



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

**ANÁLISIS INTRUSIVO Y NO – INTRUSIVO DEL FLUJO AGUA – AIRE EN
CONDUCTOS CERRADOS QUE TRANSPORTAN AGUA RESIDUAL**

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

PRESENTA:
CALEB RODRÍGUEZ TRINIDAD

TUTOR PRINCIPAL
DR. ÓSCAR POZOS ESTRADA, INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX., OCTUBRE 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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. Óscar Arturo Fuentes Mariles
Secretario: M.I. Víctor Franco
Vocal: Dr. Óscar Pozos Estrada
1^{er}. Suplente: Dr. Rafael Bernardo Carmona Paredes
2^{do}. Suplente: Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez

Lugar donde se realizó la tesis: Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad de México

TUTOR DE TESIS:

Dr. Óscar Pozos Estrada

FIRMA

DEDICATORIAS

A mis padres, Juan y Eloísa, por ser mi apoyo incondicional en todo momento, por guiarme con su ejemplo y sabios consejos a lo largo de mi vida. Mi amor eterno para ustedes

A mi hno Esdras, por todos los momentos buenos que hemos vivido y por impulsarme a superarme profesionalmente. ¡Eres el mejor hermano!

A mi prometida Berenice, por ser el pilar fundamental para lograr este objetivo, has estado conmigo desde el inicio de esta meta, apoyándome y alentándome día tras día, aun en los momentos difíciles. Te lo agradezco muchísimo amor.

A mi Tía Tere, Pilar, Iván y demás familia, por brindarme su apoyo en mi estancia en la Ciudad de México. De todo corazón muchas gracias.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por abrirme las puertas de la máxima casa de estudios para ampliar mi desarrollo profesional mediante los estudios de maestría.

Al Instituto de Ingeniería UNAM, por darme el privilegio de realizar este proyecto de investigación en sus instalaciones.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme la beca completa durante la realización de los estudios de maestría.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA-UNAM) (Proyecto PAPIIT IN101618), por el financiamiento para el desarrollo de la presente investigación

Al Dr. Óscar Pozos Estrada por su invaluable apoyo en todo momento, por sus atenciones y consejos para la realización de la investigación. Gracias por la amistad brindada.

Al Ingeniero Simón Ávila, por orientarme con sus conocimientos en el procesamiento de la información para esta tesis.

A los Ingenieros Onofre, Javier y Eduardo por su apoyo constante para la realización de las pruebas experimentales.

A mis profesores durante el transcurso de la maestría, por los conocimientos adquiridos por medio de sus enseñanzas.

A mis amigos y compañeros, quienes han compartido su conocimiento a lo largo de mi carrera profesional sin esperar nada a cambio y a todas aquellas personas que estuvieron apoyándome para que este sueño se hiciera realidad.

No dejes que termine el día sin haber crecido un poco, sin haber sido feliz, sin haber realizado tus sueños . . .

Walt Whitman

INDICE

INTRODUCCION	XV
OBJETIVO	XVI
1. SISTEMAS DE BOMBEO PARA EL TRANSPORTE DE AGUAS RESIDUALES	1
1.1. Conceptos principales	1
1.1.1. Gasto.....	1
1.1.2. Carga	1
1.1.3. Eficiencia.....	1
1.1.4. Curva característica de una bomba	2
1.1.5. Curva del sistema	3
1.2. Bombas para el transporte de aguas residuales.....	3
1.2.1. Bombas centrífugas.....	4
1.2.2. Bombas de tornillo	6
1.2.3. Eyectores neumáticos	7
1.2.4. Bombas de impulsor liso	9
1.2.5. Bombas de emulsión de aire (air – liff) y de chorro	9
1.3. Estaciones de bombeo de aguas residuales	9
1.3.1. Tipos	10
1.3.2. Clasificación	10
2. TRANSFORMACIONES BIOLÓGICAS DURANTE EL TRANSPORTE DE AGUAS RESIDUALES	11
2.1. Proceso de producción de sulfuro de hidrógeno.....	11
2.2. Corrosión debida al sulfuro de hidrógeno	12
2.2.1. Proceso de corrosión por el sulfuro de hidrógeno.....	12
2.2.2. Control de la corrosión por el sulfuro de hidrógeno.....	15
2.3. Otras transformaciones biológicas	16
2.4. Ventajas de la inyección de aire a los conductos que transportan agua residual.....	16
3. BOLSAS DE AIRE/GAS EN CONDUCTOS CERRADOS	18
3.1. Causas de la acumulación de bolsas de aire/gas en los conductos cerrados	18
3.2. Problemas producidos por las bolsas de aire/gas en los conductos cerrados	18
3.2.1. Incremento de la pérdida de carga.....	19
3.2.2. Retorno de bolsas de aire/gas (<i>blowback</i>).....	20



3.2.3.	Efectos de las bolsas de aire/gas en transitorios hidráulicos	21
3.2.4.	Reducción de la eficiencia en sistemas de bombeo	24
3.3.	Hidráulica de las bolsas de aire/gas en conductos cerrados.....	24
3.3.1.	Movimiento de las burbujas y bolsas de aire/gas.....	24
3.4.	Válvulas de aire	25
3.4.1.	Válvulas de admisión y expulsión de aire (VAEA)	25
3.4.2.	Válvulas de expulsión de aire (VEA)	26
3.4.3.	Válvulas de aire combinadas (VAC)	27
3.4.4.	Válvulas de aire para aguas residuales.....	28
3.5.	Falla de las válvulas de aire	30
4.	FLUJO AGUA – AIRE EN CONDUCTOS CERRADOS	31
4.1.	Patrones de flujo	31
4.1.1.	Patrones de flujo horizontales concurrentes	31
4.1.2.	Patrones de flujo verticales concurrentes.....	33
4.2.	Entrada de aire a través de estructuras hidráulicas.....	34
4.2.1.	Salto hidráulico en acueductos.....	34
4.3.	Mecanismos de entrada de aire.....	35
4.4.	Transporte de burbujas y bolsas de aire en tuberías con pendientes descendentes	37
4.5.	Cantidad de aire transportado en tuberías con pendientes descendentes	37
4.6.	Relaciones para calcular la entrada de aire en estructuras hidráulicas	39
4.7.	Efectos de la temperatura del agua en la entrada de aire a un conducto cerrado, debido a un salto hidráulico	41
4.8.	Efectos de la tensión superficial en las burbujas de aire	46
4.9.	Técnicas para la medición de los perfiles de concentración de aire.....	47
4.9.1.	Estado del arte	47
4.9.2.	Método intrusivo con sonda de conductividad.....	50
4.9.3.	Método no – intrusivo con cámara de alta velocidad.....	51
5.	INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL	55
5.1.	Descripción del dispositivo experimental.....	55
5.2.	Desarrollo de las pruebas experimentales	56
5.2.1.	Descripción de las pruebas experimentales.....	57



5.2.2.	Registro de datos con sonda de conductividad de doble punta.....	61
5.2.3.	Captura de imágenes con la cámara de alta velocidad.....	63
5.2.4.	Medición del gasto de agua	65
5.2.5.	Medición de la tensión superficial en agua con jabón.....	65
5.3.	Procesamiento de la información	67
5.3.1.	Procesamiento de datos obtenidos con la sonda	67
5.3.2.	Procesamiento de imágenes obtenidas con la cámara de alta velocidad.....	68
5.4.	Bondad de ajuste entre datos	69
5.4.1.	Coefficiente de correlación, r	69
5.4.2.	Coefficiente de determinación, R^2	69
6.	RESULTADOS	70
6.1.	Agua limpia a temperatura ambiente.....	70
6.1.1.	Parámetros de calibración empleados	70
6.1.2.	Perfiles de concentración de aire	72
6.2.	Agua limpia con un incremento de temperatura	77
6.2.1.	Parámetros de calibración empleados	77
6.2.2.	Perfiles de concentración de aire	78
6.3.	Agua con surfactante (Jabón).....	83
6.3.1.	Parámetros de calibración empleados	83
6.3.2.	Perfiles de concentración de aire	84
6.4.	Valores de la tensión superficial en cada escenario.....	89
6.5.	Análisis de resultados.....	89
6.6.	Perfiles de concentración a lo largo de las imágenes.....	93
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	95
ANEXO A.	Perfiles de concentración	97
A.1.	Agua limpia a temperatura ambiente.....	97
A.2.	Agua limpia con un incremento de temperatura	109
A.3.	Agua con surfactante (Jabón).....	118
BIBLIOGRAFIA	127

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 Esquema de la carga de elevación de una bomba, (Tchobanoglous, 1996)	1
Fig. 1.2 Curvas características de una bomba (Tchobanoglous, 1995)	2
Fig. 1.3 Curva del sistema para un sistema de bombeo (Tchobanoglous, 1995)	3
Fig. 1.4 Clasificación de las bombas centrifugas por la dirección del flujo (CONAGUA, 2007)	5
Fig. 1.5 Bomba con impulsor atascado	5
Fig. 1.6 Tipos de impulsores: cerrado, semiabierto y abierto	6
Fig. 1.7 Esquema de una bomba de tornillo típica (Tchobanoglous, 1995)	7
Fig. 1.8 Eyector neumático y componentes (Tchobanoglous, 1995)	8
Fig. 1.9 Esquema de una bomba de emulsión por aire típica (Tchobanoglous, 1995)	9
Fig. 2.1 Película biológica causante de la formación de sulfuro de hidrogeno	13
Fig. 2.2 Efecto del pH en el equilibrio del H ₂ S (EPA, 1985)	14
Fig. 2.3 Zonas de daño en las paredes de la tubería	15
Fig. 3.1 Fuerzas actuantes en una bolsa de aire estacionaria (Pozos et al., 2012)	19
Fig. 3.2 Bolsa de aire en una pendiente descendente (Edmunds, 1979)	19
Fig. 3.3 Bolsas de aire en un sistema a bombeo (Pozos et al., 2012)	20
Fig. 3.4 Retorno de bolsas de aire a contraflujo (blowback) (Pozos et al., 2012)	21
Fig. 3.5 Golpe de ariete causado por la remoción de una bolsa de aire (Pozos et al., 2012)	22
Fig. 3.6 Bolsa de gas acumulada en un cambio de pendiente (Pozos et al., 2012)	25
Fig. 3.7 Esquema de una válvula de admisión y expulsión de aire (VAEA) (Pozos et al., 2012)	26
Fig. 3.8 Esquema de una válvula de expulsión de aire (VEA) (Pozos et al., 2012)	27
Fig. 3.9 Esquema de válvulas de aire combinadas (VAC) (Pozos et al., 2012)	28
Fig. 3.10 Válvula de aire trifuncional para aguas residuales, modelo D-020	29
Fig. 3.11 Válvula de purga de aire automática para aguas residuales, modelo S-020	29
Fig. 3.12 Cierre dinámico de válvulas de gran orificio	30
Fig. 4.1 Patrones de flujo horizontales concurrentes (Collier, 1981)	32
Fig. 4.2 Patrones de flujo verticales concurrentes (Collier, 1981)	33
Fig. 4.3 Primer mecanismo de entrada de aire	35
Fig. 4.4 Segundo mecanismo de entrada de aire	36
Fig. 4.5 Tercer mecanismo de entrada de aire	36
Fig. 4.6 Aire introducido por un chorro en régimen supercrítico	37
Fig. 4.7 Transporte de aire en tuberías con pendiente descendente en función de su longitud y diámetro	38
Fig. 4.8 Esquema considerando flujo de agua-aire (Mortensen, 2009)	42
Fig. 4.9 Demanda de aire β versus número de Froude para cada tamaño de tubería (♦) 7.62 cm, (■) 17.7 cm, (▲) 30.0 cm y (●) 59.1 cm de diámetro. (Mortensen, 2009)	44
Fig. 4.10 Demanda de aire β versus F1 y tendencias para cada temperatura del agua T = (♦) 12.8 °C, (■) 29.4 °C, (▲) 48.9 °C y (●) 62.8 °C (Mortensen, 2009)	45
Fig. 4.11 Diferencia entre el tamaño de las burbujas de aire, según la temperatura a) 12.8°C, b) 29.4°C, c) 48.9°C y d) 62.8°C (Mortensen, 2009)	45
Fig. 4.12 Comportamiento de la concentración agua-aire en un salto hidráulico (modificado de Takahashi y Ohtsu, 2016)	48
Fig. 4.13 Datos obtenidos con la sonda de conductividad de doble punta (frecuencia: 20 kHz) (modificado de Chanson, 2002)	49
Fig. 4.14 Esquema de trabajo para el desarrollo de la investigación	50
Fig. 4.15 Definición de las áreas de escala de grises en las imágenes (modificado de Leandro et al., 2012)	52

Fig. 4.16 Procesos dentro del algoritmo editor de imágenes, (modificado de Leandro et al., 2012)	53
Fig. 4.17 Algoritmo de matriz de intensidad de píxeles (modificado de Leandro et al., 2012)	54
Fig. 5.1 Dispositivo experimental con sus elementos principales	56
Fig. 5.2 Sección de medición	56
Fig. 5.3 Procedimiento de ingreso de aire a la línea de conducción	57
Fig. 5.4 Solución de agua con jabón para las pruebas experimentales	60
Fig. 5.5 Preparación de la solución de agua con jabón	60
Fig. 5.6 Ubicación de la sonda dentro del dispositivo experimental	61
Fig. 5.7 Sonda de conductividad de doble punta y su conexión al equipo de cómputo	62
Fig. 5.8 Espectro de frecuencias registrado por la sonda	62
Fig. 5.9 Imagen capturada con la cámara de alta velocidad	63
Fig. 5.10 Nivelación de la cámara de alta velocidad	64
Fig. 5.11 Configuración de trabajo para el método no intrusivo	64
Fig. 5.12 Medidor de gasto en cada prueba experimental	65
Fig. 5.13 Ascenso por capilaridad	66
Fig. 5.14 Diagrama de bloques modelado en Simulink	67
Fig. 5.15 Ejemplo de la ubicación del umbral de análisis para el procesamiento	68
Fig. 6.1 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$	73
Fig. 6.2 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$	74
Fig. 6.3 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$	75
Fig. 6.4 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$	76
Fig. 6.5 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$, $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$	79
Fig. 6.6 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$, $T = 33 \text{ }^\circ\text{C}$	80
Fig. 6.7 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$, $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$	81
Fig. 6.8 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$, $T = 32 \text{ }^\circ\text{C}$	82
Fig. 6.9 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$	85
Fig. 6.10 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$	86
Fig. 6.11 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$	87
Fig. 6.12 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$	88
Fig. 6.13 Comparación de perfiles de concentración de aire obtenidos con sonda	90
Fig. 6.14 Zona de separación debida a la presencia de la sonda	91
Fig. 6.15 Comparación de perfiles de concentración de aire obtenidos con cámara	91
Fig. 6.16 Perfiles de concentración de aire obtenidos con sonda y cámara, $S = 0.003$ y $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$	92
Fig. 6.17 Perfiles de concentración de aire en intensidad de píxeles a lo largo de las imágenes para el escenario de agua a temperatura ambiente	93
Fig. 6.18 Perfiles de concentración de aire en intensidad de píxeles a lo largo de las imágenes para el escenario de agua con incremento de temperatura	94
Fig. 6.19 Perfiles de concentración de aire en intensidad de píxeles a lo largo de las imágenes para el escenario de agua con surfactante (Jabón)	94
Fig. A.1 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$	97
Fig. A.2 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$	98
Fig. A.3 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.028 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$	99

Fig. A.4 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$	__ 100
Fig. A.5 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$	__ 101
Fig. A.6 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.028 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$	__ 102
Fig. A.7 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$	__ 103
Fig. A.8 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$	__ 104
Fig. A.9 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.027 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$	__ 105
Fig. A.10 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$	__ 106
Fig. A.11 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$	__ 107
Fig. A.12 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.028 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$	__ 108
Fig. A.13 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$, $T = 29.8 \text{ }^\circ\text{C}$	__ 109
Fig. A.14 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$, $T = 29 \text{ }^\circ\text{C}$	__ 110
Fig. A.15 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$, $T = 32.5 \text{ }^\circ\text{C}$	__ 111
Fig. A.16 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$, $T = 32 \text{ }^\circ\text{C}$	__ 112
Fig. A.17 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$, $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$	__ 113
Fig. A.18 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$, $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$	__ 114
Fig. A.19 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$, $T = 32 \text{ }^\circ\text{C}$	__ 115
Fig. A.20 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$, $T = 31 \text{ }^\circ\text{C}$	__ 116
Fig. A.21 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$	__ 118
Fig. A.22 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$	__ 119
Fig. A.23 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$	__ 120
Fig. A.24 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$	__ 121
Fig. A.25 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$	__ 122
Fig. A.26 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$	__ 123
Fig. A.27 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$	__ 124
Fig. A.28 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$	__ 125

INDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Variables hidráulicas medidas en el dispositivo de $D = 7.62$ cm, para diferentes temperaturas	43
Tabla 5.1 Datos para las condiciones de trabajo en agua limpia a temperatura ambiente	58
Tabla 5.2 Datos para las condiciones de trabajo en agua limpia con incremento de temperatura	59
Tabla 5.3 Datos para las condiciones de trabajo en agua con surfactante (jabón).....	61
Tabla 6.1 Umbrales de calibración definidos en las pruebas con agua limpia a temperatura ambiente	71
Tabla 6.2 Parámetros de calibración para el procesamiento de imágenes en las pruebas con agua limpia a temperatura ambiente.....	71
Tabla 6.3 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.020$ m^3/s , $S = 0.01$	73
Tabla 6.4 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.020$ m^3/s , $S = 0.01$	74
Tabla 6.5 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.020$ m^3/s , $S = 0.02$	74
Tabla 6.6 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.020$ m^3/s , $S = 0.02$	75
Tabla 6.7 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.020$ m^3/s , $S = 0.03$	75
Tabla 6.8 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.020$ m^3/s , $S = 0.03$	76
Tabla 6.9 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.020$ m^3/s , $S = 0.04$	76
Tabla 6.10 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.020$ m^3/s , $S = 0.04$	77
Tabla 6.11 Umbrales de calibración definidos en las pruebas en agua limpia con incremento de temperatura	77
Tabla 6.12 Parámetros de calibración para el procesamiento de imágenes en las pruebas en agua limpia con un incremento de temperatura.....	78
Tabla 6.13 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura – $Q = 0.020$ m^3/s , $S = 0.01$, $T = 30$ °C	79
Tabla 6.14 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.020$ m^3/s , $S = 0.01$, $T = 30$ °C.....	80
Tabla 6.15 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura – $Q = 0.020$ m^3/s , $S = 0.02$, $T = 33$ °C	80
Tabla 6.16 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.020$ m^3/s , $S = 0.02$, $T = 33$ °C.....	81
Tabla 6.17 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura – $Q = 0.020$ m^3/s , $S = 0.03$, $T = 30$ °C	81
Tabla 6.18 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.020$ m^3/s , $S = 0.03$, $T = 30$ °C	82
Tabla 6.19 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura – $Q = 0.020$ m^3/s , $S = 0.04$, $T = 32$ °C	82
Tabla 6.20 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.020$ m^3/s , $S = 0.04$, $T = 32$ °C.....	83
Tabla 6.21 Umbrales de calibración definidos en las pruebas en agua limpia con surfactante (Jabón)	83
Tabla 6.22 Parámetros de calibración para el procesamiento de imágenes en las pruebas en agua limpia con surfactante (Jabón).....	84

Tabla 6.23 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) – $Q = 0.020$ m^3/s , $S = 0.01$	85
Tabla 6.24 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.020$ m^3/s , $S = 0.01$	86
Tabla 6.25 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) – $Q = 0.020$ m^3/s , $S = 0.02$	86
Tabla 6.26 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.020$ m^3/s , $S = 0.02$	87
Tabla 6.27 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) – $Q = 0.020$ m^3/s , $S = 0.03$	87
Tabla 6.28 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.020$ m^3/s , $S = 0.03$	88
Tabla 6.29 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) – $Q = 0.020$ m^3/s , $S = 0.04$	88
Tabla 6.30 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.020$ m^3/s , $S = 0.04$	89
Tabla 6.31 Valor de la tensión superficial para cada escenario de trabajo	89
Tabla 6.32 Valores de concentración de aire obtenidos con sonda y cámara, $S = 0.003$ y $Q = 0.020$ m^3/s	92
Tabla A.1 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.023$ m^3/s , $S = 0.01$	97
Tabla A.2 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.023$ m^3/s , $S = 0.01$	98
Tabla A.3 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.026$ m^3/s , $S = 0.01$	98
Tabla A.4 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.026$ m^3/s , $S = 0.01$	99
Tabla A.5 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.028$ m^3/s , $S = 0.01$	99
Tabla A.6 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.028$ m^3/s , $S = 0.01$	100
Tabla A.7 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.023$ m^3/s , $S = 0.02$	100
Tabla A.8 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.023$ m^3/s , $S = 0.02$	101
Tabla A.9 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.025$ m^3/s , $S = 0.02$	101
Tabla A.10 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.025$ m^3/s , $S = 0.02$	102
Tabla A.11 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.028$ m^3/s , $S = 0.02$	102
Tabla A.12 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.028$ m^3/s , $S = 0.02$	103
Tabla A.13 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.022$ m^3/s , $S = 0.03$	103
Tabla A.14 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.022$ m^3/s , $S = 0.03$	104

Tabla A.15 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.025$ m^3/s , $S = 0.03$	104
Tabla A.16 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.025$ m^3/s , $S = 0.03$	105
Tabla A.17 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.027$ m^3/s , $S = 0.03$	105
Tabla A.18 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.027$ m^3/s , $S = 0.03$	106
Tabla A.19 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.022$ m^3/s , $S = 0.04$	106
Tabla A.20 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.022$ m^3/s , $S = 0.04$	107
Tabla A.21 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.026$ m^3/s , $S = 0.04$	107
Tabla A.22 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.026$ m^3/s , $S = 0.04$	108
Tabla A.23 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.028$ m^3/s , $S = 0.04$	108
Tabla A.24 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.028$ m^3/s , $S = 0.04$	109
Tabla A.25 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.023$ m^3/s , $S = 0.01$, $T = 29.8$ °C	110
Tabla A.26 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.023$ m^3/s , $S = 0.01$, $T = 29.8$ °C.....	110
Tabla A.27 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.026$ m^3/s , $S = 0.01$, $T = 29$ °C	111
Tabla A.28 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.026$ m^3/s , $S = 0.01$, $T = 29$ °C.....	111
Tabla A.29 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.023$ m^3/s , $S = 0.02$, $T = 32.5$ °C	112
Tabla A.30 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.023$ m^3/s , $S = 0.02$, $T = 32.5$ °C.....	112
Tabla A.31 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.026$ m^3/s , $S = 0.02$, $T = 32$ °C	113
Tabla A.32 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.026$ m^3/s , $S = 0.02$, $T = 32$ °C.....	113
Tabla A.33 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.022$ m^3/s , $S = 0.03$, $T = 30$ °C	114
Tabla A.34 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.022$ m^3/s , $S = 0.03$, $T = 30$ °C.....	114
Tabla A.35 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.025$ m^3/s , $S = 0.03$, $T = 30$ °C	115
Tabla A.36 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.025$ m^3/s , $S = 0.03$, $T = 30$ °C.....	115
Tabla A.37 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.022$ m^3/s , $S = 0.04$, $T = 32$ °C	116

Tabla A.38 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$, $T = 32 \text{ }^\circ\text{C}$	116
Tabla A.39 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura – $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$, $T = 31 \text{ }^\circ\text{C}$	117
Tabla A.40 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$, $T = 31 \text{ }^\circ\text{C}$	117
Tabla A.41 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) – $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$	118
Tabla A.42 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$	119
Tabla A.43 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) – $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$	119
Tabla A.44 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$	120
Tabla A.45 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) – $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$	120
Tabla A.46 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$	121
Tabla A.47 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) – $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$	121
Tabla A.48 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$	122
Tabla A.49 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) – $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$	122
Tabla A.50 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$	123
Tabla A.51 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) – $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$	123
Tabla A.52 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$	124
Tabla A.53 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) – $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$	124
Tabla A.54 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$	125
Tabla A.55 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) – $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$	125
Tabla A.56 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$	126

INTRODUCCION

La mayoría de las veces, los sistemas que transportan agua residual contienen bolsas de aire/gas, debido a la descomposición de la materia orgánica y el ingreso de aire, que generalmente se acumulan en sus puntos altos. Este fenómeno ocurre debido a que el aire/gas es más ligero que el agua y por tanto migra hacia las cimas de la conducción. La presencia de bolsas de aire/gas estacionarias en sistemas de aguas residuales que trabajan a presión, pueden reducir la sección transversal de forma importante restringiendo el transporte de agua. Generalmente, aguas abajo de las bolsas de aire/gas estacionarias se presenta un salto hidráulico. Este fenómeno se caracteriza por la mezcla de agua – aire que se genera por la turbulencia del mismo.

Si bien ha habido varias investigaciones con el flujo agua – aire en conductos cerrados, muy pocas de las investigaciones se han dirigido específicamente a considerar los efectos de la temperatura y la tensión superficial. La investigación desarrollada tuvo como objetivo medir la concentración de aire con métodos intrusivos y no – intrusivos, en agua limpia a temperatura ambiente, agua limpia con incremento de temperatura y agua con surfactante (jabón). Este último escenario fue simulado para representar las características del agua residual. Los resultados obtenidos fueron analizados y comparados.

En la investigación se utilizó un dispositivo experimental de pendiente variable, que consiste de un circuito de tuberías de 20 cm de diámetro, que trabaja a presión y con gastos de agua variables. El aire es inyectado a través de un compresor para generar bolsas estacionarias en un punto elevado del sistema, formándose un salto hidráulico en el extremo de aguas abajo.

La técnica intrusiva utilizada consiste en una sonda de conductividad de doble punta. Para la técnica no – intrusiva se recurre al uso de una cámara de alta velocidad. Ambos medios requieren de un procesamiento de datos posterior con el fin de obtener gráficas de perfiles de concentración para los diferentes escenarios.

Los resultados obtenidos con ambas técnicas tienen una tendencia similar. De esta manera se concluye que ambos métodos pueden utilizarse para medir la concentración de aire en conductos cerrados.

OBJETIVO

La investigación experimental tiene el propósito de estimar perfiles de concentración de aire en una serie de saltos hidráulicos (fenómeno inestable que permite el ingreso de aire debido a la turbulencia que se genera por el cambio abrupto del régimen del flujo), ubicados al final de bolsas de aire estacionarias, localizadas en un punto alto de una línea de conducción. El estudio se centra en analizar la concentración de aire en líneas de conducción de aguas residuales, donde las propiedades del flujo se ven alteradas por la presencia de componentes orgánicos. Los resultados son comparados con las concentraciones de aire obtenidas en agua limpia, para determinar en qué medida la concentración de aire se ve afectada por la tensión superficial al agregar surfactantes al agua.

La concentración de aire se determinó mediante una sonda de conductividad de doble punta (técnica intrusiva) y una cámara de alta velocidad (técnica no intrusiva). El uso de sondas de conductividad para analizar el flujo agua – aire se ha venido implementando desde la década de los 60. Por otra parte, el uso de imágenes es una técnica relativamente nueva, basada en las investigaciones realizadas por Leandro *et al.* (2012), donde a partir de algoritmos de edición de imágenes y de matriz de intensidad de píxeles, implementados en códigos de programación, se procesan las imágenes para calcular la concentración de aire en cualquier punto ubicado dentro de la imagen. Ambas técnicas se complementan para obtener mejores perfiles de concentración de aire. Los algoritmos para el procesamiento de imágenes requieren calibrarse con los resultados obtenidos de la sonda. Es importante mencionar, que los resultados obtenidos mediante las imágenes tienen muy buena concordancia con los perfiles obtenidos con una sonda de conductividad de doble punta, y demuestra que el procedimiento de procesamiento de imágenes puede ser una herramienta poderosa, para complementar o sustituir las mediciones que se hacen de manera intrusiva con sondas de conductividad o de fibra óptica.

1. SISTEMAS DE BOMBEO PARA EL TRANSPORTE DE AGUAS RESIDUALES

1.1. Conceptos principales

1.1.1. Gasto

El bombeo de agua residual o potable tiene como finalidad transportar el flujo de un punto a otro, comúnmente desde una cota más baja a otra más elevada. El gasto en una bomba es el volumen de líquido bombeado por unidad de tiempo. Las unidades utilizadas para expresar el gasto generalmente son litros por segundo o metros cúbicos por segundo (Tchobanoglous, 1995).

1.1.2. Carga

La carga de una bomba es la distancia a la que se puede elevar un líquido y se mide en metros de columna del líquido bombeado. La altura necesaria para vencer las pérdidas que se producen en las conducciones de un sistema a un gasto dado es la carga del sistema.

Los términos que se utilizan específicamente en el análisis de bombas y sistemas de bombeo son: 1) carga geométrica de aspiración H_s ; 2) carga geométrica de elevación H_d ; 3) carga geométrica total H_{geom} ; 4) carga de velocidad H_v ; 5) pérdidas de carga por fricción y locales y 6) carga manométrica total H_T , (Fig. 1.1), (Tchobanoglous, 1995).

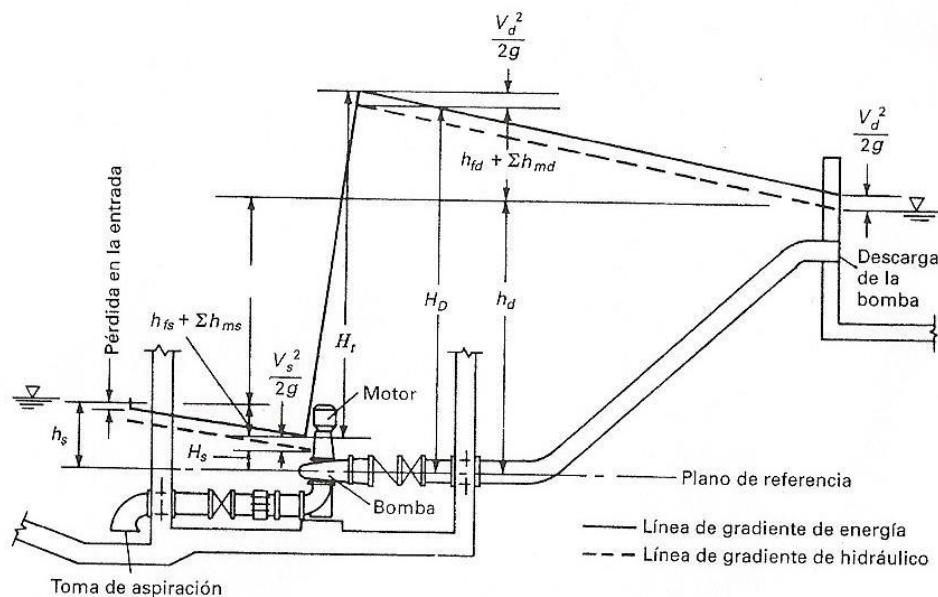


Fig. 1.1 Esquema de la carga de elevación de una bomba, (Tchobanoglous, 1996)

1.1.3. Eficiencia

La eficiencia de una bomba se mide en base al gasto que descarga contra una carga dada y con un rendimiento determinado. El gasto de la bomba estará en función de las necesidades

del proyecto. La información sobre el diseño de la bomba viene suministrada por medio de una serie de curvas características. La eficiencia de la bomba es el cociente entre la potencia útil y la absorbida por la bomba (Tchobanoglous, 1995).

Las eficiencias de las bombas suelen variar dentro de un intervalo comprendido entre un 60 y un 85 %. Las pérdidas de energía en el interior de una bomba pueden clasificarse como volumetricas, mecánicas e hidráulicas.

1.1.4. Curva característica de una bomba

La carga a la que la bomba puede impulsar los diversos gastos a velocidad de funcionamiento constante se establece en los ensayos de bombeo que realizan los fabricantes. En el curso del ensayo se varía el gasto de bombeo actuando sobre una válvula dispuesta en la descarga de la bomba y se mide la carga correspondiente. Al mismo tiempo, se miden la eficiencia y la potencia absorbida (Tchobanoglous, 1995).

Los resultados del ensayo representan gráficamente las siguientes leyes: $H - Q$ curva de carga, $\eta - Q$ curva de eficiencia y $P - Q$ curva de potencia (Fig. 1.2). El fabricante de bombas debe proporcionar las curvas características que corresponden a cada equipo, con el fin de proporcionar al usuario sus características y este pueda hacer uso correcto y óptimo de la bomba (Gardea, 1992).

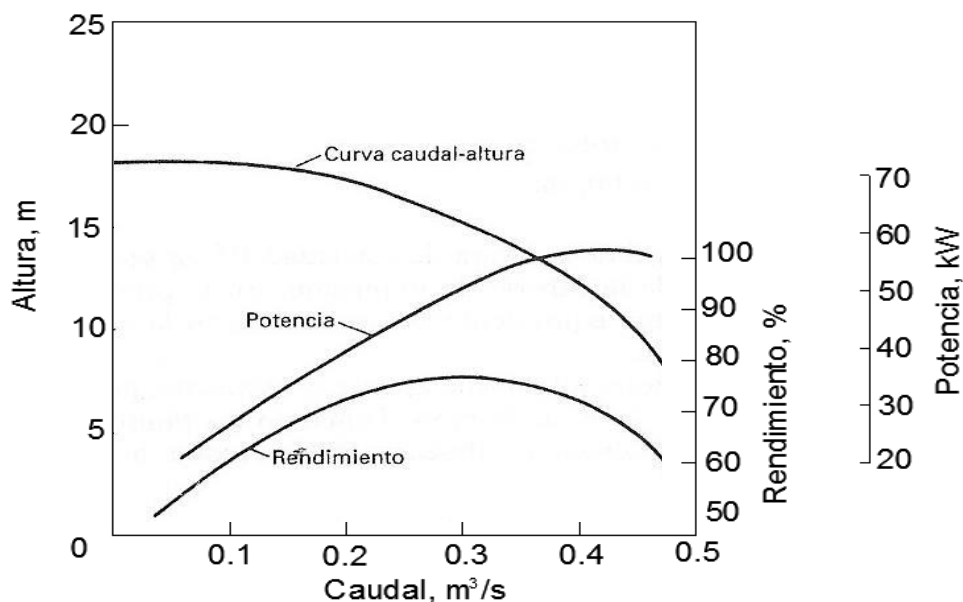


Fig. 1.2 Curvas características de una bomba (Tchobanoglous, 1995)

1.1.5. Curva del sistema

Para determinar la carga requerida por una bomba, o grupo de bombas, para descargar gastos dados a través de un sistema de tuberías determinado, se calcula la curva carga – gasto del sistema. Esta curva es una representación gráfica de la carga del sistema y se obtiene dibujando los puntos correspondientes a la carga manométrica total (carga geométrica más pérdidas) para distintos gastos que varíe desde cero al valor máximo esperado, (Fig. 1.3), (Tchobanoglous, 1995).

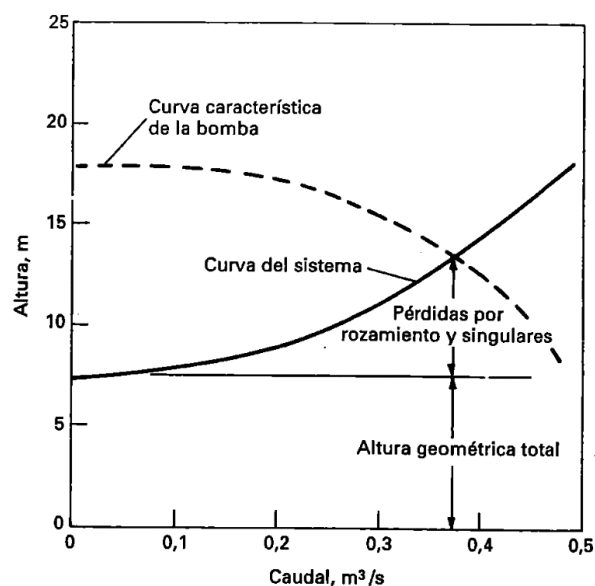


Fig. 1.3 Curva del sistema para un sistema de bombeo (Tchobanoglous, 1995)

1.2. Bombas para el transporte de aguas residuales

Las bombas se clasifican con base en una gran cantidad de criterios, que van desde sus aplicaciones, materiales de construcción, hasta su configuración mecánica. Un criterio básico que incluye una clasificación general, es el que se basa en el principio por el cual se adiciona energía al fluido. Bajo este criterio las bombas pueden dividirse en dos grandes grupos; dinámicas y de desplazamiento positivo (CONAGUA, 2007).

- a) Dinámicas. Bombas a las que se agrega energía continuamente para incrementar la velocidad del fluido dentro de la bomba a valores mayores de los que existen en la succión, de manera que la subsecuente reducción de velocidad dentro o más allá de la bomba, produce un incremento en la presión.
- b) De desplazamiento positivo. Bombas en las cuales se agrega energía periódicamente mediante la aplicación de fuerza a uno o más elementos móviles



para desplazar un número deseado de volúmenes de fluido, lo que resulta en un incremento directo en la presión.

Las bombas normalmente empleadas en el campo de las aguas residuales son las centrífugas, de tornillo y de desplazamiento positivo.

1.2.1. Bombas centrífugas

Una bomba centrífuga consta de 2 elementos principales: un elemento rotativo denominado impulsor, el cual fuerza al líquido a seguir un movimiento rotativo, y la carcasa o cuerpo de la bomba, la cual tiene por objeto dirigir el líquido hacia el impulsor y hacia la descarga (Tchobanoglous, 1995).

Las bombas centrífugas son las de uso más extendido en el transporte de aguas residuales. Según la dirección del flujo, se clasifican en bombas de flujo radial, mixto y axial. Considerando el tipo de impulsor se clasifican en abiertos, semiabiertos y cerrados.

1.2.1.1. Clasificación según la dirección del flujo

Las bombas centrífugas se clasifican de acuerdo a la trayectoria del fluido en el interior del impulsor en: flujo radial, flujo axial y flujo mixto (Fig. 1.4).

- a) Flujo radial. El movimiento del fluido se inicia en un plano perpendicular a este. Estas bombas pueden ser horizontales o verticales.
- b) Flujo axial. La dirección del fluido en el impulsor es en forma axial y alrededor del eje de giro del impulsor de la bomba, sin tener cambios de dirección. Estas bombas desarrollan su carga por la acción de un impulso o elevación de los alabes sobre el líquido y usualmente son bombas verticales de un solo paso.
- c) Flujo mixto. El movimiento del fluido dentro del impulsor se desarrolla en tres direcciones, tangencial, radial y axial al eje de giro del impulsor de la bomba. Estas bombas desarrollan su carga parcialmente por fuerza centrífuga y parcialmente por el impulso de los alabes sobre el líquido (CONAGUA, 2007).

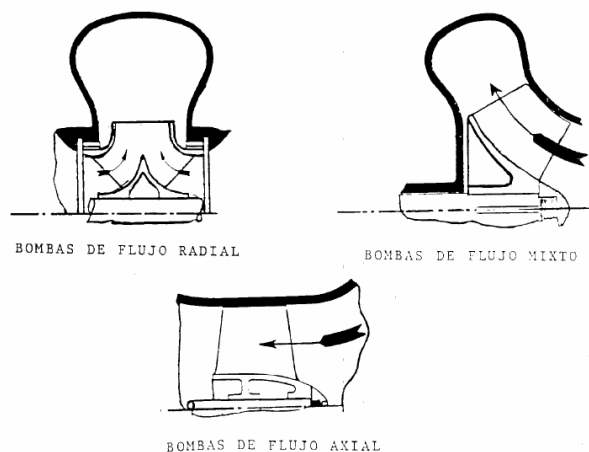


Fig. 1.4 Clasificación de las bombas centrífugas por la dirección del flujo (CONAGUA, 2007)

Las bombas de flujo radial generalmente manejan poco gasto y grandes alturas de elevación por paso, se emplean para el bombeo de aguas residuales y pluviales. Debido a que los trapos y otros materiales presentes en el agua residual podrían atascar rápidamente las pequeñas secciones de paso típicas de las bombas de flujo radial (Fig. 1.5), las utilizadas para bombear agua residual son comúnmente de doble aspiración, del tipo voluta y equipadas con impulsores inatascables.



Fig. 1.5 Bomba con impulsor atascado

Las bombas de voluta de flujo mixto son adecuadas para el bombeo de agua residual sin tratar y agua pluvial. Las bombas de flujo axial se emplean para bombear grandes gastos a

poca altura, especialmente en el bombeo del efluente tratado de una estación depuradora o de aguas pluviales (Tchobanoglous, 1995).

1.2.1.2. Clasificación según el tipo de impulsor

Los impulsores tienen formas muy variadas según la aplicación particular lo requiera (Fig. 1.6). Se clasifican de acuerdo a la forma de sujeción de los alabes:

- a) Impulsor cerrado de simple aspiración. Las caras anterior y posterior forman una caja; entre ambas caras se fijan los alabes.
- b) Impulsor cerrado de doble aspiración.
- c) Impulsor semiabierto de simple aspiración. Sin la cara anterior, los alabes se fijan solo en la cara posterior.
- d) Impulsor abierto de doble aspiración sin la cara anterior ni posterior. Los alabes se fijan en el núcleo o cubo de rodete (Mataix, 1986).

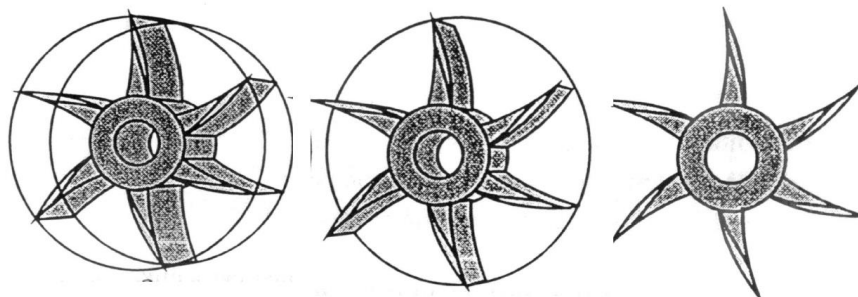


Fig. 1.6 Tipos de impulsores: cerrado, semiabierto y abierto

1.2.2. Bombas de tornillo

La bomba de tornillo, clasificada como bomba de desplazamiento positivo, es probablemente la más antigua del mundo. Se basa en el principio de Arquímedes, en el cual un eje giratorio que lleva acoplado una, dos o tres chapas helicoidales gira en una cuneta inclinada, empujando el agua hacia arriba a través de ella (Fig. 1.7).

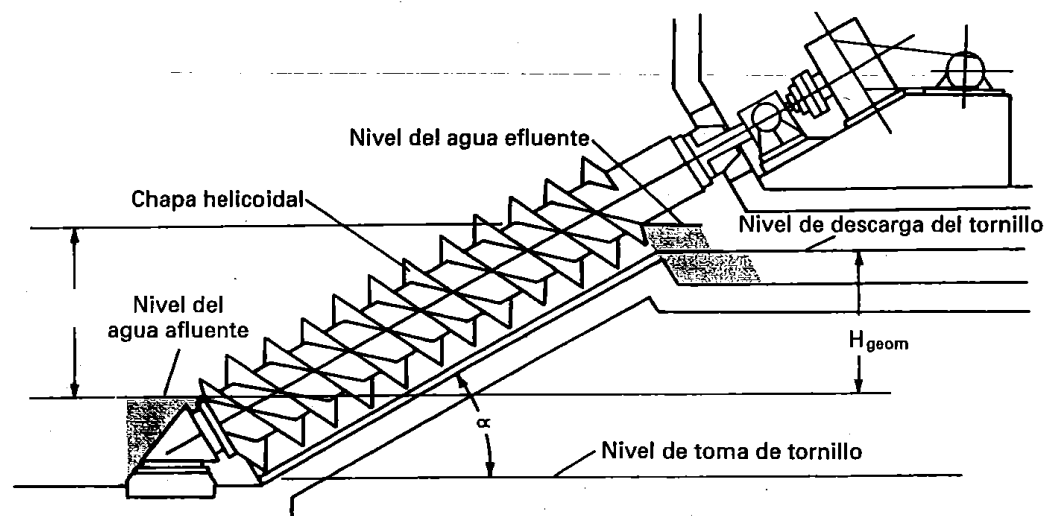


Fig. 1.7 Esquema de una bomba de tornillo típica (Tchobanoglous, 1995)

La bomba de tornillo tiene 2 ventajas principales sobre las bombas centrífugas en el bombeo de aguas residuales:

- Puede manejar sólidos de mayor tamaño sin atascarse.
- Funciona a velocidad constante para una amplia gama de caudales con rendimientos relativamente buenos.

Debido a sus características de inatascabilidad y a su capacidad de bombeo de gastos variables, la bomba de tornillo puede ser muy útil en diversas aplicaciones de bombeo de agua residual, incluyendo:

- Bombeo de agua residual a baja altura.
- Bombeo de aguas pluviales.
- Bombeo de fangos de retorno.
- Bombeo de efluentes tratados

1.2.3. Eyectores neumáticos

Los eyectores neumáticos se instalan cuando los gastos iniciales son pequeños y los futuros estimados no excederán de la capacidad de la instalación. Se emplean en estaciones de pequeña capacidad porque no se atascan fácilmente. En la Fig. 1.8 se ilustra un eyector neumático con su equipo y controles correspondientes.

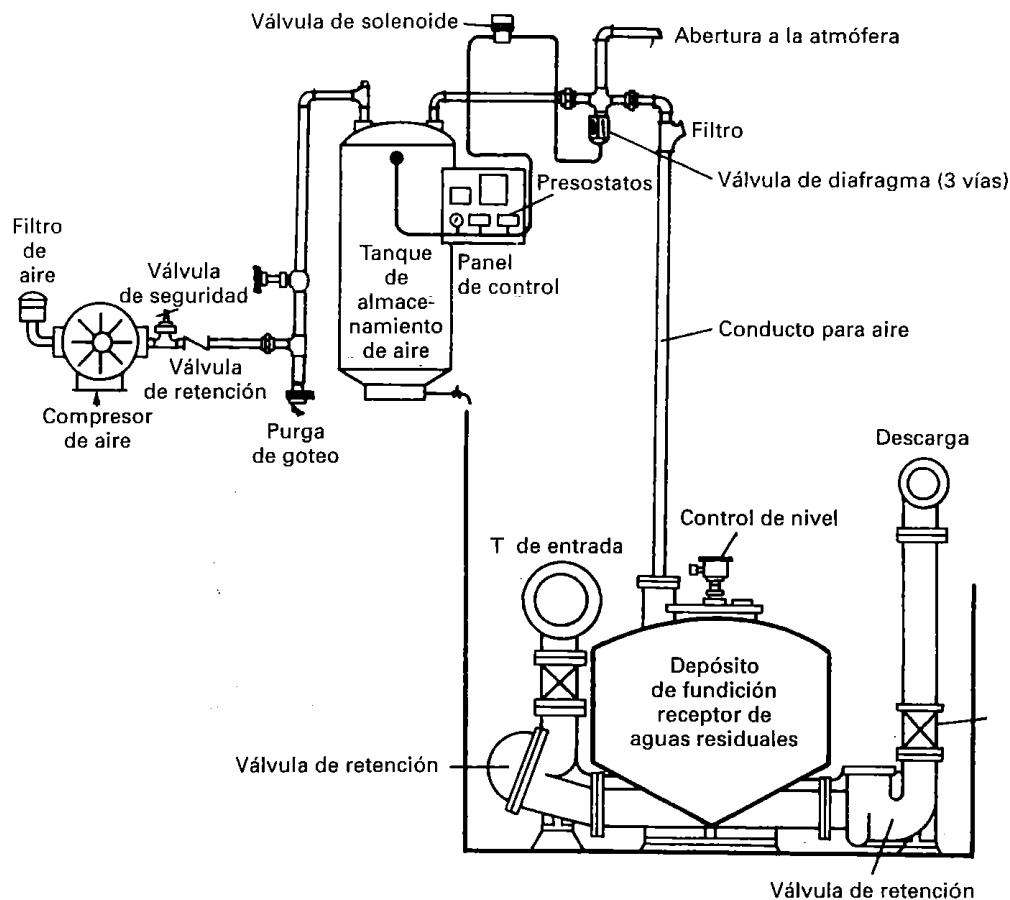


Fig. 1.8 Eector neumático y componentes (Tchobanoglous, 1995)

El agua residual entra y comienza a llenar la cámara de recepción. Cuando se llena, se actúa una válvula de tres vías que cierra la purga de aire y admite el aire comprimido en la cámara, forzando la salida del agua residual por el conducto de impulsión. Cuando el agua residual alcanza su nivel mínimo, se invierte la posición de la válvula de tres vías cerrando la entrada de aire comprimido y abriendo la de purga del aire, lo cual permite que el agua residual penetre de nuevo en la cámara llenando la misma. El aire comprimido puede suministrarse directamente desde los compresores o desde una cámara de aire que se mantiene a la presión necesaria mediante los compresores. Cuando se emplea la cámara de aire, los compresores pueden ser de menor capacidad y la potencia del motor puede reducirse a la mitad (Tchobanoglous, 1995).

1.2.4. Bombas de impulsor liso

Estas bombas son centrifugas del tipo voluta equipadas con un rodete especial sin alabes. Las bombas de rodete liso han demostrado un excelente comportamiento por razón de su inatascabilidad y son particularmente adecuadas para gastos pequeños.

1.2.5. Bombas de emulsión de aire (air – liff) y de chorro

Una bomba de emulsión no tiene partes móviles y, por lo tanto, es prácticamente inatascable (Fig. 1.9). Las bombas de chorro se emplean ocasionalmente en plantas de tratamiento de agua residual en ciertas actividades tales como el cebado de bombas centrifugas o de sumidero (Tchobanoglous, 1995).

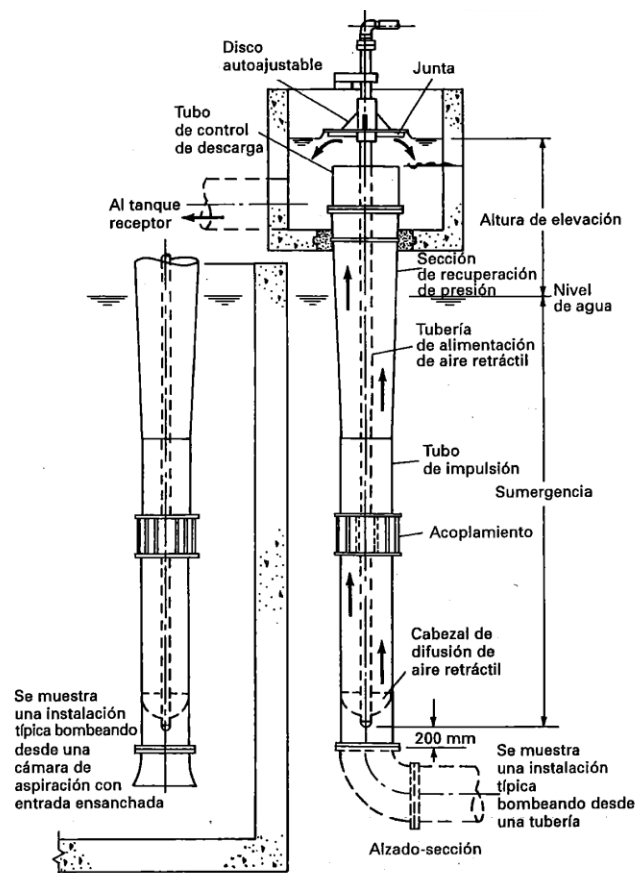


Fig. 1.9 Esquema de una bomba de emulsión por aire típica (Tchobanoglous, 1995)

1.3. Estaciones de bombeo de aguas residuales

El objeto básico de una estación de bombeo es elevar el agua residual, por lo que dentro de una estación se incluyen tanto las bombas como los equipos auxiliares de las mismas. En consecuencia, las características de diseño de las estaciones de bombeo varían con la capacidad y el método constructivo a emplear.

1.3.1. Tipos

Las estaciones de bombeo son necesarias para la impulsión de:

- Aguas residuales domesticas crudas.
- Aguas pluviales.
- Aguas residuales industriales.
- Aguas residuales de redes de alcantarillado unitario.
- Fangos o lodos producidos en las plantas de tratamiento.
- Efluentes tratados.
- Redes de agua en las plantas de tratamiento.

Las principales condiciones y factores que obligan a la necesidad de recurrir al uso de estaciones de bombeo en las redes de alcantarillado son los siguientes:

- Cuando la cota de la zona a servir es demasiado baja para que sus aguas residuales puedan ser evacuadas por gravedad a los colectores existentes o en proyecto.
- Cuando se requiere dar servicio a zonas situadas en el exterior de la cuenca vertiente, pero perteneciente a la zona a sanear.
- Cuando la omisión de un bombeo, aun en el caso de que ello sea factible, supone un coste de construcción excesivo debido a la necesidad de efectuar grandes excavaciones para la construcción de la alcantarilla que dé servicio a una zona determinada (Tchobanoglous, 1995).

1.3.2. Clasificación

Las estaciones de bombeo han sido clasificadas de varias maneras, aunque ninguna de ellas es satisfactoria. Algunos de los sistemas normales de clasificación son los siguientes:

- Por capacidad (metros cúbicos por segundo, metros cúbicos por día o litros por segundo).
- Según la fuente de energía (electricidad, motores diésel, etc.).
- Por el método de construcción empleado (in situ, prefabricadas, etc.).
- Por su función u objeto específico.

Las estaciones de bombeo prefabricadas son suministradas en módulos que incluyen todos los equipos y componentes ya montados. Normalmente se encuentran disponibles con tres tipos de equipos de bombeo: eyectores neumáticos, bombas sumergidas y bombas de cámara seca. Las estaciones de bombeo convencionales, se emplean cuando las condiciones locales impiden el uso de estaciones prefabricadas y la magnitud o la variación del gasto excede a las capacidades disponibles de las instalaciones prefabricadas (Tchobanoglous, 1995).

2. TRANSFORMACIONES BIOLÓGICAS DURANTE EL TRANSPORTE DE AGUAS RESIDUALES

A medida que el agua residual circula por las tuberías, la composición de los gases que constituyen la atmosfera interior del tubo se altera y difiere de la del aire normal debido a la entrada de gases, vapores de gasolina, monóxido de carbono y otros gases presentes en los efluentes de origen comercial e industrial, así como de la liberación de gases producidos por las transformaciones bacterianas que tienen origen en las paredes de los conductos.

La composición química de las aguas residuales consiste, principalmente, en materia orgánica e inorgánica, y los gases presentes en ellas. Los gases que con mayor frecuencia podemos encontrar son el nitrógeno (N_2), el oxígeno (O_2), el dióxido de carbono (CO_2), el sulfuro de hidrógeno (H_2S), el amoníaco (NH_3), y el metano (CH_4). Los tres últimos gases son producto de la descomposición de la materia orgánica.

Dos de los problemas más importantes asociados al funcionamiento de una red de alcantarillado son: la corrosión de las tuberías y sus instalaciones complementarias y el control de las emanaciones de gases malolientes en las alcantarillas. Ambos problemas están fundamentalmente relacionados con la producción de sulfuro de hidrógeno (Tchobanoglous, 1995).

El sulfuro de hidrógeno (H_2S) ha sido estudiado por los daños que causa a los sistemas que transportan aguas residuales. Desde 1900 se han hecho importantes investigaciones sobre los problemas causados por el sulfuro de hidrógeno. Ingenieros de todo el mundo han realizado importantes contribuciones en el tema (ASCE, 1982; ASCE, 1989; Pomeroy, 1974; Pomeroy *et al*, 1985).

(Laughlin, 1964; Parkhurst y Pomeroy, 1973) han reportado investigaciones sobre el efecto de la corrosión causada por sulfuro de hidrógeno en sistemas de bombeo que transportan aguas residuales, se han enfocado únicamente en la inyección de aire para controlar el sulfuro. La conclusión más importante de estos trabajos sugiere que la inyección de aire puede ayudar a reducir la corrosión causada por el sulfuro de hidrógeno.

Desafortunadamente, la mayor parte de las investigaciones realizadas se enfocan solo en el proceso bioquímico de las bolsas de gases corrosivos y los medios de control. Dedicar muy poca atención al comportamiento hidráulico de éstas.

2.1. Proceso de producción de sulfuro de hidrógeno

El sulfuro de hidrógeno presente en el agua residual, aparte del procedente de vertidos industriales, agua infiltrada del terreno y residuos de fosas sépticas evacuados a las

alcantarillas resulta, principalmente, de la reducción bacteriana del ion sulfato (SO_4^{2-}) existente. Otros compuestos que ocasionalmente contiene el agua residual, tales como sulfitos, tiosulfatos, azufre libre y otros compuestos inorgánicos, pueden también ser reducidos a sulfuro de hidrógeno.

El sulfuro de hidrógeno es un gas que está presente tanto en la atmosfera del interior de las alcantarillas como en estado disuelto en el agua residual. Este gas es responsable del olor a huevos podridos de muchas aguas residuales. El sulfuro de hidrógeno puede ser oxidado a ácido sulfúrico por la acción de bacterias que se desarrollan en las paredes de las tuberías, lo cual da lugar a importantes problemas de corrosión. El gas es tóxico para los seres humanos y ha causado la muerte de muchos operarios de los equipos de mantenimiento.

La reducción del azufre orgánico e inorgánico a sulfuro puede ser efectuada por un cierto número de microorganismos. Por ejemplo, muchos microorganismos pueden asimilar el azufre inorgánico en forma de sulfato, sulfito y tiosulfato reduciéndolos a sulfuro en su protoplasma, donde se acumula en forma de productos orgánicos que contienen azufre, principalmente proteínas y aminoácidos, por ejemplo, cisteína, metionina y cistina.

Los organismos importantes asociados a la producción de sulfuro de hidrógeno en las redes de alcantarillado son aquellos que reducen los sulfatos para obtener energía para el mantenimiento y crecimiento celular. En condiciones anaerobias (ausencia de oxígeno), dos géneros de bacterias anaerobias obligadas de la especie *Desulfovibrio*, comúnmente denominadas bacterias reductoras de sulfatos, pueden convertir el sulfato en sulfuro. La reacción de reducción suele ir acompañada, generalmente, de la oxidación de la materia orgánica y, en casos especiales, del hidrógeno (Tchobanoglous, 1995).

2.2. Corrosión debida al sulfuro de hidrógeno

El costo anual de las correcciones a introducir para paliar los efectos de la corrosión causada por el sulfuro de hidrógeno en tuberías, estaciones de bombeo y plantas de tratamiento es tan enorme que es importante conocer la forma en que se produce la corrosión y que es lo que puede hacerse para controlarla o eliminarla (Tchobanoglous, 1995).

2.2.1. Proceso de corrosión por el sulfuro de hidrógeno

La reducción bacteriana del sulfato a sulfuro solamente tiene lugar en un medio anaerobio, normalmente se realiza en la parte sumergida de la película biológica, que se desarrolla en las paredes de los conductos (Fig. 2.1).

Generalmente, el espesor de la película biológica varía entre 1 y 1.5 mm, dependiendo de la velocidad de circulación en la tubería. Cuando la velocidad es muy baja, pueden

desarrollarse películas de hasta 3 mm de espesor o más. Si el agua residual tiene alto contenido de sólidos o materias abrasivas, puede ser que la película biológica no llegue a desarrollarse.

Es importante mencionar que el proceso de corrosión en tuberías de concreto y metálicas es el mismo. Los procesos implicados en ambos casos son:

- Liberación de sulfuro de hidrógeno
- Absorción en las superficies húmedas expuestas
- Reacción de corrosión.

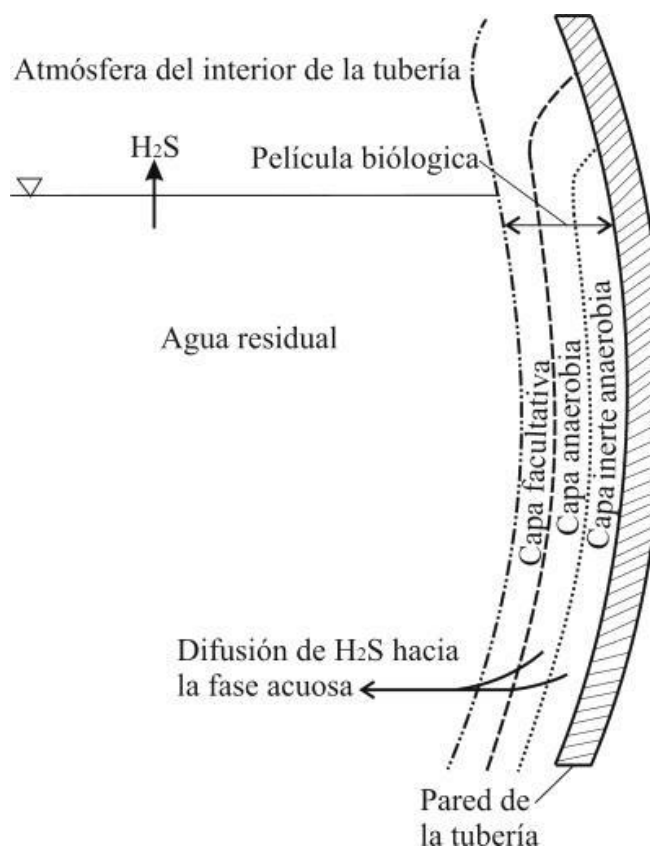


Fig. 2.1 Película biológica causante de la formación de sulfuro de hidrógeno

La película biológica libera sulfuro al agua residual. Una vez en solución, el H_2S escapa a la atmósfera del tubo. La cantidad presente en ésta está directamente relacionada con la concentración de H_2S en la fase acuosa, y la cantidad de sulfuro disuelto aumentará al disminuir el pH del agua residual (Fig. 2.2).

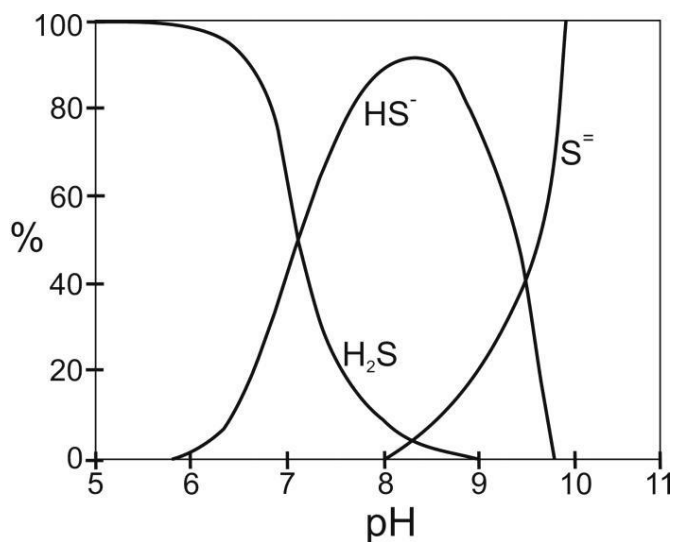


Fig. 2.2 Efecto del pH en el equilibrio del H₂S (EPA, 1985)

Después de su emisión a la atmósfera interna del tubo, el sulfuro de hidrógeno se transfiere a la zona de paredes del conducto situada por encima de la superficie libre del agua. Debido a que las paredes del conducto están húmedas a causa de las condensaciones acumuladas en ellas, el sulfuro de hidrógeno de la atmósfera queda fijado en las paredes tan pronto como entra en contacto con estas. El sulfuro de hidrógeno retenido en esas zonas húmedas es transformado en ácido sulfúrico por la acción de bacterias del tipo *Thiobacillus* y principalmente por las de la clase *Thiobacillus concretivorus*

El ácido sulfúrico reacciona con el cemento del concreto. Cuando existe una tasa baja de producción de ácido sulfúrico, la mayor parte reacciona con el cemento, originando un material pastoso que no tiene suficiente adherencia a los agregados utilizados en la fabricación del conducto. Si se tiene una tasa elevada de producción de ácido sulfúrico, este no podrá esparcirse por medio de la masa pastosa y consecuentemente, será arrastrado de las paredes por la corriente cuando el tubo trabaje totalmente lleno o se desprenderá por propio peso. Este proceso se repetirá a medida que continúa la corrosión de la tubería.

La forma de evolución de la corrosión varía, dependiendo de los siguientes factores:

- Circulación de aire
- Cantidad de condensados existente
- Tasa y cantidad de sulfuro de hidrógeno producido

Generalmente, la tasa de corrosión será más elevada en la clave de la tubería y junto a la superficie del agua a ambos lados (Fig. 2.3).

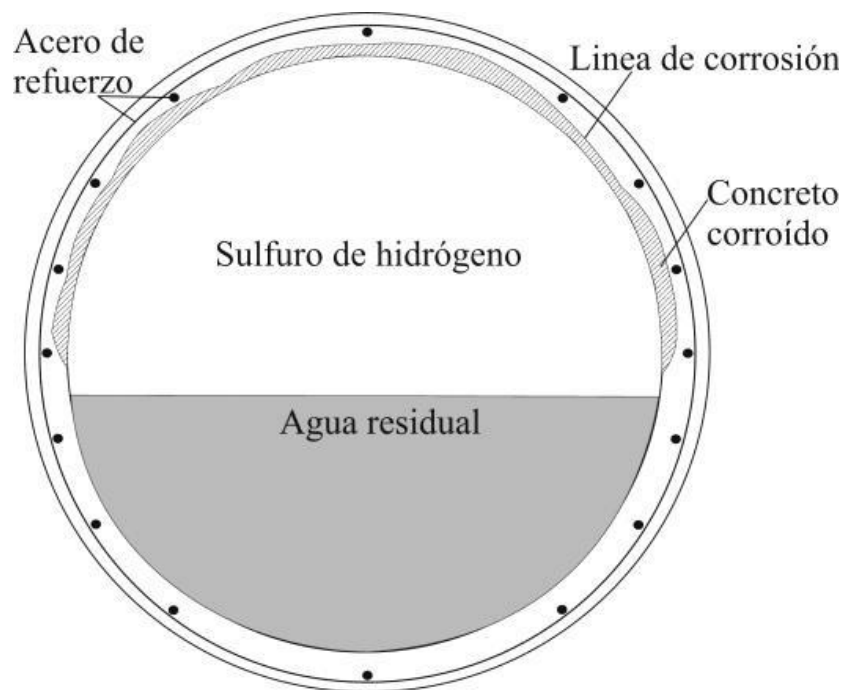


Fig. 2.3 Zonas de daño en las paredes de la tubería

2.2.2. Control de la corrosión por el sulfuro de hidrógeno

La corrosión debida al sulfuro de hidrógeno puede ser controlada por eliminación o limitación de la producción de aquel. Existen 2 clasificaciones de métodos para el control de la corrosión, los métodos físicos y químicos. Los métodos químicos tienen por objeto la interrupción del proceso del H_2S por medio de la adición de algún agente químico o cuidando los niveles de algunas propiedades químicas del agua tales como el pH o el contenido de oxígeno. El método físico de mayor utilidad es el mejoramiento del balance de oxígeno, este método consiste en introducir oxígeno, ya sea por aireación o inyección directa para oxidar el H_2S . Los principales métodos de control son los siguientes:

- Control en origen de las descargas que aportan materia orgánica y azufre
- Aireación
- Adición de productos químicos tales como cloro, peróxido de hidrógeno y otros agentes oxidantes, nitrato sódico y sustancias tóxicas.
- Limpieza periódica, tanto mecánica como química
- Ventilación
- Buen diseño



Los métodos más utilizados en redes de alcantarillado existentes son la aireación, cloración y la limpieza mecánica. En redes de nueva construcción, el sistema más económico y efectivo es el buen diseño de aquellas (Tchobanoglous, 1995).

2.3. Otras transformaciones biológicas

Además de la producción de sulfuro de hidrógeno, las características del agua residual en las tuberías se ven modificadas con el paso del tiempo, merced a un conjunto de reacciones mediatizadas por otras bacterias no especificadas. Los cambios que se producen pueden ser demostrados midiendo el potencial redox (reducción – oxidación) del agua residual en varios puntos aguas arriba de la estación depuradora y en otros situados aguas abajo.

En un medio acuoso, el potencial redox es una medida aproximada del equilibrio existente entre las sustancias reductoras y oxidantes presentes. Un potencial positivo corresponde a condiciones oxidantes, mientras que uno negativo lo es a condiciones reductoras. Las condiciones anaerobias se caracterizan por potenciales redox negativos o ligeramente positivos.

Las transformaciones que tienen lugar en el agua residual dependen de si existe oxígeno disuelto en la misma. En condiciones aerobias, numerosos compuestos orgánicos pueden convertirse en otros más simples, dióxido de carbono y diversos compuestos orgánicos oxidados. La presencia de dióxido de carbono tiende a disminuir el pH. En condiciones anaerobias, lo más probable es que los compuestos orgánicos complejos del agua residual se transformen en dióxido de carbono, metano, compuestos orgánicos más sencillos y ácidos. Tanto el dióxido de carbono como los ácidos producidos tienden a disminuir el pH (Tchobanoglous, 1995).

2.4. Ventajas de la inyección de aire a los conductos que transportan agua residual

Uno de los métodos físicos para disminuir la producción de sulfuro de hidrogeno en los conductos que transportan agua residual, es la inyección de aire. La adición de suficiente oxígeno disuelto puede prevenir o reducir de manera significativa la oxidación bioquímica de los sulfuros ya existentes (EPA, 1985).

Los métodos de adición de aire incluyen:

- Inyección directa de aire comprimido
- Uso de aspiradores Venturi
- Uso de bombas de aire comprimido en las estaciones de bombeo
- Disolución en tubo U, usando aire comprimido

La aireación puede ser un método económico para controlar la generación de sulfuro si el aire se introduce por medios pasivos, como la presencia de condiciones turbulentas en el sistema. En caso contrario, se requerirá de equipo para comprimir e introducir el aire en las tuberías y esto representará un costo considerable. Las principales ventajas de este método son la reducción de la DBO y la no toxicidad en las aguas residuales. En una tubería a presión, una bolsa de aire puede formarse y originar problemas de carácter local, si la transferencia de oxígeno es inadecuada aun cuando este protegida por válvulas expulsoras de aire (EPA, 1992).

3. BOLSAS DE AIRE/GAS EN CONDUCTOS CERRADOS

3.1. Causas de la acumulación de bolsas de aire/gas en los conductos cerrados

El aire atrapado presente en las tuberías generalmente no puede ser expulsado por completo; sin embargo, entender las maneras en las que se introduce, facilita al ingeniero disminuir la cantidad que ingresa. Entre las posibles causas de la entrada de aire a los conductos cerrados, se mencionan las siguientes:

- a) Inicialmente la línea de conducción se encuentra completamente llena de aire antes de poner en operación el sistema, por ello es fundamental eliminar todo el aire antes del llenado de la misma. Cuando inicia el llenado de la línea, gran parte del aire es arrastrado aguas abajo para ser evacuado por válvulas y demás mecanismos instalados con ese propósito. Aunque es importante mencionar que una parte del aire podría quedar atrapado en los puntos altos del sistema.
- b) El agua contiene aproximadamente 2 % de aire disuelto. Este puede ser expulsado hacia la superficie cuando la presión es reducida o también, si la temperatura se incrementa.
- c) El equipo mecánico instalado puede introducir aire al sistema. Un ejemplo son las bombas que, al momento de realizar la succión, ingresan entre 5 y 10 % de aire debido a que se generan vórtices. Asimismo, cuando existe presión de vacío, el aire podría introducirse a través de juntas defectuosas o por medio de válvulas de admisión de aire.

3.2. Problemas producidos por las bolsas de aire/gas en los conductos cerrados

El aire atrapado en los conductos cerrados puede generar diversidad de problemas. Si el aire se acumula en los puntos altos de las conducciones, estos pueden reducir su sección efectiva para el paso del agua y de esta manera dar como resultado un incremento de la pérdida de carga.

El aire también puede acelerar el proceso de corrosión en las tuberías de fierro por el aumento de la cantidad de oxígeno disponible. Los dispositivos de medición se ven afectados por el aire atrapado, al producirse lecturas incorrectas. La transición de tubo parcialmente lleno a tubo lleno causada por la presencia de una bolsa de aire podría generar vibraciones en la tubería. Las bolsas de aire de mayor tamaño regresan a contraflujo debido a su fuerza de flotación y causar daños significativos en estructuras tales como sifones o cajas rompedoras de presión (Pozos *et al.*, 2012).

3.2.1. Incremento de la pérdida de carga

El aire atrapado en tuberías es arrastrado por el flujo de agua y suele concentrarse en puntos altos de la línea, originando la formación de bolsas de aire que se incrementan en tamaño si más bolsas o burbujas de aire se les unen. Si una bolsa de aire se ubica en un tramo de tubería con pendiente descendente, el agua tratará de moverla en dirección aguas abajo. En caso de que la bolsa de aire sea lo suficientemente grande, la fuerza de flotación de la bolsa puede igualar la fuerza de arrastre del agua, originando que la bolsa de aire permanezca estacionaria en el conducto, y la fuerza de fricción tienda a cero (Fig. 3.1).

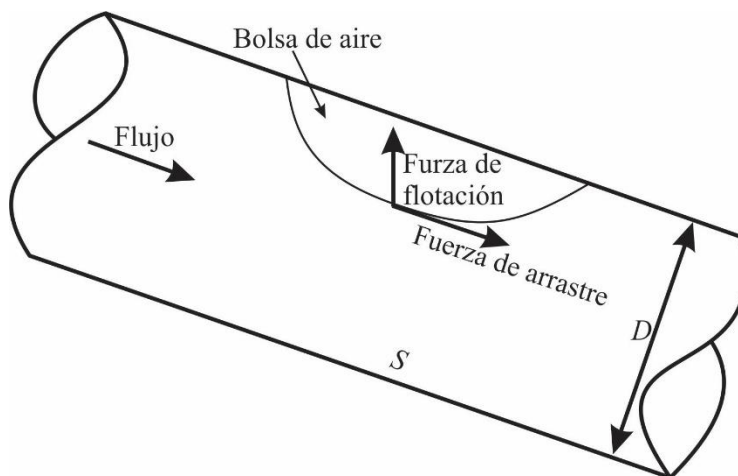


Fig. 3.1 Fuerzas actuantes en una bolsa de aire estacionaria (Pozos et al., 2012)

El aire que se introduce reduce la sección transversal de la tubería, presentándose un flujo a superficie libre debajo de la bolsa de aire, provocando que la línea piezométrica sea paralela a la pendiente del conducto (Fig. 3.2).

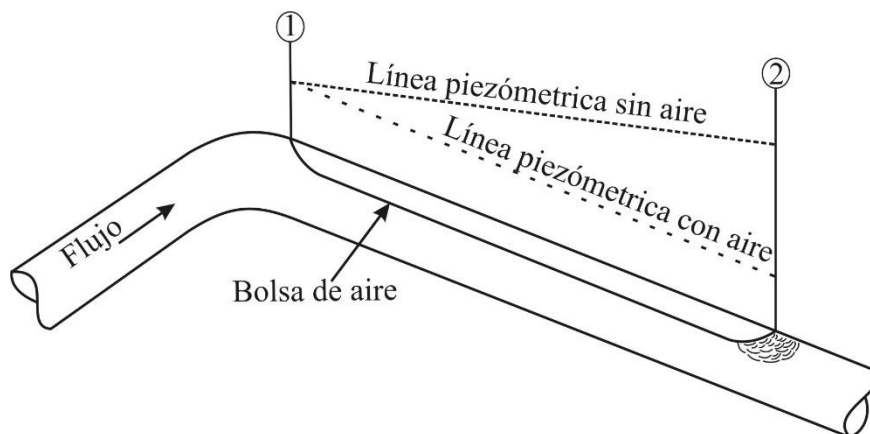


Fig. 3.2 Bolsa de aire en una pendiente descendente (Edmunds, 1979)

La presencia de aire en sistema de conducción produce una pérdida de carga que reduce su capacidad. Aplicando la ecuación de la energía entre los extremos de una bolsa de aire, se comprueba que la pérdida de carga es similar a la longitud de la componente vertical de la bolsa (Edmunds, 1979, Corcos, 2003, Corcos, 2005).

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 en flujo a superficie libre (Richards, 1962).

En sistemas a bombeo, el aire atrapado origina un incremento del consumo de energía eléctrica en los equipos y una disminución del gasto, si las bolsas de aire ubicadas en los puntos altos de las líneas de conducción no son removidas hacia aguas abajo (Fig. 3.3). En un caso extremo puede ocurrir que el flujo en el conducto no fluya por la pérdida de carga acumulada debido a varias bolsas de aire. La pérdida de carga en el sistema podría llegar a ser mayor que la carga proporcionada por la bomba.

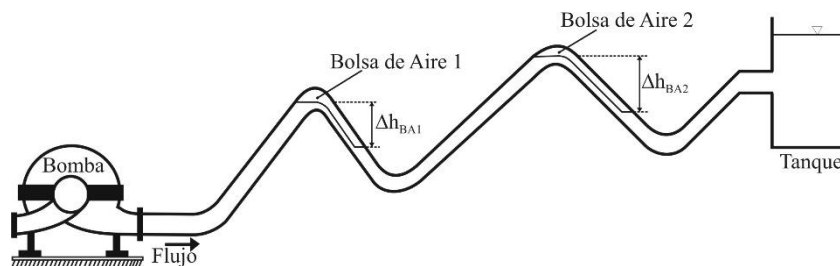


Fig. 3.3 Bolsas de aire en un sistema a bombeo (Pozos et al., 2012)

Si las pérdidas de carga fueran menores, los derrames no ocurrirían y el flujo no se detendría por completo, entonces los problemas causados por la reducción de la sección transversal del conducto pasarían desapercibidos (Richards, 1962).

Entre más bolsas de aire se acumulen en los puntos altos de las líneas de conducción, mayor será la pérdida de carga. Por esta razón la pérdida de carga total debe calcularse como la suma de pérdidas producidas en cada bolsa de aire presente.

3.2.2. Retorno de bolsas de aire/gas (*blowback*)

El aire acumulado en los puntos altos de las líneas de conducción de sistemas a bombeo, propicia la formación de grandes bolsas de aire, llegando a tener longitudes de varias veces el diámetro del conducto. En ocasiones ocurre que la bolsa de aire se estabiliza en tramos de la línea de conducción donde exista una pendiente descendente pronunciada, presentándose un salto hidráulico en el extremo aguas abajo de la bolsa (Fig. 3.4).

La turbulencia en el salto hidráulico provoca que el aire ingrese y se mezcle con el agua que circula en la tubería. Hacia aguas abajo del salto hidráulico, el aire que se escapa forma burbujas que se acumulan formando burbujas y/o bolsas de aire de mayor tamaño. Si estas bolsas son lo suficientemente grandes, la fuerza de arrastre del agua se ve superada por la fuerza de flotación propia de la bolsa de aire, permitiendo que permanezcan estacionarias en la tubería al tiempo que incrementan su tamaño por la llegada de más burbujas de aire que llegan a unírseles. Con el incremento del volumen de aire en las bolsas, éstas reducirán su velocidad por el aumento de la fuerza de flotación. Es entonces cuando se presenta el fenómeno conocido como *blowback*, donde las bolsas de aire regresan con una enorme fuerza por medio del salto hidráulico provocando daños parciales o totales a la base de estructuras hidráulicas, como tanques y cajas rompedoras de presión (Pozos *et al.*, 2012).

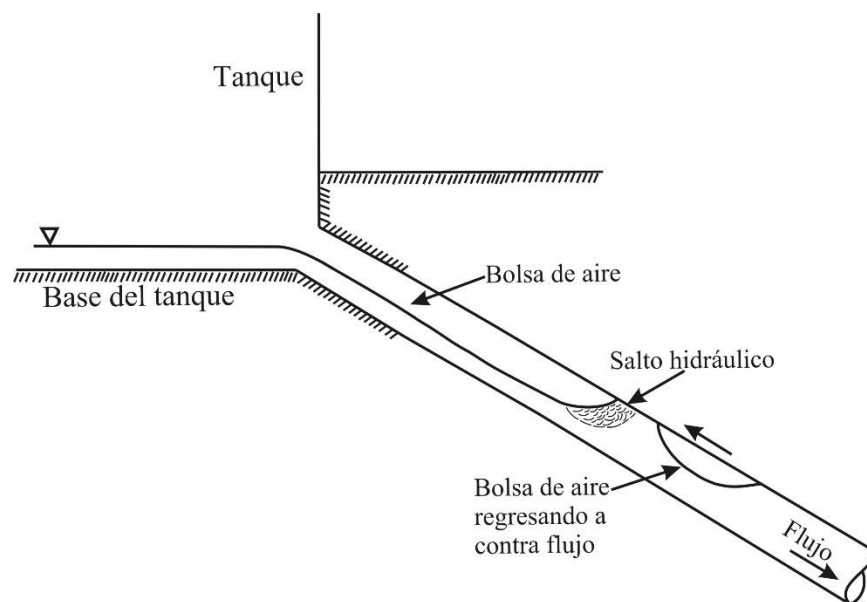


Fig. 3.4 Retorno de bolsas de aire a contraflujo (*blowback*) (Pozos *et al.*, 2012)

3.2.3. Efectos de las bolsas de aire/gas en transitorios hidráulicos

Generalmente cuando se analizan los transitorios hidráulicos se supone que no existe aire atrapado en las líneas de conducción. En muchos sistemas de este tipo, el aire puede ingresar por medio de los vórtices que se generan en la succión de las bombas. En presencia de una presión menor que la atmosférica, el aire puede introducirse en las juntas y válvulas con sellos defectuosos.

El agua contiene aproximadamente 2% de aire disuelto, si la presión disminuye o se incrementa la temperatura, el aire se escapa formando burbujas que se acumulan en pequeñas bolsas ubicándose en los puntos altos de las líneas de conducción. El incremento

de velocidad por debajo de la bolsa de aire puede originar el desprendimiento de una porción de la bolsa o finalmente que ésta se remueva (Fig. 3.5).

El aire atrapado puede provocar efectos perjudiciales en los transitorios hidráulicos, originando sobrepresiones importantes en la zona de descarga de las bombas, en presencia de aire atrapado se pueden generar mayores velocidades de giro en reversa de los impulsores.

El efecto del aire atrapado en transitorios hidráulicos ha sido estudiado por numerosos investigadores, de ellos muchos han propuesto modelos matemáticos para su análisis.

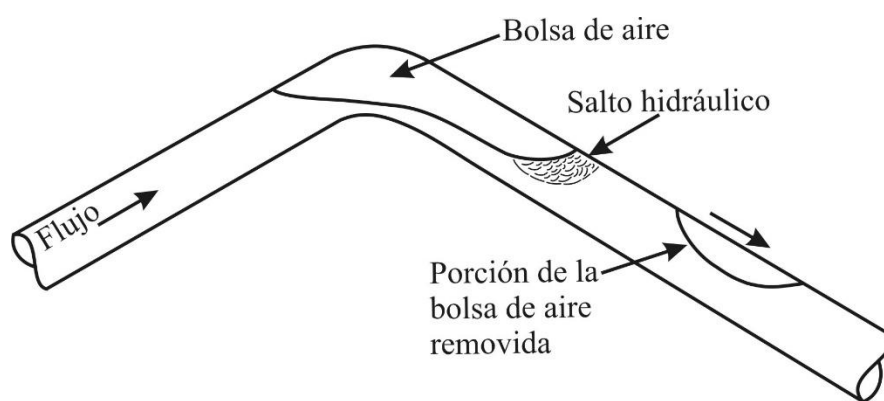


Fig. 3.5 Golpe de ariete causado por la remoción de una bolsa de aire (Pozos et al., 2012)

Brown (1968) reportó resultados obtenidos en campo y a través de cálculos numéricos de 2 acueductos de bombeo donde se presentaron presiones mayores a las de diseño, lo cual se atribuyó a la presencia de aire atrapado. Brown concluyó que el efecto de aire y otros gases disueltos en el agua se deben considerar para el análisis numérico de los transitorios.

Martin (1976) simuló matemáticamente el efecto del aire atrapado en transitorios hidráulicos en líneas de conducción con distintas configuraciones. Sus resultados mostraron que el aire puede ser perjudicial o benéfico en relación a su cantidad, localización, configuración del sistema y de las causas del transitorio.

Jönsson (1985) describió el impacto de bolsas de aire en transitorios hidráulicos ocurridos en una planta de bombeo de aguas residuales donde se tenían instaladas válvulas de retención en la descarga de las bombas y existían niveles bajos de agua en el tanque de succión. Jönsson concluyó que las sobrepresiones fueron causadas por la compresión de una bolsa de aire confinada contra la válvula de retención. Jönsson (1992) obtuvo resultados de mediciones realizadas en 3 diferentes estaciones de bombeo, ahora su



modelo computacional considera el efecto de las bolsas de aire lo que le permitió verificar sus conclusiones anteriores.

Hashimoto *et al.* (1988) estudiaron los transitorios hidráulicos causados por la apertura rápida de una válvula situada en el extremo aguas arriba de una tubería considerando dos casos: una bolsa de aire y un flujo de gas cuando se presenta una columna de líquido en la tubería. Al finalizar los experimentos, las presiones máximas resultaron ser 24 veces mayores que la presión de operación al considerar aire atrapado.

Larsen y Burrows (1992) realizaron mediciones de presiones transitorias en 3 sistemas a bombeo de aguas residuales, las cuales compararon con resultados obtenidos a partir de la aplicación del programa WHPS. Las comparaciones mostraron un efecto combinado de separación de columna y bolsas de aire localizadas en puntos altos de las 3 líneas causado por el paro repentino de las bombas. Concluyeron que las bolsas de aire pueden disminuir o incrementar las presiones, dependiendo las causas que produzcan el transitorio y del volumen de aire en las bolsas.

Qiu (1995), Burrows y Qiu (1995), y Qiu y Burrows (1996) presentaron casos reales mostrando la influencia de bolsas de aire en transitorios hidráulicos. Las presiones pueden aumentar entre 1.6 y 2 veces más en comparación con la presión en régimen estacionario. Estos resultados les permitieron afirmar que la presencia de bolsas de aire en las líneas de conducción por bombeo, pueden tener un efecto perjudicial cuando hay una abrupta interrupción del flujo por el paro repentino de las bombas.

Förster (1997) investigó de forma experimental y analítica la reducción de la presión en acueductos debida a la presencia de bolsas de aire en puntos altos de la línea de conducción, durante el desarrollo del transitorio hidráulico. Realizo varias mediciones para identificar la influencia de la geometría y el volumen de las bolsas de aire en el amortiguamiento de las presiones transitorias.

Fuertes (2001) propuso un modelo matemático para el análisis de transitorios hidráulicos con bolsas de aire ubicadas en puntos altos de los acueductos. Consideró 2 situaciones: la primera utilizando válvulas de admisión y expulsión de aire, la segunda sin tomar en cuenta estos dispositivos. Por medio de una investigación experimental valido su modelo encontrando buena similitud con los resultados teóricos obtenidos.

Ochoa (2005) desarrolló un modelo matemático basado en las ecuaciones de flujo separado para dos componentes (agua-aire) con el objetivo de determinar el comportamiento del aire atrapado en conductos de presión, cuando este ocupa parcialmente la sección



transversal de la tubería. Sus resultados numéricos fueron validados posteriormente en un dispositivo experimental.

3.2.4. Reducción de la eficiencia en sistemas de bombeo

Thomas (2003) presenta una comparación útil entre la eficiencia de algunas líneas de conducción a bombeo y el costo de remover el aire atrapado en la línea. Estimo que el 75 % del costo de operación en un acueducto se relaciona con el bombeo.

La revisión de varios acueductos para distribución de agua potable, realizada en todo el mundo, reveló 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 causa una disminución de entre 15 y 20 % del gasto otorgado 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 forzadas y, como consecuencia, demanden mayor consumo de energía eléctrica.

3.3. Hidráulica de las bolsas de aire/gas en conductos cerrados

Las grandes bolsas de gas constituidas principalmente de aire pueden quedar atrapadas en los puntos altos de los conductos a presión de agua residual, cuando no se coloquen válvulas expulsoras de aire en las cimas de los sistemas que podrían acumular aire. Es posible que aún si se tuviesen válvulas en los puntos altos, éstas podrían fallar y el aire y/o los gases corrosivos no serían expulsados.

3.3.1. Movimiento de las burbujas y bolsas de aire/gas

Cuando las bolsas de gas se extienden en la sección de la tubería con pendiente descendente pronunciada, generalmente al final de las bolsas se presenta un salto hidráulico. La turbulencia presente del salto, genera pequeñas burbujas de gas que son bombeadas o introducidas hacia el tubo que fluye completamente lleno. Las pequeñas burbujas son arrastradas por el flujo para formar burbujas más grandes o pequeñas bolsas de gas que se van adhiriendo a la parte superior de la tubería (Fig. 3.6).

Si las bolsas que fluyen pegadas a la tubería continúan creciendo, su fuerza de flotación aumentará y ésta podría llegar a ser mayor que la fuerza de arrastre propia del flujo de agua sobre las bolsas. Si esto se presenta, las bolsas de aire podrían regresar a contraflujo e incorporarse a la bolsa de mayor tamaño por medio del salto hidráulico. El caso ideal sería que las burbujas y bolsas de gas fueran removidas de la línea de conducción por la velocidad del agua, pero siempre esto no es posible (Pozos *et al.*, 2012).

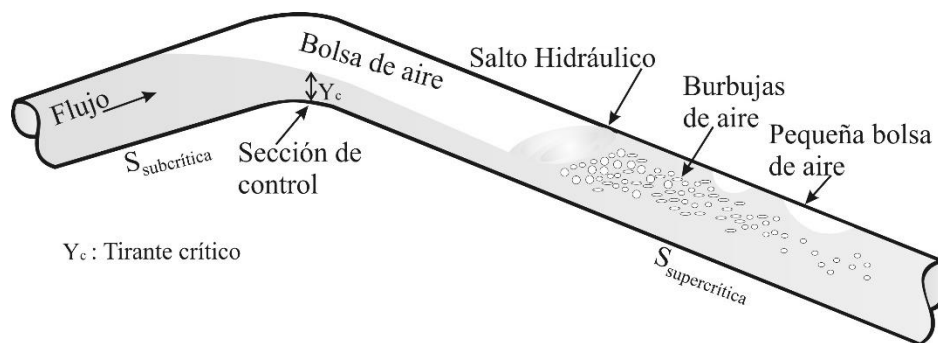


Fig. 3.6 Bolsa de gas acumulada en un cambio de pendiente (Pozos et al., 2012)

3.4. Válvulas de aire

Es importante considerar la presencia de aire atrapado en los sistemas de bombeo. Es por ello que es necesario implementar mecanismos que nos ayuden a expulsarlo. Uno de los mecanismos utilizados es el mecánico consistente en el uso de válvulas de aire y venteos.

Las válvulas de aire son las más usadas en líneas de conducción alrededor del mundo por su modo de operación al expulsar y/o admitir aire de manera automática sin asistencia del personal de operación. Las válvulas de aire son dispositivos que permiten la salida de aire y gas corrosivo de las tuberías de aguas residuales. Por lo general las válvulas de aire se dividen en 3 tipos:

- Válvulas de admisión y expulsión de aire (VAEA)
- Válvulas de expulsión de aire (VEA)
- Válvulas combinadas (VAC)

3.4.1. Válvulas de admisión y expulsión de aire (VAEA)

Este tipo de válvulas se usan para expulsar el aire durante la puesta en marcha de los equipos de bombeo y al llenar la conducción. La liberación del aire se debe realizar de forma lenta para evitar algún fenómeno transitorio. Las VAEA admiten grandes volúmenes de aire para evitar posibles daños a los conductos por separación de columna o al drenar la tubería

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 (Fig. 3.7).

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 (Pozos et al., 2012).

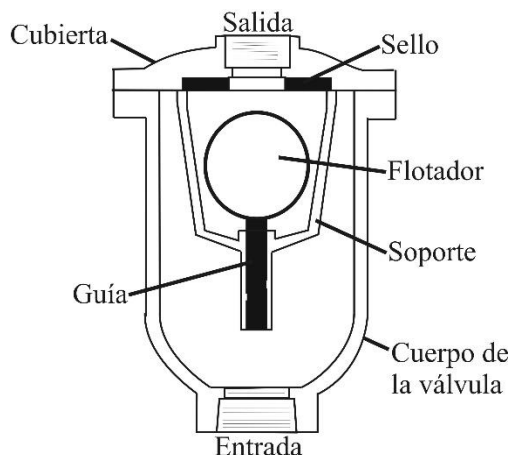


Fig. 3.7 Esquema de una válvula de admisión y expulsión de aire (VAEA) (Pozos et al., 2012)

3.4.2. 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 estos operan normalmente. Las VEA tienen un flotador hidromecánico que detecta la presencia del aire en las líneas de conducción, y permite su expulsión cuando estas trabajan a presiones mayores que la atmosférica.

Durante la operación de un acueducto, pequeñas cantidades de aire se introducen en el cuerpo de la VEA (Fig. 3.8). 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 este selle el orificio de la válvula. Este proceso se repite si una nueva cantidad de aire se concentra en la VEA (Pozos et al., 2012).

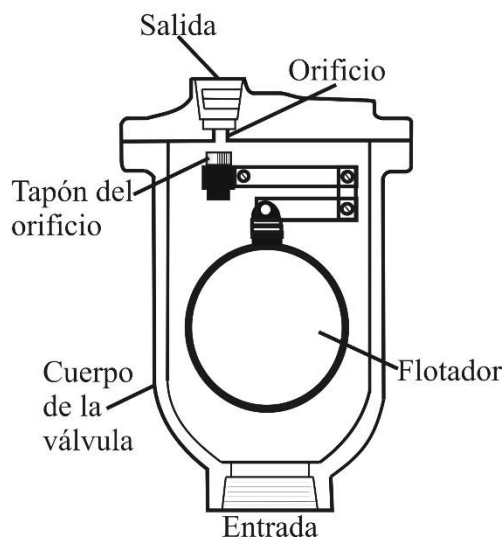


Fig. 3.8 Esquema de una válvula de expulsión de aire (VEA) (Pozos et al., 2012)

3.4.3. 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 (Fig. 3.9). 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.

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 (Pozos et al., 2012).

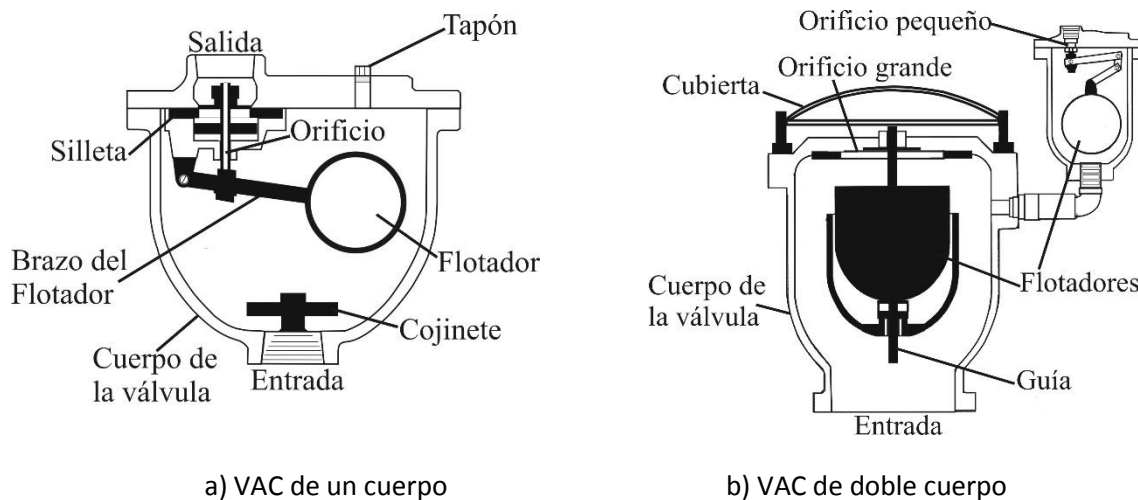


Fig. 3.9 Esquema de válvulas de aire combinadas (VAC) (Pozos et al., 2012)

3.4.4. Válvulas de aire para aguas residuales

Diversos fabricantes han diseñado diferentes modelos de válvulas de aire para su uso en sistemas de conducción de aguas residuales de modo que el agua residual se mantenga alejada de las partes críticas de la válvula, interponiendo por lo general un colchón de aire que minimiza los riesgos de obturación o mal funcionamiento. Otro aspecto a tener en cuenta es asegurar que la válvula no expulse líquido al exterior durante su operación. Esta característica, si bien no deseable, puede llegar a ser admisible para una válvula que trabaja con agua limpia; sin embargo, debe ser evitada cuando se trata de aguas residuales por los obvios riesgos inherentes de contaminación.

La empresa A.R.I. diseña válvulas de aire para aguas residuales que pueden funcionar con líquidos que contienen partículas sólidas, tales como aguas servidas, efluentes y fluidos que pueden provocar la acumulación de sustancias químicas. Algunos de sus diseños son los siguientes:

➤ Válvula de aire trifuncional para aguas residuales, modelo D-020

En este tipo de válvula se combinan un orificio de aire y vacío y una purga de aire en una sola unidad (Fig. 3.10). La válvula ha sido especialmente diseñada para diversos sistemas de conducción de aguas residuales y servidas, y variadas condiciones de funcionamiento. Esta válvula evacua el aire durante el llenado de la tubería, permite la descarga eficiente de bolsas de aire y gas de las tuberías presurizadas, y admite grandes volúmenes de aire en caso de vaciado de la tubería. El diseño exclusivo permite separar el líquido del mecanismo de cierre hermético (sellado) y asegura óptimas condiciones de funcionamiento. Algunas

aplicaciones de este tipo de válvulas son: estaciones de bombeo para aguas residuales, plantas de tratamiento de aguas, líneas de suministro de aguas residuales y agua de mar.



Fig. 3.10 Válvula de aire trifuncional para aguas residuales, modelo D-020

➤ **Válvula de purga de aire automática para aguas residuales, modelo S-020**

El diseño de este tipo de válvula es para funcionar con líquidos que contienen partículas sólidas, es decir con aguas servidas y efluentes. Las válvulas descargan el aire (gases) acumulado mientras el sistema está presurizado y en funcionamiento. El diseño exclusivo permite separar el líquido del mecanismo de cierre hermético (sellado) y asegura óptimas condiciones de funcionamiento. La presencia de aire en un sistema de conducción de agua puede reducir el área efectiva del corte transversal del flujo, y provocar así un aumento de la pérdida de carga y la disminución del caudal. El aire/gas atrapado puede también ser causa de golpes de ariete y de errores en la medición del consumo, a la vez que acelera la corrosión.



Fig. 3.11 Válvula de purga de aire automática para aguas residuales, modelo S-020

3.5. Falla 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 las de admisión y expulsión de aire (VAEA).

Este tipo de dispositivos se componen de un flotador esférico hueco, el cual 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.

El cierre prematuro o cierre dinámico, 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 – 0.05 bar), esto provoca que las válvulas no puedan expulsar el aire atrapado, resultando en la acumulación de 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. Los resultados se muestran en forma gráfica en la Fig. 3.12.

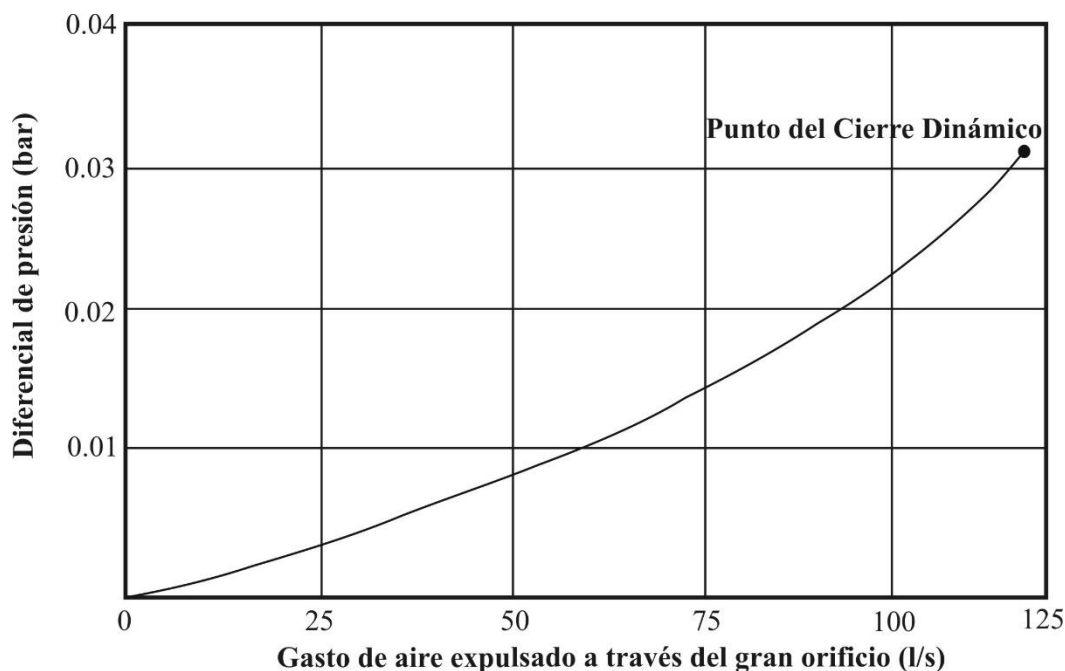


Fig. 3.12 Cierre dinámico de válvulas de gran orificio

4. FLUJO AGUA – AIRE EN CONDUCTOS CERRADOS

4.1. Patrones de flujo

El flujo bifásico puede ocurrir en numerosos patrones, dependiendo de las velocidades y los gastos de los fluidos o componentes, así como de sus propiedades físicas entre otras variables. Varios investigadores han determinado diferentes patrones de flujo de dos fluidos circulando de forma concurrente por conductos de diferentes geometrías. En tubos transparentes y velocidades moderadas es posible clasificar los patrones de flujo de forma visual. Sin embargo, a velocidades mayores los patrones tienen un comportamiento caótico, por lo tanto, otras técnicas deben ser utilizadas para analizar los flujos dentro de los ductos. Las investigaciones más recientes reportan el uso de cámaras de alta velocidad, para posteriormente analizar las imágenes obtenidas cuadro por cuadro y poder clasificar los patrones de flujo.

Es importante destacar, que existen importantes diferencias entre los nombres dados a los diferentes patrones de flujo por diferentes autores. Algunas descripciones de varios patrones en dos fases de flujos concurrentes son presentadas por Hewitt y Hall-Taylor (1970). Para el propósito de este trabajo, se utilizan únicamente la clasificación de los patrones de flujo más comúnmente aceptados.

4.1.1. Patrones de flujo horizontales concurrentes

Los patrones observados en flujo horizontal concurrente y en tubos inclinados dependen de la velocidad del gas relativa a la del líquido y de la pendiente del conducto. Asimismo, la gravedad produce un efecto significativo en los perfiles de flujo que se presentan si la inclinación del conducto es variada.

Flujo con pequeñas burbujas de gas. La fase gaseosa se encuentra distribuida en forma de pequeñas burbujas esféricas dentro de una fase líquida continua, las cuales tienden a viajar en la parte superior del conducto. Para velocidades moderadas de ambos fluidos, toda la sección transversal del tubo contiene burbujas de gas.

Flujo con burbujas de gas. Cuando el gasto de gas se incrementa las pequeñas burbujas se unen formando burbujas de mayor tamaño, las cuales fluyen en la parte superior del conducto.

Flujo estratificado. En este caso la separación de ambos fluidos es completa, el líquido fluye en la parte baja del conducto y el gas en la parte alta del mismo. El flujo estratificado se desarrolla cuando los componentes o fluidos viajan a velocidades bajas.

Flujo ondular. Al incrementarse la velocidad del gas durante un flujo estratificado, se produce una inestabilidad en la superficie del líquido, lo que provoca ondas o perturbaciones que viajan en la misma dirección del flujo.

Flujo con bolsas de gas. Un mayor incremento en la velocidad de la fase gaseosa en un flujo ondular, genera que las ondas o perturbaciones tengan una mayor altura, lo suficiente para alcanzar el techo del conducto y formar las bolsas de aire, las cuales viajan con una velocidad mayor que la del líquido.

Flujo anular. Si la velocidad del gas se incrementa aún más, esto tendrá como resultado la formación de un núcleo de gas rodeado con una delgada capa de líquido.

En la Fig. 4.1 se presentan algunos de los regímenes más conocidos y más estudiados por varios investigadores.

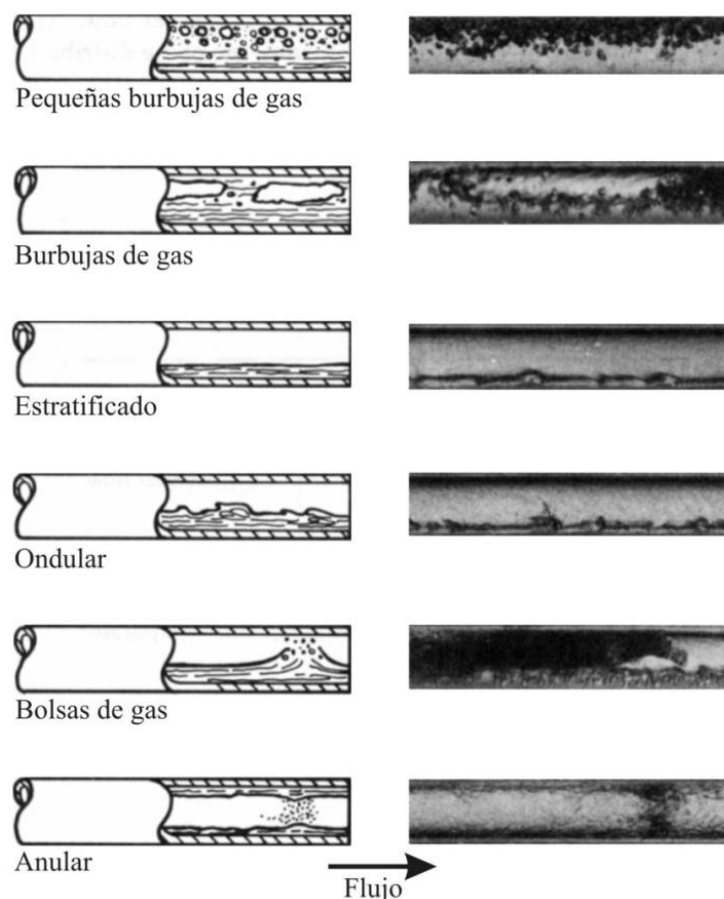


Fig. 4.1 Patrones de flujo horizontales concurrentes (Collier, 1981)

4.1.2. Patrones de flujo verticales concurrentes

Los patrones de flujo en conductos verticales se presentan en la Fig. 4.2. Es importante notar que estos patrones de flujo son más simétricos con respecto al eje del conducto, que aquellos que se presentan en tubos horizontales.

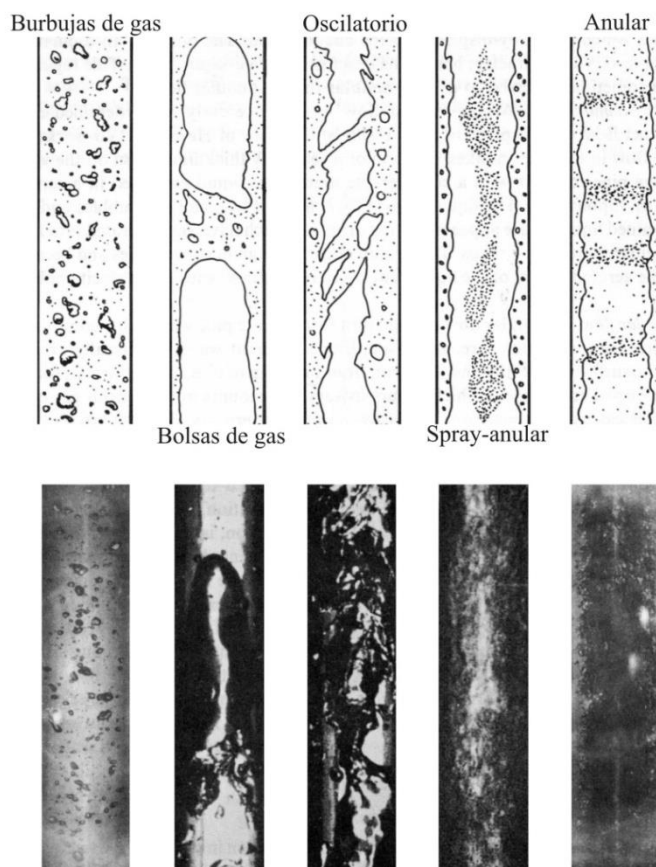


Fig. 4.2 Patrones de flujo verticales concurrentes (Collier, 1981)

Flujo con burbujas de gas. Para pequeñas velocidades de la fase líquida, el gas se encuentra distribuido en forma de pequeñas burbujas.

Flujo con bolsas de gas. Cuando en un flujo con burbujas se incrementa el gasto del gas, éstas tenderán a unirse para formar bolsas de gas con una forma parecida a la de una bala. Las bolsas tienen un diámetro similar al del conducto, excepto por una delgada capa del líquido en la pared del tubo.

Flujo oscilatorio. Al incrementarse la velocidad durante el flujo con bolsas de gas, el patrón se vuelve inestable u oscilatorio por la ruptura de las bolsas.



Flujo spray – anular. Este patrón de flujo ha sido identificado como poco común. En el perímetro de la tubería se forma una delgada capa de líquido, mientras otra cantidad del mismo se introduce al núcleo central formado por el gas.

Flujo anular. En el flujo anular una capa de líquido fluye pegada a la pared, al mismo tiempo que un núcleo de gas es transportado a alta velocidad por el conducto. Esto causa el desprendimiento de gotas de líquido, que se unen al núcleo de gas en diferentes cantidades durante periodos variados. En este patrón las gotas están más separadas unas de otras comparadas con aquellas presentes en el flujo spray-anular.

4.2. Entrada de aire a través de estructuras hidráulicas

La entrada de aire se presenta en estructuras hidráulicas, tales como sifones, acueductos, vertedores de embudo, cimacios vertedores, entre otras. El fenómeno se presenta cuando un chorro de agua en flujo supercrítico impacta a un cuerpo de agua estático o con una velocidad baja o al ocurrir un salto hidráulico al final de una bolsa de aire atrapada en un conducto cerrado. La acción turbulenta aguas abajo de la zona de impacto del agua o del salto hidráulico genera burbujas de aire, proceso conocido como “generación de burbujas”. La entrada de aire va a ocurrir siempre y cuando las burbujas sean transportadas hacia aguas abajo. Investigación experimental ha mostrado que no siempre que se produce generación de burbujas de aire, éstas van a ser arrastradas por el flujo de agua. Todo dependerá de las condiciones hidráulicas aguas abajo de la zona turbulenta (Wisner et al., 1975).

En esta investigación se considera que el aire introducido por un salto hidráulico que se presenta al final de una bolsa de aire atrapada en un acueducto a bombeo, es el porcentaje de aire α contenido en la mezcla homogénea de agua-aire.

4.2.1. Salto hidráulico en acueductos

Desde el punto de vista de los diseñadores de acueductos, el flujo de dos componentes como el de agua-aire en conductos cerrados puede dividirse en cuatro categorías generales. En cada uno de estos casos pueden presentarse uno o varias combinaciones de los patrones de flujo antes descritos. Según Falvey (1980) las categorías son las siguientes:

- Flujo en conductos parcialmente llenos
- Flujo teniendo un salto hidráulico que sella el conducto
- Flujo a través de controles de flujo
- Caídas de agua

Para el propósito de este trabajo sólo se analiza el salto hidráulico que sella el conducto. Los trabajos más conocidos acerca del flujo agua-aire, donde ocurre la transición de flujo supercrítico a tubo completamente lleno a través de un salto hidráulico son los realizados por Lane y Kindsvater (1938), Kalinske y Robertson (1943), Fasso (1955), Cohen de Lara (1955), Haindl (1957), Rajaratnam (1965), Ahmed et al. (1984), Matsushita (1989), y Smith y Chen (1989).

Una de las investigaciones más recientes relacionadas con saltos hidráulicos en conductos circulares es la que llevaron a cabo Stahl y Hager (1999). El estudio donde se analizaron las principales características de este tipo de saltos, fue realizado en un dispositivo experimental con una sección de medición de 6 metros de largo compuesta de tubos de acrílico con diámetro interior de 240 mm. La investigación del flujo a superficie libre y los saltos hidráulicos fue realizada a presión atmosférica.

4.3. Mecanismos de entrada de aire

Ervine (1998) investigó la entrada de aire en conductos cerrados y comenta que existen por lo menos tres mecanismos mediante los cuales el aire se introduce a un flujo presurizado, es decir, el tubo fluye totalmente lleno. Estos mecanismos se describen a continuación:

Primer mecanismo. El primer mecanismo se relaciona con la entrada de aire en ausencia de una acción turbulenta en la transición de flujo a superficie libre a tubo completamente lleno. Un chorro de agua que impacta a baja velocidad un cuerpo de agua estático o que se mueve lentamente, puede arrastrar una delgada capa de aire (capa límite). Este aire puede ser introducido hacia aguas abajo, cuando se genera una separación entre la zona de recirculación del flujo y el chorro de agua, ver Fig. 4.3.

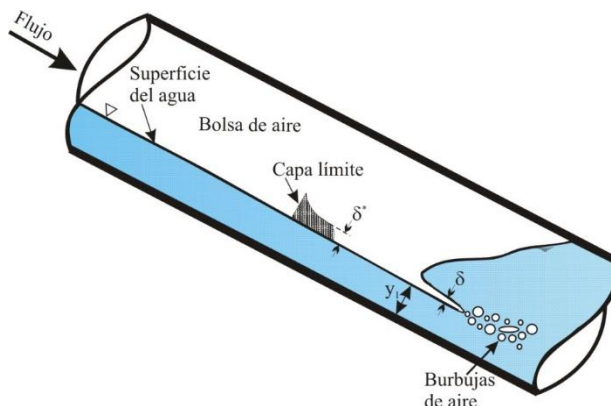


Fig. 4.3 Primer mecanismo de entrada de aire

Segundo mecanismo. El segundo mecanismo tiene que ver con la turbulencia o perturbación sobre la superficie libre del chorro de agua aguas arriba de la zona de entrada de aire. La agitación en la superficie del agua tiene lugar por diferentes causas, entre las que se encuentran la formación de vórtices, la velocidad del agua, que provoca la generación de ondas. La cantidad de aire que entra hacia aguas abajo del chorro puede ser representado por un área sombreada, tal como se muestra en la Fig. 4.4. La magnitud de la inestabilidad en la superficie del agua puede relacionarse con la carga de velocidad. El argumento anterior ha sido confirmado mediante análisis dimensional, sin embargo esta afirmación necesita demostrarse experimentalmente.

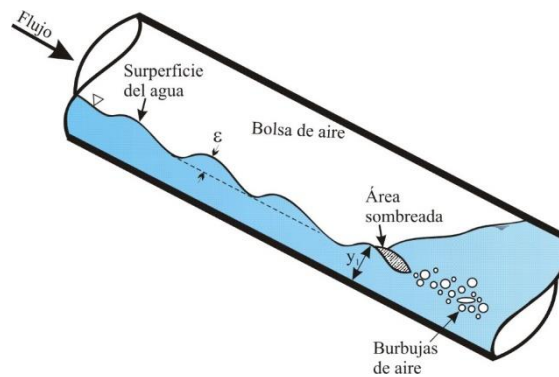


Fig. 4.4 Segundo mecanismo de entrada de aire

Tercer mecanismo. Este es un mecanismo de aeración a superficie libre que contribuye a la velocidad de entrada de aire. A altas velocidades la aeración en la superficie libre se puede presentar en el chorro aguas arriba. Ésta se puede incrementar debido a la turbulencia en la superficie del cuerpo de agua que recibe el impacto del chorro, como se observa comúnmente en un salto hidráulico, lo cual da lugar a la entrada de aire a través de la superficie libre con una longitud d . La Fig. 4.5 muestra los detalles de este mecanismo de entrada de aire.

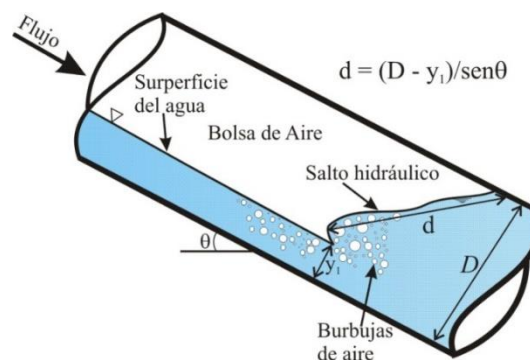


Fig. 4.5 Tercer mecanismo de entrada de aire

De lo anterior se puede concluir que el desarrollo de una relación analítica para obtener la cantidad de aire que entra hacia aguas abajo de un conducto cerrado no es posible, debido a que por lo menos existen tres mecanismos diferentes.

4.4. Transporte de burbujas y bolsas de aire en tuberías con pendientes descendentes

Hasta ahora la discusión se ha enfocado en el proceso de entrada de aire en estructuras hidráulicas. Por otra parte, igual de importante es el proceso de transporte del aire bombeado o introducido por alguno de los tres mecanismos antes descritos. Cuando el aire se encuentra en la zona a tubo lleno, pueden presentarse dos fenómenos, que el aire regrese a contra flujo o que sea transportado hacia aguas abajo, tal como se muestra en Fig. 4.6.

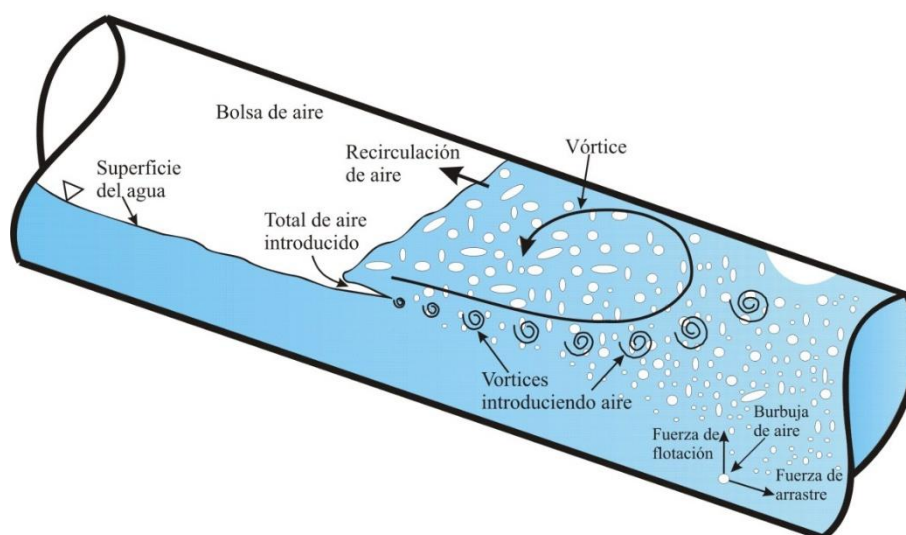


Fig. 4.6 Aire introducido por un chorro en régimen supercrítico

Investigaciones teóricas y experimentales se han realizado para estudiar la habilidad de los vórtices para atrapar burbujas de aire en sus núcleos e impulsarlas una distancia considerable, hacia aguas abajo del punto de entrada. Las principales fuerzas que actúan sobre las burbujas de aire son las fuerzas de arrastre y de flotación.

4.5. Cantidad de aire transportado en tuberías con pendientes descendentes

Ervine (1998) comenta que la cantidad de aire transportado en tuberías con pendientes descendentes no sólo depende de la cantidad de aire introducida, sino también de las condiciones aguas abajo del punto de entrada y de la pendiente de la tubería. Si las condiciones de flujo son capaces de remover las burbujas, es decir, la velocidad del flujo es mayor a la velocidad de remoción, entonces el parámetro más importante que afecta el

arrastre o el transporte de aire hacia aguas abajo es la relación entre la longitud y el diámetro del conducto (L/D) aguas abajo del punto de entrada de aire, como se muestra en la Fig. 4.7. Investigación experimental ha mostrado que existen por lo menos tres diferentes relaciones L/D que afectan el transporte de aire.

Conductos cortos. Los conductos cortos son aquellos que tienen una relación $L/D < 5$. En estos conductos todo el aire introducido en el punto de entrada es transportado hacia aguas abajo y removido por completo del tubo. La Fig. 4.7 a) muestra el fenómeno. Una vez que el aire es introducido éste va a ser expulsado por completo de la línea.

Conductos intermedios. Los conductos intermedios tienen una relación $5 < L/D < 20$. Para esta condición las burbujas de aire van a elevarse hacia el techo de la tubería debido a su fuerza de flotación, asimismo, estas burbujas van a unirse entre sí para formar pequeñas bolsas de aire, que se van a mover pegadas a la clave del tubo. En este caso el régimen de flujo que se presenta es el de una mezcla de agua con burbujas y pequeñas bolsas de aire que pueden llegar a ser expulsadas a través del punto final del tubo, ver Fig. 4.7 b).

Conductos largos. Los conductos largos se distinguen porque la relación $L/D > 20$. Dentro de esta categoría las burbujas de aire forman bolsas de aire que se adhieren al techo de la tubería, las cuales sólo podrán ser removidas de la línea, si el flujo tiene la capacidad de transportarlas. Cuando la fuerza de arrastre producida por el flujo no pueda expulsar el aire, las bolsas crecerán al acumular más aire y eventualmente regresaran a contra flujo a través del salto para volver a formar parte de la bolsa de aire, Fig. 4.7 c).

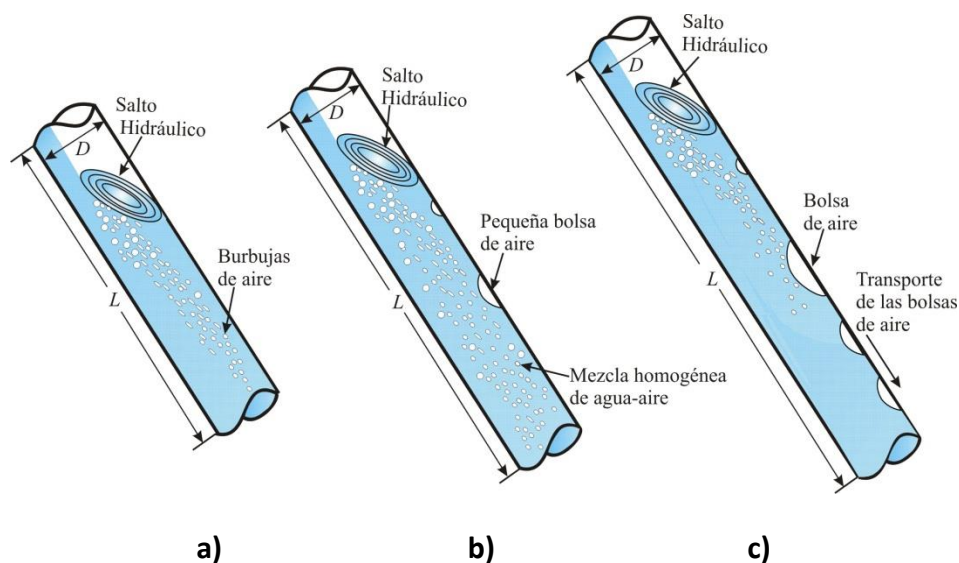


Fig. 4.7 Transporte de aire en tuberías con pendiente descendente en función de su longitud y diámetro

4.6. Relaciones para calcular la entrada de aire en estructuras hidráulicas

Al considerar que se presenta un salto hidráulico al final de una bolsa de aire en un tubo con pendiente descendente, este salto generará burbujas de aire debido a su acción turbulenta. Las burbujas pueden ser introducidas o bombeadas hacia aguas abajo de la tubería, esto dependerá de varias variables, tales como: el número de Froude al inicio del salto hidráulico (Kalinske and Robertson, 1943), la velocidad del chorro que impacta el cuerpo de agua (Kenn and Zanker, 1967), la recirculación de los vórtices (Goldring *et al.* 1980), la turbulencia de la superficie del chorro de agua (Ervin and Mckeogh, 1980), entre otros factores. El aire que entra será transportado a lo largo de la tubería en forma de pequeñas burbujas, parte de éstas se unen para formar burbujas de mayor tamaño o pequeñas bolsas de aire, las cuales viajarán en la parte alta del tubo. Asimismo, una parte del aire puede regresar a contra flujo, este fenómeno es conocido como recirculación.

Ahmed *et al.* (1984) resume algunos factores que influyen en la recirculación:

- La pendiente de la tubería tiene influencia en el balance de las fuerzas de arrastre y flotación que actúan sobre las burbujas de aire.
- La velocidad de ascenso efectiva de la burbuja de aire en un flujo turbulento.
- La velocidad del chorro de agua que impacta el cuerpo de agua que se mueve a menor velocidad, el ángulo de dispersión de las burbujas de aire, así como de la intensidad turbulenta generada en los núcleos de los vórtices.
- El valor de la velocidad del agua aguas abajo del salto hidráulico.

Ahmed *et al.* (1984) basados en investigación experimental, reportan que el transporte de aire en forma de una mezcla de agua-aire puede contener un porcentaje máximo de $\alpha = 42\%$. El porcentaje de aire contenido en una mezcla puede obtenerse mediante la expresión (4.1):

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (4.1)$$

α = Porcentaje de aire en la mezcla (%)

β = Relación entre el gasto de aire y el gasto de agua

$$\beta = \frac{Q_{aire}}{Q_{agua}} \quad (4.2)$$

Donde

Q_{aire} = gasto de aire (m³/s)

Q_{agua} = gasto de agua (m³/s)

Existen varias ecuaciones empíricas con las cuales se puede estimar el porcentaje de aire que introduce un salto hidráulico hacia aguas abajo de la tubería. Una de las relaciones más conocidas es la propuesta por Kalinske y Robertson (1943).

$$\beta = 0.0066(F_1 - 1)^{1.4} \quad (4.3)$$

F_1 = Número de Froude al inicio del salto hidráulico.

La relación anterior es válida únicamente cuando todo el aire bombeado por el salto hidráulico es expulsado de la línea.

Wisner (1965) realizó experimentos para números de Froude grandes en un conducto rectangular y obtuvo la siguiente ecuación:

$$\beta = 0.014(F_1 - 1)^{1.4} \quad (4.4)$$

El Cuerpo de Ingenieros Militares de los Estados Unidos (USACE por sus siglas en inglés) realizó una serie de experimentos en conductos cerrados. Para proponer una ecuación para estimar el aire introducido por un salto hidráulico, tomaron en cuenta la envolvente superior de sus resultados. La relación se puede escribir como:

$$\beta = 0.03(F_1 - 1)^{1.06} \quad (4.5)$$

La desventaja de las ecuaciones (4.3) a (4.5) es que no consideran los efectos de escala.

Thomas (1982) obtuvo una relación que evalúa la entrada de aire en un modelo de un sifón, el paréntesis elevado a la tercera potencia es un factor que permite considerar los efectos de escala.

$$\beta = 0.01F_1^2 \left(1 - \frac{0.8}{v_1}\right)^3 \quad (4.6)$$

v_1 = velocidad del agua aguas arriba del salto hidráulico (m/s)

Recientemente, Escarameia *et al.* (2005) investigaron la expulsión de aire a través de un salto hidráulico en una tubería circular con pendiente descendente y proveen una relación para evaluar la cantidad de aire que introduce el salto con la siguiente ecuación.

$$\beta = 0.0025(F_1 - 1)^{1.8} \quad (4.7)$$

Basados en una importante cantidad de pruebas, Ahmed *et al.* (1984) propusieron una relación para evaluar la cantidad de aire introducido por un salto hidráulico hacia aguas abajo de una tubería que fluye completamente llena, la cual incluye un término que considera los efectos de escala, útil para comparar la relación agua-aire entre modelo y prototipo.

$$\beta = 0.04(F_1 - 1)^{0.85} \left[\left(1 - \frac{0.8}{v_{sc}}\right)^3 \left(1 - \exp^{-2(v_0 - v_0^*)/v_{asc}}\right) \right] \quad (4.8)$$

v_{sc} = velocidad supercrítica del flujo o velocidad aguas arriba del salto hidráulico (m/s)

v_0 = velocidad del agua aguas abajo del salto hidráulico (m/s)

v_0^* = velocidad crítica aguas abajo del salto hidráulico para transportar el aire (m/s)

v_{asc} = velocidad de ascenso de las burbujas de aire (m/s)

La influencia del factor de escala es significativa sólo cuando el valor de $v_0 - v_0^*$ es menor que 0.25 m/s, que corresponde al valor de $(v_0 - v_0^*)/v_{br} < 1$. Por lo tanto, los términos dentro del paréntesis rectangular pueden ser considerados igual a la unidad. Entonces, la ecuación (4.8) puede escribirse como:

$$\beta = 0.04(F_1 - 1)^{0.85} \quad (4.9)$$

4.7. Efectos de la temperatura del agua en la entrada de aire a un conducto cerrado, debido a un salto hidráulico

En la actualidad existe una gran cantidad de investigaciones relacionadas con el aire introducido por un salto hidráulico a un conducto que fluye lleno de agua, sin embargo, muy poco se sabe de los efectos de escala. Para determinar la importancia de los efectos de escala de la entrada de aire por un salto hidráulico en conductos cerrados, Mortensen (2009) realizó una investigación experimental en cuatro tubos circulares de diferentes diámetros y similares números de Froude. Además, midió la entrada de aire en una de las tuberías con varias temperaturas del agua para identificar cualquier efecto cambiante en las propiedades del fluido. Los resultados indicaron que el porcentaje de arrastre de aire no

se vio afectado por el tamaño de la tubería si la longitud total del salto hidráulico estaba dentro de la tubería.

Para esta condición, los datos obtenidos de las cuatro tuberías muestran que la entrada de aire debido al salto hidráulico en los conductos cerrados no se ve afectada por el diámetro de la tubería, es decir, se pueden despreciar los efectos de escala. Sin embargo, el arrastre de aire se vio afectado significativamente por la temperatura del agua.

Las pruebas fueron realizadas en una tubería con diámetro de 7.62 cm, mediante el registro de mediciones del gasto de aire para cuatro diferentes temperaturas del agua. Los resultados indican que la entrada de aire mediante el salto es significativamente afectada por la temperatura del agua. Al aumentar la temperatura la entrada de aire disminuye.

Para investigar el efecto de escala del tamaño de la tubería y las propiedades de los fluidos en el arrastre de aire de saltos hidráulicos en conductos cerrados, Mortensen (2009) realizó sus pruebas experimentales en Utah Water Laboratory en Logan, Utah.

Las pruebas para el efecto de escala fueron realizadas en cuatro tuberías con diámetros internos de 7.62 cm, 17.7 cm, 30.0 cm y 59.1 cm y longitudes de 106, 120, 80 y 53 diámetros, respectivamente. Las tuberías fueron de acrílico (7.62 cm y 17.7 cm) y de acero (30.0 cm y 59.1 cm). Las longitudes de la tubería y el material variaron debido al espacio y cada tubería tenía 4% de pendiente descendente.

Los gastos de aire de entrada fueron obtenidos utilizando el anemómetro de hilo caliente modelo A031 de Kanomax (+ 3% de precisión de lectura) para medir las velocidades del aire a través de un tubo vertical ubicado inmediatamente aguas abajo de una abertura en el extremo aguas arriba de la tubería (Fig. 4.8).

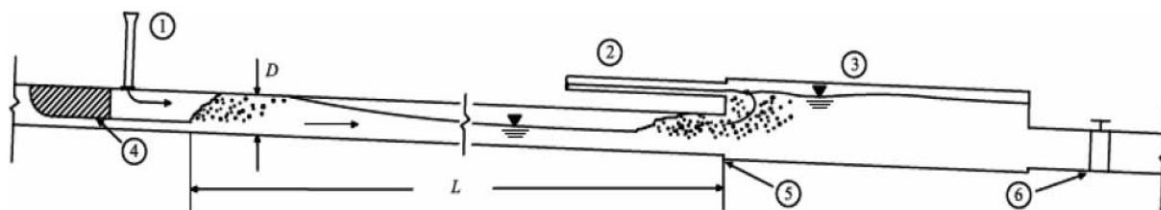


Fig. 4.8 Esquema considerando flujo de agua-aire (Mortensen, 2009)

1). Tubo vertical, 2). Venteo, 3). Cámara de captura de Aire, 4). Abertura para la entrada del flujo de aproximación, 5). Extremo final de la tubería aguas abajo, 6). Válvula de control.

El agua ingresó a cada tubería a través de una abertura para poder generar el flujo supercrítico para poder provocar el salto hidráulico.

Usando un anemómetro de hilo caliente modelo A031 de Kanomax, se registraron gastos de aire a la entrada del tubo para diferentes temperaturas del agua $T = 12.88\text{ }^{\circ}\text{C}$, $29.48\text{ }^{\circ}\text{C}$, $48.98\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $62.88\text{ }^{\circ}\text{C}$ en una tubería de diámetro de 7.62 cm. La temperatura ambiente fue aproximadamente de $21.18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La Tabla 4.1 muestra el rango de condiciones de operación para cada temperatura del agua. Se usaron varios gastos, ubicaciones del salto y tirantes de agua.

T ($^{\circ}\text{C}$)	F_1	Re	v_1 (m/s)	L (diámetros de tubería)
12.8	3.59	1.06E+05	1.71	7
	10.55	2.73E+05	4.27	89
29.4	3.77	1.83E+05	1.92	2
	11.42	4.32E+05	4.57	91
48.9	3.95	2.79E+05	2.1	5
	10.77	5.64E+05	4.21	95
62.8	3.92	3.31E+05	2.01	4
	12.88	8.18E+05	5	97

Tabla 4.1 Variables hidráulicas medidas en el dispositivo de $D = 7.62\text{ cm}$, para diferentes temperaturas

Donde:

R = Número de Reynolds del salto hidráulico

V_1 = Velocidad de flujo de aproximación

L = Distancia desde el inicio del salto hasta el extremo final del tubo

El agua se calentó a la temperatura deseada en un tanque de 5 m^3 , después circulaba a través de la tubería del sistema y luego regresaba de nuevo al tanque.

La temperatura del agua se tomó a medida que ésta salía de la cámara de captura con un termómetro digital y se mantenía dentro un rango de 2°C de la temperatura buscada para cada serie de pruebas.

Los efectos de la temperatura se analizaron graficando la demanda de aire (β) versus Número de Froude (F_1) para cada temperatura.

La Fig. 4.9 muestra los datos de la demanda de aire para cada tamaño de tubería, de donde resultado la ecuación (4.10), ésta se muestra en forma gráfica en la Fig. 4.9. El mejor ajuste de los resultados se representa con la siguiente regresión lineal:

$$\beta = 2.34F_1 - 5.248 \quad (4.10)$$

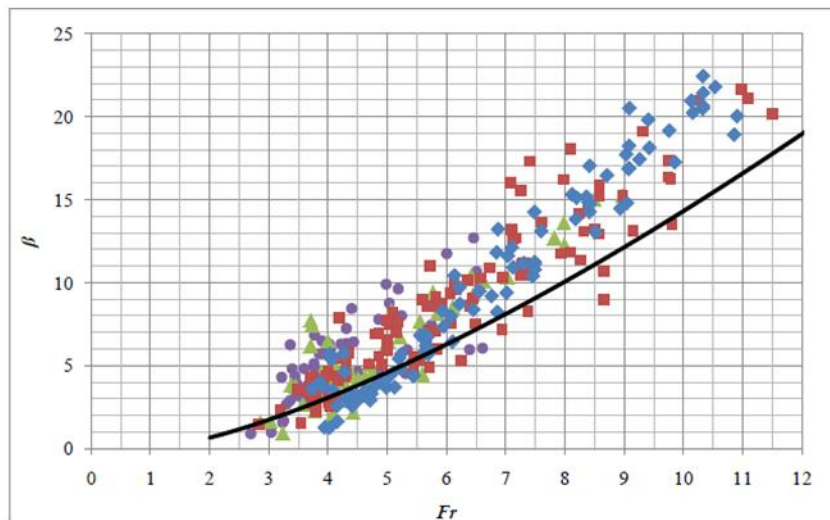


Fig. 4.9 Demanda de aire β versus número de Froude para cada tamaño de tubería (\blacklozenge) 7.62 cm, (\blacksquare) 17.7 cm, (\blacktriangle) 30.0 cm y (\blacklozenge) 59.1 cm de diámetro. (Mortensen, 2009)

Aunque hay una dispersión notable de los datos, los resultados de los cuatro tamaños de tubería están dentro de los mismos límites de dispersión, lo que indica que para las cuatro tuberías probadas, el tamaño de la tubería tiene un pequeño efecto en la demanda de aire.

Los resultados indican que β es afectada significativamente por la temperatura del agua, cuando la temperatura se incrementa β decrece como se muestra en la Fig. 4.10. En el caso de los datos de 12.8°C y 29.4°C hay una pequeña diferencia, pero la tendencia se vuelve significativa a medida que aumenta la temperatura. De acuerdo a los datos obtenidos por Mortensen (2009) β puede ser aproximada por:

$$\beta = (0.122 - 0.034F_1)T + 3.540F_1 - 11.901 \quad (4.11)$$

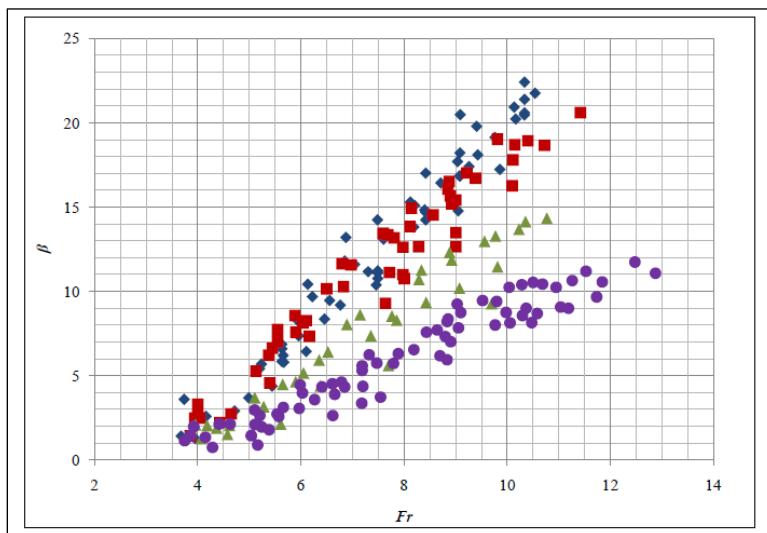


Fig. 4.10 Demanda de aire β versus F_1 y tendencias para cada temperatura del agua $T = (\blacklozenge)$ 12.8 °C, (\blacksquare) 29.4 °C, (\blacktriangle) 48.9 °C y (\bullet) 62.8 °C (Mortensen, 2009)

Se observó que los tamaños de las burbujas de aire eran visualmente más grandes a medida que la temperatura aumentaba. La Fig. 4.11 muestra la diferencia en el tamaño de la burbuja de aire entre saltos hidráulicos para diferentes temperaturas del agua, para $F_1 = 7.62$, resultando para cada temperatura $\beta =$ (a) 12.5, (b) 12.1, (c) 7.5 y (d) 3.2.

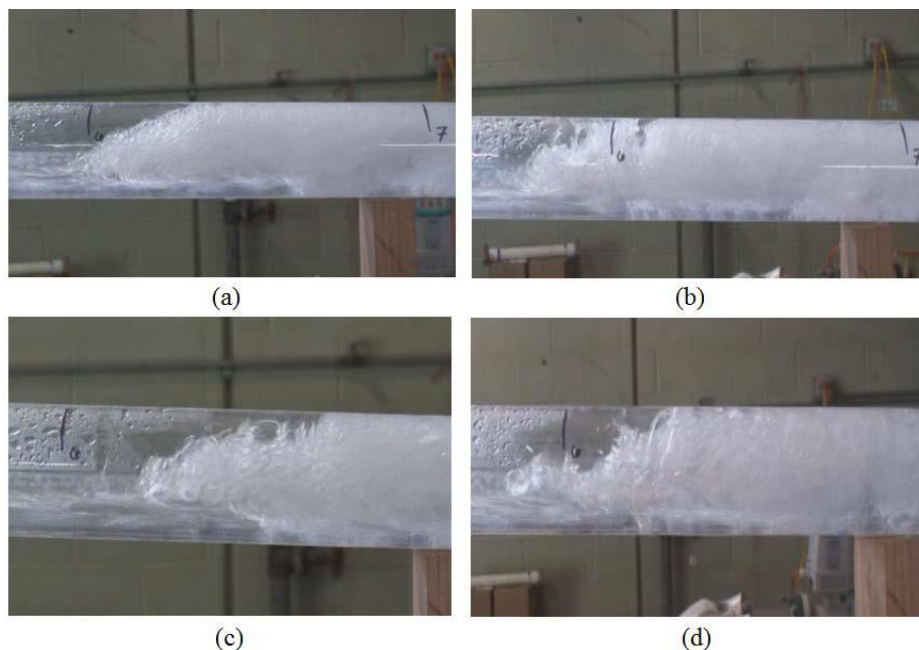


Fig. 4.11 Diferencia entre el tamaño de las burbujas de aire, según la temperatura a) 12.8°C, b) 29.4°C, c) 48.9°C y d) 62.8°C (Mortensen, 2009)

4.8. Efectos de la tensión superficial en las burbujas de aire

Shames (1995) menciona que la tensión superficial es una fuerza de tensión distribuida a lo largo de la superficie, se debe primordialmente a la atracción molecular entre moléculas parecidas (cohesión) y a la atracción molecular entre moléculas diferentes (adhesión). En el interior del líquido las fuerzas cohesivas se cancelan, pero en la superficie libre del líquido las fuerzas cohesivas desde abajo exceden las fuerzas adhesivas desde el gas localizado por encima, dando como resultado una tensión superficial.

Munson *et al.* (1999) comenta que la tensión superficial es una propiedad del líquido y depende de la temperatura, así como del otro fluido con que esté en contacto en la interface. El valor de la tensión superficial disminuye cuando aumenta la temperatura.

Çengel *et al.* (2006) define que la tensión superficial puede cambiarse de manera considerable por la presencia de *impurezas*. Por lo tanto, se pueden agregar ciertos productos químicos, llamados *surfactantes*, a un líquido para disminuir su tensión superficial. Por ejemplo, los jabones y detergentes hacen disminuir la tensión superficial del agua.

Pothof *et al.* (2013) comentan que la literatura sobre la tensión superficial de las aguas residuales es escasa. Dado el hecho de que las proteínas y los aditivos surfactantes están presentes en las aguas residuales, es de esperar que la tensión superficial de las aguas residuales domésticas sea variable.

Los autores realizaron experimentos con agua limpia, agua limpia con surfactantes y aguas residuales sin tratar. Los experimentos con agua agregada con surfactante confirmaron que la descarga de aire aumenta significativamente a una tensión superficial más baja. Sin embargo, la menor tensión superficial de las aguas residuales no mejora el transporte de aire en comparación con el transporte de aire en aguas limpias. Una tensión superficial más baja cambia la forma de las grandes bolsas de gas con dimensiones típicas del orden del diámetro del tubo y disminuye el diámetro promedio de la burbuja en el salto hidráulico (Hinze, 1955).

De acuerdo a los resultados obtenidos, los autores comentan que el comportamiento dinámico de la tensión superficial está dominada por la difusión molecular de los componentes del líquido. Analizar el transporte de aire en aguas residuales puede ser inconsistente, debido a que los componentes reductores de la tensión superficial pueden tener menor difusión molecular en comparación con el agua limpia agregada con surfactante. Es probable que los surfactantes en las aguas residuales (principalmente

proteínas y moléculas de grasa) se desprendan más fácilmente de la interfaz agua – aire, que los surfactantes en el agua con surfactante agregado.

Pothof *et al.* (2013) concluyen que la notable diferencia entre el agua agregada con surfactante y el agua residual es probablemente causada por la influencia de la turbulencia en la tensión superficial dinámica. Las mediciones de laboratorio sugieren que la turbulencia acelera la evolución de la tensión superficial hacia un valor estático para el agua con surfactante agregado, mientras que la turbulencia tiene el efecto opuesto en las aguas residuales.

4.9. Técnicas para la medición de los perfiles de concentración de aire

Los métodos para determinar la concentración de aire en un salto hidráulico pueden ser intrusivas y no intrusivas. En las técnicas intrusivas se utilizan instrumentos que invaden el flujo para efectuar las mediciones, un ejemplo es la sonda de conductividad de doble punta. Por otro lado, las técnicas no intrusivas tienen la finalidad de realizar mediciones sin interferir con el flujo, ejemplo de esta técnica es la utilización de fotografías a través de cámaras de alta velocidad.

Investigadores han empleado estas técnicas para cuantificar la concentración de aire presente en un salto hidráulico principalmente en canales de sección rectangular a superficie libre.

4.9.1. Estado del arte

Desde la segunda mitad del siglo pasado se han llevado a cabo numerosos estudios experimentales para obtener el contenido de 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 aire se define como el cociente de volumen de aire entre el volumen de agua en un cierto punto del flujo agua – aire (Fig. 4.12).

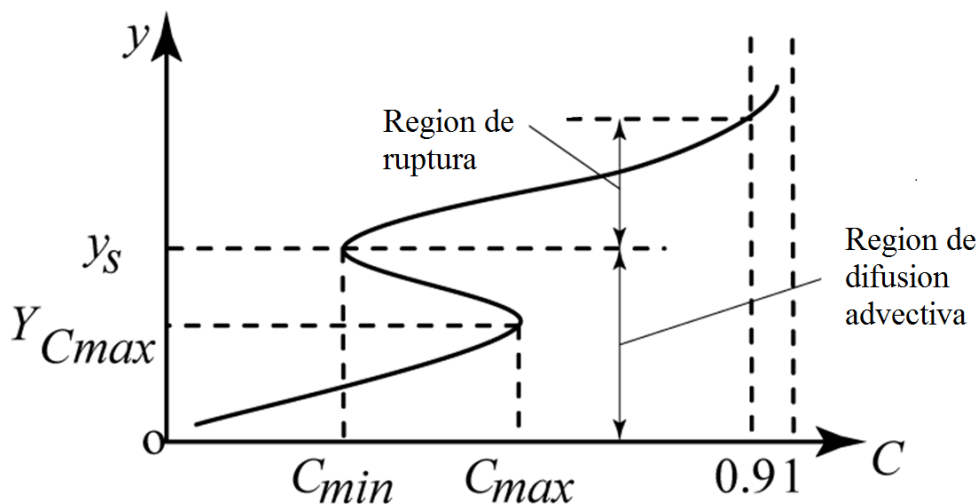


Fig. 4.12 Comportamiento de la concentración agua-aire en un salto hidráulico (modificado de Takahashi y Ohtsu, 2016)

Kalinske y Robertson (1943) llevaron a cabo algunos de los primeros experimentos de arrastre de aire por la medición de las concentraciones de aire en saltos hidráulicos dentro de un solo tubo circular en varias pendientes de 0 a 16.7 grados. Sus resultados mostraron que la demanda de aire depende sólo del número de Froude inmediatamente aguas arriba del salto y no de la pendiente de la tubería.

Rajaratnam (1962) fue uno de los primeros que midió la concentración de aire utilizando una sonda electro-resistiva. El autor dio una descripción de los campos de velocidad en los saltos hidráulicos utilizando un tubo Pitot-Prandtl. Mostró la analogía entre el flujo de un chorro de pared y un salto hidráulico no aireado.

Resch y Leutheusser (1972) hicieron una contribución importante, obteniendo resultados mediante sondas cónicas de hilo caliente en la región del flujo con burbujas. Resch y Leutheusser mostraron principalmente que los procesos de entrada de aire, velocidad de transferencia y energía de disipación eran fuertemente afectados por las condiciones del flujo de entrada.

A principios de los noventa, Chanson y Qiao (1994) utilizaron sondas de conductividad (de una y dos puntas) fabricadas, probadas y usadas en la Universidad de Queensland con un rango de tamaños desde 0.025 mm hasta 0.35 mm. Las pruebas de conductividad están basadas en la diferencia de resistividad eléctrica entre el aire y el agua. Resultado de las mediciones con una sonda de doble punta se puede observar en la Fig. 4.13.

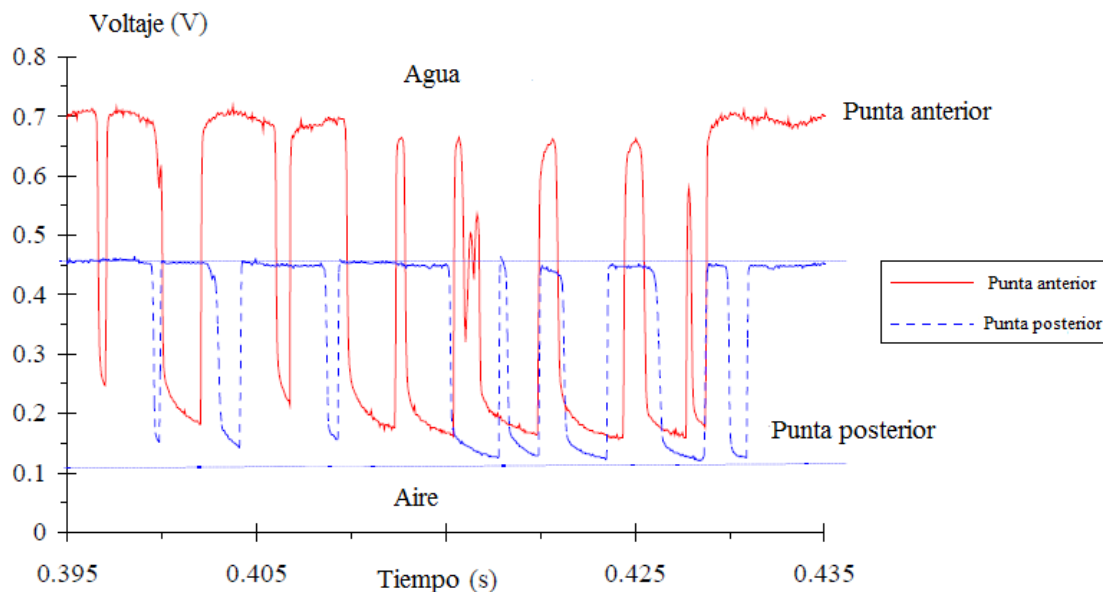


Fig. 4.13 Datos obtenidos con la sonda de conductividad de doble punta (frecuencia: 20 kHz) (modificado de Chanson, 2002)

Mossa y Tolve (1998) utilizaron una videocámara CCD para obtener imágenes en un salto hidráulico. Analizaron la concentración de aire presente en los saltos hidráulicos mediante procesamiento de imágenes. Su técnica no invasiva era capaz, no sólo de evaluar la concentración de aire perfectamente, sino de visualizar coherentemente las estructuras de turbulencia.

Murzyn *et al.* (2005), utilizaron sondas de fibra óptica para la medición de burbujas de aire en saltos hidráulicos.

Vorobel y Berehulak (2006) utilizaron la técnica de contraste para las imágenes por primera vez. Al no encontrar una relación directa entre los píxeles de la imagen y las lecturas de concentración de aire de la sonda de conductividad de doble punta buscaron un algoritmo para mejorar el contraste en las imágenes.

Escarameia (2007) midió concentraciones de arrastre de aire en saltos hidráulicos en una tubería circular y comparó sus resultados a los encontrados por Kalinske y Robertson (1943), Wisner *et al.* (1975), Rajaratnam (1965), y Rabben *et al.* (1983). Esta comparación mostró diferencias significativas de la demanda de aire entre los diversos experimentos. Ella sugiere que los diferentes resultados pueden deberse a diferencias en la geometría del conducto, así como las condiciones de flujo y de salida aguas abajo.

Leandro *et al.* (2012) mencionan que los métodos intrusivos para la medición de concentración de aire permiten medir en puntos dentro del flujo, pero no permiten lecturas de puntos múltiples. Sugieren que con el método basado en el análisis de imágenes se pueden obtener lecturas de concentración de aire en múltiples puntos.

4.9.2. Método intrusivo con sonda de conductividad

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 (Mellor and Herring, 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 4.14, se muestra el esquema de trabajo en donde se observa la sonda de conductividad instalada en el dispositivo experimental.

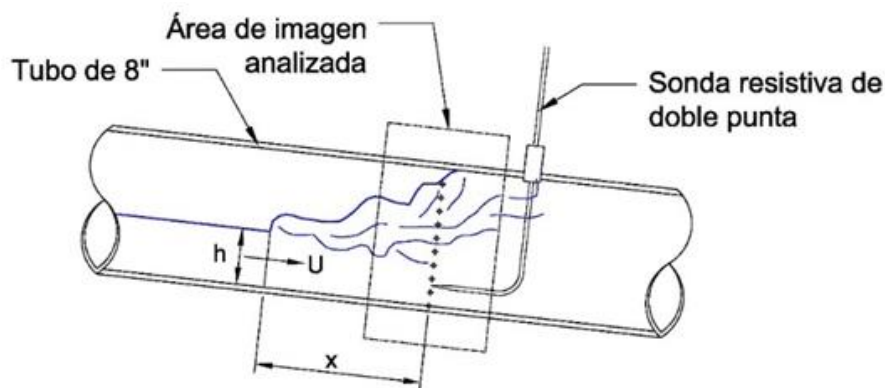


Fig. 4.14 Esquema de trabajo para el desarrollo de la investigación

4.9.3. Método no – intrusivo con cámara de alta velocidad

El procesamiento de imágenes es un método propuesto por Leandro *et al.* (2012), que permite calcular la concentración de aire en el salto hidráulico en función de la intensidad de los píxeles.

El procesamiento de imágenes está basado en dos algoritmos programados en Matlab, el primero consiste en la edición de las imágenes (EI) y el segundo en un algoritmo de matriz de intensidad de píxeles (MIP).

4.9.3.1. Algoritmo Editor de Imágenes (EI)

El algoritmo de edición de imágenes fue desarrollado con base en los conceptos de los sistemas de inferencia difusa, tales como funciones de asociación, de umbral y condicionantes if – then definidos por Bezdek *et al.* (1999).

Estas funciones mejoran el contraste de la imagen mediante la asignación de un valor a cada píxel dado (i, j) .

En las imágenes analizadas por el autor que propone este método, se distinguen dos áreas distintas divididas por la superficie del agua: el área que está por encima de la superficie del agua donde los píxeles negros representan puntos con el 100% de concentración de aire y la zona debajo de la superficie del agua, donde los píxeles grises representan puntos con concentraciones de aire inferiores al 100% (Fig. 4.15).

Debido a la inestable naturaleza de la superficie del agua, no es posible definir un límite claro entre estas dos áreas. Además, teniendo en cuenta que un píxel negro tiene una intensidad de píxel $p_i = 0$ y un píxel blanco $p_i = 255$, el algoritmo de edición de imágenes tiene que distinguir entre el píxel negro que está por encima de la superficie del agua (100% de aire) y otro píxel negro debajo de la superficie del agua (0% aire).

La función utilizada dentro del algoritmo para la edición de las imágenes, es la presentada en la Ecuación 4.12 donde (1) edita la zona sobre la superficie libre, (2) edita la zona de transición y (3) edita la zona debajo de la superficie libre.

$$PI_{i,j}^f = \begin{cases} I_{T3}(PI_{i,j}) \times PI_{i,j}^3 + I_{T2}(PI_{i,j}) \times PI_{i,j}^3 & i < \text{lim}S \dots (1) \\ I_{T3}(PI_{i,j}) \times I_{T1}(PI_{i,j}) \times PI_{i,j}^1 + I_{T1}(PI_{i,j}) \times I_{T2}(PI_{i,j}) \times PI_{i,j}^4 & \text{lim}S \leq i < \text{lim}St \dots (2) \\ I_{T1}(PI_{i,j}) \times PI_{i,j}^1 & i \geq \text{lim}St \dots (3) \end{cases} \quad (4.12)$$

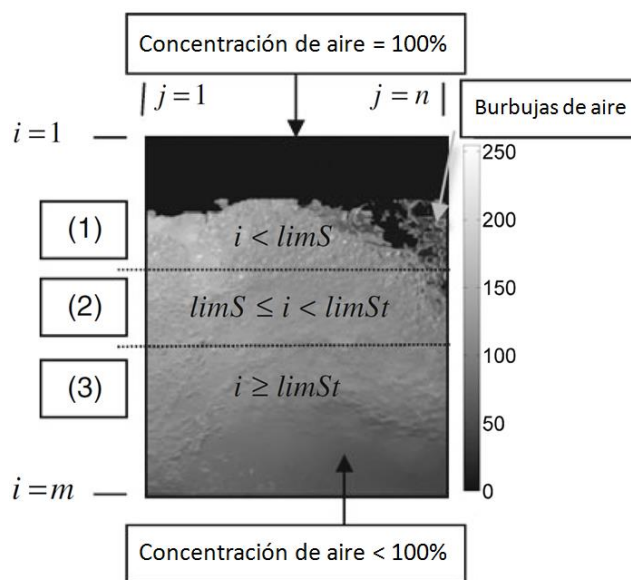


Fig. 4.15 Definición de las áreas de escala de grises en las imágenes (modificado de Leandro et al., 2012)

Las áreas grises oscuras por debajo de la superficie libre del agua tienen una concentración de aire cercana a cero y las áreas más claras tienen valores mayores de cero. En el primer paso del algoritmo, la subfunción (1) tiene el propósito de oscurecer las áreas con una baja intensidad de pixel manteniendo las áreas más claras sin alterarlas. En el segundo paso, la subfunción (3) modifica la intensidad de pixeles del área superior negra por arriba de la superficie libre del agua en una tonalidad blanca, con el fin de eliminar las burbujas más oscuras que se encuentran impregnadas a la pared de la tubería que originen imprecisiones. La tercera etapa y última, la subfunción (2) proporciona una transición gradual entre las zonas editadas de la imagen, sobre y por debajo de la superficie libre del agua, manteniendo el trabajo realizado en el paso 1.

El algoritmo de edición de imágenes funciona corriendo todos los valores almacenados en cada imagen, es decir, la matriz $PI_{i,j}$ y convertirlos en otra nueva imagen $PI'_{i,j}$, que es la matriz transformada (Fig. 4.16).

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

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

Para $limS \leq i \leq limSt$

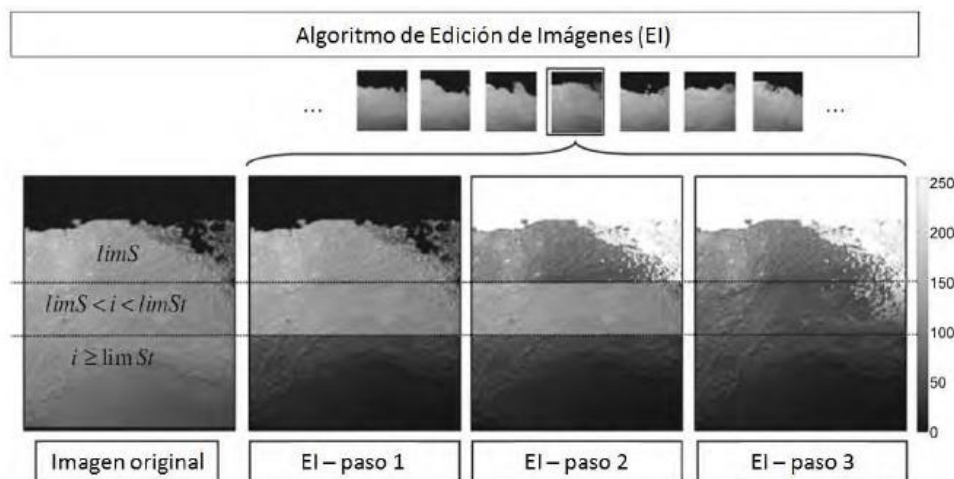


Fig. 4.16 Procesos dentro del algoritmo editor de imágenes, (modificado de Leandro et al., 2012)

4.9.3.2. Matriz Intensidad de Píxeles (MIP)

La finalidad del algoritmo de matriz de intensidad de píxeles es calcular la matriz de intensidad media en el tiempo, usado para predecir la concentración de aire en cualquier punto dado dentro de cada imagen $PI_{i,j}^f$. El procedimiento consiste en tres pasos: *paso 1*, divide la imagen en matrices pequeñas, *paso 2*, calcula la matriz de intensidades medias de píxeles para cada imagen a través de un histograma y *paso 3*, calcula la matriz de intensidad de píxel promedio en el tiempo a partir de las matrices obtenidas en el paso 2 (Fig. 4.17).

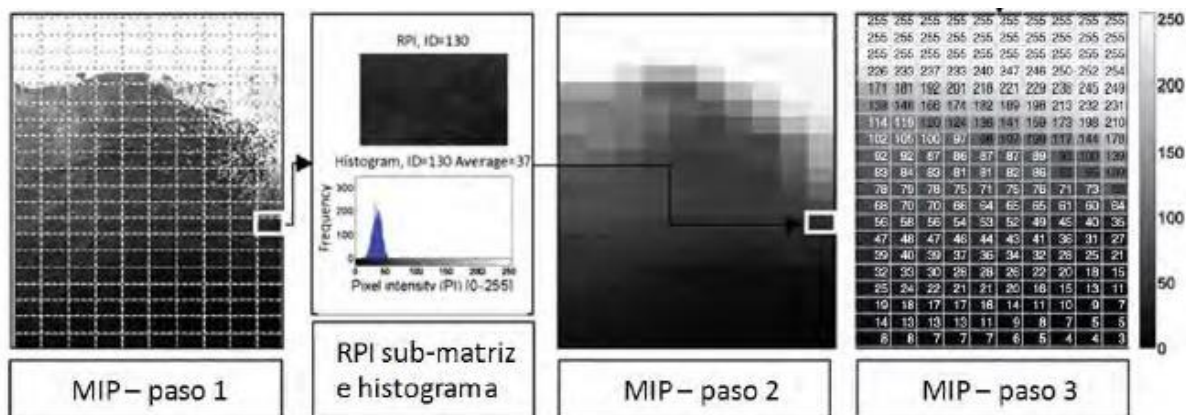


Fig. 4.17 Algoritmo de matriz de intensidad de píxeles (modificado de Leandro et al., 2012)

4.9.3.3. Herramienta Superficie Libre

En la obtención del contenido de agua-aire en un salto hidráulico mediante el procesamiento de imágenes, propuesto por Leandro *et al.* (2012), resulta útil definir la superficie libre del agua y así reducir el ancho de la transición como parte de los pasos del algoritmo de edición de imágenes.

El procedimiento se aplica a un grupo de imágenes en escala de grises, tomadas en un cierto periodo de tiempo, en la zona turbulenta del salto hidráulico. La técnica que aquí se propone para definir la superficie libre del agua consiste en tres pasos. Primero se hace una comparación entre 3 imágenes consecutivas para generar un mapa con valores de uno, con los píxeles que cambian de color, identificando la zona de burbujas debido a que está en constante movimiento.

En el segundo paso se realiza una búsqueda en cada una de las columnas del mapa generado por el paso anterior, iniciando en el píxel que representa el lado superior de la imagen; se toma un grupo de píxeles y si el promedio es menor que un cierto parámetro se elige un siguiente grupo, avanzando un píxel, y haciendo la misma comparación, cuando el promedio es mayor o igual que el parámetro designado se guarda la posición y continua con la siguiente columna.

Con las posiciones registradas en cada columna se hace un ajuste de los puntos a una función spline, la cual representa una aproximación de la superficie libre del agua en la longitud de turbulencia del salto.

5. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

5.1. Descripción del dispositivo experimental

Se ha mencionado en esta tesis que a lo largo de los acueductos, generalmente existen puntos elevados en la tubería donde se pueden acumular bolsas de aire que terminan en un salto hidráulico. Por lo tanto, se diseñó un dispositivo experimental con la intención de representar un caso similar en un laboratorio de Hidráulica.

El dispositivo experimental consiste en un sistema de tuberías que forman un circuito, con un punto elevado, es decir, dos tramos continuos en donde el primero tiene una pendiente ascendente y el segundo una pendiente descendente. Las pendientes pueden ser modificadas según las necesidades de los experimentos.

En la Figura 5.1, se muestran los elementos principales del dispositivo donde se puede observar un tanque de carga constante; una bomba con una potencia de 20 HP; un tramo de tubería de PVC de 15.24 cm (6") de diámetro interior, con una longitud de 986 cm; una válvula de mariposa de 15.24 cm (6") de diámetro; un tramo de tubería flexible de 20.32 cm (8") de diámetro y 1.48 m de longitud; un tramo de tubería de PVC de 20.32 cm (8") de diámetro interior, con longitud de 300 cm; un tramo de tubería flexible de 20.32 cm (8") de diámetro y 0.25 m de longitud que permite obtener el punto elevado, variando la pendiente; un tramo de tubería de PVC de 20.32 cm (8") de diámetro interior, con longitud de 554 cm; una válvula de mariposa de 20.32 cm (8") el cual permitió controlar el gasto en la descarga; un tramo de 1.48 m de tubería flexible que descarga libremente en el tanque de carga constante. El dispositivo tiene una sección de medición de PVC transparente de 20.32 cm (8") de diámetro interior con una longitud de 1.20 m (dentro de esta longitud, se ubicó siempre al salto hidráulico).

En la sección de medición se colocó una caja de acrílico transparente (pecera), que al llenarla con agua disminuye la reflexión de la luz y el efecto de curvatura de la tubería y mejora la visualización de las imágenes del flujo agua-aire (Fig. 5.2).

Es importante mencionar que el equipo de bombeo cuenta con un variador de velocidad de giro, lo cual permite hacer experimentos en el mismo dispositivo con distintos gastos de agua.

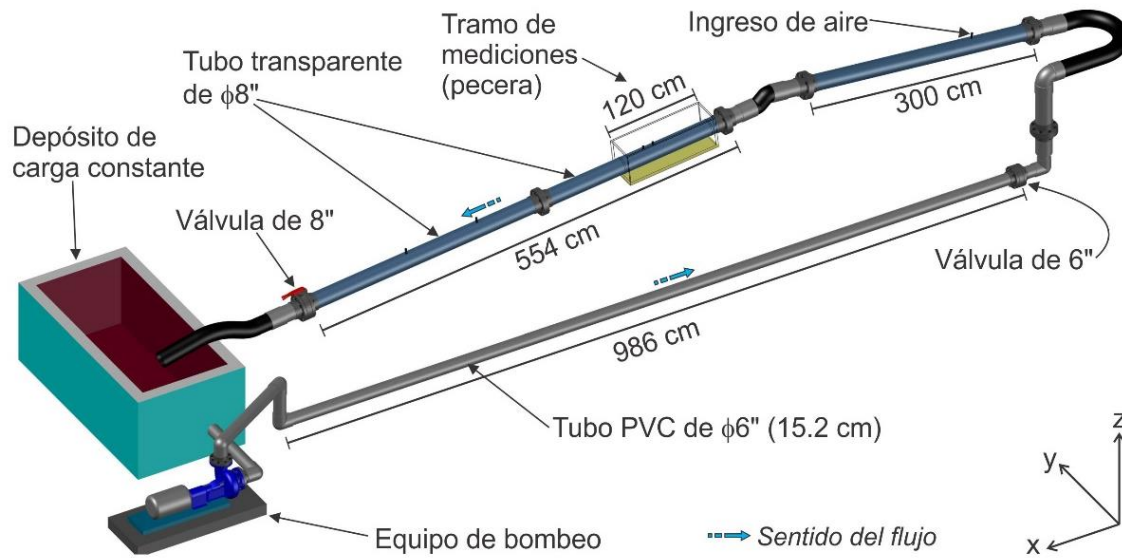


Fig. 5.1 Dispositivo experimental con sus elementos principales



Fig. 5.2 Sección de medición

5.2. Desarrollo de las pruebas experimentales

El objetivo de esta investigación es determinar la concentración de aire en un salto hidráulico presente al final de una bolsa de aire estacionaria, ubicada en un punto alto de una línea de conducción presurizada.

Las pruebas experimentales se realizaron para tres escenarios distintos: *Agua limpia a temperatura ambiente*, *agua con surfactante (jabón)* y *agua limpia con un incremento de temperatura*. Para ello se realizaron variaciones de los gastos de agua y pendientes de la tubería. Los perfiles de concentración en cada escenario experimental, se determinaron

utilizando la sonda de conductividad de doble punta como medio intrusivo y la cámara de alta velocidad como medio no – intrusivo.

En condiciones normales de operación el dispositivo experimental funciona a tubo parcialmente lleno. Entonces fue necesario cerrar parcialmente la válvula de mariposa de 20.32 cm (8”), para generar la pérdida de carga necesaria para que la tubería trabaje a presión. Posteriormente, se inyecta aire en la tubería mediante un compresor y su ingreso se controla mediante un par de válvulas (Fig. 5.3), en el punto indicado en la Figura 5.1 hasta lograr que se forme una bolsa de aire de un tamaño suficiente para que se presente un salto hidráulico en la sección de medición.



Fig. 5.3 Procedimiento de ingreso de aire a la línea de conducción

5.2.1. Descripción de las pruebas experimentales

Como se mencionó anteriormente las pruebas experimentales se realizaron considerando tres distintas condiciones. Aunque el objetivo principal de la investigación es determinar perfiles de concentración de aire en bolsas de gases presentes en líneas de conducción a presión de aguas residuales, fue necesario realizar pruebas en agua limpia a temperatura ambiente y con un incremento de temperatura, con la finalidad de obtener resultados comparativos que permitan deducir en qué medida se ve afectado la concentración de aire, debido a la variación de la tensión superficial y la temperatura del agua.

Agua limpia a temperatura ambiente

Se realizaron un total de dieciséis pruebas considerando variaciones de gasto y pendiente como se muestra en la Tabla 5.1. Cada prueba se realizó bajo condiciones de temperatura ambiente de 17 °C entre los meses de febrero y marzo de 2018.

PENDIENTE	ω_{BOMBA} (Hz)	Q (m ³ /s)
0.01	20	0.020
	22	0.023
	24	0.026
	26	0.028
0.02	20	0.020
	22	0.023
	24	0.025
	26	0.028
0.03	20	0.020
	22	0.022
	24	0.025
	26	0.027
0.04	20	0.020
	22	0.022
	24	0.026
	26	0.028

Tabla 5.1 Datos para las condiciones de trabajo en agua limpia a temperatura ambiente

Agua limpia con un incremento de temperatura

En este escenario de trabajo se obtuvieron doce pruebas experimentales de acuerdo a los parámetros indicados en la Tabla 5.2. El incremento de temperatura del agua se logró calentando el agua en dos botes de metal o tambos de 200 litros. Una vez que el agua alcanzaba el punto de ebullición, ésta era vertida al tanque de carga constante para que se mezclara con el agua a temperatura ambiente.

Mientras se agregaba el agua caliente al tanque, se registraba la temperatura del agua utilizando un termómetro de mercurio. Como las pruebas se efectuaron entre abril y mayo de 2018, la temperatura inicial del agua en el tanque oscilaba entre 20 y 22 °C. Al agregar el agua caliente, la temperatura se incrementó entre 8 y 10 °C (Tabla 5.2).

Es importante mencionar que durante las pruebas se midió constantemente la temperatura, para verificar que no hubiera disminución considerable de la misma. La temperatura permaneció prácticamente sin variaciones en cada prueba.

PENDIENTE	ω_{BOMBA} (Hz)	Q (m ³ /s)	Temperatura (°C)
0.01	20	0.020	30.0
	22	0.023	29.8
	24	0.026	29.0
0.02	20	0.020	33.0
	22	0.023	32.5
	24	0.025	32.0
0.03	20	0.020	30.0
	22	0.022	30.0
	24	0.025	30.0
0.04	20	0.020	32.0
	22	0.022	32.0
	24	0.026	31.0

Tabla 5.2 Datos para las condiciones de trabajo en agua limpia con incremento de temperatura

Agua con surfactante (jabón)

El jabón utilizado para las pruebas experimentales fue de la marca “zote”. Es un jabón hecho a base de aceite de coco y sebo de res, que al estar en contacto con el agua crea una emulsión. Una característica importante para la elección de este jabón es que no produce espuma únicamente el agua adquiere una tonalidad grisácea con partículas de jabón suspendidas en su interior y sobre la superficie libre (Fig. 5.4).

Teniendo en cuenta que el tanque de carga constante tiene una capacidad aproximada de 2000 litros, se ensayaron diferentes soluciones de agua con jabón con el fin de encontrar la cantidad adecuada para la realización de las pruebas. La cantidad de jabón se definió en 600 gramos.

La solución de agua con jabón en el tanque de almacenamiento se preparaba de la siguiente manera: en tres cubetas de 19 litros se mezclaba 600 gramos de jabón en agua, 200 gramos de jabón en cada cubeta. El jabón previamente se dividía en trozos pequeños con el fin de diluirlo rápidamente (Fig. 5.5). Posteriormente, a cada cubeta con solución se le incrementaba la temperatura entre 80 y 90 °C por medio de resistencias conectadas a la corriente eléctrica, con el fin de obtener una mezcla lo más homogéneamente posible. Teniendo listas las cubetas con solución, eran vertidas en el tanque que contenía un nivel inicial de agua.

Se realizaron un total de doce pruebas experimentales comprendidas entre los meses de marzo y abril de 2018. En la Tabla 5.3 se concentran los parámetros considerados en las pruebas experimentales.



Fig. 5.4 Solución de agua con jabón para las pruebas experimentales



Fig. 5.5 Preparación de la solución de agua con jabón

PENDIENTE	ω_{BOMBA} (Hz)	Q (m ³ /s)	Cantidad de Jabon (gr)
0.01	20	0.020	600.0
	22	0.023	600.0
	24	0.026	600.0
0.02	20	0.020	600.0
	22	0.023	600.0
	24	0.025	600.0
0.03	20	0.020	600.0
	22	0.022	600.0
	24	0.025	600.0
0.04	20	0.020	600.0
	22	0.022	600.0
	24	0.026	600.0

Tabla 5.3 Datos para las condiciones de trabajo en agua con surfactante (jabón)

5.2.2. Registro de datos con sonda de conductividad de doble punta

Las mediciones de concentración de aire fueron realizadas con una sonda de conductividad de doble punta. El uso de una sonda para medir la concentración de aire corresponde a una técnica del tipo intrusivo, debido a que se coloca dentro del flujo del conducto para llevar a cabo las mediciones. Para ello, se realizó un orificio en el lomo de la tubería en el punto de interés dentro de la zona de análisis (Fig. 5.6). Las lecturas se tomaron verticalmente desde el fondo hasta la parte superior de la tubería, para diferentes gastos y pendientes en los tres escenarios de trabajo descritos anteriormente.

La sonda de conductividad tiene forma de “L”. Está conformada por dos puntas de aguja, ubicadas una a lado de la otra, conectadas por medio de un cable de red a una tarjeta de adquisición de datos que a su vez se conecta a un equipo de cómputo en donde se almacenan los datos obtenidos para su posterior procesamiento (Fig. 5.7).

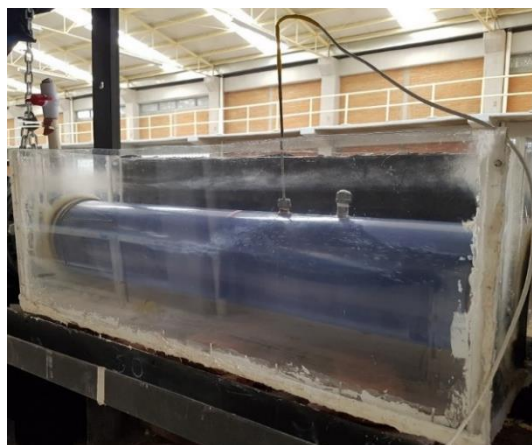


Fig. 5.6 Ubicación de la sonda dentro del dispositivo experimental

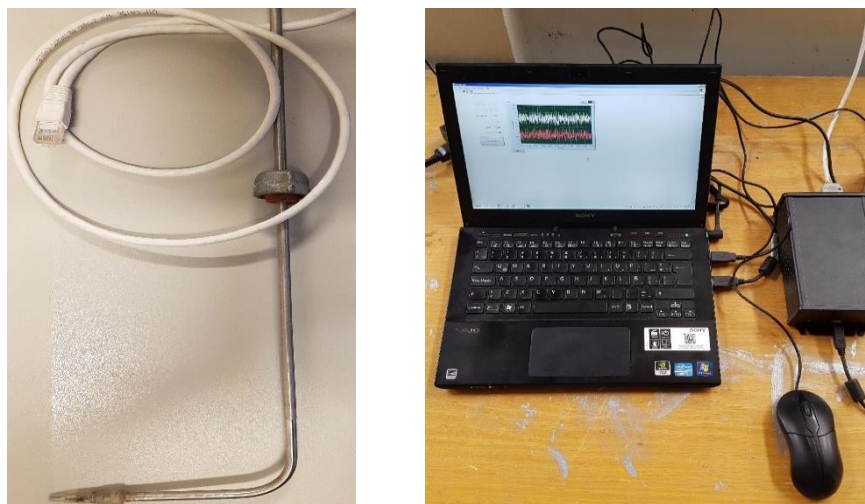


Fig. 5.7 Sonda de conductividad de doble punta y su conexión al equipo de cómputo

Las puntas de la sonda detectan niveles de voltaje del medio que las rodea, sea agua o aire. Estos cambios de voltaje son digitalizados por medio de una tarjeta de adquisición de datos y son representados en un espectro de frecuencias (Fig. 5.8). En el espectro de frecuencias se representan dos señales, una blanca y una roja que corresponden a cada una de las puntas de la sonda. La toma de datos fue a una frecuencia de 10000 Hz en un lapso de tiempo de 20 segundos.

Las mediciones hechas con la sonda fueron realizadas a cada centímetro en línea vertical, desde el fondo hasta la parte superior del conducto. Por cada prueba experimental realizada se obtuvieron 17 registros de datos.

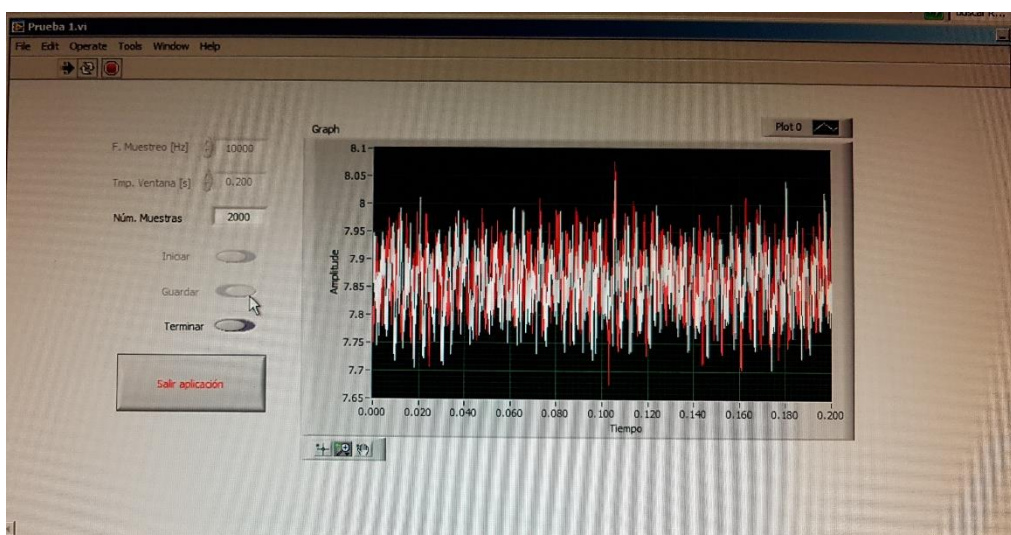


Fig. 5.8 Espectro de frecuencias registrado por la sonda

5.2.3. Captura de imágenes con la cámara de alta velocidad

Para la captura de imágenes del salto hidráulico, fenómeno de interés para la investigación experimental, se utilizó una cámara de alta velocidad marca FASTEC modelo IL4. Esta cámara es capaz de capturar 500 fotogramas por segundo (fps) con un tamaño de 1280x1024 pixeles, así como velocidades mayores para resoluciones menores.

Una vez que se obtenían los datos con la sonda, inmediatamente se capturaban las imágenes para cada uno de los casos en estudio. Las imágenes para las pruebas experimentales en cada escenario de trabajo se capturaron con las siguientes características: dimensiones de 900 x 600 pixeles a una velocidad de 500 fps. En cada ensayo experimental se guardaron 1500 imágenes para su posterior procesamiento. En la Fig. 5.9 se observa un ejemplo de las imágenes capturadas con la cámara de alta velocidad.

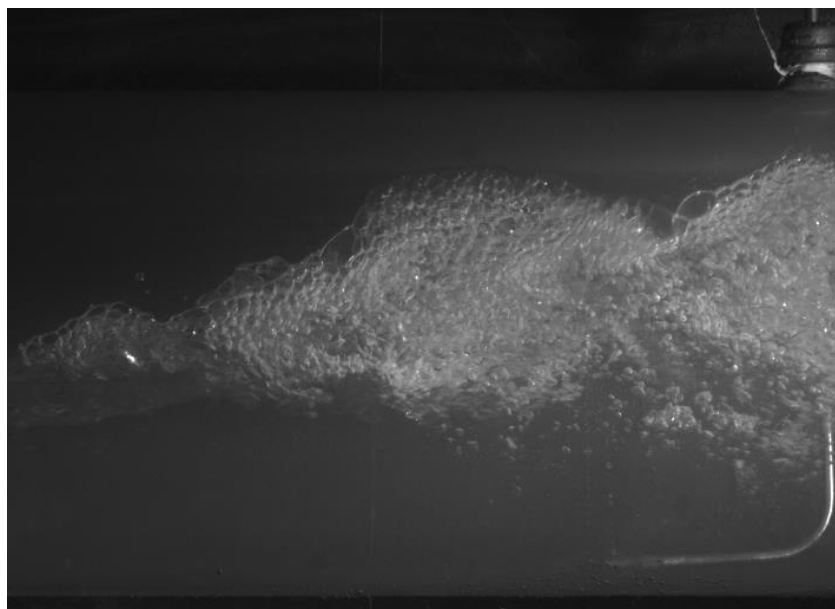


Fig. 5.9 Imagen capturada con la cámara de alta velocidad

Antes de iniciar la captura de imágenes, se colocaba el equipo en el siguiente arreglo de trabajo: la cámara con su lente era instalada sobre un tripié a una distancia focal de 2 metros respecto a la pared anterior del conducto. Con un nivel de mano la cámara era nivelada en la vertical y en la horizontal, para ajustarla de acuerdo a la pendiente en el dispositivo experimental (Fig. 5.10).

La zona de filmación fue iluminada de manera artificial por medio de una lámpara de luz halógena con una potencia de 1000 watts. La lámpara fue ubicada al lado derecho ya que esto permitió disminuir la reflexión producida por el acrílico de la pecera (Fig. 5.11). Fue

necesario cubrir el espacio total de trabajo con una “caseta” hecha de telas negras con el fin de evitar la entrada de luz natural. El uso de luz artificial asegura que la intensidad de luz permaneciera constante en todas las imágenes.



Fig. 5.10 Nivelación de la cámara de alta velocidad

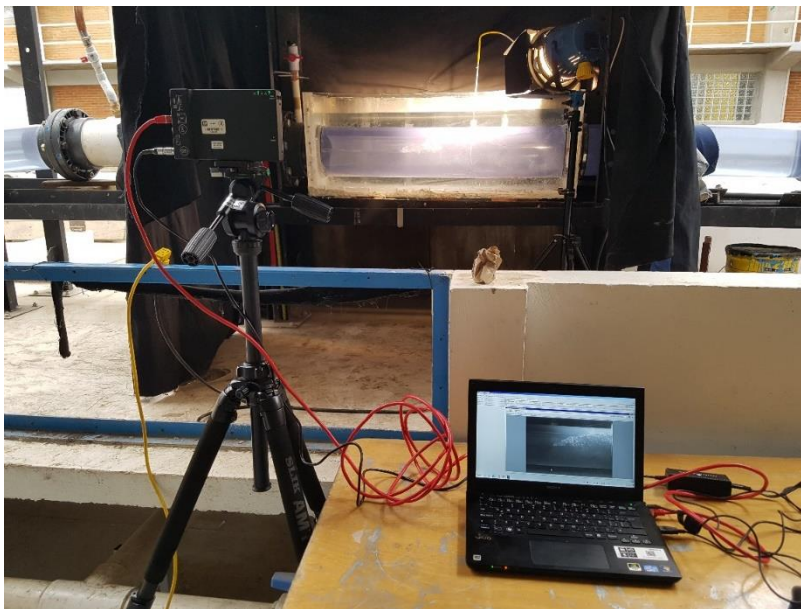


Fig. 5.11 Configuración de trabajo para el método no intrusivo

5.2.4. Medición del gasto de agua

El gasto de agua para cada prueba, se obtuvo con un medidor de flujo ultrasónico de correlación de tiempo de transito que emplea tecnología dual DSP. Este instrumento funciona por medio de sensores ubicados en la pared exterior del conducto, que a su vez están conectados a un medidor que interpreta las señales obtenidas en el tiempo (Fig. 5.12).

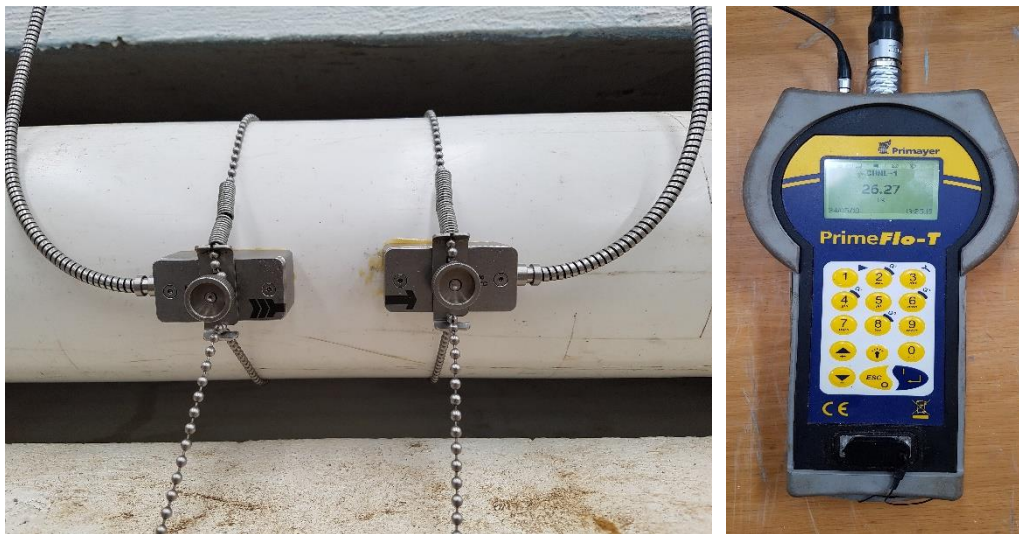


Fig. 5.12 Medidor de gasto en cada prueba experimental

5.2.5. Medición de la tensión superficial en agua con jabón

En las pruebas experimentales en agua con jabón fue necesario obtener la tensión superficial con el fin de determinar su relación con el comportamiento de la concentración de aire en el salto hidráulico.

Para ello se consideró el efecto de capilaridad, el cual es el ascenso o descenso de un líquido en un tubo de diámetro pequeño insertado en un líquido. Este fenómeno es una consecuencia interesante de la tensión superficial. La fuerza de tensión superficial actúa hacia arriba sobre el agua en un tubo de vidrio, a lo largo de la circunferencia, tendiendo a jalar del agua hacia arriba. Como resultado, el agua asciende en el tubo hasta que el peso del líquido en el tubo, por arriba del nivel de este en el recipiente, equilibra la fuerza de tensión superficial.

Çengel *et al.* (2006) explican que la magnitud del ascenso por capilaridad en un tubo circular se puede determinar a partir de un equilibrio de fuerzas sobre la columna cilíndrica de líquido de altura h en el tubo (Fig. 5.13).

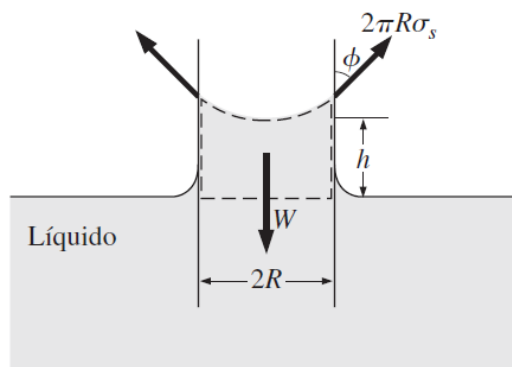


Fig. 5.13 Ascenso por capilaridad

El fondo de la columna de líquido está al mismo nivel que la superficie libre en el recipiente y, por lo tanto, la presión allí debe ser la atmosférica; lo anterior equilibra la presión atmosférica que actúa sobre la superficie libre del líquido, y en consecuencia, estos dos efectos se cancelan entre sí. El peso de la columna de líquido es (Ecuación 5.1):

$$W = mg = \rho Vg = \rho g(\pi R^2 h) \quad (5.1)$$

Cuando se iguala la componente vertical de la fuerza de tensión superficial al peso se obtiene (Ecuación 5.2):

$$W = F_{superficial} \rightarrow \rho g(\pi R^2 h) = 2\pi R \sigma_s \cos \phi \quad (5.2)$$

Despejando h da el ascenso por capilaridad como (Ecuación 5.3):

$$h = \frac{2\sigma_s}{\rho g R} \cos \phi \quad R = \text{constante} \quad (5.3)$$

El ascenso por capilaridad es inversamente proporcional al radio del tubo. Por lo tanto, cuanto más delgado sea el tubo, mayor es el ascenso (o descenso) del líquido en él. El ascenso por capilaridad también es inversamente proporcional a la densidad del líquido, así, los líquidos más ligeros experimentan ascensos más grandes por capilaridad

La expresión anterior permite calcular el ascenso por capilaridad, entonces a partir de ella, podemos obtener el valor de la tensión superficial (Ecuación 5.4):

$$\sigma_s = \frac{h\rho g R}{2 \cos \phi} \quad (5.4)$$

donde:

- σ_s = Tensión superficial en N/m
- h = Ascenso por capilaridad en m
- ρ = Densidad del líquido en kg/m³
- g = Aceleración de la gravedad en m/s²
- R = Radio del tubo en m
- ϕ = Ángulo de contacto en grados

5.3. Procesamiento de la información

5.3.1. Procesamiento de datos obtenidos con la sonda

Los valores del espectro de frecuencias en cada prueba realizada, son guardados en un archivo de texto. Estos datos se procesan utilizando Simulink, que es un entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación de Matlab. Simulink permite transformar el valor del voltaje registrado por la sonda en contenido de aire expresado en porcentaje. Dicho proceso se realiza mediante un diagrama de bloques modelado para cada punta de la sonda (Fig. 5.14).

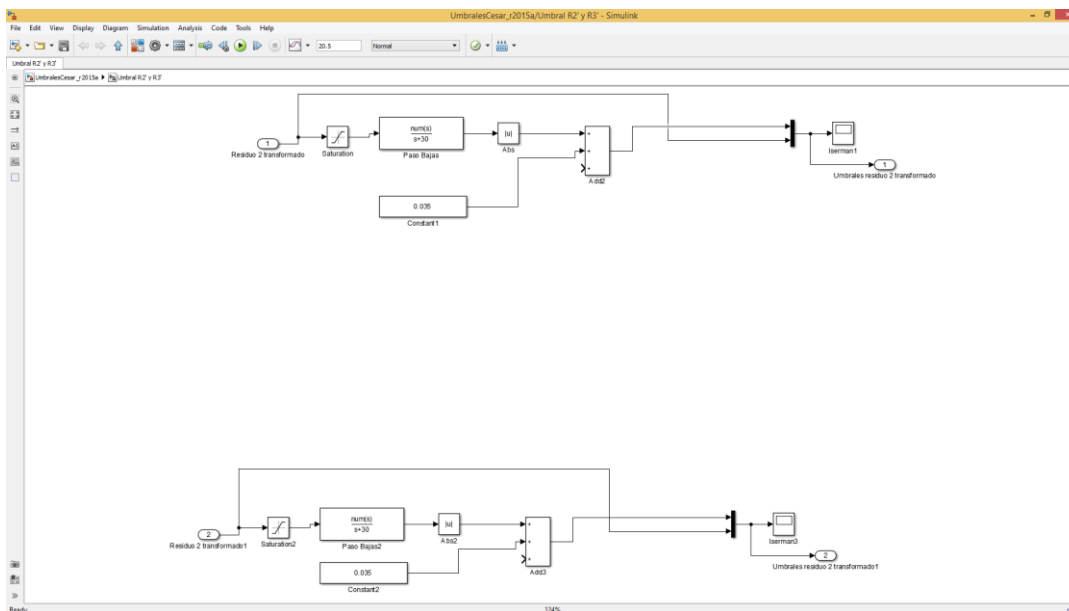


Fig. 5.14 Diagrama de bloques modelado en Simulink

Para determinar el porcentaje de concentración de aire a partir del análisis de las señales, es necesario especificar umbrales, tanto inferior como superior. Los umbrales permiten a Simulink diferenciar cuando existe presencia de agua y de aire, es decir, valores que estén

por debajo del umbral inferior y del umbral superior corresponderán a lecturas de agua y los que estén por arriba de ellos serán lecturas de aire (Fig. 5.15).

Los umbrales tienen que ser calibrados a partir de las observaciones experimentales realizadas durante las pruebas. Esto permite que posteriormente al realizar el procesamiento se facilite determinar el valor de cada umbral.

El valor final de la concentración de aire se calculaba promediando los valores obtenidos por ambas señales, correspondientes a cada altura donde se ubicaba la sonda dentro del conducto.

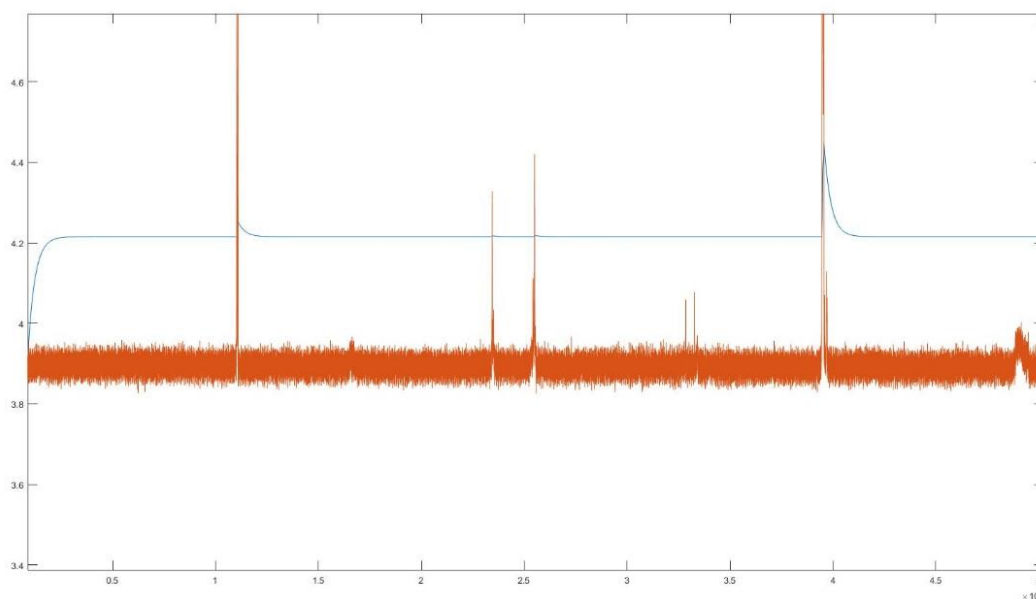


Fig. 5.15 Ejemplo de la ubicación del umbral de análisis para el procesamiento

5.3.2. Procesamiento de imágenes obtenidas con la cámara de alta velocidad

Por cada prueba en los distintos escenarios se capturaron 1500 imágenes con las características descritas anteriormente. La cantidad de imágenes señalada fue con el propósito de obtener mejores promedios de valores presentados en los perfiles de concentración. Cada paquete de imágenes fue procesado con el algoritmo de tratamiento de imágenes propuesto por Leandro *et al.* (2012), dispuesto en el programa IGui4 que trabaja en el entorno de Matlab.

En el procesamiento de imágenes se ensayó con imágenes filtradas y no filtradas. El proceso de filtración mejora la calidad de las imágenes proporcionando claridad a las áreas blancas y opacidad a las zonas negras presentes en cada imagen.

5.4. Bondad de ajuste entre datos

El coeficiente de correlación “ r ” y el coeficiente de determinación “ R^2 ” son medidas que indican la relación que existe entre los perfiles de concentración de aire obtenidos tanto con el método intrusivo (sonda de conductividad de doble punta) como el método no intrusivo (cámara de alta velocidad)

5.4.1. Coeficiente de correlación, r

El coeficiente de correlación indica la tendencia de una variable a seguir a otra. El análisis de regresión proporciona una medida numérica del grado de correlación entre dos variables para un conjunto particular de observaciones. El valor del coeficiente de correlación dependerá del grado de dispersión de las observaciones. Este valor varía entre cero y uno, valores cercanos a cero indicaran que existe poca relación entre las variables, valores cercanos a uno indicaran que las observaciones coinciden exactamente sobre una línea recta.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (5.5)$$

donde

X_i, Y_i = variables medidas con la sonda en porcentaje y con los algoritmos en pixeles respectivamente.

\bar{X}, \bar{Y} = media de las mediciones realizadas para cada grupo

5.4.2. Coeficiente de determinación, R^2

El coeficiente de determinación se utiliza para analizar como las diferencias en una variable pueden ser explicadas por una diferencia en una segunda variable. Si el coeficiente de determinación es cercano a uno indicará que los resultados obtenidos del procesamiento de imágenes reflejan un resultado valido o verdadero, en caso de que sea cercano a cero indicará todo lo contrario.

$$R^2 = r^2 \quad (5.6)$$

6. RESULTADOS

Una vez realizadas las pruebas en cada escenario, los datos obtenidos tanto con el método intrusivo (sonda de conductividad de doble punta) como el método no intrusivo (cámara de alta velocidad) fueron procesadas de acuerdo a lo descrito en el capítulo anterior.

Para cada prueba realizada, en el procesamiento de los registros de datos obtenidos con la sonda, se ajustaron los umbrales superior e inferior de acuerdo a lo observado durante los experimentos y se consideraron valores máximos y mínimos del registro de frecuencias para cada altura o tirante probado. Por medio de una hoja de cálculo se definieron dichos umbrales. Las letras CAA y CAN identifican a cada una de las puntas de la sonda nombradas como canal azul y canal naranja, respectivamente.

En relación a las imágenes, los perfiles de concentración de aire se obtuvieron para 4 condiciones de procesamiento: *Imágenes filtradas con y sin uso de la herramienta superficie libre e Imágenes no filtradas con y sin uso de la herramienta superficie libre*. Por medio del coeficiente de correlación y el de determinación se eligió la mejor representación a comparar con las concentraciones obtenidas con la sonda.

Las concentraciones de aire medidas con la sonda y la cámara fueron representadas en una sola gráfica con el propósito de compararlas entre sí para su posterior análisis.

6.1. Agua limpia a temperatura ambiente

Para este escenario se procesaron los datos de 16 pruebas con las pendientes y los gastos indicados en la Tabla 6.1. Para cada prueba se tienen 17 registros de datos con sonda y 1500 imágenes tomadas con la cámara, las cuales se obtuvieron una vez que el salto hidráulico se estabilizó dentro del conducto, en la zona de interés para la investigación.

6.1.1. Parámetros de calibración empleados

En la Tabla 6.1 se muestra el valor de los umbrales definidos para los registros con sonda.

PENDIENTE	ω_{BOMBA} (Hz)	Q (m ³ /s)	LIMITE SUPERIOR		LIMITE INFERIOR	
			CAA	CAN	CAA	CAN
0.01	20	0.020	6.73	6.73	4.28	4.13
	22	0.023	6.47	6.48	4.20	4.04
	24	0.026	6.73	6.75	4.18	4.02
	26	0.028	6.53	6.62	4.11	3.94
0.02	20	0.020	6.56	6.61	4.20	4.04
	22	0.023	6.68	6.72	4.20	4.03
	24	0.025	6.81	6.84	4.18	4.02
	26	0.028	6.77	6.84	4.12	3.97
0.03	20	0.020	6.81	6.84	4.25	4.09
	22	0.022	6.77	6.82	4.24	4.08
	24	0.025	6.63	6.65	4.23	4.06
	26	0.027	6.80	6.84	4.12	3.96
0.04	20	0.020	6.76	6.76	4.29	4.05
	22	0.022	6.85	6.86	4.20	3.98
	24	0.026	6.83	6.85	4.21	3.98
	26	0.028	6.77	6.85	4.12	3.97

Tabla 6.1 Umbral de calibración definidos en las pruebas con agua limpia a temperatura ambiente

Los parámetros de calibración utilizados en el algoritmo editor de imágenes para el procesamiento de imágenes en cada prueba en este escenario, se muestran en la Tabla 6.2.

PENDIENTE	ω_{BOMBA} (Hz)	Q (m ³ /s)	RECORTAR IMÁGENES (Píxeles)			
			Coord. Sup. Izq.		Coord. Inf. Der.	
0.01	20	0.020	425	79	770	500
	22	0.023	348	81	781	500
	24	0.026	330	80	780	500
	26	0.028	345	80	771	500
0.02	20	0.020	367	82	782	510
	22	0.023	380	83	785	510
	24	0.025	370	83	785	510
	26	0.028	406	63	764	492
0.03	20	0.020	337	76	750	492
	22	0.022	360	70	728	486
	24	0.025	244	70	722	488
	26	0.027	308	53	756	477
0.04	20	0.020	202	70	805	497
	22	0.022	273	71	784	495
	24	0.026	320	70	782	496
	26	0.028	348	53	772	483

Tabla 6.2 Parámetros de calibración para el procesamiento de imágenes en las pruebas con agua limpia a temperatura ambiente

PENDIENTE	ω_{BOMBA} (Hz)	Q (m ³ /s)	PI - 1				PI - 2					DlimS	Graf. Perfil
			a	b	Ptr	b	Y ₁	Y ₂	Ptr2	LimS	LimSt		
0.01	20	0.020	0	255	13	180	180	255	55	80	160	80	215
	22	0.023	20	255	13	180	180	255	60	120	200	80	293
	24	0.026	30	255	18	180	180	255	65	60	180	120	311
	26	0.028	25	255	18	180	180	255	75	80	210	130	297
0.02	20	0.020	35	255	10	180	180	255	75	90	200	110	284
	22	0.023	55	255	15	180	180	255	77	55	200	145	274
	24	0.025	55	255	15	180	180	255	77	40	170	130	284
	26	0.028	35	255	15	180	180	255	80	105	250	145	234
0.03	20	0.020	30	255	15	180	180	255	90	95	270	175	291
	22	0.022	40	255	15	180	180	255	80	130	240	110	243
	24	0.025	60	255	15	180	180	255	90	70	250	180	359
	26	0.027	40	255	15	180	180	255	100	60	250	190	324
0.04	20	0.020	30	255	13	180	180	255	110	110	300	190	495
	22	0.022	40	255	13	180	180	255	95	95	290	195	382
	24	0.026	30	255	13	180	180	255	95	85	260	175	335
	26	0.028	20	255	13	180	180	255	95	85	270	185	290

(Continúa Tabla 6.2)

PENDIENTE	ω_{BOMBA} (Hz)	Q (m ³ /s)	PIM - STEP3 - GRID		INTERVALO DE ANALISIS		
			a	b	Inicial	Final	Incremento
0.01	20	0.020	10	10	1	1501	1501
	22	0.023	10	10	1	1501	1501
	24	0.026	10	10	1	1501	1501
	26	0.028	10	10	1	1501	1501
0.02	20	0.020	10	10	1	1501	1501
	22	0.023	10	10	1	1501	1501
	24	0.025	10	10	1	1501	1501
	26	0.028	10	10	1	1501	1501
0.03	20	0.020	10	10	1	1501	1501
	22	0.022	10	10	1	1501	1501
	24	0.025	10	10	1	1501	1501
	26	0.027	10	10	1	1501	1501
0.04	20	0.020	10	10	1	1501	1501
	22	0.022	10	10	1	1501	1501
	24	0.026	10	10	1	1501	1501
	26	0.028	10	10	1	1501	1501

(Continúa Tabla 6.2)

6.1.2. Perfiles de concentración de aire

En las Figuras 6.1 a 6.4 se muestran los perfiles de concentración de aire de manera gráfica obtenidos con ambos métodos (sonda y cámara), correspondiente a una prueba para cada una de las pendientes consideradas. Asimismo, en las Tablas 6.3 a 6.10 se presentan los resultados numéricos obtenidos del procesamiento y los parámetros estadísticos de ajuste (correlación y determinación). Todos los perfiles de concentración muestran una tendencia similar. Además, las gráficas tienen una muy buena concordancia entre los perfiles obtenidos con las fotografías y los registrados con la sonda. Asimismo, ambos perfiles en cada figura muestran cómo en el tercio inferior del conducto se tienen las menores concentraciones de aire, mientras que en la parte superior se incrementa de forma importante las concentraciones de aire, debido a la presencia de la mezcla agua-aire generada por la turbulencia del salto hidráulico. En el mismo sentido, los coeficientes de

correlación obtenidos muestran una buena concordancia entre los valores obtenidos mediante las fotografías con aquellos registrados con la sonda de conductividad.

Pruebas con pendiente de 0.01

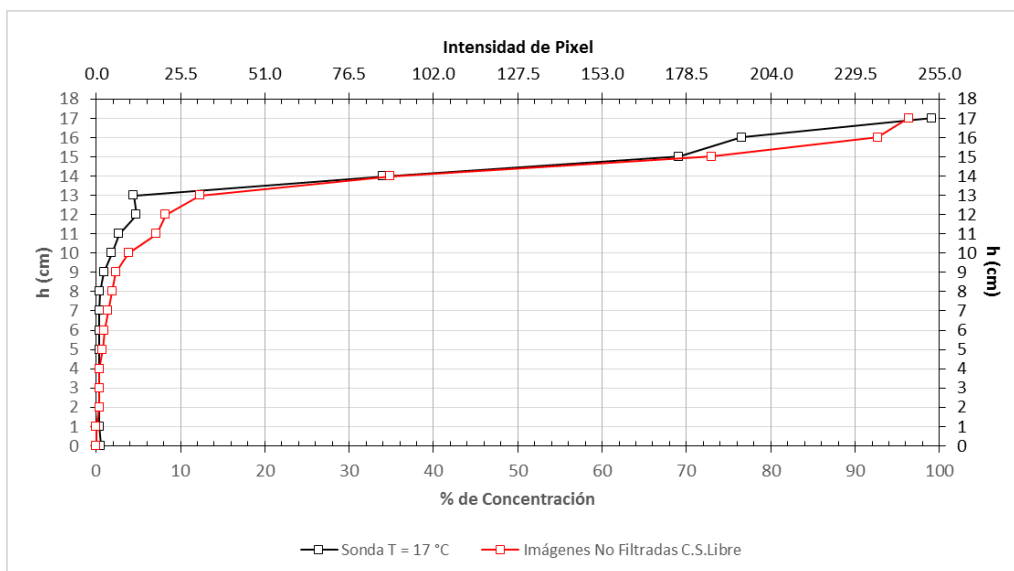


Fig. 6.1 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL			
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS	
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE
0.00	0.00	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
1.00	21.10	0.37	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00
2.00	42.20	0.38	0.39	0.39	0.39	0.39	0.02	1.00	1.00	1.00
3.00	63.30	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
4.00	84.40	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
5.00	105.50	0.38	0.78	0.78	0.78	0.78	1.34	2.00	2.00	2.00
6.00	126.60	0.39	0.99	0.99	0.99	0.99	2.00	2.53	2.53	2.53
7.00	147.70	0.40	1.42	1.42	1.42	1.42	2.93	3.63	3.62	3.62
8.00	168.80	0.42	1.89	1.89	1.90	1.88	4.03	4.81	4.83	4.80
9.00	189.90	0.91	2.34	2.32	2.34	2.29	5.70	5.91	5.96	5.85
10.00	211.00	1.87	3.83	2.73	3.83	2.65	10.97	6.96	9.76	6.75
11.00	232.10	2.71	8.48	4.72	7.18	4.23	26.69	12.02	18.30	10.79
12.00	253.19	4.76	11.14	5.33	8.24	4.83	40.59	13.58	21.02	12.32
13.00	274.29	4.45	17.01	5.18	12.30	4.60	65.49	13.20	31.36	11.73
14.00	295.41	34.00	37.99	13.54	34.84	12.04	120.70	34.53	88.84	30.71
15.00	316.51	69.13	73.27	38.95	72.97	38.38	197.28	99.32	186.08	97.87
16.00	337.60	76.51	92.77	71.46	92.70	71.28	237.68	182.23	236.37	181.77
17.00	358.70	99.10	96.37	94.88	96.34	94.85	245.80	241.93	245.68	241.86

Tabla 6.3 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.990	0.980
Filtradas S.S.Libre	0.968	0.937
No Filtradas C.S.Libre	0.993	0.985
No Filtradas S.S.Libre	0.965	0.932

Tabla 6.4 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$

Pruebas con pendiente de 0.02

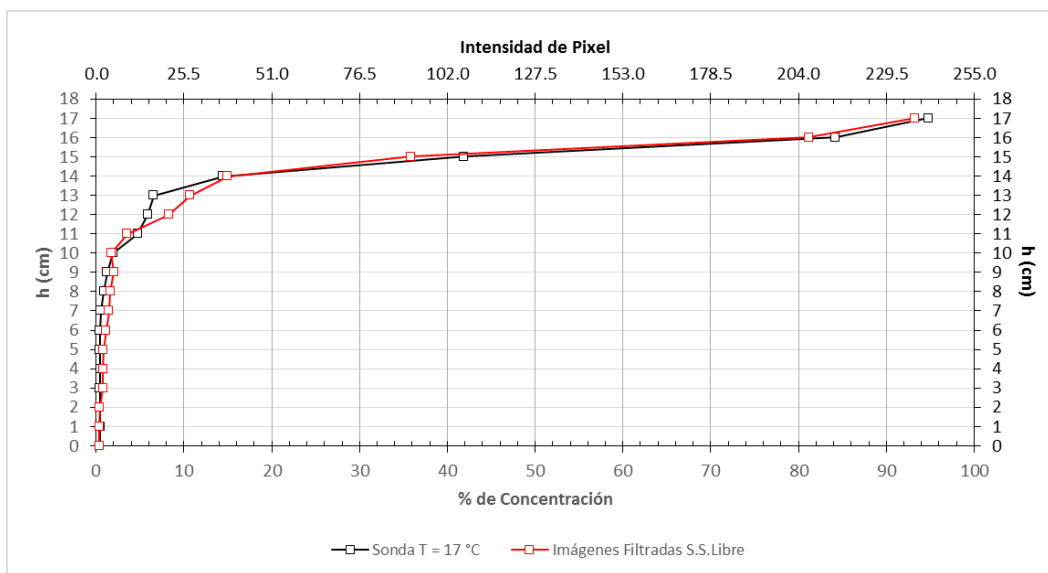


Fig. 6.2 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL			
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS	
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE
0.00	0.00	0.43	0.39	0.39	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00
1.00	21.45	0.45	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
2.00	42.90	0.41	0.40	0.40	0.40	0.40	1.01	1.01	1.02	1.02
3.00	64.35	0.42	0.78	0.78	0.78	0.78	2.00	2.00	2.00	2.00
4.00	85.80	0.46	0.78	0.78	0.78	0.78	2.00	2.00	2.00	2.00
5.00	107.25	0.39	0.82	0.82	0.82	0.82	2.09	2.09	2.09	2.09
6.00	128.70	0.40	1.15	1.15	1.15	1.15	2.94	2.94	2.94	2.94
7.00	150.15	0.54	1.46	1.46	1.45	1.45	3.72	3.72	3.70	3.70
8.00	171.60	0.91	1.61	1.61	1.58	1.58	4.10	4.10	4.03	4.03
9.00	193.05	1.24	2.05	2.02	2.03	1.92	5.24	5.16	4.90	4.89
10.00	214.50	1.95	4.05	1.71	5.34	1.68	10.33	4.35	7.21	4.28
11.00	235.96	4.76	10.48	3.55	11.22	3.25	26.71	9.04	20.47	8.29
12.00	257.39	5.89	11.88	8.27	10.05	6.83	30.30	21.08	23.04	17.41
13.00	278.85	6.56	13.24	10.70	9.30	7.67	33.77	27.28	22.79	19.57
14.00	300.29	14.48	18.28	14.97	13.43	10.72	46.61	38.18	33.78	27.34
15.00	321.75	41.89	43.14	35.83	42.41	34.48	110.01	91.36	107.98	87.93
16.00	343.21	84.24	84.12	81.18	84.36	81.29	214.51	207.01	215.11	207.29
17.00	364.65	94.79	93.27	93.25	93.05	93.04	237.85	237.78	237.28	237.25

Tabla 6.5 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.997	0.994
Filtradas S.S.Libre	0.998	0.996
No Filtradas C.S.Libre	0.998	0.996
No Filtradas S.S.Libre	0.998	0.996

Tabla 6.6 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$

Pruebas con pendiente de 0.03

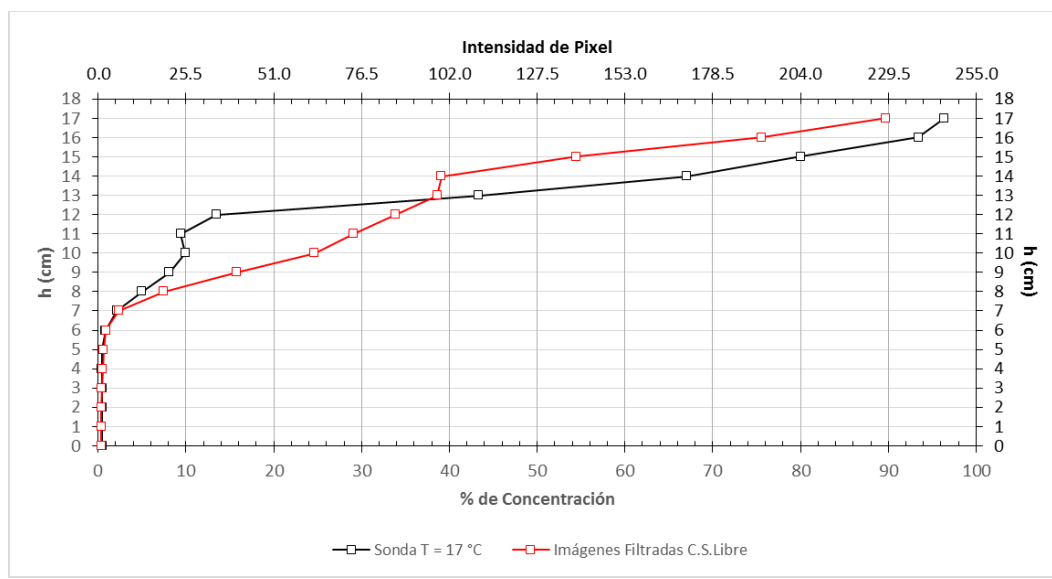


Fig. 6.3 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL			
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS	
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE
0.00	0.00	0.45	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
1.00	20.85	0.43	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
2.00	41.70	0.46	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
3.00	62.55	0.45	0.40	0.40	0.40	0.40	1.01	1.01	1.01	1.01
4.00	83.40	0.41	0.54	0.54	0.53	0.53	1.38	1.38	1.36	1.36
5.00	104.25	0.46	0.65	0.65	0.65	0.65	1.65	1.65	1.65	1.65
6.00	125.10	0.86	0.88	0.78	0.94	0.78	2.25	1.99	2.40	1.99
7.00	145.95	2.12	2.32	0.78	2.83	0.78	5.92	1.99	7.22	1.99
8.00	166.80	4.98	7.49	6.16	8.54	6.16	19.10	15.71	21.78	15.70
9.00	187.65	8.14	15.76	16.92	17.45	17.01	40.18	43.14	44.50	43.37
10.00	208.50	9.92	24.64	26.02	26.72	26.41	62.84	66.36	68.14	67.35
11.00	229.35	9.39	29.05	30.20	31.05	30.78	74.08	77.01	79.19	78.50
12.00	250.21	13.45	33.84	34.20	35.37	34.52	86.30	87.21	90.19	88.02
13.00	271.04	43.38	38.65	39.48	39.31	38.97	98.55	100.67	100.22	99.36
14.00	291.90	67.00	39.12	39.59	39.26	38.66	99.75	100.95	100.12	98.58
15.00	312.75	80.02	54.46	53.92	56.43	54.88	138.88	137.50	143.90	139.94
16.00	333.60	93.45	75.59	77.68	76.80	78.38	192.76	198.07	195.84	199.87
17.00	354.44	96.39	89.73	90.45	90.39	90.79	228.81	230.65	230.50	231.53

Tabla 6.7 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.940	0.884
Filtradas S.S.Libre	0.937	0.877
No Filtradas C.S.Libre	0.935	0.875
No Filtradas S.S.Libre	0.935	0.874

Tabla 6.8 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$

Pruebas con pendiente de 0.04

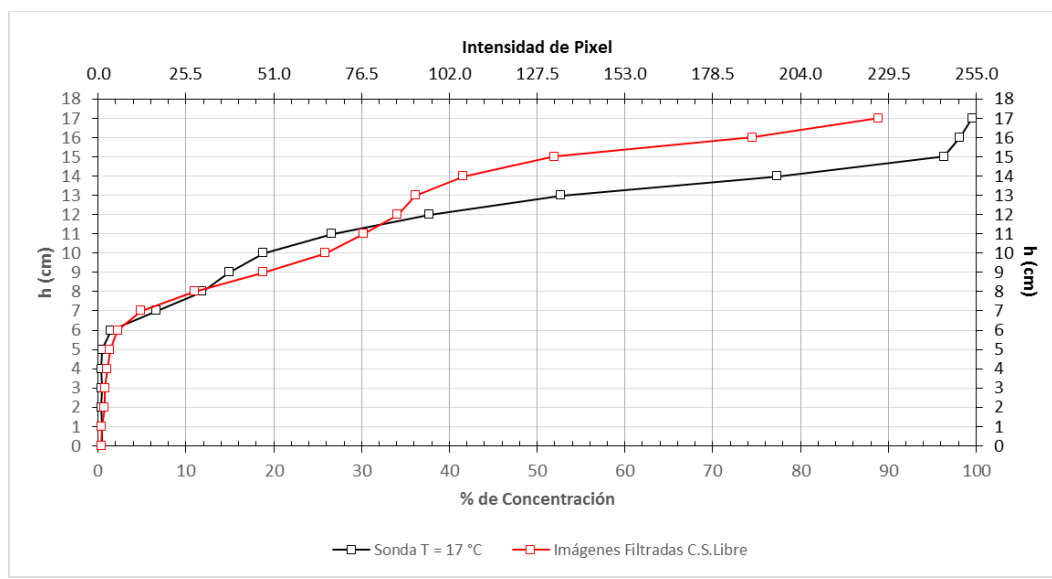


Fig. 6.4 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL			
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS	
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE
0.00	0.00	0.42	0.39	0.39	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00
1.00	21.40	0.43	0.40	0.40	0.40	0.40	1.03	1.03	1.01	1.01
2.00	42.80	0.37	0.73	0.73	0.69	0.69	1.86	1.86	1.77	1.77
3.00	64.20	0.41	0.79	0.79	0.78	0.78	2.00	2.00	2.00	2.00
4.00	85.60	0.39	1.02	1.02	1.01	1.01	2.61	2.61	2.57	2.57
5.00	107.00	0.49	1.37	1.37	1.33	1.32	3.50	3.50	3.39	3.38
6.00	128.40	1.45	2.26	2.09	2.25	1.97	5.77	5.34	5.73	5.03
7.00	149.80	6.68	4.90	8.92	5.23	8.80	12.50	22.74	13.34	22.45
8.00	171.20	11.88	10.96	19.04	11.63	18.98	27.94	48.56	29.65	48.40
9.00	192.60	14.94	18.82	27.04	19.71	27.08	47.99	68.96	50.26	69.05
10.00	214.00	18.80	25.88	32.07	26.32	31.68	66.00	81.77	67.10	80.78
11.00	235.40	26.61	30.21	34.84	30.01	33.73	77.03	88.84	76.53	86.01
12.00	256.80	37.70	34.13	38.05	33.27	36.32	87.03	97.03	84.83	92.63
13.00	278.19	52.72	36.15	39.59	34.86	37.50	92.19	100.95	88.91	95.62
14.00	299.61	77.38	41.57	45.57	40.75	43.91	106.02	116.21	103.91	111.97
15.00	321.00	96.32	51.94	56.48	53.19	57.20	132.46	144.01	135.63	145.85
16.00	342.39	98.18	74.51	78.50	77.08	80.62	189.99	200.18	196.54	205.59
17.00	363.81	99.58	88.92	90.15	89.75	90.65	226.73	229.89	228.87	231.15

Tabla 6.9 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.954	0.909
Filtradas S.S.Libre	0.947	0.897
No Filtradas C.S.Libre	0.952	0.907
No Filtradas S.S.Libre	0.947	0.896

Tabla 6.10 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$

6.2. Agua limpia con un incremento de temperatura

Para este escenario se procesaron un total de 12 pruebas con las características descritas en la Tabla 6.11. En cada prueba se tienen 17 registros de datos con sonda y 1500 imágenes tomadas con la cámara, las cuales se obtuvieron una vez que el salto hidráulico se estabilizó en la sección de medición.

6.2.1. Parámetros de calibración empleados

En la Tabla 6.11 se presenta el valor de los umbrales definidos para los registros con sonda.

PENDIENTE	ω_{BOMBA} (Hz)	Q (m^3/s)	LIMITE SUPERIOR		LIMITE INFERIOR	
			CAA	CAN	CAA	CAN
0.01	20	0.020	6.98	7.01	4.00	3.80
	22	0.023	6.80	6.81	4.08	3.84
	24	0.026	6.94	6.96	4.08	3.85
0.02	20	0.020	6.97	7.00	4.10	3.88
	22	0.023	6.97	6.97	4.11	3.91
	24	0.025	6.92	6.95	4.11	3.90
0.03	20	0.020	6.92	6.94	4.15	3.94
	22	0.022	7.00	7.02	4.21	4.01
	24	0.025	7.04	7.07	4.24	4.03
0.04	20	0.020	6.90	6.93	4.26	4.13
	22	0.022	6.89	6.92	4.14	3.92
	24	0.026	6.90	6.94	4.18	3.98

Tabla 6.11 Umbrales de calibración definidos en las pruebas en agua limpia con incremento de temperatura

Los parámetros de calibración utilizados en el algoritmo editor de imágenes para el procesamiento de imágenes para cada prueba en este escenario, se resumen en la Tabla 6.12.

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAestrÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – OBRAS HIDRÁULICAS**

PENDIENTE	ω_{BOMBA} (Hz)	Q (m ³ /s)	RECORTAR IMÁGENES (Píxeles)			
			Coord. Sup. Izq.		Coord. Inf. Der.	
0.01	20	0.020	257	88	773	511
	22	0.023	290	89	780	511
	24	0.026	372	87	782	511
0.02	20	0.020	281	86	765	510
	22	0.023	204	95	782	509
	24	0.025	216	95	767	508
0.03	20	0.020	255	67	781	493
	22	0.022	215	70	765	493
	24	0.025	247	66	763	491
0.04	20	0.020	218	86	782	506
	22	0.022	197	86	744	509
	24	0.026	346	96	803	517

Tabla 6.12 Parámetros de calibración para el procesamiento de imágenes en las pruebas en agua limpia con un incremento de temperatura

PENDIENTE	ω_{BOMBA} (Hz)	Q (m ³ /s)	PI - 1				PI - 2				DlimS	Graf. Perfil	
			a	b	Ptr	b	y ₁	y ₂	Ptr2	LimS			LimSt
0.01	20	0.020	40	255	15	180	180	255	95	95	185	90	386
	22	0.023	40	255	15	180	180	255	90	90	200	110	370
	24	0.026	35	255	15	180	180	255	95	120	210	90	290
0.02	20	0.020	30	255	15	180	180	255	100	90	225	135	368
	22	0.023	35	255	30	180	180	255	135	30	195	165	448
	24	0.025	55	255	30	180	180	255	135	40	200	160	436
0.03	20	0.020	25	255	13	180	180	255	105	85	230	145	401
	22	0.022	25	255	13	180	180	255	120	95	240	145	425
	24	0.025	25	255	18	180	180	255	135	50	245	195	399
0.04	20	0.020	25	255	15	180	180	255	110	75	255	180	446
	22	0.022	55	255	15	180	180	255	135	70	255	185	423
	24	0.026	35	255	15	180	180	255	120	35	245	210	341

(Continúa Tabla 6.12)

PENDIENTE	ω_{BOMBA} (Hz)	Q (m ³ /s)	PIM - STEP3 - GRID		INTERVALO DE ANALISIS		
			a	b	Inicial	Final	Incremento
0.01	20	0.020	10	10	1	1501	1501
	22	0.023	10	10	1	1501	1501
	24	0.026	10	10	1	1501	1501
0.02	20	0.020	10	10	1	1501	1501
	22	0.023	10	10	1	1501	1501
	24	0.025	10	10	1	1501	1501
0.03	20	0.020	10	10	1	1501	1501
	22	0.022	10	10	1	1501	1501
	24	0.025	10	10	1	1501	1501
0.04	20	0.020	10	10	1	1501	1501
	22	0.022	10	10	1	1501	1501
	24	0.026	10	10	1	1501	1501

(Continúa Tabla 6.12)

6.2.2. Perfiles de concentración de aire

En las Figuras 6.5 a 6.8 se muestran los perfiles de concentración de aire de manera gráfica obtenidos con ambos métodos (sonda y cámara). Asimismo, en la Tablas 6.13 a 6.20 se presentan los resultados numéricos obtenidos del procesamiento y los parámetros estadísticos de ajuste (correlación y determinación), para cada prueba. Los perfiles de concentración de aire muestran una tendencia similar. Al mismo tiempo, las gráficas tienen

una muy buena concordancia entre los perfiles obtenidos con las imágenes y los registrados con la sonda. De la misma forma, ambos perfiles en cada figura muestran que en el tercio inferior del tubo se presentan menores concentraciones de aire, mientras que en la parte superior aumentan las concentraciones de aire, debido a la presencia de la mezcla agua-aire provocada por el salto hidráulico. Además, los coeficientes de correlación obtenidos muestran una buena concordancia entre los valores obtenidos mediante las fotografías con aquellos registrados con la sonda de conductividad.

Pruebas con pendiente de 0.01

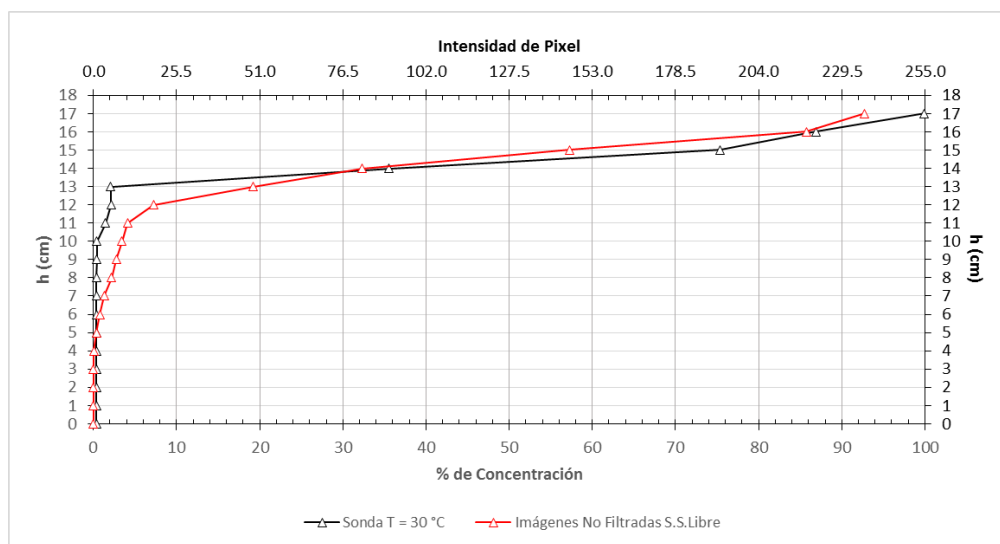


Fig. 6.5 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$, $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL				
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	
0.00	0.00	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	21.20	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	42.40	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	63.60	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	84.80	0.37	0.08	0.08	0.07	0.07	0.21	0.21	0.18	0.18	0.18
5.00	106.00	0.38	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
6.00	127.20	0.36	0.80	0.80	0.79	0.79	2.04	2.04	2.00	2.00	2.00
7.00	148.40	0.37	1.30	1.30	1.29	1.29	3.31	3.31	3.30	3.30	3.30
8.00	169.60	0.38	2.20	2.20	2.18	2.18	5.60	5.60	5.55	5.55	5.55
9.00	190.80	0.43	2.75	2.75	2.82	2.75	7.01	7.00	7.19	7.01	7.01
10.00	212.00	0.41	4.35	3.63	5.54	3.44	11.09	9.25	14.13	8.77	8.77
11.00	233.20	1.47	10.14	4.26	13.06	4.09	25.86	10.86	33.31	10.42	10.42
12.00	254.40	2.13	19.03	7.51	21.88	7.25	48.53	19.14	55.79	18.48	18.48
13.00	275.60	2.09	32.37	19.56	35.23	19.16	82.55	49.88	89.83	48.87	48.87
14.00	296.81	35.58	43.77	31.81	47.68	32.31	111.62	81.12	121.58	82.39	82.39
15.00	317.99	75.37	66.75	55.18	70.71	57.23	170.20	140.70	180.31	145.95	145.95
16.00	339.20	86.86	85.60	84.51	87.36	85.71	218.29	215.49	222.76	218.57	218.57
17.00	360.41	99.92	92.49	92.62	92.75	92.77	235.85	236.19	236.50	236.57	236.57

Tabla 6.13 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$, $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.965	0.932
Filtradas S.S.Libre	0.983	0.966
No Filtradas C.S.Libre	0.958	0.918
No Filtradas S.S.Libre	0.985	0.970

Tabla 6.14 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$, $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

Pruebas con pendiente de 0.02

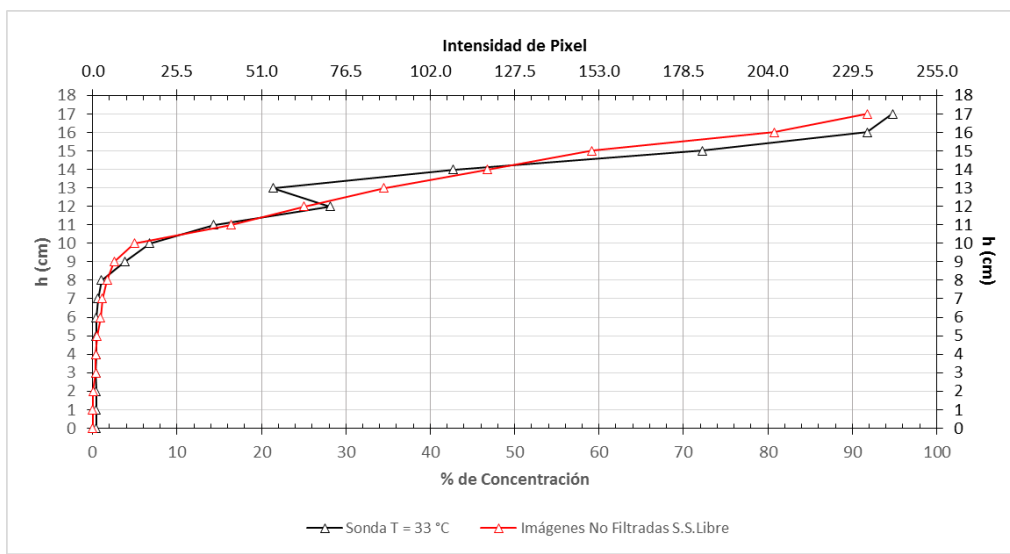


Fig. 6.6 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$, $T = 33 \text{ }^\circ\text{C}$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL				
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	
0.00	0.00	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	21.25	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	42.50	0.41	0.04	0.04	0.04	0.04	0.11	0.11	0.10	0.10	
3.00	63.75	0.38	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00	
4.00	85.00	0.41	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00	
5.00	106.25	0.40	0.53	0.53	0.55	0.55	1.35	1.35	1.39	1.39	
6.00	127.50	0.44	1.13	1.13	0.96	0.96	2.88	2.88	2.45	2.45	
7.00	148.75	0.65	1.10	1.10	1.12	1.12	2.81	2.81	2.87	2.87	
8.00	170.00	1.04	1.89	1.85	1.79	1.73	4.81	4.72	4.57	4.42	
9.00	191.25	3.78	3.16	2.74	3.24	2.57	8.06	6.98	8.26	6.55	
10.00	212.50	6.74	6.69	5.15	7.45	4.95	17.05	13.14	18.99	12.61	
11.00	233.74	14.35	14.76	16.52	16.47	16.36	37.63	42.13	42.01	41.72	
12.00	255.00	28.14	23.97	25.28	25.57	25.09	61.13	64.47	65.21	63.97	
13.00	276.24	21.35	33.31	34.30	35.51	34.53	84.95	87.47	90.56	88.06	
14.00	297.50	42.72	44.14	45.75	47.19	46.72	112.57	116.67	120.32	119.15	
15.00	318.75	72.20	54.96	56.48	59.63	59.15	140.16	144.03	152.05	150.83	
16.00	340.00	91.77	74.50	77.75	79.11	80.73	189.98	198.26	201.73	205.85	
17.00	361.26	94.76	89.88	91.02	91.37	91.81	229.19	232.09	232.99	234.12	

Tabla 6.15 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$, $T = 33 \text{ }^\circ\text{C}$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.985	0.971
Filtradas S.S.Libre	0.986	0.972
No Filtradas C.S.Libre	0.987	0.974
No Filtradas S.S.Libre	0.988	0.976

Tabla 6.16 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$, $T = 33 \text{ }^\circ\text{C}$

Pruebas con pendiente de 0.03

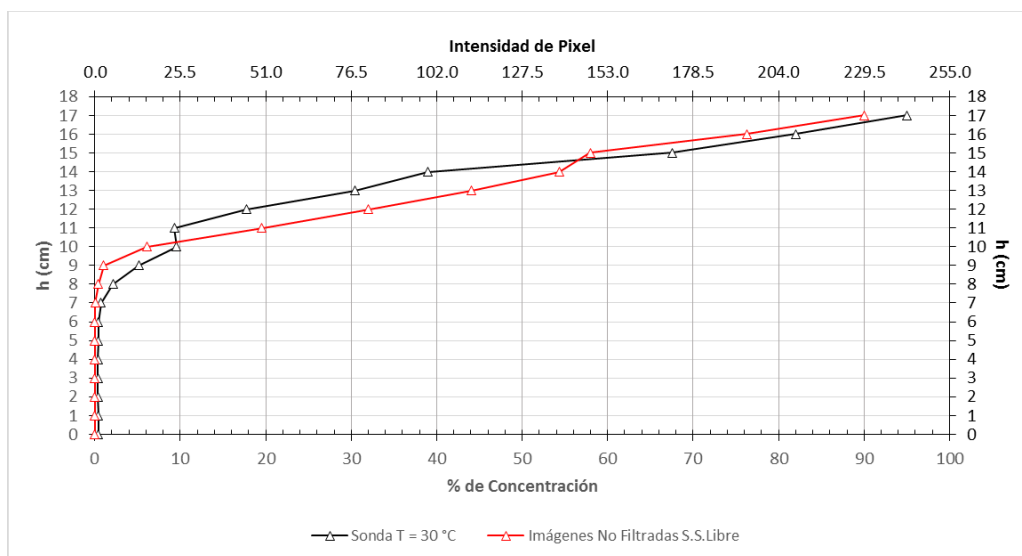


Fig. 6.7 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$, $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL				
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	
0.00	0.00	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	21.35	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	42.70	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	64.05	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	85.40	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	106.75	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
6.00	128.10	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
7.00	149.45	0.73	0.07	0.07	0.09	0.05	0.17	0.17	0.22	0.13	0.13
8.00	170.80	2.11	0.51	0.37	0.68	0.40	1.30	0.94	1.72	1.03	1.03
9.00	192.15	5.14	2.68	1.27	3.17	1.05	6.84	3.23	8.09	2.68	2.68
10.00	213.50	9.55	10.00	6.24	11.70	6.08	25.50	15.91	29.83	15.50	15.50
11.00	234.85	9.33	21.98	19.47	24.16	19.54	56.05	49.64	61.61	49.83	49.83
12.00	256.20	17.72	33.91	31.59	36.44	32.02	86.47	80.55	92.92	81.66	81.66
13.00	277.55	30.43	45.56	43.29	48.46	44.05	116.19	110.39	123.57	112.34	112.34
14.00	298.91	38.94	55.33	53.29	58.36	54.33	141.09	135.89	148.81	138.54	138.54
15.00	320.25	67.53	56.40	55.30	60.85	57.96	143.81	141.00	155.17	147.80	147.80
16.00	341.60	81.96	74.75	73.92	78.12	76.28	190.61	188.50	199.21	194.51	194.51
17.00	362.94	94.97	89.15	89.93	89.41	89.98	227.33	229.32	227.99	229.45	229.45

Tabla 6.17 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$, $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.965	0.932
Filtradas S.S.Libre	0.971	0.942
No Filtradas C.S.Libre	0.962	0.925
No Filtradas S.S.Libre	0.972	0.945

Tabla 6.18 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$, $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

Pruebas con pendiente de 0.04

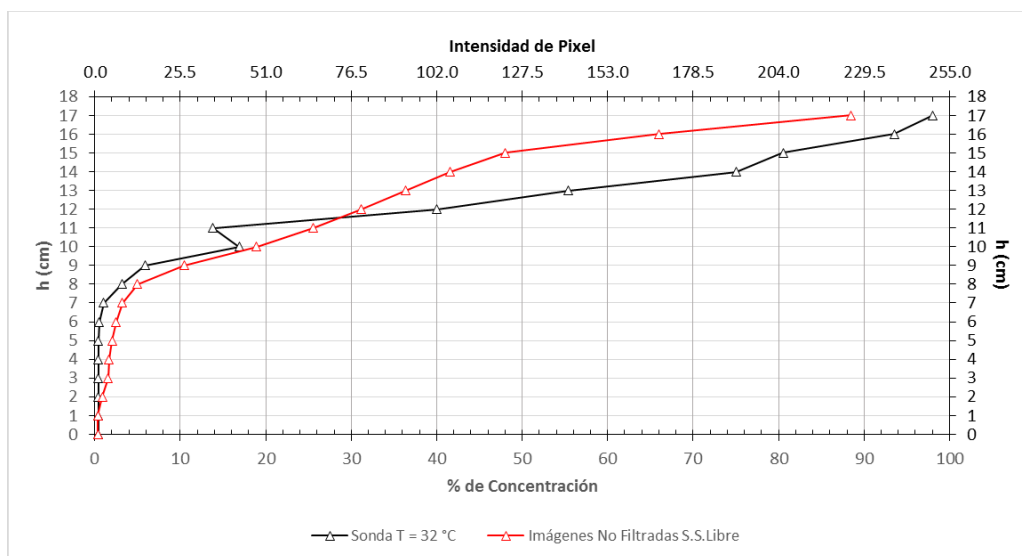


Fig. 6.8 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$, $T = 32 \text{ }^\circ\text{C}$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL			
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS	
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE
0.00	0.00	0.42	0.39	0.39	0.38	0.38	1.00	1.00	0.97	0.97
1.00	21.05	0.41	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
2.00	42.10	0.41	0.93	0.93	0.90	0.90	2.37	2.37	2.29	2.29
3.00	63.15	0.39	1.64	1.64	1.59	1.59	4.19	4.19	4.05	4.05
4.00	84.20	0.39	1.64	1.64	1.68	1.68	4.18	4.18	4.28	4.28
5.00	105.25	0.42	1.98	1.98	2.05	2.05	5.04	5.04	5.23	5.23
6.00	126.30	0.51	2.52	2.50	2.56	2.51	6.42	6.37	6.52	6.40
7.00	147.35	1.07	3.82	3.29	4.01	3.24	9.74	8.38	10.23	8.26
8.00	168.40	3.18	7.91	5.27	8.31	5.00	20.16	13.43	21.19	12.75
9.00	189.45	5.88	14.56	10.81	15.46	10.44	37.13	27.57	39.42	26.61
10.00	210.50	16.91	21.91	19.07	23.11	18.94	55.87	48.63	58.92	48.30
11.00	231.55	13.84	28.62	25.64	29.71	25.51	72.98	65.39	75.76	65.05
12.00	252.60	39.99	33.99	31.16	35.16	31.14	86.68	79.46	89.64	79.39
13.00	273.65	55.38	38.20	36.10	39.58	36.37	97.42	92.05	100.92	92.73
14.00	294.71	75.02	42.84	41.21	44.36	41.52	109.24	105.08	113.11	105.88
15.00	315.76	80.53	49.71	46.88	52.07	48.05	126.75	119.53	132.77	122.52
16.00	336.80	93.53	66.50	63.49	70.01	66.02	169.58	161.91	178.54	168.36
17.00	357.84	98.06	87.48	87.86	88.75	88.41	223.06	224.05	226.31	225.46

Tabla 6.19 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$, $T = 32 \text{ }^\circ\text{C}$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.959	0.920
Filtradas S.S.Libre	0.959	0.920
No Filtradas C.S.Libre	0.961	0.924
No Filtradas S.S.Libre	0.962	0.926

Tabla 6.20 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$, $T = 32 \text{ }^\circ\text{C}$

6.3. Agua con surfactante (Jabón)

Para este escenario se procesaron un total de 12 pruebas para las pendientes y los gastos mostrados en la Tabla 6.21. En cada prueba se tienen 17 registros de datos con sonda y 1500 imágenes tomadas con la cámara, las cuales se obtuvieron una vez que el salto hidráulico se estabilizó dentro del conducto de la sección de medición.

6.3.1. Parámetros de calibración empleados

En la Tabla 6.21 se tienen los valores de los umbrales definidos para los registros con sonda.

PENDIENTE	ω_{BOMBA} (Hz)	Q (m^3/s)	LIMITE SUPERIOR		LIMITE INFERIOR	
			CAA	CAN	CAA	CAN
0.01	20	0.020	6.66	6.70	4.33	4.24
	22	0.023	6.82	6.89	4.29	4.20
	24	0.026	6.77	6.81	4.44	4.40
0.02	20	0.020	6.69	6.76	4.50	4.50
	22	0.023	6.57	6.63	4.46	4.44
	24	0.025	6.54	6.62	4.46	4.42
0.03	20	0.020	6.75	6.81	4.51	4.42
	22	0.022	6.66	6.74	4.61	4.56
	24	0.025	6.81	6.87	4.61	4.55
0.04	20	0.020	6.85	6.90	4.43	4.32
	22	0.022	6.83	6.89	4.38	4.25
	24	0.026	6.90	6.97	4.50	4.42

Tabla 6.21 Umbrales de calibración definidos en las pruebas en agua limpia con surfactante (Jabón)

Los parámetros de calibración utilizados en el algoritmo editor de imágenes para el procesamiento de las imágenes para cada prueba en este escenario se resumen en la Tabla 6.22.

PENDIENTE	ω_{BOMBA} (Hz)	Q (m ³ /s)	RECORTAR IMÁGENES (Píxeles)			
			Coord. Sup. Izq.		Coord. Inf. Der.	
0.01	20	0.020	177	104	774	528
	22	0.023	225	104	773	529
	24	0.026	291	104	772	528
0.02	20	0.020	189	90	768	511
	22	0.023	199	91	749	513
	24	0.025	168	90	768	510
0.03	20	0.020	281	70	792	485
	22	0.022	309	71	779	485
	24	0.025	185	55	787	476
0.04	20	0.020	247	74	777	489
	22	0.022	306	74	787	490
	24	0.026	197	109	772	530

Tabla 6.22 Parámetros de calibración para el procesamiento de imágenes en las pruebas en agua limpia con surfactante (Jabón)

PENDIENTE	ω_{BOMBA} (Hz)	Q (m ³ /s)	PI - 1				PI - 2					DlimS	Graf. Perfil
			a	b	Ptr	b	y ₁	y ₂	Ptr2	LimS	LimSt		
0.01	20	0.020	35	255	15	180	180	255	105	35	170	135	479
	22	0.023	35	255	15	180	180	255	105	50	165	115	431
	24	0.026	35	255	10	180	180	255	95	25	155	130	365
0.02	20	0.020	35	255	10	180	180	255	95	65	205	140	469
	22	0.023	35	255	10	180	180	255	95	45	195	150	458
	24	0.025	35	255	10	180	180	255	95	25	175	150	489
0.03	20	0.020	35	255	10	180	180	255	115	35	215	180	399
	22	0.022	35	255	10	180	180	255	115	30	215	185	372
	24	0.025	35	255	10	180	180	255	100	45	225	180	464
0.04	20	0.020	35	255	10	180	180	255	100	85	235	150	417
	22	0.022	35	255	10	180	180	255	110	50	245	195	357
	24	0.026	35	255	10	180	180	255	110	45	245	200	460

(Continúa Tabla 6.22)

PENDIENTE	ω_{BOMBA} (Hz)	Q (m ³ /s)	PIM - STEP3 - GRID		INTERVALO DE ANALISIS		
			a	b	Inicial	Final	Incremento
0.01	20	0.020	10	10	1	1501	1501
	22	0.023	10	10	1	1501	1501
	24	0.026	10	10	1	1501	1501
0.02	20	0.020	10	10	1	1501	1501
	22	0.023	10	10	1	1501	1501
	24	0.025	10	10	1	1501	1501
0.03	20	0.020	10	10	1	1501	1501
	22	0.022	10	10	1	1501	1501
	24	0.025	10	10	1	1501	1501
0.04	20	0.020	10	10	1	1501	1501
	22	0.022	10	10	1	1501	1501
	24	0.026	10	10	1	1501	1501

(Continúa Tabla 6.22)

6.3.2. Perfiles de concentración de aire

En las Figuras 6.9 a 6.12 se muestran los perfiles de concentración de aire de manera gráfica obtenidos con ambos métodos (sonda y cámara). Asimismo, en la Tabla 6.23 a 6.30 se presentan los resultados obtenidos del procesamiento y los parámetros estadísticos de ajuste (correlación y determinación), para cada prueba. Los perfiles de concentración

muestran una tendencia similar. Además, las gráficas tienen una muy buena concordancia entre los perfiles obtenidos con las fotografías y los registrados con la sonda. Igualmente, ambos perfiles en cada figura muestran cómo en el tercio inferior del conducto se tienen las menores concentraciones de aire, mientras que en la parte superior se incrementa de forma importante las concentraciones de aire, debido a la presencia de la mezcla agua-aire generada por el salto hidráulico. Asimismo, los coeficientes de correlación obtenidos muestran una buena concordancia entre los valores obtenidos mediante las fotografías con aquellos registrados con la sonda de conductividad.

Pruebas con pendiente de 0.01

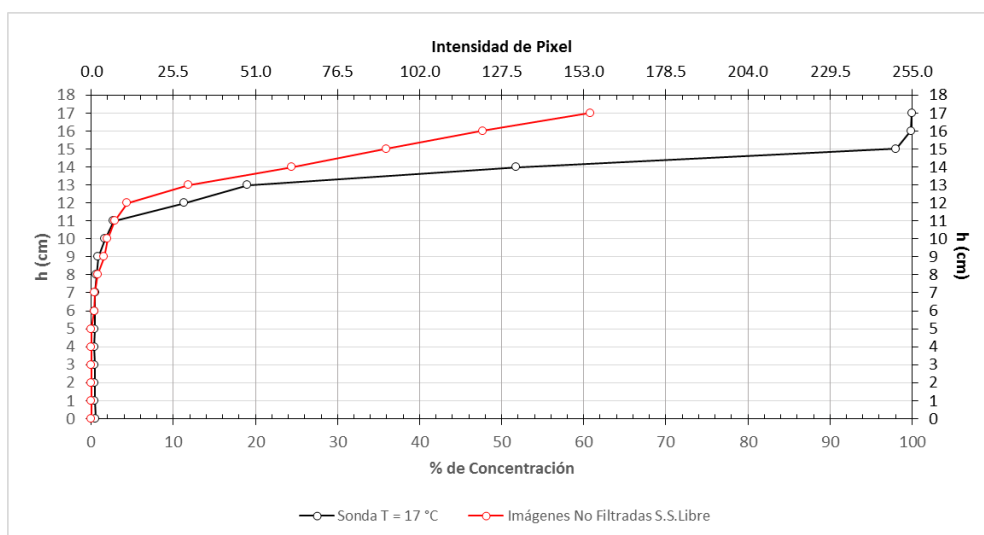


Fig. 6.9 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$. $S = 0.01$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL			
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS	
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE
0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	21.25	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	42.50	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	63.75	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	85.00	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	106.25	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
6.00	127.50	0.41	0.39	0.39	0.40	0.39	1.00	1.00	1.02	1.00
7.00	148.75	0.47	0.44	0.44	0.50	0.44	1.13	1.11	1.26	1.11
8.00	170.00	0.61	0.83	0.79	0.97	0.79	2.13	2.01	2.48	2.00
9.00	191.25	0.82	1.94	1.55	2.43	1.55	4.95	3.96	6.20	3.95
10.00	212.50	1.69	5.26	1.99	6.60	1.99	13.41	5.08	16.83	5.07
11.00	233.74	2.70	14.49	2.82	16.68	2.84	36.94	7.20	42.54	7.25
12.00	255.00	11.34	27.76	4.29	30.20	4.39	70.79	10.93	77.02	11.21
13.00	276.24	19.02	40.94	11.88	43.35	11.79	104.40	30.31	110.56	30.06
14.00	297.50	51.80	52.67	24.19	55.38	24.38	134.32	61.69	141.23	62.16
15.00	318.75	98.04	60.87	34.58	65.64	35.98	155.22	88.17	167.38	91.75
16.00	340.00	99.86	72.51	46.40	76.01	47.66	184.89	118.32	193.83	121.53
17.00	361.26	100.00	81.98	59.73	83.94	60.82	209.04	152.30	214.04	155.11

Tabla 6.23 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) – $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.949	0.901
Filtradas S.S.Libre	0.973	0.946
No Filtradas C.S.Libre	0.948	0.899
No Filtradas S.S.Libre	0.975	0.950

Tabla 6.24 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$

Pruebas con pendiente de 0.02

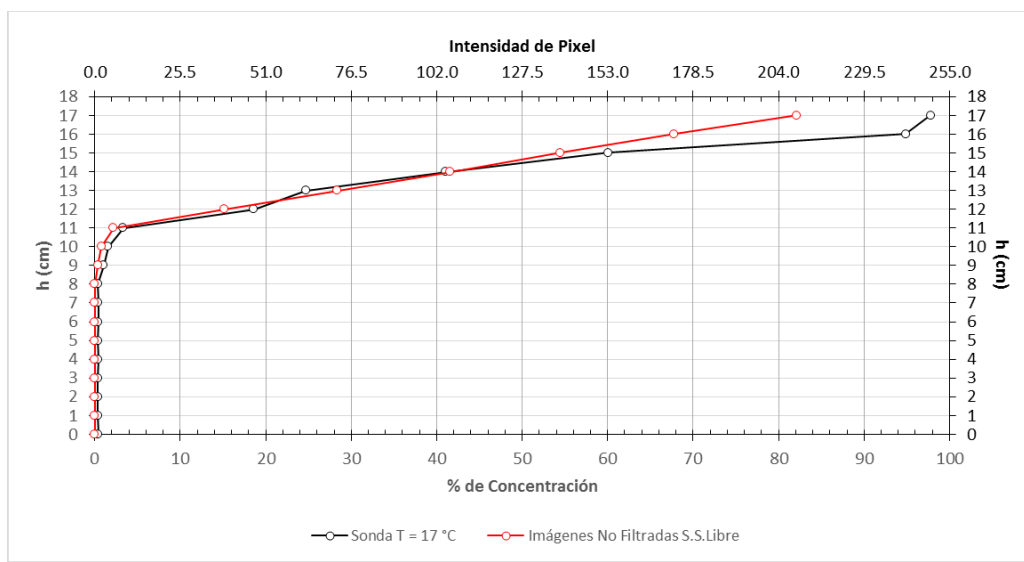


Fig. 6.10 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL				
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	
0.00	0.00	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	21.10	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	42.20	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	63.30	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	84.40	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	105.50	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
6.00	126.60	0.40	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.06	0.00
7.00	147.70	0.40	0.02	0.00	0.13	0.00	0.06	0.00	0.33	0.00	0.00
8.00	168.80	0.38	0.19	0.01	0.56	0.01	0.49	0.04	1.42	0.03	0.00
9.00	189.90	1.02	1.49	0.39	2.23	0.39	3.81	1.00	5.69	1.00	0.00
10.00	211.00	1.56	5.17	0.77	6.57	0.77	13.18	1.97	16.75	1.96	0.00
11.00	232.10	3.32	14.18	2.21	16.32	2.20	36.17	5.62	41.62	5.61	0.00
12.00	253.19	18.62	27.26	15.13	29.48	15.12	69.51	38.57	75.18	38.56	0.00
13.00	274.29	24.68	40.46	28.37	42.63	28.36	103.17	72.35	108.72	72.33	0.00
14.00	295.41	41.05	53.43	41.56	55.49	41.58	136.25	105.98	141.50	106.03	0.00
15.00	316.51	60.07	65.67	54.21	67.75	54.48	167.45	138.23	172.77	138.91	0.00
16.00	337.60	94.88	77.61	67.49	79.32	67.82	197.91	172.10	202.26	172.93	0.00
17.00	358.70	97.80	87.24	81.91	88.06	82.17	222.47	208.88	224.56	209.53	0.00

Tabla 6.25 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.973	0.946
Filtradas S.S.Libre	0.989	0.979
No Filtradas C.S.Libre	0.968	0.937
No Filtradas S.S.Libre	0.990	0.979

Tabla 6.26 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$

Pruebas con pendiente de 0.03

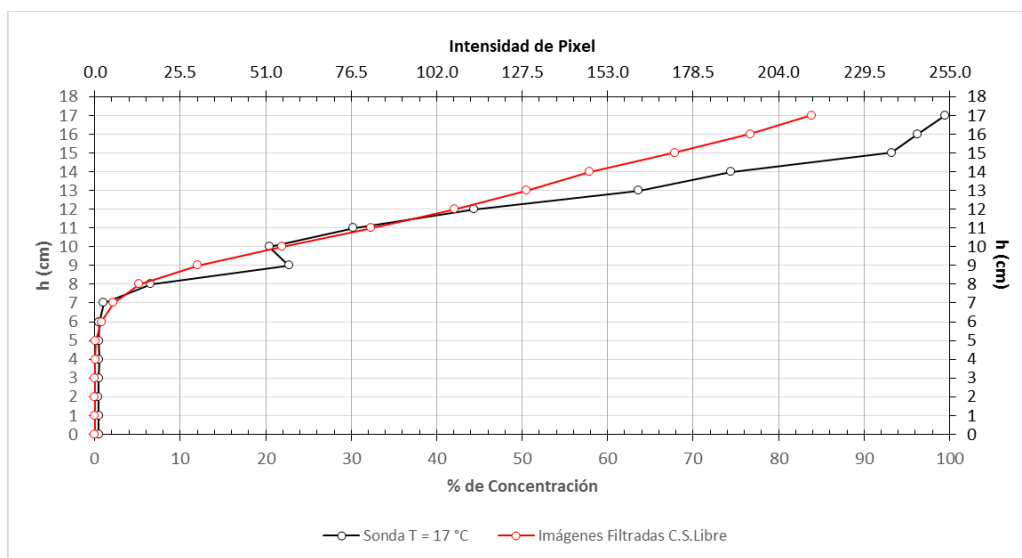


Fig. 6.11 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL			
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS	
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE
0.00	0.00	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	20.80	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	41.60	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	62.40	0.45	0.01	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.04	0.00
4.00	83.20	0.50	0.03	0.00	0.07	0.00	0.08	0.00	0.17	0.00
5.00	104.00	0.48	0.10	0.00	0.23	0.00	0.26	0.01	0.59	0.01
6.00	124.80	0.54	0.78	0.39	1.16	0.39	1.99	1.00	2.96	1.00
7.00	145.60	1.03	2.20	0.78	3.02	0.77	5.60	1.98	7.71	1.97
8.00	166.40	6.56	5.21	1.28	6.89	1.30	13.28	3.26	17.58	3.32
9.00	187.20	22.74	12.06	2.37	14.65	2.37	30.75	6.04	37.36	6.05
10.00	208.00	20.44	21.89	4.00	24.80	4.03	55.83	10.19	63.24	10.28
11.00	228.80	30.26	32.33	13.43	35.07	13.30	82.45	34.25	89.42	33.92
12.00	249.60	44.38	42.06	24.10	44.69	24.00	107.26	61.45	113.95	61.20
13.00	270.40	63.62	50.47	33.07	53.25	33.20	128.70	84.32	135.77	84.66
14.00	291.21	74.41	57.89	40.94	61.26	41.52	147.63	104.41	156.20	105.87
15.00	312.00	93.24	67.86	50.04	70.25	50.13	173.05	127.60	179.13	127.84
16.00	332.81	96.29	76.71	59.30	78.59	59.30	195.61	151.21	200.41	151.23
17.00	353.60	99.49	83.86	69.27	84.95	69.35	213.84	176.63	216.63	176.85

Tabla 6.27 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.992	0.984
Filtradas S.S.Libre	0.982	0.965
No Filtradas C.S.Libre	0.991	0.983
No Filtradas S.S.Libre	0.982	0.965

Tabla 6.28 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$

Pruebas con pendiente de 0.04

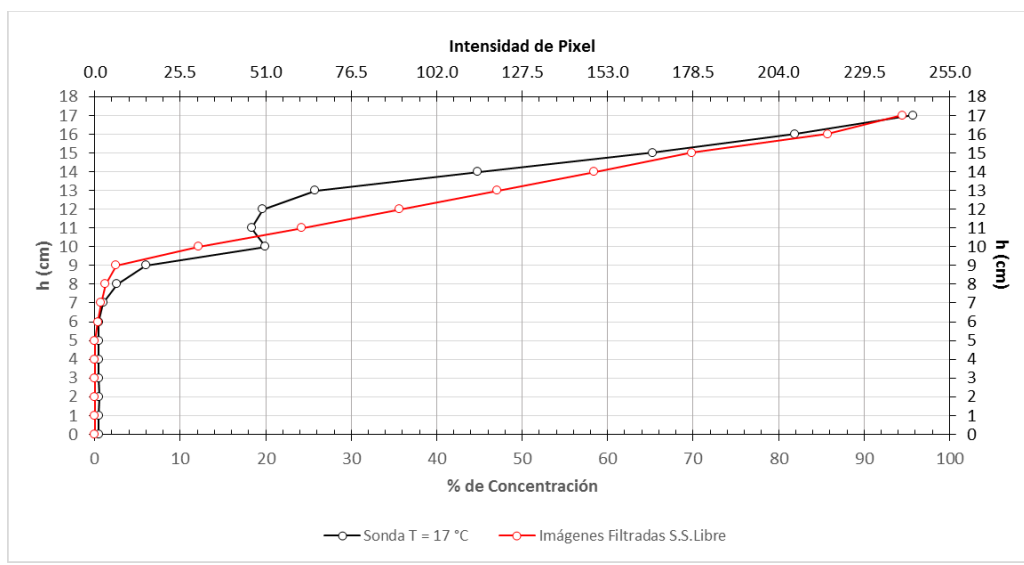


Fig. 6.12 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL				
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	
0.00	0.00	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	20.80	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	41.60	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	62.40	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	83.20	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
5.00	104.00	0.45	0.02	0.02	0.06	0.01	0.05	0.05	0.16	0.03	0.03
6.00	124.80	0.49	0.41	0.39	0.68	0.39	1.04	1.00	1.73	1.00	1.00
7.00	145.60	1.01	1.04	0.74	2.02	0.72	2.64	1.89	5.14	1.83	1.83
8.00	166.40	2.59	3.30	1.26	5.72	1.27	8.40	3.22	14.59	3.24	3.24
9.00	187.20	6.00	9.37	2.50	13.96	2.47	23.90	6.39	35.60	6.31	6.31
10.00	208.00	19.95	19.78	12.13	25.41	12.14	50.45	30.93	64.79	30.97	30.97
11.00	228.80	18.36	31.51	24.22	37.21	24.31	80.35	61.77	94.89	62.00	62.00
12.00	249.60	19.67	43.12	35.69	48.78	35.77	109.97	91.00	124.38	91.21	91.21
13.00	270.40	25.80	54.42	47.11	60.07	47.34	138.77	120.12	153.18	120.73	120.73
14.00	291.21	44.79	65.79	58.44	71.07	58.81	167.77	149.02	181.22	149.96	149.96
15.00	312.00	65.23	75.89	69.83	80.92	70.92	193.53	178.06	206.36	180.86	180.86
16.00	332.81	81.95	88.05	85.75	89.92	85.93	224.52	218.65	229.30	219.11	219.11
17.00	353.60	95.72	94.22	94.46	94.30	94.38	240.27	240.89	240.45	240.67	240.67

Tabla 6.29 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.962	0.926
Filtradas S.S.Libre	0.976	0.953
No Filtradas C.S.Libre	0.948	0.899
No Filtradas S.S.Libre	0.976	0.952

Tabla 6.30 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$

6.4. Valores de la tensión superficial en cada escenario

La tensión superficial fue una variable importante a conocer para cada escenario, concretamente en las pruebas experimentales realizadas en agua con surfactante (jabón). Conocer el comportamiento de la tensión superficial permitió entender cómo ésta afecta a la concentración de aire dentro del salto hidráulico. Por medio del efecto de capilaridad, método descrito en el capítulo 5, se pudo obtener el valor numérico de la tensión superficial.

Fue necesario efectuar el cálculo de la tensión superficial para los otros escenarios (agua limpia a temperatura ambiente y agua limpia con un incremento de temperatura) con el fin de contrastar resultados y determinar en qué medida se ve afectada también por la temperatura. La Tabla 6.31 muestra los resultados obtenidos, donde h es la altura del ascenso por capilaridad, ρ es la densidad del líquido, g es la aceleración debida a la gravedad, r es el radio del tubo capilar y σ_s es la tensión superficial.

Escenario	h (m)	ρ (kg/m ³)	g (m/s ²)	r (m)	σ_s (N/m)
Agua (21 °C)	0.02080	935.00	9.81	0.00075	0.072
Agua (33 °C)	0.01977	965.00	9.81	0.00075	0.070
Jabon (21.5 °C)	0.01428	930.00	9.81	0.00075	0.049

Tabla 6.31 Valor de la tensión superficial para cada escenario de trabajo

Los resultados indican que la temperatura influye en el comportamiento de la tensión superficial de acuerdo a lo comentado por Munson *et al.* (1999). La tensión superficial disminuye cuando aumenta la temperatura.

Al agregar surfactante (jabón) al agua, la tensión superficial disminuyó de manera considerable. Esto comprueba lo indicado por Çengel *et al.* (2006).

6.5. Análisis de resultados

En este apartado se discutirán solo una parte de los resultados obtenidos con la sonda y la cámara de alta velocidad. Debido a que en total se tienen 40 registros con la sonda y el

mismo número de carpetas de fotografías para los tres escenarios, el análisis únicamente se centrará en una sola prueba de cada escenario, considerando las mismas pendientes y los mismos gastos.

En la Figura 6.13, se aprecian los perfiles de concentración de aire en porcentaje, obtenidos con la sonda para una pendiente de 0.03 y un gasto de 0.020 m³/s. Como se observa el perfil de concentración de aire es variable en su comportamiento, siendo en el escenario de agua con surfactante donde se presentan mayores concentraciones y en el escenario de agua con incremento de temperatura menores concentraciones. El escenario de agua a temperatura ambiente queda con valores intermedios de concentración de aire.

Lo anterior confirma las investigaciones hechas por Pothof *et al.* (2013), donde sus experimentos en agua con surfactante demostraron que la descarga de aire aumenta en forma considerable con una tensión superficial más baja. La temperatura influye de manera importante en el arrastre de aire tal como lo demostró Mortensen (2009): a medida que la temperatura del agua aumenta, la cantidad de aire arrastrado por el salto hidráulico disminuye.

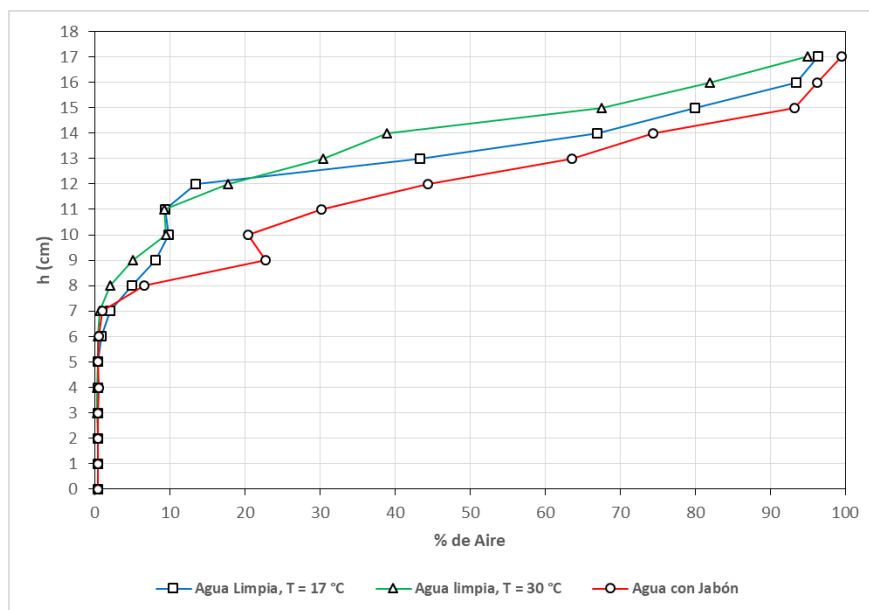


Fig. 6.13 Comparación de perfiles de concentración de aire obtenidos con sonda

Los perfiles de concentración de aire obtenidos con la sonda presentan discontinuidades en la zona turbulenta del salto hidráulico. Esto se puede apreciar entre las alturas de 8 y 13 cm de la mayoría de las pruebas realizadas. Mediante las observaciones del fenómeno se pudo concluir que las discontinuidades se deben a la recirculación presente en la zona de

turbulencia, a la inestabilidad propia del fenómeno y a la presencia de la sonda que separaba por instantes el remolino del salto hidráulico (Figura 6.14).

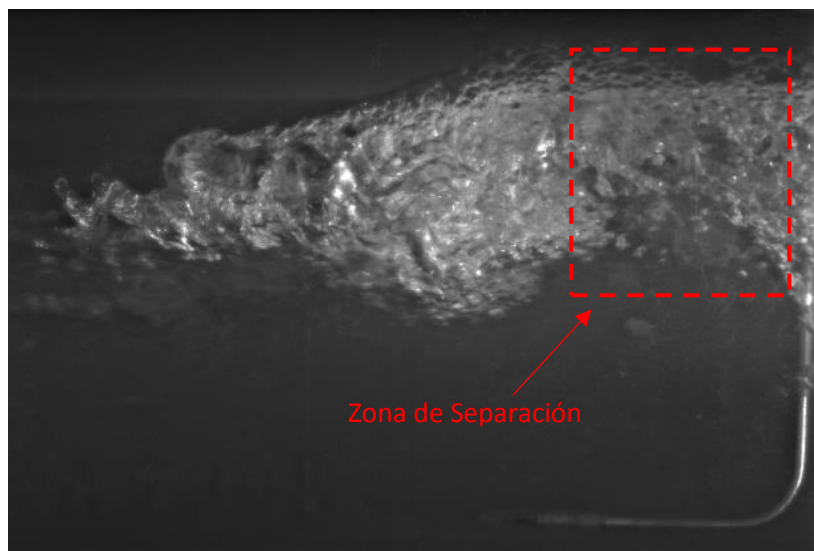


Fig. 6.14 Zona de separación debida a la presencia de la sonda

La Figura 6.15 muestra la comparación de los perfiles de concentración de aire en porcentaje, resultado del procesamiento de imágenes, para la misma pendiente y gasto de las pruebas elegidas en la discusión anterior. Al igual que los resultados obtenidos con la sonda, los perfiles de concentración de aire se comportan de la misma manera.

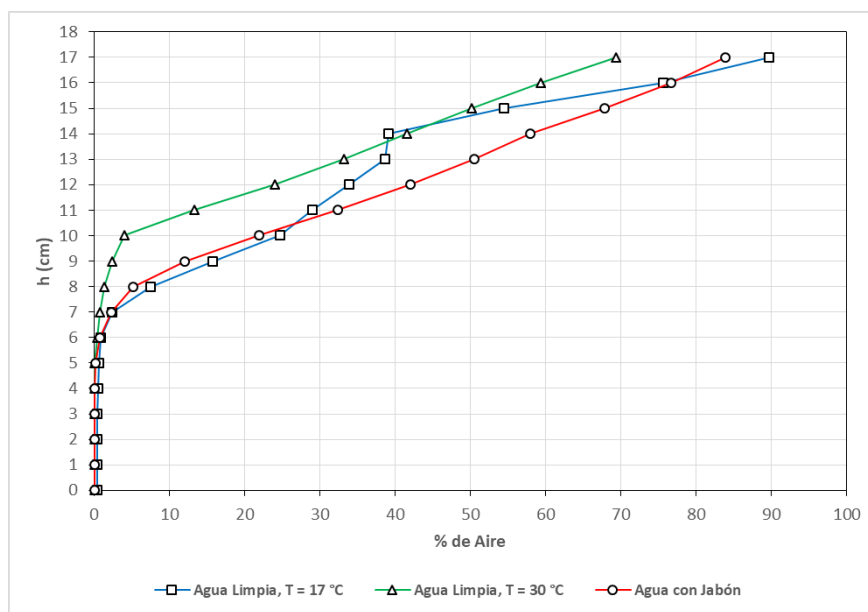


Fig. 6.15 Comparación de perfiles de concentración de aire obtenidos con cámara

Los perfiles de concentración de aire obtenidos a partir del procesamiento de imágenes muestran una buena concordancia con los resultados obtenidos con la sonda. Esto demuestra que el procedimiento de procesamiento de imágenes puede ser una herramienta poderosa, para complementar las mediciones que se hacen de manera intrusiva con sondas o cualquier otro instrumento. En la Figura 6.16 y la Tabla 6.32 se muestra la comparación general entre los resultados obtenidos en cada escenario.

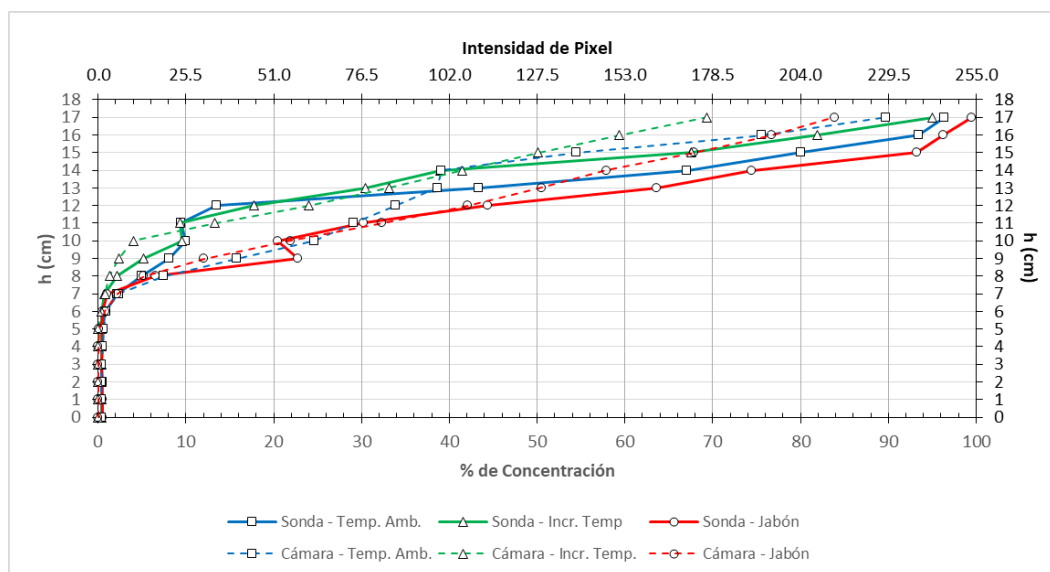


Fig. 6.16 Perfiles de concentración de aire obtenidos con sonda y cámara, $S = 0.003$ y $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$

ALTURA (cm)	ESCENARIO - TEMP. AMBIENTE			ESCENARIO - INCR. TEMPERATURA			ESCENARIO - JABON		
	SONDA	CAMARA		SONDA	CAMARA		SONDA	CAMARA	
		% CONC.	INT. PIXEL		% CONC.	INT. PIXEL		% CONC.	INT. PIXEL
0.00	0.45	0.39	1.00	0.41	0.00	0.00	0.47	0.00	0.00
1.00	0.43	0.39	1.00	0.39	0.00	0.00	0.45	0.00	0.00
2.00	0.46	0.39	1.00	0.39	0.00	0.00	0.43	0.00	0.00
3.00	0.45	0.40	1.01	0.39	0.00	0.00	0.45	0.01	0.02
4.00	0.41	0.54	1.38	0.38	0.00	0.00	0.50	0.03	0.08
5.00	0.46	0.65	1.65	0.39	0.00	0.01	0.48	0.10	0.26
6.00	0.86	0.88	2.25	0.44	0.39	1.00	0.54	0.78	1.99
7.00	2.12	2.32	5.92	0.73	0.77	1.97	1.03	2.20	5.60
8.00	4.98	7.49	19.10	2.11	1.30	3.32	6.56	5.21	13.28
9.00	8.14	15.76	40.18	5.14	2.37	6.05	22.74	12.06	30.75
10.00	9.92	24.64	62.84	9.55	4.03	10.28	20.44	21.89	55.83
11.00	9.39	29.05	74.08	9.33	13.30	33.92	30.26	32.33	82.45
12.00	13.45	33.84	86.30	17.72	24.00	61.20	44.38	42.06	107.26
13.00	43.38	38.65	98.55	30.43	33.20	84.66	63.62	50.47	128.70
14.00	67.00	39.12	99.75	38.94	41.52	105.87	74.41	57.89	147.63
15.00	80.02	54.46	138.88	67.53	50.13	127.84	93.24	67.86	173.05
16.00	93.45	75.59	192.76	81.96	59.30	151.23	96.29	76.71	195.61
17.00	96.39	89.73	228.81	94.97	69.35	176.85	99.49	83.86	213.84

Tabla 6.32 Valores de concentración de aire obtenidos con sonda y cámara, $S = 0.003$ y $Q = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$

6.6. Perfiles de concentración a lo largo de las imágenes

El procesamiento de imágenes ofrece la ventaja de poder obtener perfiles de concentración de aire en distintos puntos de las imágenes, a diferencia de la sonda que sólo permite obtenerlos en un solo punto a la vez o por medición.

Las Figuras 6.17 a la 6.19 representan los perfiles de concentración en 3D a lo largo de las imágenes, para los tres escenarios, con una pendiente de 0.03 y el gasto de 0.020 m³/s. Al analizar cada representación gráfica se observa de manera clara la discontinuidad presente en la interfaz agua – aire, debida a la inestabilidad propia del fenómeno en estudio.

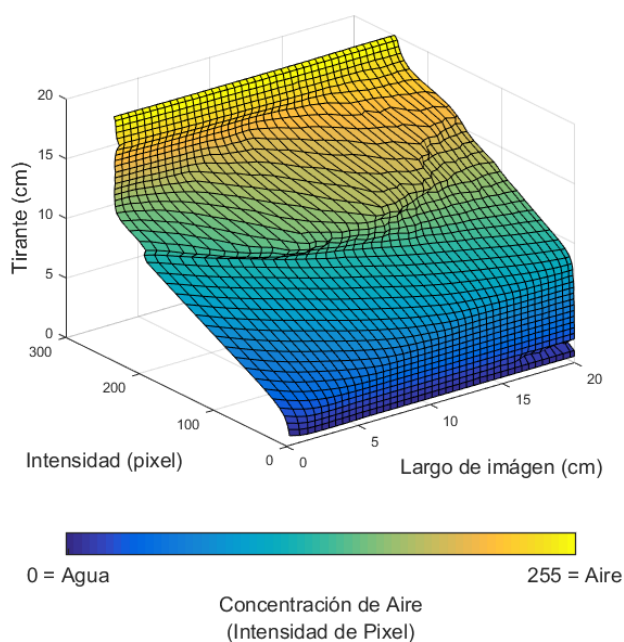


Fig. 6.17 Perfiles de concentración de aire en intensidad de píxeles a lo largo de las imágenes para el escenario de agua a temperatura ambiente

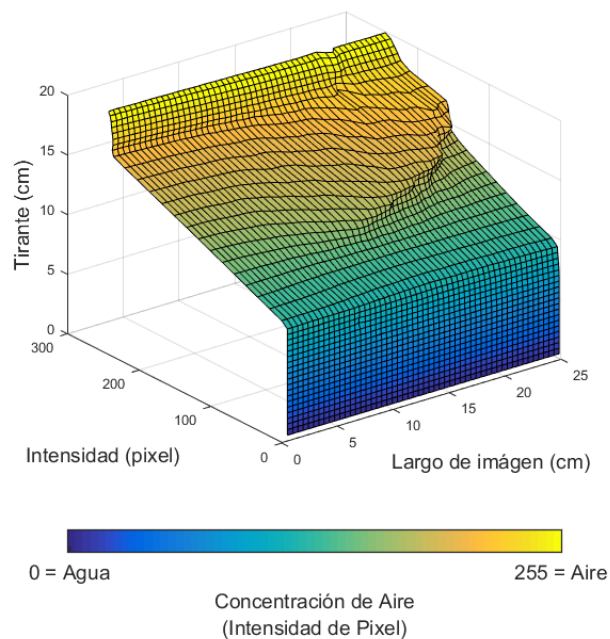


Fig. 6.18 Perfiles de concentración de aire en intensidad de píxeles a lo largo de las imágenes para el escenario de agua con incremento de temperatura

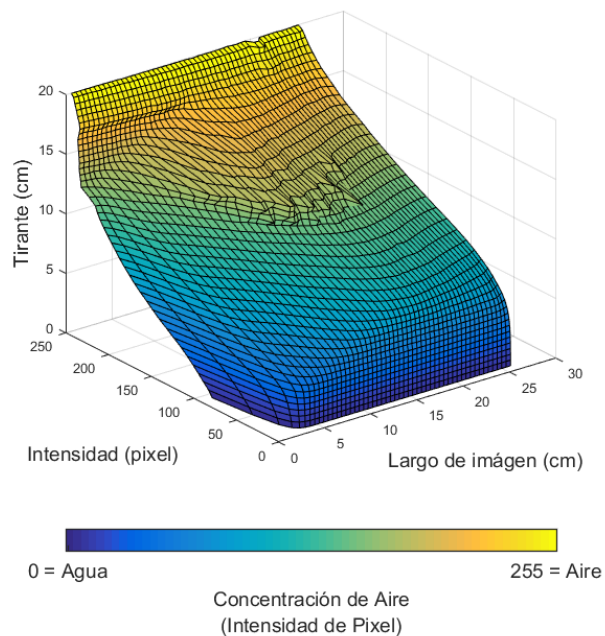


Fig. 6.19 Perfiles de concentración de aire en intensidad de píxeles a lo largo de las imágenes para el escenario de agua con surfactante (Jabón)



7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los perfiles de concentración de aire calculados a través de las imágenes en tonos de grises indican, que el procedimiento de procesamiento de imágenes con una adecuada calibración, permite estimar la concentración de aire en el flujo agua-aire generado por un salto hidráulico en un conducto cerrado de sección circular.

Los resultados obtenidos validan la hipótesis de que la concentración de aire en un salto se puede evaluar en base a la intensidad de píxeles de las imágenes. Por tanto, esta técnica de visualización resulta ser una herramienta poderosa para complementar los datos recolectados con una sonda de doble punta o con otro instrumento de medición intrusivo.

Las variaciones observadas en las gráficas, entre los perfiles de concentración obtenidas con la sonda y los evaluados mediante los algoritmos EI y MIP, se debe principalmente al hecho de que, a través de los algoritmos se obtienen los perfiles cercanos a la pared del conducto mientras que la sonda mide a lo largo del centro del mismo.

Las alturas a las que se tomaron las medidas no coinciden perfectamente en el centro y en la pared de la tubería. No obstante, se redujo el efecto de curvatura con el uso de la caja de acrílico llena de agua.

El uso de los métodos intrusivos permite la toma de lecturas puntuales dentro del flujo a lo largo de un perfil vertical como en el caso de la sonda; es decir, no hace posible la lectura de múltiples puntos a la vez sino solamente en el lugar donde se coloca el instrumento. Es por eso que, la implementación de los métodos no intrusivos, como el basado en el análisis de imágenes, permite conocer la concentración de aire en diferentes partes del flujo, a través de un registro de datos en zonas donde la sonda no fue colocada.

Para tener una mayor representatividad de los resultados obtenidos con imágenes, se recomienda que las fotografías sean tomadas cerca de la pared lateral del conducto en el que se están realizando los experimentos. Además, es conveniente utilizar una cámara de alta velocidad para obtener un número importante de fotografías de alta definición. Se propone realizar la captura de las imágenes por la noche con una buena iluminación artificial.

Los perfiles de concentración de aire obtenidos en las pruebas en agua con incremento de temperatura confirman los resultados obtenidos por Mortensen (2009), cuando la temperatura del agua aumenta la cantidad de aire arrastrado por el salto hidráulico disminuye.

El análisis de la concentración de aire en las pruebas en agua con surfactante demostró que el arrastre de aire aumenta a medida que la tensión superficial disminuye, con lo que se comprueba la veracidad de las investigaciones realizadas por Pothof *et al.* (2013).

Por lo tanto, es importante mencionar que los perfiles de concentración de aire obtenidos en todas las pruebas experimentales variaron en función de la temperatura y la tensión superficial. Con ello es preciso no sólo tomar en cuenta al gasto y la pendiente como variables de diseño de las líneas de conducción para aguas residuales, sino también considerar la temperatura y la tensión superficial del flujo.

ANEXO A. Perfiles de concentración

A.1. Agua limpia a temperatura ambiente

Pruebas con pendiente de 0.01

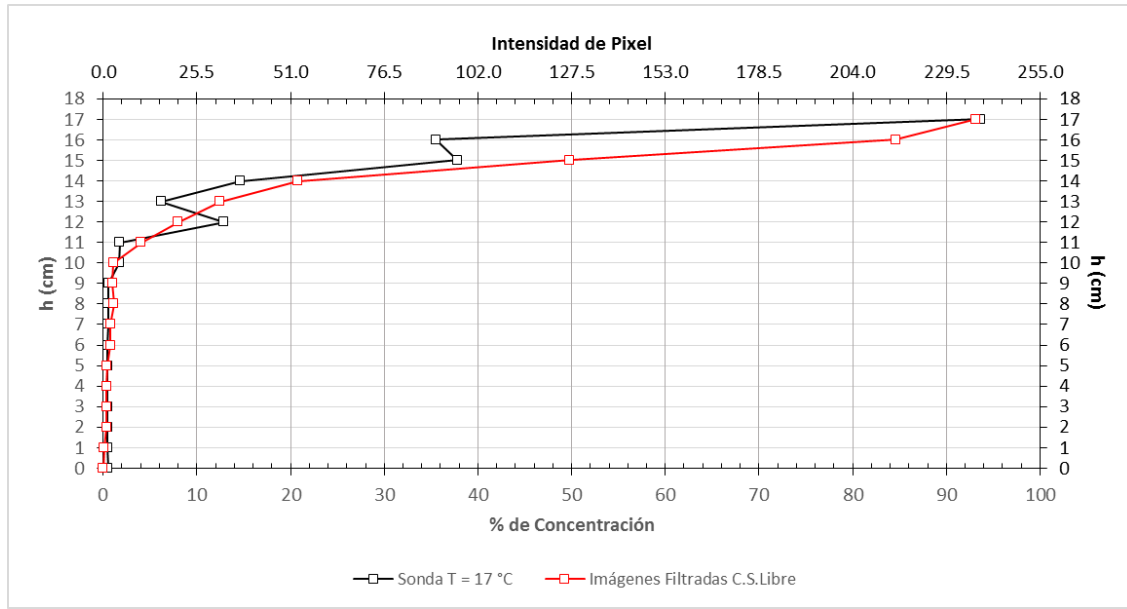


Fig. A.1 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL				
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	
0.00	0.00	0.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	21.00	0.46	0.09	0.09	0.09	0.09	0.24	0.24	0.22	0.22	0.22
2.00	42.00	0.46	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.00	63.00	0.48	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.00	84.00	0.44	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
5.00	105.00	0.48	0.42	0.42	0.42	0.42	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07
6.00	126.00	0.46	0.77	0.77	0.77	0.77	1.96	1.96	1.97	1.97	1.97
7.00	147.00	0.52	0.78	0.78	0.78	0.78	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
8.00	168.00	0.53	1.13	1.13	1.06	1.06	2.87	2.87	2.70	2.70	2.70
9.00	189.00	0.59	0.99	0.99	0.88	0.88	2.53	2.53	2.23	2.23	2.23
10.00	209.99	1.70	1.08	1.02	1.57	0.99	2.76	2.59	4.00	2.54	2.54
11.00	231.00	1.76	4.05	4.61	5.17	4.24	10.32	11.76	13.18	10.81	10.81
12.00	252.01	12.90	8.00	11.44	7.77	9.09	20.40	29.18	19.81	23.17	23.17
13.00	273.00	6.19	12.50	15.83	10.06	11.01	31.89	40.36	25.65	28.07	28.07
14.00	294.00	14.59	20.72	24.57	18.66	19.82	52.85	62.66	47.57	50.54	50.54
15.00	314.99	37.78	49.80	53.16	49.38	51.22	126.99	135.55	125.91	130.62	130.62
16.00	336.00	35.51	84.57	85.92	85.30	86.01	215.65	219.09	217.51	219.32	219.32
17.00	357.01	93.63	93.16	93.30	93.66	93.69	237.57	237.91	238.82	238.90	238.90

Tabla A.1 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.923	0.851
Filtradas S.S.Libre	0.920	0.846
No Filtradas C.S.Libre	0.922	0.851
No Filtradas S.S.Libre	0.921	0.849

Tabla A.2 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$

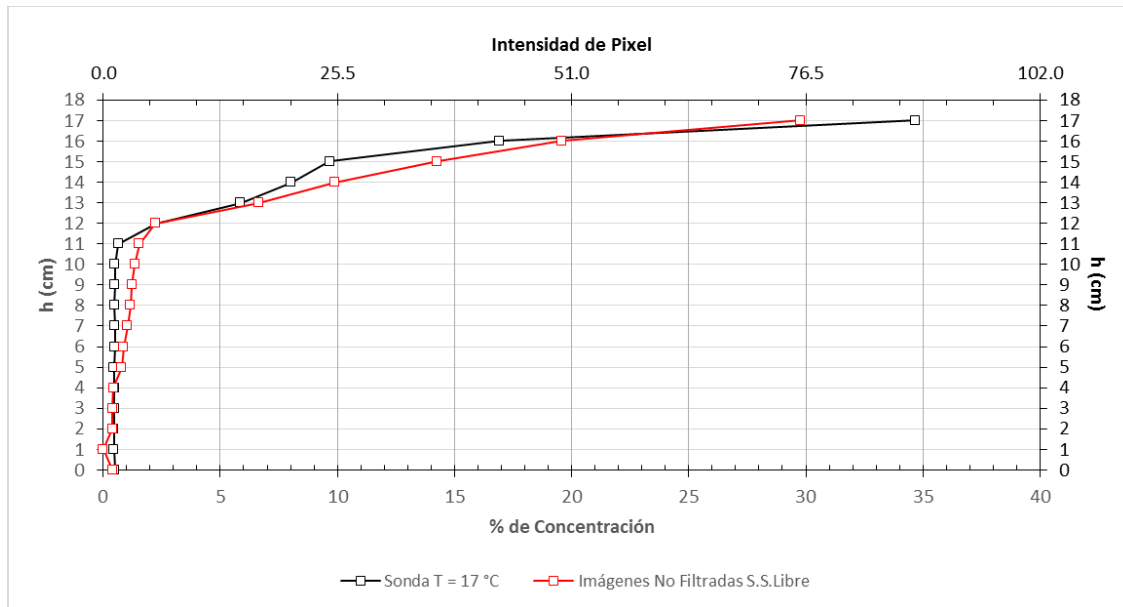


Fig. A.2 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL			
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS	
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE
0.00	0.00	0.49	0.58	0.58	0.39	0.39	1.48	1.48	1.00	1.00
1.00	21.05	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	42.10	0.47	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
3.00	63.15	0.48	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
4.00	84.20	0.48	0.43	0.43	0.43	0.43	1.10	1.10	1.10	1.10
5.00	105.25	0.47	0.78	0.78	0.78	0.78	2.00	2.00	2.00	2.00
6.00	126.30	0.50	0.88	0.88	0.88	0.88	2.24	2.24	2.23	2.23
7.00	147.35	0.49	1.05	1.05	1.05	1.05	2.67	2.67	2.68	2.68
8.00	168.40	0.48	1.18	1.18	1.17	1.17	3.00	3.00	2.99	2.99
9.00	189.45	0.49	1.23	1.23	1.24	1.24	3.14	3.14	3.16	3.16
10.00	210.50	0.50	1.36	1.36	1.38	1.36	3.46	3.46	3.52	3.47
11.00	231.55	0.65	1.69	1.58	1.74	1.54	4.30	4.03	4.44	3.93
12.00	252.60	2.26	3.89	2.45	4.28	2.22	9.92	6.25	10.91	5.67
13.00	273.65	5.88	8.42	7.55	8.84	6.64	21.46	19.25	22.53	16.93
14.00	294.71	8.03	12.20	11.66	11.55	9.88	31.10	29.74	29.46	25.20
15.00	315.76	9.66	17.71	16.98	16.20	14.27	45.17	43.30	41.30	36.40
16.00	336.80	16.94	23.97	22.89	22.11	19.60	61.13	58.37	56.38	49.97
17.00	357.84	34.68	32.87	31.78	32.27	29.75	83.82	81.05	82.30	75.86

Tabla A.3 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.965	0.931
Filtradas S.S.Libre	0.967	0.934
No Filtradas C.S.Libre	0.972	0.945
No Filtradas S.S.Libre	0.979	0.958

Tabla A.4 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$

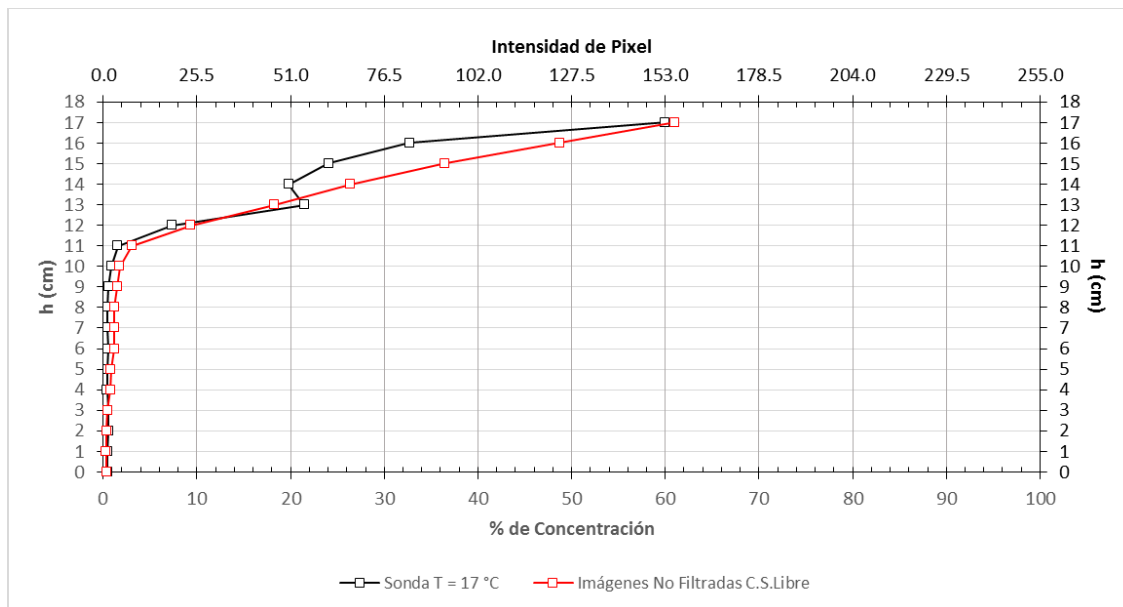


Fig. A.3 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.028 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL			
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS	
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE
0.00	0.00	0.49	0.40	0.40	0.39	0.39	1.01	1.01	1.00	1.00
1.00	21.05	0.49	0.39	0.39	0.34	0.34	1.00	1.00	0.86	0.86
2.00	42.10	0.55	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
3.00	63.15	0.51	0.47	0.47	0.47	0.47	1.21	1.21	1.21	1.21
4.00	84.20	0.44	0.78	0.78	0.78	0.78	2.00	2.00	2.00	2.00
5.00	105.25	0.47	0.84	0.84	0.84	0.84	2.15	2.15	2.15	2.15
6.00	126.30	0.50	1.18	1.18	1.18	1.18	3.00	3.00	3.00	3.00
7.00	147.35	0.49	1.18	1.18	1.18	1.18	3.00	3.00	3.00	3.00
8.00	168.40	0.48	1.18	1.18	1.18	1.18	3.02	3.02	3.02	3.02
9.00	189.45	0.55	1.52	1.52	1.52	1.52	3.87	3.87	3.89	3.89
10.00	210.50	0.87	1.71	1.70	1.75	1.73	4.35	4.34	4.47	4.40
11.00	231.55	1.55	2.61	5.37	3.06	5.29	6.64	13.70	7.82	13.49
12.00	252.60	7.31	6.80	17.64	9.34	17.80	17.35	44.97	23.82	45.40
13.00	273.65	21.50	14.94	25.69	18.27	26.19	38.10	65.50	46.59	66.77
14.00	294.71	19.82	23.11	32.69	26.36	33.48	58.92	83.36	67.23	85.38
15.00	315.76	24.07	32.68	42.40	36.52	43.84	83.35	108.12	93.12	111.81
16.00	336.80	32.70	44.53	54.85	48.71	56.28	113.56	139.87	124.22	143.52
17.00	357.84	59.98	55.56	64.29	61.02	67.29	141.67	163.95	155.61	171.59

Tabla A.5 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.028 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.972	0.945
Filtradas S.S.Libre	0.963	0.928
No Filtradas C.S.Libre	0.974	0.949
No Filtradas S.S.Libre	0.966	0.933

Tabla A.6 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.028 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$

Pruebas con pendiente de 0.02

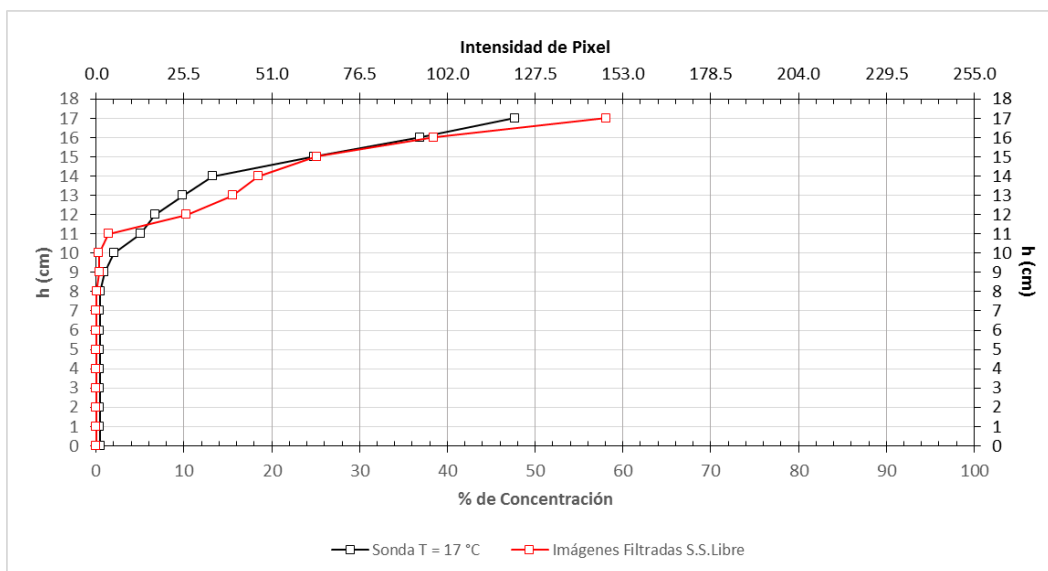


Fig. A.4 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL				
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	
0.00	0.00	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	21.40	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	42.80	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	64.20	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	85.60	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	107.00	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.00	128.40	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7.00	149.80	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.00	171.20	0.46	0.04	0.04	0.01	0.01	0.10	0.10	0.02	0.02	0.02
9.00	192.60	0.91	0.38	0.38	0.38	0.38	0.98	0.98	0.98	0.96	0.96
10.00	214.00	2.03	0.93	0.29	1.68	0.29	2.38	0.75	4.28	0.74	0.74
11.00	235.40	5.07	7.13	1.41	9.60	1.43	18.19	3.60	24.48	3.64	3.64
12.00	256.80	6.70	15.50	10.30	18.12	10.45	39.52	26.26	46.20	26.65	26.65
13.00	278.19	9.89	19.07	15.57	20.63	15.45	48.63	39.71	52.61	39.39	39.39
14.00	299.61	13.24	20.97	18.46	21.62	17.90	53.48	47.06	55.14	45.64	45.64
15.00	321.00	24.87	27.83	25.09	28.92	24.69	70.96	63.98	73.75	62.96	62.96
16.00	342.39	36.89	42.67	38.49	45.05	38.89	108.82	98.14	114.87	99.16	99.16
17.00	363.81	47.70	62.87	58.09	67.98	61.39	160.30	148.14	173.36	156.56	156.56

Tabla A.7 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.986	0.973
Filtradas S.S.Libre	0.989	0.979
No Filtradas C.S.Libre	0.983	0.966
No Filtradas S.S.Libre	0.988	0.976

Tabla A.8 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$

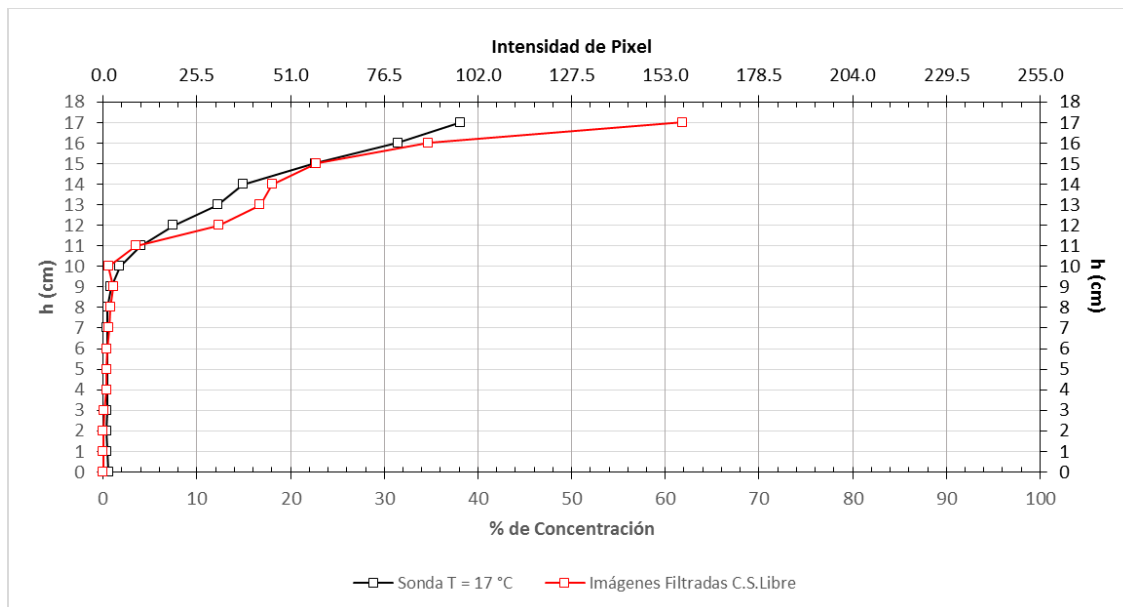


Fig. A.5 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL			
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS	
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE
0.00	0.00	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	21.40	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	42.80	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	64.20	0.43	0.09	0.09	0.08	0.08	0.24	0.24	0.21	0.21
4.00	85.60	0.43	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
5.00	107.00	0.43	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
6.00	128.40	0.42	0.41	0.41	0.40	0.40	1.04	1.04	1.03	1.03
7.00	149.80	0.41	0.62	0.62	0.58	0.58	1.59	1.59	1.47	1.47
8.00	171.20	0.46	0.78	0.78	0.77	0.77	1.98	1.98	1.97	1.97
9.00	192.60	0.83	1.08	1.08	0.84	0.84	2.75	2.75	2.13	2.13
10.00	214.00	1.80	0.58	0.46	0.77	0.45	1.49	1.16	1.96	1.16
11.00	235.40	3.99	3.51	0.46	5.10	0.44	8.94	1.18	12.99	1.13
12.00	256.80	7.49	12.35	0.90	14.66	0.78	31.48	2.30	37.37	1.98
13.00	278.19	12.23	16.76	5.77	18.03	5.39	42.75	14.72	45.98	13.74
14.00	299.61	14.93	18.04	10.19	17.67	9.27	46.00	26.00	45.06	23.65
15.00	321.00	22.63	22.77	15.07	22.19	13.83	58.06	38.43	56.58	35.26
16.00	342.39	31.47	34.75	24.79	36.62	24.88	88.61	63.23	93.39	63.44
17.00	363.81	38.16	61.81	47.62	65.25	49.45	157.62	121.43	166.39	126.10

Tabla A.9 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.974	0.949
Filtradas S.S.Libre	0.947	0.896
No Filtradas C.S.Libre	0.969	0.939
No Filtradas S.S.Libre	0.936	0.876

Tabla A.10 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$

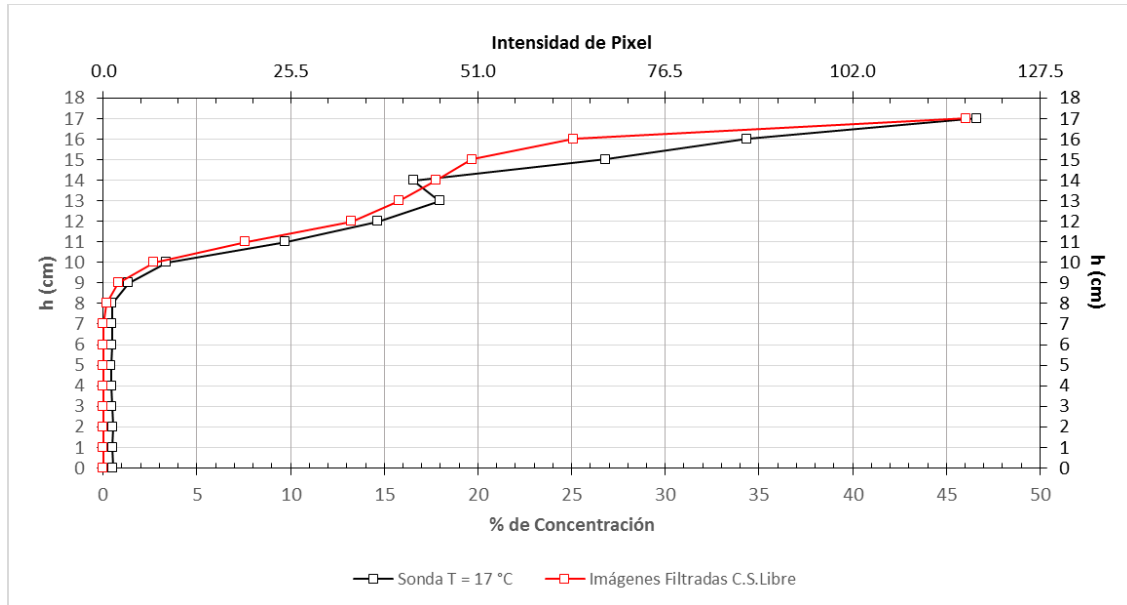


Fig. A.6 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.028 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL			
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS	
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE
0.00	0.00	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	21.50	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	43.00	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	64.50	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	86.00	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	107.50	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.00	129.00	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7.00	150.50	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.00	172.00	0.46	0.18	0.18	0.16	0.16	0.46	0.46	0.41	0.41
9.00	193.50	1.37	0.81	4.98	0.82	4.89	2.05	12.71	2.09	12.47
10.00	215.00	3.39	2.71	17.61	2.90	17.60	6.91	44.90	7.41	44.88
11.00	236.51	9.74	7.58	23.38	7.46	22.77	19.34	59.61	19.02	58.06
12.00	258.00	14.66	13.26	24.55	11.94	21.25	33.82	62.61	30.44	54.19
13.00	279.49	17.95	15.79	21.34	13.25	17.15	40.26	54.42	33.79	43.73
14.00	301.00	16.55	17.76	23.49	15.18	19.16	45.28	59.91	38.71	48.85
15.00	322.51	26.81	19.68	24.34	16.40	19.42	50.18	62.05	41.81	49.52
16.00	344.00	34.38	25.10	27.78	21.31	22.77	64.01	70.85	54.34	58.07
17.00	365.49	46.60	46.06	47.75	42.89	43.63	117.46	121.75	109.37	111.27

Tabla A.11 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.028 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.986	0.971
Filtradas S.S.Libre	0.924	0.854
No Filtradas C.S.Libre	0.977	0.955
No Filtradas S.S.Libre	0.900	0.810

Tabla A.12 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.028 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$

Pruebas con pendiente de 0.03

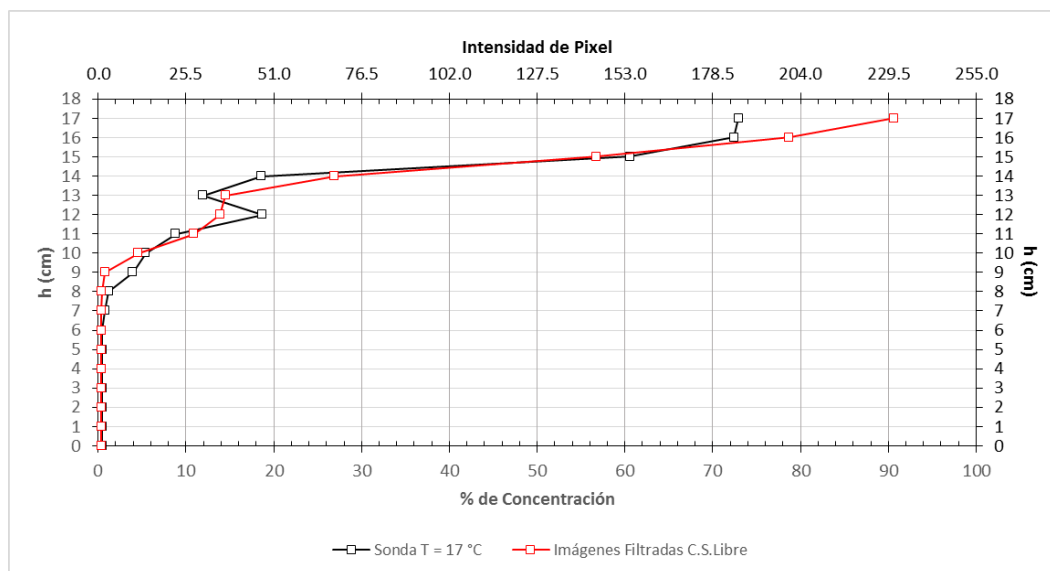


Fig. A.7 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL			
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS	
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE
0.00	0.00	0.47	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
1.00	20.85	0.45	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
2.00	41.70	0.45	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
3.00	62.55	0.45	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
4.00	83.40	0.44	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
5.00	104.25	0.45	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
6.00	125.10	0.44	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
7.00	145.95	0.79	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
8.00	166.80	1.20	0.39	0.39	0.39	0.39	1.01	1.01	1.01	1.00
9.00	187.65	3.97	0.77	3.00	0.98	3.00	1.95	7.65	2.49	7.65
10.00	208.50	5.42	4.60	16.96	5.48	17.12	11.73	43.25	13.96	43.66
11.00	229.35	8.84	10.90	21.29	11.14	20.45	27.79	54.28	28.42	52.15
12.00	250.21	18.73	13.86	19.37	11.51	15.06	35.35	49.40	29.35	38.41
13.00	271.04	11.96	14.51	17.33	10.60	11.53	37.00	44.18	27.03	29.40
14.00	291.90	18.58	26.87	30.03	24.40	25.84	68.52	76.57	62.22	65.89
15.00	312.75	60.56	56.75	60.99	56.96	59.84	144.72	155.53	145.24	152.59
16.00	333.60	72.43	78.71	80.52	79.08	80.49	200.70	205.33	201.66	205.24
17.00	354.44	72.93	90.68	91.61	91.15	91.77	231.24	233.59	232.43	234.02

Tabla A.13 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.989	0.978
Filtradas S.S.Libre	0.985	0.969
No Filtradas C.S.Libre	0.988	0.977
No Filtradas S.S.Libre	0.984	0.968

Tabla A.14 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$

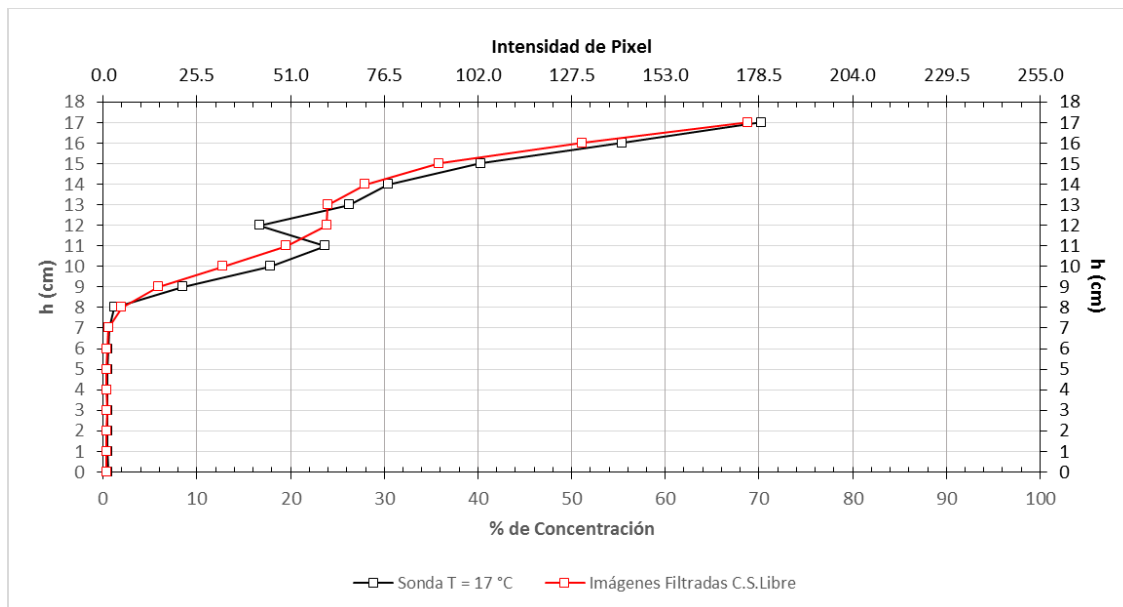


Fig. A.8 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL			
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS	
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE
0.00	0.00	0.53	0.39	0.39	0.30	0.30	1.00	1.00	0.77	0.77
1.00	20.95	0.45	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
2.00	41.90	0.46	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
3.00	62.85	0.45	0.44	0.44	0.41	0.41	1.12	1.12	1.05	1.05
4.00	83.80	0.43	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
5.00	104.75	0.45	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
6.00	125.70	0.52	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.01	1.00
7.00	146.65	0.62	0.58	0.39	0.69	0.39	1.48	1.00	1.75	1.00
8.00	167.60	1.19	1.99	0.37	2.50	0.37	5.07	0.95	6.37	0.95
9.00	188.55	8.49	5.88	6.23	7.26	6.24	15.00	15.88	18.51	15.92
10.00	209.49	17.86	12.82	15.92	14.92	16.04	32.68	40.59	38.05	40.91
11.00	230.45	23.73	19.56	22.92	22.14	23.57	49.88	58.44	56.45	60.10
12.00	251.40	16.70	23.85	26.46	25.44	26.56	60.81	67.46	64.87	67.72
13.00	272.34	26.23	23.97	26.12	24.73	25.75	61.13	66.60	63.07	65.66
14.00	293.30	30.40	27.98	30.24	28.13	29.31	71.35	77.10	71.74	74.75
15.00	314.25	40.30	35.89	38.06	36.47	37.42	91.51	97.04	93.01	95.43
16.00	335.19	55.44	51.14	52.85	54.15	54.52	130.40	134.77	138.07	139.02
17.00	356.15	70.23	68.84	72.31	72.75	75.28	175.54	184.40	185.52	191.97

Tabla A.15 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.992	0.984
Filtradas S.S.Libre	0.992	0.984
No Filtradas C.S.Libre	0.992	0.984
No Filtradas S.S.Libre	0.992	0.983

Tabla A.16 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$

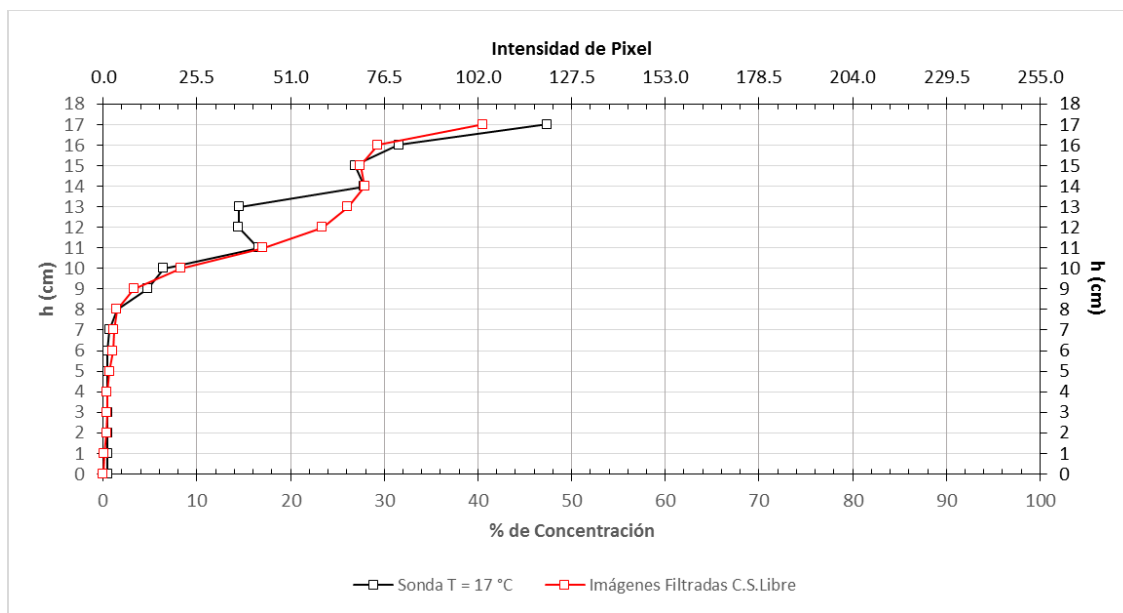


Fig. A.9 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.027 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL			
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS	
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE
0.00	0.00	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	21.25	0.45	0.10	0.10	0.05	0.05	0.26	0.26	0.12	0.12
2.00	42.50	0.47	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
3.00	63.75	0.49	0.40	0.40	0.39	0.39	1.02	1.02	1.00	1.00
4.00	85.00	0.43	0.40	0.40	0.40	0.40	1.01	1.01	1.01	1.01
5.00	106.25	0.47	0.67	0.67	0.68	0.68	1.72	1.72	1.72	1.72
6.00	127.50	0.45	1.03	1.03	0.92	0.92	2.64	2.64	2.35	2.35
7.00	148.75	0.67	1.14	1.14	1.13	1.13	2.91	2.91	2.89	2.89
8.00	170.00	1.46	1.44	1.38	1.49	1.37	3.67	3.52	3.79	3.48
9.00	191.25	4.75	3.26	4.24	3.65	4.07	8.32	10.82	9.32	10.37
10.00	212.50	6.45	8.25	13.53	9.69	13.54	21.04	34.50	24.72	34.53
11.00	233.74	16.61	17.04	22.30	18.48	22.38	43.44	56.86	47.12	57.06
12.00	255.00	14.46	23.41	27.67	24.05	27.23	59.70	70.57	61.32	69.43
13.00	276.24	14.50	26.11	28.91	25.55	27.55	66.59	73.71	65.16	70.26
14.00	297.50	27.89	27.91	29.93	26.32	27.64	71.18	76.32	67.12	70.49
15.00	318.75	26.86	27.47	29.32	25.37	26.63	70.04	74.78	64.70	67.90
16.00	340.00	31.59	29.33	31.23	26.96	28.28	74.79	79.65	68.74	72.10
17.00	361.26	47.38	40.56	42.06	39.55	40.34	103.44	107.26	100.85	102.87

Tabla A.17 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.027 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.960	0.922
Filtradas S.S.Libre	0.942	0.888
No Filtradas C.S.Libre	0.953	0.907
No Filtradas S.S.Libre	0.935	0.874

Tabla A.18 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.027 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$

Pruebas con pendiente de 0.04

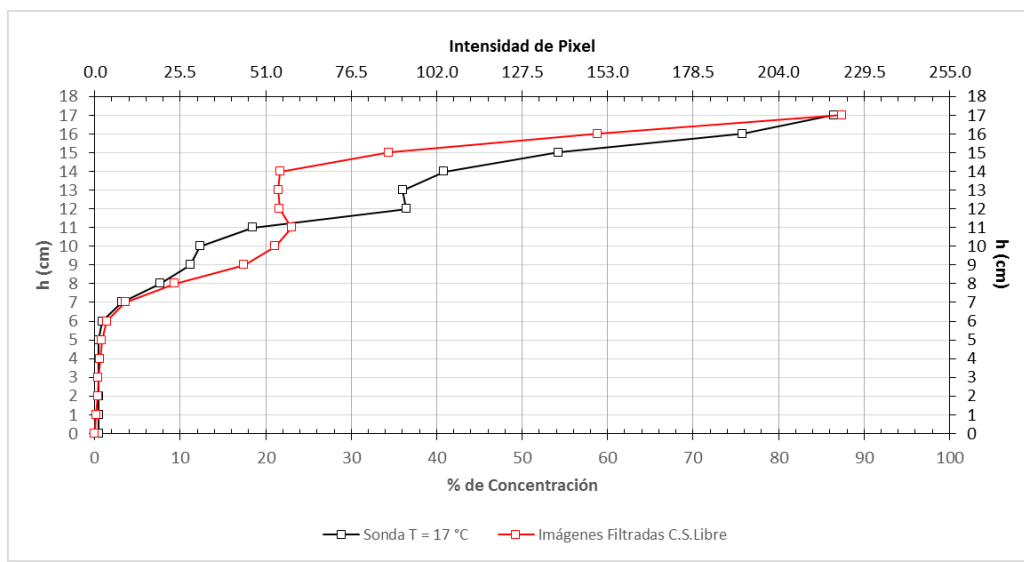


Fig. A.10 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL				
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	
0.00	0.00	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	21.25	0.46	0.16	0.16	0.01	0.01	0.41	0.41	0.02	0.02	0.02
2.00	42.50	0.46	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3.00	63.75	0.45	0.39	0.39	0.39	0.39	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00
4.00	85.00	0.46	0.65	0.65	0.64	0.64	1.65	1.65	1.64	1.64	1.64
5.00	106.25	0.46	0.84	0.84	0.83	0.82	2.15	2.14	2.13	2.10	2.10
6.00	127.50	0.90	1.42	1.06	1.53	1.06	3.62	2.71	3.89	2.69	2.69
7.00	148.75	3.17	3.58	2.94	3.98	2.88	9.14	7.50	10.16	7.35	7.35
8.00	170.00	7.64	9.37	12.17	10.37	12.02	23.88	31.02	26.44	30.65	30.65
9.00	191.25	11.18	17.45	20.09	17.55	19.10	44.49	51.23	44.74	48.71	48.71
10.00	212.50	12.33	21.12	22.60	19.73	20.54	53.87	57.63	50.30	52.37	52.37
11.00	233.74	18.46	23.05	23.80	20.20	20.62	58.78	60.68	51.50	52.57	52.57
12.00	255.00	36.46	21.64	22.16	18.54	18.77	55.17	56.51	47.29	47.87	47.87
13.00	276.24	36.03	21.46	21.96	18.35	18.63	54.72	55.99	46.80	47.50	47.50
14.00	297.50	40.87	21.68	22.16	18.26	18.45	55.29	56.51	46.56	47.04	47.04
15.00	318.75	54.22	34.43	34.22	32.11	31.25	87.79	87.26	81.88	79.69	79.69
16.00	340.00	75.83	58.88	60.69	59.38	60.47	150.13	154.75	151.42	154.20	154.20
17.00	361.26	86.47	87.37	88.19	88.06	88.62	222.81	224.89	224.54	225.99	225.99

Tabla A.19 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.949	0.901
Filtradas S.S.Libre	0.945	0.893
No Filtradas C.S.Libre	0.936	0.877
No Filtradas S.S.Libre	0.932	0.870

Tabla A.20 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$

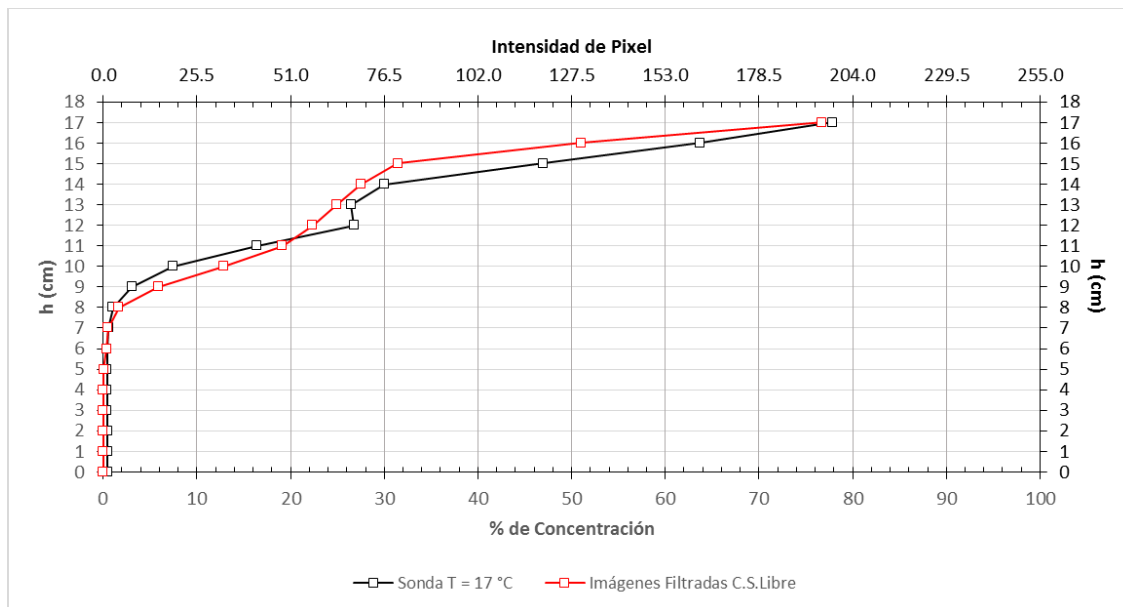


Fig. A.11 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL				
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	
0.00	0.00	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	21.35	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	42.70	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	64.05	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	85.40	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	106.75	0.43	0.03	0.03	0.03	0.03	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
6.00	128.10	0.43	0.38	0.38	0.38	0.38	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97
7.00	149.45	0.57	0.54	0.49	0.55	0.46	1.38	1.24	1.40	1.17	1.17
8.00	170.80	1.02	1.65	0.94	1.93	0.87	4.21	2.40	4.93	2.21	2.21
9.00	192.15	3.05	5.86	9.71	6.71	9.55	14.96	24.77	17.12	24.34	24.34
10.00	213.50	7.46	12.84	18.97	13.80	18.62	32.75	48.37	35.19	47.48	47.48
11.00	234.85	16.40	19.12	23.74	19.11	22.58	48.75	60.54	48.73	57.59	57.59
12.00	256.20	26.78	22.34	26.03	21.77	24.28	56.98	66.38	55.51	61.91	61.91
13.00	277.55	26.47	24.88	27.78	23.04	24.92	63.45	70.84	58.77	63.55	63.55
14.00	298.91	29.99	27.53	31.16	24.58	27.05	70.20	79.45	62.67	68.97	68.97
15.00	320.25	46.97	31.45	34.32	29.54	31.37	80.19	87.53	75.32	79.99	79.99
16.00	341.60	63.76	51.00	55.02	51.55	54.32	130.06	140.30	131.46	138.51	138.51
17.00	362.94	77.84	76.72	81.26	79.57	83.23	195.63	207.21	202.89	212.23	212.23

Tabla A.21 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.983	0.966
Filtradas S.S.Libre	0.976	0.952
No Filtradas C.S.Libre	0.976	0.952
No Filtradas S.S.Libre	0.970	0.942

Tabla A.22 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$

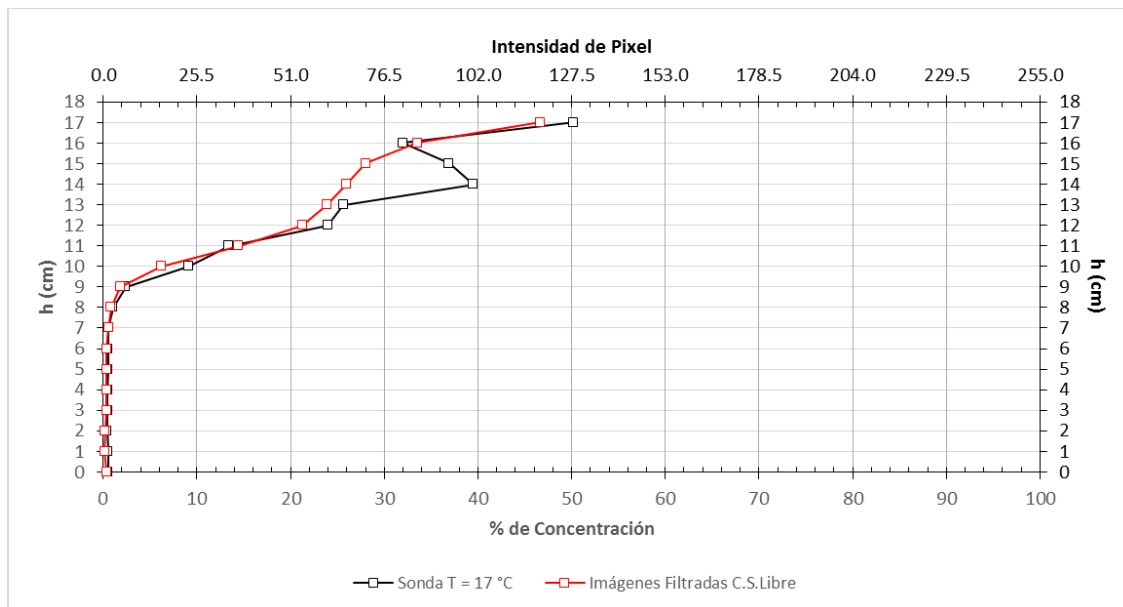


Fig. A.12 Perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.028 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL			
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS	
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE
0.00	0.00	0.50	0.39	0.39	0.00	0.00	0.99	0.99	0.00	0.00
1.00	21.55	0.51	0.14	0.14	0.02	0.02	0.35	0.35	0.04	0.04
2.00	43.10	0.44	0.22	0.22	0.28	0.28	0.55	0.55	0.71	0.71
3.00	64.65	0.45	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
4.00	86.20	0.47	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
5.00	107.75	0.51	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
6.00	129.30	0.50	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00
7.00	150.85	0.60	0.59	0.59	0.59	0.59	1.51	1.51	1.50	1.50
8.00	172.40	1.05	0.84	1.16	0.85	1.16	2.15	2.96	2.16	2.96
9.00	193.95	2.39	1.82	9.94	1.99	9.91	4.64	25.34	5.07	25.27
10.00	215.50	9.10	6.19	20.00	6.92	20.00	15.79	51.00	17.64	51.01
11.00	237.06	13.41	14.48	27.09	15.22	26.84	36.91	69.08	38.81	68.45
12.00	258.61	23.96	21.27	30.83	21.15	29.69	54.24	78.61	53.94	75.71
13.00	280.16	25.61	23.89	30.45	22.63	28.20	60.92	77.64	57.70	71.92
14.00	301.69	39.50	25.96	31.86	24.25	29.06	66.19	81.23	61.84	74.11
15.00	323.24	36.91	28.02	34.03	25.82	30.73	71.45	86.77	65.83	78.35
16.00	344.79	31.98	33.53	40.81	31.31	37.48	85.49	104.07	79.84	95.58
17.00	366.34	50.21	46.62	55.14	47.40	55.17	118.86	140.61	120.87	140.67

Tabla A.23 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.028 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.981	0.962
Filtradas S.S.Libre	0.955	0.912
No Filtradas C.S.Libre	0.975	0.951
No Filtradas S.S.Libre	0.946	0.894

Tabla A.24 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia a temperatura ambiente - $Q = 0.028 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$

A.2. Agua limpia con un incremento de temperatura

Pruebas con pendiente de 0.01

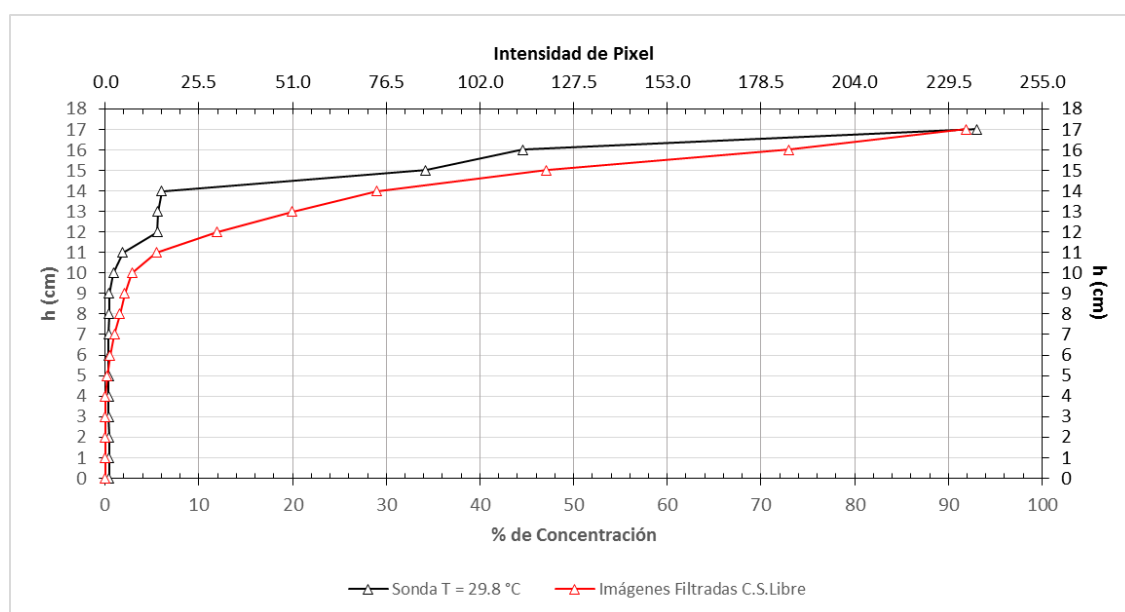


Fig. A.13 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$, $T = 29.8 \text{ °C}$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL				
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	
0.00	0.00	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	21.15	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	42.30	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	63.45	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	84.60	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	105.75	0.39	0.23	0.23	0.19	0.19	0.59	0.59	0.48	0.48	0.48
6.00	126.90	0.38	0.54	0.54	0.46	0.46	1.36	1.36	1.19	1.19	1.19
7.00	148.05	0.38	0.98	0.98	0.97	0.97	2.50	2.50	2.48	2.48	2.48
8.00	169.20	0.42	1.57	1.57	1.51	1.51	4.00	4.00	3.85	3.85	3.85
9.00	190.35	0.41	2.07	2.07	2.02	2.02	5.28	5.28	5.15	5.15	5.15
10.00	211.50	0.91	2.87	2.81	2.88	2.64	7.33	7.16	7.35	6.74	6.74
11.00	232.65	1.90	5.47	4.43	6.74	4.09	13.95	11.29	17.19	10.44	10.44
12.00	253.80	5.55	11.90	12.29	13.58	11.74	30.33	31.34	34.62	29.93	29.93
13.00	274.95	5.62	19.95	20.50	21.59	19.62	50.87	52.27	55.06	50.03	50.03
14.00	296.10	6.05	28.97	29.67	31.66	29.78	73.88	75.65	80.73	75.93	75.93
15.00	317.26	34.22	47.10	48.47	52.67	50.27	120.10	123.60	134.30	128.18	128.18
16.00	338.40	44.58	72.93	74.46	79.57	78.28	185.96	189.88	202.91	199.61	199.61
17.00	359.54	93.08	91.89	92.66	92.58	92.85	234.33	236.29	236.07	236.76	236.76

Tabla A.25 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura – $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$, $T = 29.8 \text{ }^\circ\text{C}$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.951	0.904
Filtradas S.S.Libre	0.949	0.900
No Filtradas C.S.Libre	0.937	0.877
No Filtradas S.S.Libre	0.944	0.891

Tabla A.26 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$, $T = 29.8 \text{ }^\circ\text{C}$

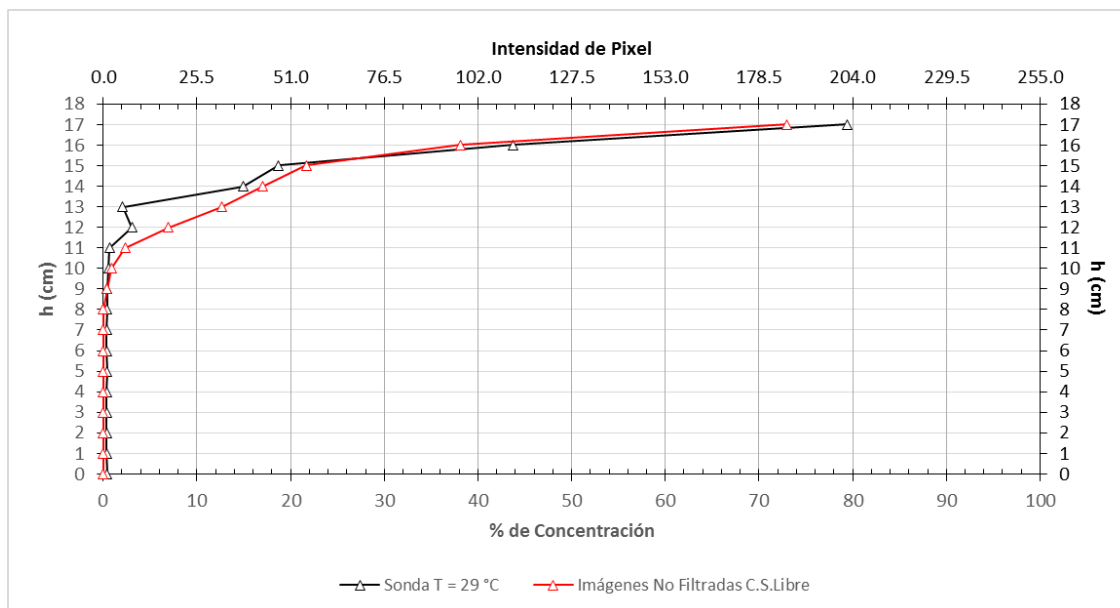


Fig. A.14 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$, $T = 29 \text{ }^\circ\text{C}$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL				
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	
0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	21.25	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	42.50	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	63.75	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	85.00	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	106.25	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.00	127.50	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7.00	148.75	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.00	170.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9.00	191.25	0.43	0.40	0.40	0.40	0.40	1.02	1.02	1.01	1.01	1.01
10.00	212.50	0.58	0.87	0.87	0.86	0.86	2.22	2.22	2.20	2.20	2.20
11.00	233.74	0.67	2.51	8.81	2.35	8.75	6.41	22.46	6.00	22.31	22.31
12.00	255.00	3.05	7.21	24.12	6.96	23.71	18.38	61.52	17.76	60.46	60.46
13.00	276.24	2.06	12.60	29.07	12.63	27.27	32.13	74.13	32.21	69.54	69.54
14.00	297.50	14.95	17.65	30.19	17.03	27.02	45.01	76.99	43.42	68.89	68.89
15.00	318.75	18.72	23.15	35.11	21.69	31.06	59.04	89.54	55.30	79.19	79.19
16.00	340.00	43.70	37.82	45.90	38.12	44.53	96.43	117.04	97.20	113.54	113.54
17.00	361.26	79.38	69.49	72.64	72.98	74.99	177.19	185.23	186.08	191.22	191.22

Tabla A.27 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura – $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$, $T = 29 \text{ }^\circ\text{C}$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.985	0.970
Filtradas S.S.Libre	0.904	0.817
No Filtradas C.S.Libre	0.988	0.975
No Filtradas S.S.Libre	0.921	0.849

Tabla A.28 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$, $T = 29 \text{ }^\circ\text{C}$

Pruebas con pendiente de 0.02

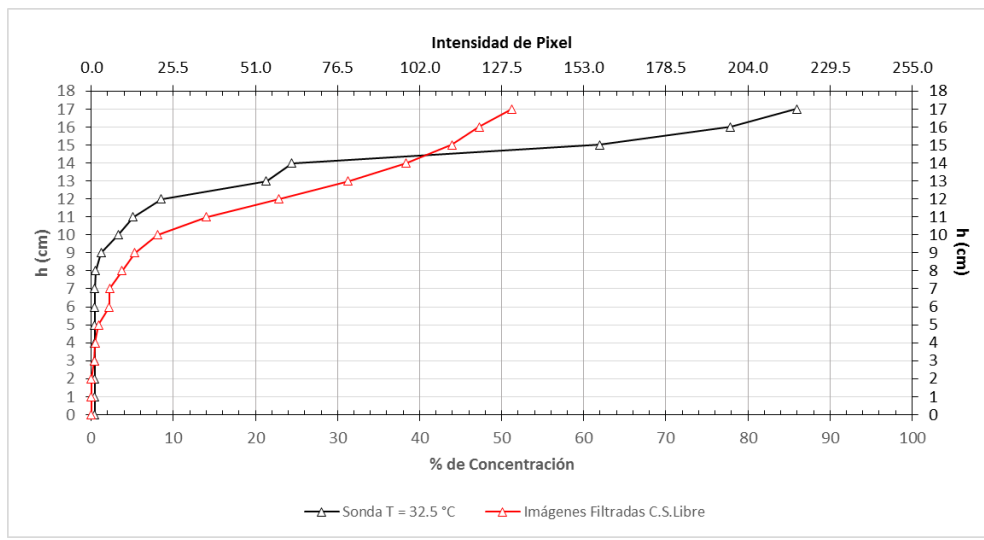


Fig. A.15 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$, $T = 32.5 \text{ }^\circ\text{C}$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL				
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	
0.00	0.00	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	20.75	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	41.50	0.41	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
3.00	62.25	0.40	0.39	0.39	0.39	0.39	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4.00	83.00	0.40	0.49	0.49	0.49	0.49	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
5.00	103.75	0.41	0.90	0.90	0.90	0.90	2.28	2.28	2.30	2.30	2.30
6.00	124.50	0.42	2.21	2.21	1.96	1.96	5.63	5.63	5.00	5.00	5.00
7.00	145.25	0.42	2.26	2.26	2.28	2.28	5.77	5.77	5.81	5.81	5.81
8.00	166.00	0.54	3.75	3.75	3.62	3.62	9.57	9.57	9.22	9.22	9.22
9.00	186.75	1.20	5.30	5.30	5.15	5.13	13.51	13.51	13.13	13.08	13.08
10.00	207.50	3.29	8.07	7.96	8.33	7.63	20.58	20.30	21.25	19.45	19.45
11.00	228.24	5.09	14.02	13.01	15.97	12.29	35.74	33.18	40.72	31.34	31.34
12.00	249.01	8.55	22.80	23.13	26.38	22.58	58.15	58.97	67.27	57.57	57.57
13.00	269.76	21.29	31.29	31.27	33.98	30.78	79.80	79.73	86.64	78.49	78.49
14.00	290.50	24.45	38.30	37.61	39.80	36.71	97.65	95.91	101.49	93.60	93.60
15.00	311.25	61.91	43.91	42.90	45.36	42.30	111.98	109.41	115.68	107.86	107.86
16.00	332.00	77.89	47.28	46.34	47.97	45.49	120.57	118.16	122.31	115.98	115.98
17.00	352.74	85.92	51.25	50.18	52.07	49.62	130.67	127.96	132.79	126.54	126.54

Tabla A.29 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura – $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$, $T = 32.5 \text{ }^\circ\text{C}$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.917	0.841
Filtradas S.S.Libre	0.915	0.837
No Filtradas C.S.Libre	0.902	0.814
No Filtradas S.S.Libre	0.917	0.841

Tabla A.30 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$, $T = 32.5 \text{ }^\circ\text{C}$

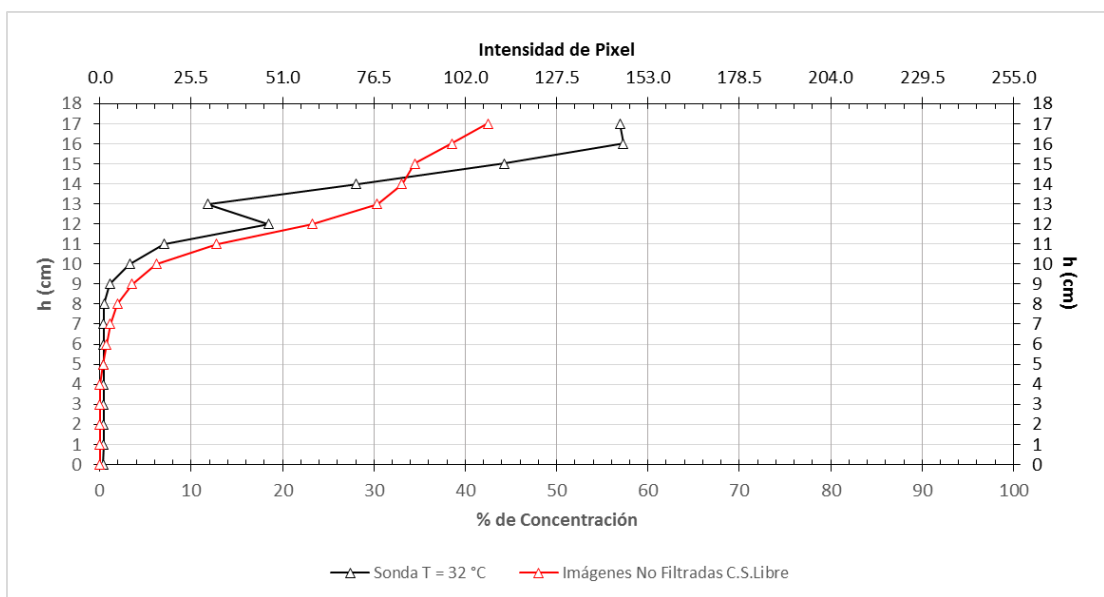


Fig. A.16 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$, $T = 32 \text{ }^\circ\text{C}$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL				
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	
0.00	0.00	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	20.70	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	41.40	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	62.10	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	82.80	0.41	0.05	0.07	0.03	0.06	0.12	0.18	0.07	0.15	
5.00	103.50	0.42	0.38	0.39	0.38	0.39	0.96	1.00	0.97	1.01	
6.00	124.20	0.42	0.73	0.89	0.72	0.82	1.86	2.27	1.84	2.09	
7.00	144.90	0.40	1.17	1.19	1.16	1.18	3.00	3.03	2.96	3.02	
8.00	165.60	0.47	1.95	2.08	1.93	2.02	4.97	5.29	4.92	5.16	
9.00	186.30	1.08	3.69	3.64	3.54	3.53	9.42	9.29	9.03	8.99	
10.00	207.00	3.27	6.53	6.65	6.20	6.29	16.66	16.95	15.81	16.03	
11.00	227.71	7.00	13.33	13.45	12.81	12.74	33.99	34.29	32.67	32.48	
12.00	248.39	18.48	23.37	26.20	23.25	25.01	59.58	66.81	59.28	63.77	
13.00	269.10	11.80	31.68	33.44	30.38	31.63	80.79	85.28	77.47	80.67	
14.00	289.80	28.07	34.42	35.43	33.06	33.60	87.77	90.34	84.30	85.68	
15.00	310.50	44.22	35.71	37.60	34.49	35.46	91.06	95.88	87.95	90.42	
16.00	331.21	57.28	40.14	41.26	38.51	39.05	102.37	105.20	98.20	99.59	
17.00	351.89	56.92	43.06	44.14	42.47	42.76	109.79	112.55	108.31	109.05	

Tabla A.31 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura – $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$, $T = 32 \text{ }^\circ\text{C}$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.923	0.852
Filtradas S.S.Libre	0.918	0.843
No Filtradas C.S.Libre	0.925	0.855
No Filtradas S.S.Libre	0.920	0.846

Tabla A.32 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$, $T = 32 \text{ }^\circ\text{C}$

Pruebas con pendiente de 0.03

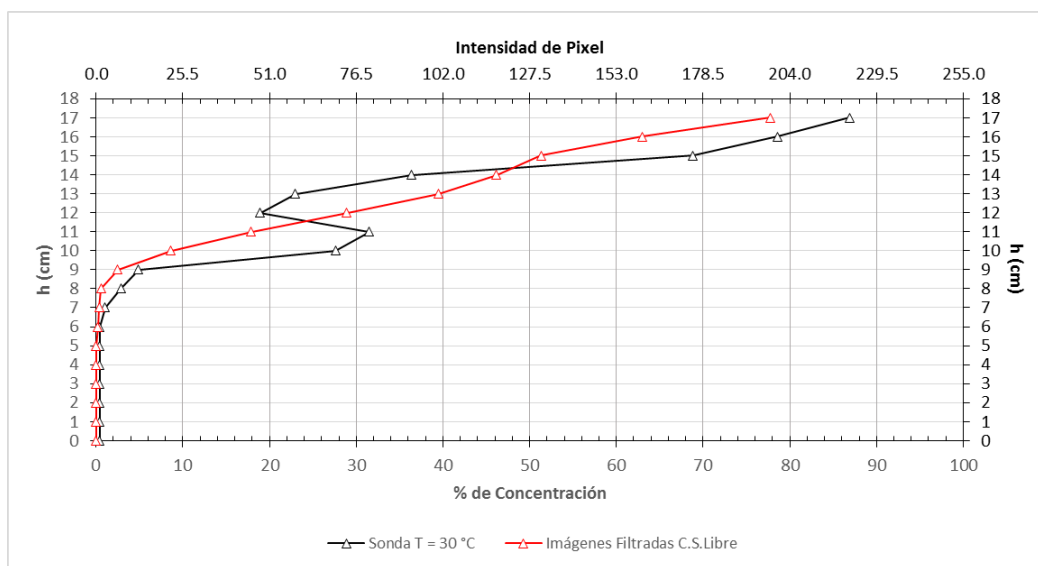


Fig. A.17 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$, $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL				
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	
0.00	0.00	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	21.20	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	42.40	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	63.60	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	84.80	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	106.00	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.00	127.20	0.42	0.19	0.19	0.09	0.09	0.50	0.50	0.22	0.22	0.22
7.00	148.40	1.02	0.35	0.35	0.35	0.35	0.90	0.90	0.88	0.88	0.88
8.00	169.60	2.85	0.58	0.58	0.55	0.54	1.47	1.47	1.40	1.37	1.37
9.00	190.80	4.89	2.52	1.34	2.83	1.20	6.44	3.42	7.23	3.06	3.06
10.00	212.00	27.59	8.62	12.44	9.09	12.15	21.98	31.73	23.19	30.97	30.97
11.00	233.20	31.48	17.88	25.74	19.19	25.66	45.60	65.63	48.92	65.43	65.43
12.00	254.40	18.94	28.89	36.98	30.89	37.37	73.67	94.30	78.76	95.28	95.28
13.00	275.60	22.99	39.44	46.51	41.49	46.95	100.58	118.59	105.79	119.72	119.72
14.00	296.81	36.33	46.19	52.34	47.84	52.53	117.78	133.46	122.00	133.94	133.94
15.00	317.99	68.86	51.34	56.03	53.40	56.77	130.92	142.88	136.18	144.77	144.77
16.00	339.20	78.58	62.95	68.35	64.45	69.02	160.52	174.29	164.34	176.02	176.02
17.00	360.41	86.90	77.73	81.03	80.02	82.60	198.22	206.63	204.05	210.63	210.63

Tabla A.33 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura – $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$, $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.946	0.896
Filtradas S.S.Libre	0.938	0.880
No Filtradas C.S.Libre	0.945	0.893
No Filtradas S.S.Libre	0.939	0.881

Tabla A.34 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$, $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

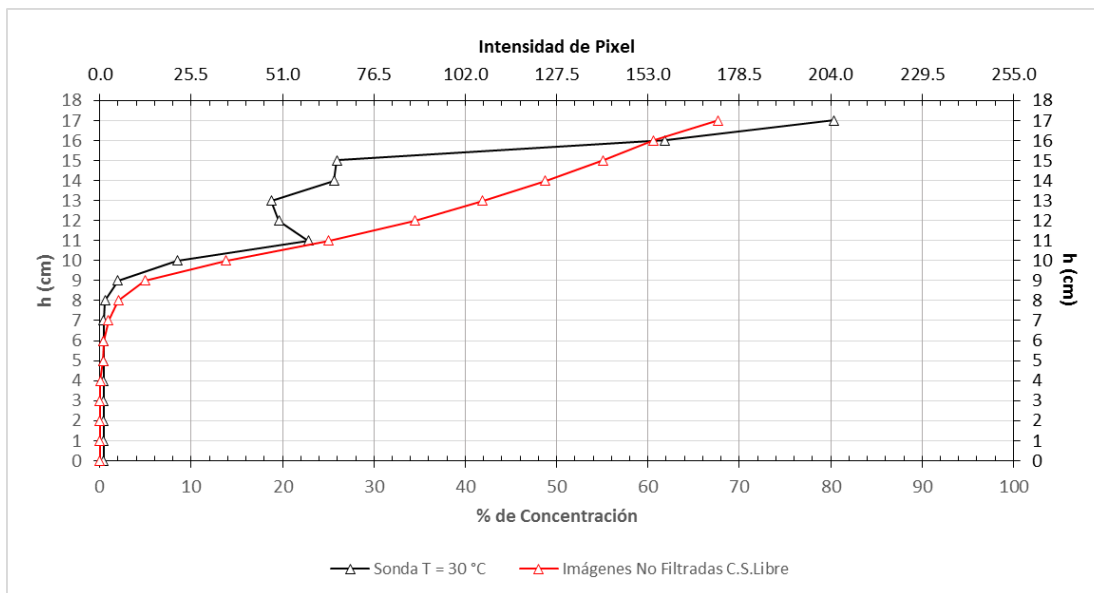


Fig. A.18 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$, $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL				
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	
0.00	0.00	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	21.30	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	42.60	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	63.90	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	85.20	0.41	0.04	0.04	0.04	0.04	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10
5.00	106.50	0.41	0.38	0.38	0.38	0.38	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97
6.00	127.80	0.40	0.51	0.50	0.43	0.41	1.30	1.28	1.10	1.05	1.05
7.00	149.10	0.41	0.82	0.59	0.92	0.59	2.08	1.50	2.34	1.51	1.51
8.00	170.40	0.56	1.89	0.99	2.04	0.96	4.83	2.52	5.20	2.46	2.46
9.00	191.70	1.98	4.49	2.69	4.92	2.55	11.46	6.87	12.55	6.49	6.49
10.00	213.00	8.49	12.74	13.84	13.85	13.50	32.48	35.30	35.31	34.42	34.42
11.00	234.30	22.83	24.06	25.04	25.07	24.70	61.34	63.86	63.92	62.99	62.99
12.00	255.60	19.62	33.34	34.27	34.48	34.18	85.01	87.40	87.92	87.17	87.17
13.00	276.91	18.78	40.62	41.87	41.92	41.98	103.59	106.77	106.90	107.05	107.05
14.00	298.21	25.63	47.35	48.56	48.78	48.93	120.76	123.81	124.39	124.77	124.77
15.00	319.51	25.96	53.73	54.84	55.13	55.15	137.02	139.84	140.59	140.63	140.63
16.00	340.81	61.87	59.48	59.97	60.65	60.29	151.67	152.94	154.65	153.75	153.75
17.00	362.11	80.31	64.66	65.72	67.67	67.91	164.88	167.57	172.57	173.16	173.16

Tabla A.35 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura – $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$, $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.901	0.811
Filtradas S.S.Libre	0.898	0.806
No Filtradas C.S.Libre	0.903	0.815
No Filtradas S.S.Libre	0.903	0.815

Tabla A.36 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$, $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

Pruebas con pendiente de 0.04

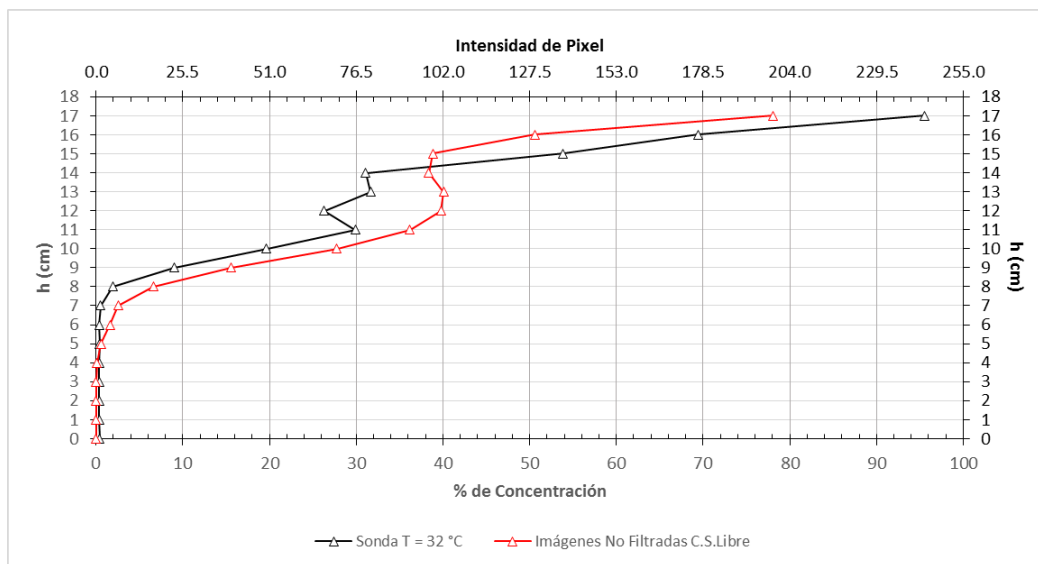


Fig. A.19 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$, $T = 32 \text{ }^\circ\text{C}$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL				
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	
0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	21.20	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	42.40	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	63.60	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	84.80	0.39	0.09	0.09	0.09	0.09	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
5.00	106.00	0.40	0.60	0.60	0.58	0.58	1.54	1.54	1.47	1.47	1.47
6.00	127.20	0.39	1.72	1.71	1.60	1.59	4.37	4.37	4.08	4.06	4.06
7.00	148.40	0.52	2.38	2.14	2.55	2.20	6.07	5.46	6.49	5.60	5.60
8.00	169.60	1.91	6.31	4.70	6.58	4.49	16.09	11.98	16.78	11.45	11.45
9.00	190.80	8.98	15.20	13.68	15.54	13.09	38.76	34.88	39.62	33.38	33.38
10.00	212.00	19.68	28.43	28.39	27.76	27.00	72.49	72.39	70.80	68.85	68.85
11.00	233.20	29.88	37.87	38.12	36.19	36.15	96.57	97.20	92.30	92.19	92.19
12.00	254.40	26.29	41.81	41.94	39.76	39.81	106.61	106.94	101.39	101.51	101.51
13.00	275.60	31.65	42.01	42.14	40.08	40.13	107.12	107.47	102.20	102.34	102.34
14.00	296.81	31.12	40.80	40.96	38.38	38.45	104.05	104.45	97.86	98.05	98.05
15.00	317.99	53.84	41.81	41.40	38.86	38.09	106.63	105.57	99.10	97.12	97.12
16.00	339.20	69.42	51.56	49.64	50.59	48.08	131.47	126.58	128.99	122.60	122.60
17.00	360.41	95.49	76.34	77.07	78.03	78.09	194.66	196.52	198.98	199.12	199.12

Tabla A.37 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura – $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$, $T = 32 \text{ }^\circ\text{C}$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.948	0.898
Filtradas S.S.Libre	0.945	0.894
No Filtradas C.S.Libre	0.954	0.910
No Filtradas S.S.Libre	0.951	0.904

Tabla A.38 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$, $T = 32 \text{ }^\circ\text{C}$

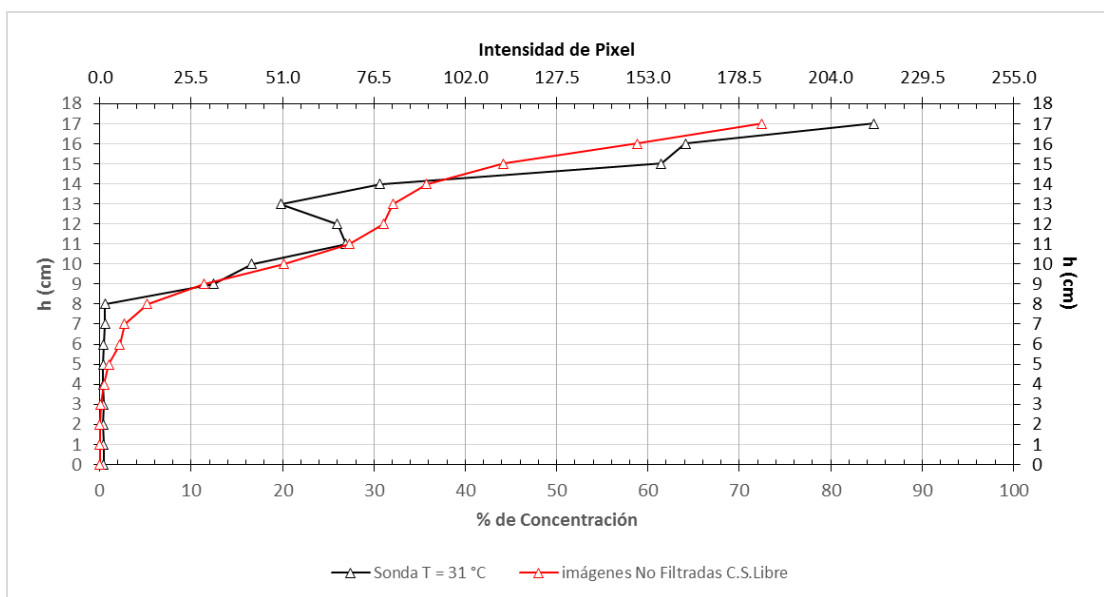


Fig. A.20 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$, $T = 31 \text{ }^\circ\text{C}$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL				
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	
0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	21.10	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	42.20	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	63.30	0.40	0.10	0.10	0.10	0.10	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
4.00	84.40	0.38	0.49	0.49	0.49	0.49	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
5.00	105.50	0.38	0.98	0.98	0.99	0.99	2.49	2.49	2.52	2.52	2.52
6.00	126.60	0.39	2.39	2.38	2.18	2.17	6.08	6.08	5.55	5.54	5.54
7.00	147.70	0.55	2.53	2.38	2.68	2.43	6.46	6.06	6.84	6.20	6.20
8.00	168.80	0.60	4.93	4.00	5.19	3.88	12.57	10.20	13.25	9.89	9.89
9.00	189.90	12.43	10.10	6.30	11.41	6.06	25.75	16.06	29.08	15.46	15.46
10.00	211.00	16.64	18.72	14.96	20.11	14.77	47.73	38.14	51.29	37.65	37.65
11.00	232.10	26.93	27.21	25.04	27.31	24.09	69.38	63.86	69.63	61.44	61.44
12.00	253.19	26.00	31.66	29.99	31.03	28.74	80.74	76.47	79.13	73.28	73.28
13.00	274.29	19.83	32.79	31.56	32.07	30.33	83.61	80.48	81.77	77.33	77.33
14.00	295.41	30.68	36.31	34.67	35.78	33.47	92.59	88.41	91.23	85.36	85.36
15.00	316.51	61.48	43.28	41.12	44.22	41.02	110.36	104.86	112.75	104.60	104.60
16.00	337.60	64.12	56.45	52.88	58.78	53.69	143.94	134.85	149.90	136.90	136.90
17.00	358.70	84.70	68.59	64.21	72.49	66.27	174.90	163.73	184.84	168.98	168.98

Tabla A.39 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura – $Q = 0.026$ m^3/s , $S = 0.04$, $T = 31$ °C

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.969	0.938
Filtradas S.S.Libre	0.966	0.933
No Filtradas C.S.Libre	0.975	0.950
No Filtradas S.S.Libre	0.972	0.945

Tabla A.40 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con incremento de temperatura - $Q = 0.026$ m^3/s , $S = 0.04$, $T = 31$ °C

A.3. Agua con surfactante (Jabón)

Pruebas con pendiente de 0.01

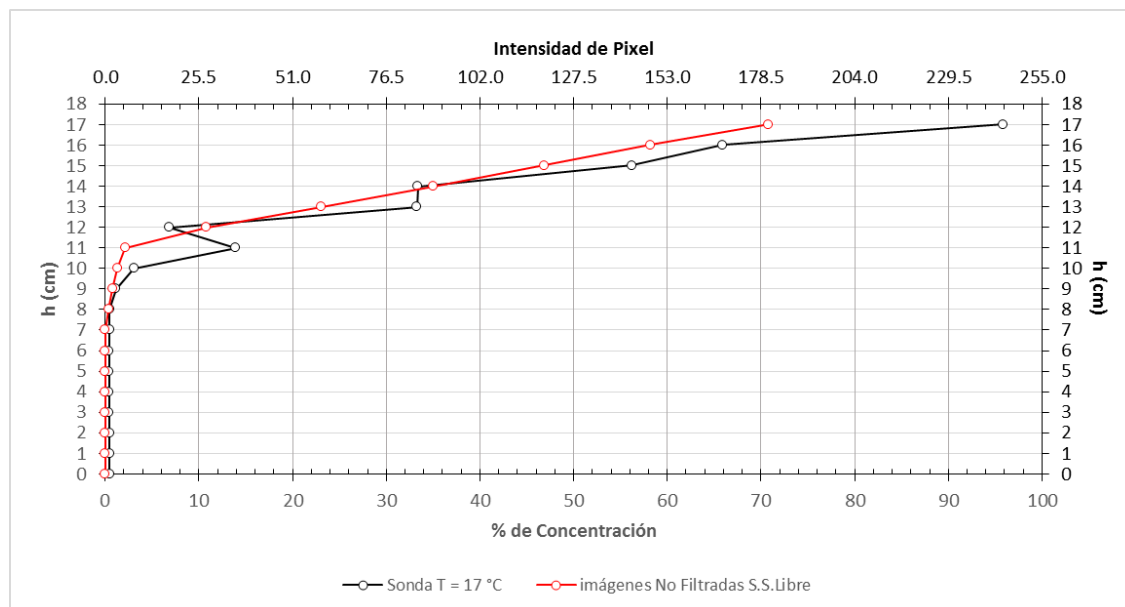


Fig. A.21 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$. $S = 0.01$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL			
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS	
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE
0.00	0.00	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	21.30	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	42.60	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	63.90	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	85.20	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	106.50	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.00	127.80	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7.00	149.10	0.45	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02
8.00	170.40	0.48	0.01	0.00	0.02	0.39	0.01	0.00	0.04	1.00
9.00	191.70	1.17	0.06	0.00	0.21	0.80	0.16	0.00	0.54	2.05
10.00	213.00	3.09	0.59	0.00	1.33	1.30	1.51	0.00	3.40	3.31
11.00	234.30	13.96	3.44	0.39	5.08	2.13	8.77	1.00	12.95	5.42
12.00	255.60	6.88	10.09	0.65	12.43	10.82	25.72	1.67	31.70	27.60
13.00	276.91	33.30	22.74	6.14	25.49	23.04	57.98	15.65	64.99	58.75
14.00	298.21	33.40	38.66	22.23	41.35	34.99	98.59	56.68	105.45	89.23
15.00	319.51	56.20	54.33	38.49	56.64	46.84	138.54	98.15	144.43	119.43
16.00	340.81	65.90	68.80	54.31	70.36	58.18	175.45	138.48	179.43	148.35
17.00	362.11	95.81	80.93	70.43	81.69	70.80	206.38	179.59	208.31	180.54

Tabla A.41 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) – $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.985	0.970
Filtradas S.S.Libre	0.972	0.946
No Filtradas C.S.Libre	0.984	0.969
No Filtradas S.S.Libre	0.985	0.971

Tabla A.42 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$

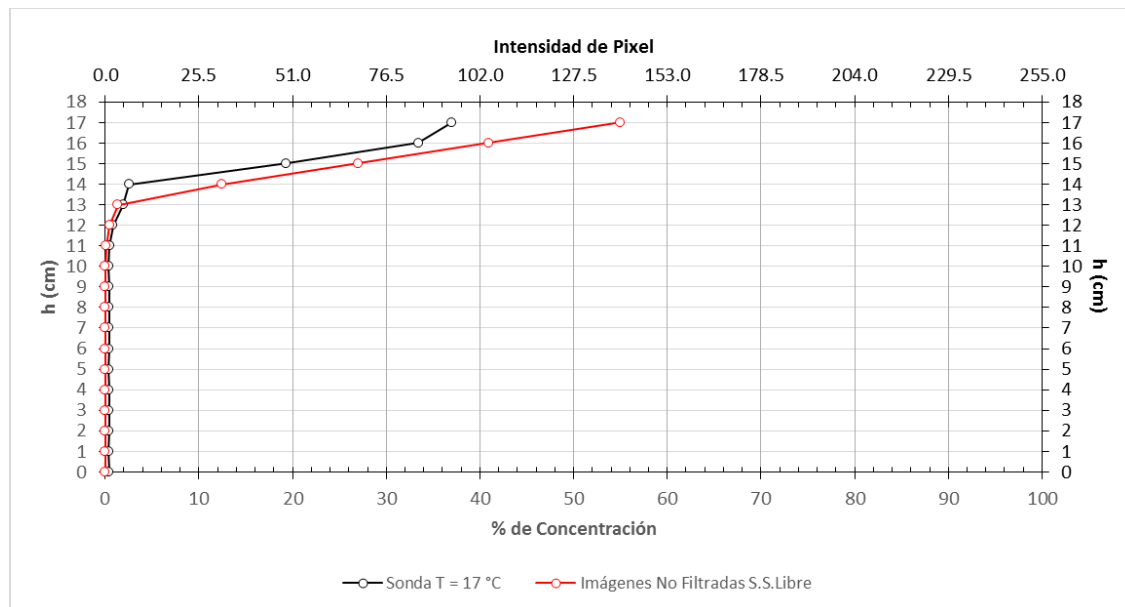


Fig. A.22 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL				
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	
0.00	0.00	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	21.25	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	42.50	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	63.75	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	85.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	106.25	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.00	127.50	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7.00	148.75	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
8.00	170.00	0.43	0.03	0.00	0.08	0.00	0.08	0.00	0.22	0.00	0.00
9.00	191.25	0.40	0.29	0.00	0.63	0.00	0.75	0.00	1.60	0.00	0.00
10.00	212.50	0.39	1.97	0.00	3.00	0.00	5.02	0.00	7.66	0.00	0.00
11.00	233.74	0.46	7.27	0.11	9.16	0.11	18.53	0.28	23.35	0.28	0.00
12.00	255.00	0.84	17.61	0.50	19.74	0.50	44.90	1.27	50.33	1.26	0.00
13.00	276.24	1.94	31.39	1.39	33.41	1.38	80.05	3.54	85.20	3.52	0.00
14.00	297.50	2.54	45.69	12.48	47.63	12.45	116.50	31.82	121.45	31.75	0.00
15.00	318.75	19.35	59.34	27.01	61.05	26.98	151.32	68.88	155.67	68.80	0.00
16.00	340.00	33.45	71.90	40.90	73.03	40.90	183.34	104.29	186.22	104.30	0.00
17.00	361.26	37.03	81.83	55.00	82.09	55.03	208.66	140.25	209.34	140.33	0.00

Tabla A.43 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.905	0.819
Filtradas S.S.Libre	0.986	0.971
No Filtradas C.S.Libre	0.896	0.803
No Filtradas S.S.Libre	0.986	0.972

Tabla A.44 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.01$

Pruebas con pendiente de 0.02

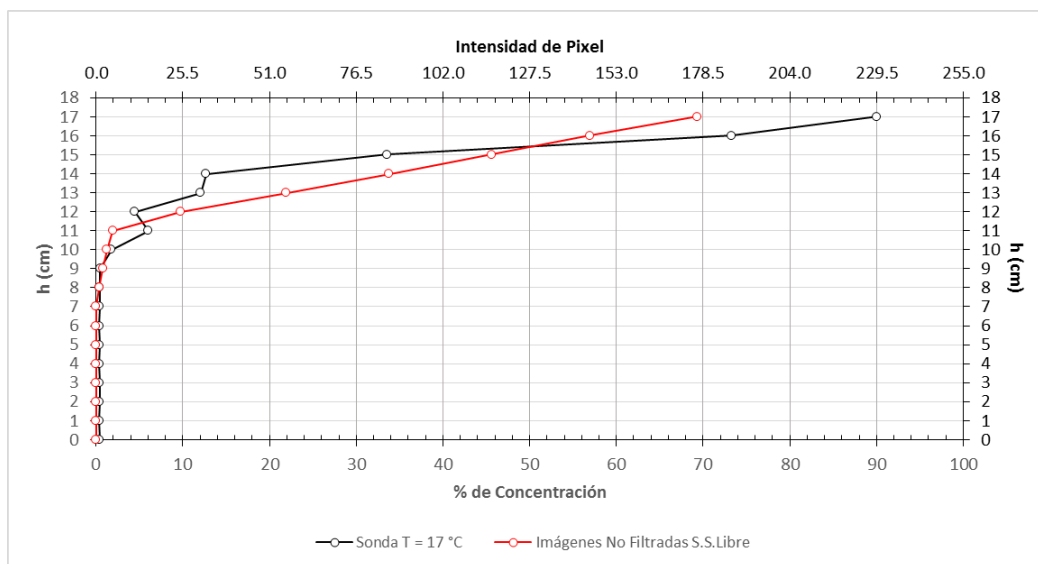


Fig. A.23 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL				
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	
0.00	0.00	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	21.15	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	42.30	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	63.45	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	84.60	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	105.75	0.41	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.04	0.00	0.00
6.00	126.90	0.38	0.04	0.00	0.10	0.00	0.10	0.00	0.26	0.00	0.00
7.00	148.05	0.39	0.21	0.01	0.47	0.01	0.54	0.02	1.19	0.02	0.02
8.00	169.20	0.40	1.21	0.39	2.05	0.39	3.07	1.00	5.22	1.00	1.00
9.00	190.35	0.48	3.69	0.77	5.45	0.77	9.42	1.97	13.90	1.97	1.97
10.00	211.50	1.75	9.27	1.27	11.74	1.25	23.64	3.23	29.93	3.18	3.18
11.00	232.65	6.01	18.41	1.88	21.15	1.91	46.95	4.80	53.94	4.86	4.86
12.00	253.80	4.46	30.21	9.77	32.99	9.75	77.03	24.92	84.11	24.85	24.85
13.00	274.95	12.05	41.68	21.89	44.49	21.96	106.29	55.83	113.43	55.99	55.99
14.00	296.10	12.67	52.69	33.52	55.69	33.79	134.35	85.47	142.00	86.16	86.16
15.00	317.26	33.55	64.02	45.19	66.65	45.60	163.26	115.24	169.95	116.28	116.28
16.00	338.40	73.33	73.57	56.30	75.55	56.91	187.61	143.56	192.66	145.13	145.13
17.00	359.54	90.03	82.14	68.86	83.13	69.30	209.46	175.59	211.98	176.72	176.72

Tabla A.45 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.878	0.771
Filtradas S.S.Libre	0.942	0.886
No Filtradas C.S.Libre	0.865	0.749
No Filtradas S.S.Libre	0.942	0.887

Tabla A.46 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.023 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$

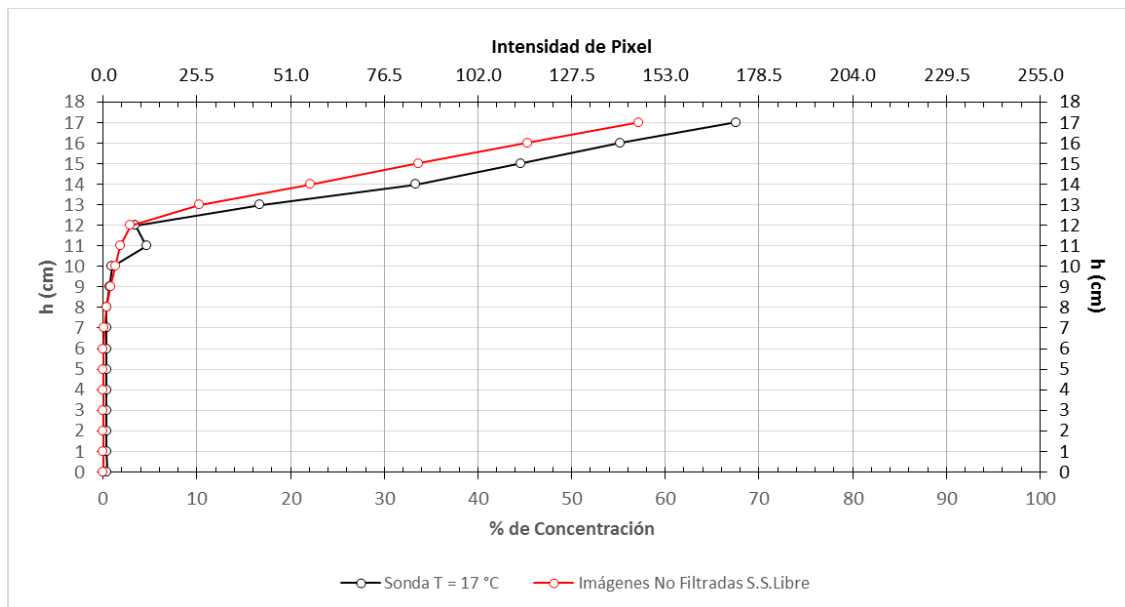


Fig. A.24 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL				
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	
0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	21.05	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	42.10	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	63.15	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	84.20	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	105.25	0.39	0.02	0.00	0.01	0.00	0.06	0.00	0.03	0.00	0.00
6.00	126.30	0.39	0.11	0.00	0.13	0.00	0.27	0.00	0.33	0.00	0.00
7.00	147.35	0.38	0.52	0.11	0.74	0.11	1.33	0.28	1.89	0.28	0.28
8.00	168.40	0.39	1.97	0.39	2.49	0.39	5.01	1.00	6.36	1.00	1.00
9.00	189.45	0.67	5.82	0.78	6.61	0.78	14.85	1.99	16.87	1.99	1.99
10.00	210.50	0.93	13.21	1.34	14.00	1.31	33.68	3.41	35.71	3.35	3.35
11.00	231.55	4.65	23.48	1.72	23.86	1.81	59.86	4.39	60.85	4.62	4.62
12.00	252.60	3.41	35.29	2.90	35.34	2.90	89.99	7.41	90.11	7.39	7.39
13.00	273.65	16.74	47.00	10.25	47.02	10.22	119.83	26.14	119.91	26.07	26.07
14.00	294.71	33.36	57.96	22.09	58.03	22.12	147.80	56.32	147.98	56.41	56.41
15.00	315.76	44.62	67.54	33.26	68.06	33.66	172.22	84.81	173.55	85.83	85.83
16.00	336.80	55.22	76.87	44.89	76.86	45.26	196.02	114.47	196.00	115.41	115.41
17.00	357.84	67.53	83.87	56.98	83.43	57.20	213.88	145.31	212.76	145.87	145.87

Tabla A.47 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.944	0.892
Filtradas S.S.Libre	0.996	0.991
No Filtradas C.S.Libre	0.943	0.889
No Filtradas S.S.Libre	0.996	0.991

Tabla A.48 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.02$

Pruebas con pendiente de 0.03

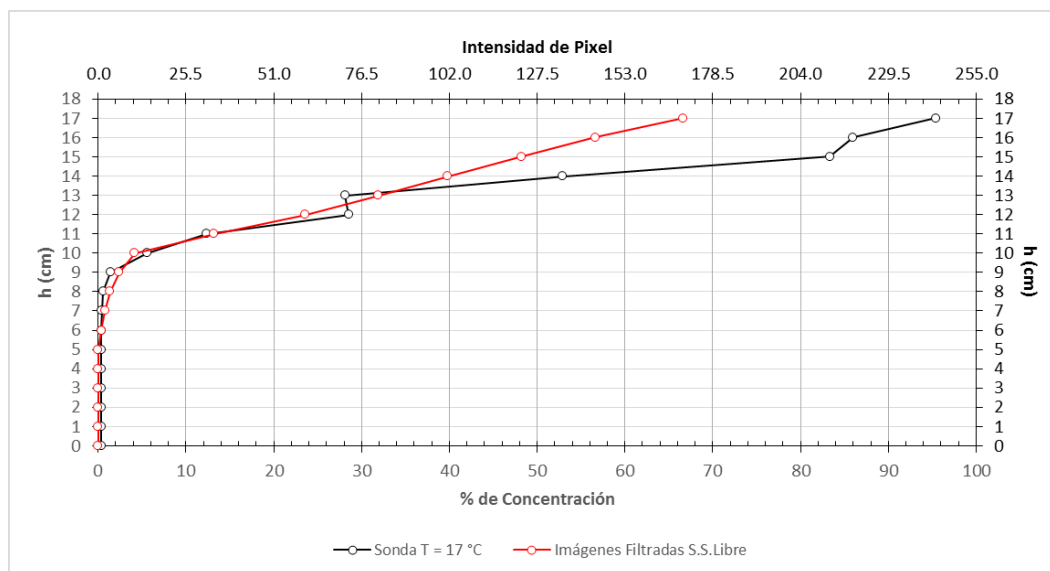


Fig. A.25 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL			
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS	
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE
0.00	0.00	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	20.75	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	41.50	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	62.25	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	83.00	0.38	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00
5.00	103.75	0.39	0.02	0.00	0.08	0.00	0.05	0.00	0.20	0.00
6.00	124.50	0.39	0.51	0.39	0.75	0.39	1.31	1.00	1.91	1.00
7.00	145.25	0.43	1.48	0.76	2.24	0.76	3.78	1.94	5.71	1.94
8.00	166.00	0.59	4.73	1.33	6.47	1.33	12.07	3.39	16.49	3.40
9.00	186.75	1.43	12.43	2.42	15.07	2.42	31.69	6.17	38.43	6.17
10.00	207.50	5.56	22.61	4.16	25.24	4.15	57.66	10.60	64.37	10.59
11.00	228.24	12.34	32.77	13.20	35.24	13.11	83.57	33.67	89.85	33.42
12.00	249.01	28.56	42.06	23.60	44.54	23.60	107.25	60.18	113.57	60.17
13.00	269.76	28.12	49.19	31.94	51.91	32.24	125.45	81.45	132.37	82.20
14.00	290.50	52.95	57.36	39.83	60.13	40.20	146.27	101.56	153.32	102.51
15.00	311.25	83.33	66.40	48.27	69.01	48.56	169.32	123.08	175.97	123.83
16.00	332.00	86.00	75.13	56.64	77.39	57.02	191.59	144.44	197.34	145.40
17.00	352.74	95.39	83.37	66.68	84.47	66.82	212.58	170.03	215.40	170.40

Tabla A.49 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.952	0.906
Filtradas S.S.Libre	0.984	0.969
No Filtradas C.S.Libre	0.945	0.893
No Filtradas S.S.Libre	0.984	0.968

Tabla A.50 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$

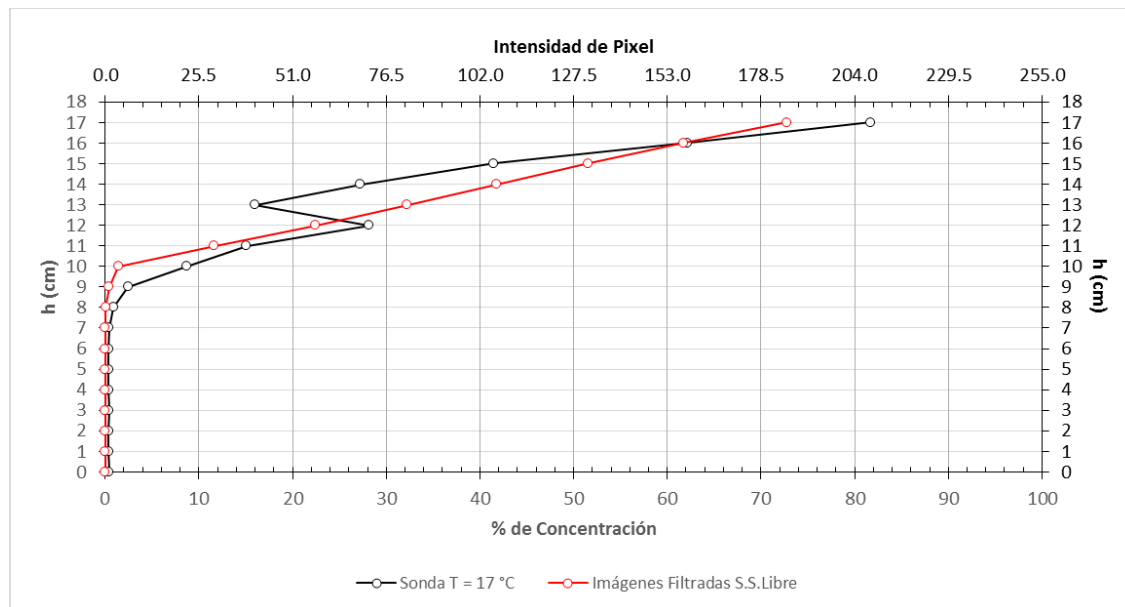


Fig. A.26 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL				
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	
0.00	0.00	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	21.10	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	42.20	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	63.30	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	84.40	0.38	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00
5.00	105.50	0.39	0.01	0.00	0.20	0.00	0.02	0.00	0.52	0.00	0.00
6.00	126.60	0.39	0.20	0.00	1.04	0.00	0.50	0.00	2.66	0.00	0.00
7.00	147.70	0.40	1.15	0.00	3.57	0.00	2.93	0.00	9.11	0.00	0.00
8.00	168.80	0.90	4.30	0.03	9.28	0.03	10.97	0.09	23.66	0.09	0.09
9.00	189.90	2.47	11.61	0.40	18.31	0.40	29.60	1.03	46.69	1.03	1.03
10.00	211.00	8.67	21.83	1.43	28.78	1.39	55.66	3.64	73.39	3.54	3.54
11.00	232.10	15.08	32.32	11.66	39.13	11.65	82.42	29.72	99.78	29.70	29.70
12.00	253.19	28.19	42.36	22.45	49.01	22.47	108.01	57.23	124.96	57.29	57.29
13.00	274.29	16.01	51.19	32.25	58.15	32.60	130.53	82.23	148.29	83.13	83.13
14.00	295.41	27.26	60.60	41.75	67.30	42.20	154.54	106.45	171.62	107.61	107.61
15.00	316.51	41.51	70.53	51.59	76.13	51.90	179.85	131.57	194.14	132.35	132.35
16.00	337.60	62.16	79.56	61.75	83.23	61.99	202.87	157.45	212.24	158.09	158.09
17.00	358.70	81.67	86.56	72.74	87.80	72.86	220.72	185.49	223.90	185.78	185.78

Tabla A.51 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.935	0.874
Filtradas S.S.Libre	0.963	0.927
No Filtradas C.S.Libre	0.911	0.830
No Filtradas S.S.Libre	0.962	0.925

Tabla A.52 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.03$

Pruebas con pendiente de 0.04

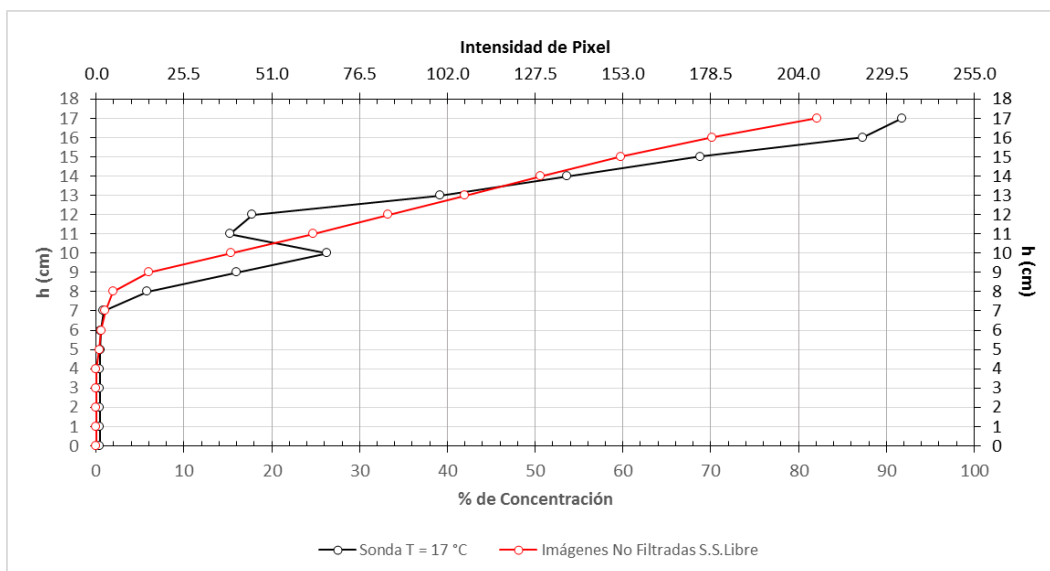


Fig. A.27 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL			
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS	
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE
0.00	0.00	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	20.85	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	41.70	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	62.55	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
4.00	83.40	0.44	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.19	0.00
5.00	104.25	0.46	0.45	0.39	0.97	0.35	1.15	1.00	2.46	0.90
6.00	125.10	0.52	1.13	0.56	3.13	0.55	2.87	1.42	7.98	1.41
7.00	145.95	0.82	4.11	1.09	8.64	1.06	10.49	2.77	22.04	2.70
8.00	166.80	5.81	11.56	1.95	17.60	1.94	29.48	4.98	44.88	4.95
9.00	187.65	16.00	21.20	5.98	27.25	5.99	54.06	15.25	69.49	15.27
10.00	208.50	26.31	30.48	15.32	36.43	15.36	77.71	39.06	92.90	39.16
11.00	229.35	15.24	39.50	24.76	45.33	24.69	100.73	63.14	115.60	62.96
12.00	250.21	17.77	48.17	33.22	54.04	33.25	122.83	84.71	137.81	84.80
13.00	271.04	39.14	56.71	41.98	62.60	42.02	144.60	107.04	159.63	107.14
14.00	291.90	53.62	65.47	50.49	71.23	50.56	166.93	128.75	181.63	128.94
15.00	312.75	68.80	74.74	59.66	79.73	59.77	190.60	152.14	203.31	152.41
16.00	333.60	87.34	84.50	70.11	87.42	70.20	215.48	178.77	222.93	179.01
17.00	354.44	91.81	91.90	82.22	92.40	82.16	234.36	209.66	235.62	209.50

Tabla A.53 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.959	0.919
Filtradas S.S.Libre	0.974	0.948
No Filtradas C.S.Libre	0.943	0.890
No Filtradas S.S.Libre	0.974	0.949

Tabla A.54 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$

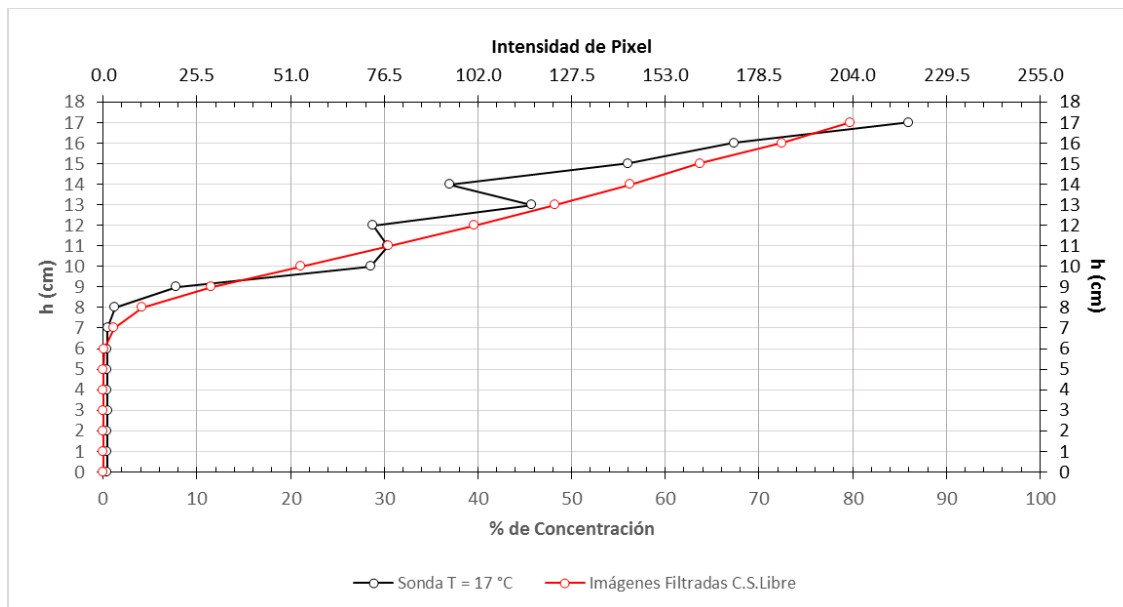


Fig. A.28 Perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$

ALTURA (cm)	ALTURA (Píxeles)	Sonda	% DE CONCENTRACION				INTENSIDAD DE PIXEL				
			IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		IMÁGENES FILTRADAS		IMÁGENES NO FILTRADAS		
			C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	C.S.LIBRE	S.S.LIBRE	
0.00	0.00	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	21.10	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	42.20	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	63.30	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	84.40	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.00	105.50	0.43	0.01	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00	0.11	0.00	0.00
6.00	126.60	0.43	0.13	0.00	0.45	0.00	0.33	0.00	1.16	0.00	0.00
7.00	147.70	0.49	1.16	0.27	2.54	0.27	2.95	0.69	6.49	0.69	0.69
8.00	168.80	1.26	4.16	0.40	7.93	0.40	10.61	1.01	20.21	1.01	1.01
9.00	189.90	7.82	11.55	1.37	16.78	1.36	29.47	3.49	42.79	3.47	3.47
10.00	211.00	28.53	21.09	10.20	26.31	10.20	53.78	26.02	67.10	26.00	26.00
11.00	232.10	30.38	30.47	19.79	35.59	19.78	77.70	50.45	90.76	50.43	50.43
12.00	253.19	28.83	39.63	29.30	44.60	29.32	101.06	74.73	113.74	74.76	74.76
13.00	274.29	45.74	48.22	38.24	53.18	38.35	122.95	97.51	135.61	97.78	97.78
14.00	295.41	36.96	56.25	46.50	61.37	46.86	143.44	118.58	156.50	119.49	119.49
15.00	316.51	56.03	63.70	54.13	69.11	54.92	162.42	138.04	176.23	140.05	140.05
16.00	337.60	67.33	72.48	62.89	77.17	63.42	184.82	160.36	196.79	161.72	161.72
17.00	358.70	86.01	79.77	71.46	83.35	72.35	203.42	182.22	212.54	184.50	184.50

Tabla A.55 Valores para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – OBRAS HIDRÁULICAS

IMÁGENES	COEFICIENTE CORRELACION	COEFICIENTE DETERMINACION
Filtradas C.S.Libre	0.978	0.956
Filtradas S.S.Libre	0.974	0.948
No Filtradas C.S.Libre	0.974	0.948
No Filtradas S.S.Libre	0.974	0.948

Tabla A.56 Coeficientes de correlación y determinación para los perfiles de concentración de aire en agua limpia con surfactante (Jabón) - $Q = 0.026 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.04$

BIBLIOGRAFIA

Ahmed, A.A., Ervine, D.A., and McKeogh, E.J. (1984). *“The process of aeration in closed conduit hydraulic structures”*. In Proceedings of a Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures. Edited by H. Kobus. Technische Akademie Esslingen, Germany, Vol. 4(13), pp. 1–11.

American Society of Civil Engineers (1982), *“Gravity sanitary sewer design and construction”*, ASCE MOP 60 y WPCF MOP FD-5.

American Society of Civil Engineers (1989), *“Sulfide in wastewater collection and treatment systems”*, ASCE MOP 69.

Bezdek, J.C., Keller, J., Krisnapuram, R., Pal, N (1999). *“Fuzzy Models and Algorithms for Pattern Recognition and Image Processing”*. Springer US. XVI, 776.

Brown, R. J. (1968), *“Water column separation at two pumping plants”*, Journal of Basic Engineering, ASME, 90 (4), 521-531.

Burrows, R., y Qiu, D. Q. (1995), *“Effect of air pockets on pipeline surge pressure”*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Journal of Water, Maritime and Energy, 112, dic, informe 10859, 349-361.

Çengel, A. Y. y Cimbala, M. J. (2006), *“Mecánica de fluidos – fundamentos y aplicaciones”*, McGraw – Hill Interamericana, México.

Chanson, H., and G.L. Qiao, (1994). *“Air bubble entrainment and gas transfer at hydraulic jumps”*. In Research Report No. CE149: Department of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia.

Chanson, H. (2002), *“Air-Water Flow Measurements with Intrusive, Phase-Detection Probes: Can We Improve Their Interpretation?”* J. Hydraulic Eng., ASCE, 128 (2002), pp. 252-255.

Cohen de Lara, G. (1955), *“Degazage naturel dans les puits inclinés reliant les adductions secondaires aux galeries en charge”*. In Proceedings of the 6th International Association for Hydraulic Research Congress, La Haye, Vol. 3(C19), pp. 1–20.

Collier, J.G., 1981. Convective boiling and condensation, 2nd Edition, McGraw Hill.

CONAGUA (2007), *“MAPAS – Diseño de instalaciones mecánicas”*, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 461p.

CONAGUA (2007), *“MAPAS – Operación de equipo electromecánico en plantas de bombeo para agua potable y residual”*, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 78p.

Corcos, G. (2003), *“Air in water pipes: A manual for designers of spring - supplied gravity – driven 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.

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

Ervin, R.A., McKeogh, E., Elsayy, E.M., (1980). *“Effect of turbulence intensity on the rate of air entrainment by plunging water jets”*. Proc Instn Civ Engrs, 69, 2, pp. 425-445.

Ervine, D. A., (1998), *“Air entrainment in hydraulic structures: a review,”* Proceedings of Institute of Civil Engineers, Water, Maritime & Energy, UK, 130, pp. 142–153.

Environmental Protection Agency (1985), *“Design manual, odor and corrosión control in sanitary sewerage systems and treatment plants”*, Estados Unidos.

Environmental Protection Agency (1993), *“Detection, control, and correction of hydrogen sulfide corrosión in existing wastewater systems”*, Estados Unidos.

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.

Escarameia, M. (2007). *“Investigating hydraulic removal of air from water pipelines”*. The institution of Civil Engineers Water Management I60, issue WMI, pg. 25-34.

Falvey, H.T., (1980), *“Air–water flow in hydraulic structures”*, Engineering Monograph 41, Bureau of Reclamation, Denver, CO.

Fasso, C. (1955), *“Experimental research on air entrainment in gated outlet works”*, In Proceedings of the 6th International Association for Hydraulic Research Congress, La Haye, Vol. X (C26), pp. 1– 18.

Forster, G. (1997), "*Druckstosdampfung durch grose Luftblasen in Hochpunkten von Rohrleitungen*", *Mitteilungen des Institutes fur Wasserbau der Universitat Stuttgart*, fasciculo 94.

Fuertes, V. S. (2001), "*Transitorios hidráulicos con aire atrapado*", tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, España.

Gardea Villegas H. (1992), "*Aprovechamientos hidroeléctricos y de bombeo*", Editorial Trillas, México, 290p.

Goldring, B.T., Mawer, W.T., Thomas, N.H., (1980). "*Level surges in the circulating water downshaft of large generating stations*". Third International Pressure Surges Conference, BHRA, Canterbury, England.

Haindl, K. (1957), "*Hydraulic jump in closed conduits*". In Proceedings of the 7th International Association for Hydraulic Research Congress, Lisboa, Vol. 2(D32), pp. 1–12.

Hashimoto, K., Imaeda, M., and Osayama, A. (1988), "*Transients of fluid lines containing and air pocket or liquid column*", *Journal of Fluid Control*, 18(4), 38-54.

Hewitt, G.F., y Hall – Taylor, N.S. (1970), "*Annular Two – Phase Flow*", First Edition, Pergamon Press, Great Britain.

Hinze, J. O. (1955). "*Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes.*" *AIChE J.*, 1(3), 289–295.

Jönsson, L. (1985), "*Maximum transient pressures in a conduit with check valve and air entrainment*", *Proceeding of the International Conference on the Hydraulics of Pumping Stations*, British Hydromechanics Research Association, Manchester, 55-76.

Kalinske, A.A., and J.M. Robertson (1943). "*Entrainment of Air in Flowing Water – A Symposium*". *Trans. ASCE*, 108:1393.

Kenn, M.J., Zanker, K.J., (1967). "*Aspects of similarity for air-entraining water flows*", *Nature*, 213, 5071, pp. 59-60.

Lane, E. W., and Kindsvater, C. E. (1938). "*Hydraulic jump in enclosed conduits*" *Engrg. News-Record*, 815-817.

Larsen, T., and Burrows, R. (1992), *“Measurements and computations of transients in pumped sewer plastic mains”*, Proceedings of the BHR Group / IAHR International Conference on Pipeline Systems, Manchester, 117-123.

Laughlin, J. E. (1964), *“Studies in force main aeration”*, J San Eng Div, ASCE, 90(SA6), 13.

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

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.

Matsushita, F. (1989). *“On the hydraulic jump in a downward sloping closed conduit”*. Transactions of the Japanese Society of Irrigation Drainage and Reclamation Engineering, 144: 33–42.

Mataix Claudio (1986), *“Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas”*, 2ª Ed., Ediciones del Castillo, 651p.

Mellor, G.L. and H.J. Herring (1973). *“A survey of the mean turbulent field closure models”*. AIAA J. 11, 590-9.

Mortensen, D. J. (2009), *“Factors affecting air entrainment of hydraulic jumps within closed conduits”*, master thesis, Utah State University, Logan Utah, 65p.

Mossa Michele and Umberto Tolve (1998). *“Flow Visualization in Bubbly Two-Phase Hydraulic Jump”*. The American Society of Mechanical Engineers

Munson, R. B., Young, F. D. y Okiishi, H. T. (1999), *“Fundamentos de mecánica de fluidos”*, Editorial Limusa, México.

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

Ochoa, L. H. (2005), *“Modelación de aire atrapado en flujo de agua en conductos”*, tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.

Parkhurst, J. D., y Pomeroy, R. D. (1973), *“The use of air injection to control sulfide buildup in filled pipes”*, reporte a Los Ángeles County Sanitary District, California, EUA.

Pomeroy, R. D. (1974), *“Process design manual for sulfide control in sanitary sewerage systems”*, EPA 625/1-74-005, US EPA, Cincinnati.

Pomeroy, R. D., Parkhurst, J. D., Livingston, J., y Bailey, H. H. (1985), *“Sulfide occurrence and control in sewerage collection systems”*, reporte técnico, EPA 600/X-85-052, US, EPA, Cincinnati, OH.

Pothof, M. W. I, Schuit, D. A. y Clemens, R. L. H. F. (2013), *“Influence of surface tensión on air – water flows”*, Journal of hydraulic engineering, American Society of Civil Engineers.

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.

Qiu, D. Q. (1995), *“Transient analysis and the effect of air pockets in a pipeline”*, tesis de maestría, Universidad de Liverpool, Reino Unido.

Qiu, D. Q., y Burrows, R. (1996), *“Prediction of pressure transients with entrapped air in a pipeline”*, Proceedings of the 7th International Conference on Pressure Surge and Fluid Transients in Pipelines and Open Channels, BHRA, Harrogate, Reino Unido, 251-263.

Rabben, S.L., Els, H., Rouve, G. (1983). *“Investigation on flow aeration at offsets downstream of high-head control structures Proc”*. 20th IAHR Congress, Moscow, USSR, Vol. 3 (1983), pp. 354-360.

Rajaratnam, N. (1962) *“An experimental study of the air entrainment characteristics of hydraulic jump”*. J. Inst. Engineering India, 42, 247-273.

Rajaratnam, N. (1965), *“Hydraulic jump in horizontal conduits”*. Water Power and Dam Construction, 17(2): 80–83.

Resch, F. J., and H. J. Leutheusser (1972), *“Le ressaut hydraulique: Mesure de turbulence dans la région diphasique”*, Houille Blanche, 4, 279–293.

Richards, R. T. (1962), *“Air binding in water pipelines”*, AWWA, June, 719-730.

Shames, H. I. (1995), *“Mecánica de Fluidos”*, tercera edición, McGraw – Hill Interamericana, Santafé de Bogotá, Colombia.

Smith, C.D., and Chen, W. (1989). *“The hydraulic jump in a steeply sloping square conduit”*. Journal of Hydraulic Research, 27(3): 385–399.

Stahl, H., and W. H. Hager. (1999). *“Hydraulic jump in circular pipes.”* Can. J. Civ. Eng. 26 (3): 368–373.

Tchobanoglous George (1995), *“Ingeniería de aguas residuales – Redes de alcantarillado y Bombeo”*, McGraw – Hill/Interamericana de España, 457p.

Thomas, N.H., (1982). *“Air demand distortion in hydraulic models: experimental evidence of bi-modal structure in air entraining flows and scaling analysis of detrainment with special application to siphon priming”*, International Conference on the Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures, BHRA, Coventry, England.

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

U.S. Corps of Engineers, *“Air demand – regulated outlet works”*, Hydraulic Design Criteria, Chart 050-1.

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

Wisner, P.E., (1965). *“Role of the Froude number in the study of air entrainment”*, Proc. 11th Cong. IAHR, Leningrad, Paper 1.15.

Wisner, P.E., Mohsen, F.N. and Kouwen, N. (1975), *“Removal of air from water lines by hydraulic means”*, JI Hydraulic Div., ASCE, 101(HY2), 243-257.