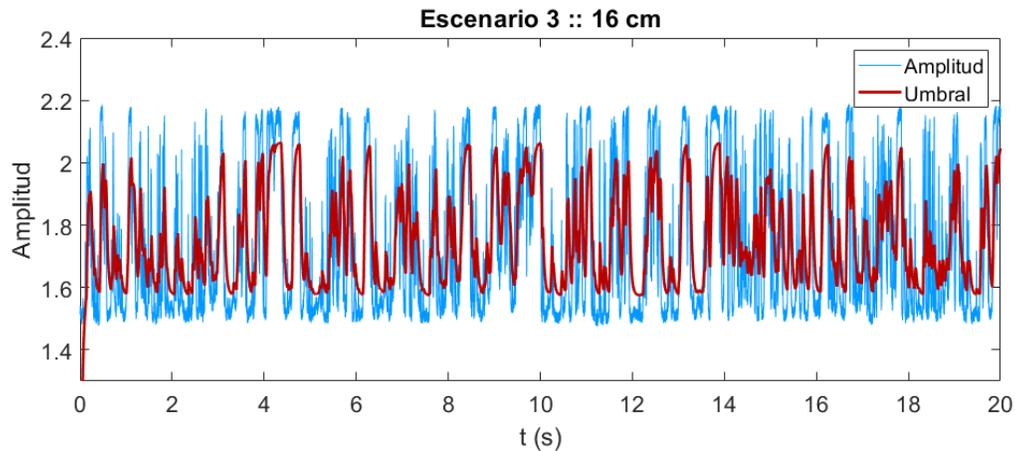


Figura 3.14. Curva de amplitud de la señal\_1 a una altura de 16 cm del escenario 3 y curva de umbral.

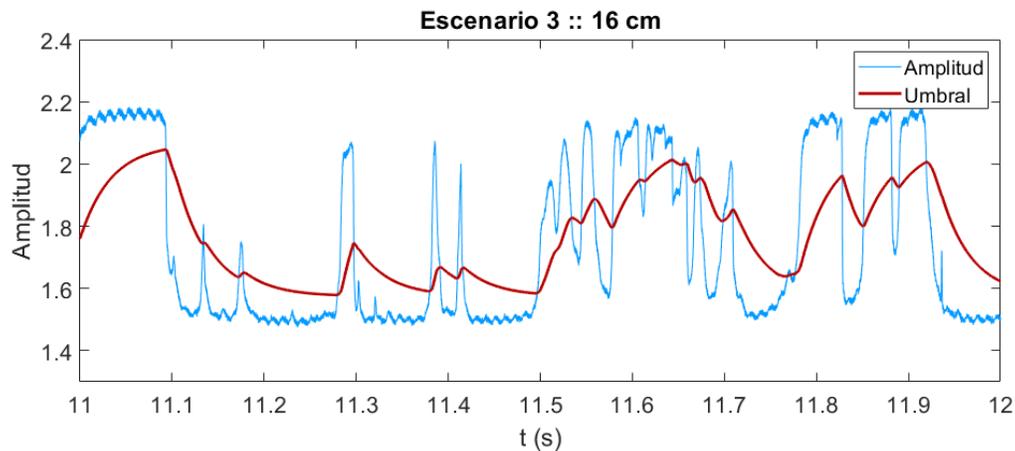


Figura 3.15. Curva de amplitud de la señal\_1 a una altura de 16 cm del escenario 3 y curva de umbral, en un segundo.

Calculado el umbral para cada una de las posiciones de la sonda se contabiliza la cantidad de valores de amplitud que están por arriba y cuantos por debajo de la curva umbral y se obtiene la relación agua-aire en los distintos puntos del perfil del salto hidráulico.

$$C = 100 - \frac{\sum_{i=1}^n (Amplitud_i > Umbral_i)}{n} 100 \quad (3.1)$$

Donde  $n$  es la cantidad de registros ( $n \approx 200,000$ ) para cada una de las posiciones de la sonda.

Para el caso de la posición de la sonda a una altura de 16 cm, correspondiente a la figura 3.14, la concentración de agua-aire ( $C$ ) resultó de 36.5 %.

Los resultados completos de la concentración de agua-aire  $C$  para el escenario 3, incluyendo las dos señales, se presentan en la tabla 3.3. En la figura 3.16 se puede apreciar la gráfica con los resultados de concentraciones  $C$  para ambas señales de la sonda correspondientes al escenario 3 y en la figura 3.17 se muestra la gráfica con el promedio de estas.

Tabla 3.3. Concentración agua-aire ( $C$ ) para el escenario 3 (Q3), medido con soda.

Altura (cm)	señal_1	señal_2	Promedio (%)
0	0.46	0.38	0.42
1	0.49	0.49	0.49
2	0.95	1.06	1.00
3	1.30	1.47	1.39
4	0.45	0.42	0.43
5	0.74	0.77	0.76
6	1.69	2.16	1.92
7	2.28	3.61	2.95
8	4.07	6.64	5.35
9	11.35	13.89	12.62
10	12.98	14.50	13.74
11	11.78	13.43	12.60
12	14.55	15.39	14.97
13	22.97	24.03	23.50
14	25.75	27.13	26.44
15	22.73	23.51	23.12
16	36.52	38.15	37.34
17	61.88	63.48	62.68

Se procesaron los datos para cada uno de los 8 escenarios propuestos, calculando los perfiles de concentración agua-aire  $C$  obtenidos con la sonda de conductividad (ver APENDICE A). Estos perfiles se utilizaron posteriormente para calibrar los parámetros en el procesamiento de imágenes.

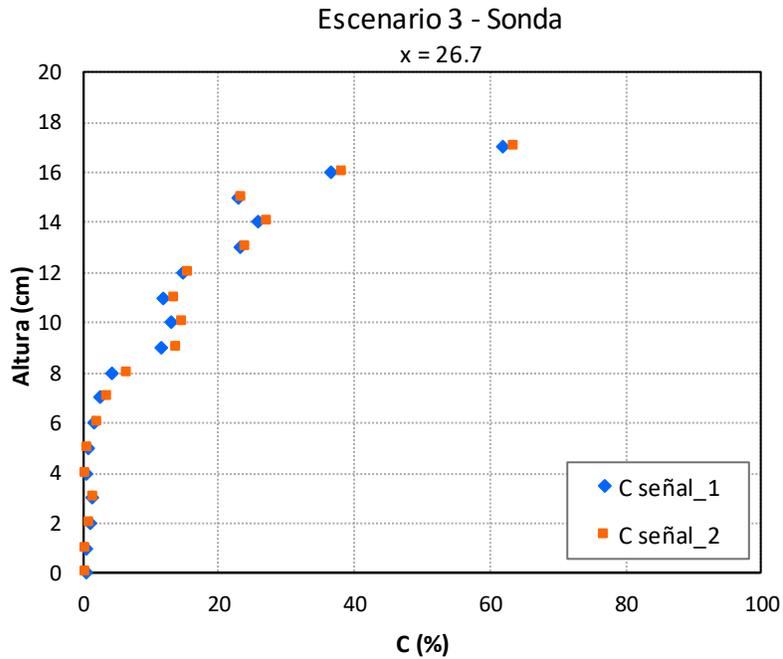


Figura 3.16. Concentración agua-aire obtenida con la sonda para cada punta en el escenario 3.

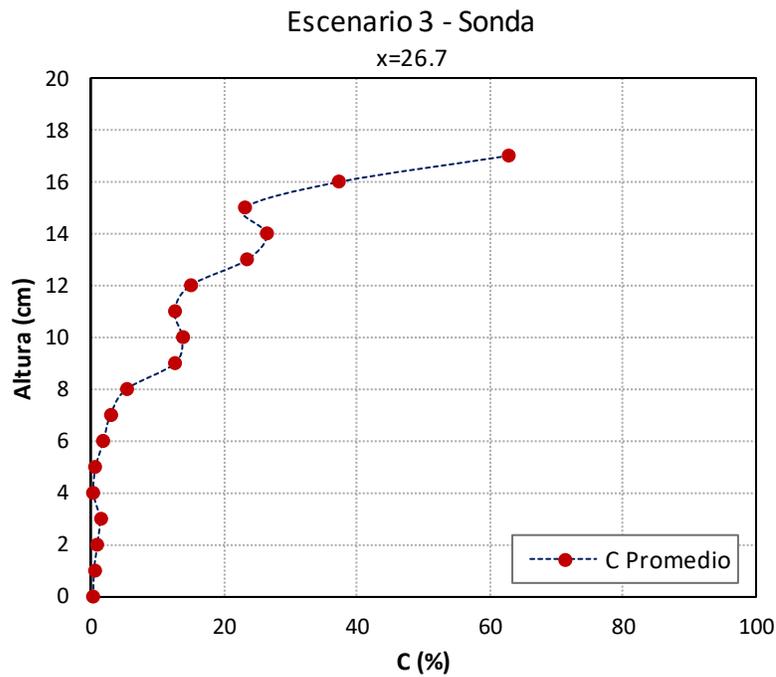


Figura 3.17. Concentración agua-aire promedio, obtenida con sonda de conductividad, para el escenario 3.

### **3.2.3 Procesamiento de imágenes**

El procesamiento de imágenes que se utilizó para determinar la concentración de aire en el resalto hidráulico en función de la intensidad de los píxeles corresponde al propuesto por Leandro et al. (2012).

El procesamiento de imágenes tiene como objetivo determinar series de tiempo de concentración de aire y valores de tiempo-promedio en el resalto hidráulico. La hipótesis consiste en que la concentración de aire puede ser estimada basándose en intensidad de píxeles de las imágenes. El procedimiento de procesamiento de imágenes consiste en dos algoritmos escritos en Matlab:

1. Edición de imágenes (IE), y
2. Algoritmo de matriz de intensidad de píxel (PIM).

Ambos algoritmos y subfunciones son ejecutados para todas las imágenes.

En el proceso de adquisición de datos, para cada uno de los escenarios, primero se obtuvieron los datos con la sonda y posteriormente se procedió a capturar las fotografías con la cámara de alta velocidad. Se propuso almacenar 1,000 fotografías para cada escenario a una velocidad de 500 fotogramas por segundo (fps), es decir, 2 segundos en total.

Las imágenes se almacenaron en escala de grises de 8 bits con un tamaño de 1,000x600 píxeles. En el estudio realizado por Leandro et al. (2012) se capturó una serie de al menos 60 imágenes por prueba con un período de recopilación de datos de aproximadamente 11.0 segundos (5.45 fps), mientras que en un estudio previo desarrollado por Mossa y Tolve (1998) utilizó 10 fotografías tomadas en intervalos de 1.5 segundos (1.5 fps). Cabe mencionar que Leandro et al. (2012) sugiere aplicar el procedimiento de procesamiento de imágenes utilizando una cámara de alta velocidad para proporcionar una serie temporal de alta resolución de concentración.

A pesar de intentar igualar las condiciones ambientales y configuración de la cámara en cada uno de los escenarios, debido a que las fotos se capturaron en momentos distintos, a simple vista las imágenes obtenidas se notan con un brillo diferente, sin embargo, en una de las etapas del procesamiento de las imágenes estas diferencias se equilibran.

Antes de iniciar el procesamiento de las imágenes propuesto por Leandro et al. (2012), se aplicó un filtro gaussiano para mejorar el contraste, en la figura 3.18 se presenta una de las imágenes del escenario 3.

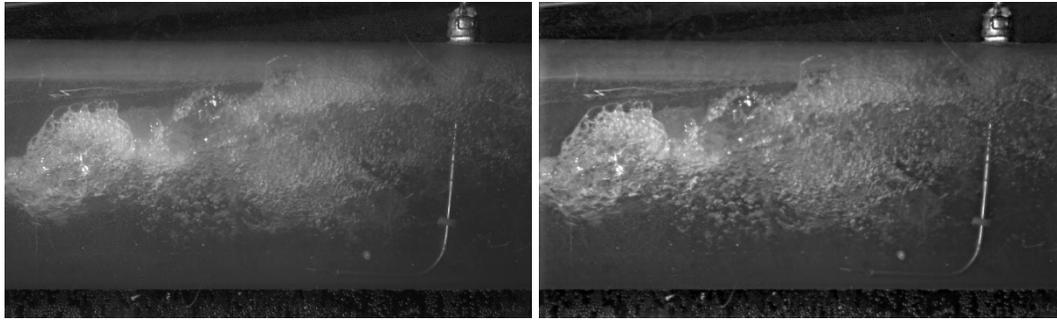


Figura 3.18. Una de las imágenes del escenario 3. Imagen original (izquierda) e imagen con filtro (derecha).

El algoritmo de matriz de intensidad de pixeles es válido solo en el área del salto hidráulico, por lo tanto, fue necesario recortar las imágenes. Los límites superior e inferior los define la altura de la tubería (diámetro), mientras que el límite izquierdo y derecho se establecieron de acuerdo a la zona de burbujas. El tamaño de las imágenes recortadas fue de 600x460 pixeles en la mayoría de los casos, ver figura 3.19.

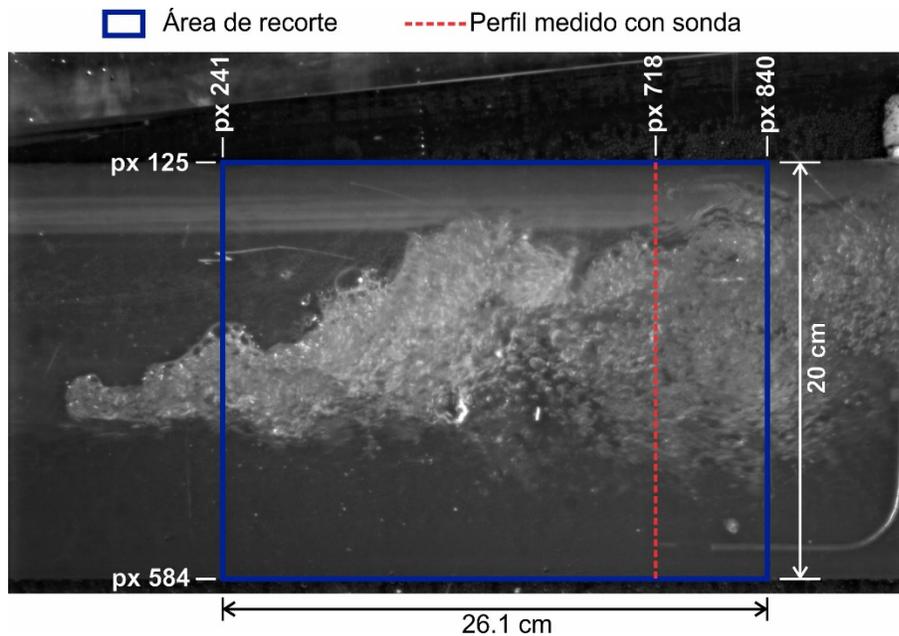


Figura 3.19. Ejemplo de recorte de imagen para aplicar algoritmo de matriz de intensidad de pixeles.

### 3.2.3.1 Edición de imágenes

El primer paso del algoritmo de edición de imágenes (IE) consiste en utilizar la función de lógica difusa  $S$  para oscurecer los pixeles por debajo de la superficie libre del agua, en particular,

aquellos que están por debajo de la zona de burbujas. Cuando el flujo es solo agua, es decir, que el contenido de agua-aire es 100%, el color de los píxeles deberá de ser 0. El límite en donde se aplica el paso 1 se denomina *limSt*.

En el paso 2 se aclara la zona de la imagen que está por encima de la superficie libre del flujo con valores de intensidad de pixel de 255 que representan el blanco en la escala de grises. Lo anterior debido a que se sabe que la concentración de agua-aire en la zona mencionada es 0%. Este proceso se aplica en la zona superior del límite denominado *limS*.

Los límites *limSt* y *limS* se definen de acuerdo a observación en el conjunto de imágenes a procesar.

El tercer y último paso del proceso de edición de imágenes consiste en definir una transición suave entre las zonas modificadas en los pasos 1 y 2. Los píxeles más claros, que representan el aire en la zona de turbulencia del salto hidráulico, permanecen sin cambios, mientras que a los píxeles más oscuros se les aplica una función lineal de lógica difusa para la transición.

En la figura 3.20 se muestra el proceso de la aplicación del algoritmo de edición de imágenes.

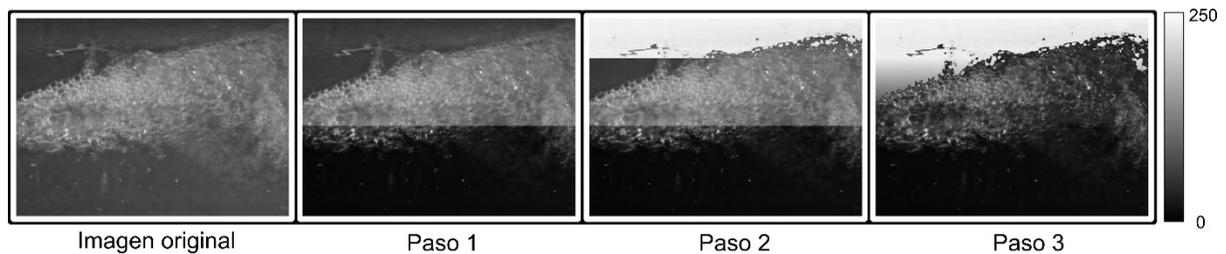


Figura 3.20. Proceso de edición de imágenes aplicado a una imagen del escenario 1.

### 3.2.3.2 Definición de la superficie libre del agua

Con la intención de mejorar los resultados de las imágenes editadas se utilizó un procedimiento para definir, de manera aproximada, la superficie libre del agua. Además, debido a que la pendiente de la superficie libre del flujo en el salto hidráulico, se presenta en ascenso, en el resultado del procesamiento de imágenes se observó que en el lado izquierdo aparece una zona oscura por encima de la superficie libre de flujo y en el extremo derecho aparecen zonas más claras por debajo de la superficie libre del mismo.

El método utilizado consiste obtener una imagen que muestre los píxeles que cambien, en cierta magnitud, la intensidad de los píxeles entre imágenes continuas (figura 3.21).

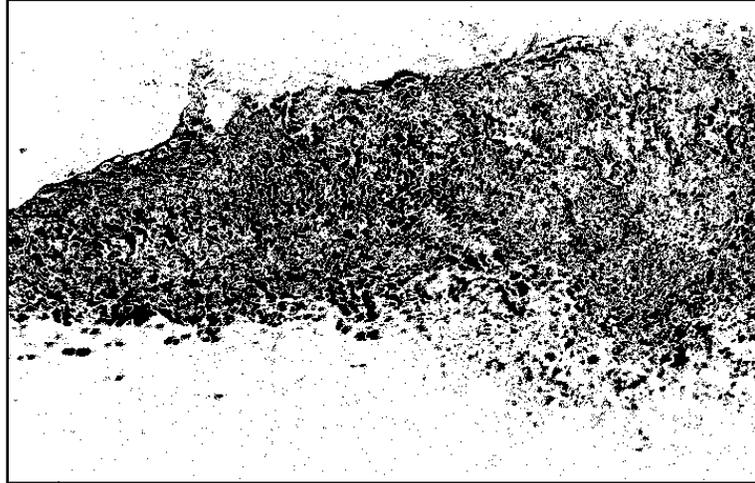


Figura 3.21. Imagen que muestra los pixeles que cambian en dos imágenes continuas.

En la imagen obtenida, se realiza una búsqueda en cada una de sus columnas, calculando el promedio de un grupo vertical de  $h$  pixeles continuos, si el promedio es menor que una magnitud  $h1$  significa que se ha llegado a un punto en donde los pixeles, entre imágenes continuas, son variables, se marca la posición y se continua con la columna siguiente. El resultado de la búsqueda se muestra en la figura 3.22.

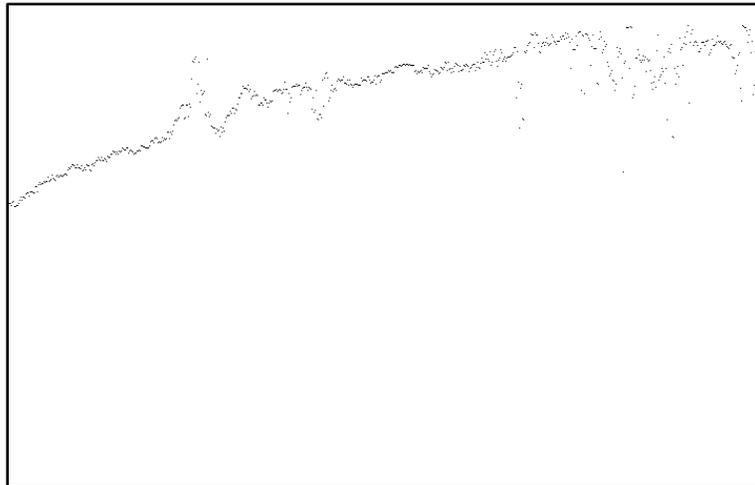


Figura 3.22. Puntos que delimitan la superficie libre del agua en el salto hidráulico.

Ajustando los puntos mediante la aplicación de una función spline suavizada, incluida en Matlab, se obtiene una buena aproximación de la superficie libre del flujo. Al final del salto hidráulico la precisión de la curva spline, es menor debido a que la mezcla agua-aire se reduce. La curva suavizada se muestra en la figura 3.23.

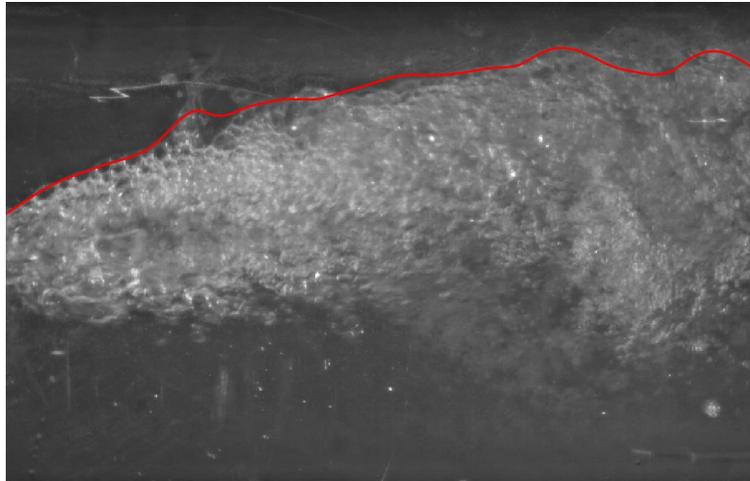


Figura 3.23. Ejemplo de imagen con estimación de la superficie libre del agua en el salto hidráulico.

Algunos parámetros que requiere el algoritmo, para su calibración, se eligieron de acuerdo a los recomendados por Leandro et al (2012). Los parámetros  $Ptr$ ,  $Ptr2$ ,  $limSt$  y  $limS$  se establecieron mediante observación y con base a los resultados de contenido de aire  $C$  obtenidos con la sonda de conductividad.

En la tabla 3.4 se muestran los parámetros utilizados en el algoritmo de procesamiento de imágenes para cada una de las mediciones.

Tabla 3.4. Parámetros  $Ptr$  y  $Ptr2$  para los 8 escenarios medidos.

Escenario	$Ptr$ (pixel)	$Ptr2$ (pixel)
1	30	110
2	30	105
3	30	120
4	30	115
5	22	75
6	10	70
7	30	150
8	30	150

El parámetro  $limS$  representa la superficie libre del agua calculada y  $limSt = limS - 50$ .

Conociendo la ubicación de la superficie libre del agua, el algoritmo de edición de imágenes se aplicó de manera individual para cada una de las columnas, de ancho de 1 pixel, de las imágenes. Un ejemplo de imagen editada se muestra en la figura 3.24.



Figura 3.24. Resultado del procedimiento de edición de imágenes definiendo la superficie libre del agua.

### 3.2.3.3 Algoritmo de intensidad de pixeles

Después de editar las imágenes se lleva a cabo el proceso para determinar el promedio de concentración de agua-aire para cada una de las mediciones en función de la intensidad de pixel de las imágenes obtenidas.

Con la finalidad de comparar de una mejor manera los resultados obtenidos con la sonda de conductividad y el procesamiento de imágenes con intensidad de pixel, se dividen las imágenes procesadas ( $m \times n$ ) en submatrices de  $10 \times 10$  pixeles ( $p \times q$ ) (figura 3.25), o si se desea puede ser un tamaño diferente, para obtener un promedio de los valores de los pixeles para cada submatriz. Por lo tanto, se obtienen imágenes de  $m/p \times n/q$ , aproximadamente de  $60 \times 46$  pixeles (figura 3.26). Lo anterior, permite dibujar perfiles de concentración agua-aire en toda la longitud de las imágenes capturadas.

La imagen que se ha mostrado como ejemplo corresponde al escenario 1 ( $Q1$ ). Para esta medición, se tomaron datos con la sonda a una distancia  $x = 32$  cm, que corresponde al pixel 60, en dirección horizontal, en la imagen obtenida con promedios de submatrices. En la figura 3.27 se muestra un perfil de intensidad de pixeles, que representa la concentración de agua-aire, de la imagen en la posición mencionada. Además, en la misma figura se grafica el perfil con el promedio de todas las imágenes ( $\approx 1000$ ) para este escenario.



Figura 3.25. División de imágenes en submatrices para obtener promedios de intensidad de pixel.

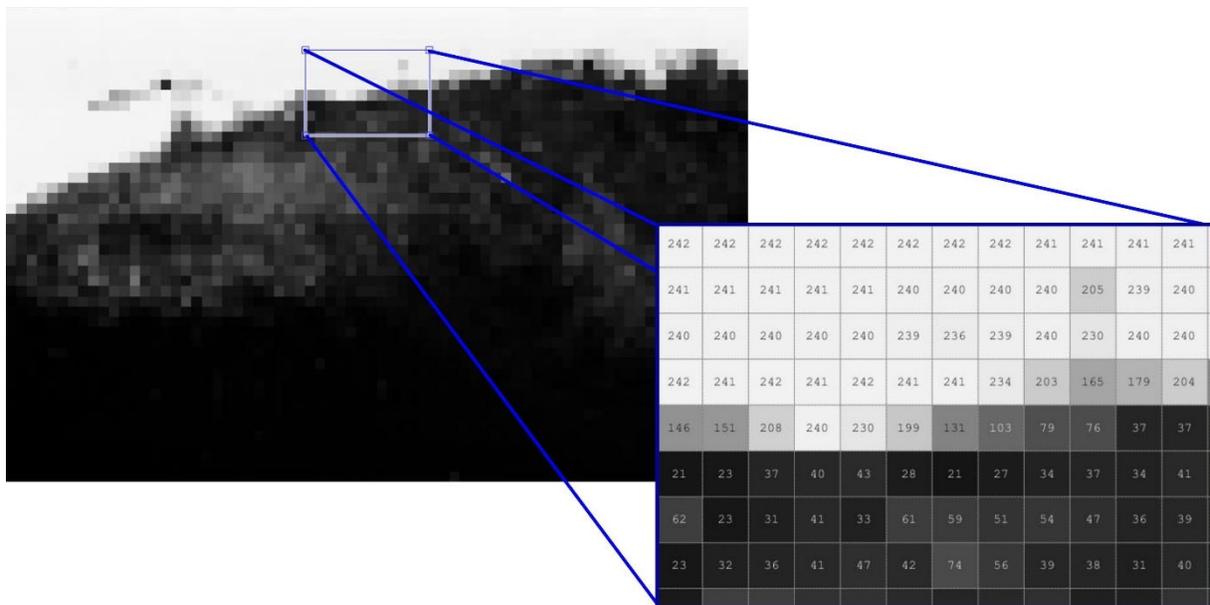


Figura 3.26. Imagen con promedios de píxeles en cada submatriz.

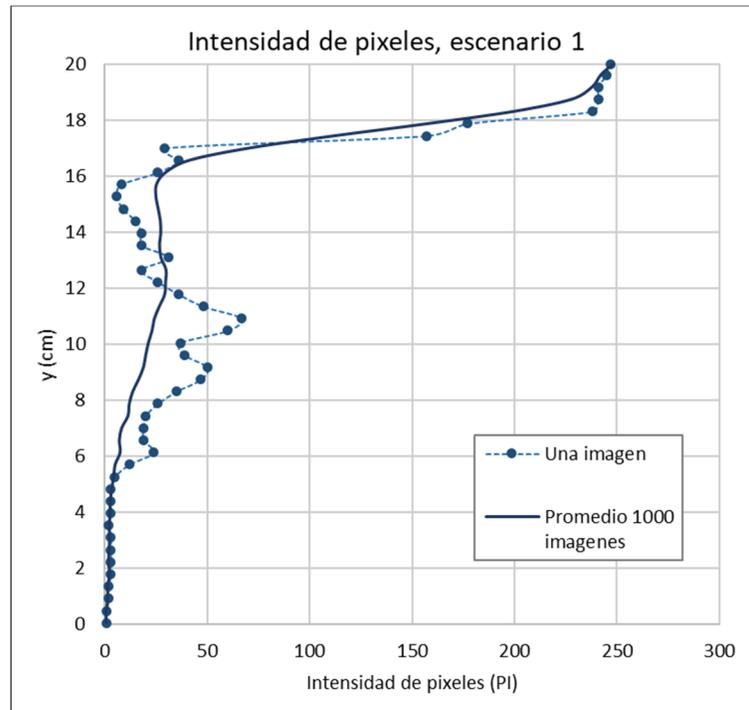


Figura 3.27. Gráfica de intensidad de píxeles en  $x=32$  cm para el escenario 1.

Al aplicar los algoritmos de procesamiento de imágenes y de intensidad de píxeles a cada una de las imágenes de un escenario, se calcula el promedio de intensidad de píxeles entre todas ellas para obtener la media de contenido de agua-aire  $C$  en el lapso de tiempo estudiado. En la figura 3.28 se muestra, como una imagen, el resultado para el escenario 1 (Q1), y en la figura 3.29 se pueden observar perfiles verticales de  $C$  a cada 5 centímetros en la longitud del salto hidráulico, de tal manera que uno de los perfiles corresponde a la distancia  $x$  (32 cm) a la que se midió con la sonda de conductividad.

### Aplicación en Matlab

La aplicación desarrollada para implementar los algoritmos para el procesamiento de las imágenes permite leer un grupo de  $n$  imágenes, así como visualizarlas para definir el área que deberá analizarse. Además, se capturan y ajustan los parámetros para obtener la mejor calibración. De manera opcional es posible realizar el cálculo considerando la superficie libre del flujo. La interfaz de la aplicación se muestra en la figura 3.30.

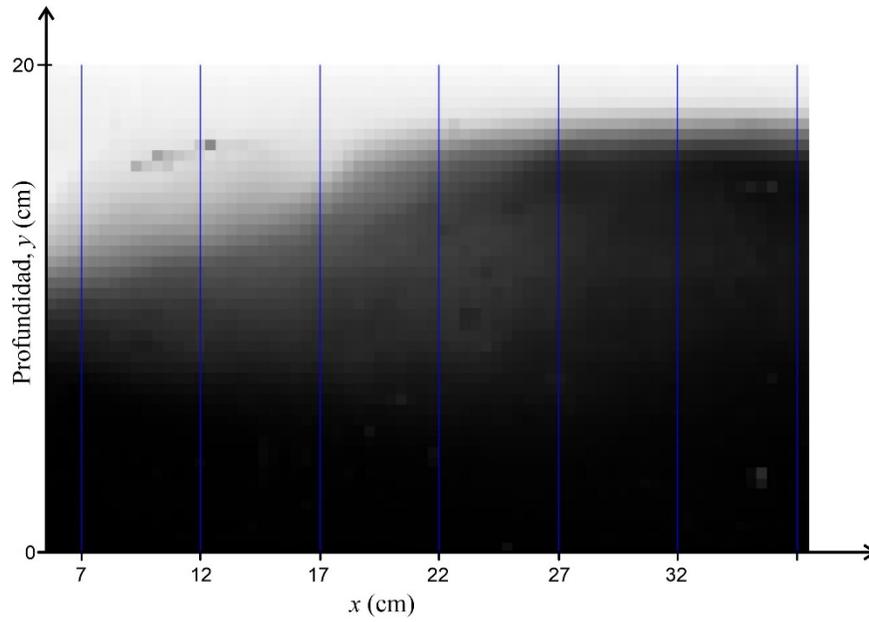


Figura 3.28. Promedio de intensidad de pixeles para el escenario 1 (Q1).

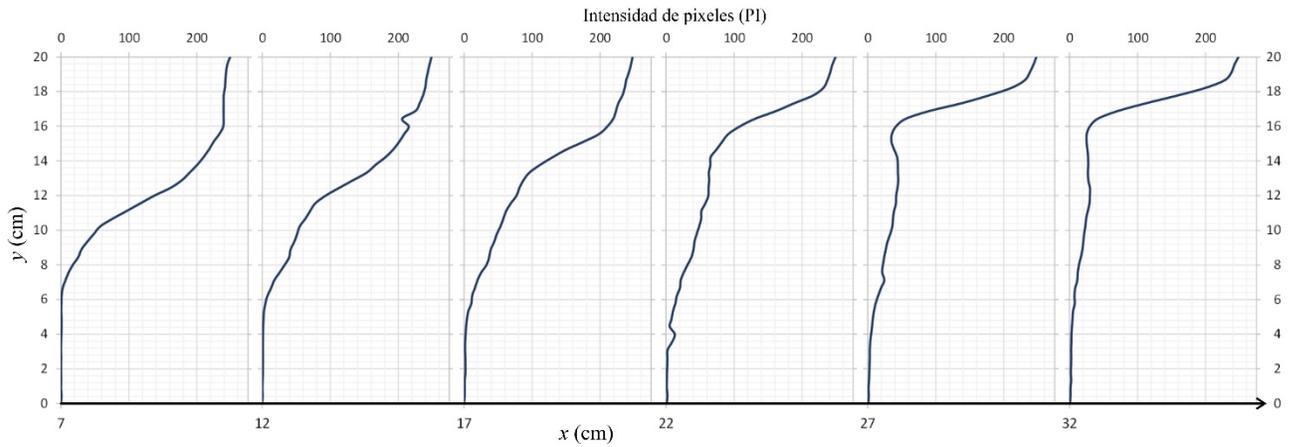


Figura 3.29. Perfiles de intensidad de pixeles a cada 5 centímetros del escenario 1, incluyendo en la posición de la sonda ( $x = 32$  cm).

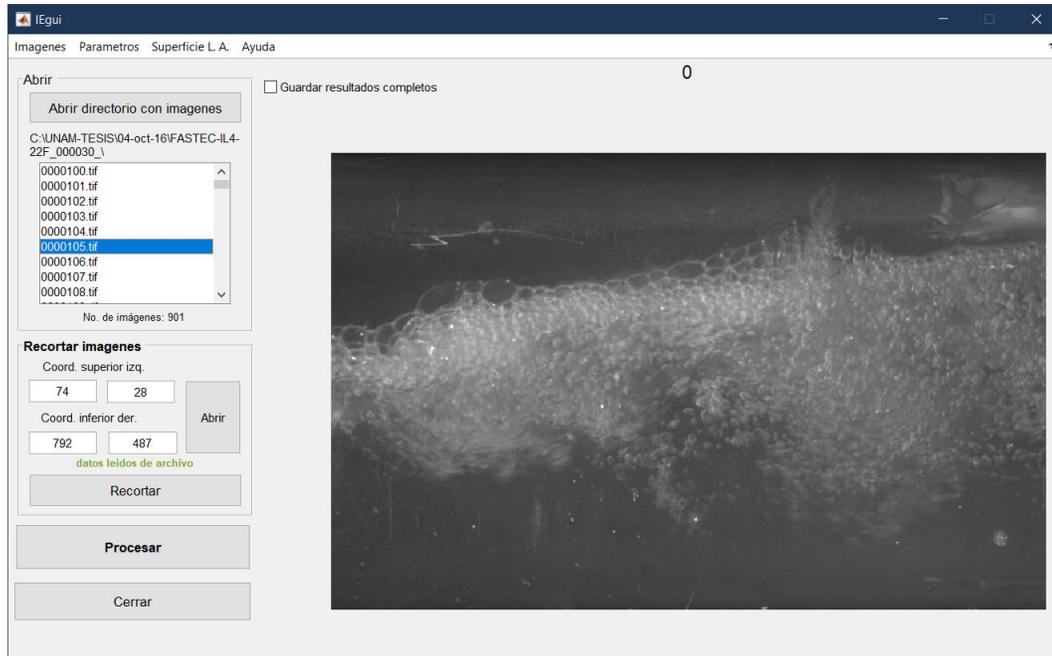


Figura 3.30. Interfaz gráfica de la aplicación desarrollada para el procesamiento de las imágenes.

### 3.2.3.4 Análisis de correlación

El análisis de correlación es el conjunto de técnicas estadísticas empleado para medir la intensidad de la asociación entre dos variables. El principal objetivo del análisis de correlación consiste en determinar qué tan intensa es la relación entre dos variables, estas pueden ser.

- Variable dependiente, es la variable que se predice o calcula cuya representación es "Y"
- Variable independiente, es la o las variables que proporcionan las bases para el cálculo, cuya representación es "X". Esta o estas variables suelen ocurrir antes en el tiempo que la variable dependiente.

### 3.2.3.5 Coeficiente de Correlación

El coeficiente de correlación más utilizado es el de Pearson, este es un índice estadístico que mide la relación lineal entre dos variables cuantitativas, es una forma de medir la intensidad de la relación lineal entre dos variables. El valor del coeficiente de correlación puede tomar valores desde menos uno hasta uno,  $-1 < r < 1$ , indicando que mientras más cercano a uno sea el valor

del coeficiente de correlación, en cualquier dirección, más fuerte será la asociación lineal entre las dos variables. El coeficiente de correlación de cálculo “ $r$ ” es un estimador muestral del coeficiente poblacional  $\rho$ .

Mientras más cercano a cero sea el coeficiente de correlación, este indicará que más débil es la asociación entre ambas variables. Si es igual a cero se concluirá que no existe relación lineal alguna entre ambas variables. Una de las maneras de calcular “ $r$ ”, es utilizando la fórmula clásica:

$$r = \frac{\sum[(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2 * \sum(Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3.2)$$

Donde  $\bar{X}$  e  $\bar{Y}$  son la media del conjunto de datos de las variables independiente y dependiente respectivamente.

### **3.2.3.6 Coeficiente de determinación**

Cuando se explora una correlación lineal entre variables cuantitativas, parte de la variación de la variable  $Y$  puede ser debida a  $X$ . Sin embargo, en alguna proporción esta variabilidad se deberá a otros factores o como efecto del azar. El coeficiente de determinación puede ser calculado para mostrar la proporción de variabilidad de la variable  $Y$  que es atribuida a la relación lineal con  $X$ .

El coeficiente de determinación se obtiene elevando al cuadrado el valor del coeficiente de correlación ( $r^2$  o  $R^2$ ). El coeficiente de determinación podrá tomar valores entre 0 y 1. Valores cercanos a 1 implican que una gran proporción de la variabilidad de  $Y$  es explicada por  $X$ .

Realizando el cálculo del coeficiente de determinación para los datos de contenido de agua-aire  $C$  obtenidos con la sonda de conductividad y el procesamiento de imágenes, para el caso del escenario uno se obtiene un valor  $R^2 = 0.98$ , (ver figura 3.31).

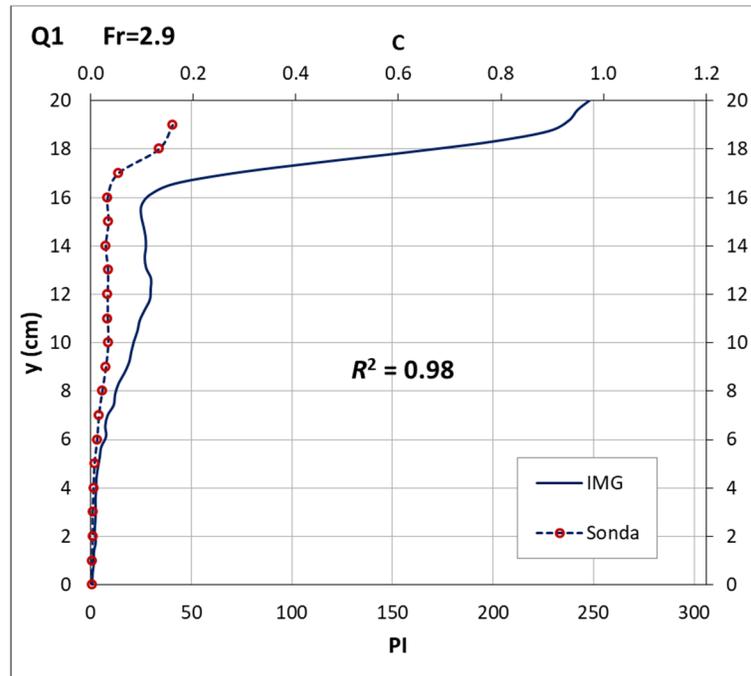


Figura 3.31. Resultados de contenido agua-aire obtenido con sonda de conductividad y método de procesamiento de imágenes. Escenario 1 (Q1).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, la presente investigación consiste en obtener perfiles de contenido agua-aire, en un salto hidráulico ubicado al final de una bolsa de aire en un conducto a presión. La acumulación de aire se presenta debido a que aguas arriba de esta, la pendiente es ascendente y aguas abajo la pendiente es descendente. La medición de  $C$  se realizó utilizando dos métodos distintos, un método intrusivo mediante la utilización de una sonda de conductividad de doble punta, y un método no intrusivo que consiste en el procesamiento de imágenes capturadas con una cámara de alta velocidad.

Las características de los diferentes escenarios que se propusieron se muestran en la tabla 4.1. En la mitad de los casos se presentó un resalto hidráulico débil, mientras que la otra mitad un resalto del tipo oscilante, de acuerdo a la magnitud del número de Froude.

Tabla 4.1. Condiciones de flujo para los escenarios del experimento.

Escenario	$S$	$V$ (m/s)	$Q$ (l/s)	$Fr$	$Re$	Tirante (cm)	Tipo de resalto
Q1	0.11	2.11	22.5	2.9	140,400	7.40	Oscilante
Q2	0.11	2.17	26.8	2.8	167,200	8.26	Oscilante
Q3	0.10	1.99	19.3	2.8	120,100	6.89	Oscilante
Q4	0.10	2.01	22.5	2.7	140,600	7.69	Oscilante
Q5	0.07	1.70	20.2	2.2	126,000	8.02	Débil
Q6	0.07	1.84	22.6	2.4	141,100	8.22	Débil
Q7	0.03	1.53	21.2	1.9	132,200	8.99	Débil
Q8	0.03	1.59	24.9	1.8	155,000	9.90	Débil

Una vez que se han ajustado los parámetros de los algoritmos, propuestos por Leandro et al. (2012), para obtener el promedio de imágenes procesadas, que representan el contenido de agua-aire  $C$  en función de la intensidad de píxeles, es posible graficar perfiles de  $C$  verticales a distintas longitudes  $x$  en el rango de captura de las imágenes.

Para efecto de comparar los resultados obtenidos con ambas técnicas se muestran los perfiles de  $C$  medidos con la sonda y los obtenidos con las imágenes para los 8 escenarios (figura 4.1 a la figura 4.8). Los datos numéricos se pueden consultar en el APÉNDICE B.

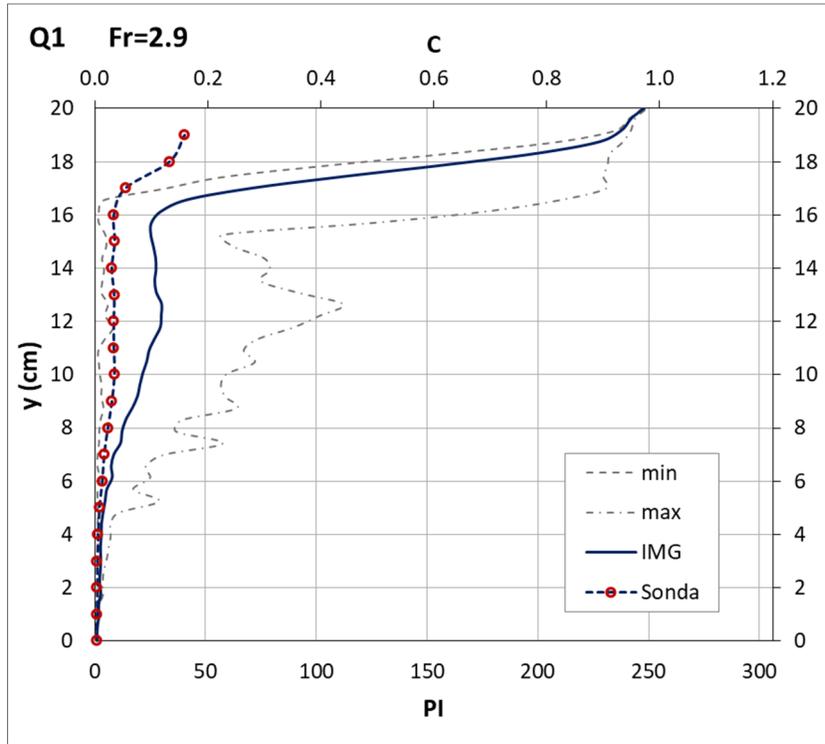


Figura 4.1. Perfiles de concentración de aire con 2 métodos, escenario 1,  $x=32$  cm.

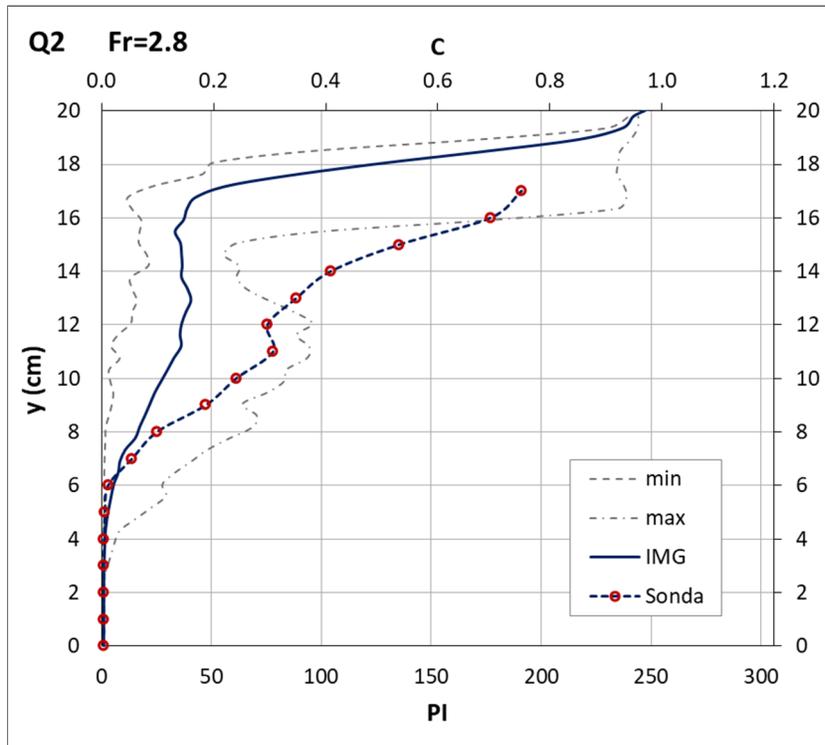


Figura 4.2. Perfiles de concentración de aire con 2 métodos, escenario 2,  $x=30$  cm.

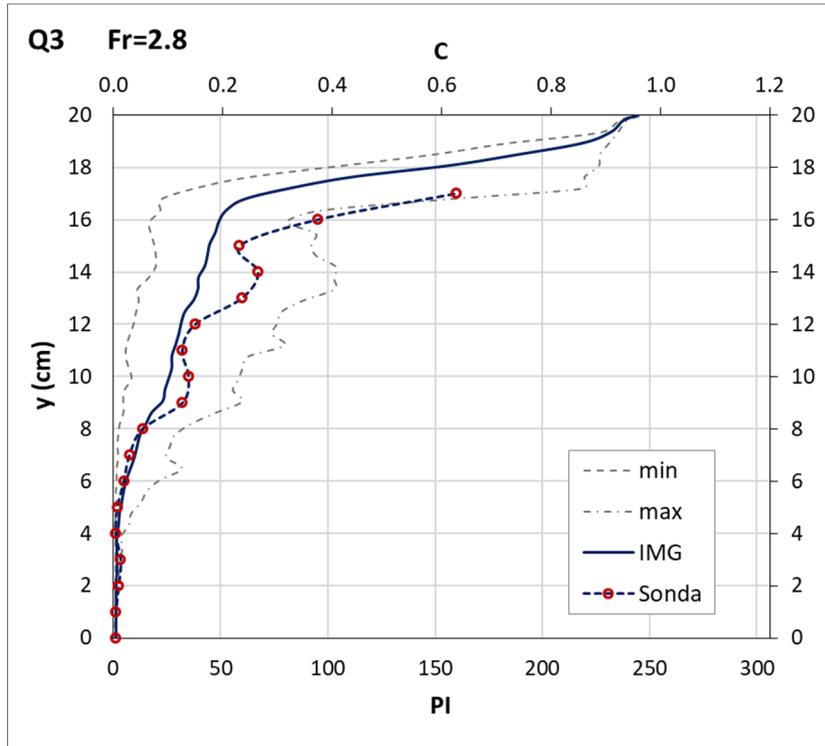


Figura 4.3. Perfiles de concentración de aire con 2 métodos, escenario 3,  $x=27$  cm

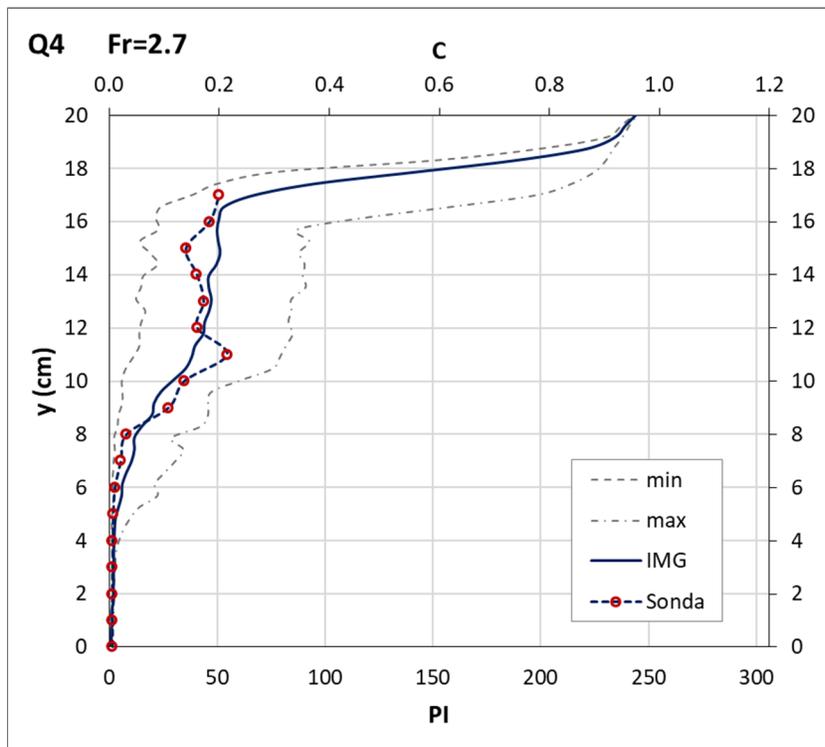


Figura 4.4. Perfiles de concentración de aire con 2 métodos, escenario 4,  $x=31$  cm.

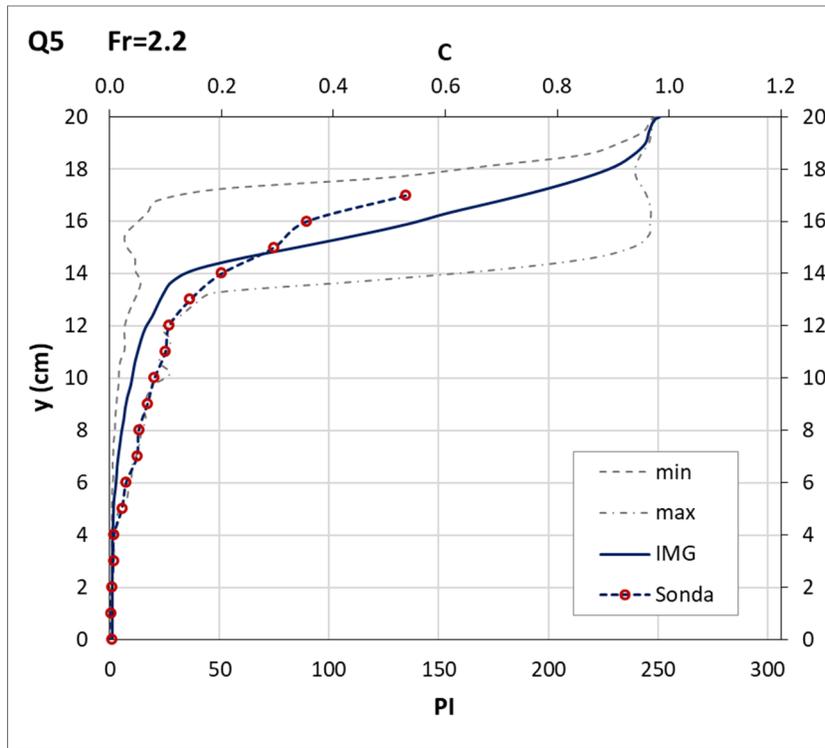


Figura 4.5. Perfiles de concentración de aire con 2 métodos, escenario 5,  $x=23$  cm.

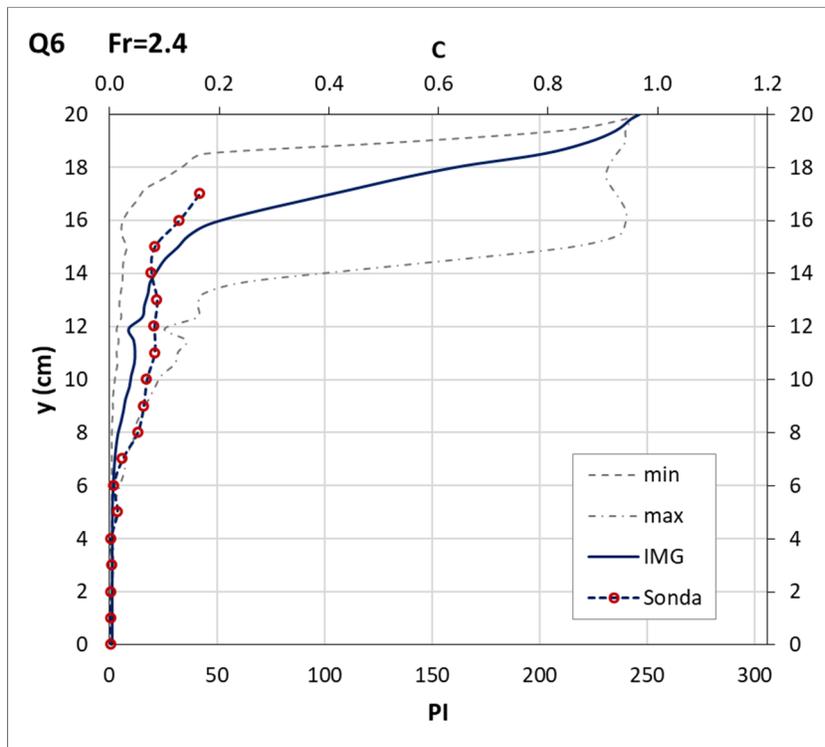


Figura 4.6. Perfiles de concentración de aire con 2 métodos, escenario 6,  $x=23$  cm.

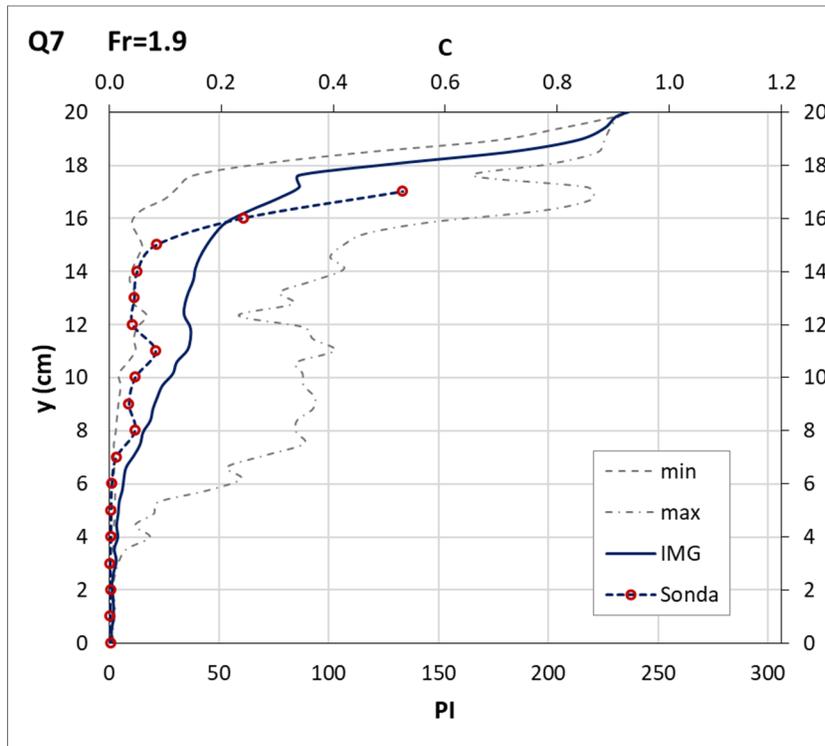


Figura 4.7. Perfiles de concentración de aire con 2 métodos, escenario 7,  $x=32$  cm.

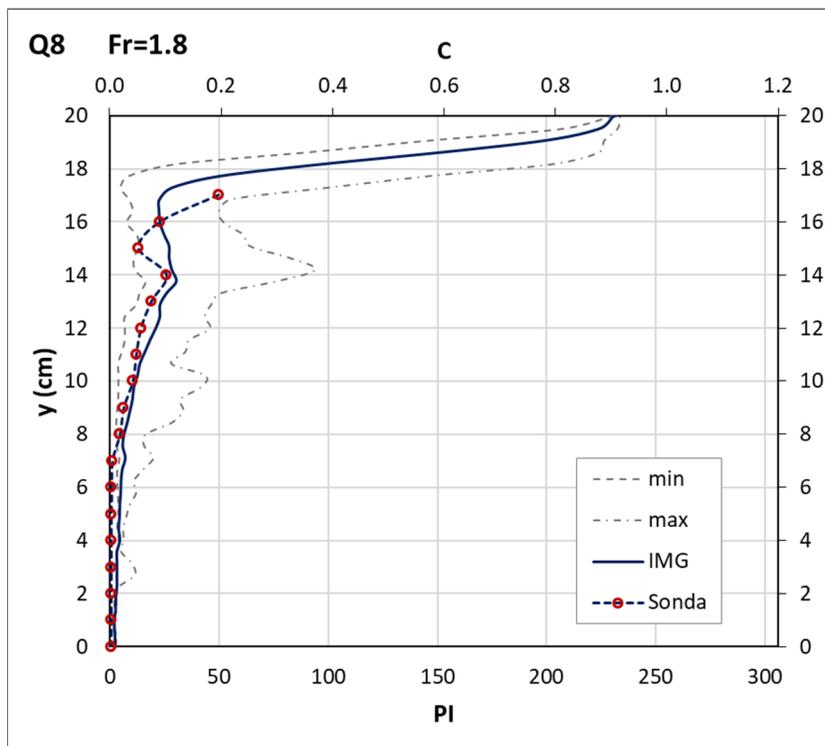


Figura 4.8. Perfiles de concentración de aire con 2 métodos, escenario 8,  $x=34$  cm.

En las figuras anteriores, IMG es la curva de  $C$  obtenida con el procesamiento de imágenes, Sonda es el perfil de  $C$  obtenido con la sonda de conductividad, min y max se refieren a los valores mínimos y máximos de intensidad de pixel de promediar grupos de 20 imágenes (50 grupos).

Los coeficientes de determinación se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Coeficientes de determinación para cada uno de los escenarios medidos.

Escenario	$R^2$
1	0.99
2	0.85
3	0.93
4	0.89
5	0.94
6	0.73
7	0.74
8	0.68

De manera visual se observa que en la mayoría de los escenarios los perfiles de  $C$  tienen un buen ajuste. En los escenarios 1 y 2 es en donde se aprecia una mayor discrepancia entre los perfiles, obtenidos con la sonda y mediante el procesamiento de imágenes. Como se mencionó antes, para que el salto hidráulico se mantenga en la misma posición durante las mediciones, fue necesario abrir una válvula para que ingresara una pequeña cantidad de aire de manera continua. Se cree, que además de otros factores, en estos dos casos el salto hidráulico cambio de posición en los instantes en los que se midió con la sonda y cuando se tomaron las fotografías. En el caso del escenario 1 es posible que el movimiento del salto se diera hacia aguas arriba y en el escenario 2 hacia aguas abajo.

Para el caso del escenario 2, se analizaron los perfiles para valores diferentes de  $x$  y se observó que para  $x=15$  cm mejora la coincidencia con los resultados de la sonda (ver figura 4.9).

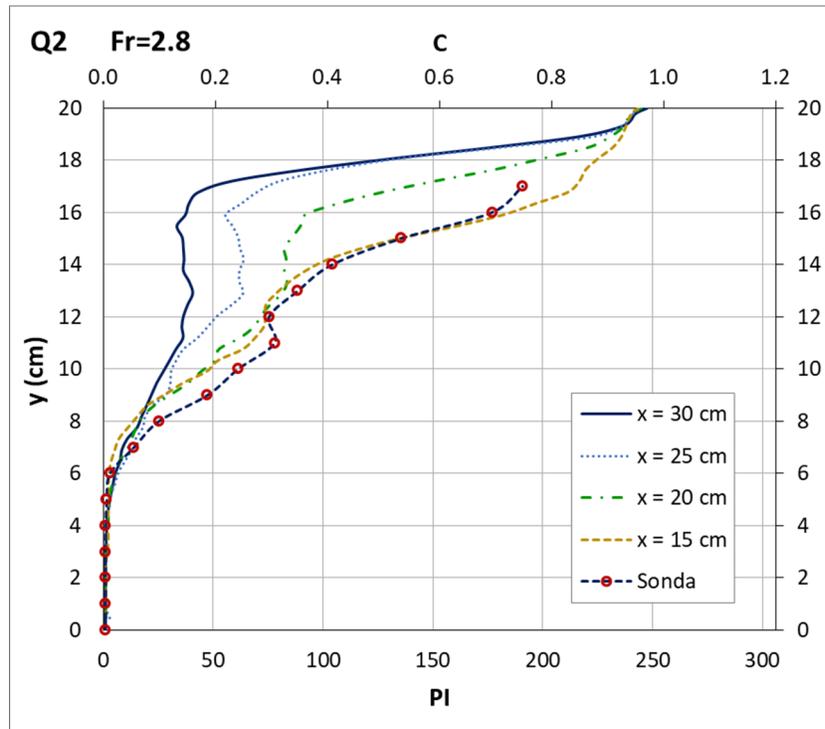


Figura 4.9. Perfil de C con mejor coincidencia para el escenario 2.

Los resultados del procesamiento de imágenes son matrices de intensidad de pixel en escala de grises (de 8 bits), que pueden ser representados en forma de imágenes. De la figura 4.10 a la figura 4.25 se muestra el resultado para los 8 escenarios. En las imágenes, el ancho es la distancia en centímetros, al que se recortó cada imagen y se indica el eje vertical (en azul) la posición en donde se midió  $C$  con la sonda. La altura es el diámetro de la tubería (20 cm). La barra de intensidad de pixeles mostrada al lado derecho de cada imagen, que va de 0 a 255, representa  $C$  en cualquier punto de la imagen, 0 es 100% agua y 255 es 100% aire.

En las imágenes se puede ver que su ancho es variable, esto se debe a que los recortes, para cada escenario, se realizaron con la mayor amplitud posible.

En el intervalo de figuras mencionado también se muestran los perfiles de  $C$  de cada imagen a las distancias: 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 35 centímetros. Algunos pixeles con mayor intensidad (más oscuros) que se observan en la zona superior izquierda de las imágenes promediadas se deben a una imperfección en el exterior del tubo.

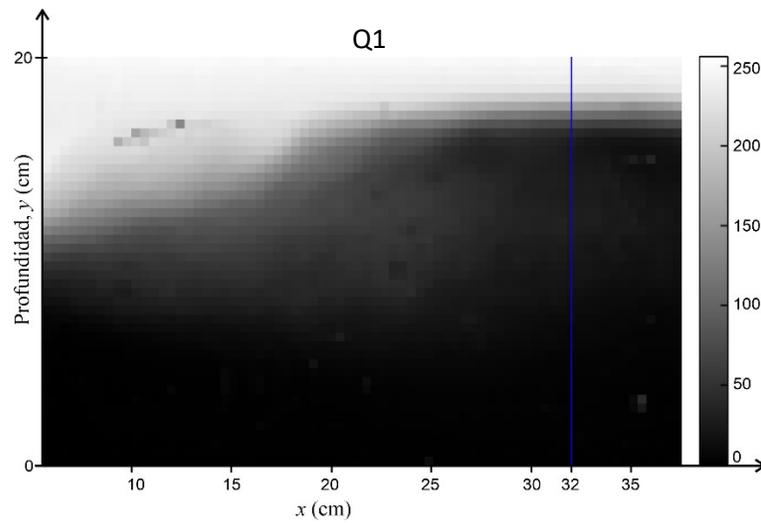


Figura 4.10. Resultado del procesamiento de imágenes para el escenario 1.

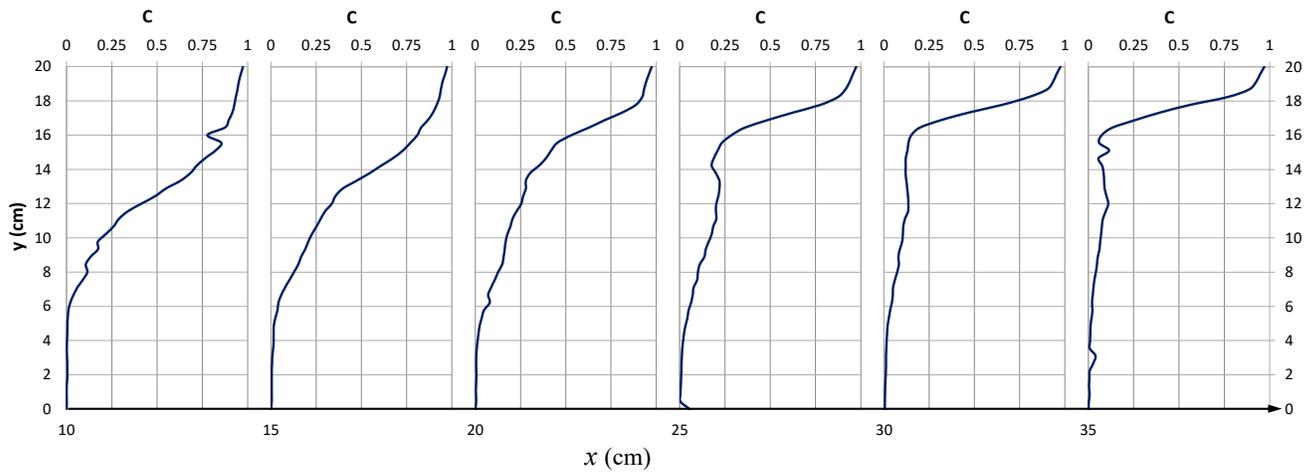


Figura 4.11. Perfiles de C a cada 5 centímetros para el escenario 1.

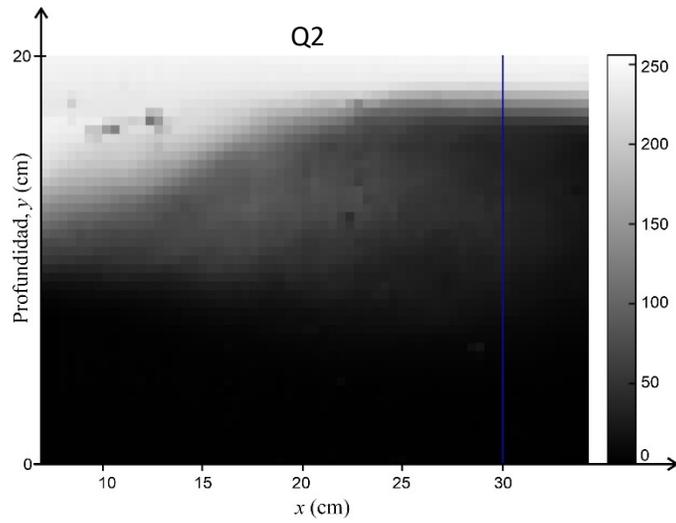


Figura 4.12. Resultado del procesamiento de imágenes para el escenario 2.

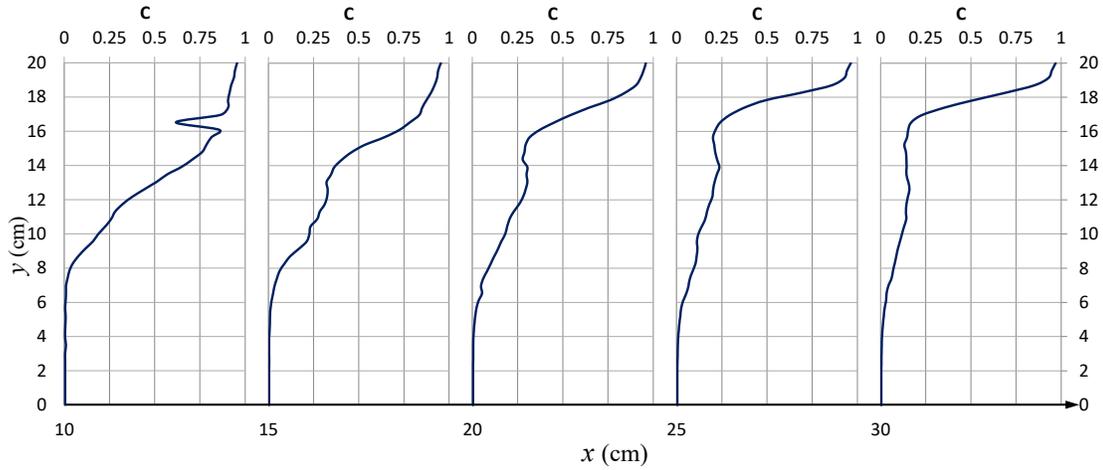


Figura 4.13. Perfiles de C a cada 5 centímetros para el escenario 2.

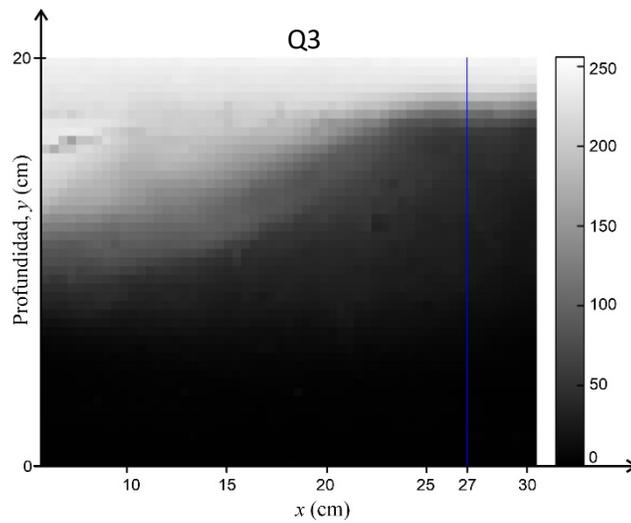


Figura 4.14. Resultado del procesamiento de imágenes para el escenario 3.

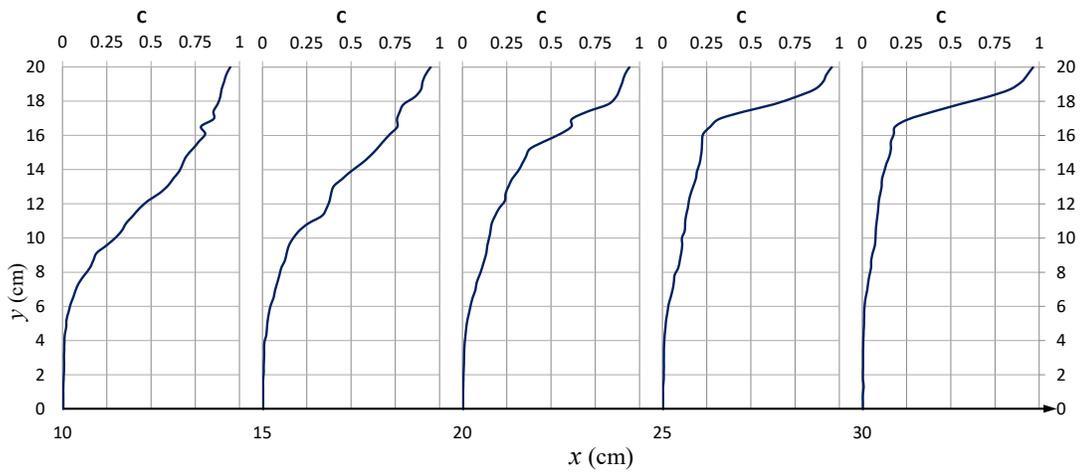


Figura 4.15. Perfiles de C a cada 5 centímetros para el escenario 3.

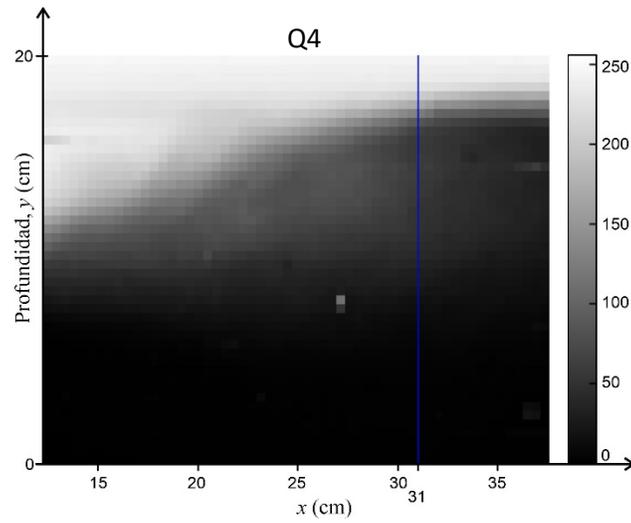


Figura 4.16. Resultado del procesamiento de imágenes para el escenario 4.

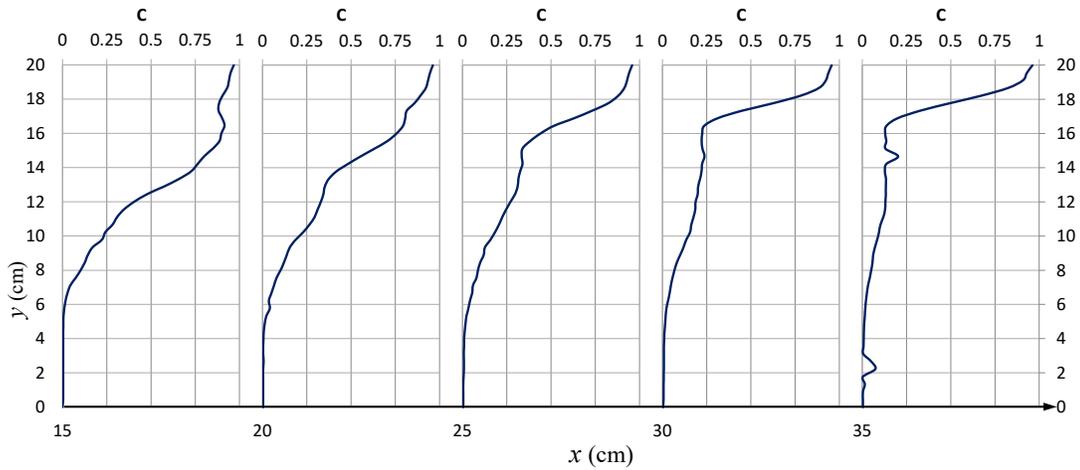


Figura 4.17. Perfiles de C a cada 5 centímetros para el escenario 4.

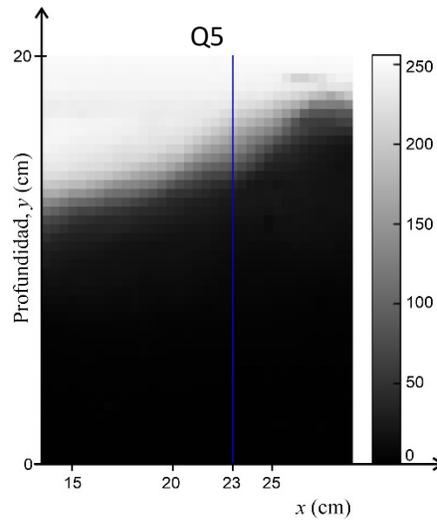


Figura 4.18. Resultado del procesamiento de imágenes para el escenario 5.

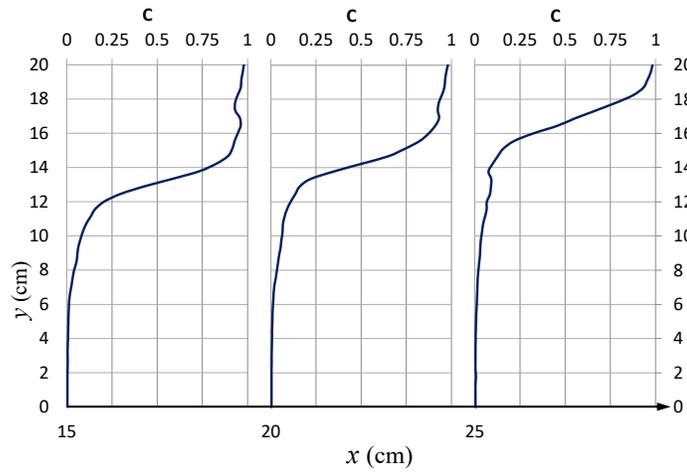


Figura 4.19. Perfiles de C a cada 5 centímetros para el escenario 5.

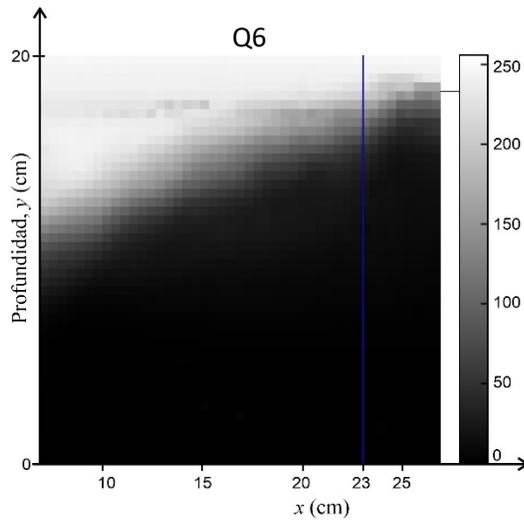


Figura 4.20. Resultado del procesamiento de imágenes para el escenario 6.

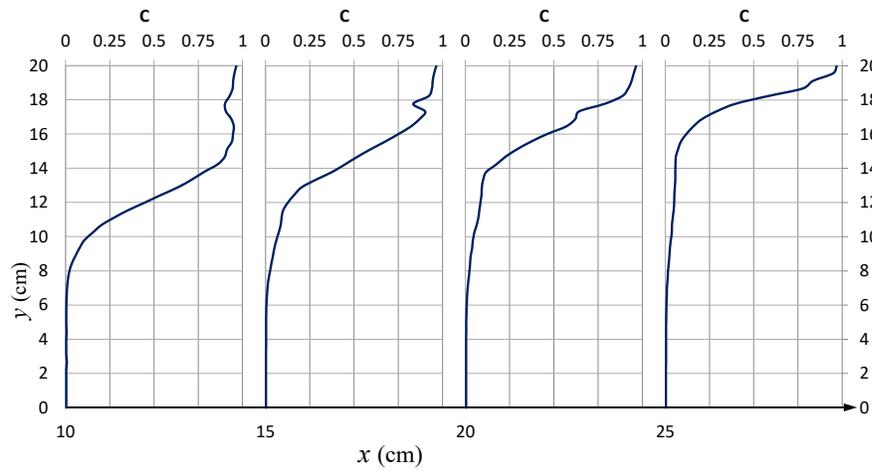


Figura 4.21. Perfiles de C a cada 5 centímetros para el escenario 6.

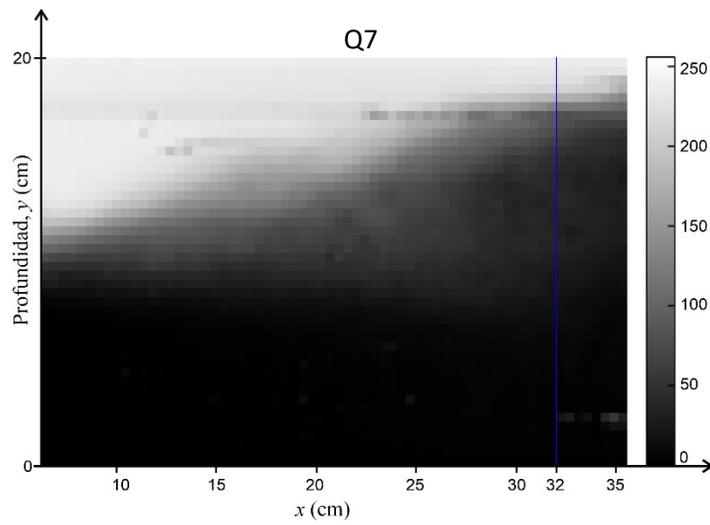


Figura 4.22. Resultado del procesamiento de imágenes para el escenario 7.

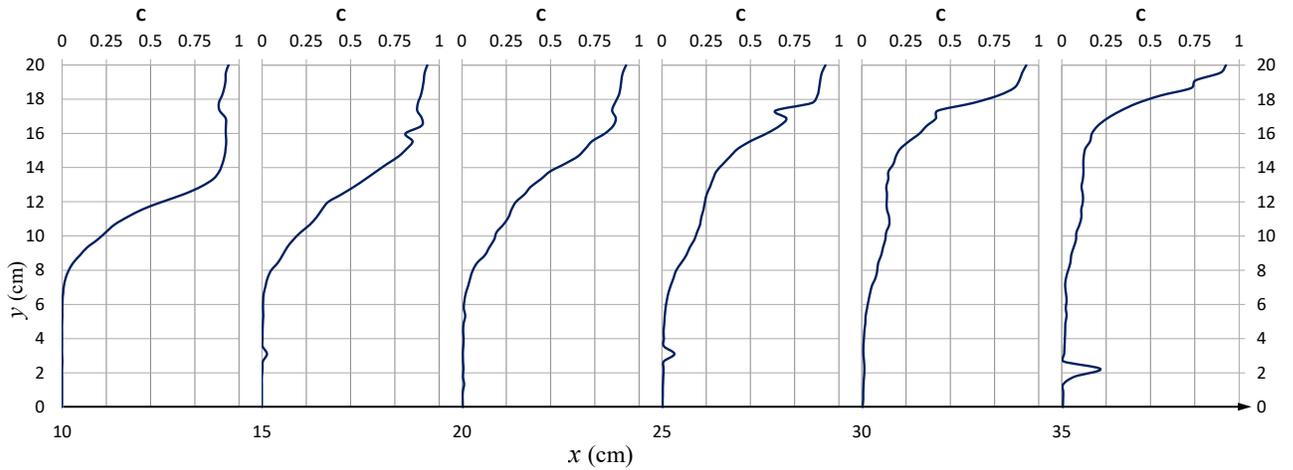


Figura 4.23. Perfiles de C a cada 5 centímetros para el escenario 7.

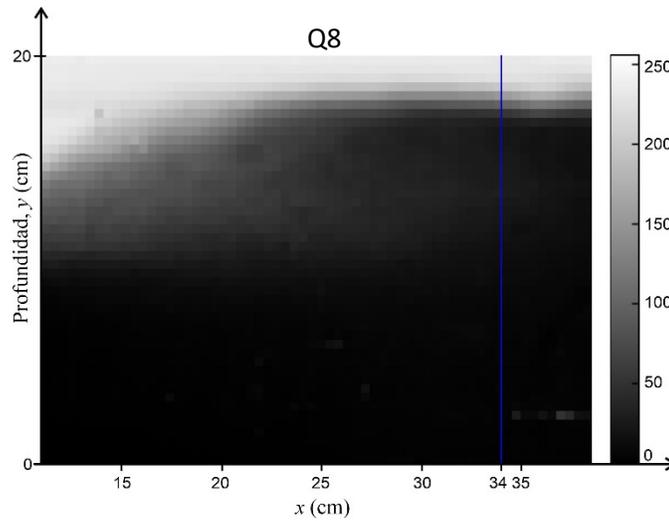


Figura 4.24. Resultado del procesamiento de imágenes para el escenario 8.

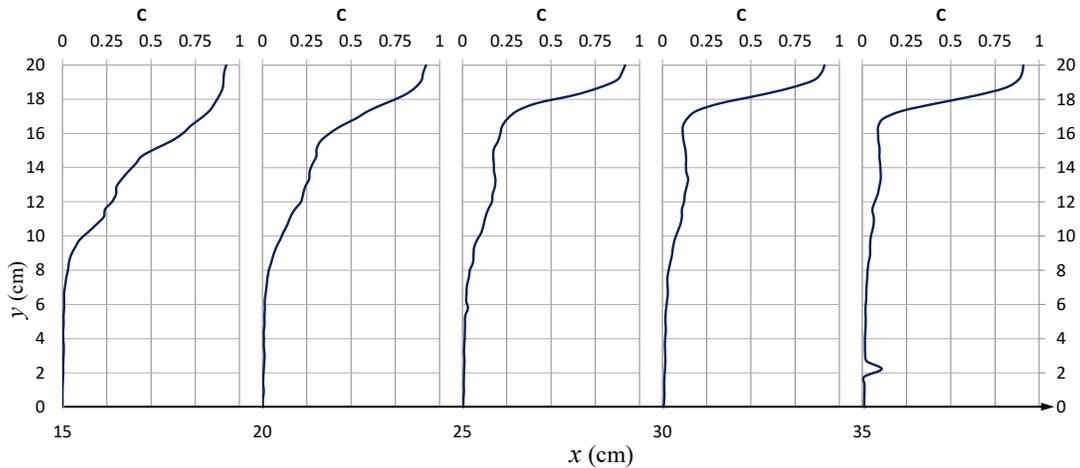


Figura 4.25. Perfiles de C a cada 5 centímetros para el escenario 8.

Una de las ventajas del método de procesamiento de imágenes para obtener la concentración de aire en el salto hidráulico es que se pueden obtener perfiles de concentración-tirante en el tiempo, debido a que es posible graficar los perfiles para cada una de las imágenes capturadas o incluso el perfil promedio de grupos de imágenes en el tiempo. De la figura 4.26 a la figura 4.33 se muestran perfiles de concentración de aire correspondientes a tiempos de 0.2, 0.6, 1.0, 1.4 y 1.8 segundos respectivamente, para cada una de las alternativas. En estos perfiles se puede apreciar la variación de la concentración de aire en el flujo en un lapso de tiempo de 1.6 segundos.

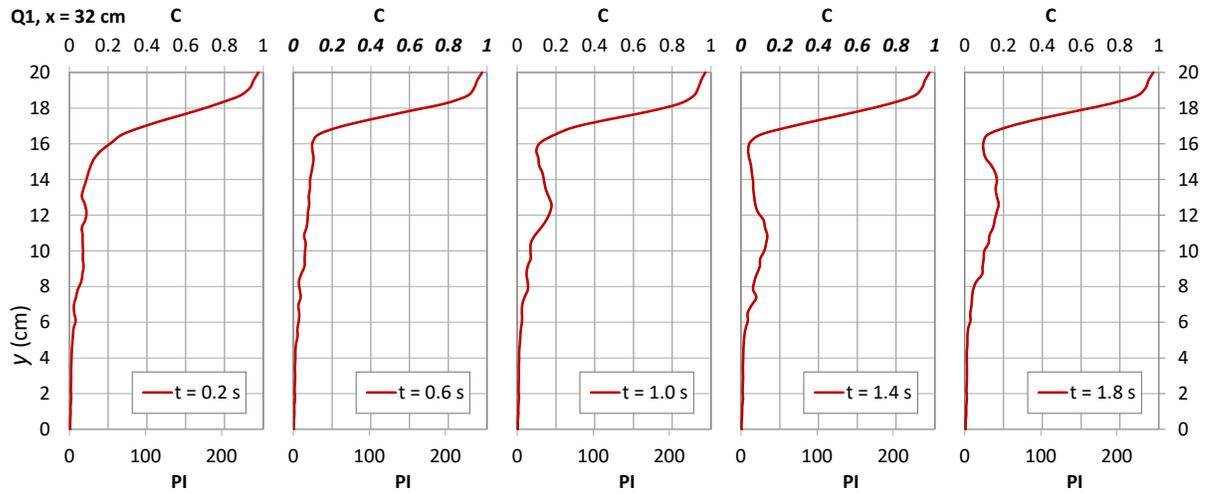


Figura 4.26. Serie de tiempo para el escenario 1 en  $x = 32$  centímetros.

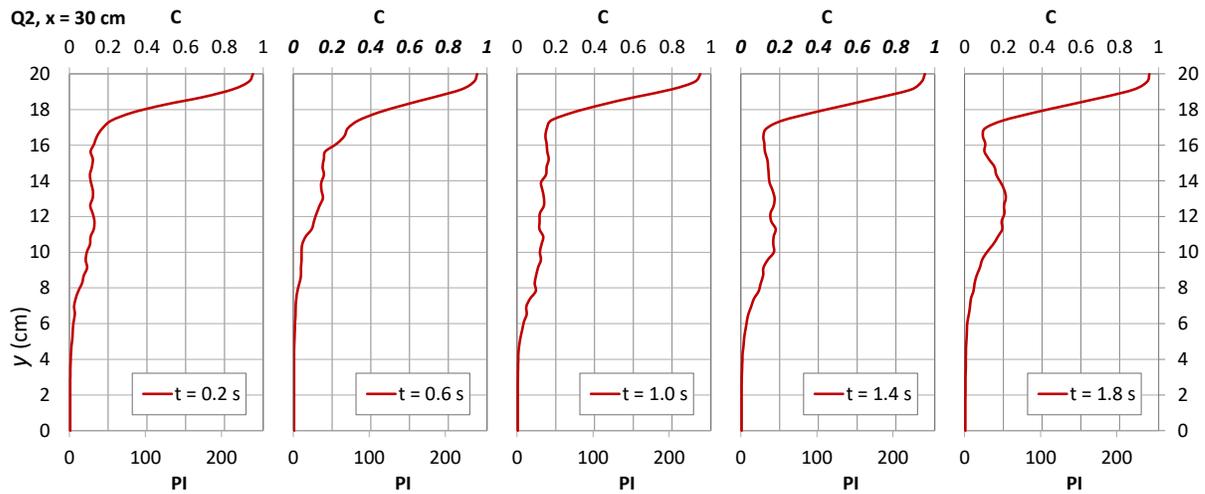


Figura 4.27. Serie de tiempo para el escenario 2 en  $x = 30$  centímetros.

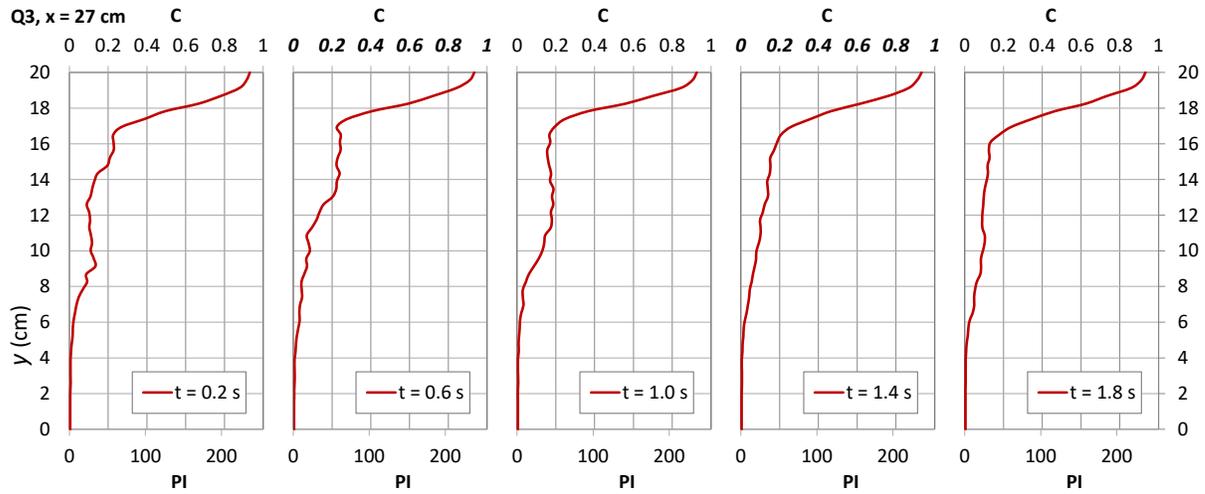


Figura 4.28. Serie de tiempo para el escenario 3 en  $x = 27$  centímetros.

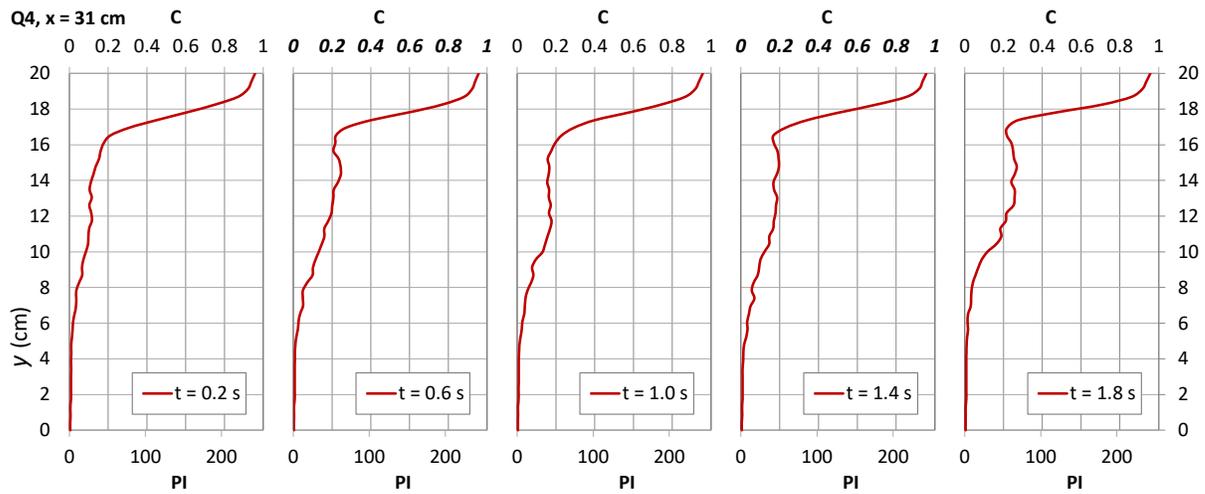


Figura 4.29. Serie de tiempo para el escenario 4 en  $x = 31$  centímetros.

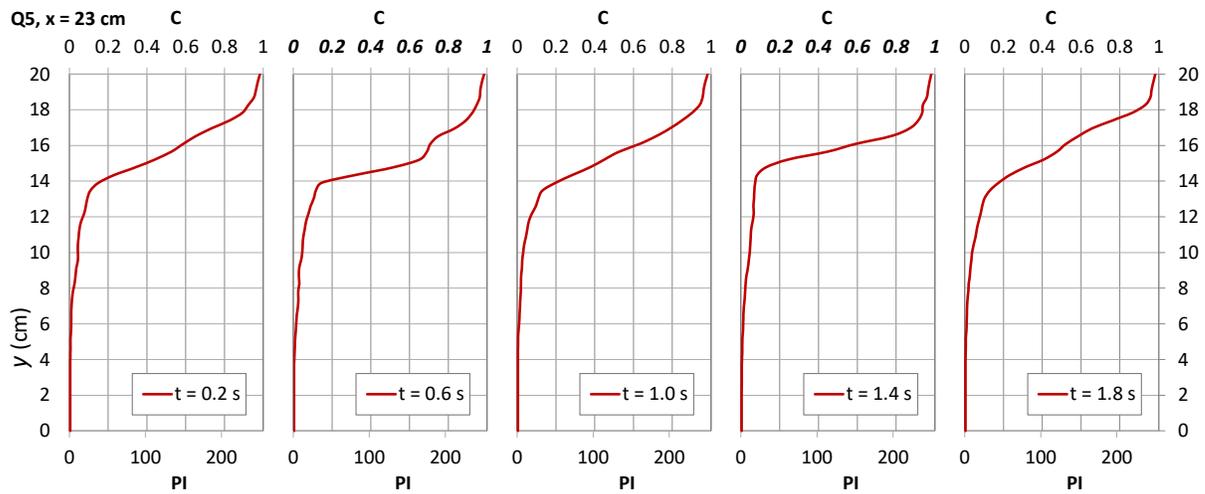


Figura 4.30. Serie de tiempo para el escenario 5 en  $x = 23$  centímetros.

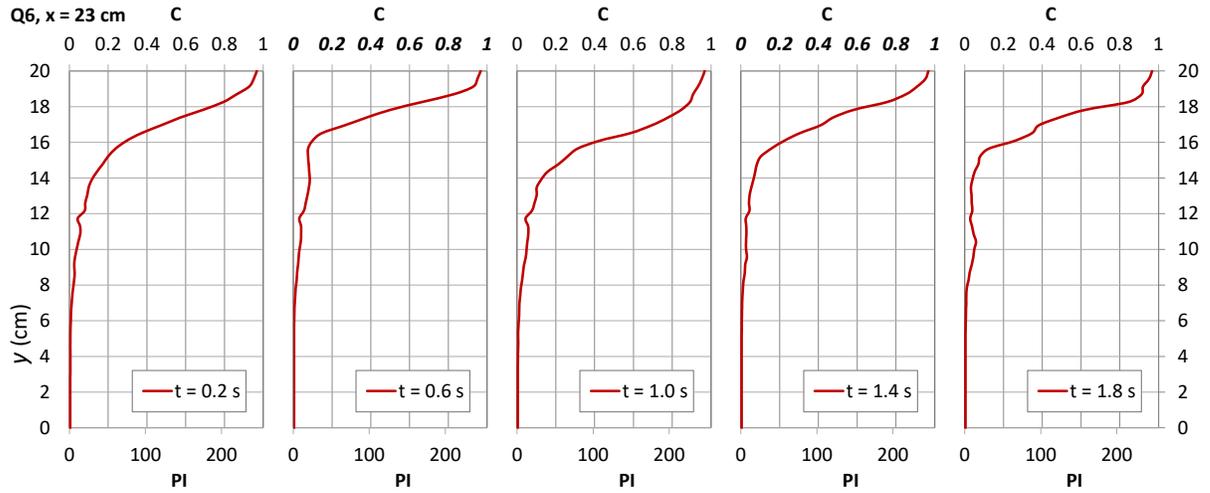


Figura 4.31. Serie de tiempo para el escenario 6 en  $x = 23$  centímetros.

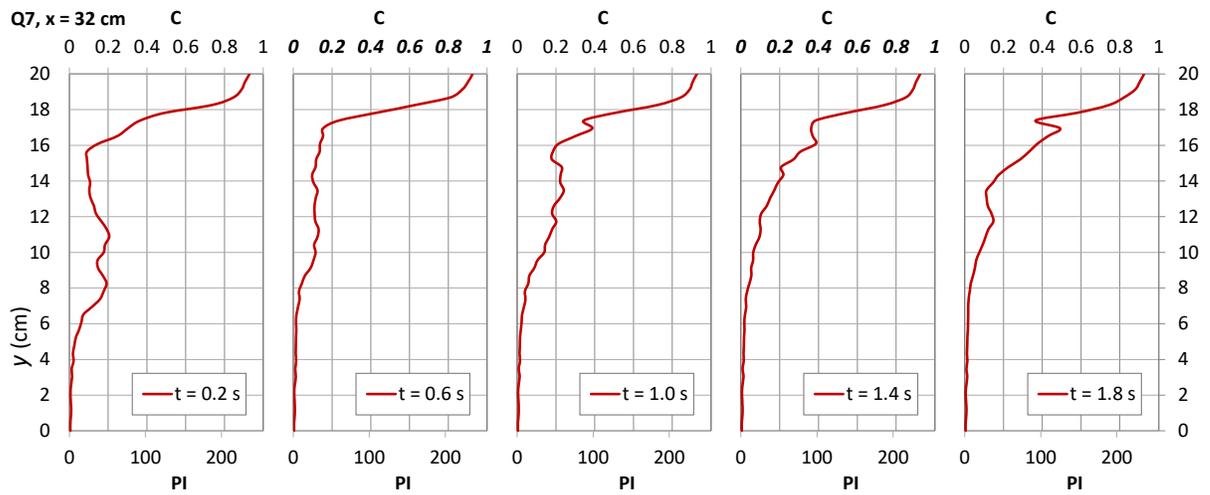


Figura 4.32. Serie de tiempo para el escenario 7 en  $x = 32$  centímetros.

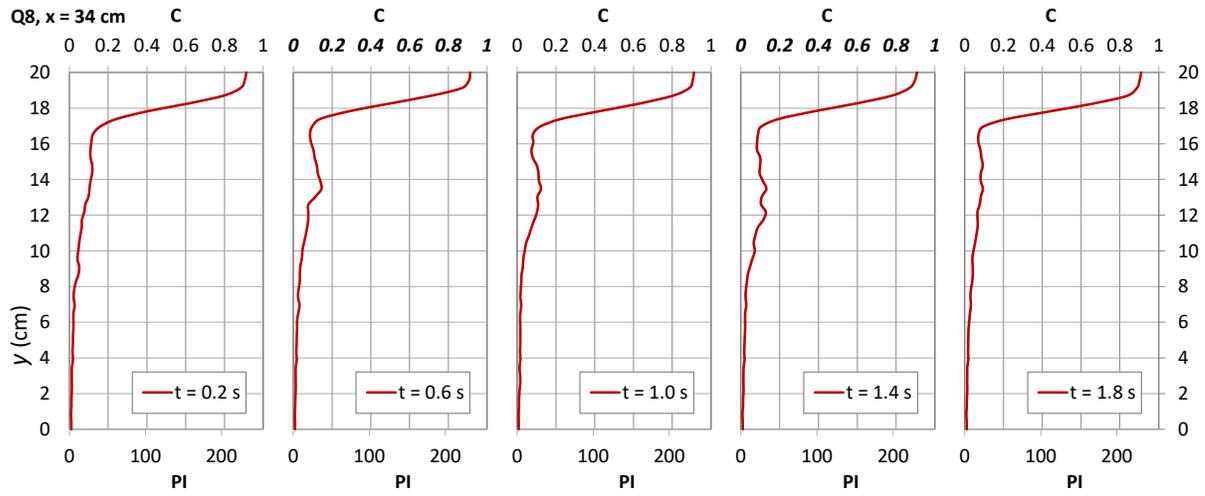


Figura 4.33. Serie de tiempo para el escenario 8 en  $x = 34$  centímetros.

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

El uso de técnicas de procesamiento de imágenes para obtener la concentración de agua-aire en un salto hidráulico presente en un acueducto a presión, puede ser una importante herramienta para complementar resultados que se obtienen utilizando técnicas intrusivas.

La técnica de procesamiento de imágenes, que tiene como base la intensidad de píxeles, permite analizar el comportamiento de las concentraciones de aire en el espacio y tiempo en todos los puntos del área de la imagen resultado, perfiles verticales y perfiles horizontales. Para obtener mejores resultados utilizando el procesamiento de imágenes es importante una adecuada calibración en el proceso de validación.

El método no intrusivo de procesamiento de imágenes tiene la ventaja de hacer mediciones en una cierta longitud del salto hidráulico sin interferir con el flujo, al contrario de métodos intrusivos en donde se utiliza una sonda para llevar a cabo las mediciones.

Al comparar los resultados, se observa una tendencia consistente entre ambos métodos, sin embargo, se presenta una mayor diferencia en dos de los casos. Una de las causas de estas diferencias, puede deberse a que una vez ingresado el aire y formarse la bolsa, la ubicación del salto es inestable en la dirección del flujo. Como resultado de una gran variedad de investigaciones (Kalinske y Robertson (1943), entre otros) se sabe que una cierta cantidad de burbujas son arrastradas por el flujo, lo que le resta pequeños volúmenes a la bolsa de aire, provocando que el salto se mueva de forma lenta hacia aguas arriba.

La localización de la superficie libre del agua, en el resalto hidráulico, resultó útil para mejorar los resultados, con el método de procesamiento de imágenes, en la zona de transición, ya que en algunos casos se obtenían zonas oscuras por encima de la superficie libre del agua y zonas claras por debajo de esta.

Las condiciones ambientales al momento de capturar las imágenes, en el caso del método no intrusivo, es un factor relevante que puede afectar de manera significativa el procedimiento de cálculo y los resultados. En el presente estudio, en dos de los escenarios, fue notable la diferencia de las imágenes obtenidas, con respecto a las demás, lo que afectó en el proceso de calibración de parámetros que requiere el algoritmo.

Aunque en el estudio realizado por Leandro et al. (2012) se utilizó un canal rectangular, la similitud entre los resultados, obtenidos con una sonda de conductividad y la técnica de procesamiento de imágenes, es similar, como se aprecia en la figura 5.1.

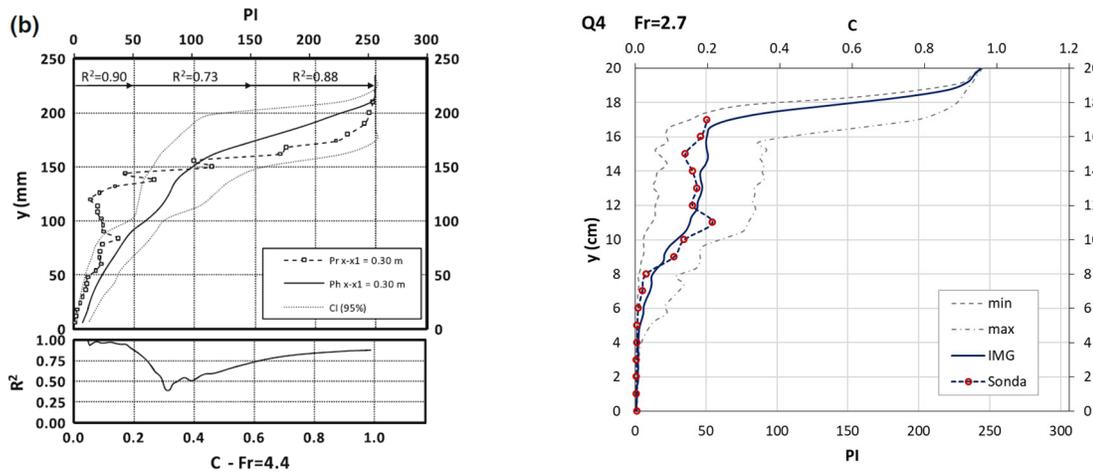


Figura 5.1. Resultados de concentración agua-aire con métodos intrusivos y no intrusivos. Izquierda: Estudio realizado por Leandro et al. (2012). Derecha: presente estudio.

Para evitar que el salto hidráulico cambie de posición, cuando se trata de una tubería a presión, es conveniente determinar el gasto de aire que es arrastrado por el flujo para reponerlo calibrando una válvula que permita el ingreso de la misma cantidad de aire.

## Recomendaciones

- En la captura de imágenes para el método no intrusivo, es preferible realizarse en la menor cantidad de sesiones posible, cuando no se disponga de elementos suficientes para igualar las condiciones ambientales. Esto ayudara a agilizar el proceso de calibración y validación.
- Si en el futuro se concluye utilizar el procesamiento de imágenes para el análisis de contenido de aire en un salto hidráulico, se sugiere establecer condiciones ambientales y parámetros de calibración específicos, de acuerdo a distintas investigaciones. El presente estudio podría representar una referencia.
- Para futuras investigaciones se recomienda realizar mediciones con el método intrusivo y no intrusivo en iguales intervalos de tiempo, por ejemplo, si se obtienen datos con una sonda de conductividad en un lapso de tiempo de 10 segundos, capturar las imágenes durante ese mismo tiempo. Lo anterior ayudara a estudiar si afecta de manera significativa en los resultados el considerar tiempos distintos, como el caso del presente estudio.

- El color de la tubería que se utiliza para el experimento puede afectar los resultados de la técnica de procesamiento de imágenes, por lo tanto, se sugiere que, para estudios posteriores se utilicen tuberías transparentes sin alguna tonalidad de color.
- Se sugiere, para el caso de otros estudios, se utilice una técnica diferente para determinar la superficie libre del flujo en el salto hidráulico. Lo que puede permitir comprar los resultados con los obtenidos en el presente estudio.
- Se recomienda realizar un análisis con los resultados obtenidos en la presente investigación, para intentar establecer un modelo matemático que ayude definir el comportamiento del flujo agua-aire que se presenta en un salto hidráulico en acueductos a presión.

## REFERENCIAS

Afshar, N. R., Asawa, G. L., & Raju, K. R. (1994). Air concentration distribution in self-aerated flow. *Journal of Hydraulic research*, 32(4), 623-631.

Babb, A. F., & Aus, H. C. (1981). Measurement of air in flowing water. *Journal of the Hydraulics Division*, 107(12), 1615-1630.

Balutto, A (1996), Air valve technology reviewed, Introducing controlled air transferred technology, VENT-O-MAT, <http://internationalvalve.com>

Balutto, A (1998), The application of controlled air transfer technology to new and existing pipeline systems, <http://www.ventomat.com>

Barrera, M. (2011), “Diseño del sistema de agua potable por gravedad y bombeo en la aldea Joconal y escuela primaria en la aldea campanario progreso, municipio de la unión”, Tesis, Universidad de San Carlos Guatemala.

Carvalho, M. R. L. M. F. (2002). Ações hidrodinâmicas em estruturas hidráulicas: Modelação computacional do ressalto hidráulico (Doctoral dissertation).

Bezdek JC, Keller J, Krisnapuram R, Pal NR (1999) Fuzzy models and algorithms for pattern recognition and image processing. Kluwer Academic Publishers, USA

Chanson, H. (1988), Study of air entrainment and aeration devices on spillway model, Tesis de doctorado, University of Canterbury

Chanson H. Qiao G.L. (1994), “Air Bubble Entrainment and Gas Transfer at Hydraulic Jumps”, Department of Civil Engineering, The University of Queensland Brisbane QLD, Australia 4072.

Chanson, H., & Montes, J. S. (1995). Characteristics of undular hydraulic jumps: Experimental apparatus and flow patterns. *Journal of hydraulic engineering*, 121(2), 129-144.

Chanson, H., & Brattberg, T. (2000). Experimental study of the air–water shear flow in a hydraulic jump. *International Journal of Multiphase Flow*, 26(4), 583-607.

Chanson H. (2002). "Air-Water Flow Measurements with Intrusive Phase-Detection Probes. Can we Improve their Interpretation?." *Jl of Hyd. Engrg., ASCE*, Vol. 128, No. 3, pp. 252-255 (ISSN 0733-9429).

Chanson H. (2007) “Bubbly flow structure in hydraulic jump”, *European Journal of Mechanics*.

Colgate, D (1966), Hydraulic model studies of the flow characteristics and air entrainment in the check towers of the main aqueduct, Canadian river project Texas, Department of the Interior Bureau of Reclamation, reporte Hyd-555, EUA

Corcos, G (2003), Air in water pipes: A manual for designers of spring-supplied gravitydriven drinking water rural delivery systems. Agua para la vida, 2a ed, www.aplv.org.

Corcos, G (2005), Aire en tuberías de agua. Agua para la vida, 2a ed, www.aplv.org.

Cummings, P. D., & Chanson, H. (1997). Air entrainment in the developing flow region of plunging jets- Part 2: Experimental.

Edmunds, R C (1979), Air binding in pipes, Journal AWWA, Water Technology / Distribution, 273-277

Falvey, H T (1980), Air-water flow in hydraulic systems, Bureau of Reclamation, Engineering monograph, 41

Escarameia, M., Dabrowski, C., Gahan, C. and Lauchlan, C., (2005). “Experimental and numerical studies on movement of air in water pipelines”. HR Wallingford Report SR661.

Gualtieri, C., Chanson, H. (2007) Experimental analysis of Froude number effect on air entrainment in the hydraulic jump. Environ Fluid Mech 7, 217–238. <https://doi.org/10.1007/s10652-006-9016-1>

Herringe R.A (1973) "A study of the Structure of Gas-Liquid Mixture Flows". Ph.D. thesis, Univ. of News South Wales, Kensington, Australia.

Kalinske, A A, y Bliss, P H (1943), Removal of air from pipelines by flowing water, ASCE, 13(10), 480-482

Kalinske, A A, y Robertson, J M (1943), Closed conduit flow, ASCE, 108, 1453-1516

Kent, J C (1952), The entrainment of air by water flowing in circular conduits with downgrade slopes, tesis doctoral, Universidad de California, Berkley, California, EUA

Landon, P O (1994), Air in Pipe? Time to review air valve basics, Opflow AWWA, mar, 1-5

Leandro J. Carvalho R. (2012), “Estimating void fraction in a hydraulic jump by measurements of pixel intensity”, Exp Fluids 52:1307–1318.

Lennon, J. M., & Hill, D. (2006). Particle image velocity measurements of undular and hydraulic jumps. Journal of Hydraulic Engineering, 132(12), 1283-1294.

MAPAS, "Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable", CONAGUA, 2015.

MAPAS, "Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Conducciones", CONAGUA, 2015.

Martin, C S (1976), Entrapped air in pipelines, Proceedings of the Second International Conference on Pressure Surges, British Hydromechanics Research Association, The City University, Londres, sep 22-24, informe F2, F2-15 - F2-28

Matos, J., & Frizell, K. H. (2000). Air concentration and velocity measurements on self-aerated flow down stepped chutes. In Building Partnerships (pp. 1-10).

Misra SK, Thomas M, Kambhamettu C, Kirby JT, Veron F, Brocchini M (2006) Estimation of complex air-water interfaces from particle image velocimetry images. *Exp Fluids* 40:764-775

Mora P. (2012) "Medición de características de burbuja en un resalto hidráulico", Tesis, Universidad Carlos III de Madrid.

Mossa M. Tolve U. (1998) "Flow visualization in bubbly two-phase hydraulic jump", *Journal of Fluids Engineering*.

Mouaze D, Murzyn F, Chaplin JR (2005) Free surface length scale estimation in hydraulic jumps. *J Fluids Eng* 127:1191-1193

Murzyn, F., Mouaze, D., & Chaplin, J. R. (2005). Optical fibre probe measurements of bubbly flow in hydraulic jumps. *International Journal of Multiphase Flow*, 31(1), 141-154.

Murzyn, F., & Chanson, H. (2008). Experimental assessment of scale effects affecting two-phase flow properties in hydraulic jumps. *Experiments in Fluids*, 45(3), 513-521.

Naghash, M. (1994, August). Void Fraction Measurement Techniques for Gas-Liquid Bubbly Flows in Closed Conduits: A Literature Review. In *Fundamentals and Advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation* 278-288, New York: American Society of Civil Engineers.

Pozos, O (2007), Investigation on the effects of entrained air in pipelines, tesis doctoral, Universidad de Stuttgart, Alemania.

Pozos, E. O., Fairuzov, Y., Sánchez, H. A., Rodal Canales, E. A. (2012), "Manual de análisis de la problemática del aire atrapado en acueductos para mejorar su eficiencia", Instituto de Ingeniería UNAM, 235p.

Rajaratnam N. (1962) “An experimental study of air entrainment characteristics of the hydraulic jump”, Journal of Instrumental Engineering, The Institution of Engineers (India),

Resch F.J. Leutheusser H.J. (1972) “Reynolds stress measurements in hydraulic jumps”, Journal of Hydraulic Research.

Resch, F. J., Leutheusser, H. J., & Alemu, S. (1974). Bubbly two-phase flow in hydraulic jump. Journal of the Hydraulics Division, 100(1), 137-149.

Richards, R T (1962), Air binding in water pipelines, AWWA, jun, 719-730

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. Measurement Science and Technology, 16(10), 1945.

Sailer, R E (1955), San Diego aqueduct, Journal of Civil Engineering, ASCE, 25(5), 38-40

Sarode MV, Ladhake SA, Deshmukh PR (2008) Fuzzy system for color image enhancement. World Acad Sci Eng Tech 48:311–316

Takahashi M. Ohtsu I. (2015), “Characteristics of air entrainment in hydraulic jumps”, IAHR World Congress, The Hague, the Netherlands.

Thielicke, W. (2014): The Flapping Flight of Birds - Analysis and Application. Phd thesis, Rijksuniversiteit Groningen, <http://irs.ub.rug.nl/ppn/382783069>

Thomas, S (2003), Air management in water distribution systems. A new understanding of air transfer, Clear Water Legacy, Burlington, Ontario, Canadá

Toombes, L. (2002). Experimental study of air-water flow properties on low-gradient stepped cascades.

Viparelli, M. (1953). The flow in a flume with 1: 1 slope. Proc., MIHC, 417.

Volkart, P. (1980). The mechanism of air bubble entrainment in self-aerated flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 6(5), 411-423.

Vorobel R, Berehulyak O (2006) Gray image contrast enhancement by optimal fuzzy transformation, vol 4029. Springer, Berlin, pp 860–869. doi:10.1007/11785231

Wallis, G B (1969), One dimensional two-phase flow, McGraw Hill, Nueva York, EUA

Waniewski, T. A., Brennen, C. E., & Raichlen, F. (2001). Measurements of air entrainment by bow waves. *J. Fluids Eng.*, 123(1), 57-63.

Wisner, P E, Mohsen, F N, y Kouwen, N (1975), Removal of air from water lines by hydraulic means, ASCE, Journal of the Hydraulics Division, 101, HY2, 243-25

## A. APENDICE

Resultados obtenidos con el método intrusivo, utilizando una sonda de conductividad.

Escenario 1

Tabla A.1. Resultados de  $C$  con sonda para el escenario 1.

Altura (cm)	Concentración agua-aire $C$ (%)		
	señal_1	señal_2	Promedio
0	0.32	0.46	0.39
1	0.32	0.46	0.39
2	0.37	0.52	0.45
3	0.37	0.53	0.45
4	0.50	0.71	0.60
5	0.66	0.98	0.82
6	1.13	1.53	1.33
7	1.45	1.88	1.66
8	2.02	2.62	2.32
9	2.62	3.47	3.04
10	2.97	4.03	3.50
11	2.80	3.96	3.38
12	2.88	3.85	3.36
13	2.88	4.01	3.44
14	2.46	3.55	3.00
15	2.82	4.26	3.54
16	2.83	3.93	3.38
17	4.76	6.09	5.43
18	12.51	14.08	13.29
19	15.35	16.61	15.98

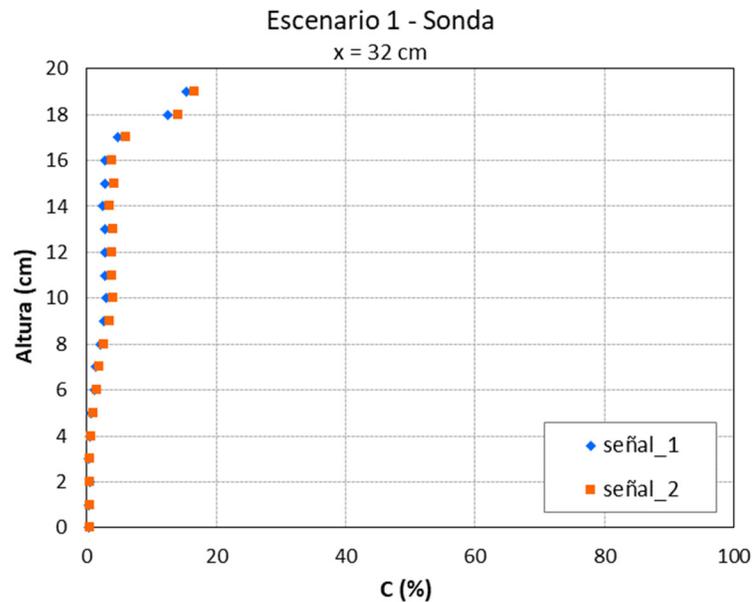


Figura A.1. Grafica de resultados de  $C$  con sonda para el escenario 1.

Escenario 2

Tabla A.2. Resultados de C con sonda para el escenario 2.

Altura (cm)	Concentración agua-aire C (%)		
	señal_1	señal_2	Promedio
0	0.41	0.32	0.36
1	0.45	0.34	0.40
2	0.45	0.34	0.40
3	0.43	0.33	0.38
4	0.45	0.34	0.40
5	0.63	0.56	0.60
6	1.20	1.17	1.18
7	5.19	5.73	5.46
8	9.47	10.32	9.89
9	17.84	19.35	18.59
10	24.14	23.95	24.04
11	31.01	30.15	30.58
12	29.94	29.22	29.58
13	34.79	34.71	34.75
14	40.27	41.46	40.87
15	52.56	53.74	53.15
16	68.63	70.17	69.40
17	74.66	75.09	74.88

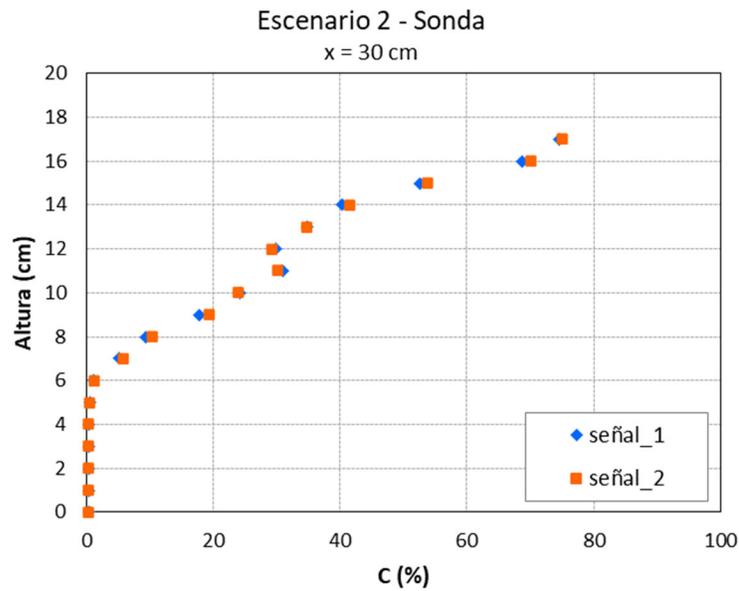


Figura A.2. Grafica de resultados de C con sonda para el escenario 2.

Escenario 3

Tabla A.3. Resultados de C con sonda para el escenario 3.

Altura (cm)	Concentración agua-aire C (%)		
	señal_1	señal_2	Promedio
0	0.46	0.38	0.42
1	0.49	0.49	0.49
2	0.95	1.06	1.00
3	1.30	1.47	1.39
4	0.45	0.42	0.43
5	0.74	0.77	0.76
6	1.69	2.16	1.92
7	2.28	3.61	2.95
8	4.07	6.64	5.35
9	11.35	13.89	12.62
10	12.98	14.50	13.74
11	11.78	13.43	12.60
12	14.55	15.39	14.97
13	22.97	24.03	23.50
14	25.75	27.13	26.44
15	22.73	23.51	23.12
16	36.52	38.15	37.34
17	61.88	63.48	62.68

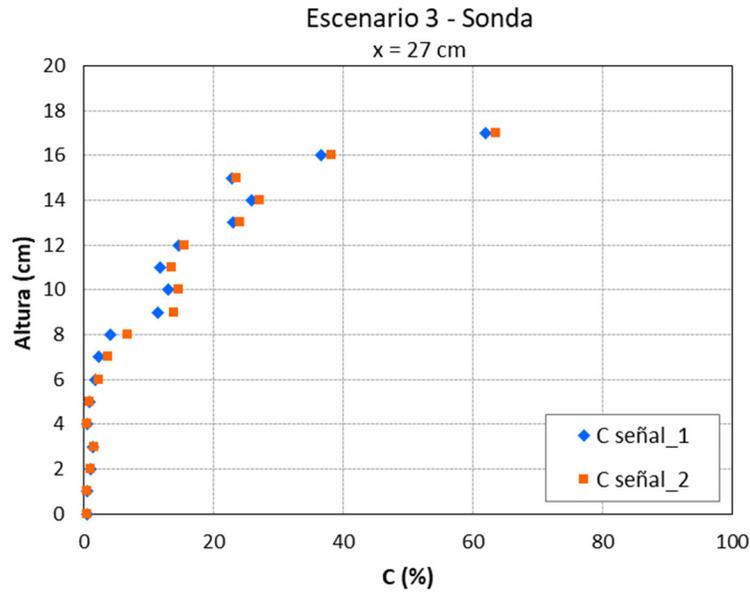


Figura A.3. Grafica de resultados de C con sonda para el escenario 3.

Escenario 4

Tabla A.4. Resultados de C con sonda para el escenario 4.

Altura (cm)	Concentración agua-aire C (%)		
	señal_1	señal_2	Promedio
0	0.61	0.44	0.52
1	0.56	0.42	0.49
2	0.54	0.39	0.47
3	0.57	0.44	0.50
4	0.61	0.61	0.61
5	0.74	0.58	0.66
6	1.02	0.95	0.98
7	1.94	2.18	2.06
8	2.94	3.28	3.11
9	10.05	11.50	10.77
10	12.41	14.83	13.62
11	20.91	21.90	21.41
12	15.80	16.14	15.97
13	16.50	17.76	17.13
14	15.50	16.38	15.94
15	13.51	14.33	13.92
16	17.91	18.57	18.24
17	19.58	20.39	19.98

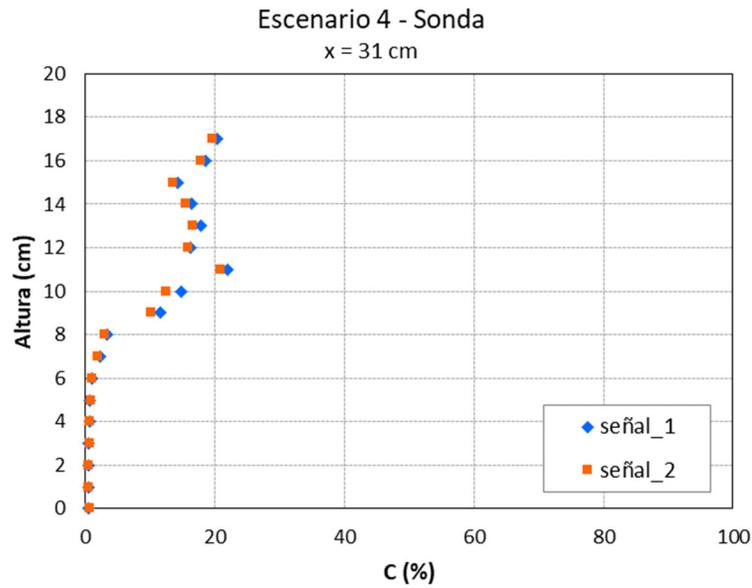


Figura A.4. Grafica de resultados de C con sonda para el escenario 4.

Escenario 5

Tabla A.5. Resultados de C con sonda para el escenario 5.

Altura (cm)	Concentración agua-aire C (%)		
	señal_1	señal_2	Promedio
0	0.44	0.26	0.35
1	0.41	0.24	0.33
2	0.48	0.28	0.38
3	0.52	0.87	0.69
4	0.73	0.80	0.76
5	1.42	2.99	2.21
6	1.97	3.94	2.96
7	2.99	6.84	4.92
8	3.35	7.06	5.20
9	5.31	8.19	6.75
10	5.66	10.38	8.02
11	7.54	12.39	9.97
12	8.70	12.63	10.67
13	13.11	15.67	14.39
14	18.89	21.03	19.96
15	28.77	29.89	29.33
16	34.88	35.50	35.19
17	52.37	53.64	53.00

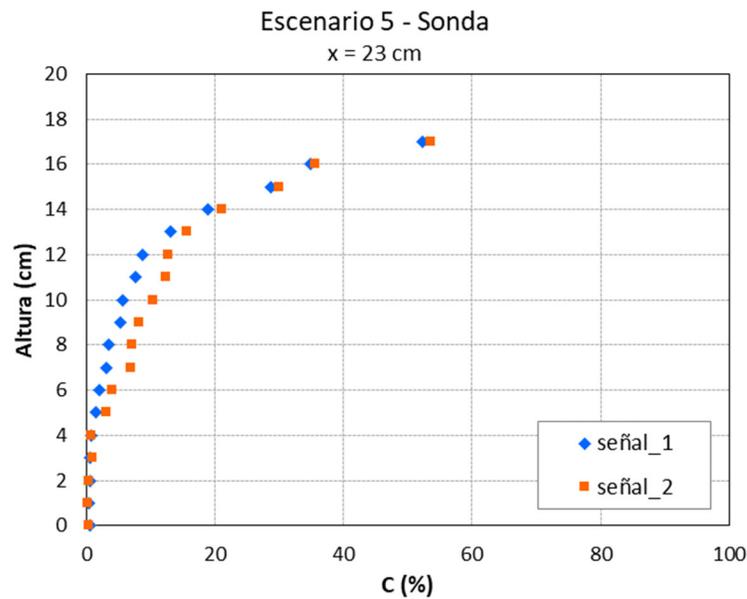


Figura A.5. Grafica de resultados de C con sonda para el escenario 5.

Escenario 6

Tabla A.6. Resultados de C con sonda para el escenario 6.

Altura (cm)	Concentración agua-aire C (%)		
	señal_1	señal_2	Promedio
0	0.39	0.21	0.30
1	0.33	0.18	0.25
2	0.45	0.25	0.35
3	0.42	0.67	0.55
4	0.36	0.19	0.28
5	0.71	2.20	1.46
6	0.84	0.78	0.81
7	1.77	3.04	2.41
8	3.53	6.81	5.17
9	4.56	7.93	6.24
10	5.22	8.46	6.84
11	6.42	10.08	8.25
12	6.74	9.69	8.22
13	7.78	9.59	8.68
14	7.26	8.10	7.68
15	8.77	7.77	8.27
16	13.37	12.18	12.77
17	16.65	16.31	16.48

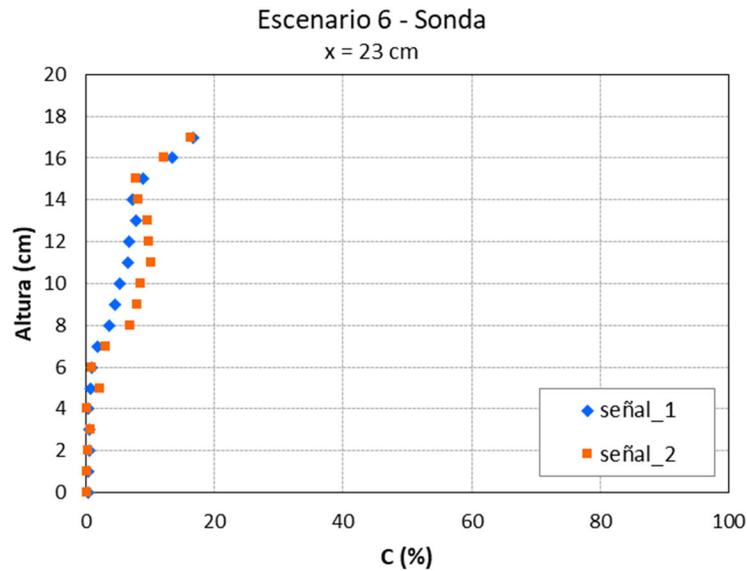


Figura A.6. Grafica de resultados de C con sonda para el escenario 6.

Escenario 7

Tabla A.7. Resultados de C con sonda para el escenario 7.

Altura (cm)	Concentración agua-aire C (%)		
	señal_1	señal_2	Promedio
0	0.27	0.37	0.32
1	0.21	0.30	0.26
2	0.23	0.33	0.28
3	0.22	0.31	0.26
4	0.33	0.43	0.38
5	0.35	0.45	0.40
6	0.44	0.64	0.54
7	1.16	1.49	1.33
8	4.25	5.08	4.66
9	3.25	3.96	3.61
10	4.01	5.40	4.71
11	7.53	9.12	8.33
12	3.56	4.89	4.22
13	3.86	5.24	4.55
14	4.04	6.09	5.07
15	7.79	9.33	8.56
16	23.85	24.13	23.99
17	52.97	51.74	52.36

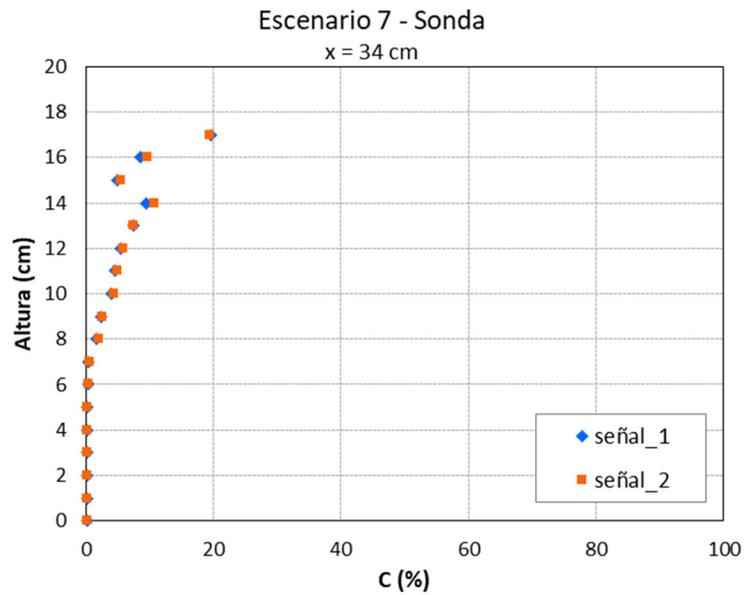


Figura A.7. Grafica de resultados de C con sonda para el escenario 7.

Escenario 8

Tabla A.8. Resultados de C con sonda para el escenario 8.

Altura (cm)	Concentración agua-aire C (%)		
	señal_1	señal_2	Promedio
0	0.21	0.29	0.25
1	0.21	0.27	0.24
2	0.19	0.25	0.22
3	0.21	0.28	0.25
4	0.22	0.29	0.25
5	0.21	0.28	0.24
6	0.30	0.38	0.34
7	0.44	0.48	0.46
8	1.70	1.93	1.81
9	2.42	2.59	2.50
10	3.98	4.30	4.14
11	4.56	4.90	4.73
12	5.46	5.76	5.61
13	7.47	7.42	7.45
14	9.48	10.80	10.14
15	4.86	5.50	5.18
16	8.59	9.55	9.07
17	19.57	19.51	19.54

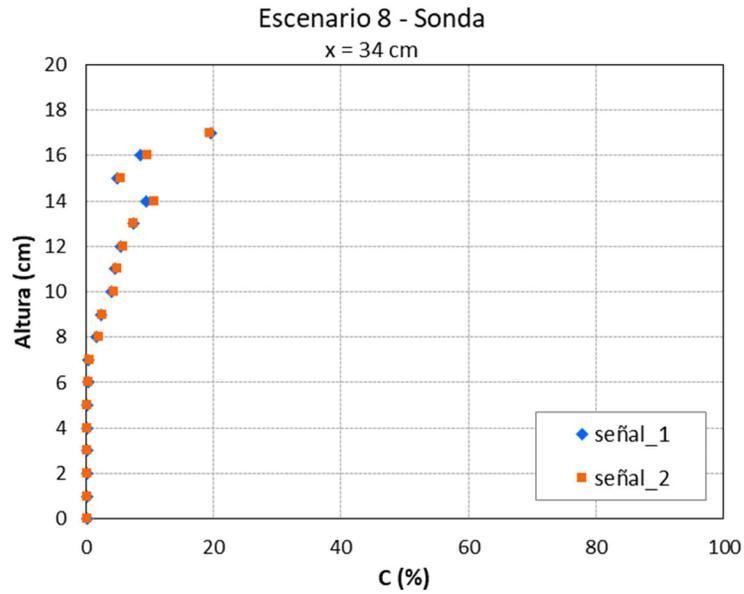


Figura A.8. Grafica de resultados de C con sonda para el escenario 8.

## B. APENDICE

Resultados numéricos con el método de procesamiento de imágenes en la ubicación de la sonda de conductividad.

### *Escenario 1*

Tabla B.1. Valores de C obtenidos con sonda y procesamiento de imágenes, x = 32, escenario 1.

Profundidad y (cm)	Concentración agua-aire C	
	sonda	imágenes
0	0.004	0.004
1	0.004	0.006
2	0.004	0.009
3	0.004	0.010
4	0.006	0.011
5	0.008	0.016
6	0.013	0.027
7	0.017	0.033
8	0.023	0.050
9	0.030	0.071
10	0.035	0.084
11	0.034	0.098
12	0.034	0.116
13	0.034	0.110
14	0.030	0.108
15	0.035	0.101
16	0.034	0.112
17	0.054	0.279
18	0.133	0.669
19	0.160	0.917
20	-	0.973

### *Escenario 2*

Tabla B.2. Valores de C obtenidos con sonda y procesamiento de imágenes, x = 30, escenario 2.

Profundidad y (cm)	Concentración agua-aire C	
	sonda	imágenes
0	0.004	0.004
1	0.004	0.004
2	0.004	0.004
3	0.004	0.004
4	0.004	0.006
5	0.006	0.012
6	0.012	0.021
7	0.055	0.035
8	0.099	0.064
9	0.186	0.085
10	0.240	0.109
11	0.306	0.136
12	0.296	0.143
13	0.348	0.158
14	0.409	0.143
15	0.532	0.141
16	0.694	0.148
17	0.749	0.200
18	-	0.489
19	-	0.865
20	-	0.970

*Escenario 3*

Tabla B.3. Valores de C obtenidos con sonda y procesamiento de imágenes,  $x = 27$ , escenario 3.

Profundidad $y$ (cm)	Concentración agua-aire $C$	
	sonda	imágenes
0	0.004	0.004
1	0.005	0.004
2	0.010	0.004
3	0.014	0.006
4	0.004	0.006
5	0.008	0.013
6	0.019	0.022
7	0.029	0.039
8	0.054	0.054
9	0.126	0.087
10	0.137	0.101
11	0.126	0.110
12	0.150	0.123
13	0.235	0.147
14	0.264	0.160
15	0.231	0.175
16	0.373	0.194
17	0.627	0.282
18		0.586
19		0.866
20		0.959

*Escenario 4*

Tabla B.4. Valores de C obtenidos con sonda y procesamiento de imágenes,  $x = 31$ , escenario 4.

Profundidad $y$ (cm)	Concentración agua-aire $C$	
	sonda	imágenes
0	0.005	0.004
1	0.005	0.005
2	0.005	0.008
3	0.005	0.008
4	0.006	0.009
5	0.007	0.013
6	0.010	0.023
7	0.021	0.041
8	0.031	0.050
9	0.108	0.080
10	0.136	0.114
11	0.214	0.151
12	0.160	0.172
13	0.171	0.185
14	0.159	0.182
15	0.139	0.200
16	0.182	0.199
17	0.200	0.264
18		0.610
19		0.898
20		0.957

*Escenario 5*

Tabla B.5. Valores de C obtenidos con sonda y procesamiento de imágenes,  $x = 23$ , escenario 5.

Profundidad $y$ (cm)	Concentración agua-aire $C$	
	sonda	imágenes
0	0.004	0.004
1	0.003	0.004
2	0.004	0.004
3	0.007	0.004
4	0.008	0.004
5	0.022	0.006
6	0.030	0.010
7	0.049	0.015
8	0.052	0.021
9	0.068	0.028
10	0.080	0.039
11	0.100	0.049
12	0.107	0.065
13	0.144	0.090
14	0.200	0.137
15	0.293	0.331
16	0.352	0.548
17	0.530	0.735
18		0.889
19		0.957
20		0.983

*Escenario 6*

Tabla B.6. Valores de C obtenidos con sonda y procesamiento de imágenes,  $x = 23$ , escenario 6.

Profundidad $y$ (cm)	Concentración agua-aire $C$	
	sonda	imágenes
0	0.003	0.004
1	0.003	0.004
2	0.003	0.004
3	0.005	0.004
4	0.003	0.004
5	0.015	0.004
6	0.008	0.006
7	0.024	0.009
8	0.052	0.015
9	0.062	0.026
10	0.068	0.038
11	0.082	0.046
12	0.082	0.039
13	0.087	0.066
14	0.077	0.083
15	0.083	0.124
16	0.128	0.205
17	0.165	0.405
18	-	0.631
19	-	0.878
20	-	0.967

*Escenario 7*

Tabla B.7. Valores de C obtenidos con sonda y procesamiento de imágenes, x = 32, escenario 7.

Profundidad y (cm)	Concentración agua-aire C	
	sonda	imágenes
0	0.003	0.004
1	0.003	0.008
2	0.003	0.006
3	0.003	0.012
4	0.004	0.015
5	0.004	0.017
6	0.005	0.025
7	0.013	0.042
8	0.047	0.062
9	0.036	0.081
10	0.047	0.107
11	0.083	0.138
12	0.042	0.143
13	0.045	0.138
14	0.051	0.153
15	0.086	0.174
16	0.240	0.223
17	0.524	0.323
18	-	0.486
19	-	0.841
20	-	0.926

*Escenario 8*

Tabla B.8. Valores de C obtenidos con sonda y procesamiento de imágenes, x = 34, escenario 8.

Profundidad y (cm)	Concentración agua-aire C	
	sonda	imágenes
0	0.003	0.009
1	0.002	0.008
2	0.002	0.012
3	0.002	0.013
4	0.003	0.018
5	0.002	0.018
6	0.003	0.020
7	0.005	0.026
8	0.018	0.025
9	0.025	0.037
10	0.041	0.047
11	0.047	0.061
12	0.056	0.082
13	0.074	0.093
14	0.101	0.115
15	0.052	0.106
16	0.091	0.090
17	0.195	0.097
18	-	0.310
19	-	0.754
20	-	0.911