

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**“INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE LA MADERA EN LA
ACUMULACIÓN DE MATERIAL LEÑOSO AGUAS ARRIBA
DE UNA REJILLA DE RETENCIÓN”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

ELABORADO POR

MAGGIE REBECA MALLQUI ASTOCAZA

ASESOR

MSc. JUAN WALTER CABRERA CABRERA

Lima- Perú

2023

© 2023, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados
**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la Tesis en su totalidad o en parte,
con fines estrictamente académicos.”**

Mallqui Astocaza, Maggie Rebeca

mmallquia@uni.pe

964850191

DEDICATORIA

Para Leonardo, hermano, gracias por todas tus enseñanzas.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial a mi asesor Msc. Juan Walter Cabrera Cabrera por sus consejos, paciencia y disponibilidad constante durante la realización de la presente investigación.

Agradecer al Laboratorio Nacional de Hidráulica, al Dr. Julio Kuroiwa Zevallos y al Dr. Miguel Zubiaur Alejos por recibirme y permitirme un espacio para realizar mi investigación en el área didáctica, así como a todo el personal administrativo que me facilitó la implementación de mi modelo, a mi alma mater la Universidad Nacional de Ingeniería donde siempre se ha brindado alimentación al estudiante y un espacio tranquilo para estudiar. A la Facultad de Ingeniería Civil por el conocimiento transmitido durante mis años de estudio y a los docentes de gran calidad quienes frecuentemente están alentando a la investigación.

A la Dra. Isabella Schalko y al Dr. Arnd Hartlieb por tomarse su tiempo en absolver mis consultas relacionadas a mi tema de investigación.

A mis familiares en general por los ánimos persistentes para continuar con este proyecto. A mis padres por su apoyo incondicional y ánimo durante todas las etapas de mi investigación y a mis hermanos por darme un motivo para salir adelante. A mis amigos más cercanos que más de una vez me han apoyado de manera desinteresada en largas jornadas en el laboratorio.

A todos muchísimas gracias.

ÍNDICE

RESUMEN	7
ABSTRACT	9
PRÓLOGO	10
LISTA DE TABLAS	12
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS	16
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	18
1.1 GENERALIDADES.....	18
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	18
1.3 OBJETIVOS.....	20
1.3.1 Objetivo General.....	20
1.3.2 Objetivos Específicos.....	20
1.4 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	20
1.4.1 Estudios de Schmocker & Hager (2013).....	21
1.4.2 Estudios de Hartlieb (2017).....	21
1.4.3 Estudios de Isabella Schalko et al. (2018).....	21
1.4.4 Estudios de Isabella Schalko et al. (2019).....	21
1.4.5 Estudios de Isabella Schalko et al. (2021).....	22
1.4.6 Estudios de Al-Zawaidah et al. (2021).....	22
1.4.7 Comentarios sobre las investigaciones realizadas.....	22
CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO	24
2.1 NOCIONES PREVIAS.....	24
2.2 PROCESOS DE TRONCOS EN RÍOS.....	24

2.2.1	Incorporación de madera en ríos	24
2.2.2	Transporte de madera en ríos	25
2.2.3	Acumulación de restos leñosos	27
2.3	CASOS DE ACUMULACIONES DE MATERIAL LEÑOSO	28
2.3.1	Puertos fluviales	28
2.3.2	Centrales Hidroeléctricas.....	29
2.3.3	Puentes	30
2.4	CARACTERÍSTICAS DE LA ACUMULACIÓN DE TRONCOS.....	31
2.4.1	Densidad de troncos.....	31
2.4.2	Dimensión de troncos.....	33
2.4.3	Volumen de una acumulación de troncos	34
2.4.4	Compacidad de una acumulación de madera.....	35
2.5	AUMENTO DE REMANSO DEBIDO A LA ACUMULACIÓN DE MADERA 36	
2.6	EFFECTOS DE ESCALA	42
2.7	TEORÍA DE ERRORES	43
2.7.1	Desviación estándar	44
	CAPÍTULO III: METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO	45
3.1	DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO UTILIZADO.....	45
3.2	ACUMULACIÓN DE MADERA ARTIFICIAL.....	47
3.2.1	Fabricación de piezas 3D	49
3.3	PROGRAMA DE ENSAYOS Y PROCEDIMIENTOS.....	52
	CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS	57
4.1.	EFFECTOS DE LA CONFIGURACIÓN DEL MODELO FÍSICO	57
4.1.1.	Efectos de la rejilla de retención sobre el porcentaje de retención.....	57
4.1.2.	Efectos de la rejilla de retención sobre el flujo	60

4.1.3. Efectos de la velocidad de lanzado de palitos.....	62
4.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE REPRODUCIBILIDAD	62
4.3. INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE LA MADERA EN LA FORMA DE ACUMULACIÓN DE MADERA	66
4.3.1. Análisis en la compacidad de la acumulación mediante el criterio de Hartlieb	69
4.3.2. Análisis de la compacidad de la acumulación mediante el criterio de Schalko	74
4.4. INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE LA MADERA EN LA ALTURA RELATIVA DE REMANSO	78
4.5. INFLUENCIA DE LA FORMA DE LA ACUMULACIÓN SOBRE LA ALTURA RELATIVA DE REMANSO.....	86
CONCLUSIONES	89
RECOMENDACIONES	91
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
ANEXOS	97
ANEXO A: TABLAS	98
ANEXO B: PANEL FOTOGRÁFICO	104
ANEXO C: PLANO DE CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL	162

RESUMEN

La presente tesis evalúa la influencia de la densidad de la madera que conforma una acumulación sobre el aumento de remanso aguas arriba de una rejilla de retención, tomando como base recientes investigaciones acerca de la evaluación de la peligrosidad de los efectos hidráulicos y geomorfológicos de la acumulación de madera en estructuras hidráulicas.

El transporte de madera en ríos tiene su origen en los siguientes procesos: deslizamientos, erosión de bancos y grandes inundaciones mediante el transporte semi-congestionado o congestionado de madera, este último, con mayor relevancia en el análisis de peligrosidad. En el territorio peruano se evidencian casos de transporte y acumulaciones de palizada en ríos de la Selva, especialmente en puertos fluviales e infraestructura hidráulica de centrales hidroeléctricas.

La flotabilidad de los troncos de madera está determinada por su densidad, especie y estado de descomposición e influyen en la forma de la acumulación, la cual puede afectar su compacidad y el flujo que atraviesa la acumulación.

Recientes investigaciones han encontrado la influencia de dos tipos de parámetros en el aumento de remanso debido a la acumulación de material leñoso: parámetros asociados a las condiciones de flujo como el número de Froude y tirante inicial, además parámetros asociados a las características de la acumulación como el volumen, densidad del material flotante, contenido de material fino, entre otros.

El propósito del presente trabajo fue investigar la influencia de la densidad del material flotante de una acumulación aguas arriba de una rejilla de retención, para ello se realizaron una serie de experimentos en el canal del área didáctica del Laboratorio Nacional de Hidráulica mediante un modelo físico de una acumulación natural de material leñoso conformado por un canal de pendiente variable, una rejilla de retención y palitos artificiales fabricados en impresoras 3D. Se analizaron

un total de 20 escenarios, incluyendo 4 densidades y 5 números de Froude diferentes.

La principal contribución de esta investigación fue demostrar el incremento del efecto de remanso con el incremento de la densidad del material flotante, además se propone una ecuación que depende de la densidad de la madera para estimar el incremento de remanso debido a la acumulación de madera. Otros importantes hallazgos mostraron que la compacidad de la acumulación de material flotante se incrementa con el aumento de la densidad de la madera.

Finalmente se plantean algunas recomendaciones que pueden ayudar a mejorar futuros experimentos de canal y posibles temas de investigación que contribuirán al estudio del transporte de madera en ríos.

ABSTRACT

This thesis evaluates the influence of wood density on backwater rise due to wood accumulation, taking as reference previous studies about wood transport and hazards evaluations in hydraulic structures due to wood accumulations.

Wood transport originates from the following processes: landslides, riverbank erosion and large floods with congested or semi-congested wood transport. Congested transportation has greater relevance in hazard analysis. In Peru, evidence of wood accumulations is found in river ports and hydroelectric dams.

The buoyancy of the log is determined by its density, species and state of decomposition and influences the shape of the accumulation, which can alter the compactness of the cumulus and the water that passes through it.

Recent investigations have found two types of parameters in the influence of the backwater rise due wood accumulation: parameters associated with flow conditions and parameters associated with the characteristics of wood accumulations.

The purpose of this research was to analyze the influence of wood density in an accumulation upstream of a retention grid, to achieve this, a series of flume experiments were carried out at the National Hydraulic Laboratory through a natural wood accumulation model composed of a variable slope channel, a retention grid and artificial logs manufactured in 3D printers. Twenty scenarios were evaluated, including different 04 densities and 05 Froude numbers.

The main contribution of this research is to demonstrate the increase in the backwater effect with rising the density of the floating material, in addition, a modified equation that depends on the wood density is proposed to estimate the increase in backwater rise. Other important findings showed that accumulations have more compactness with rising wood density.

At the end of the document, a list of recommendations and possible topics is proposed to improve future flume experiments and contribute to the study of wood transport in rivers.

PRÓLOGO

La cordillera de los Andes divide al Perú en dos grandes vertientes hidrográficas, la vertiente occidental, cuyos ríos drenan en dirección al Océano Pacífico, y la vertiente oriental, donde drenan en dirección al Océano Atlántico. Las características que presentan los cursos de agua de cada vertiente tienen marcadas diferencias: grandes descargas y pendientes bajas en la vertiente oriental y, descargas pequeñas y pendientes pronunciadas en la vertiente occidental (con excepción de la zona norte del país). Asimismo, los procesos fluviales presentes en cada vertiente están influenciados por el medio circundante: el clima semi-árido de la vertiente occidental propicia el arrastre de grandes volúmenes de sedimentos en época de avenidas mientras que, en la vertiente oriental, el clima tropical y los grandes bosques propician el arrastre de troncos y palos. El emplazamiento de las principales ciudades en la parte occidental de la cordillera ha impulsado el estudio de los procesos fluviales asociados con la carga y transporte de sedimentos en detrimento de los posibles estudios asociados a los efectos del transporte de palizadas; sin embargo, el desarrollo reciente de proyectos hidroeléctricos y vías de transporte en la región oriental han generado la necesidad de revisar estos procesos fluviales. Dentro de este contexto, la presente investigación analiza experimentos de laboratorio los posibles efectos de remanso en un curso de agua como consecuencia de la acumulación de troncos y palos en una rejilla de laboratorio, incluyendo la densidad como variable de control.

El estudio considera el uso de tecnología de impresión 3D para tener un mejor control de las densidades y dimensiones de los troncos a simular, y el uso de un canal de pendiente variable para simular diferentes escenarios de flujo con arrastre de troncos. Los ensayos realizados incluyen la caracterización de la acumulación de troncos (geometría), la caracterización del flujo (en función del número de Froude), y el aumento de remanso ocasionado por la variación de la densidad de la acumulación de troncos. Los resultados se resumen en una ecuación experimental que permite estimar el incremento relativo del remanso en función a la densidad de la acumulación y puede ser utilizada como insumo para la evaluación del peligro de los efectos hidráulicos y geomorfológicos de la acumulación de madera en estructuras hidráulicas.

En este contexto, el estudio presentado representa un primer aporte y de lectura obligada para empezar a comprender mejor el comportamiento de los ríos de la Amazonía peruana.

Msc. Juan Walter Cabrera Cabrera
Profesor Asociado
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Nacional de Ingeniería

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 1 Parámetros que influyen en el incremento de remanso.....	23
Tabla N° 2 Número de árboles por hectárea por clase diamétrica en el Bosque Aluvial Inundable BPP de Loreto	33
Tabla N° 3 Tipos de perfiles de flujo	36
Tabla N° 4 Características de troncos artificiales.....	50
Tabla N° 5 Valores de parámetros preestablecidos	52
Tabla N° 6 Programa de ensayos	52
Tabla N° 7 Error relativo estándar de parámetros predeterminados (%).....	54
Tabla N° 8 Porcentaje de retención de palitos	58
Tabla N° 9 Efecto de remanso debido a la rejilla de retención	62
Tabla N° 10 Error relativo estándar del incremento de remanso relativo.....	63
Tabla N° 11 Rango de valores en parámetros	68
Tabla N° 12 Compacidad de la acumulación según Hartlieb (2017)	69
Tabla N° 13 Compacidad de la acumulación según Schalko (2019)	74
Tabla N° 14 Resultados de aumento relativo de remanso	79
Tabla N° 15 Factor de acumulación para cada densidad.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1 Presa Palagnedra, Suiza, antes y después del bloqueo de gran cantidad de leños flotantes (Furlan, 2019)	19
Figura N° 2 Transporte congestionado de madera en ríos. Arriba) Río Slave, zona de Fort Fitzgerald, Alberta, Canadá (Kramer et al., 2017). Abajo) Río Marañón, Perú (Consortio Hidrovía Amazonas, 2008).	26
Figura N° 3 Modelo conceptual de la dinámica de troncos en un tramo de río (Lucía et al., 2015).....	27
Figura N° 4 Modelo de clasificación de acumulación de restos leñosos (Wallerstein et al., 2001).....	28
Figura N° 5 Acumulación de palizada en puerto fluvial (Consortio Hidrovía Huallaga, 2005)	29
Figura N° 6 Acumulación de palizada en presa Chimay, río Tulumayo (Elaboración propia)	30
Figura N° 7 Acumulación de palizada en puente del río La Paila, Colombia (Alcaldía Zarzal Valle, 2022).....	31
Figura N° 8 Variación de densidad por la absorción de humedad para maderas frescas (arriba) y maderas en descomposición (abajo) (Ruiz-Villanueva et al., 2016)	32
Figura N° 9 Esquema de acumulación de madera (Hartlieb, 2017).....	35
Figura N° 10 Esquema de un flujo a través de una constricción (Chow, 1959) ..	37
Figura N° 11 Desarrollo temporal de la profundidad de flujo relativo h/h_0 para diferentes volúmenes de madera VD (Schmocker & Hager, 2013)	38
Figura N° 12 (a) Profundidad de flujo relativa h/h_0 (b) Longitud relativa de alfombra de madera L/BR para varios F_0 (Schmocker & Hager, 2013).....	39
Figura N° 13 incremento relativo de remanso ($\Delta h/h_0$) vs. número de Froude inicial (F_0) para densidades de acumulación constantes ($\rho D/\rho W = 0.8$) (Hartlieb, 2017).	39
Figura N° 14 incremento relativo de remanso $\Delta h/h_0$ vs. densidad de acumulación relativa $\rho D/\rho W$ para dos valores de número de Froude inicial (Hartlieb, 2017)	40
Figura N° 15 $\Delta h/h_0$ vs. F_0 variando la compacidad (Schalko et al., 2018).....	40

Figura N° 16 $\Delta h/h_0$ vs. F_0 para diferentes porcentajes de FM a) para una compacidad baja $a = 4.2$ b) para una compacidad alta $a = 2.8$ (Schalko et al., 2018) 41

Figura N° 17 Arriba) Esquema de acumulación de (Schalko et al., 2018) Abajo) Esquema de acumulación de (Schalko et al., 2019) 42

Figura N° 18 Forma de acumulación para materiales de distinta densidad (Al-Zawaidah et al., 2021) 42

Figura N° 19 Esquema de ejecución de ensayos (Elaboración propia) 46

Figura N° 20 Esquema de secciones de medición (Elaboración propia) 48

Figura N° 21 Esquema de acumulación de troncos (Elaboración propia) 48

Figura N° 22 Parámetros de fabricación (Elaboración propia) 49

Figura N° 23 Fabricación de pieza roja ($\rho_T = 950 \pm 30 \text{ kg/m}^3$). en impresoras 3D.(Elaboración propia) 50

Figura N° 24 Tronco artificial de mayor densidad ($\rho_T = 950 \pm 30 \text{ kg/m}^3$) (Elaboración propia) 51

Figura N° 25 Grupos de palitos artificiales fabricados (Elaboración propia) 51

Figura N° 26 Rejillas de retención de troncos (Elaboración propia) 57

Figura N° 27 Porcentaje de retención vs. Número de Froude (Elaboración propia) 60

Figura N° 28 Efecto de la rejilla para número de Froude $F_0 = 0.2$ (Elaboración propia) 60

Figura N° 29 Efecto de la rejilla para número de Froude $F_0 = 0.3$ (Elaboración propia) 61

Figura N° 30 Efecto de la rejilla para número de Froude $F_0 = 0.4$ (Elaboración propia) 61

Figura N° 31 Efecto de la rejilla para número de Froude $F_0 = 0.5$ (Elaboración propia) 61

Figura N° 32 Efecto de la rejilla para número de Froude $F_0 = 1.3$ (Elaboración propia) 61

Figura N° 33 Proceso de acumulación con densidad= $400 \text{ m}^3/\text{s}$, $F_0 = 0.5$ y variación de $VD = 10 \%$ (Elaboración propia) 68

Figura N° 34 Acumulación con piezas de distintas densidades para $F_0 = 0.4$ (Elaboración propia) 69

Figura N° 35 Relación de compacidad versus Densidad para $Fo=0.2$ (Elaboración propia)	72
Figura N° 36 Relación de compacidad versus Densidad para $Fo=0.3$ (Elaboración propia)	72
Figura N° 37 Relación de compacidad versus Densidad para $Fo=0.4$ (Elaboración propia)	73
Figura N° 38 Relación de compacidad versus Densidad para $Fo=0.5$ (Elaboración propia)	73
Figura N° 39 Relación de compacidad versus Densidad para $Fo=1.3$ (Elaboración propia)	74
Figura N° 40 Relación de compacidad versus Densidad para $Fo=0.2$ (Elaboración propia)	76
Figura N° 41 Relación de compacidad versus Densidad para $Fo =0.3$ (Elaboración propia)	77
Figura N° 42 Relación de compacidad versus Densidad para $Fo=0.4$ (Elaboración propia)	77
Figura N° 43 Relación de compacidad versus Densidad para $Fo=0.5$ (Elaboración propia)	77
Figura N° 44 Relación de compacidad versus Densidad para $Fo=1.3$. (Elaboración propia)	78
Figura N° 45 Incremento relativo de remanso promedio vs. distintos escenarios (Elaboración propia)	81
Figura N° 46 Altura de remanso vs. Número de Froude para distintas densidades 1 (Elaboración propia)	82
Figura N° 47 Altura de remanso vs. Número de Froude para cada densidad evaluada (Elaboración propia)	84
Figura N° 48 Densidad vs. Nuevo factor de tipo de acumulación (Elaboración propia)	85
Figura N° 49 Valores de $\Delta h/h_o$ experimentales vs $\Delta h/h_o$ calculados (Elaboración propia)	86
Figura N° 50 Altura de remanso vs. Compacidad (Elaboración propia).....	87
Figura N° 51 Formación de acumulación para escenarios 9, 10, 11 y 12 ($Fo = 0.4$) (Elaboración propia)	88

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

A_C	Área de la cuenca
A_L	Área lateral de acumulación de material flotante
a	Factor de volumen o compacidad
α_1	Coefficientes de energía
B	Ancho de canal experimental
B_C	Ancho de canal fluvial
B_R	Ancho total de la rejilla
$C_{T/L}$	Constante de proporcionalidad
d_L	Diámetro de tronco
e^*	Error relativo estándar
FM	Cantidad de material fino
F_O	Número de Froude
f_A	Factor de tipo de acumulación
g	Gravedad
h_e	Pérdidas debido a la turbulencia
h_f	Pérdidas debido a la fricción
h_o	Altura de agua inicial
h	Altura de agua
H_{vert}	Altura de agua sobre el vertedero
Δh	Incremento de remanso
L	Longitud de acumulación
L_t	Longitud de troncos
LW_D	Material leñoso depositado
LW_{ex}	Material leñoso exportado aguas abajo
LW	Madera grande
LWD	Escombros de madera grande
m_t	Masa del tronco
m	Relación de contracción
n	Número de muestras
Q_0	Caudal inicial
s	Desviación estándar de la muestra
S_0	Pendiente de fondo de canal
T	Altura de acumulación de una muestra

u	Factor de desviación
V_{est}	Volumen total de material leñoso estimado
v_t	Volumen del tronco
V_C	Volumen característico de una acumulación
V_L	Volumen suelto de una acumulación
V_S	Volumen sólido de una acumulación
V	Velocidad
V_D	Volumen lanzado de madera
W_{post}	Material leñoso en zonas inundables
WD	Escombros de madera
\bar{x}	Promedio de la muestra
y	Tirante
ρ_t	Densidad del tronco
ρ_w	Densidad del agua
σ^2	Desviación estándar

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

En la presente investigación se estudiará el efecto de remanso que es causado por la acumulación de material leñoso transportado por los ríos durante eventos extraordinarios. De acuerdo con recientes investigaciones, la altura de remanso depende de distintas características de la acumulación de material leñoso y las características del flujo de aproximación. Según lo observado en recientes investigaciones, la forma de la acumulación es determinada por el arrastre de piezas hacia el fondo del canal lo cual está influenciado por las características de las piezas flotantes. Mediante una serie de experimentos, se pretende evaluar la influencia de la densidad del material flotante sobre el remanso debido a una acumulación, para distintas condiciones de flujo.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Gurnell et al. (2002) describen los efectos positivos del transporte de material leñoso en los ecosistemas fluviales, como parte esencial del hábitat y como vía de transporte de alimentos para plantas y animales. También se ha estudiado de manera exhaustiva las características de la dinámica de este material dentro de un cauce fluvial como el arrastre, el transporte y la deposición. Cuando el material leñoso es transportado en grandes cantidades durante una avenida es frecuente que se produzcan acumulaciones en infraestructuras naturales o artificiales, lo que puede causar variación en el flujo o cambios en la morfología del lecho. Investigaciones recientes han considerado esencial el estudio del efecto de remanso como parte de una evaluación de peligrosidad por el aumento no previsto del nivel de agua.

Las zonas de estudio evaluadas corresponden por lo general a sistemas fluviales con alta densidad de vegetación capaces de incorporar cantidades significativas de material leñoso al río durante eventos extraordinarios. Cabe señalar que la mayor parte de los estudios corresponden a ríos europeos donde se pueden encontrar cuencas boscosas de distintas características. Los fenómenos asociados a la acumulación de material leñoso incluyen inundación de zonas circundantes, erosión local en infraestructuras e interrupción de transporte de sedimento (Schalko et al., 2018). En el territorio peruano, los ríos de la Selva como

el Napo o el Ucayali transportan grandes cantidades de material leñoso los cuales generan condiciones riesgosas en infraestructuras portuarias (Consortio H&O - Ecsa, 2005).

Furlan (2019) describe la magnitud de los efectos por acumulaciones de escombros de madera en presas. Un ejemplo de esto es el reservorio de Palagnedra en Suiza (Figura N° 1), el cual contaba con un aliviadero de ventanas de 3 metros de alto y fue desbordado en 1978 por una avenida producto de la acumulación de 25 000 m³ de escombros de madera, ocasionando la destrucción de la presa. De igual forma la presa Sa Teula, en Italia, con aliviaderos de ventanas de 3 metros de alto fue desbordado debido a la acumulación de gran cantidad de madera que dañó la presa.



Figura N° 1 Presa Palagnedra, Suiza, antes y después del bloqueo de gran cantidad de leños flotantes (Furlan, 2019)

La importancia de los experimentos de laboratorio es la estimación del incremento de remanso que se produce por las acumulaciones de escombros de madera y cuáles son los parámetros que influyen en este aumento en mayor medida.

Schmocker & Hager (2013) realizaron una investigación donde se determinó una relación entre el número de Froude del flujo de aproximación y la altura de agua después de una acumulación de troncos. Sus hallazgos indicaron que para un número de Froude $F_0 = 0.5$ la altura de agua se incrementaba a 2.5 veces su valor inicial, mientras que para $F_0 = 1.5$ la altura de agua se incrementaba a 4 veces su valor inicial. Posteriormente se estudiaron otros parámetros que influyen en el aumento de altura de flujo, sin embargo, se encuentra poca información respecto al efecto de la densidad de la acumulación de troncos.

Frente a esta problemática se han llevado a cabo estudios experimentales donde se aplican distintas metodologías para simular la acumulación de material leñoso en rejillas de retención y así evaluar su influencia en el aumento de remanso y la socavación local. En el presente trabajo se propone evaluar específicamente el efecto de la densidad de la madera en el aumento de remanso utilizando troncos artificiales de diferentes densidades fabricados en impresoras 3D.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Evaluar la influencia de la densidad de la madera en la acumulación de material leñoso aguas arriba de una rejilla de retención.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Simular la acumulación de material leñoso teniendo como variable de flujo al número de Froude del flujo de aproximación y como variable de la acumulación de material leñoso a la densidad de la madera.
- b) Analizar la influencia de la densidad de la madera en la forma de la acumulación de material leñoso aguas arriba de una rejilla de retención.
- c) Evaluar la influencia de la densidad de la madera en el aumento de remanso debido a la acumulación de material leñoso.

1.4 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

En los últimos años se han propuesto distintas metodologías para evaluar el comportamiento de una acumulación de madera en los ríos, sin embargo, el estudio de acumulaciones de escombros de madera se remonta a la década del 50 cuando Kennedy (1957) realiza uno de los primeros estudios exhaustivos sobre las fuerzas involucradas en estructuras hidráulicas de retención de madera.

Posteriormente autores como Bezzola & Hegg (2008) estudiaron los problemas y riesgos relacionados con los escombros flotantes en los ríos. Los estudios que se resumen a continuación analizan principalmente el efecto de remanso ocasionado por la acumulación de material leñoso en ríos y han servido de base para definir la metodología de la presente investigación.

1.4.1 Estudios de Schmocker & Hager (2013)

El objetivo de su investigación fue estudiar diversos aspectos de una acumulación de madera en la modelación física, haciendo énfasis en los parámetros que influyen el proceso de la acumulación y el efecto de remanso. Sus resultados indican un efecto significativo del número de Froude del flujo de aproximación en el proceso de acumulación de madera.

1.4.2 Estudios de Hartlieb (2017)

Arnd Hartlieb estudió la influencia de dos parámetros en el efecto de remanso debido a la acumulación de troncos en un aliviadero de compuertas radiales. Consideró que la altura relativa de remanso ($\Delta h/h_o$) aguas arriba de las compuertas se relacionaba directamente con la forma de la acumulación del material flotante y mediante un análisis dimensional determinó que los parámetros decisivos que la gobiernan eran la densidad del material leñoso y el número de Froude del flujo de aproximación.

1.4.3 Estudios de Isabella Schalko et al. (2018)

Schalko realizó estudios para determinar los parámetros de gobierno en el incremento de remanso debido a la acumulación de material leñoso en una rejilla de retención. Sus experimentos consistieron en ensayos con volúmenes predefinidos y se evaluó la influencia de parámetros asociados a las características de la acumulación de material leñoso y las características del flujo de aproximación inicial. Posteriormente, realizaron un análisis dimensional con los parámetros que predominaron en el incremento de remanso y se estableció una ecuación de diseño para estimar el incremento de remanso.

1.4.4 Estudios de Isabella Schalko et al. (2019)

El objetivo de esta investigación fue estimar el volumen de material leñoso que genera el principal incremento de remanso para determinadas condiciones de flujo (denominado volumen característico de una acumulación de madera) y los efectos de la acumulación natural de igual forma. La investigación también incluyó experimentos con lecho móvil para analizar el efecto de la socavación provocada por la acumulación de material leñoso.

1.4.5 Estudios de Isabella Schalko et al. (2021)

El objetivo de esta investigación fue estudiar el efecto de las acumulaciones de madera larga sobre el incremento de remanso aguas arriba de una rejilla de retención inclinada y el transporte de la carga del lecho con un espacio libre debajo de la rejilla de retención, mediante una serie de experimentos evaluando diferentes características de madera grande o LW (por sus siglas en ingles), incluyendo la densidad de la madera, y teniendo en cuenta inundaciones secuenciadas.

1.4.6 Estudios de Al-Zawaidah et al. (2021)

El objetivo de esta investigación fue evaluar los efectos geomorfológicos de acumulaciones de dos materiales de densidades diferentes en una rejilla de retención.

1.4.7 Comentarios sobre las investigaciones realizadas

Como se observa, diversos autores han evaluado la influencia de distintos parámetros en el incremento de remanso producto de la acumulación de material leñoso a través de distintas metodologías.

Los estudios de Schmocker & Hager (2013) demostraron que la altura de remanso aumentaba con el tiempo de riego de la madera, parámetro asociado directamente con la densidad, teniendo en cuenta que el peso de cada pieza aumenta con la absorción de agua. Por su parte, Hartlieb (2017) trabajó con 02 valores de densidades con piezas artificiales de madera, concluyendo que cuanto mayor es el número de Froude del flujo de aproximación y la densidad de las piezas flotantes, mayor será el incremento de remanso aguas arriba de la acumulación.

Posteriormente, los estudios de Schalko et al. (2018) permitieron identificar los parámetros de mayor influencia en el incremento de remanso a través de ensayos en acumulaciones con forma predefinida, que sirvieron más adelante para su siguiente estudio (Schalko et al., 2019a), donde se establece una ecuación entre el incremento de remanso y los principales parámetros de influencia en acumulaciones naturales de madera y en la que además se incluye un coeficiente que podría variar en función de la densidad de la madera.

Recientemente, una investigación de Schalko et al. (2021) analiza el incremento de remanso sobre una rejilla inclinada, incluyendo una evaluación de la influencia de la densidad de madera. Sus resultados mostraron un efecto insignificante de la densidad de troncos en el incremento de remanso y en el transporte de carga de sedimentos en una rejilla inclinada y además se menciona la posibilidad de que pequeños flujos puedan transportar madera de baja densidad en comparación a la madera más densa.

Por otro lado, en el estudio de Al-Zawaidah et al. (2021), llevado a cabo con madera y piezas de plástico, se determinó que la densidad de piezas flotantes influye en la forma de la acumulación de material flotante y en el incremento de remanso aguas arriba de una rejilla de retención.

La Tabla N° 1 muestra un resumen con los parámetros que más influyen en el incremento de remanso producto de las acumulaciones de madera según las investigaciones mencionadas.

Tabla N° 1 Parámetros que influyen en el incremento de remanso

Parámetros	(Schmocker & Hager, 2013)	(Hartlieb, 2017)	(Schalko et al., 2018)	(Schalko et al., 2019)	(Schalko et al., 2021)	(Al-Zawaidah et al., 2021)
Froude del flujo de aproximación	X	X	X	X		X
Altura del flujo de aproximación				X		
Compacidad de la acumulación		X	X	X		
Dimensiones de la acumulación	X	X	X	X		
Densidad de la madera		X				X
Dimensión de troncos			X	X	X	
Contenido de material orgánico fino			X	X	X	

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 NOCIONES PREVIAS

El río es una corriente de agua que discurre por un cauce fluvial, al que va ajustando su geometría libremente. La formación de meandros, por ejemplo, depende de la resistencia a la erosión de las orillas. Además, un río puede desbordar su cauce y ocupar las llanuras de inundación durante eventos extraordinarios, generando arrastre y deposición de material sólido (Martín Vide, 2003)

Dentro de la dinámica fluvial, se denomina material leñoso a los restos de troncos, árboles completos, ramas y raíces comprendidos en la corriente del río. En la literatura internacional es común referirse a ellos como madera grande (LW, por su acrónimo en inglés) o restos de madera grande (LWD), en otros casos como madera a la deriva (driftwood) o restos de madera (WD); la denominación grande hace referencia a piezas con longitudes mayores a un metro y diámetros superiores a 10 cm.

Ruiz-Villanueva et al. (2016) explican la connotación negativa de usar el término desechos o escombros de madera por su gran valor en el ámbito ecológico. En el territorio nacional se denomina palizada al conjunto de restos vegetales transportados por ríos, especialmente de la selva.

Ruiz-Villanueva et al. (2015) explican que el material leñoso se puede hallar como fragmentos depositados de manera individual (logs) o como acumulaciones (Wood o log jams) y que sus características y frecuencia dentro de la corriente dependen de la dinámica fluvial y la vegetación en la zona.

2.2 PROCESOS DE TRONCOS EN RÍOS

2.2.1 Incorporación de madera en ríos

En cuencas boscosas se producen aportes de grandes cantidades de material vegetal a los ríos. Benda & Sias (2003) plantean que los principales procesos de incorporación de material leñoso a los ríos son los deslizamientos, la erosión de bancos y el transporte fluvial durante inundaciones. Aportes adicionales pueden

producirse por incendios forestales o descomposición de la vegetación a las orillas del río (May & Gresswell, 2003).

Ruiz-Villanueva et al. (2015) señalan que en ríos de menor orden la cantidad de madera suele ser mayor que en ríos de mayor orden y que la cantidad de troncos depende de las características de los bosques, los procesos que intervienen en su incorporación y de las características morfodinámicas del río.

Steeb et al. (2017) evaluaron el riesgo de la acumulación de madera en distintas cuencas de Suiza. En su estudio determinaron el aporte de madera de cada proceso de reclutamiento y realizaron un balance de masas para determinar una relación entre el área de la cuenca A_c (km²) y el volumen total de material leñoso estimado V_{est} (m³):

$$\text{Ecuación 1:} \quad V_{est} = 113 \cdot A_c^{2/3}$$

Además, se observó que el principal aporte en las cabeceras de cuenca la madera provenía del desgaste masivo, deslizamientos de tierra y flujos de escombros, mientras que en las zonas bajas el principal aporte provenía de las erosiones de banco laterales.

En el territorio nacional parte de su origen se debe a la tala agrícola, a la tala minera y a la tala maderera formal e informal, cuyos residuos se incorporan a los cauces en épocas de desborde (Chuan Huingo, 2019).

2.2.2 Transporte de madera en ríos

La presencia de un volumen significativo de material vegetal en el cauce de un río en un periodo relativamente corto se puede vincular a eventos extremos como avenidas o procesos geomorfológicos repentinos como deslizamientos, así como a otros mecanismos que tienen un impacto más lento pero constante como la erosión de bancos. En estos casos extraordinarios se habla de un tipo de transporte “congestionado” el cual tiene mayor relevancia para un análisis de peligrosidad (Braudrick & Grant, 2000).



Figura N° 2 Transporte congestionado de madera en ríos. Arriba) Río Slave, zona de Fort Fitzgerald, Alberta, Canadá (Kramer et al., 2017). Abajo) Río Marañón, Perú (Consortio Hidrovía Amazonas, 2008).

Según estudios de Braudrick et al. (1997) en un transporte no congestionado las piezas se mueven sin interacción entre ellas, mientras que un transporte congestionado, los detritos leñosos se mueven juntos como una sola masa y ocupan más del 33 % del canal. La Figura N° 2 muestra el caso del transporte congestionado de madera en un río en Canadá y en un río de la Selva Baja de Perú.

Lucía et al. (2015) realizaron una investigación sobre el efecto de las inundaciones repentinas en el transporte y deposición de LW en la cuenca del Río Magra (Italia). En el estudio se plantea un modelo conceptual (Figura N° 3) en el que se destaca la incorporación de troncos es ríos mediante procesos geomorfológicos (deslizamientos, cortes o erosión de bancos) y el acarreo de material leñoso cuando el ancho del río abarca las zonas inundables (W_{post}). Además, explica la complejidad del material leñoso cuando se deposita (LW_D) o cuando se exporta aguas abajo (LW_{ex}).

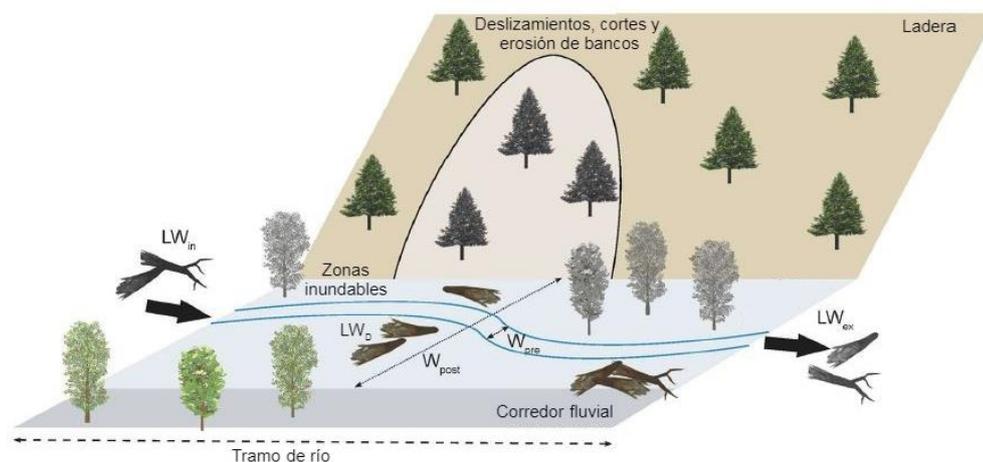


Figura N° 3 Modelo conceptual de la dinámica de troncos en un tramo de río (Lucía et al., 2015)

Cabe mencionar que los principales procesos de incorporación de madera a un cauce fluvial pueden variar dependiendo de las características del río, por lo general, para ríos de mayor orden y baja pendiente los aportes de madera se deben a la erosión de bancos, y para ríos de menor orden y mayor pendiente, los procesos gravitacionales como los deslizamientos tienen predominio (Comiti et al., 2008).

2.2.3 Acumulación de restos leñosos

La importancia del estudio de las acumulaciones de maderas en ríos radica en la peligrosidad y el riesgo que implican las obstrucciones en infraestructuras naturales y artificiales, ocasionando la sobre elevación en el nivel de agua e inundando zonas que de otra forma no se verían afectadas (Ruiz-Villanueva et al., 2015).

Por otro lado, también se han estudiado los efectos de las acumulaciones de restos leñosos en la morfología de ríos, por ejemplo Wallerstein et al. (2001) conceptualizaron el impacto morfológico de las acumulaciones en una clasificación (Figura N° 4) basada en una relación entre la longitud de la acumulación (I) y el ancho del canal fluvial (B).

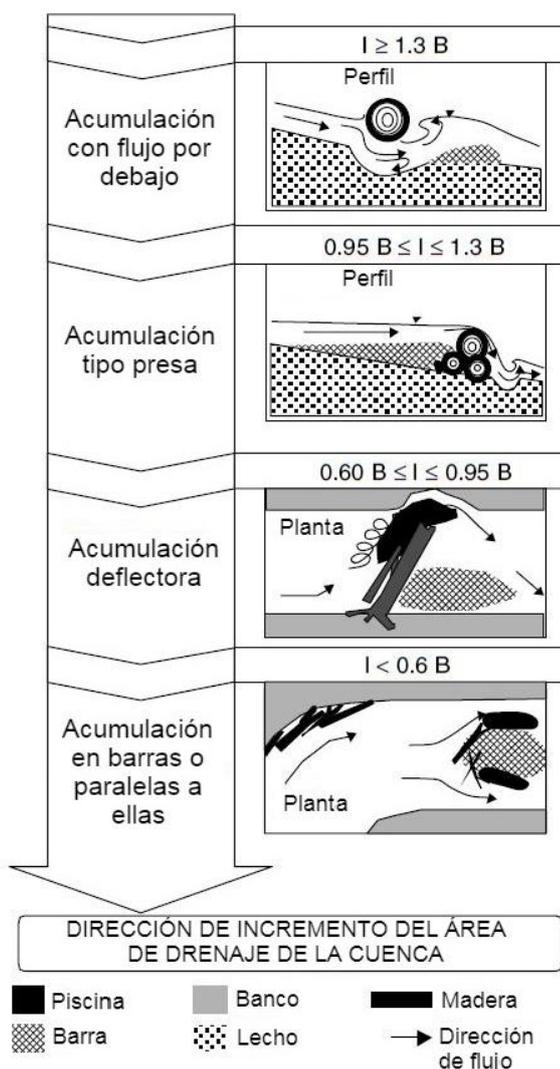


Figura N° 4 Modelo de clasificación de acumulación de restos leñosos (Wallerstein et al., 2001)

El curso de agua de estudio elegido por Wallerstein et al. (2001) fue Abiaca Creek, al norte de Mississippi, donde se observaron distintos tipos de acumulaciones a medida que se desplazaba aguas abajo: acumulaciones con flujo por debajo, acumulaciones tipo presa, acumulaciones deflectoras de flujo y acumulaciones depositadas en barras.

2.3 CASOS DE ACUMULACIONES DE MATERIAL LEÑOSO

2.3.1 Puertos fluviales

De acuerdo con el estudio de navegabilidad del río Huallaga (Consortio Hidrovia Huallaga, 2005) los ríos amazónicos que tienen alta capacidad de transporte de

palizada son Amazonas y Ucayali, seguidos por el río Marañón con capacidad de transporte de palizada media y los ríos Huallaga y Madre de Dios con capacidad de transporte de palizada media-baja. En estos cursos, las obras más afectadas por la palizada son los puertos debido a que las acumulaciones ejercen esfuerzos adicionales sobre elementos estructurales como cables y plataformas, poniendo en riesgo la infraestructura, la Figura N° 5 ejemplifica este fenómeno.



Figura N° 5 Acumulación de palizada en puerto fluvial (Consortio Hidrovia Huallaga, 2005)

2.3.2 Centrales Hidroeléctricas

Durante inundaciones, la madera grande (LW) puede transportarse por largas distancias y llegar a los embalses de las centrales hidroeléctricas. Si el vertedero está en funcionamiento durante tales inundaciones, el LW puede poner en peligro la seguridad de la operación del vertedero (Schmocker, 2013) .

Tal es el caso de la presa Tulumayo perteneciente a la Central Hidroeléctrica Chimay, ubicada en la Selva Central, provincia de Jauja, departamento de Junín y que se abastece del río Tulumayo. Durante épocas de lluvia el río transporta grandes cantidades de palizada que se acumulan en la presa y se retiene por una plataforma flotante de metal (Figura N° 6), dicha estructura retiene la palizada

flotante de la capa superficial, la otra parte de mayor densidad traspasa la plataforma por debajo, y llega a la rejilla de retención de la estructura de captación. Dicha rejilla debe recibir mantenimiento continuo con un limpiarrejas automático para evitar el bloqueo total de la captación.



Figura N° 6 Acumulación de palizada en presa Chimay, río Tulumayo (Elaboración propia)

2.3.3 Puentes

La acumulación de palizada también se produce en pilares de puentes provocando socavación local en pilares o aumento de remanso cuando se bloquea la sección hidráulica (Pagliara & Carnacina, 2011).

Un caso del fenómeno mencionado está en el río La Paila, correspondiente a la cuenca del río Magdalena en Colombia que transporta grandes cantidades de palizada durante época de lluvias que bloquea la sección e impide el flujo generando inundaciones aguas arriba de puentes de la zona, este fenómeno que se reporta en épocas de avenida (Alcaldía Zarzal Valle, 2022) y se evidencia en la fotografía de la Figura N° 7.



Figura N° 7 Acumulación de palizada en puente del río La Paila, Colombia (Alcaldía Zarzal Valle, 2022)

2.4 CARACTERÍSTICAS DE LA ACUMULACIÓN DE TRONCOS

La dinámica de un tronco o su conjunto dentro de una corriente se ve influenciada en gran medida por sus características (densidad, dimensiones, cantidad, etc.), así mismo, Braudrick & Grant (2001) señalan que las características de la madera que determinan su arrastre son la densidad y el diámetro transversal.

Durante su movimiento, la distancia recorrida depende de la relación entre su longitud y el ancho del canal, y la deposición depende de la relación entre la profundidad sumergida de la pieza y la profundidad del flujo (Braudrick & Grant, 2001). A continuación, se describen las principales características de las acumulaciones de leños.

2.4.1 Densidad de troncos

La densidad es una característica que determina la flotabilidad de la madera y se expresa como la fracción entre la masa y el volumen de la pieza de tronco:

$$\text{Ecuación 2:} \quad \rho_t = \frac{m_t}{v_t}$$

ρ_t varía de acuerdo con la especie del árbol, la edad, el estado de descomposición y el contenido de agua. Como muestra de esto, Ruiz-Villanueva et al. (2016)

realizaron un estudio donde se evaluó el aumento de la densidad de troncos frescos y troncos en estado de descomposición de acuerdo con la absorción de agua.

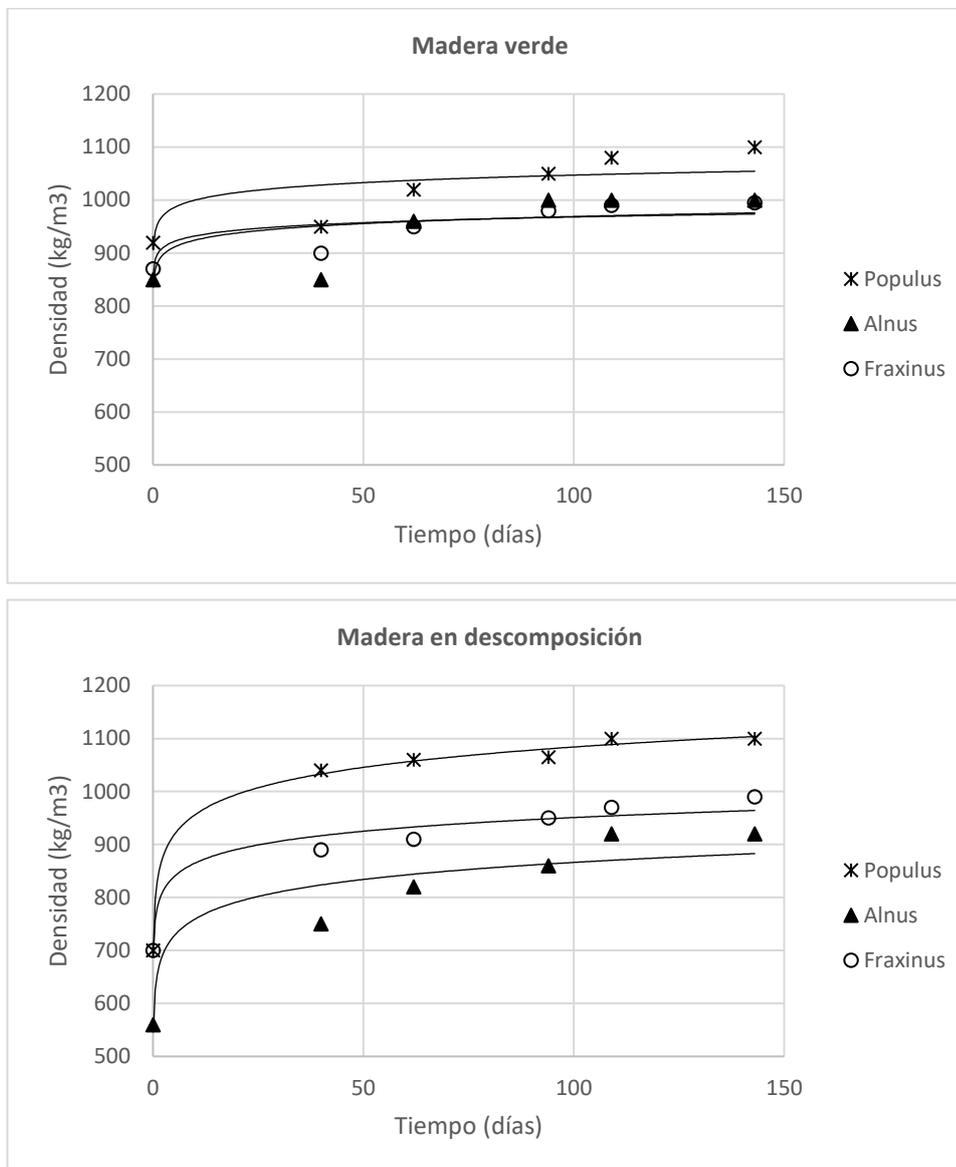


Figura N° 8 Variación de densidad por la absorción de humedad para maderas frescas (arriba) y maderas en descomposición (abajo) (Ruiz-Villanueva et al., 2016)

La Figura N° 8 muestra que la madera verde inicia con valores más altos de densidad al incorporarse al agua, por lo tanto, tiene una capacidad de absorción de humedad más lenta que la madera en descomposición. Las especies evaluadas corresponden a la zona de la presa Génessiat en el río Rhone, Francia

y el análisis corresponde a la variabilidad de la densidad de la madera en el tiempo.

Los valores de densidad de madera fresca pueden llegar como máximo hasta 1100 kg/m^3 en especies del norte de Europa (Ruiz-Villanueva et al., 2016), hasta valores mínimos de 440 kg/m^3 de la especie Hura Crepitans en la región amazónica según la investigación de Moya Roque et al. (2008). Mientras que la madera en descomposición puede tener menores valores de densidad, dependiendo del tiempo de absorción de agua.

2.4.2 Dimensión de troncos

Generalmente, los árboles en bosques son estudiados por su longitud y su diámetro, que a su vez dependen del tipo de vegetación. El material leñoso puede incluir detritos gruesos o piezas de gran dimensión con diámetros superiores a 10 cm y longitudes superiores a un metro, así como porciones más finas conformadas por material leñoso de inferior tamaño como pedazos de ramas, troncos o raíces (Ruiz-Villanueva et al., 2015).

En el Bosque Aluvial Inundable de la Amazonía peruana, los troncos con mayor predominancia son los que tienen diámetros entre 30 cm y 60 cm y las especies más representativas son el aguaje, caimitillo, machimango, aguajillo, entre otros (Kometter, 2004). En la Tabla N° 2 se muestra la abundancia de árboles de acuerdo con su clase diamétrica, correspondiente al Bosque de Producción Permanente (BPP) del Bosque Aluvial Inundable del departamento de Loreto.

Tabla N° 2 Número de árboles por hectárea por clase diamétrica en el Bosque Aluvial Inundable BPP de Loreto

Nombre común	Clases diamétricas (cm)			TOTAL	Porcentaje (%)
	30 - 59.9	60 – 89.9	90 a más		
Aguaje	26.005	0.000	0.000	26.005	28.86
Cumala caupuri	3.705	0.210	0.000	3.915	4.34
Machimango	2.237	0.419	0.070	2.726	3.03
Catahua	1.468	0.769	0.350	2.587	2.87
Caimitillo	2.307	0.210	0.000	2.517	2.79
Aguanillo	2.377	0.140	0.000	2.517	2.79
Shimbillo	2.307	0.070	0.000	2.377	2.64

Nombre común	Clases diamétricas (cm)			TOTAL	Porcentaje (%)
	30 - 59.9	60 – 89.9	90 a más		
Yesca	1.258	0.629	0.210	2.097	2.33
Pashaco	1.468	0.350	0.000	1.818	2.02
Renaco	1.538	0.280	0.000	1.818	2.02
Huarmi caspi	1.538	0.140	0.070	1.748	1.94
Maquisapa ñaccha	1.398	0.210	0.000	1.608	1.78
Yacushapana	1.468	0.140	0.000	1.608	1.78
Quinilla	1.398	0.140	0.000	1.538	1.71
Shiringa	1.049	0.140	0.000	1.188	1.32
Carahuasca	1.049	0.070	0.000	1.118	1.24
Requia	1.049	0.000	0.000	1.049	1.16
Oje	1.049	0.000	0.000	1.049	1.16
Cumala blanca	0.979	0.000	0.000	0.979	1.09
Punga	0.629	0.350	0.000	0.979	1.09
Sub-total	56.274	4.264	0.699	61.237	67.96
Otras especies	26.354	1.887	0.629	28.871	32.04
Total general	82.628	6.152	1.328	90.108	100.00

Fuente: (Kometter, 2004)

La diferencia de tamaño de los troncos puede impactar en el volumen total de una acumulación, pues según las investigaciones de laboratorio, los troncos de mayor diámetro generan mayores porcentajes de vacíos.

2.4.3 Volumen de una acumulación de troncos

El volumen de una acumulación puede variar en función de la cantidad de madera incorporada a un río, y, por ende, al tamaño de la cuenca como en la Ecuación 1. Posteriormente, Schalko et al. (2019) determinaron el volumen característico de una acumulación que genera el mayor aumento de remanso mediante una serie de ensayos a escala, obteniendo la siguiente relación empírica:

$$\text{Ecuación 3: } \frac{V_c}{Bh_o^2} = 3.1F_o$$

Donde V_c es el volumen característico de una acumulación de material leñoso, B es el ancho del canal, h_o la altura del flujo de aproximación y F_o el número de

Froude del flujo de aproximación. Esto quiere decir que el aporte adicional de madera a la acumulación contribuye a la formación de una manta alargada de material flotante que no tiene mayor influencia en el aumento de remanso.

Se tienen otras definiciones de volumen planteados en estudios con acumulaciones de madera como el volumen sólido y el volumen suelto, la relación de estos valores determina un valor de compacidad de acumulación dada por Schalko et al. (2019).

2.4.4 Compacidad de una acumulación de madera

Hartlieb (2017) definió la compacidad de una acumulación por la relación entre la profundidad de la acumulación (T) y la longitud de la acumulación (L) como se muestra en la Ecuación 4.

Ecuación 4:
$$C = T/L$$

Ambas dimensiones se presentan en el siguiente esquema de la Figura N° 9.

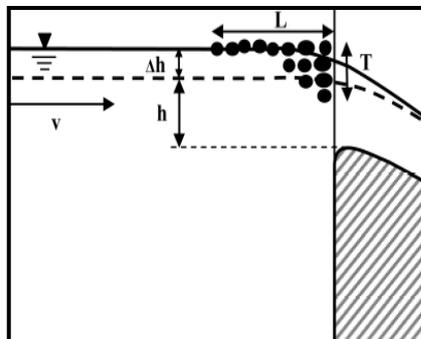


Figura N° 9 Esquema de acumulación de madera (Hartlieb, 2017)

Mediante observaciones de laboratorio, Hartlieb identificó variables que influían en la compacidad de una acumulación y mediante un análisis dimensional determinó la siguiente relación:

Ecuación 5:
$$T/L = C_{T/L} * F_o^m * (\rho_t/\rho_w)^n$$

Donde $C_{T/L}$ es una constante de proporcionalidad, F_o el número de Froude inicial y ρ_t, ρ_w son las densidades de la madera y el agua respectivamente.

Por otro lado, Schalko et al. (2018a) representan la compacidad de una acumulación mediante el factor de volumen, el cual está dado por la razón entre el volumen suelto de la acumulación y el volumen sólido de la acumulación, según:

Ecuación 6:
$$a = \frac{V_L}{V_S}$$

Durante sus experimentos pudo clasificar tres tipos de compacidad en acumulaciones de acuerdo con los valores de a obtenidos: suelto para $a = 4.0-5.0$, medio para $a = 3.0-4.0$ y denso para $a = 2.0-3.0$.

2.5 AUMENTO DE REMANSO DEBIDO A LA ACUMULACIÓN DE MADERA

La curva de remanso se genera en los perfiles de flujo gradualmente variado bajo determinadas condiciones las cuales se resumen en la Tabla N° 3.

Tabla N° 3 Tipos de perfiles de flujo

Pendiente del canal	Designación			Relación de y con y_n e y_c					Tipo general de curva	Tipo de flujo
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 1	Zona 2	Zona 3				
Horizontal $S_0=0$	Ninguno			$y >$	y_n	$>$	y_c		Ninguno	Ninguno
		H2			y_n	$> y >$	y_c		Caída	Subcrítico
			H3		y_n	$>$	y_c	$> y$	Remanso	Supercrítico
Suave $0 < S_0 < S_c$	M1			$y >$	y_n	$>$	y_c		Remanso	Subcrítico
		M2			y_n	$> y >$	y_c		Caída	Subcrítico
			M3		y_n	$>$	y_c	$> y$	Remanso	Supercrítico
Crítica $0 < S_0 = S_c$	C1			$y >$	y_c	$=$	y_n		Remanso	Subcrítico
		C2			y_c	$= y =$	y_n		Paralelo al fondo del canal	Uniforme - crítico
			C3		y_c	$=$	y_n	$> y$	Remanso	Supercrítico
Empinada $0 > S_0 > S_c$	S1			$y >$	y_c	$>$	y_n		Remanso	Subcrítico
		S2			y_c	$> y >$	y_n		Caída	Supercrítico

Pendiente del canal	Designación			Relación de y con y_n e y_c				Tipo general de curva	Tipo de flujo	
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 1	Zona 2	Zona 3				
			S3		y_c	>	y_n	> y	Remanso	Supercrítico
Suave $S_0 < 0$	Ninguno			$y >$	$(y_n)^*$	>	y_c		Ninguno	Ninguno
		A2			$(y_n)^*$	> y >	y_c		Caída	Subcrítico
			A3		$(y_n)^*$	>	y_c	> y	Remanso	Supercrítico

Fuente: (Chow, 1959)

El remanso puede ser provocado por un obstáculo en la corriente, por ejemplo, una presa, un puente u obstrucciones de material flotante. La Figura N° 10 muestra un esquema del perfil del flujo en la zona de obstrucción.

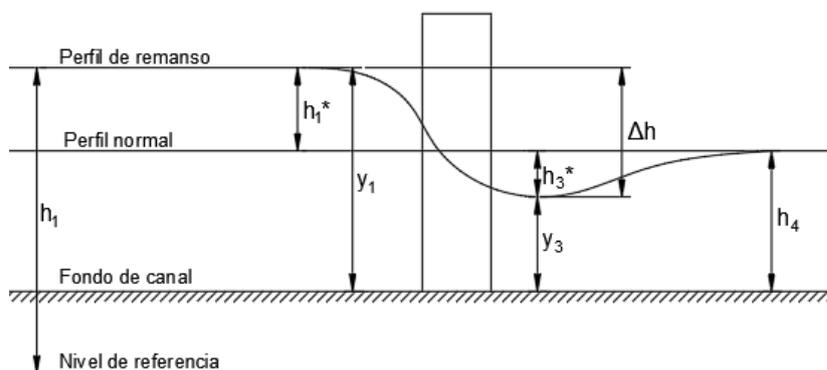


Figura N° 10 Esquema de un flujo a través de una constricción (Chow, 1959)

La designación de la curva aguas arriba de la obstrucción depende de la pendiente del fondo del canal y la ubicación del perfil de flujo respecto de la línea de profundidad crítica y la línea de profundidad normal.

Distintos autores evaluaron el incremento del remanso (h_1^*) producto de una acumulación de madera usando distintas metodologías y obteniendo diferentes puntos de vista sobre este fenómeno.

Schmocker & Hager (2013) distinguieron durante sus ensayos dos etapas en la formación de acumulación de madera: la primera en la que la acumulación produce el mayor incremento de remanso y la segunda donde se produce la

formación de un manto o alfombra que genera un menor incremento de remanso (Figura N° 11).

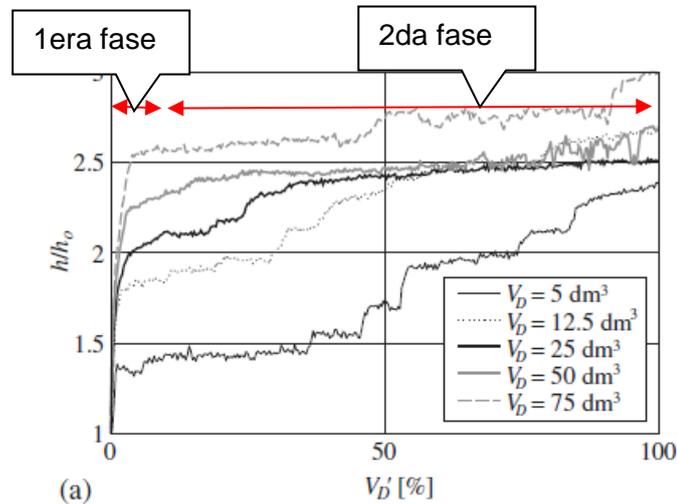


Figura N° 11 Desarrollo temporal de la profundidad de flujo relativo h/h_0 para diferentes volúmenes de madera V_D (Schmocker & Hager, 2013)

Donde h_0 es la profundidad del flujo antes de la obstrucción y h es la profundidad del flujo durante el remanso. Además, determinaron el volumen mínimo para el cual el incremento de remanso no supera la fase 1 y el volumen máximo para el cual la acumulación deja de producir incremento de remanso.

Los autores pudieron comprobar que el número de Froude inicial tuvo un efecto importante sobre la forma de la acumulación de madera y el incremento de remanso. En la Figura N° 12 (a) se muestra que la profundidad relativa del flujo aumenta linealmente con el número de Froude. Por otro lado, la gráfica (b) muestra una disminución lineal de la longitud de la acumulación de madera con el aumento del número de Froude F_0 . De esta manera, se determinaron ecuaciones empíricas para ambos casos para número de Froude $0.5 < F_0 < 1.5$:

Ecuación 7:
$$\frac{h}{h_0} = 1.4 + 1.9F_0$$

Ecuación 8:
$$\frac{L}{B_R} = 6.6 - 2.6F_0$$

Donde h_0 es el tirante inicial, h el tirante final, L la longitud de la acumulación y B_R el ancho del canal.

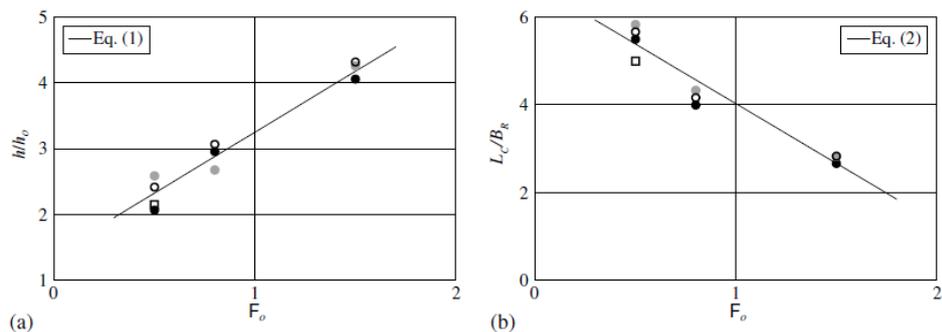


Figura N° 12 (a) Profundidad de flujo relativa h/h_o (b) Longitud relativa de alfombra de madera L/B_R para varios F_o (Schmocker & Hager, 2013)

Los estudios de Hartlieb (2017) demostraron que el número de Froude inicial y la densidad de la acumulación son parámetros que influyen significativamente en el incremento de remanso, sus resultados se plasman en la Figura N° 13 y Figura N° 14, sin embargo, la aleatoriedad de la formación de las acumulaciones de madera y la metodología de ensayos utilizada no permitieron establecer una relación más precisa de estas variables, por lo que el autor recomienda trabajar con volúmenes predefinidos de acumulaciones de material leñoso.

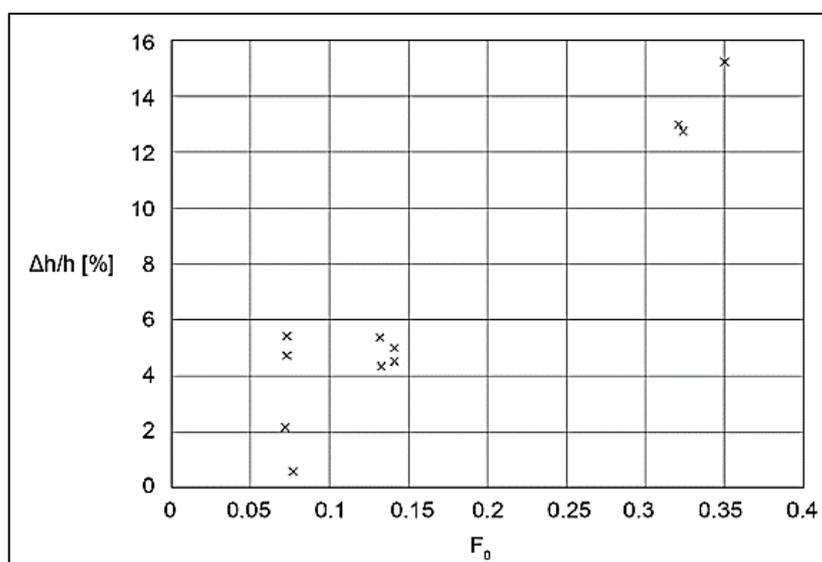


Figura N° 13 incremento relativo de remanso ($\Delta h/h_o$) vs. número de Froude inicial (F_o) para densidades de acumulación constantes ($\rho_D/\rho_W = 0.8$) (Hartlieb, 2017).

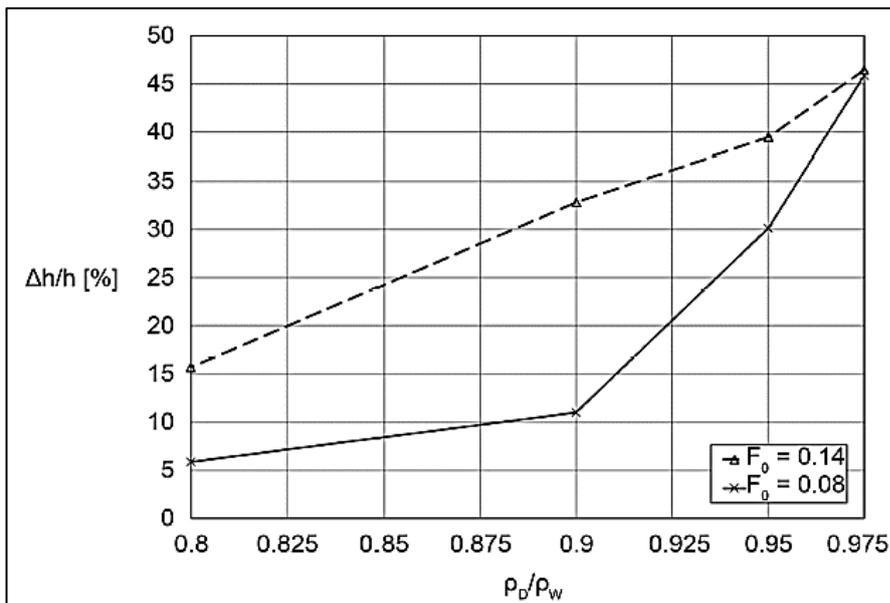


Figura N° 14 incremento relativo de remanso $\Delta h/h_o$ vs. densidad de acumulación relativa ρ_D/ρ_W para dos valores de número de Froude inicial (Hartlieb, 2017)

Schalko et al., (2018) demostraron que las acumulaciones más compactas generan mayor incremento de remanso debido a la mayor resistencia al flujo por su baja porosidad, lo cual se evidencia en la Figura N° 15, de igual manera, el contenido de material fino reduce la porosidad de la acumulación, lo cual se muestra en Figura N° 16.

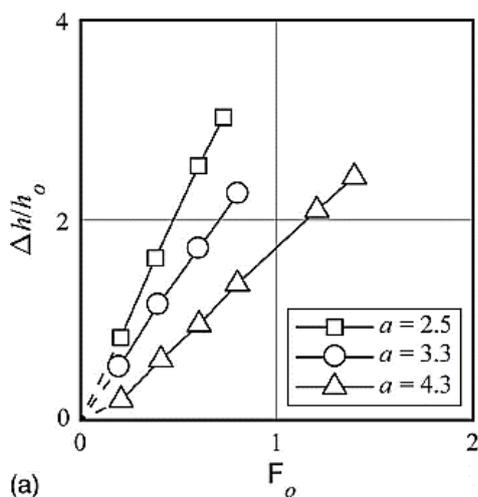


Figura N° 15 $\Delta h/h_o$ vs. F_o variando la compactidad (Schalko et al., 2018)

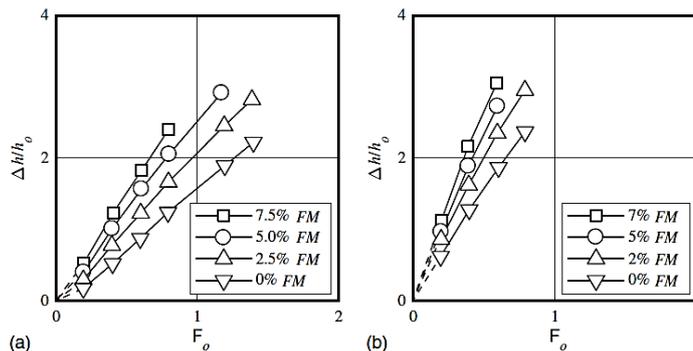


Figura N° 16 $\Delta h/h_o$ vs. F_o para diferentes porcentajes de FM a) para una capacidad baja $a = 4.2$ b) para una capacidad alta $a = 2.8$ (Schalko et al., 2018)

En base a sus experimentos, plantearon la Ecuación 9 para determinar el incremento de remanso en función del número de Froude, contenido de material fino (FM), la capacidad (a) y un factor de desviación (u) para acumulaciones predefinidas. Esta ecuación de diseño representa un cálculo conservador para determinar el incremento de remanso.

$$\text{Ecuación 9:} \quad \frac{\Delta h}{h_o} = 5.4 \frac{F_o u^{1/3} (9FM+1)}{a^{4/3}}$$

Más adelante, Schalko et al. (2019) realizaron ensayos con acumulaciones naturales de madera y plantearon una modificación de la ecuación anterior para determinar el incremento de remanso para acumulación naturales:

$$\text{Ecuación 10:} \quad \frac{\Delta h}{h_o} = 5.4 f_A \frac{F_o (V_s/h_o B d_L)^{1/3} (9FM+1)}{a}$$

Donde V_s es el volumen sólido de la acumulación, d_L es el diámetro de los troncos y f_A es el factor de tipo de acumulación que toma el valor de 0.55 para acumulaciones en lecho fijo y 0.30 para acumulaciones en lecho móvil. Los autores plantean la Ecuación 10 para acumulaciones con densidad de madera de 600 kg/m^3 , para densidades mayores recomiendan aumentar el factor f_A .

En la Figura N° 17 se muestran las dos configuraciones de ensayos utilizadas por Schalko et al. (2018) y Schalko et al. (2019) para acumulaciones predefinidas y acumulaciones naturales de madera respectivamente.

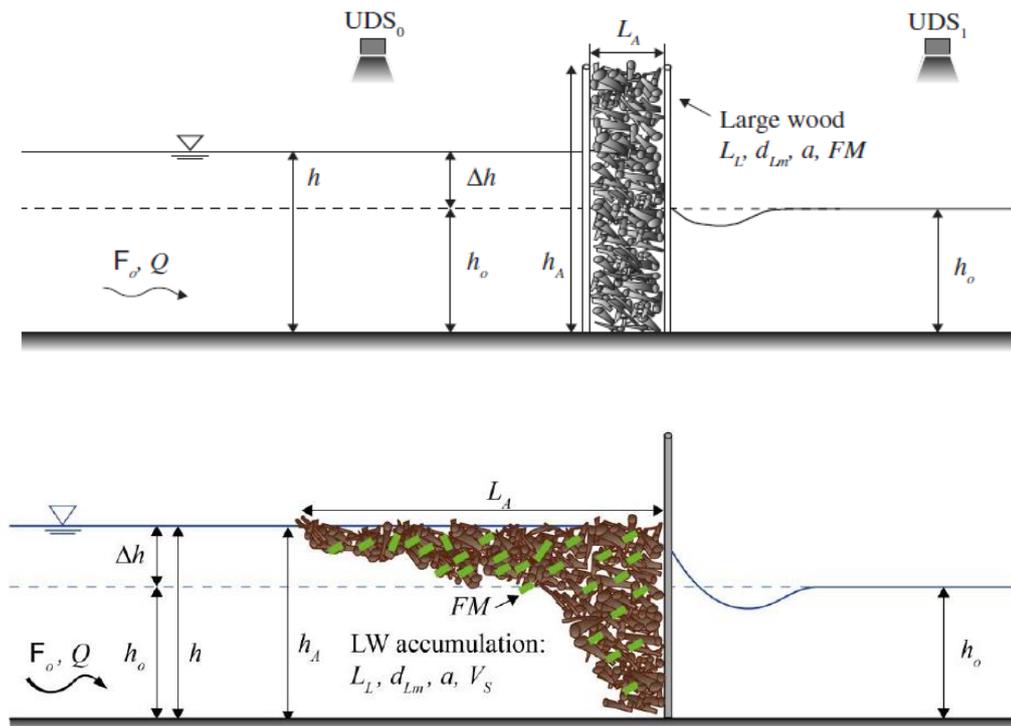


Figura N° 17 Arriba) Esquema de acumulación de (Schalko et al., 2018) Abajo) Esquema de acumulación de (Schalko et al., 2019)

Al-Zawaidah et al. (2021) evidenciaron el efecto de la densidad de material flotante en la forma de las acumulaciones. Las piezas más ligeras se ubicaban cerca de la superficie del agua, mientras que las más densas se sumergían al fondo de la rejilla, ambas con formas triangulares (Figura N° 18).

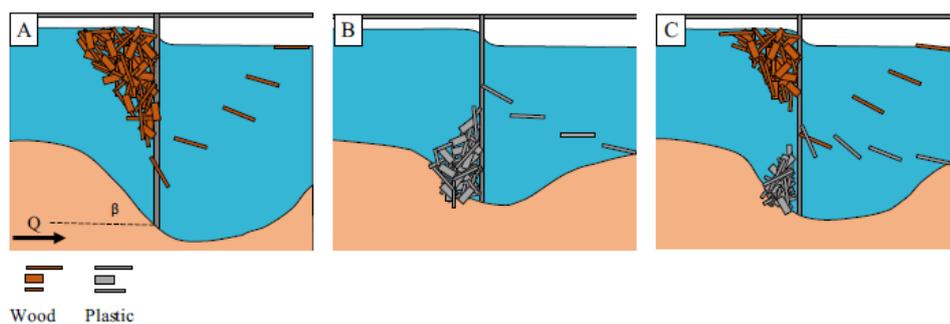


Figura N° 18 Forma de acumulación para materiales de distinta densidad (Al-Zawaidah et al., 2021)

2.6 EFECTOS DE ESCALA

Los experimentos con modelos físicos intentan representar las condiciones de un prototipo a pequeña escala. En flujos libres (por ejemplo, canales o ríos) los

efectos de la gravedad son predominantes. La similitud entre modelo y prototipo se desarrolla usualmente con la similitud de Froude. Los modelos a escala basados en la similitud de Froude pueden sobreestimar los efectos de la tensión superficial y la viscosidad del fluido dado que el uso de otro fluido con dichas propiedades escaladas no es posible. Esto puede producir efectos sobre la descarga del flujo aguas abajo de un represamiento.

Furlan (2019) menciona que el efecto de la tensión superficial sobre la curva de descarga es despreciable si la altura de flujo excede 0.015 a 0.02 m en particular sobre los vertederos tipo ogee. Pfister et al. (2013) menciona que un tirante de 0.015 m genera un error de 5% solo en términos del coeficiente de descarga de un vertedero tipo piano. Fritz et al. (1998) se menciona que los efectos de la viscosidad y tensión superficial en descargas de presas de tierra se dan para sobrelevaciones menores a 0.05 m. En el presente estudio se trabajó con tirantes de 0.06 m hasta 0.10 m y con 0.07 m hasta 0.30 m de altura de tirante para el flujo con remanso los cuales están por encima de los límites mencionados.

El modelo físico diseñado no está relacionado a un prototipo o caso de estudio en particular, por lo tanto, no se tiene definido un factor de escala. El objetivo fue evaluar distintos escenarios de bloqueo con troncos artificiales y estudiar la influencia de la densidad del material flotante sobre el flujo y sobre la acumulación de troncos.

2.7 TEORÍA DE ERRORES

La teoría de errores de Medina (2017) menciona que los errores estocásticos se presentan en mediciones de valores fluctuantes al azar, pero que estos tienden a agruparse en un valor central el cual se supone es el valor medio o promedio de cada serie de datos.

Las fluctuaciones debidas al azar influyen en los resultados experimentales, ocasionando que las variables modifiquen su valor en cada corrida del experimento. Para encontrar la incertidumbre asociada a estas mediciones se calcula la desviación estándar.

2.7.1 Desviación estándar

La desviación estándar permite cuantificar la dispersión de los valores de la variable respecto al valor medio del conjunto y está dada por la Ecuación 11.

$$\text{Ecuación 11: } \sigma^2 = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Donde s es la desviación estándar de la muestra y el n el número de muestras. De acuerdo con esto, el error relativo estándar se representa mediante la Ecuación 12.

$$\text{Ecuación 12: } e^* = \frac{s}{\bar{x} \cdot \sqrt{n}}$$

Donde \bar{x} es el promedio de la muestra.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO

3.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO UTILIZADO

Los experimentos físicos de canal fueron dirigidos en el Área Didáctica del Laboratorio Nacional de Hidráulica y sirvieron para investigar el efecto de la densidad de las piezas de una acumulación en el aumento de remanso, aguas arriba de una rejilla de retención. Para ello se acondicionó un modelo físico formado por un canal de pendiente variable y una rejilla de retención cuyas dimensiones se adaptaron al tamaño de los troncos.

La configuración del modelo se muestra en la Figura N° 19, donde el canal de pendiente variable tiene 10.6 m de largo, 0.5 m de alto y 0.25 m de ancho, con pendiente de fondo regulable. Cuenta con una caja estabilizadora de flujo en la entrada para reducir la turbulencia. La descarga de la entrada fue regulada con una válvula con capacidad de descarga de hasta 40 l/s al ingreso. Las condiciones aguas abajo del canal fueron controladas con una compuerta de persianas.

Después de una evaluación, la rejilla que se seleccionó para las simulaciones consistió en 8 barras verticales de acero inoxidable con una sección circular de 3 mm de diámetro, con un espaciamiento axial de 3 cm. La rejilla fue colocada 6.3 m aguas abajo de la entrada del canal. El espaciamiento de las barras verticales fue seleccionado para ser menor que 1.5 veces la longitud de los troncos (Lange & Bezzola, 2006). La altura de flujo h_o y la altura de remanso fueron medidos con un limnómetro.

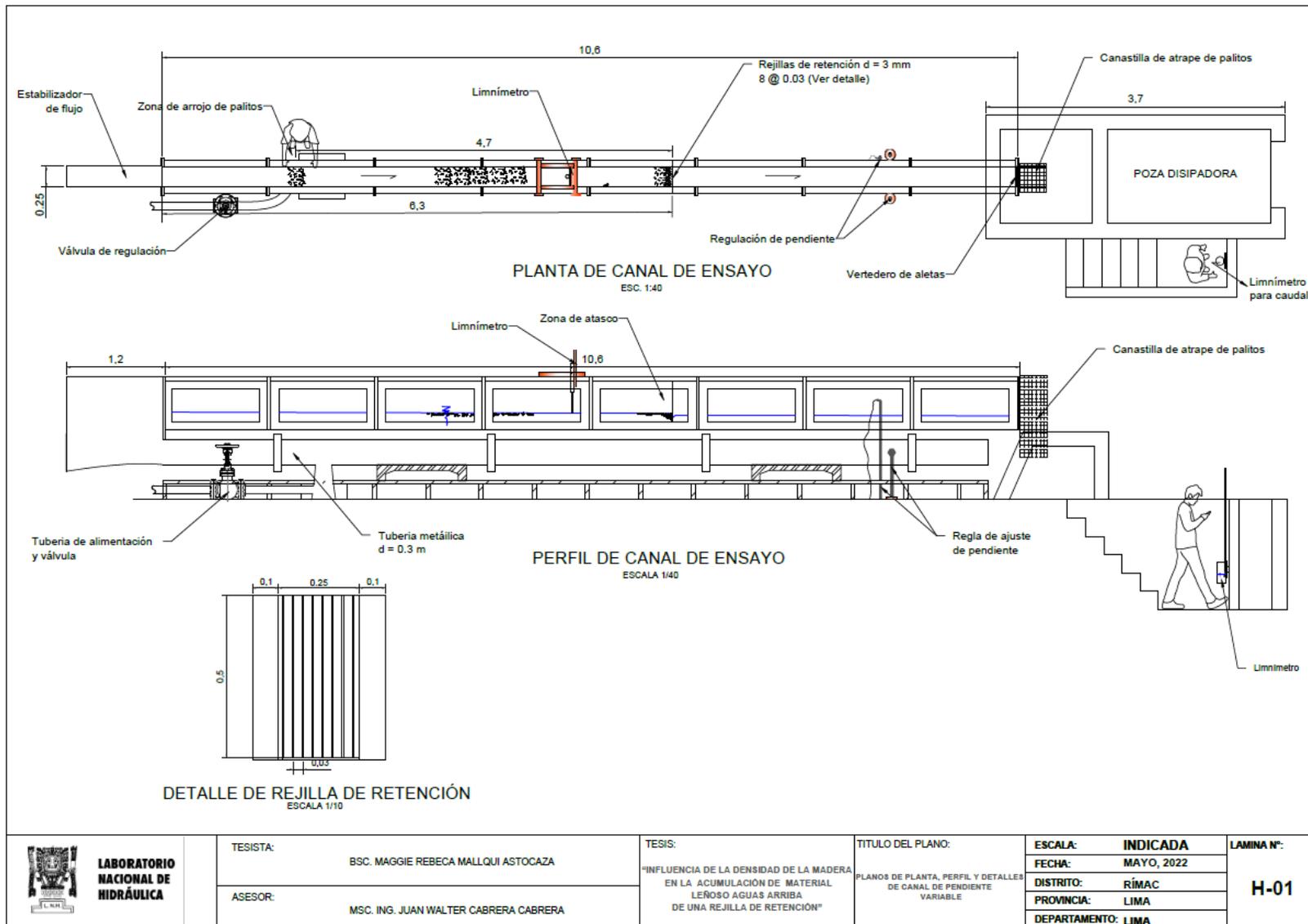


Figura N° 19 Esquema de ejecución de ensayos (Elaboración propia)

En el esquema de ejecución de ensayos en planta y en perfil se puede observar el detalle de la rejilla de retención. La ubicación del lanzador de palitos fue 4.7 m aguas arriba de la rejilla de retención para reducir el efecto de las ondas durante la formación de la acumulación de troncos. La rejilla de retención se ubicó en la parte media de una ventana para visualizar los cambios en el flujo.

Se establecieron 16 puntos de medición a lo largo del canal, la Figura N° 20 muestra la ubicación de los ejes aguas arriba y aguas abajo de la rejilla de retención.

Las condiciones de flujo de aproximación fueron definidos por la altura del flujo de aproximación h_o y el número de Froude, mediante la regulación del caudal y la pendiente del canal antes de incorporar el material flotante. Las características de la acumulación de LW comprenden la densidad de troncos (ρ_T), la longitud de los troncos (L_T), el diámetro de los troncos (d_L), la compacidad de la acumulación (α) y el volumen de la acumulación sólido y suelto. La Figura N° 21 muestra el esquema de acumulación de troncos con las características del flujo y la acumulación de material flotante.

El detalle de la planta y perfil se puede visualizar con mayor tamaño en el Anexo C: Plano de configuración experimental, del presente estudio.

3.2 ACUMULACIÓN DE MADERA ARTIFICIAL

Para simular la acumulación de material leñoso se utilizaron piezas artificiales fabricadas en impresoras 3D. Se diseñaron en total 4 grupos de piezas con diferentes densidades menores a 1000 kg/m^3 para asegurar que las piezas floten. Cada grupo fue representado por un color: verde ($400 \pm 30 \text{ kg/m}^3$), azul ($600 \pm 30 \text{ kg/m}^3$), amarillo ($800 \pm 30 \text{ kg/m}^3$) y rojo ($950 \pm 30 \text{ kg/m}^3$). Cada grupo se conformó de 700 piezas de troncos artificiales haciendo un volumen sólido total de 0.0033 m^3 .

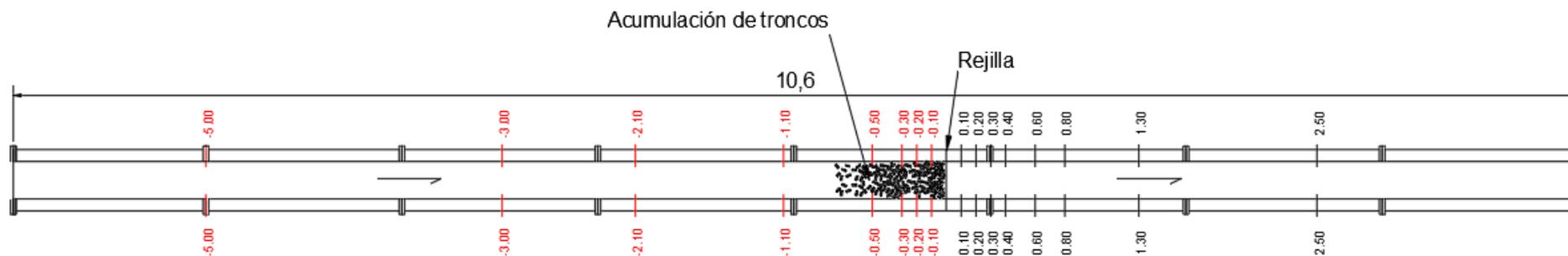


Figura N° 20 Esquema de secciones de medición (Elaboración propia)

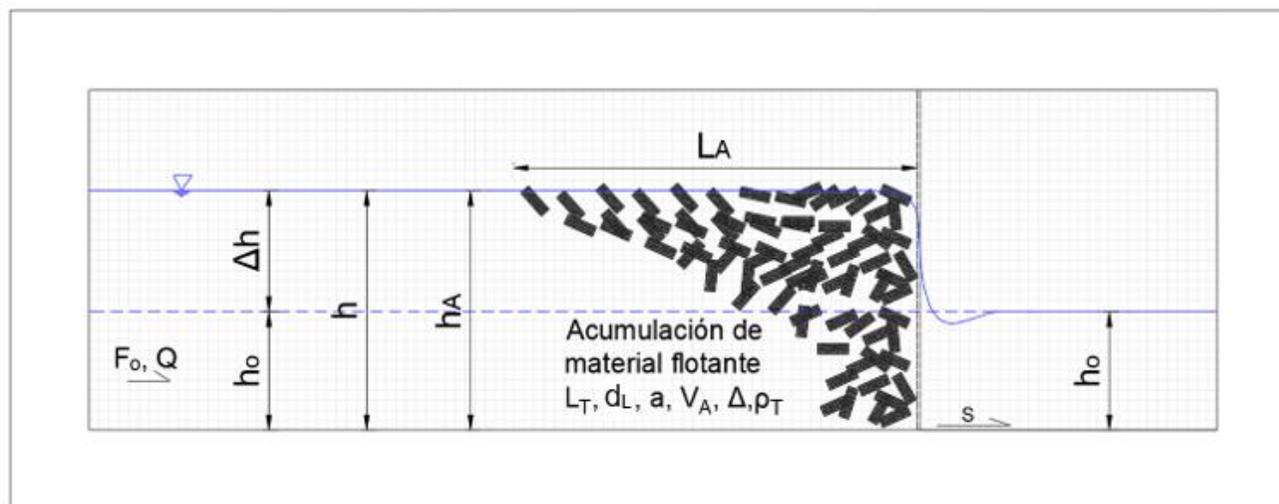


Figura N° 21 Esquema de acumulación de troncos (Elaboración propia)

3.2.1 Fabricación de piezas 3D

Para evitar variaciones en el peso de las piezas por efecto de la absorción de humedad durante los ensayos, se optó por realizar las simulaciones con troncos artificiales fabricados en impresoras 3D con PLA (ácido poliláctico), cuya densidad es de 1.24 g/cm³.

La Figura N° 22 muestra los parámetros de fabricación para cada grupo, donde se observa que la principal diferencia es la densidad de relleno de las piezas para poder llegar a la densidad de peso requerido. Así se determinó que las densidades de relleno para las piezas verdes debían ser 5 %, para las piezas azules 15 %, para las piezas amarillas 20 % y 25 % para las piezas rojas que son las más densas. Estos valores de porcentaje de relleno se establecieron mediante prueba y error para cada peso requerido.

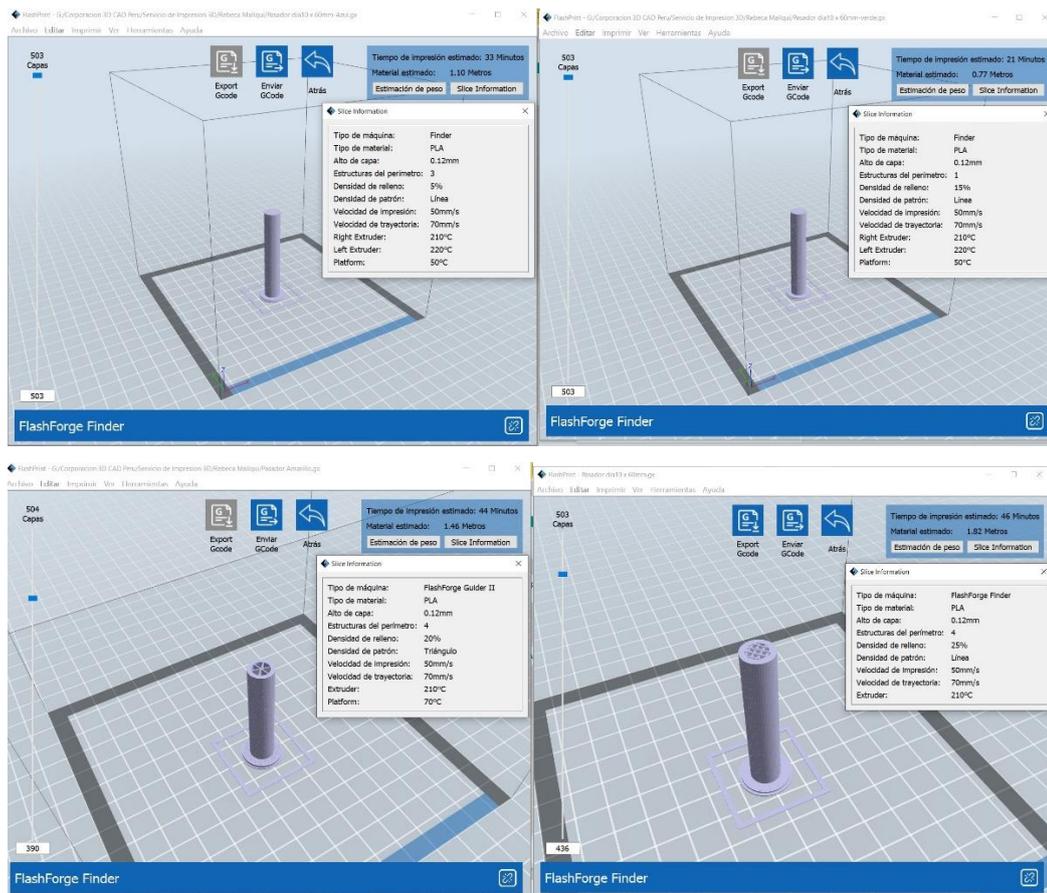


Figura N° 22 Parámetros de fabricación (Elaboración propia)

La Figura N° 23 muestra la impresora 3D utilizada para la fabricación de palitos, una máquina de la marca FlashForge Finder.

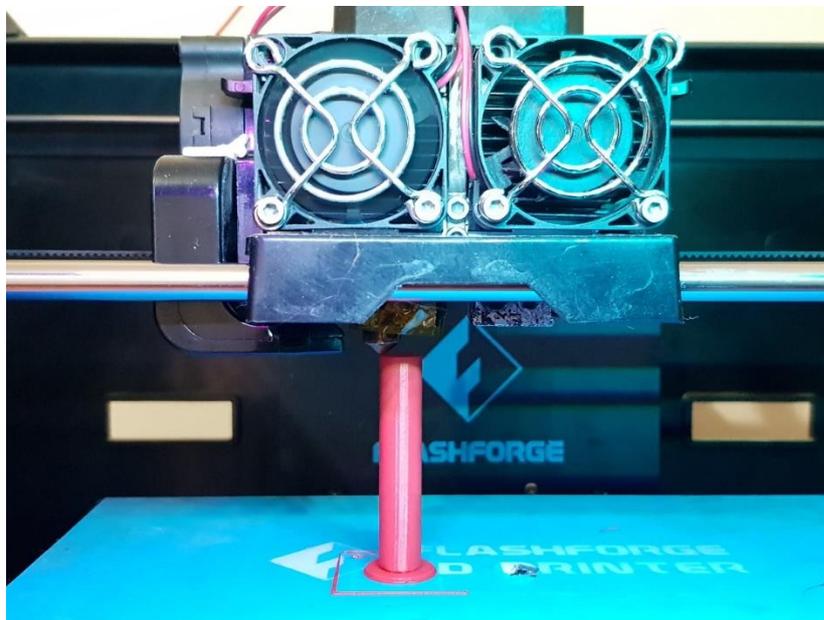


Figura N° 23 Fabricación de pieza roja ($\rho_T = 950 \pm 30 \text{ kg/m}^3$). en impresoras 3D.(Elaboración propia)

Las características de los troncos artificiales se muestran en la Tabla N° 4. La densidad de las piezas durante la fabricación se controló tomando en cuenta su peso en la balanza y su volumen mediante las dimensiones pre establecidas para lograr la relación de la Ecuación 2.

Tabla N° 4 Características de troncos artificiales

GRUPO	Longitud (cm)	Diámetro (cm)	Masa (g)	Cantidad	Densidad (kg/m ³)
VERDE	6.00	1.00	1.88±0.13	700	400 ±30
AZUL	6.00	1.00	2.83±0.13	700	600 ±30
AMARILLO	6.00	1.00	3.77±0.13	700	800 ±30
ROJO	6.00	1.00	4.48±0.13	700	950 ±30

Fuente: Elaboración propia

Los piezas fueron pesadas en una balanza gramera con 2 decimales de precisión (Figura N° 24). Las piezas que no resultaban dentro del rango de masa establecido se descartaron y se reemplazaba por una nueva pieza.



Figura N° 24 Tronco artificial de mayor densidad ($\rho_T = 950 \pm 30 \text{ kg/m}^3$) (Elaboración propia)

La Figura N° 25 muestra los 4 grupos de piezas fabricadas identificadas por un color.



Figura N° 25 Grupos de palitos artificiales fabricados (Elaboración propia)

3.3 PROGRAMA DE ENSAYOS Y PROCEDIMIENTOS

Se realizaron en total 75 ensayos de los cuales 60 permitieron analizar el aumento de remanso cuantitativamente y 15 permitieron analizar la distribución de piezas de distintas densidades de manera visual. En la Tabla N° 5 se muestran los valores y rango de valores de los principales parámetros preestablecidos para realizar los ensayos.

Tabla N° 5 Valores de parámetros preestablecidos

Parámetros asociados a la acumulación de madera	
Volumen sólido de la acumulación V_s (m ³)	0.0033
Densidad de la madera ρ_T (kg/m ³)	400, 600, 800, 950
Parámetros asociados al flujo	
Número de Froude F_o	0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.3
Profundidad de agua inicial h_o (cm)	6 - 10
Caudal Q_o (l/s)	5 - 17.1

Fuente: Elaboración propia

Se consideraron 20 escenarios con la combinación de los valores de densidades de madera y los números de Froude, y para evaluar la reproducibilidad de los experimentos se ensayó un mismo escenario 3 veces. Todos los tirantes de agua medidos antes y después del lanzamiento de palitos se pueden ver en la Tabla 2 del ANEXO A: TABLAS del presente documento.

Las simulaciones se iniciaron con la regulación del caudal de ingreso y la pendiente del canal, hasta la obtención aproximada del tirante predefinido de acuerdo con el esquema de la Figura N° 19. Los valores de los parámetros se muestran en la Tabla N° 6.

Tabla N° 6 Programa de ensayos

Escenario	Densidad (kg/m³) (1)	Hvert (cm) (2)	Q_o (l/s) (3)	S_o (%) (4)	h_o (m) (5)	F_o (6)
1	400	13.93	5.01	0.02	0.10	0.20
		13.93	5.01	0.02	0.10	0.20
		13.93	5.01	0.02	0.10	0.20

Escenario	Densidad (kg/m ³) (1)	Hvert (cm) (2)	Q _o (l/s) (3)	S _o (%) (4)	h _o (m) (5)	F _o (6)
2	600	13.93	5.01	0.02	0.10	0.20
		14.00	5.07	0.02	0.10	0.20
		14.00	5.07	0.02	0.10	0.20
3	800	14.00	5.07	0.02	0.10	0.20
		14.00	5.07	0.02	0.10	0.20
		14.00	5.07	0.02	0.10	0.20
4	950	13.93	5.01	0.02	0.10	0.20
		13.93	5.01	0.02	0.10	0.20
		13.93	5.01	0.02	0.10	0.20
5	400	12.23	3.62	0.02	0.06	0.32
		12.25	3.64	0.02	0.06	0.32
		12.25	3.64	0.02	0.06	0.33
6	600	12.24	3.63	0.02	0.06	0.33
		12.27	3.65	0.02	0.06	0.33
		12.25	3.64	0.02	0.06	0.34
7	800	12.28	3.66	0.02	0.06	0.32
		12.15	3.56	0.02	0.06	0.32
		12.15	3.56	0.02	0.06	0.32
8	950	12.20	3.60	0.02	0.06	0.31
		12.26	3.64	0.02	0.06	0.32
		12.26	3.64	0.02	0.06	0.32
9	400	18.38	10.02	0.02	0.10	0.42
		18.22	9.81	0.02	0.10	0.41
		18.22	9.81	0.02	0.10	0.42
10	600	18.30	9.91	0.02	0.10	0.42
		18.30	9.91	0.02	0.10	0.42
		18.30	9.91	0.02	0.10	0.42
11	800	18.38	10.02	0.02	0.10	0.42
		18.35	9.98	0.02	0.10	0.42
		18.30	9.91	0.02	0.10	0.43
12	950	18.03	9.55	0.02	0.10	0.40
		18.33	9.95	0.02	0.10	0.42
		18.21	9.79	0.02	0.10	0.42
13	400	15.26	6.30	0.15	0.06	0.52
		15.20	6.23	0.15	0.06	0.51
		15.20	6.23	0.15	0.06	0.52
14	600	15.17	6.20	0.15	0.06	0.52
		15.16	6.19	0.15	0.06	0.54
		15.16	6.19	0.15	0.06	0.55

Escenario	Densidad (kg/m ³) (1)	Hvert (cm) (2)	Q _o (l/s) (3)	S _o (%) (4)	h _o (m) (5)	F _o (6)
15	800	15.22	6.25	0.15	0.06	0.53
		15.22	6.25	0.15	0.06	0.53
		15.22	6.25	0.15	0.06	0.53
16	950	15.22	6.25	0.15	0.06	0.53
		15.22	6.25	0.15	0.06	0.55
		15.22	6.25	0.15	0.06	0.53
17	400	22.59	16.78	0.79	0.06	1.30
		22.66	16.91	0.79	0.07	1.27
		22.77	17.12	0.79	0.07	1.31
18	600	22.76	17.10	0.80	0.07	1.32
		22.77	17.12	0.80	0.07	1.32
		22.67	16.93	0.80	0.06	1.36
19	800	22.76	17.10	0.80	0.06	1.33
		22.56	16.73	0.80	0.07	1.27
		22.63	16.86	0.80	0.07	1.30
20	950	22.77	17.12	0.80	0.07	1.29
		22.57	16.75	0.80	0.07	1.25
		22.64	16.88	0.80	0.07	1.27

Fuente: Elaboración propia

Donde la columna (1) de la Tabla N° 6 es la densidad de material flotante en cada escenario, la columna (2) es la altura del agua sobre el vertedero para la regulación de caudal, la columna (3) y la columna (4) son el caudal y la pendiente regulados para obtener el tirante y el número de Froude predefinidos para el flujo de aproximación.

Tabla N° 7 Error relativo estándar de parámetros predeterminados (%)

Escenarios	Q _o	S _o	h _o	F _o
1 al 4	0.19	0.00	0.09	0.25
5 al 8	0.26	0.00	0.31	0.62
9 al 12	0.38	0.00	0.19	0.42
13 al 16	0.14	0.00	0.49	0.70
17 al 20	0.26	0.16	0.40	0.72

Fuente: Elaboración propia

La Tabla N° 7 muestra la incertidumbre de las mediciones de los parámetros predefinidos representados por el error relativo estándar para cada grupo de escenarios. Los errores relativos estándar no superan el 1.0 % para todos los casos, sin embargo, se muestra un incremento de la incertidumbre para la pendiente de fondo (S_o), el tirante inicial (h_o) y el número de Froude (F_o) a medida que se incrementa el número de Froude propiamente dicho en los ensayos.

Durante los experimentos, los palitos se incorporaron al flujo 4.7 m aguas arriba de la rejilla de retención en grupos de 10 % del total y fueron atrapados en una canastilla ubicada 4.3 m aguas abajo de la rejilla. A la salida del canal, se recogieron y no fueron incorporados nuevamente al flujo, se contabilizaron y se determinó el porcentaje de retención de palitos en la rejilla de retención con la diferencia del total.

Se utilizó un limnómetro para medir los tirantes en los ejes que se muestran en la Figura N° 20. Adicionalmente, se adecuó una cámara con un trípode de 1.50 m de alto a 2 m frente a la ventana del canal para capturar el incremento del tirante y la formación lateral de la acumulación de palitos. También se colocó una cámara a 2 m de altura sobre el canal para capturar el proceso de formación de la acumulación en planta.

La reproducibilidad fue evaluada corriendo 3 veces la misma condición de flujo y densidad de acumulación, y la duración de cada prueba fue de 30 minutos. En general, el procedimiento experimental puede ser resumido por los siguientes pasos:

- 1° Regulación de caudal y pendiente de canal hasta obtener h_o y F_o predefinidos.
- 2° Adición gradual de paquetes de palitos de 8%-10% del total del volumen sólido V_s (entre 60 y 70 piezas).
- 3° Medición del tirante aguas arriba y aguas abajo de la rejilla de retención.

4° Determinación de las características de la acumulación (volumen suelto, tamaño y longitud) basado en el análisis videométricos de las acumulaciones aguas arriba de la rejilla.

La determinación del volumen suelto se llevó a cabo estimando el área lateral de la acumulación por el ancho del canal. El área lateral se estimó con la forma de acumulación en la ventana lateral del canal. El volumen sólido se estimó como la suma total de los volúmenes de todos los palitos de la acumulación.

$$\text{Ecuación 13: } V_s = A_L * B$$

Donde B es el ancho del canal y A_L es el área lateral de la acumulación medido mediante un análisis videométrico y se muestran en el ANEXO B: Panel fotográfico.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo se divide en los resultados de efectos de la configuración del modelo físico, los cuales se fueron identificando con el proceso de simulación, resultados de los ensayos de reproducibilidad y el análisis de resultados de la influencia de la densidad sobre el aumento de remanso y la forma de la acumulación de troncos.

4.1. EFECTOS DE LA CONFIGURACIÓN DEL MODELO FÍSICO

4.1.1. Efectos de la rejilla de retención sobre el porcentaje de retención

Es importante mencionar algunos efectos que se fueron identificando durante los ensayos para posteriores investigaciones. Se diseñaron en total 3 rejillas de retención para formar la acumulación. Todas se diseñaron teniendo en cuenta las consideraciones de Lange & Bezzola (2006). La primera rejilla (Figura N° 26 izquierda) se diseñó con espaciamiento de 4 cm, sin embargo, se observó que no retenía troncos para números de Froude subcríticos.



Figura N° 26 Rejillas de retención de troncos (Elaboración propia)

La segunda rejilla (Figura N° 26 medio) se diseñó con un espaciamiento mucho menor, de 2 cm, para poder retener mayor cantidad de troncos. Si bien la rejilla retenía gran porcentaje de troncos, los postes fueron tan delgados que no lograron soportar el empuje de la acumulación y se deformaron.

Finalmente se diseñó la tercera rejilla con 3 cm de espaciamiento y 3 mm de diámetro (Figura N° 26 derecha) con la que se simularon todos los ensayos y cuyas dimensiones se detallan en la descripción del modelo físico. Con esta rejilla se lograron porcentajes de retención aceptables (la mayoría por encima del 50 %) y postes lo suficientemente anchos para evitar la deformación horizontal. Los porcentajes de troncos retenidos en la rejilla se muestran en la columna 3 de la Tabla N° 8.

Tabla N° 8 Porcentaje de retención de palitos

Escenario	Densidad (±30 kg/m³) (1)	F_o (2)	Retención (%) (3)
1	400	0.20	99.43
		0.20	99.43
		0.20	99.43
2	600	0.20	99.14
		0.20	99.14
		0.20	98.43
3	800	0.20	88.86
		0.20	96.14
		0.20	95.86
4	950	0.20	88.14
		0.20	86.43
		0.20	85.43
5	400	0.32	98.71
		0.32	100.00
		0.33	99.86
6	600	0.33	97.71
		0.33	96.29
		0.34	96.71
7	800	0.32	93.57
		0.32	94.43
		0.32	93.29
8	950	0.31	97.14
		0.32	92.29
		0.32	94.43
9	400	0.42	98.43
		0.41	96.86
		0.42	95.57
10	600	0.42	91.29

Escenario	Densidad ($\pm 30 \text{ kg/m}^3$) (1)	F_o (2)	Retención (%) (3)
		0.42	91.00
		0.42	91.71
11	800	0.42	91.43
		0.42	90.00
		0.43	93.71
12	950	0.40	81.00
		0.42	88.00
		0.42	88.00
13	400	0.52	94.57
		0.51	94.57
		0.52	96.29
14	600	0.52	93.29
		0.54	93.29
		0.55	89.14
15	800	0.53	91.71
		0.53	91.86
		0.53	89.86
16	950	0.53	71.14
		0.55	90.86
		0.53	85.86
17	400	1.30	62.14
		1.27	53.29
		1.31	67.43
18	600	1.32	48.43
		1.32	49.86
		1.36	40.86
19	800	1.33	49.00
		1.27	52.00
		1.30	62.00
20	950	1.29	56.43
		1.25	68.43
		1.27	59.43

Fuente: Elaboración propia

Los porcentajes de retención varían desde 40.9 % hasta 100 %. Posteriormente, los resultados de los ensayos mostraron que los porcentajes de retención disminuían con el número de Froude del flujo de aproximación.

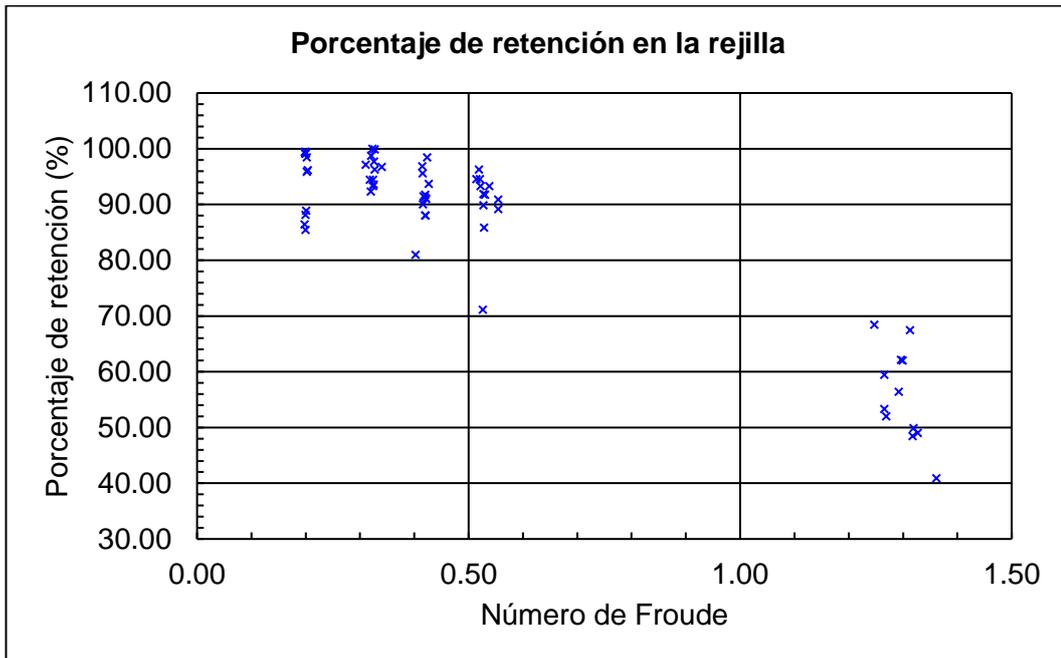


Figura N° 27 Porcentaje de retención vs. Número de Froude (Elaboración propia)

En la Figura N° 27 se observa que el porcentaje de retención para flujo de aproximación supercrítico se encuentra por debajo del 70 % y el porcentaje de retención para el flujo subcrítico por encima del 70 %.

4.1.2. Efectos de la rejilla de retención sobre el flujo

La rejilla de retención tuvo influencia en el flujo de aproximación en función del número de Froude. Para flujos subcríticos, la rejilla de retención tuvo un efecto insignificante en las condiciones del flujo de aproximación y en el aumento de remanso, sin embargo, para el caso del flujo supercrítico ($F_o = 1.3$) se observó la presencia de turbulencia aguas abajo de la rejilla de retención.



Figura N° 28 Efecto de la rejilla para número de Froude $F_o = 0.2$ (Elaboración propia)



Figura N° 29 Efecto de la rejilla para número de Froude $F_o = 0.3$ (Elaboración propia)



Figura N° 30 Efecto de la rejilla para número de Froude $F_o = 0.4$ (Elaboración propia)



Figura N° 31 Efecto de la rejilla para número de Froude $F_o = 0.5$ (Elaboración propia)

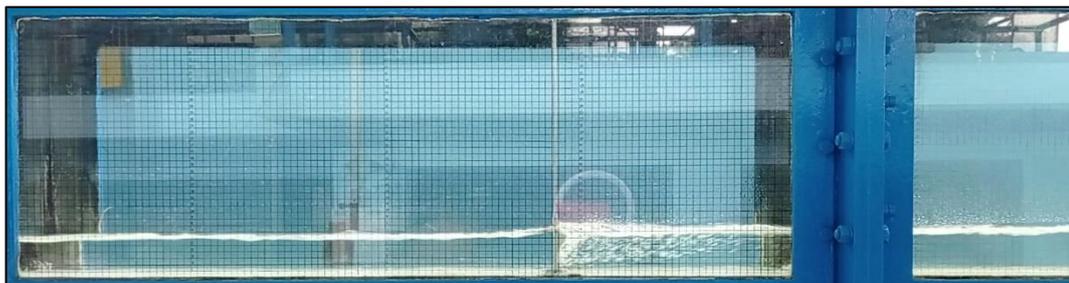


Figura N° 32 Efecto de la rejilla para número de Froude $F_o = 1.3$ (Elaboración propia)

En la Figura N° 28 se observa la generación de turbulencia debido a la rejilla de retención cuando se incrementa el número de Froude y las variaciones en los tirantes de agua; mientras que para $F_o = 0.2, 0.3, 0.4$ se considera insignificante el aumento de remanso para $F_o = 0.5$ y $F_o = 1.3$ se observa cambios en el flujo. En la Tabla N° 9 se muestran los tirantes medidos para cada caso.

Tabla N° 9 Efecto de remanso debido a la rejilla de retención

Número de Froude	Tirante inicial (cm)	Tirante aguas abajo de la rejilla (cm)	Efecto
0.2	10.0	10.0	Insignificante
0.3	6.0	6.0	Insignificante
0.4	10.0	9.8	Insignificante
0.5	6.0	5.8	Flujo inestable aguas abajo
1.3	6.0	7.0	Turbulencia e incremento del nivel de agua.

Fuente: Elaboración propia

Dado que los efectos de la rejilla en el flujo inicial se incrementan a medida que el número de Froude aumenta, solo se realizaron ensayos con número de Froude subcríticos menores a 0.5. Sin embargo, para evaluar el comportamiento del remanso producto de la acumulación de madera en flujo supercrítico, se trabajó con un solo valor de número de Froude $F_o = 1.3$. Por otro lado, el estado técnico de la bomba eléctrica limitaba el número de ensayos en el plazo planificado del uso del laboratorio.

4.1.3. Efectos de la velocidad de lanzado de palitos

Otra observación durante los ensayos fue la velocidad de lanzado que tuvo que ser ajustado a fin de obtener porcentajes de acumulación aceptables. La velocidad de incorporación de palitos al flujo varió en función del número de Froude del flujo de aproximación. Para $F_o = 1.3$ (escenarios del 17 al 20) los grupos se incorporaron al flujo cada dos segundos a fin de asegurar un porcentaje de retención de palitos por encima del 50%. En el caso de los flujos subcríticos (escenarios del 1 al 16), los grupos se añadieron cada 10 segundos y se esperó que el flujo se encontrara estable para iniciar las mediciones de tirantes.

4.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE REPRODUCIBILIDAD

Como se explicó anteriormente, dada la aleatoriedad que implican los experimentos físicos con acumulaciones de material flotante, se evaluó la reproducibilidad simulando 3 veces cada condición de flujo y se determinó el error

relativo estándar de acuerdo con la teoría de errores, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla N° 10 Error relativo estándar del incremento de remanso relativo

N°	$\Delta h/h_0$	Error relativo estándar % (e*)
1	0.03	4.48
	0.03	
	0.02	
2	0.02	11.01
	0.03	
	0.03	
3	0.17	5.02
	0.18	
	0.15	
4	0.74	2.71
	0.80	
	0.74	
5	0.22	6.00
	0.26	
	0.22	
6	0.38	4.46
	0.41	
	0.35	
7	0.78	5.94
	0.72	
	0.64	
8	1.33	4.07
	1.44	
	1.53	
9	0.35	0.37
	0.35	
	0.35	
10	0.56	3.46
	0.62	
	0.56	
11	1.00	2.07
	0.97	
	1.04	
12	1.62	1.39
	1.59	
	1.67	

N°	$\Delta h/h_o$	Error relativo estándar % (e*)
13	0.47	2.83
	0.51	
	0.51	
14	0.85	4.12
	0.98	
	0.93	
15	1.26	2.74
	1.16	
	1.26	
16	2.26	2.02
	2.27	
	2.13	
17	2.10	3.23
	1.89	
	2.08	
18	2.34	5.64
	2.78	
	2.38	
19	3.17	0.23
	3.15	
	3.17	
20	3.48	3.08
	3.40	
	3.14	
Máximo		11.01
Mínimo		0.23
Medio		3.74

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Tabla N° 10, los errores relativos estándar (e*) para los aumentos relativos de remanso para los 20 escenarios varían desde 0.23 % hasta 11.01 % con un valor medio de 3.74 %. Estos valores se encuentran en el rango recomendado por Schalko et al. (2018) quien considera aceptable porcentajes de errores relativos estándar por debajo del 15 % para ensayos con acumulaciones de madera.

Además, se realizaron los análisis de incertidumbre de los principales parámetros medidos en el canal. En las mediciones de tirantes iniciales (h_o) los errores relativos estándar varían desde 0.09 % hasta 19.02 % con un valor medio de 3 %. En las mediciones de tirantes finales (h) los errores relativos estándar varían desde 0.03 % hasta 37.06 % con un valor medio de 8.83 %. Los errores producidos en las mediciones de tirantes se debe principalmente a las variaciones en el flujo producto de las vibraciones en el canal y las tuberías.

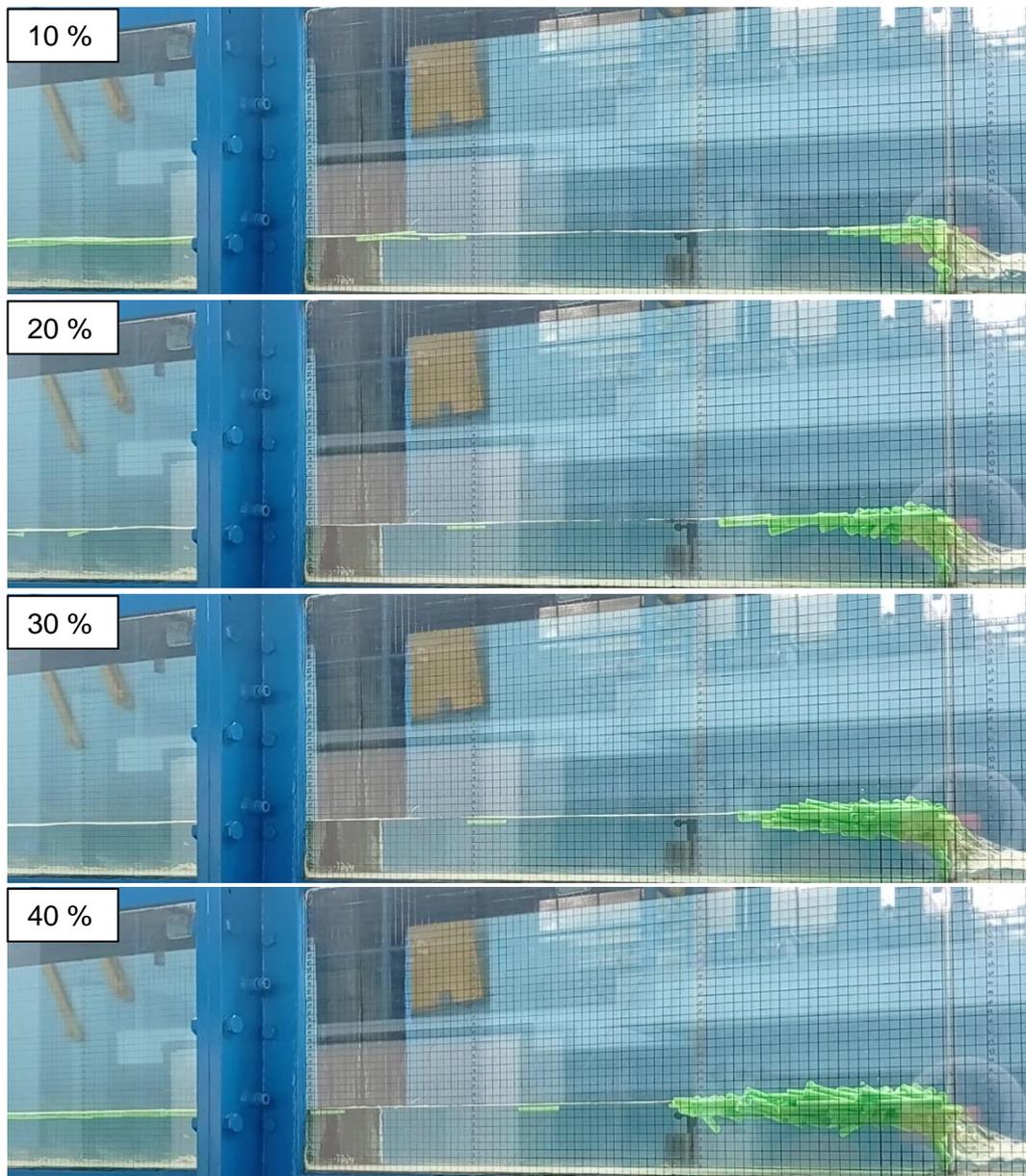
Para las mediciones de las dimensiones correspondientes a las acumulaciones de material flotante se obtuvo lo siguiente: para las longitudes (L) los errores relativos estándar variaron desde 0 % hasta 23.13 % con un valor medio de 6 %, para las alturas (T) los errores relativos estándar variaron desde 0 % hasta 6.25 % con un valor medio de 2.29 % y para las áreas laterales (A_L) los errores relativos estándar variaron desde 0.62 % hasta 24.54 % con un valor medio de 5.12 %. Los errores producidos en las mediciones de estos parámetros se deben principalmente a la heterogeneidad del posicionamiento de los tronquitos en el canal.

Por último, para los resultados de compacidades se obtuvo lo siguiente: por el criterio de Hartlieb (α) los errores relativos estándar variaron desde 0 % hasta 19.61 % con un valor medio de 5.62 % mientras que por el criterio de Schalko los errores relativos estándar variaron desde 0.67 % hasta 24.54 % con valor medio de 5.12 %. Se observa que el máximo valor de incertidumbre se produce en las compacidades obtenidas por el criterio de Schalko, ya que este considera para su cálculo las áreas laterales de las acumulaciones, parámetro de medición en acumulaciones con mayor incertidumbre.

Los porcentajes de errores relativos estándar de los parámetros medidos y calculados para cada escenario se pueden encontrar en la Tabla 1 del ANEXO A: TABLAS del presente documento.

4.3. INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE LA MADERA EN LA FORMA DE ACUMULACIÓN DE MADERA

Durante los ensayos, se observó que la acumulación se inicia desde que una pieza es retenida en la rejilla, a continuación, más piezas quedan retenidas y se incrementa la acumulación. Dependiendo de la densidad de las piezas, éstas se van desplazando hacia el fondo de la rejilla hasta que la velocidad disminuye y las últimas piezas van conformando la carpeta o cola posterior de la acumulación.



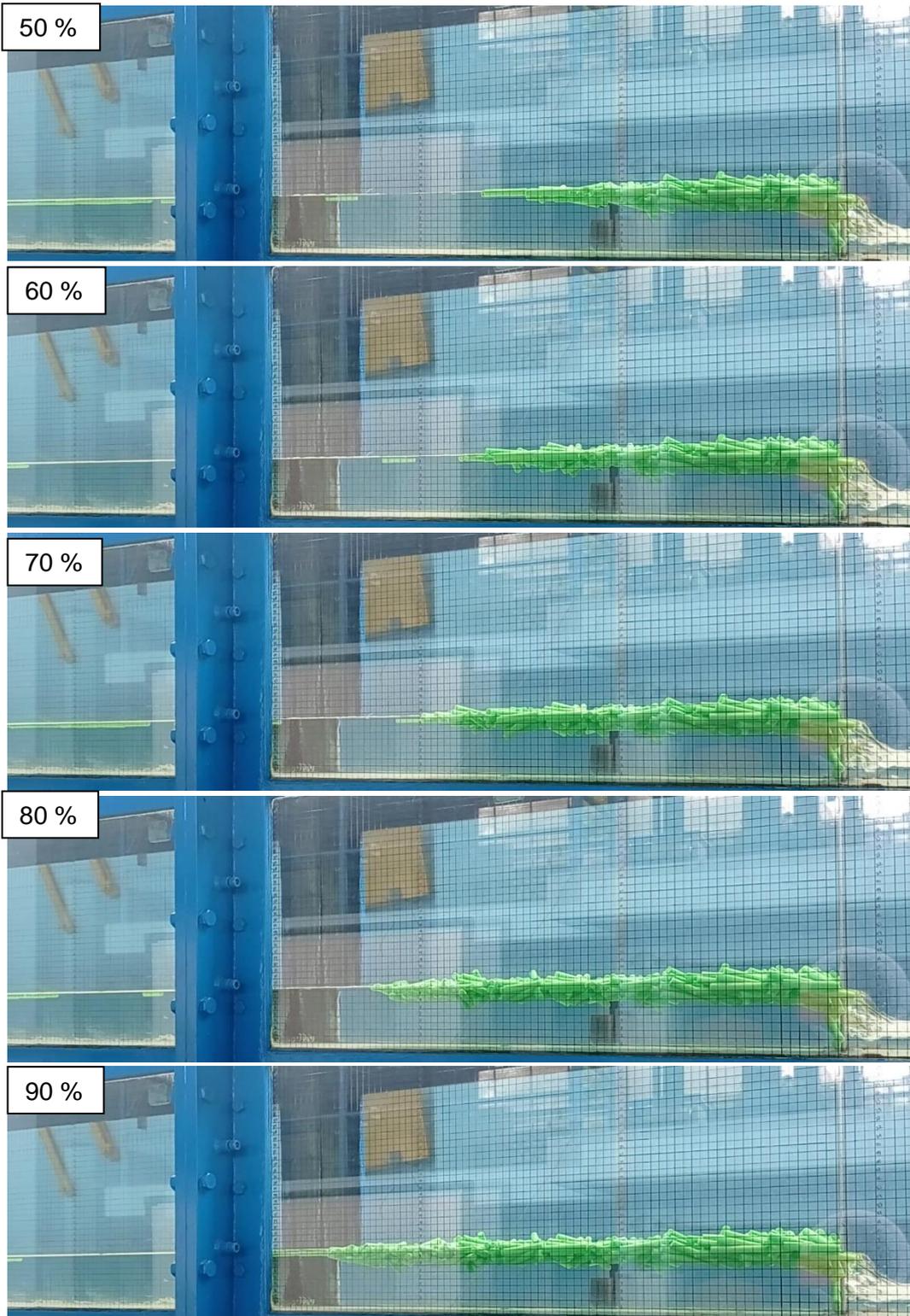




Figura N° 33 Proceso de acumulación con densidad= 400 m³/s, $F_o = 0.5$ y variación de $V_D = 10\%$
(Elaboración propia)

Las fotografías de la Figura N° 33 corresponden a un ensayo del escenario 13 y muestra el proceso de formación de una acumulación de material flotante. Se observó que la altura total de la acumulación se forma con el 30 % del volumen lanzado, el volumen incorporado posteriormente solo incrementa la longitud de la acumulación. Se observó que cuanto mayor es la densidad de los palitos la forma de acumulación se asemeja más a una caja, por otro lado, para menores densidades aumenta la longitud de la acumulación.

Para evaluar la influencia de la densidad de la madera en la forma de la acumulación se evaluaron las compacidades de las acumulaciones para cada escenario y los rangos de valores medidos y calculados de los parámetros asociados a la compacidad por el criterio de Hartlieb (2017) y Schalko et al. (2018) se muestran en la Tabla N° 11.

Tabla N° 11 Rango de valores en parámetros

Criterio de Hartlieb	
Longitud de acumulación L (cm)	6 - 180
Altura de acumulación T (cm)	2 - 27.5
Compacidad T/L	0 - 4.3
Criterio de Schalko	
Área lateral de la acumulación A_L (cm ²)	145.3 - 789.8
Compacidad α	2.1 - 6.4

Fuente: Elaboración propia

La influencia de la densidad del material flotante en la forma de las acumulaciones también puede ser apreciada en la Figura N° 34, donde se visualiza la distribución de las piezas por colores de acuerdo con su densidad. Las piezas más densas

(rojas y amarillas) se encuentran al fondo de la acumulación. Mientras que las piezas más ligeras (verdes y azules) se ubicaban cerca de la superficie.



Figura N° 34 Acumulación con piezas de distintas densidades para $F_o = 0.4$ (Elaboración propia)

Posteriormente se muestran los resultados de los análisis de compacidad de la acumulación mediante los dos enfoques distintos propuestos por Schalko (2019) y Hartlieb (2017).

4.3.1. Análisis en la compacidad de la acumulación mediante el criterio de Hartlieb

De acuerdo con el criterio de Harlieb, la compacidad de una acumulación está dada por la relación de la altura de la acumulación entre la longitud de la acumulación y esta influenciada por el número de Froude del flujo de aproximación y la densidad del material flotante según su análisis dimensional en la Ecuación 5. La Tabla N° 12 muestra los resultados obtenidos de las mediciones videométricas.

Tabla N° 12 Compacidad de la acumulación según Hartlieb (2017)

Escenario	Densidad (kg/m^3) (1)	Q_o (l/s) (2)	F_o (3)	Largo de acumulación L (cm) (4)	Altura de acumulación T (cm) (5)	Compacidad T/L (6)
1	400	5.01	0.20	180.00	2.00	0.01
		5.01	0.20	180.00	2.00	0.01
		5.01	0.20	180.00	2.00	0.01
2	600	5.01	0.20	110.00	2.50	0.02
		5.07	0.20	120.00	3.00	0.03
		5.07	0.20	102.00	2.50	0.02

Escenario	Densidad (kg/m ³) (1)	Q _o (l/s) (2)	F _o (3)	Largo de acumulación L (cm) (4)	Altura de acumulación T (cm) (5)	Compacidad T/L (6)
3	800	5.07	0.20	82.00	12.00	0.15
		5.07	0.20	90.00	12.00	0.13
		5.07	0.20	80.00	12.00	0.15
4	950	5.01	0.20	70.00	17.00	0.24
		5.01	0.20	60.00	16.00	0.27
		5.01	0.20	70.00	17.00	0.24
5	400	3.62	0.32	102.00	6.00	0.06
		3.64	0.32	110.00	6.00	0.05
		3.64	0.33	100.00	5.00	0.05
6	600	3.63	0.33	110.00	8.00	0.07
		3.65	0.33	116.00	8.00	0.07
		3.64	0.34	100.00	8.50	0.09
7	800	3.66	0.32	135.00	11.00	0.08
		3.56	0.32	105.00	10.00	0.10
		3.56	0.32	100.00	9.50	0.10
8	950	3.60	0.31	118.00	14.00	0.12
		3.64	0.32	100.00	14.00	0.14
		3.64	0.32	100.00	15.00	0.15
9	400	10.02	0.42	55.00	13.00	0.24
		9.81	0.41	61.00	14.00	0.23
		9.81	0.42	50.00	13.50	0.27
10	600	9.91	0.42	59.00	15.50	0.26
		9.91	0.42	67.00	16.00	0.24
		9.91	0.42	60.00	16.00	0.27
11	800	10.02	0.42	55.00	20.00	0.36
		9.98	0.42	55.00	19.50	0.35
		9.91	0.43	55.00	20.00	0.36
12	950	9.55	0.40	20.00	25.50	1.28
		9.95	0.42	16.00	25.00	1.56
		9.79	0.42	15.00	25.50	1.70
13	400	6.30	0.52	60.00	9.00	0.15
		6.23	0.51	77.00	9.50	0.12
		6.23	0.52	70.00	9.00	0.13
14	600	6.20	0.52	83.00	11.50	0.14
		6.19	0.54	93.00	12.00	0.13
		6.19	0.55	90.00	12.00	0.13
15	800	6.25	0.53	85.00	14.00	0.16
		6.25	0.53	70.00	13.00	0.19
		6.25	0.53	80.00	14.00	0.18

Escenario	Densidad (kg/m ³) (1)	Q _o (l/s) (2)	F _o (3)	Largo de acumulación L (cm) (4)	Altura de acumulación T (cm) (5)	Compacidad T/L (6)
16	950	6.25	0.53	30.00	20.00	0.67
		6.25	0.55	33.00	19.00	0.58
		6.25	0.53	30.00	19.00	0.63
17	400	16.78	1.30	23.00	24.00	1.04
		16.91	1.27	14.00	22.00	1.57
		17.12	1.31	25.00	22.00	0.88
18	600	17.10	1.32	20.00	24.00	1.20
		17.12	1.32	19.00	25.00	1.32
		16.93	1.36	16.00	23.00	1.44
19	800	17.10	1.33	6.00	26.00	4.33
		16.73	1.27	8.00	27.00	3.38
		16.86	1.30	13.00	27.50	2.12
20	950	17.12	1.29	8.00	27.00	3.38
		16.75	1.25	8.00	27.00	3.38
		16.88	1.27	8.00	24.00	3.00

Fuente: Elaboración propia

Para encontrar una relación entre los datos se normalizó la densidad de la acumulación dividiendo el valor entre la densidad del agua (ρ_t/ρ_w). Posteriormente se graficó la relación entre la densidad relativa y la compacidad en la Figura N° 35, Figura N° 36, Figura N° 37, Figura N° 38 y Figura N° 39 para cada número de Froude.

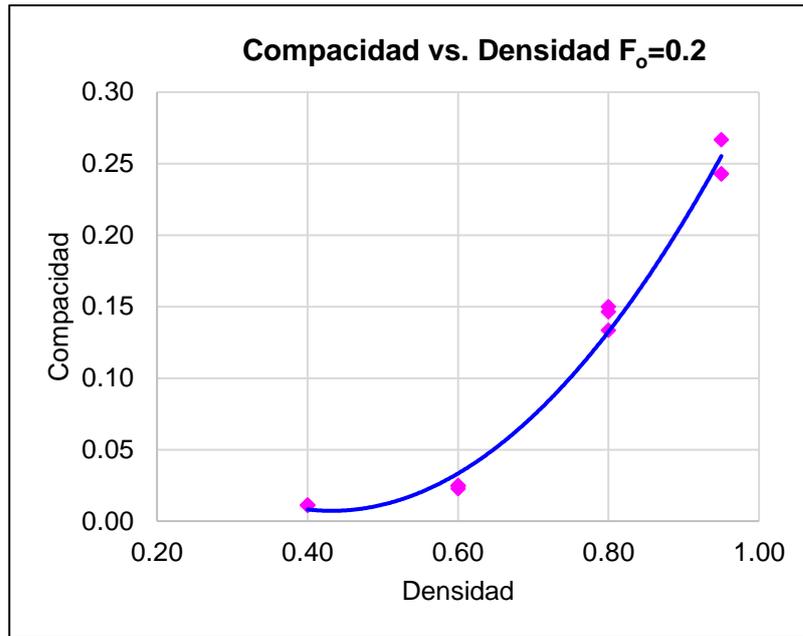


Figura N° 35 Relación de compacidad versus Densidad para $F_o=0.2$ (Elaboración propia)

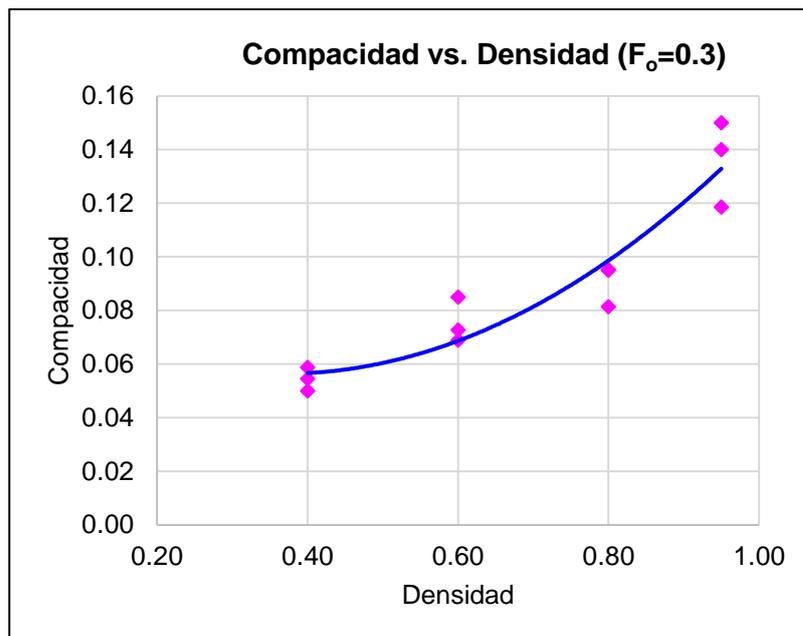


Figura N° 36 Relación de compacidad versus Densidad para $F_o=0.3$ (Elaboración propia)

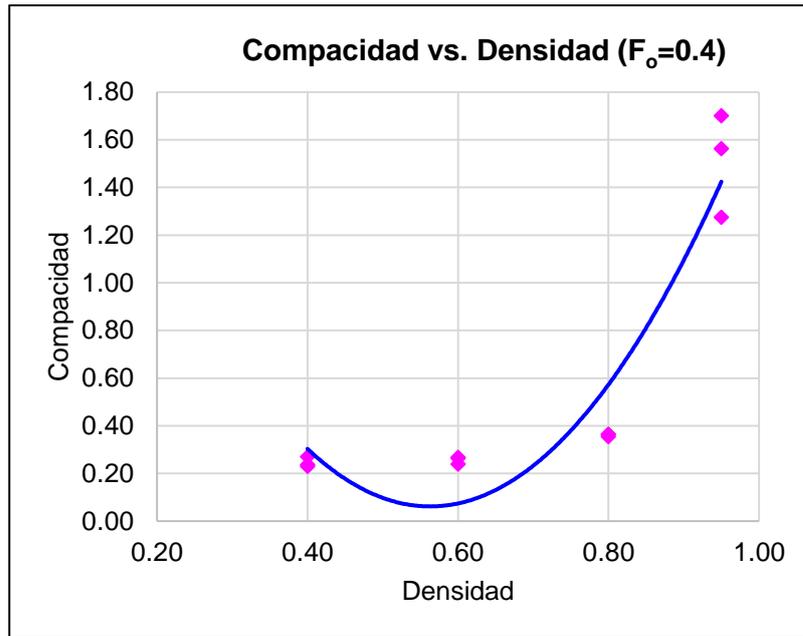


Figura N° 37 Relación de compacidad versus Densidad para $F_0=0.4$ (Elaboración propia)

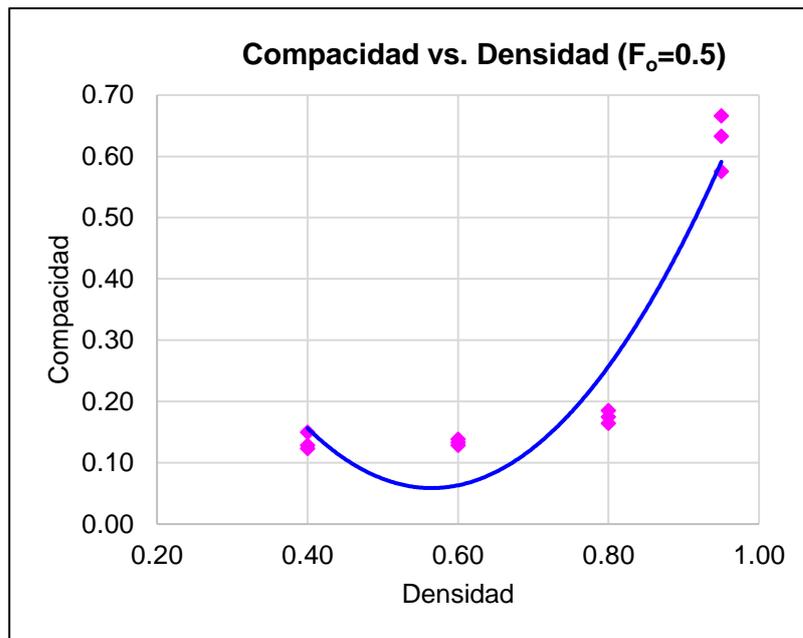


Figura N° 38 Relación de compacidad versus Densidad para $F_0=0.5$ (Elaboración propia)

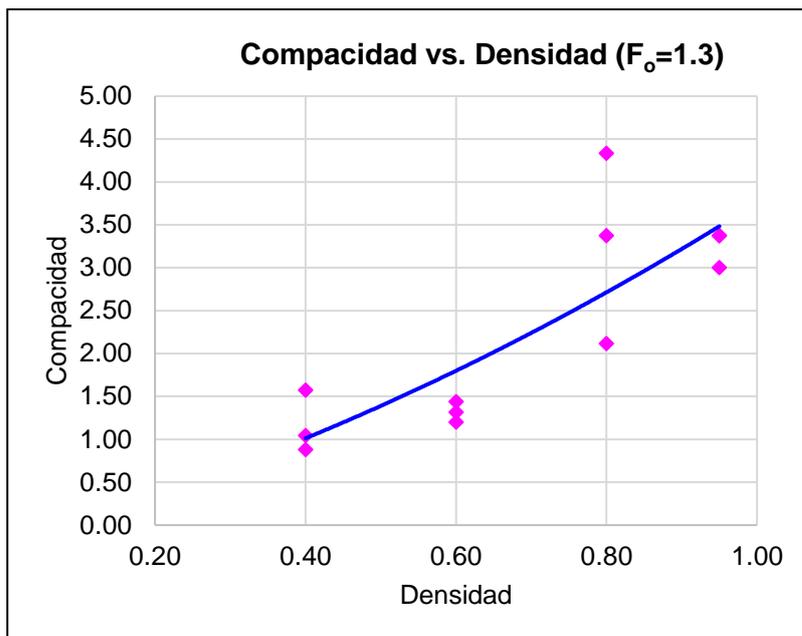


Figura N° 39 Relación de compacidad versus Densidad para $F_o=1.3$ (Elaboración propia)

Las gráficas de la Figura N° 35 a la Figura N° 39 muestran que la compacidad de la acumulación se incrementa con la densidad del material flotante de manera polinómica para cada número de Froude según el criterio de Hartlieb, es decir, la relación entre la altura y la longitud de la acumulación se incrementa con la densidad de la madera.

4.3.2. Análisis de la compacidad de la acumulación mediante el criterio de Schalko

Schalko (2019) relaciona la compacidad con la porosidad de la acumulación expresándola por su volumen suelto sobre el volumen sólido tal como se muestra en la Ecuación 6 y los resultados obtenidos con los datos medidos en la presente investigación se muestran en la Tabla N° 13.

Tabla N° 13 Compacidad de la acumulación según Schalko (2019)

Escenario	Densidad (kg/m ³)	F_o	Volumen sólido V_s (cm ³)	Volumen suelto V_l (cm ³)	Compacidad a
1	400	0.20	3279.82	9017.20	2.75
		0.20	3279.82	8779.12	2.68
		0.20	3279.82	8779.12	2.68

Escenario	Densidad (kg/m ³)	F_o	Volumen sólido V_s (cm ³)	Volumen suelto V_l (cm ³)	Compacidad a
2	600	0.20	3270.40	7463.75	2.28
		0.20	3270.40	7831.18	2.39
		0.20	3246.84	8216.24	2.53
3	800	0.20	2931.11	8813.55	3.01
		0.20	3171.44	9060.96	2.86
		0.20	3162.01	9569.72	3.03
4	950	0.20	2907.54	8149.07	2.80
		0.20	2851.00	8149.07	2.86
		0.20	2818.01	7734.22	2.74
5	400	0.32	3256.26	13297.69	4.08
		0.32	3298.67	12026.65	3.65
		0.33	3293.96	17296.09	5.25
6	600	0.33	3223.27	14642.80	4.54
		0.33	3176.15	14653.90	4.61
		0.34	3190.29	15861.60	4.97
7	800	0.32	3086.61	14752.53	4.78
		0.32	3114.89	17582.93	5.64
		0.32	3077.19	16162.46	5.25
8	950	0.31	3204.42	19747.77	6.16
		0.32	3044.20	18373.95	6.04
		0.32	3114.89	17939.56	5.76
9	400	0.42	3246.84	8084.33	2.49
		0.41	3195.00	7639.21	2.39
		0.42	3152.59	7355.15	2.33
10	600	0.42	3011.22	6949.21	2.31
		0.42	3001.79	7358.03	2.45
		0.42	3025.35	7182.34	2.37
11	800	0.42	3015.93	8469.73	2.81
		0.42	2968.81	8335.63	2.81
		0.43	3091.33	8507.07	2.75
12	950	0.40	2671.92	6712.59	2.51
		0.42	2902.83	6974.37	2.40
		0.42	2902.83	6720.67	2.32
13	400	0.52	3119.60	14584.55	4.68
		0.51	3119.60	9387.47	3.01
		0.52	3176.15	17625.10	5.55
14	600	0.52	3077.19	14807.22	4.81
		0.54	3077.19	15407.48	5.01
		0.55	2940.53	12845.31	4.37
15	800	0.53	3025.35	18787.40	6.21

Escenario	Densidad (kg/m ³)	F_o	Volumen sólido V_s (cm ³)	Volumen suelto V_l (cm ³)	Compacidad a
		0.53	3030.07	16971.86	5.60
		0.53	2964.09	18993.11	6.41
16	950	0.53	2346.77	5876.36	2.50
		0.55	2997.08	7551.82	2.52
		0.53	2832.15	7551.82	2.67
17	400	1.30	2049.89	7452.13	3.64
		1.27	1757.72	7259.08	4.13
		1.31	2224.25	11492.17	5.17
18	600	1.32	1597.50	4207.75	2.63
		1.32	1644.62	8654.45	5.26
		1.36	1347.74	3631.59	2.69
19	800	1.33	1616.35	3868.68	2.39
		1.27	1715.31	3810.98	2.22
		1.30	2045.18	4287.91	2.10
20	950	1.29	1861.39	4874.98	2.62
		1.25	2257.23	5456.80	2.42
		1.27	1960.35	5095.46	2.60

Fuente: Elaboración propia

Según se observa en la Tabla N° 13, los valores de compacidad varían entre 2 y 6 presentándose acumulaciones densas, medias y sueltas según la clasificación de Schalko (2019). A continuación se muestran las gráficas de las compacidades versus las densidades para cada número de Froude.

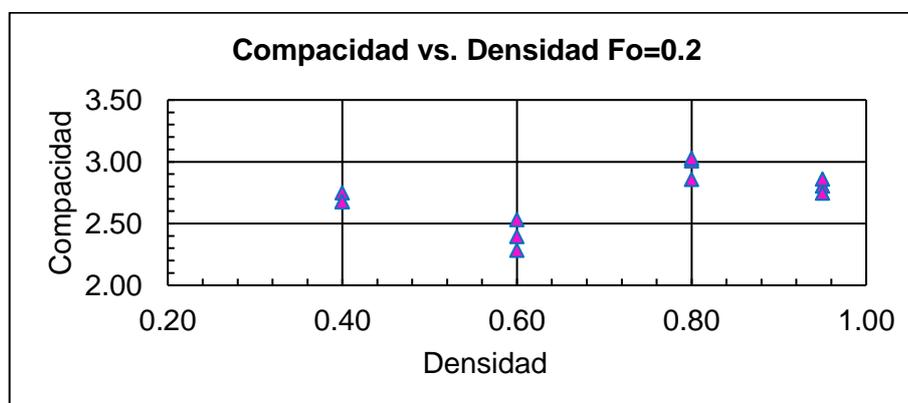


Figura N° 40 Relación de compacidad versus Densidad para $F_o=0.2$ (Elaboración propia)

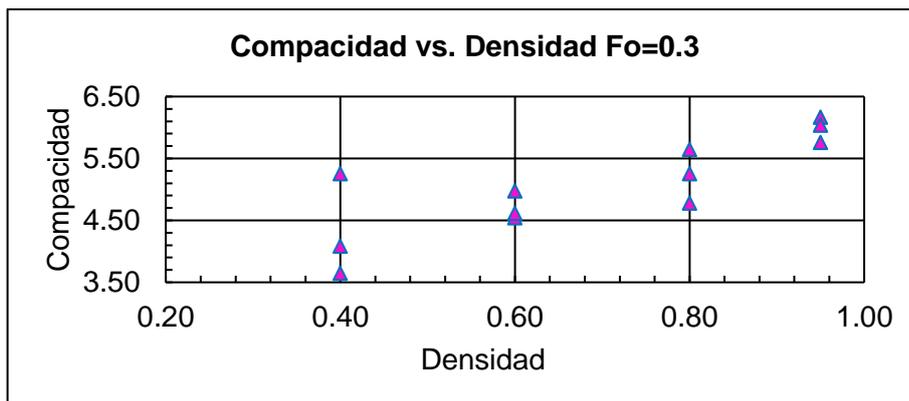


Figura N° 41 Relación de compacidad versus Densidad para $F_o = 0.3$ (Elaboración propia)

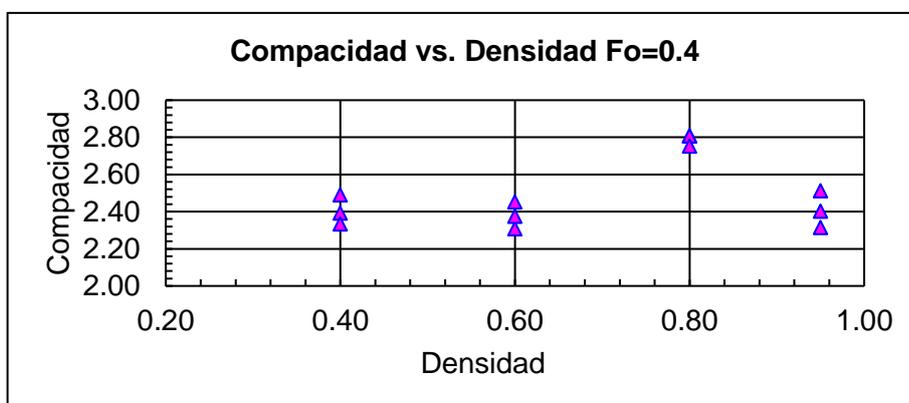


Figura N° 42 Relación de compacidad versus Densidad para $F_o=0.4$ (Elaboración propia)

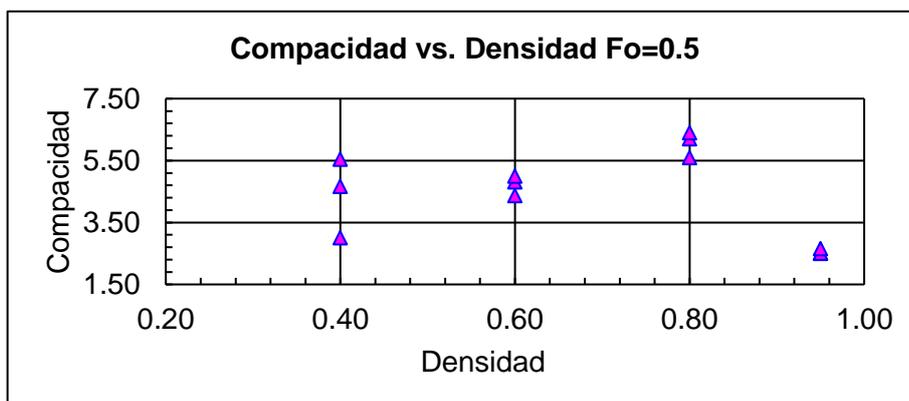


Figura N° 43 Relación de compacidad versus Densidad para $F_o=0.5$ (Elaboración propia)

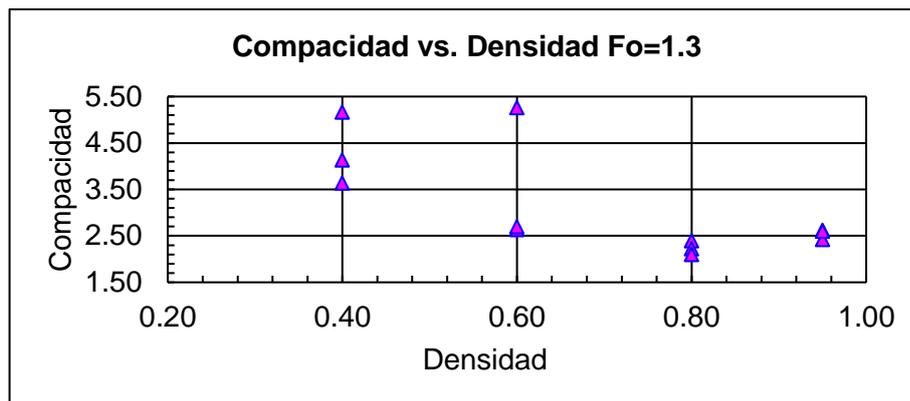


Figura N° 44 Relación de compacidad versus Densidad para $F_o=1.3$. (Elaboración propia)

En la Figura N° 40 se puede observar que los valores de la compacidad para $F_o = 0.2$ corresponden a acumulaciones densas para todas las densidades. En la Figura N° 41 los valores de compacidades para $F_o = 0.3$ corresponden a acumulaciones medias a sueltas. En la Figura N° 42 los valores de compacidades para $F_o = 0.4$ corresponden a acumulaciones densas. En la Figura N° 43 las compacidades para $F_o = 0.5$ corresponden a acumulaciones densas, medias y sueltas. En la Figura N° 44 los valores de compacidades para $F_o = 1.3$ corresponden a acumulaciones densas, medias y sueltas. Se puede notar una disminución clara de la compacidad de la acumulación con el aumento de la densidad para $F_o = 0.3$, sin embargo, a diferencia del criterio de Hartlieb (2017), aquí no se encuentra una relación clara entre la densidad y la compacidad para todos los números de Froude evaluados.

4.4. INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE LA MADERA EN LA ALTURA RELATIVA DE REMANSO

El efecto de remanso que se forma aguas arriba de la obstrucción con palitos artificiales se puede explicar con la pérdida de energía por efecto de la fricción de la acumulación y la reducción del área hidráulica del canal aguas arriba de la rejilla de retención.

Las mediciones de altura de remanso se tomaron en el instante en el que se produce el máximo aumento de remanso para cada escenario evaluado y se muestra en el Anexo B: Panel fotográfico, del presente estudio.

La Tabla N° 14 muestra los resultados de tirantes medidos antes (h_o) y después de la incorporación de palitos (h) y el máximo aumento relativo de remanso obtenido ($\Delta h/h_o$) para cada escenario.

Tabla N° 14 Resultados de aumento relativo de remanso

Escenario	Densidad (kg/m ³) (1)	Q_o (l/s) (2)	h_o (m) (3)	F_o (4)	h_1 (m) (5)	$\Delta h/h_o$ (6)
1	400	5.01	0.10	0.21	0.10	0.03
		5.01	0.10	0.21	0.10	0.03
		5.01	0.10	0.21	0.10	0.02
2	600	5.01	0.10	0.21	0.10	0.02
		5.07	0.10	0.21	0.10	0.03
		5.07	0.10	0.21	0.10	0.03
3	800	5.07	0.10	0.21	0.12	0.17
		5.07	0.10	0.21	0.12	0.18
		5.07	0.10	0.21	0.12	0.15
4	950	5.01	0.10	0.21	0.18	0.74
		5.01	0.10	0.21	0.18	0.80
		5.01	0.10	0.21	0.18	0.74
5	400	3.62	0.06	0.35	0.07	0.22
		3.64	0.06	0.36	0.07	0.26
		3.64	0.06	0.36	0.07	0.22
6	600	3.63	0.05	0.36	0.08	0.38
		3.65	0.05	0.36	0.08	0.41
		3.64	0.05	0.36	0.08	0.35
7	800	3.66	0.06	0.36	0.11	0.78
		3.56	0.05	0.36	0.10	0.72
		3.56	0.05	0.34	0.10	0.64
8	950	3.60	0.06	0.34	0.14	1.33
		3.64	0.06	0.35	0.15	1.44
		3.64	0.06	0.35	0.15	1.53
9	400	10.02	0.09	0.45	0.13	0.35
		9.81	0.09	0.45	0.13	0.35
		9.81	0.09	0.47	0.13	0.35
10	600	9.91	0.09	0.47	0.15	0.56
		9.91	0.09	0.48	0.16	0.62
		9.91	0.09	0.48	0.15	0.56
11	800	10.02	0.09	0.45	0.20	1.00
		9.98	0.09	0.45	0.19	0.97
		9.91	0.09	0.45	0.20	1.04
12	950	9.55	0.09	0.46	0.25	1.62

Escenario	Densidad (kg/m ³) (1)	Q _o (l/s) (2)	h _o (m) (3)	F _o (4)	h ₁ (m) (5)	Δh/h _o (6)
		9.95	0.09	0.48	0.25	1.59
		9.79	0.09	0.47	0.26	1.67
13	400	6.30	0.05	0.65	0.09	0.47
		6.23	0.05	0.71	0.09	0.51
		6.23	0.06	0.61	0.09	0.51
14	600	6.20	0.05	0.71	0.11	0.85
		6.19	0.06	0.59	0.12	0.98
		6.19	0.06	0.60	0.11	0.93
15	800	6.25	0.05	0.70	0.14	1.26
		6.25	0.05	0.70	0.13	1.16
		6.25	0.05	0.68	0.14	1.26
16	950	6.25	0.05	0.70	0.20	2.26
		6.25	0.05	0.66	0.19	2.27
		6.25	0.05	0.69	0.19	2.13
17	400	16.78	0.06	1.39	0.20	2.10
		16.91	0.06	1.37	0.19	1.89
		17.12	0.06	1.36	0.20	2.08
18	600	17.10	0.07	1.32	0.22	2.34
		17.12	0.06	1.33	0.25	2.78
		16.93	0.06	1.33	0.21	2.38
19	800	17.10	0.06	1.35	0.27	3.17
		16.73	0.06	1.32	0.27	3.15
		16.86	0.06	1.32	0.27	3.17
20	950	17.12	0.07	1.22	0.30	3.48
		16.75	0.07	1.16	0.29	3.40
		16.88	0.06	1.38	0.27	3.14

Fuente: Elaboración propia

Cabe indicar que los tirantes iniciales se tomaron en el eje -0.30 (30 cm aguas arriba de la rejilla de retención) y los tirantes finales se tomaron inmediatamente aguas arriba de la acumulación de palitos. Esta ubicación varió para cada escenario de ensayo; para el escenario 01 se tomó en el eje -2.10, para los escenarios 02, 03, 04, 05, 06, 07 y 08 se tomó en el eje -1.10, para los escenarios 09, 10 y 11 se tomó en el eje -0.50, para el escenario 12 en el eje -0.20, para los escenarios 13, 14 y 15 en el eje -1.10, para los escenarios 16 y 17 en el eje -0.30, para los escenarios 18 y 19 en el eje -0.20 y para el escenario 20 en el eje -0.30.

La Figura N° 45 muestra un análisis de la variación del incremento de remanso para distintas densidades de acumulación en una misma condición de flujo.

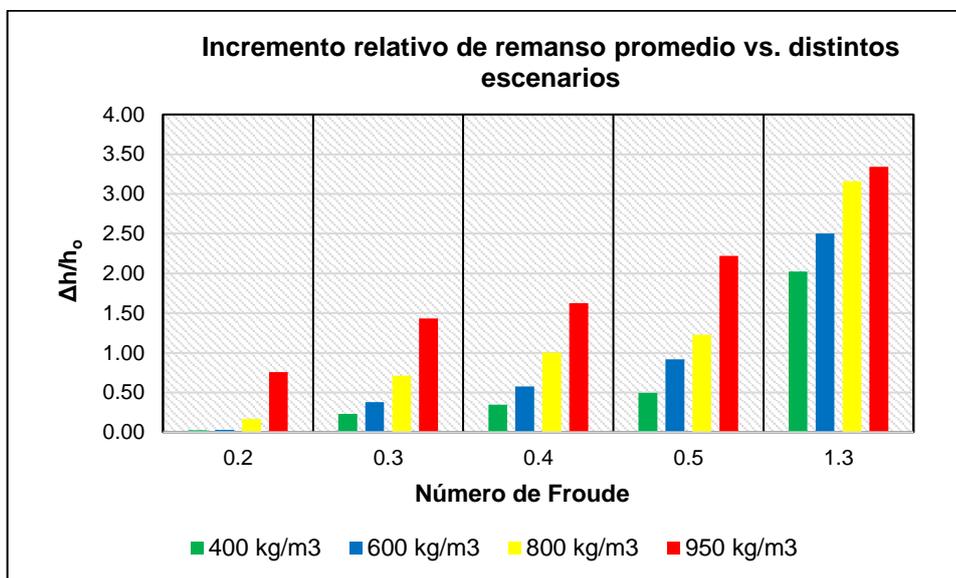


Figura N° 45 Incremento relativo de remanso promedio vs. distintos escenarios (Elaboración propia)

Según el gráfico, el incremento relativo de remanso es mayor cuando aumenta la densidad del material flotante, para una misma condición de flujo. Por ejemplo, para $F_o = 0.2$, el efecto de remanso es insignificante para densidades de 400 kg/m^3 y 600 kg/m^3 , mientras que para $F_o = 0.5$, el incremento relativo de remanso para la acumulación más densa es el 440 % del incremento para la acumulación más ligera.

La Figura N° 46 muestra los resultados del incremento del remanso de manera gráfica para todos los números de Froude del flujo de aproximación evaluados.

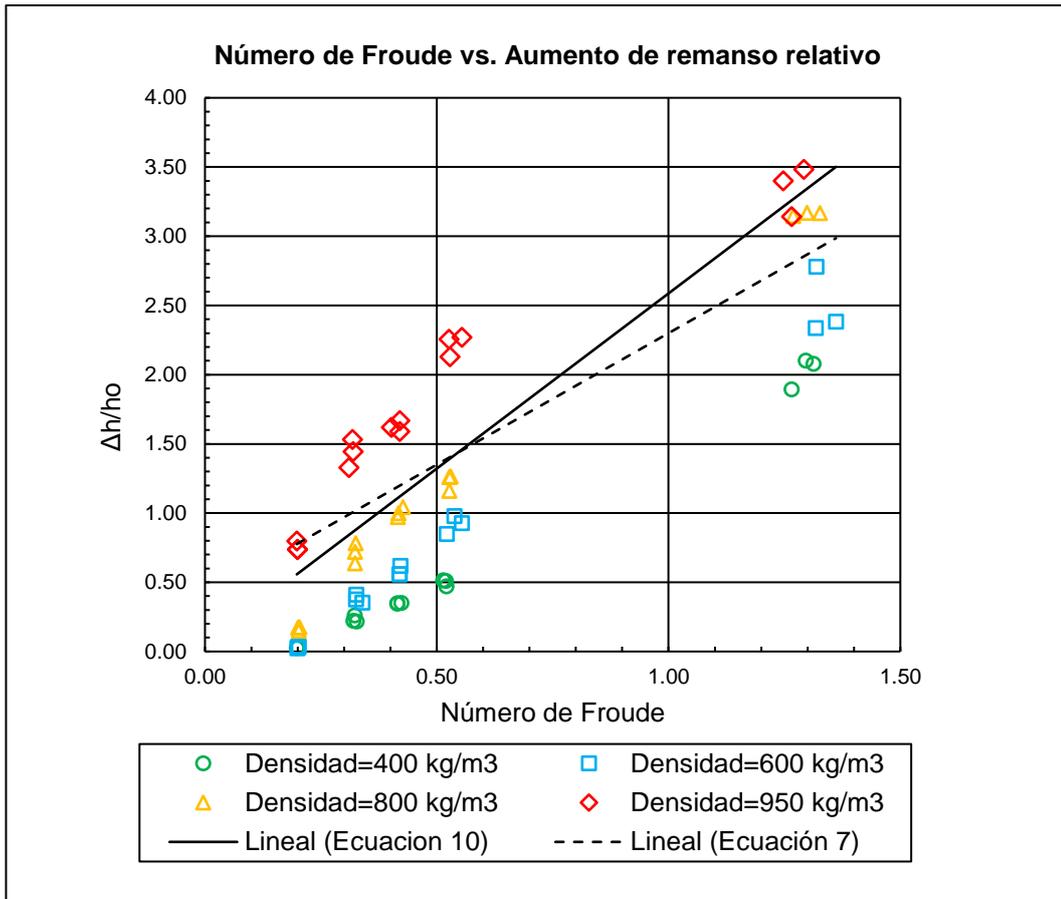


Figura N° 46 Altura de remanso vs. Número de Froude para distintas densidades 1 (Elaboración propia)

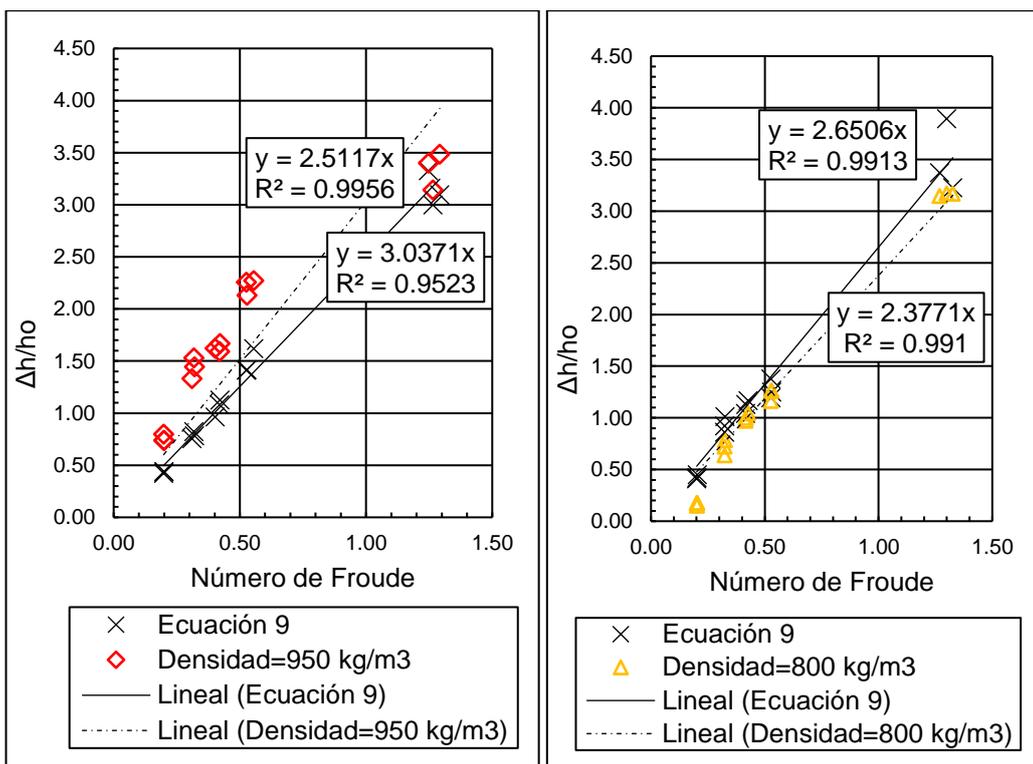
Los resultados muestran que la altura relativa de remanso se incrementa con la densidad del material flotante (Mallqui & Cabrera, 2022). Para los escenarios con número de Froude $F_o = 0.20$, la altura del tirante del flujo aguas arriba de la rejilla se mantiene constante antes y después de la acumulación con el material flotante de densidad ligera (400 kg/m^3), mientras que para el material denso (950 kg/m^3) la altura se incrementa en un 80 %. Para los escenarios con número de Froude $F_o = 1.3$, la altura del tirante se incrementa en un 190 % para el material flotante con densidad ligera (400 kg/m^3), mientras que para el material flotante más denso (950 kg/m^3) la altura se incrementa en un 350 %.

Por otro lado, los resultados se comparan con estudios previos, observándose que la ecuación propuesta por Schalko (Ecuación 10) proporciona una estimación conservadora del incremento de remanso normalizado y es comparable aproximadamente con los resultados obtenidos para una acumulación de

800 kg/m³ del presente estudio al igual que la ecuación de Schmocker (Ecuación 7).

Schalko et al. (2019) definió en su ecuación un factor de tipo de acumulación (f_A) para un mejor ajuste de los datos, el cual tiene un valor de $f_A=0.5$ para experimentos en canales de lecho fijo, sin embargo, recomienda incrementar este valor para tener en cuenta el aumento de la densidad de material flotante en la Ecuación 10.

Para investigar la variación del factor de tipo de acumulación de la Ecuación 10 con la densidad se determinó la correlación entre los coeficientes de las ecuaciones de las líneas de tendencia de los resultados obtenidos en la presente investigación y los resultados obtenidos en la Ecuación 10. Lo mencionado se representa en las gráficas de la Figura N° 47.



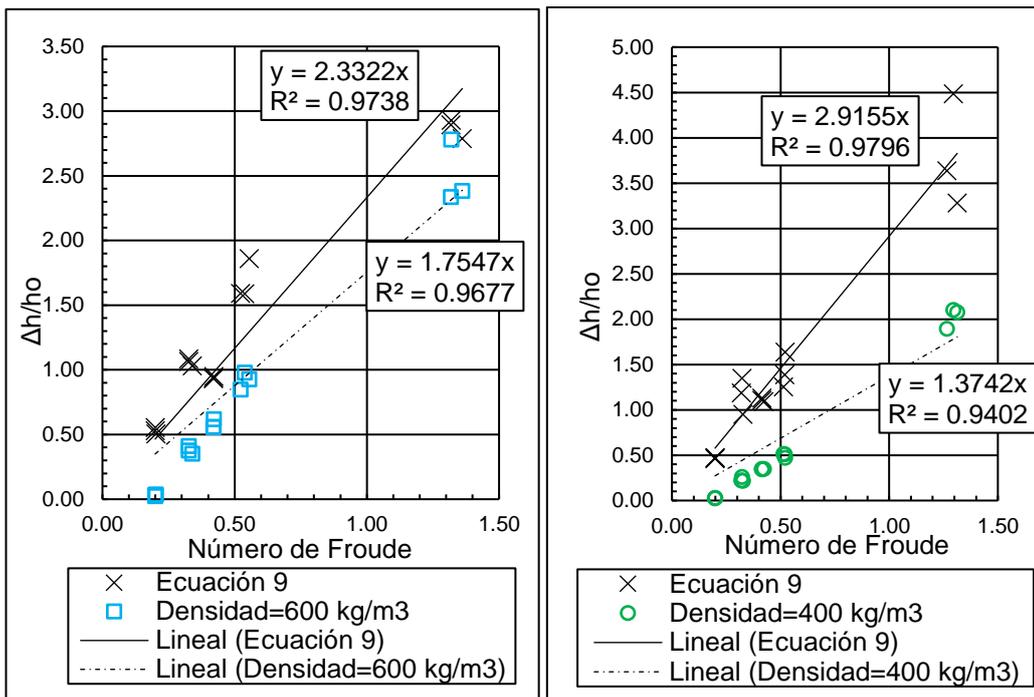


Figura N° 47 Altura de remanso vs. Número de Froude para cada densidad evaluada (Elaboración propia)

Como se observa en la Figura N° 47 la línea de tendencia de los datos tomados en la presente investigación se encuentra por encima de la línea de tendencia de la Ecuación 10 para una densidad de 0.95, a medida que la densidad disminuye, la primera desciende alejándose de la segunda.

Tabla N° 15 Factor de acumulación para cada densidad

ρ_L/ρ_w	f_A'
0.95	0.6045
0.80	0.4484
0.60	0.3761
0.40	0.2356

Fuente: Elaboración propia

La Tabla N° 15 muestra cómo varían los valores de factores de tipo de acumulación para cada densidad según el análisis planteado.

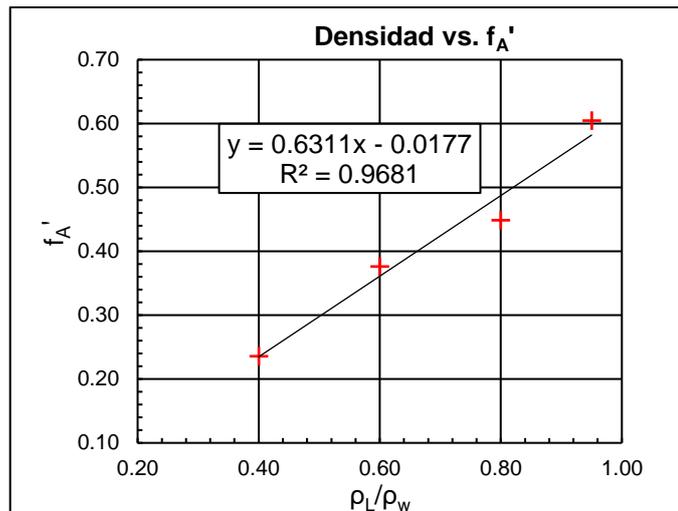


Figura N° 48 Densidad vs. Nuevo factor de tipo de acumulación (Elaboración propia)

De acuerdo con la gráfica de la Figura N° 48 se puede proponer una relación entre la densidad y el factor de acumulación.

Dada la Ecuación 10 modificada de Schalko (2019):

Ecuación 14

$$\frac{\Delta h}{h_o} = f_A' * 5.4 \frac{F_o (V_s/h_o B d_L)^{1/3} (9FM + 1)}{a}$$

Se plantea la siguiente relación:

$$\text{Ecuación 15} \quad f_A' = 0.6311 \left(\frac{\rho_L}{\rho_w} \right) - 0.0177$$

La Ecuación 15 ($R^2 = 0.97$) estima la variación del factor de tipo de acumulación por efecto de la densidad. Teniendo en cuenta la variación de la densidad ($\pm 30 \text{ kg/m}^3$) el rango de variación de f_A' en la ecuación sería de ± 0.02 .

El gráfico de la Figura N° 49 muestra un gráfico comparativo de los incrementos relativos de remanso obtenidos de la experimentación y los incrementos relativos calculados con la fórmula modificada propuesta.

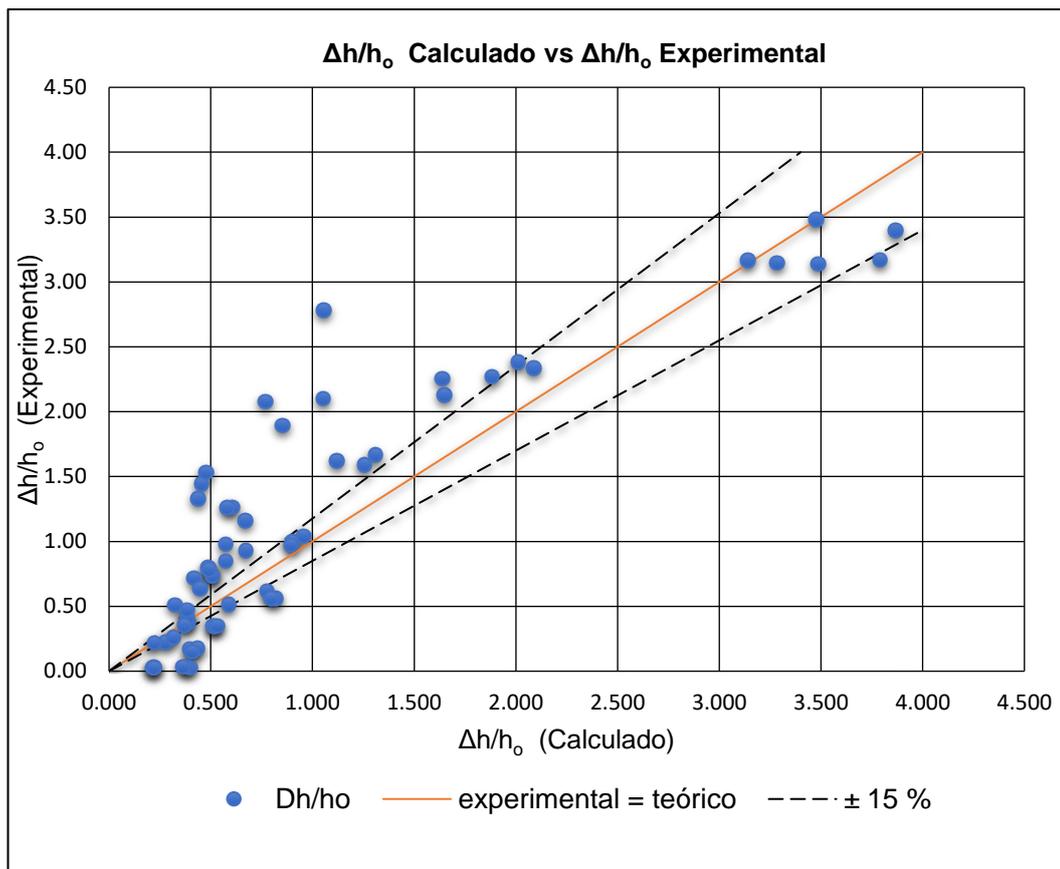


Figura N° 49 Valores de $\Delta h/h_0$ experimentales vs $\Delta h/h_0$ calculados (Elaboración propia)

La gráfica comparativa muestra baja precisión de los resultados, además se observa que los valores experimentales de incremento relativo de remanso son mayores que los valores calculados para escenarios con flujo subcrítico. Para los escenarios son flujo supercrítico, los valores calculados son mayores que los valores experimentales.

4.5. INFLUENCIA DE LA FORMA DE LA ACUMULACIÓN SOBRE LA ALTURA RELATIVA DE REMANSO

Finalmente se comparan los resultados obtenidos de compacidad y aumento de remanso. Se tomará en cuenta la compacidad planteada por Hartlieb (2017), que la considera como la relación entre la altura y la longitud de la acumulación.

La Figura N° 51 ilustra la forma de la acumulación de palitos y la altura de remanso para los escenarios 9, 10, 11 y 12 de la Tabla N° 6 en el instante donde se produce el mayor aumento de remanso después de la incorporación del 100 % de palitos.

Las imágenes muestran a simple vista que la altura de remanso se incrementa a medida que se aumenta la densidad de la acumulación para similares condiciones de flujo de aproximación.

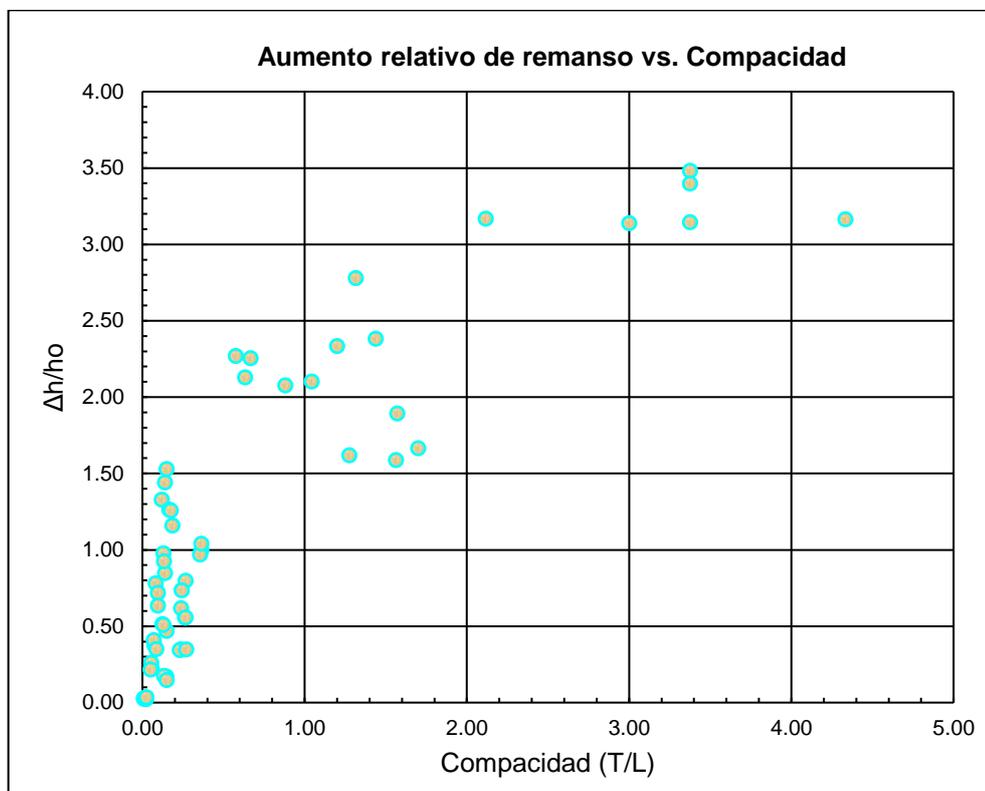


Figura N° 50 Altura de remanso vs. Compacidad (Elaboración propia)

La Figura N° 50 muestra que el remanso se incrementa con la compacidad de la acumulación de material leñoso. Es decir, mientras más pequeña sea la longitud de la acumulación comparada con la altura, habrá mayor incremento de remanso.

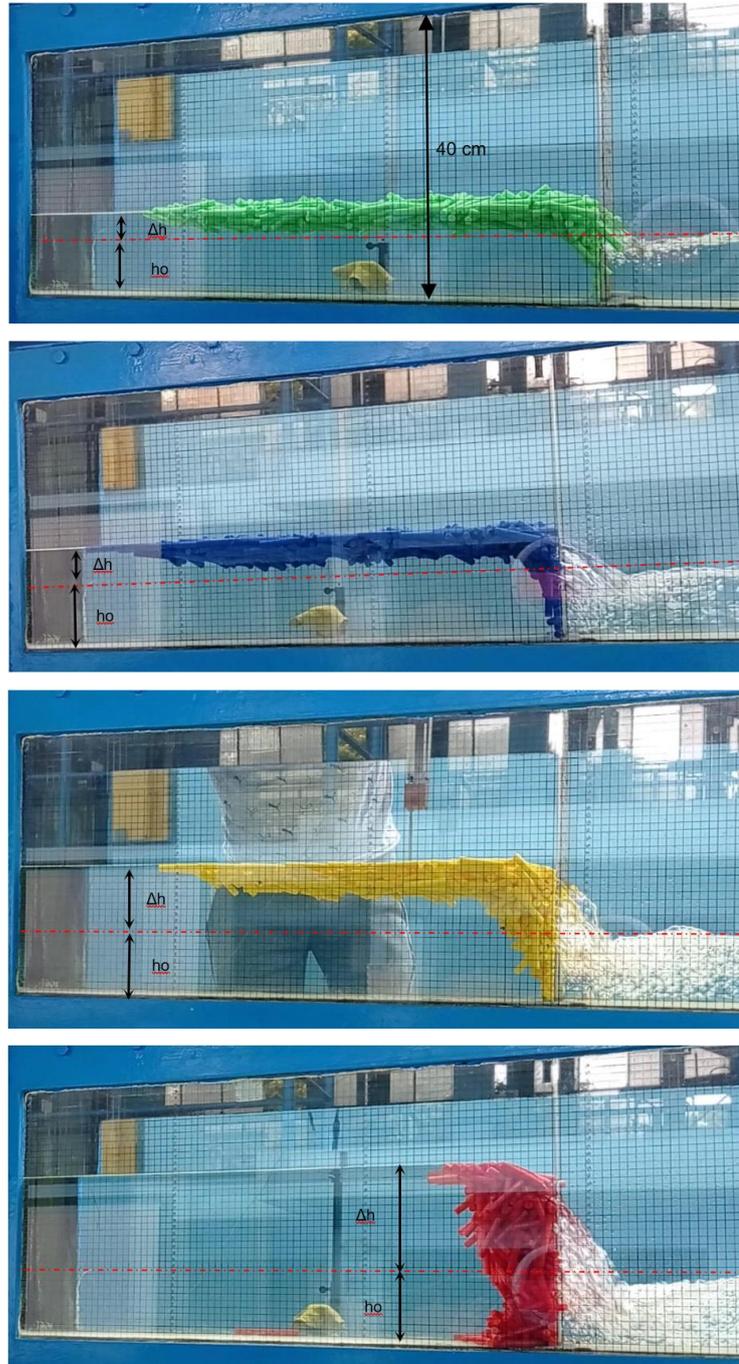


Figura N° 51 Formación de acumulación para escenarios 9, 10, 11 y 12 ($F_o = 0.4$) (Elaboración propia)

Como se observa, a medida que la densidad del material flotante aumenta, este se desplaza al fondo del canal, bloqueando mayor área hidráulica.

CONCLUSIONES

- Se llevó a cabo un programa de 60 ensayos, en 20 escenarios distintos, para evaluar la influencia de la densidad de la acumulación de madera sobre el incremento de remanso aguas arriba de una rejilla de retención variando las condiciones del flujo inicial y la densidad del material flotante. Para ello se acondicionó un modelo físico mediante un canal de pendiente variable, una rejilla de retención y troncos artificiales.
- Los resultados muestran que los mayores incrementos relativos de remanso se presentan en acumulaciones de mayor densidad, principalmente porque esta altera la forma y compacidad de la acumulación (altura entre longitud de acumulación).
- Mientras mayor es la densidad de la acumulación, menor será la longitud de la acumulación para una misma condición de flujo. Por otro lado, no se pudo determinar una relación entre la porosidad y la densidad de la acumulación para las condiciones evaluadas y se determinó que las acumulaciones evaluadas corresponden al tipo denso.
- Se comprobó que las acumulaciones más compactas (de menor longitud) generan mayor incremento de remanso.
- Se plantea una ecuación en función de la densidad de la acumulación con el fin de estimar la variación del factor de tipo de acumulación en la ecuación de determinación del incremento de remanso.
- Un análisis comparativo muestra que los incrementos relativos de remanso experimentales son mayores que los valores calculados con la fórmula modificada para escenarios con flujo subcrítico, por otro lado, los valores calculados son mayores que los experimentales para escenarios con flujo supercrítico.
- Dada la aleatoriedad de experimentos con acumulaciones de material flotante, se realizaron análisis de reproducibilidad ensayando 3 veces el mismo escenario y se determinó el error relativo estándar de cada grupo,

obteniéndose como error mínimo 0.23 % y como error máximo 11.01 %, lo cual es considerado aceptable para ensayos con acumulaciones de madera (error máximo recomendable: 15 %).

- Las principales fuentes de error identificados durante los experimentos fueron el proceso de medición visual, las pequeñas variaciones de flujo debido al lanzamiento de palitos y a la antigüedad del equipamiento, lo cual también generaba pequeñas pérdidas de líquido.
- Los porcentajes de retención de material flotante en la rejilla de retención varían de 40 % a 70 % para los escenarios con flujo supercrítico y de 70 % a 100 % para los escenarios con flujo subcrítico.
- Debido a la diversidad de especies de distintas densidades que se hallan en una acumulación real, el presente estudio permite un análisis de escenarios desfavorables de incremento de remanso en el diseño de estructuras hidráulicas.

RECOMENDACIONES

- Los resultados obtenidos en la presente investigación permiten el mejor entendimiento del proceso de acumulación de elementos flotantes durante su transporte en cuerpos de agua, por ejemplo, en los ríos amazónicos. Se recomienda aplicar los resultados obtenidos para el diseño de estructuras de retención más eficientes.
- Se recomienda que en experimentos de canal se utilicen sistemas automatizados de medición de tirantes con sensores para reducir los errores visuales y obtener mayor cantidad de datos a tiempo real. De esta manera los ensayos son más eficientes.
- Es importante considerar tomas fotográficas de calidad durante ensayos con acumulaciones de material flotante para facilitar las mediciones posteriores.
- El uso de impresoras 3D es más recurrente y facilita el modelamiento a pequeñas escalas de piezas que de otra manera sería muy complejo de construir. Se recomienda su uso para futuras estructuras hidráulicas a escala pequeña.
- Se recomienda realizar nuevas investigaciones con acumulaciones de madera teniendo en cuenta un lecho móvil y el transporte de sedimentos en distintas estructuras hidráulicas como vertederos, pilares o presas de retención.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcaldía Zarzal Valle. (2022). *Emergencia del puente del corregimiento de La Paila*. <https://www.facebook.com/watch/?v=552657062524921>
- Al-Zawaidah, H., Ravazzolo, D., & Friedrich, H. (2021). Local geomorphic effects in the presence of accumulations of different densities. *Geomorphology*, 389, 14. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107838>
- Benda, L. E., & Sias, J. C. (2003). A quantitative framework for evaluating the mass balance of in-stream organic debris. *Forest Ecology and Management*, 172(1), 1–16. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00576-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00576-X)
- Bezzola, G. R., & Hegg, C. (2008). Analysis of 2005 flood event: Processes, provisions and hazard evaluation. *Bundesamt Für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Umwelt-Wissen 2508, Birmensdorf*.
- Braudrick, C. A., & Grant, G. E. (2000). When do logs move in rivers? *Water Resources Research*, 36(2), 571–583. <https://doi.org/10.1029/1999WR900290>
- Braudrick, C. A., & Grant, G. E. (2001). Transport and deposition of large woody debris in streams: A flume experiment. *Geomorphology*, 41(4), 263–283. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00058-7](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00058-7)
- Braudrick, C. A., Grant, G. E., Ishikawa, Y., & Ikeda, H. (1997). Dynamics of Wood Transport in Streams: A Flume Experiment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22(7), 669–683. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9837\(199707\)22:7<669::aid-esp740>3.3.co;2-c](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9837(199707)22:7<669::aid-esp740>3.3.co;2-c)
- Chow, V. Te. (1959). *Hidráulica de canales abiertos* (M. E. Suárez R., Ed.; Mc Graw Hill).
- Chuan Huingo, W. (2019). Modelación hidráulica del transporte de troncos flotantes en el meandro del río Madre de Dios, sector La Pastora-Puerto Maldonado. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- Comiti, F., Andreoli, A., Mao, L., & Lenzi, M. A. (2008). Wood storage in three mountain streams of the Southern Andes and its hydro-morphological effects. *Earth Surface Processes and Landforms*, 262 (July 2007), 244–262. <https://doi.org/10.1002/esp>
- Consorcio Hidrovía Amazonas. (2008). *Estudios de Navegabilidad de los Ríos Amazonas y Marañón - Informe Final*. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. Lima, Perú.
- Consorcio Hidrovía Huallaga. (2005). *Estudio de Navegabilidad del río Huallaga, en el tramo comprendido entre Yurimaguas y la confluencia con el río Marañón*. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. Lima, Perú.
- Consorcio H&O - Ecsa. (2005). *Estudio de la navegabilidad del río Ucayali en el tramo comprendido entre Pucallpa y la confluencia con el río Marañón*. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. Lima, Perú. <https://portal.mtc.gob.pe/>
- Fritz, Hermann; Hager, W. (1998). Hydraulics of embankment weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124 (9), 963–971. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1998\)124:9\(963\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:9(963))
- Furlan, P. (2019). *Blocking probability of large wood and resulting head increase at ogee crest spillways (PhD. Thesis)*. Escuela Politécnica Federal de Lausana, Suiza.
- Gurnell, A. M., Piégay, H., Swanson, F. J., & Gregory, S. V. (2002). Large wood and fluvial processes. *Freshwater Biology*, 47(4), 601–619. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00916.x>
- Hartlieb, A. (2017). Decisive Parameters for Backwater Effects Caused by Floating Debris Jams. *Open Journal of Fluid Dynamics*, 07(04), 475–484. <https://doi.org/10.4236/ojfd.2017.74032>
- Kennedy, R. J. (1957). *The forces involved in pulpwood holding grounds* (1957 Pulp and Paper Research Institute of Canada, Ed.).
- Kometter, R. (2004). *Mapificación y evaluación forestal del bosque de producción permanente del departamento de Loreto*. Ministerio de Agricultura. Lima, Perú.
- Kramer, N., Wohl, E., Hess-Homeier, B., & Leisz, S. (2017). The pulse of driftwood export from a very large forested river basin over multiple

- time scales, Slave River, Canada. *Water Resources Research*, 53, 1997–2015. <https://doi.org/10.1002/2016WR019260>
- Lange, D., & Bezzola, G. R. (2006). Schwemmholz: Probleme und Lösungsansätze ('Large wood: problems and approach methods'). In *VAW-Report 188 (Meyer-Peter, ed)*.
 - Lucía, A., Comiti, F., Borga, M., Cavalli, M., & Marchi, L. (2015). Dynamics of large wood during a flash flood in two mountain catchments Dynamics of large wood during a flash flood in two mountain catchments. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15, 1741–1755. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1741-2015>
 - Mallqui, R., & Cabrera, J. (2022). Influence of Wood Density on Backwater Rise due to Large Wood Accumulations. *EGU General Assembly*, Art. EGU22-13483. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-13483>, 2022.
 - Martín Vide, J. P. (2003). *Ingeniería de ríos* (A. G. Editor, Ed.; Primera Ed). Edicions UPC.
 - May, C. L., & Gresswell, R. E. (2003). Large wood recruitment and redistribution in headwater streams in the southern Oregon Coast Range, U.S.A. *Canadian Journal of Forest Research*, 33(8), 1352–1362. <https://doi.org/10.1139/x03-023>
 - Medina, S. (2017). *Breve introducción a la teoría de errores y la graficación* (Universidad Autónoma de Aguascalientes, Ed.). Universidad Autónoma de Aguascalientes.
 - Moya Roque, R., Gómez Cortes, M., & Rivero Moreno, J. (2008). Clave de identificación macroscópica para 22 especies maderables de Bolivia. *Revista Forestal Venezolana*, 51(2), 179–193.
 - Pagliara, S., & Carnacina, I. (2011). Influence of large woody debris on sediment scour at bridge piers. *International Journal of Sediment Research*, 26(2), 121–136. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(11\)60081-4](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(11)60081-4)
 - Pfister, M., Battisacco, E., De Cesare, G., and Schleiss, A. J. (2013). Scale effects related to the rating curve of cylindrically crested Piano Key weirs. In M. Erpicum, S., Laugier, F., Pfister & E. Pirotton, M., Cicero, G.-M., and Schleiss, A. J. (Eds.), *Labyrinth and Piano Key Weirs II* (pp. 255–264). CRC Press, Boca Raton.

- Ruiz-Villanueva, V., Díez-Herrero, A., Bodoque, J. M., & Bladé, E. (2015). Avances en el análisis del material leñoso en ríos: Incorporación, transporte e influencia en el riesgo por inundaciones. *Cuaternario y Geomorfología*, 29(3–4), 7–33. <https://doi.org/10.17735/cyg.v29i3-4.29773>
- Ruiz-Villanueva, V., Piégay, H., Gaertner, V., Perret, F., & Stoffel, M. (2016). Wood density and moisture sorption and its influence on large wood mobility in rivers. *Catena*, 140, 182–194. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.001>
- Schalko, I., Lageder, C., Schmocker, L., Weitbrecht, V., & Boes, R. M. (2019). I Laboratory Flume Experiments on the Formation of Spanwise Large Wood Accumulations: I. Effect on Backwater Rise. *Water Resources Research*, 55(6), 4854–4870. <https://doi.org/10.1029/2018WR024649>
- Schalko, I., Ruiz-Villanueva, V., & Maager, F. (2021). Wood Retention at Inclined Bar Screens: Effect of Wood Characteristics on Backwater Rise and Bedload Transport. *MDPI*, 13, 1–16.
- Schalko, I., Schmocker, L., Weitbrecht, V., & Boes, R. M. (2018a). Backwater rise due to large wood accumulations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(9), 1–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001501](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001501)
- Schalko, I., Schmocker, L., Weitbrecht, V., & Boes, R. M. (2018b). Hazards due to large wood accumulations: Local scour and backwater rise. *E3S Web of Conferences*, 40, 1–8. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184002003>
- Schmocker, L. (2017). Floating debris retention racks at dam spillways. *37th IAHR World Congress*. <https://doi.org/ISSN 2521-7119> (Print) - ISSN 2521-716X (Online) - ISSN 2521-7127 (USB)
- Schmocker, L., & Hager, W. H. (2013). Scale modeling of wooden debris accumulation at a debris rack. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(8), 827–836. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000714](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000714)
- Steeb, N., Rickenmann, D., Badoux, A., Rickli, C., & Waldner, P. (2017). Large wood recruitment processes and transported volumes in Swiss mountain streams during the extreme flood of August 2005.

- Geomorphology*, 279(August 2005), 112–127.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.10.011>
- Wallerstein, N. P., Alonso, C. V, Bennett, S. J., & Thorne, C. R. (2001). Distorted Froude-scaled flume analysis of large woody debris. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1283, 1265–1283.
<https://doi.org/10.1002/esp.271>

ANEXOS

ANEXO A: TABLAS

ANEXO B: PANEL FOTOGRÁFICO

ANEXO C: PLANO DE CONFIGURACION EXPERIMENTAL

ANEXO A: TABLAS

Tabla 01: Porcentajes de error relativo estándar de las principales mediciones y resultados obtenidos (%) – (Fuente: Elaboración propia)

Escenarios	h_o	h	$\Delta h/h_o$	T	L	T/L	A_L	α
1.00	0.09	0.03	4.48	0.00	0.00	0.00	0.90	0.90
2.00	0.18	0.40	11.01	6.25	4.70	2.87	2.77	2.99
3.00	0.36	0.24	5.02	0.00	3.64	3.53	2.43	1.81
4.00	0.18	13.37	2.71	2.00	5.00	3.16	1.73	1.17
5.00	19.02	31.57	6.00	5.88	2.94	4.68	11.18	11.07
6.00	0.10	4.56	4.46	2.04	4.29	6.41	2.69	2.82
7.00	0.46	8.25	5.94	4.34	9.64	5.02	5.05	4.79
8.00	1.04	12.59	4.07	2.33	5.66	6.79	2.92	1.99
9.00	14.66	4.99	0.37	2.14	5.75	5.10	2.76	1.90
10.00	0.10	5.34	3.46	1.05	4.06	3.40	1.65	1.74
11.00	0.39	8.07	2.07	0.84	0.00	0.84	0.62	0.67
12.00	0.47	8.19	1.39	0.66	8.99	8.28	1.26	2.37
13.00	15.42	37.06	2.83	1.82	7.15	6.08	17.35	16.89
14.00	0.84	7.19	4.12	1.41	3.34	2.06	5.39	4.00
15.00	1.27	5.85	2.74	2.44	5.63	3.46	3.52	4.00
16.00	1.13	11.03	2.02	1.72	3.23	4.25	7.99	2.02
17.00	2.42	1.67	3.23	2.94	16.37	17.91	15.80	10.47
18.00	0.10	5.97	5.64	2.41	6.56	5.20	28.87	24.54
19.00	1.13	7.57	0.23	1.64	23.13	19.61	3.77	3.85
20.00	0.66	2.69	3.08	3.85	0.00	3.85	3.30	2.52
Máximo	19.02	37.06	11.01	6.25	23.13	19.61	28.87	24.54

Escenarios	h_o	h	$\Delta h/h_o$	T	L	T/L	A_L	α
Mínimo	0.09	0.03	0.23	0.00	0.00	0.00	0.62	0.67
Promedio	3.00	8.83	3.74	2.29	6.00	5.62	6.10	5.12

Tabla 02: Datos de tirantes medidos durante los ensayos en los ejes del canal para cada condición de flujo y densidad

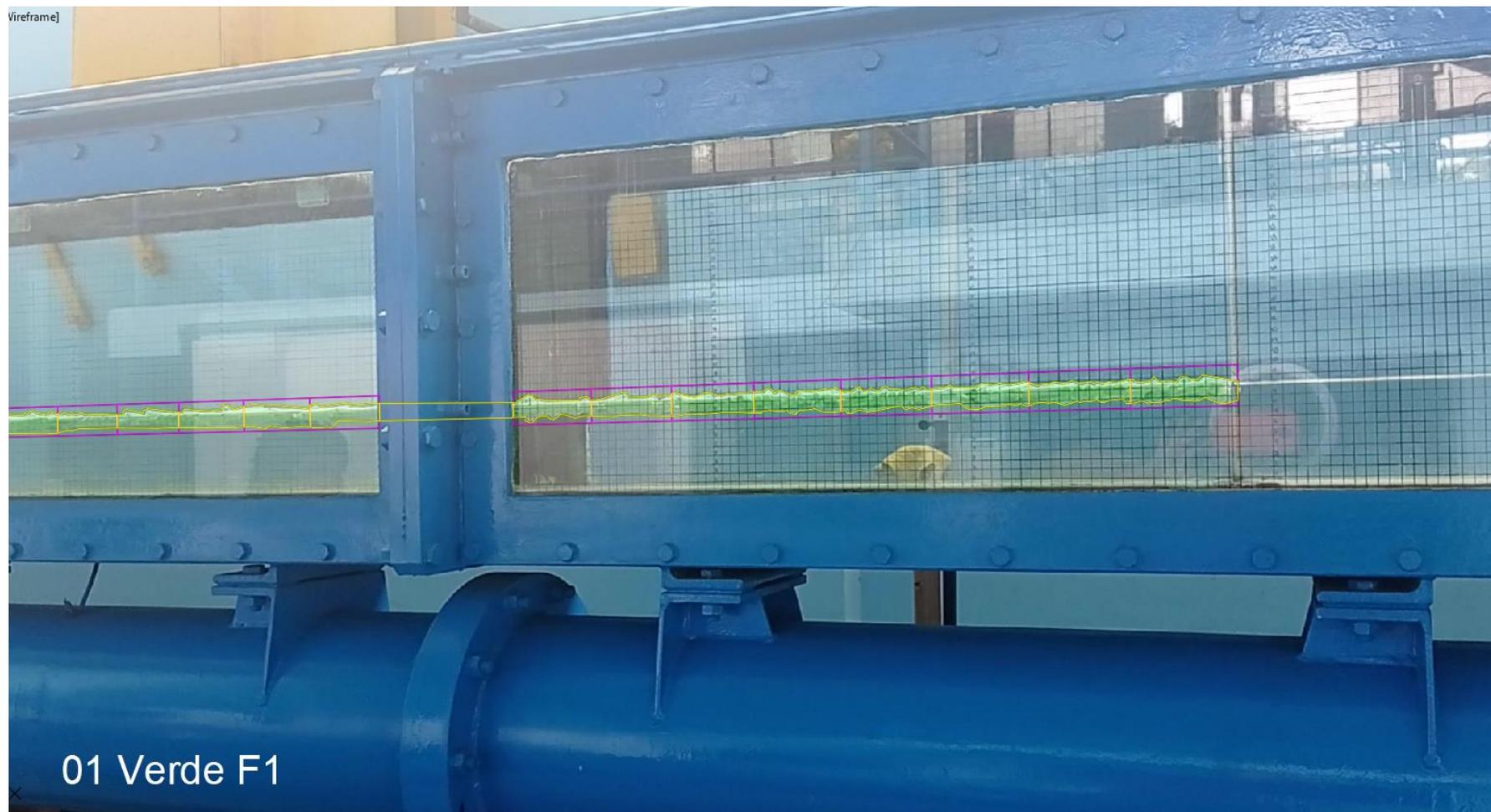
TIRANTES EN EJES (cm)																				
Ejes		ho	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Grupo	Fo	-30	-500	-300	-210	-110	-90	-70	-50	-30	-20	-10	10	20	30	40	60	80	130	250
Verde	0.2	10.11	10.17	10.42	10.39	10.38			10.27	10.39	10.44	10.28	10.02	9.99	10.00	10.01	9.95	9.87	9.82	10.05
Verde	0.2	10.10	10.14	10.38	10.39	10.31			10.09	10.15	10.14	10.16	10.02	9.99	10.00	9.98	9.92	9.87	9.82	10.01
Verde	0.2	10.13	10.14	10.37	10.38	10.31			10.21	10.17	10.11	10.07	10.03	9.99	10.01	10.01	9.93	9.87	9.81	10.04
Azul	0.2	10.10	10.22	10.44	10.46	10.34			10.22	10.13	10.15	10.28	9.97	9.99	9.99	9.98	9.93	9.89	9.82	10.04
Azul	0.2	10.15	10.25	10.48	10.51	10.48			10.21	10.27	10.28	10.22	10.02	10.01	10.02	10.02	9.96	9.92	9.86	10.04
Azul	0.2	10.09	10.24	10.46	10.50	10.44			10.22	10.21	10.14	10.17	9.98	9.96	9.94	10.01	9.92	9.87	9.83	10.02
Amarillo	0.2	10.13	11.74	11.97	11.98	11.87			10.69	11.69	11.71	11.65	9.53	9.75	9.84	9.89	9.89	9.90	9.83	10.03
Amarillo	0.2	10.04	11.63	11.84	11.89	11.80			11.63	11.65	11.58	11.52	9.60	9.69	9.82	9.86	9.83	9.86	9.78	9.99
Amarillo	0.2	10.08	11.47	11.16	11.71	11.58			11.51	11.38	11.45	11.38	9.75	9.79	9.89	9.91	9.91	9.86	9.80	10.00
Rojo	0.2	10.09	17.28	17.56	17.57	17.53			17.47	17.45	17.43	17.36	9.66	9.86	9.94	9.96	9.93	9.86	9.78	9.98
Rojo	0.2	10.14	17.98	18.23	18.28	18.23			18.15	18.14	18.17	18.14	9.56	9.89	9.96	10.08	10.04	9.97	9.87	10.11
Rojo	0.2	10.09	17.28	17.51	17.52	17.51			17.43	17.42	17.42	17.47	10.02	9.97	9.97	10.01	9.95	9.86	9.79	10.01
Verde	0.3	5.93	7.10	7.28	7.25	7.24			6.89	7.01	6.99		5.45	5.57	5.68	5.75	5.71	5.61	5.52	5.67
Verde	0.3	5.91	7.12	7.28	7.28	7.45			6.94	6.91	7.00		5.44	5.60	5.71	5.74	5.65	5.60	5.48	5.55
Verde	0.3	5.86	6.95	7.11	7.10	7.13			6.83	6.83	6.79		5.48	5.69	5.75	5.75	5.65	5.57	5.50	5.57
Azul	0.3	5.87	8.03	8.22	8.20	8.08			7.90	7.97	7.91	8.05	5.04	5.41	5.49	5.62	5.61	5.55	5.43	5.51
Azul	0.3	5.88	8.04	8.23	8.21	8.29			7.98	7.92	7.89	7.87	5.21	5.39	5.55	5.63	5.58	5.59	5.44	5.55
Azul	0.3	5.89	7.82	8.01	8.00	7.96			7.71	7.65	7.68	7.61	5.36	5.59	5.72	5.68	5.65	5.57	5.45	5.58
Amarillo	0.3	5.91	10.45	10.65	10.66	10.53			10.43	10.42	10.54	10.40	5.39	5.76	5.78	5.79	5.71	5.65	5.56	5.72
Amarillo	0.3	5.82	9.83	10.05	10.03	10.00			9.81	9.80	9.82	9.81	4.99	5.33	5.52	5.61	5.57	5.49	5.38	5.48
Amarillo	0.3	5.82	9.33	9.55	9.55	9.52			9.27	9.24	9.24	9.19	5.29	5.22	5.36	5.47	5.46	5.48	5.37	5.48
Rojo	0.3	6.03	13.87	14.11	14.12	14.04			14.02	13.95	13.96	13.94	5.43	5.76	5.78	5.77	5.71	5.64	5.53	5.58

TIRANTES EN EJES (cm)																				
Ejes		ho	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Grupo	Fo	-30	-500	-300	-210	-110	-90	-70	-50	-30	-20	-10	10	20	30	40	60	80	130	250
Rojo	0.3	5.96	14.36	14.58	14.59	14.56			14.49	14.43	14.46	14.40	5.39	5.77	5.77	5.68	5.61	5.57	5.52	5.47
Rojo	0.3	5.98	14.96	15.19	15.20	15.13			15.02	15.06	15.04	14.97	5.49	5.54	5.58	5.70	5.60	5.55	5.41	5.50
Verde	0.4	9.70	12.82	12.93	12.98	12.86	12.84	12.84	13.09				7.86	8.71	9.05	9.12	9.22	9.15	9.11	9.17
Verde	0.4	9.70	13.12	13.26	13.28	13.19	13.14	13.10	13.05				8.15	8.61	8.85	9.12	9.20	9.19	9.09	9.14
Verde	0.4	9.69	13.04	13.16	13.13	13.02	12.94	12.81	13.07				7.92	8.80	9.10	9.17	9.23	9.09	9.03	9.09
Azul	0.4	9.69	14.99	15.09	15.04	14.91	14.88	14.86	15.09	14.76		14.87	7.95	8.75	9.02	9.06	9.14	9.14	9.07	9.17
Azul	0.4	9.66	15.67	15.86	15.82	15.72	15.67	15.68	15.63		15.61	15.77	7.89	8.70	8.90	8.97	9.08	9.06	8.97	9.07
Azul	0.4	9.68	15.21	15.36	15.34	15.27	15.23	15.20	15.09	15.05	15.04	14.92	8.09	8.51	8.90	9.03	9.12	9.18	9.08	9.14
Amarillo	0.4	9.80	19.44	19.66	19.67	19.55			19.59	19.29	19.40	19.49	7.25	8.53	8.84	8.91	8.98	8.96	8.85	9.08
Amarillo	0.4	9.79	19.14	19.34	19.34	19.27			19.29	19.09	19.23	18.04	8.06	8.89	9.22	9.25	9.27	9.24	9.16	9.25
Amarillo	0.4	9.58	19.47	19.65	19.65	19.57			19.56	19.57	19.45	19.51	8.14	8.80	9.09	9.11	9.10	9.06	8.99	9.07
Rojo	0.4	9.72	25.26	25.50	25.49	25.42			25.35	25.33	25.46	25.30	7.26	8.53	9.15	9.18	9.19	9.10	8.98	9.06
Rojo	0.4	9.71	24.93	25.15	25.20	25.08			25.03	25.07	25.14	24.71	6.64	8.49	9.10	9.24	9.20	9.10	9.01	9.09
Rojo	0.4	9.60	25.48	25.70	25.72	25.62			25.60	25.59	25.60	25.58	6.56	8.74	9.23	9.32	9.23	9.13	8.97	9.02
Verde	0.5	6.20	9.40	8.90	9.07	9.11			8.60	8.78			3.93	5.59	5.60	5.64	5.71	5.67	5.55	5.97
Verde	0.5	6.21	8.67	9.20	9.37	9.40			9.39	9.20	9.13	8.91	3.60	5.51	5.66	5.61	5.64	5.62	5.46	5.77
Verde	0.5	6.17	8.64	9.11	9.22	9.31			9.01	8.88	9.03	8.84	4.65	5.29	5.54	5.56	5.56	5.51	5.41	5.64
Azul	0.5	6.13	10.62	11.15	11.26	11.33			11.43	11.13	11.40	11.21	2.65	2.98	3.57	5.38	5.60	5.54	5.39	5.65
Azul	0.5	6.00	11.09	11.62	11.73	11.87			11.79	11.70	12.00	12.12	1.95	3.60	2.79	2.49	4.50	4.75	5.49	5.75
Azul	0.5	5.88	10.63	11.10	11.28	11.33			11.37	11.40	11.19	11.20	2.29	2.99	5.31	5.48	5.51	5.46	5.40	5.59
Amarillo	0.5	6.10	13.12	13.63	13.75	13.81			13.71	13.78	13.89	13.66	3.87	5.19	5.34	5.70	5.55	5.55	5.23	5.74
Amarillo	0.5	6.12	12.05	13.04	13.18	13.22			13.12	13.19	13.22	13.20	3.16	4.13	5.42	5.56	5.57	5.54	5.47	5.67
Amarillo	0.5	6.12	13.16	13.66	13.78	13.82			13.78	13.75	13.90	13.83	3.06	5.19	5.60	5.63	5.63	5.54	5.41	5.67

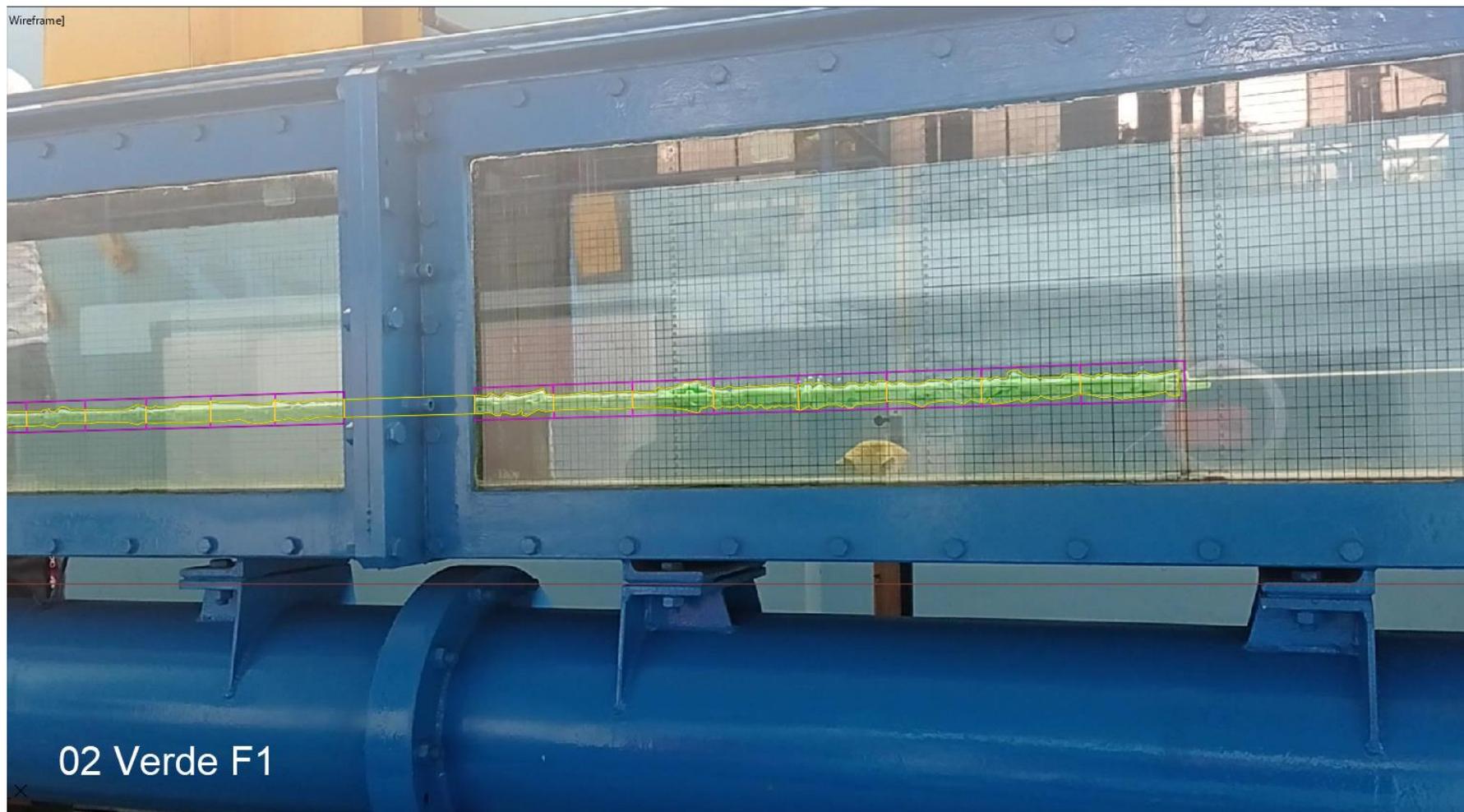
TIRANTES EN EJES (cm)																				
Ejes		ho	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Grupo	Fo	-30	-500	-300	-210	-110	-90	-70	-50	-30	-20	-10	10	20	30	40	60	80	130	250
Rojo	0.5	6.13	19.19	19.67	19.81	19.90			19.87	19.96	19.88	19.90	3.32	3.32	4.89	5.38	5.45	5.44	5.29	5.58
Rojo	0.5	5.92	18.54	19.07	19.23	19.31			19.31	19.36	19.36	19.20	1.99	3.93	5.65	5.63	5.59	5.53	5.44	5.69
Rojo	0.5	6.11	18.27	18.82	18.98	19.06			19.05	19.12	19.09	19.15	3.12	3.35	2.97	2.55	5.29	5.32	5.19	5.55
Verde	1.4	6.49	15.51	17.41	18.22	19.17			19.54	20.13			6.96	5.75	5.95	6.56	5.31	5.20	6.06	5.85
Verde	1.4	6.63	16.11	18.14	18.01	18.66			19.03	19.19	20.06	19.96	7.48	6.27	6.07	6.21	5.00	6.02	5.76	5.84
Verde	1.4	6.52	16.12	17.85	18.74	19.48			19.93	20.06	20.67		6.10	5.23	5.44	5.65	5.95	5.17	5.39	5.91
Azul	1.4	6.50	16.88	18.79	19.55	20.34			20.70	20.91	21.68		7.77	6.37	5.76	6.00	6.23	5.20	5.95	5.97
Azul	1.4	6.50	18.81	20.43	21.28	21.93			22.32	22.41	24.57		7.09	5.51	5.46	5.80	5.28	6.31	5.78	5.79
Azul	1.4	6.32	17.21	19.21	19.81	20.77			21.14	21.20	21.38		5.96	6.42	7.28	5.61	4.60	5.62	5.82	6.05
Amarillo	1.4	6.47	22.94	24.80	25.44	26.28			26.55	26.87	26.95	27.14	7.19	5.19	4.49	4.34	5.35	5.45	5.52	5.83
Amarillo	1.4	6.57	23.27	25.13	25.72	26.56			26.97	27.09	27.24	27.34	6.42	5.21	5.77	5.36	4.89	5.85	5.62	6.02
Amarillo	1.4	6.50	23.04	24.89	25.60	26.43			26.75	26.92	27.10	27.43	7.08	5.46	5.68	5.21	5.29	5.78	5.59	5.71
Rojo	1.4	6.59	25.61	27.56	28.26	29.01			29.27	29.54	29.61	29.53	7.76	7.08	5.99	5.48	5.48	5.73	5.23	5.88
Rojo	1.4	6.65	25.27	27.03	27.84	28.67			29.07	29.25	29.30	29.21	9.05	7.04	6.25	5.07	4.48	6.34	5.70	6.07
Rojo	1.4	6.62	23.50	25.34	26.10	26.95			27.30	27.41	27.58	27.46	10.39	3.01	4.03	5.38	6.10	4.70	5.57	5.33

Fuente: Elaboración propia

ANEXO B: PANEL FOTOGRAFICO



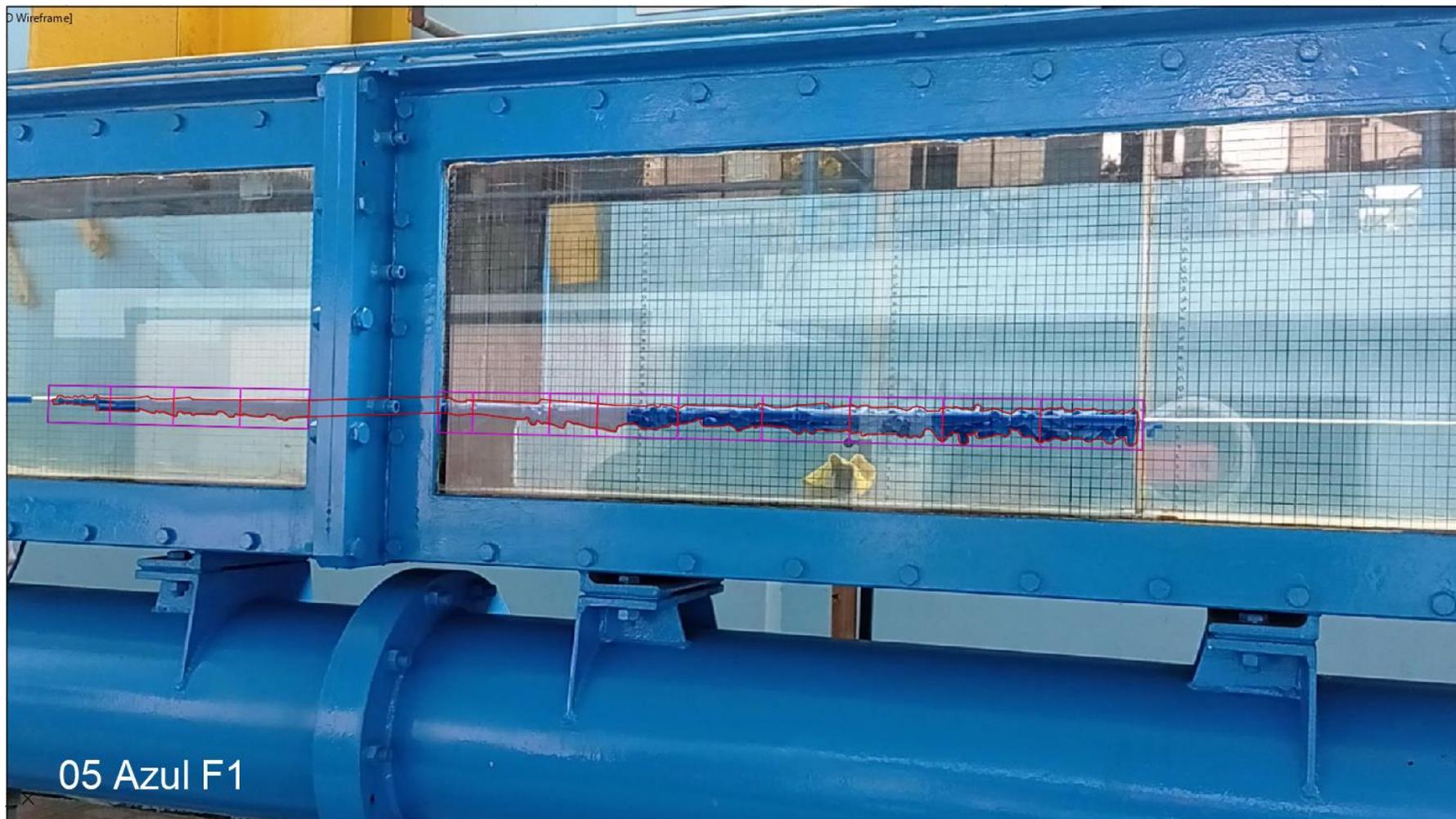
Fotografía 01: Análisis videométrico para la acumulación con $F_o = 0.2$, $\rho_T = 400 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 360.69 \text{ cm}^2$.



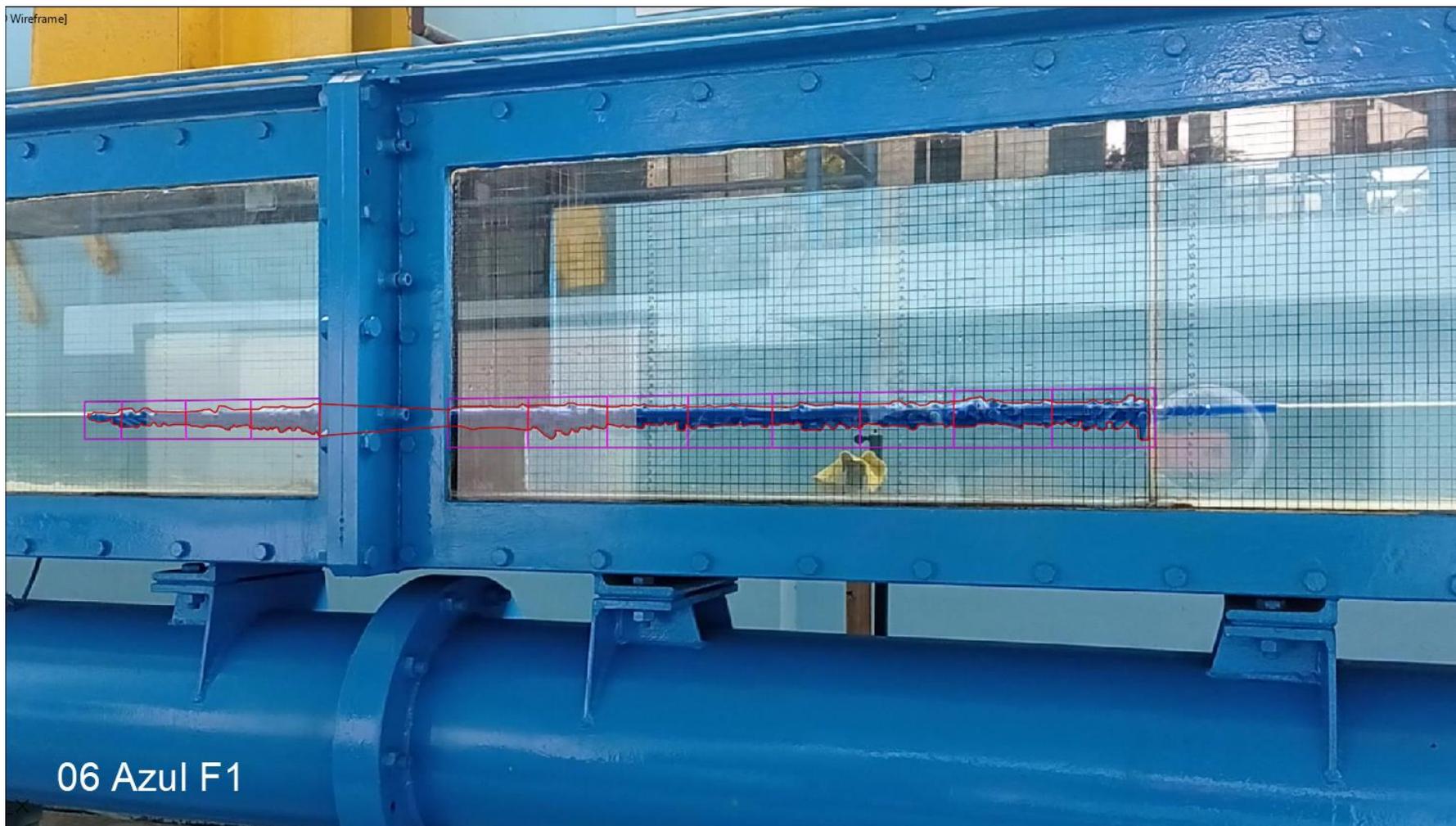
Fotografía 02: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.2$, $\rho_T=400 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 351.16 \text{ cm}^2$.



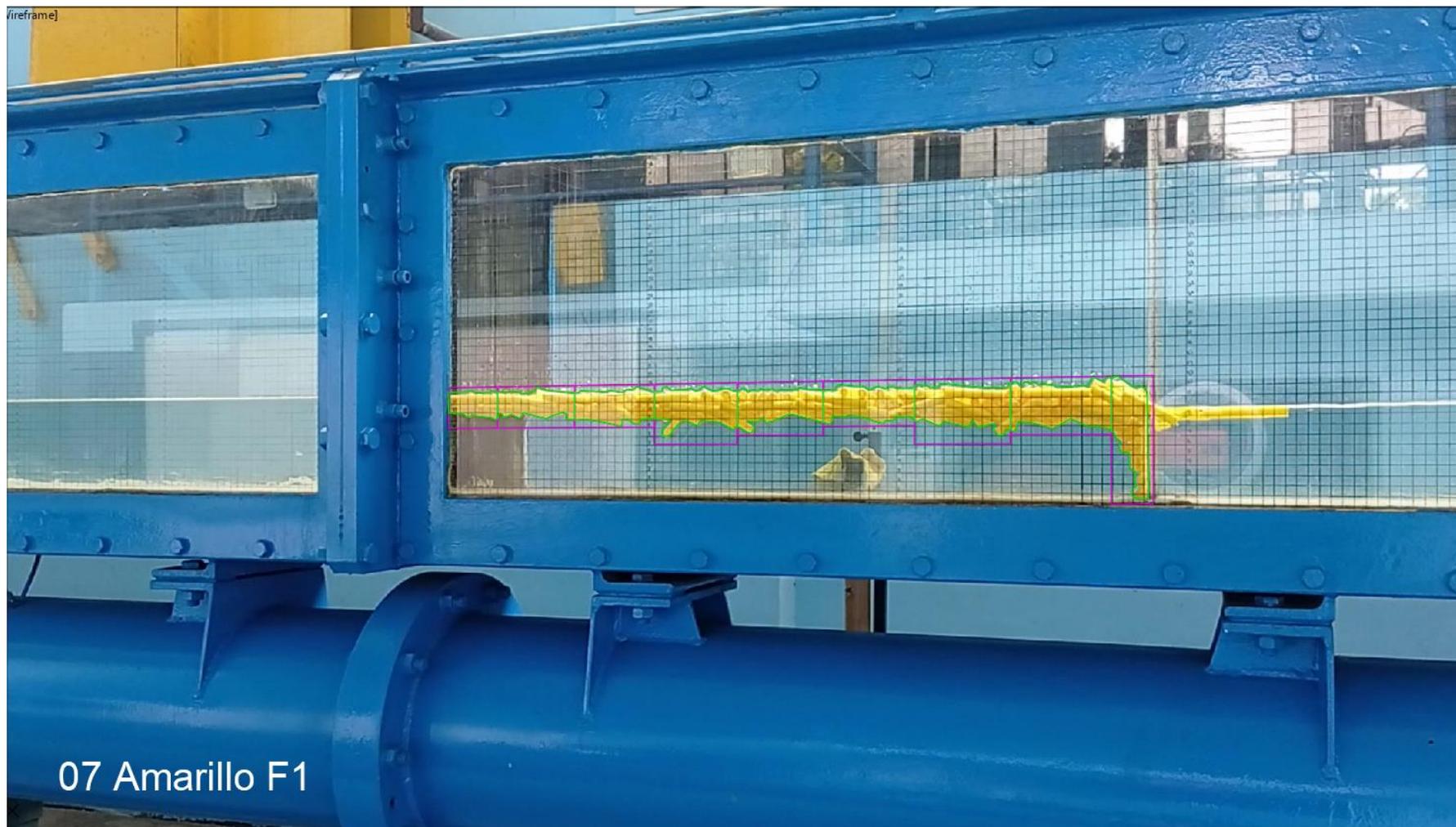
Fotografía 03: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.2$, $\rho_T=600 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 298.55 \text{ cm}^2$.



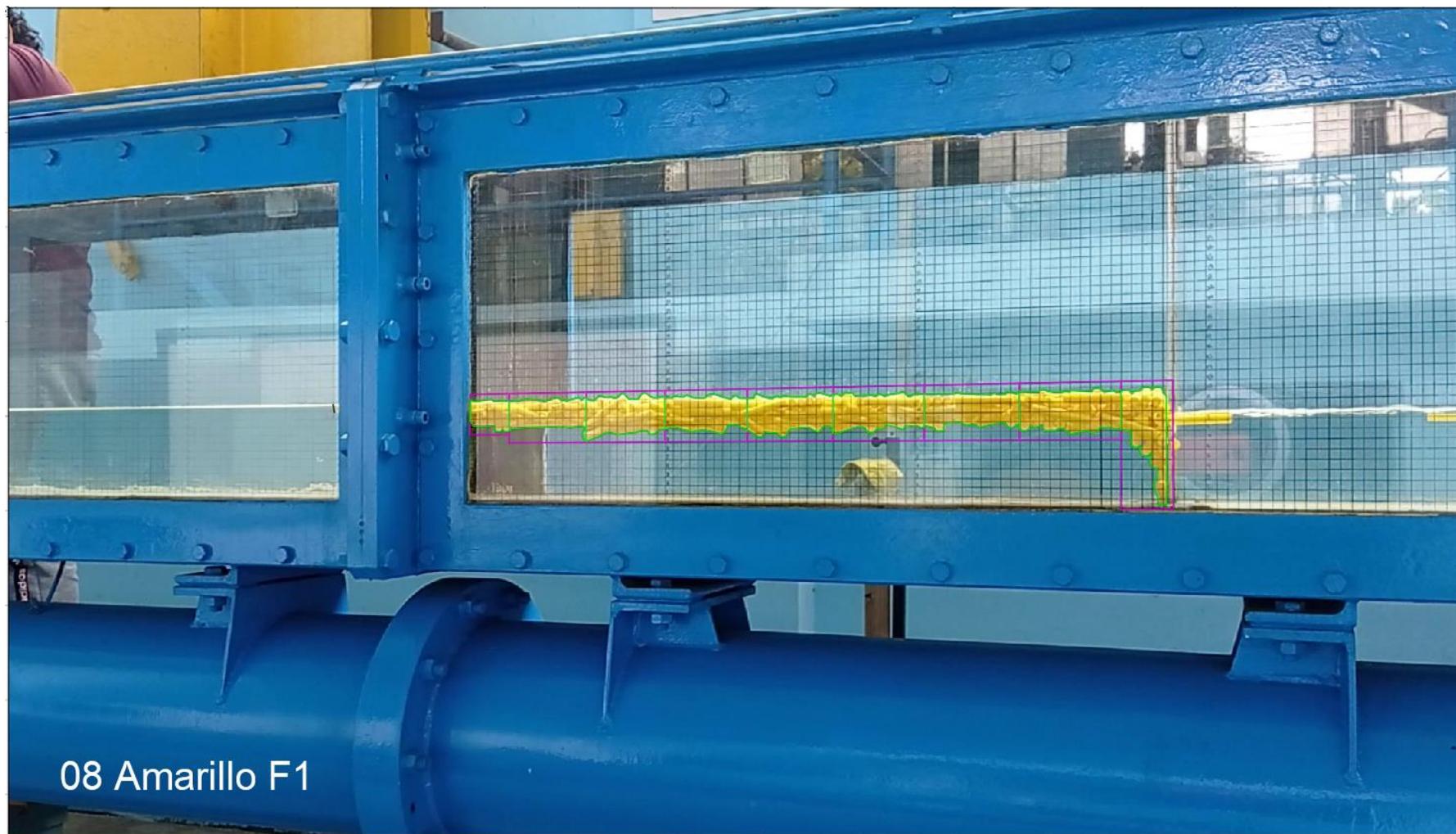
Fotografía 04: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.2$, $\rho_T=600 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 313.25 \text{ cm}^2$.



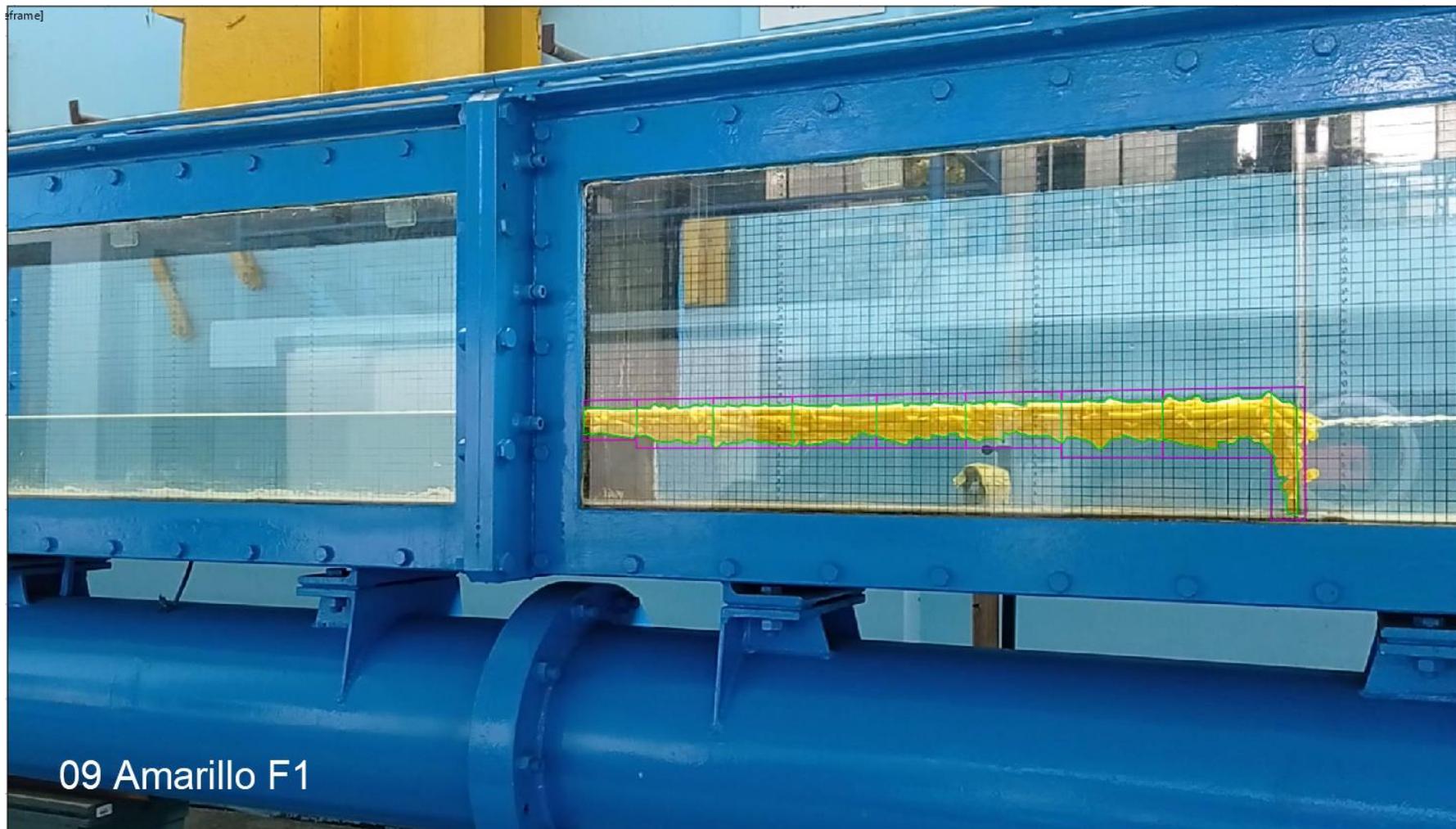
Fotografía 05: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.2$, $\rho_T=600 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 328.65 \text{ cm}^2$.



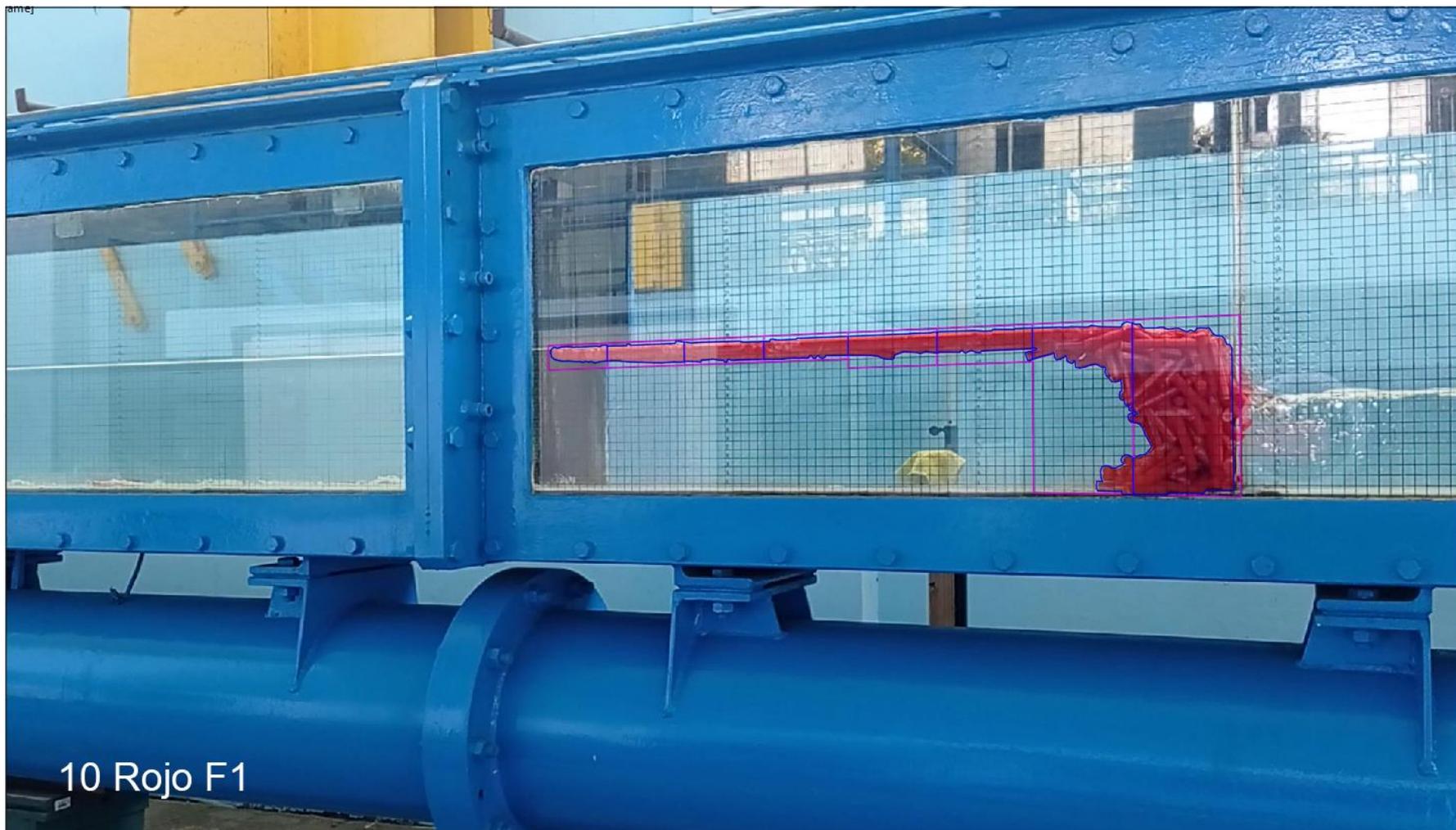
Fotografía 06: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.2$, $\rho_T=800 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 352.54 \text{ cm}^2$.



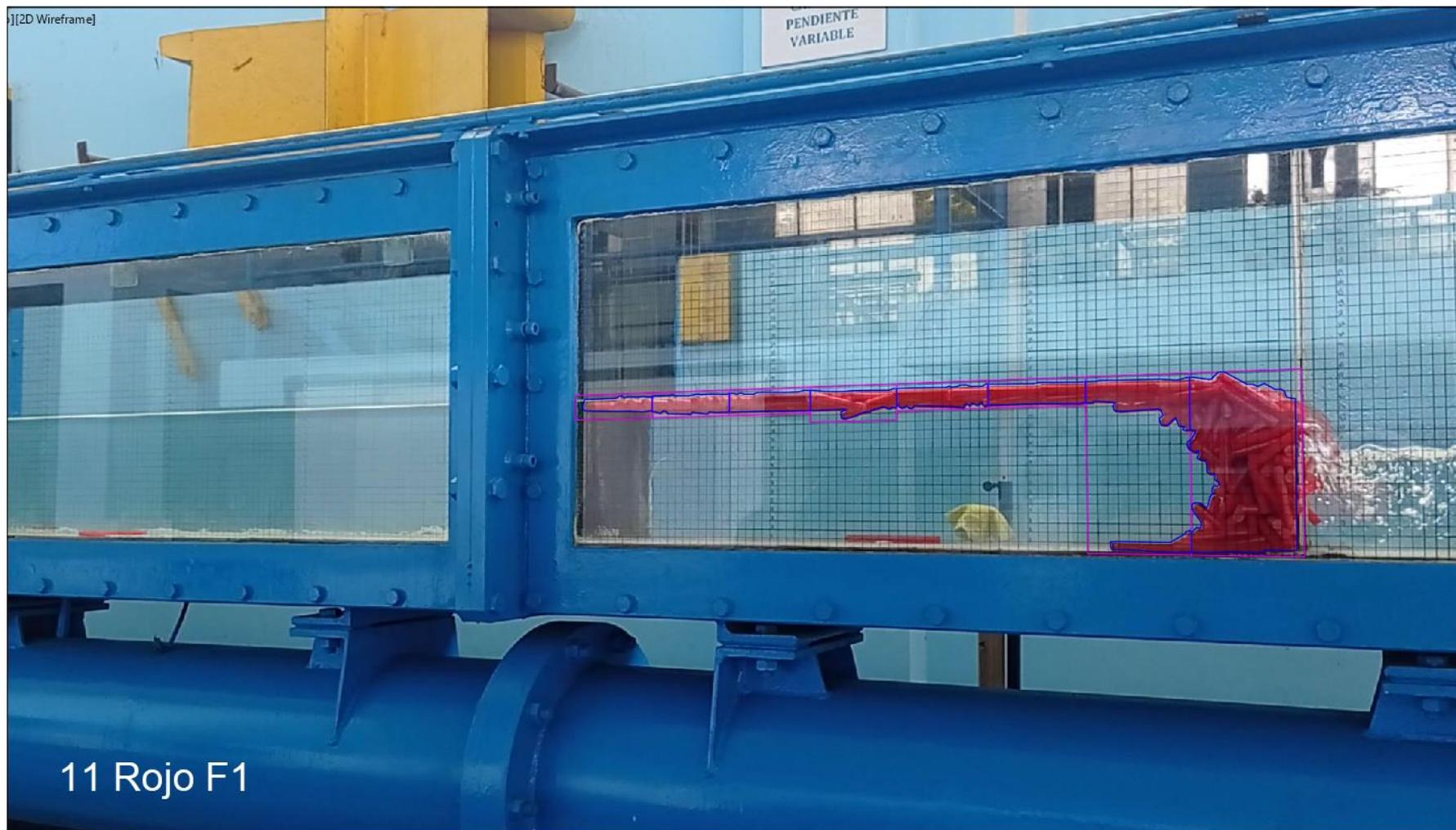
Fotografía 07: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.2$, $\rho_T=800 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 362.44 \text{ cm}^2$.



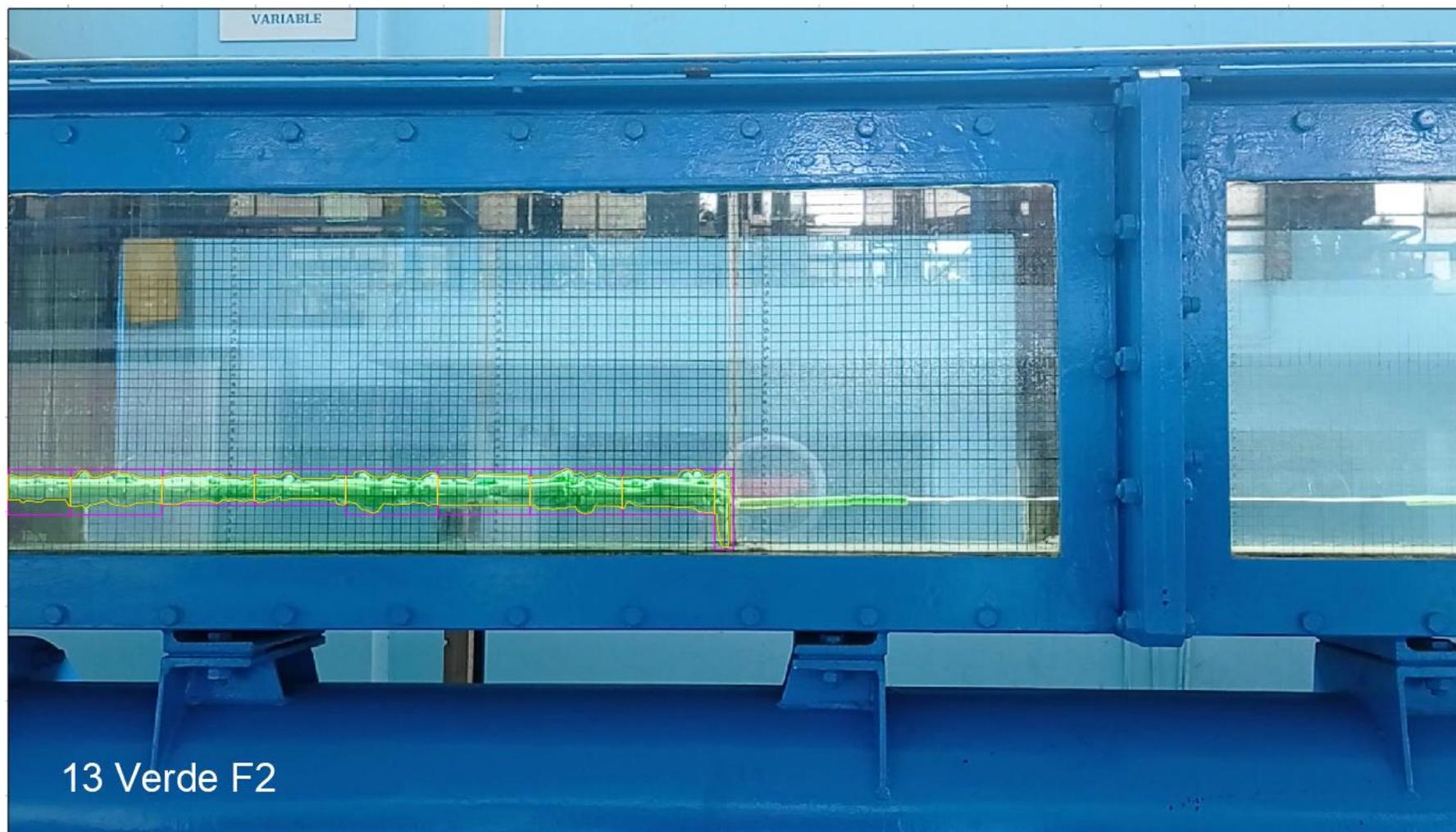
Fotografía 08: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.2$, $\rho_T=800 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 382.79 \text{ cm}^2$.



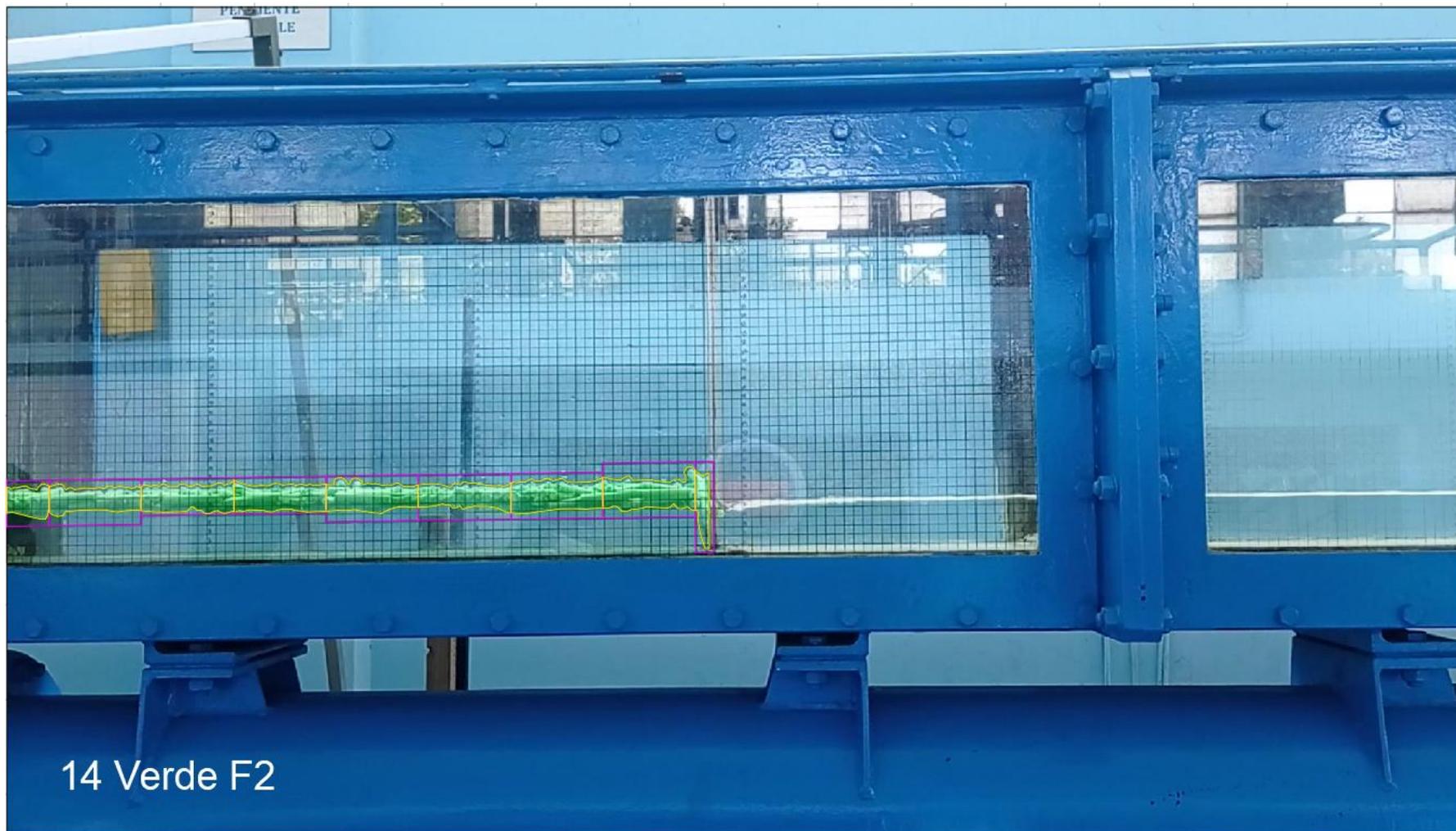
Fotografía 09: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.2$, $\rho_T=950 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 325.96 \text{ cm}^2$.



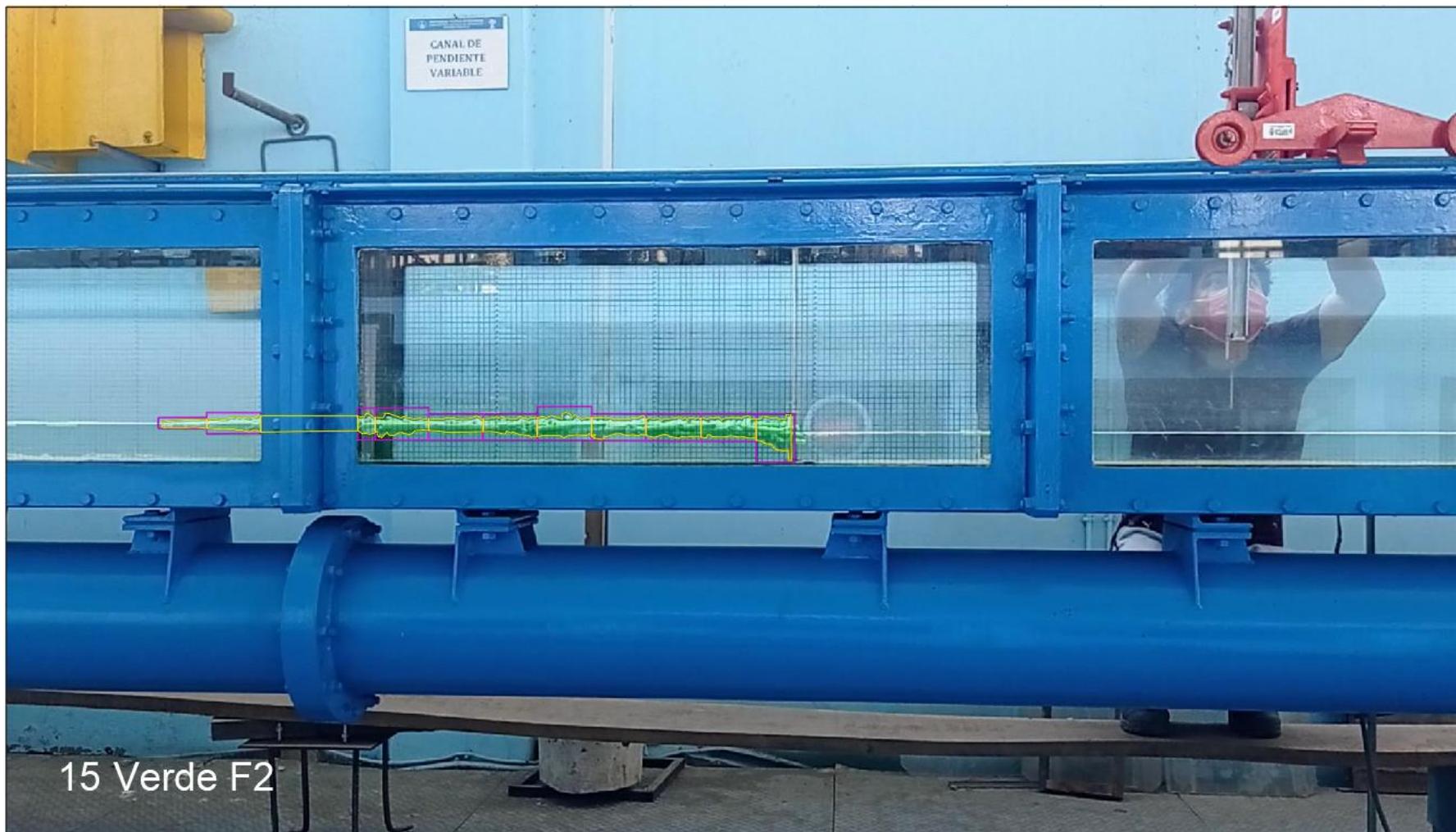
Fotografía 10: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.2$, $\rho_T=950 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 309.37 \text{ cm}^2$.



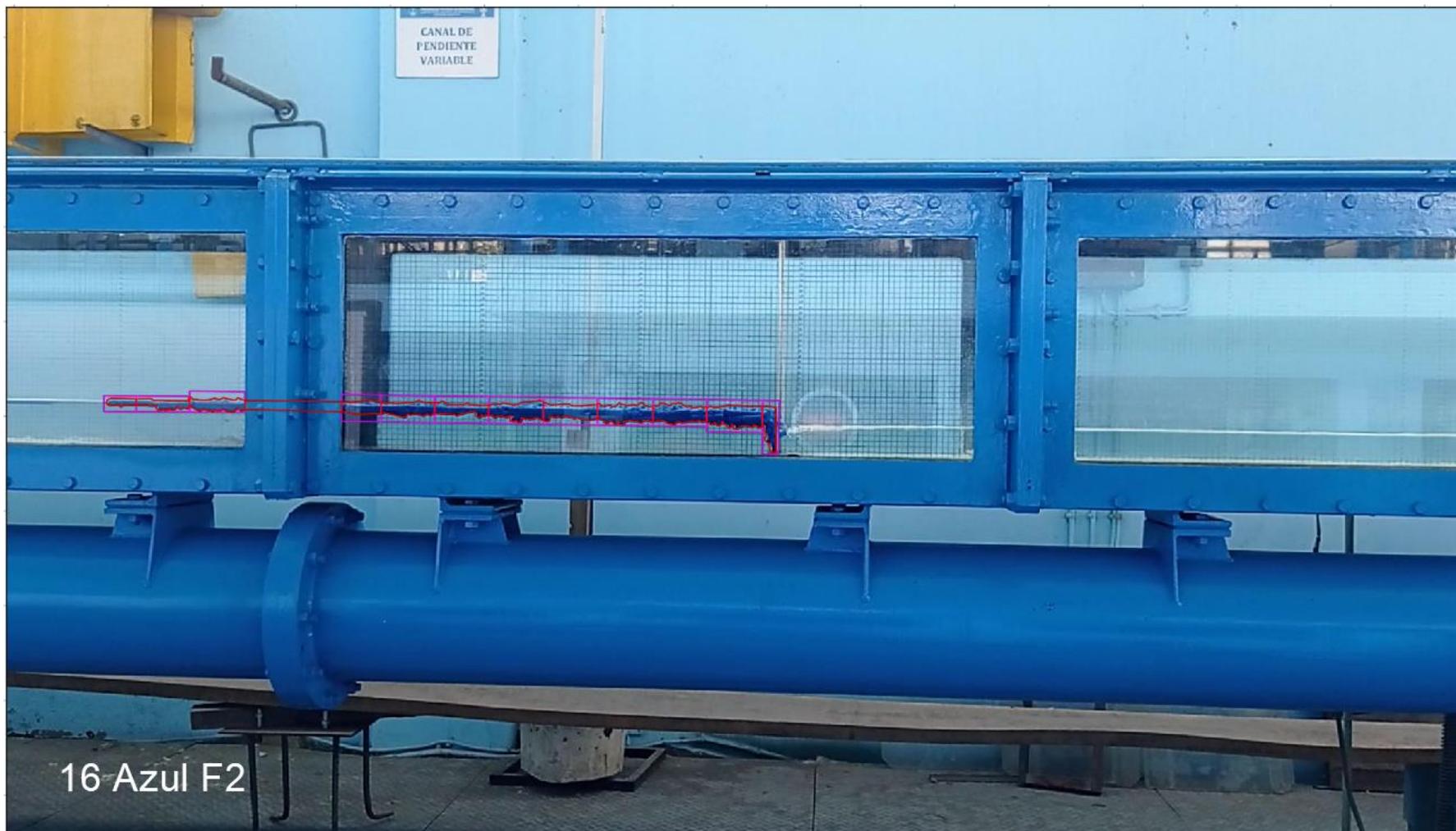
Fotografía 11: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.3$, $\rho_T=400 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 531.91 \text{ cm}^2$.



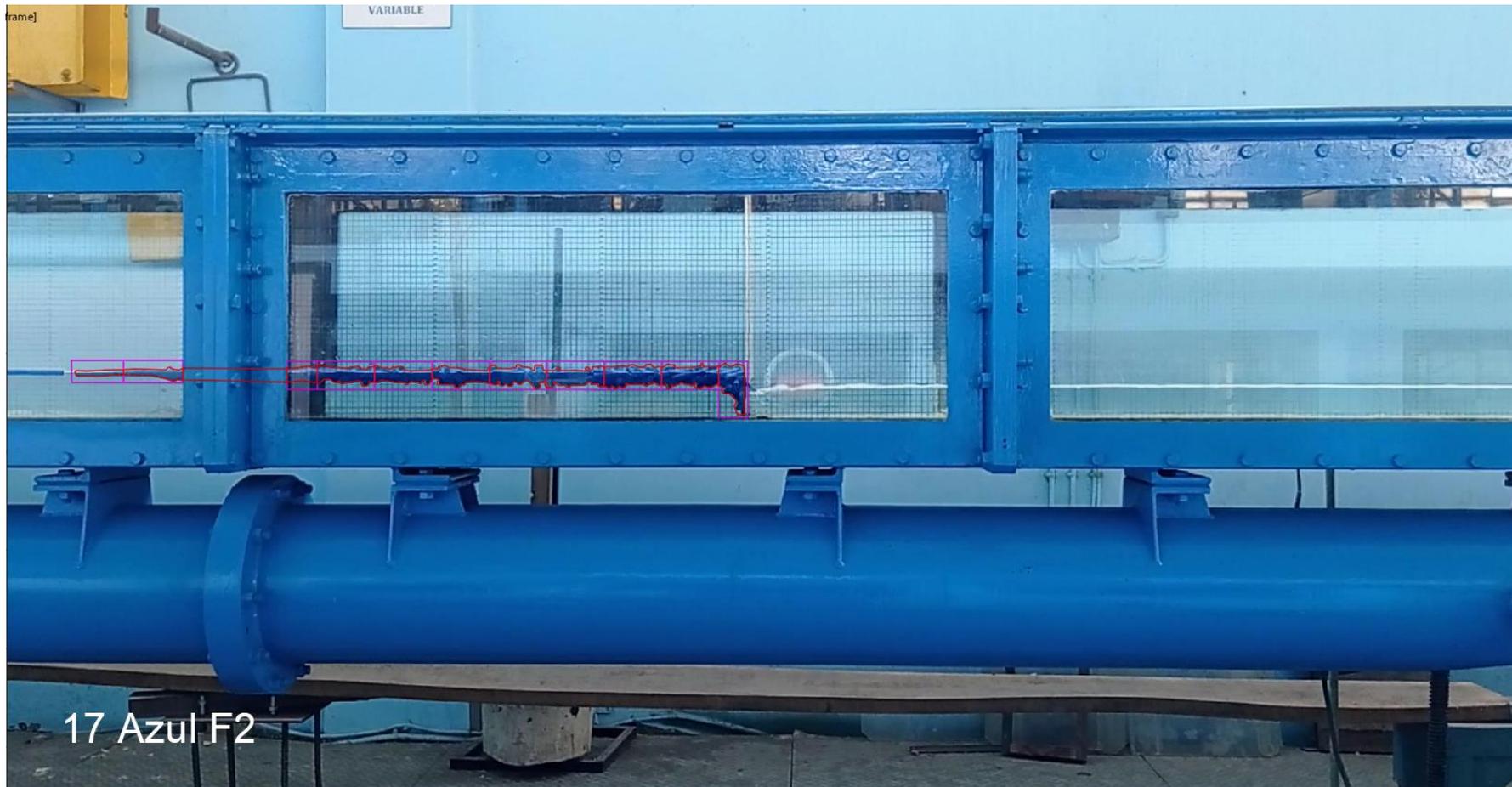
Fotografía 12: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.3$, $\rho_T=400 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 481.07 \text{ cm}^2$.



Fotografía 13: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.3$, $\rho_T=400 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 691.84 \text{ cm}^2$.



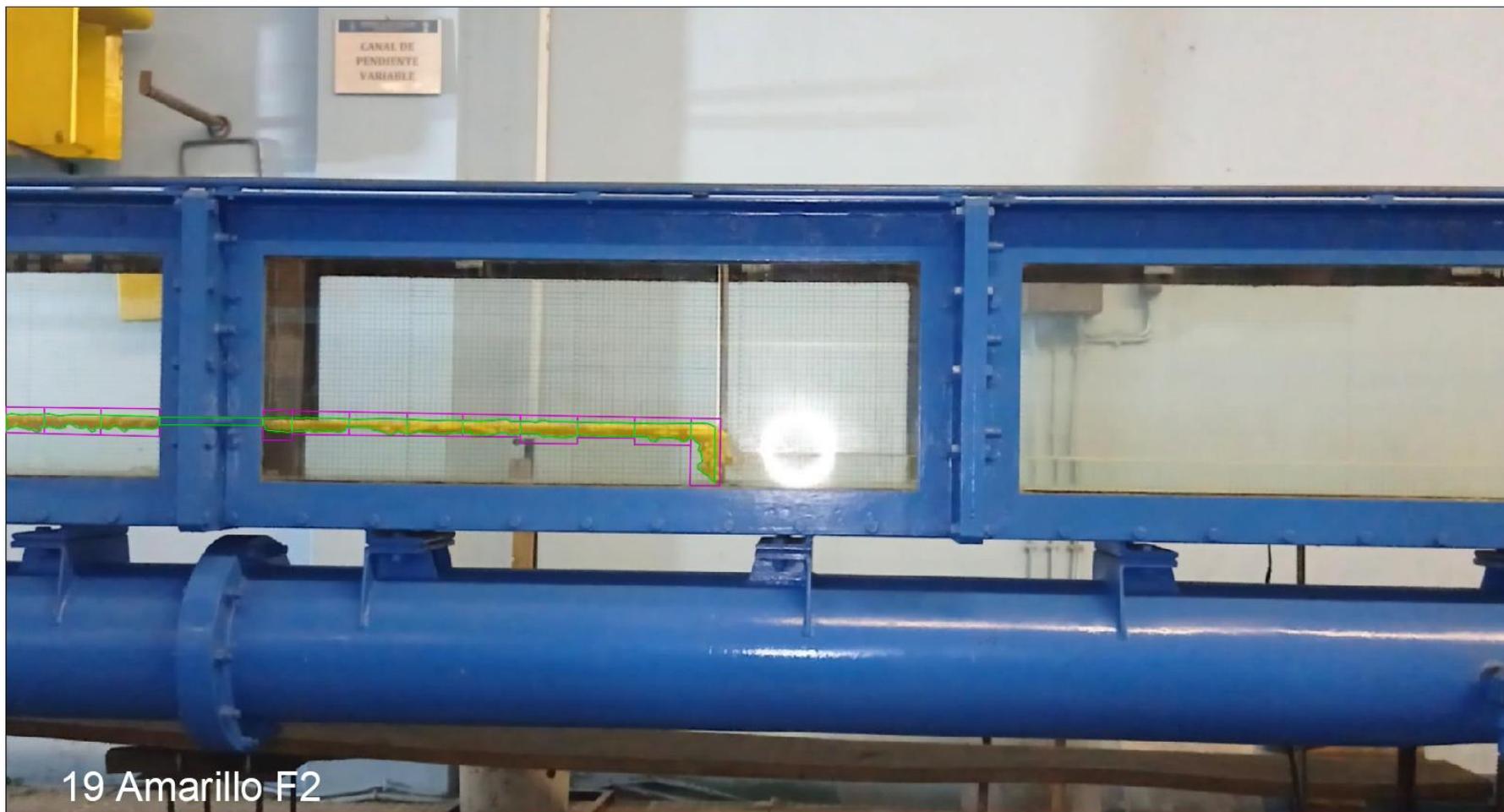
Fotografía 14: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.3$, $\rho_T=600 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 585.71 \text{ cm}^2$.



Fotografía 15: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.3$, $\rho_T=600 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 586.16 \text{ cm}^2$.



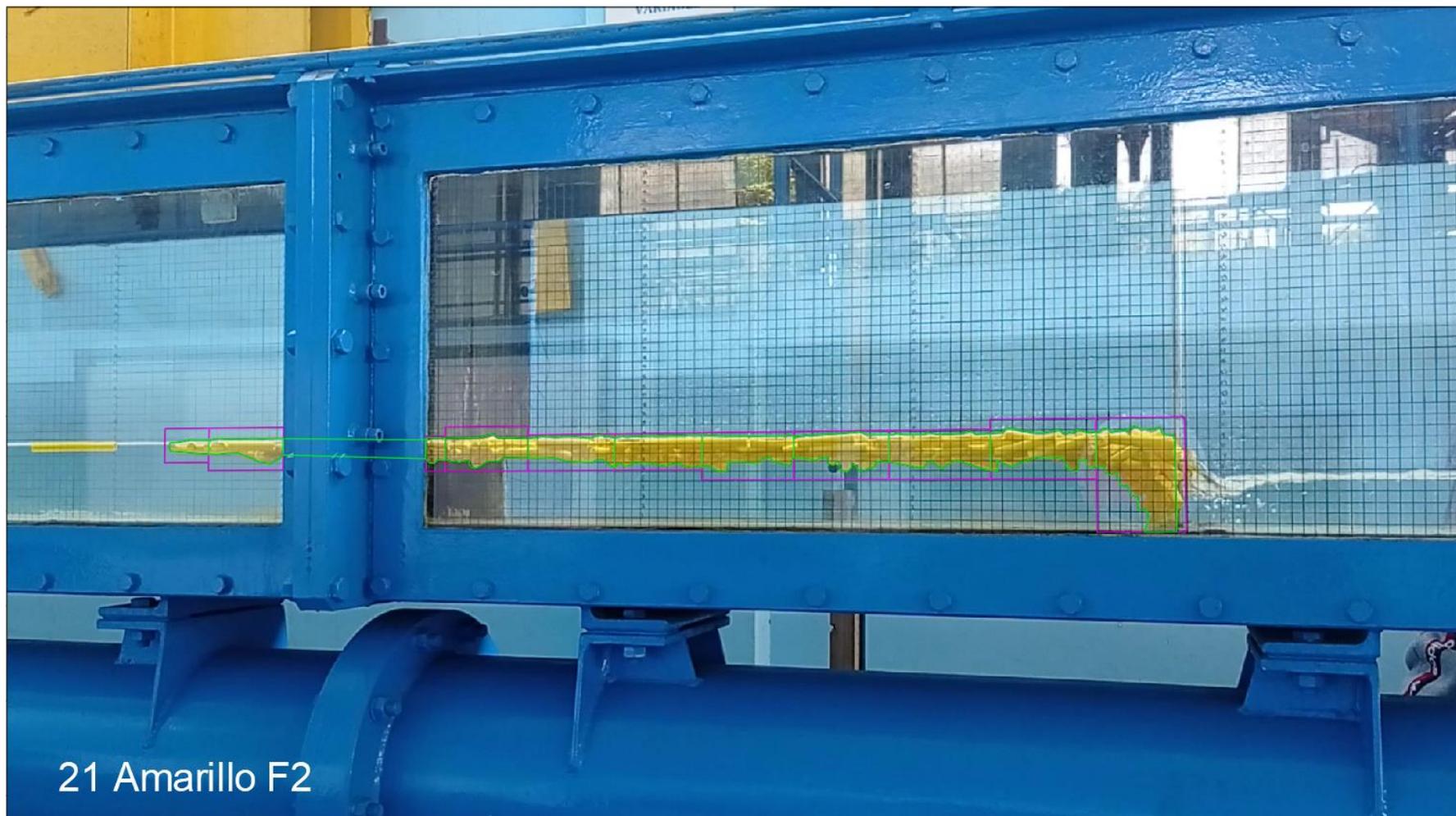
Fotografía 16: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.3$, $\rho_T=600 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 634.46 \text{ cm}^2$.



Fotografía 17: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.3$, $\rho_T=600 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 590.10 \text{ cm}^2$.



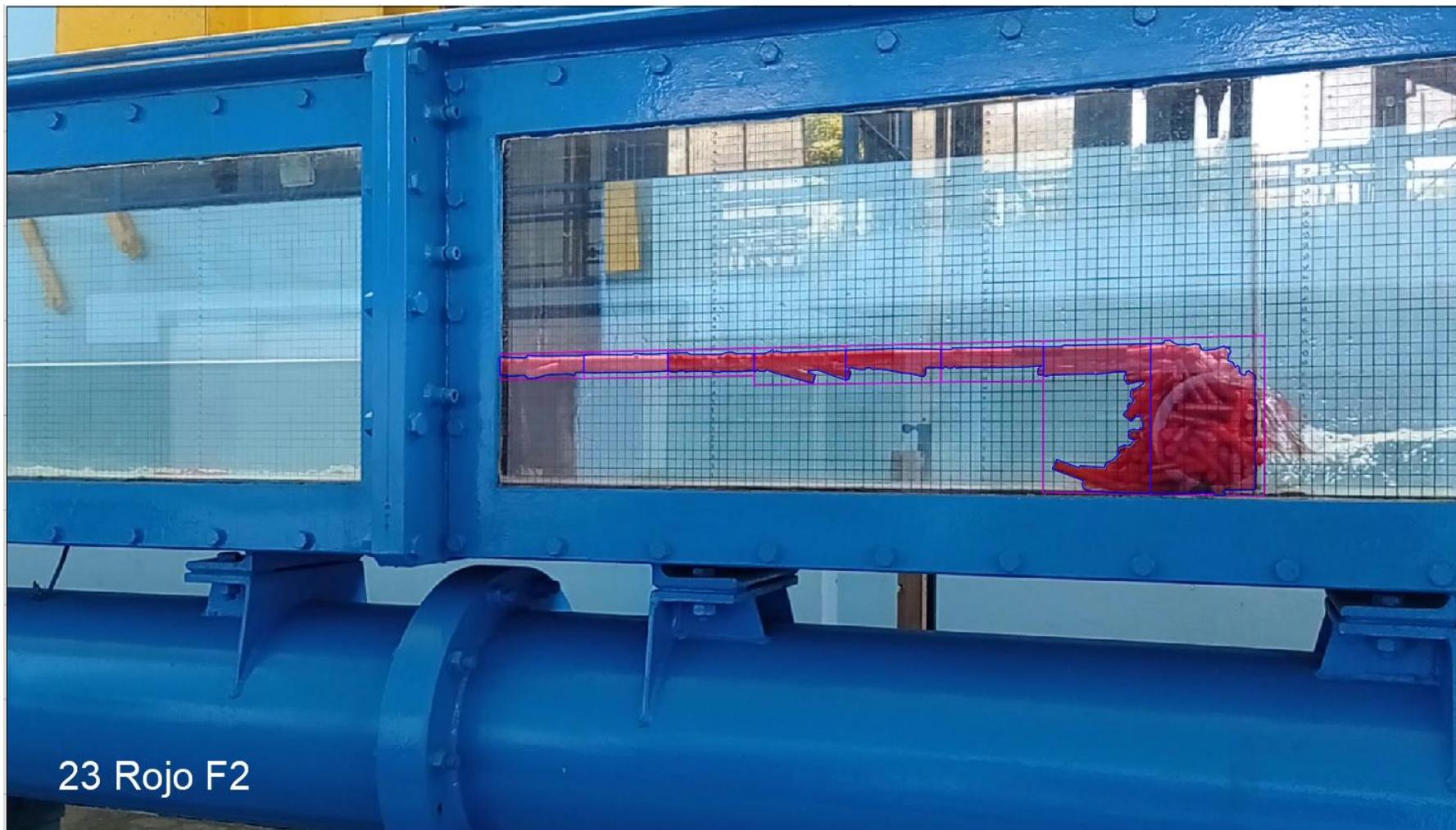
Fotografía 18: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.3$, $\rho_T=600 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 703.32 \text{ cm}^2$.



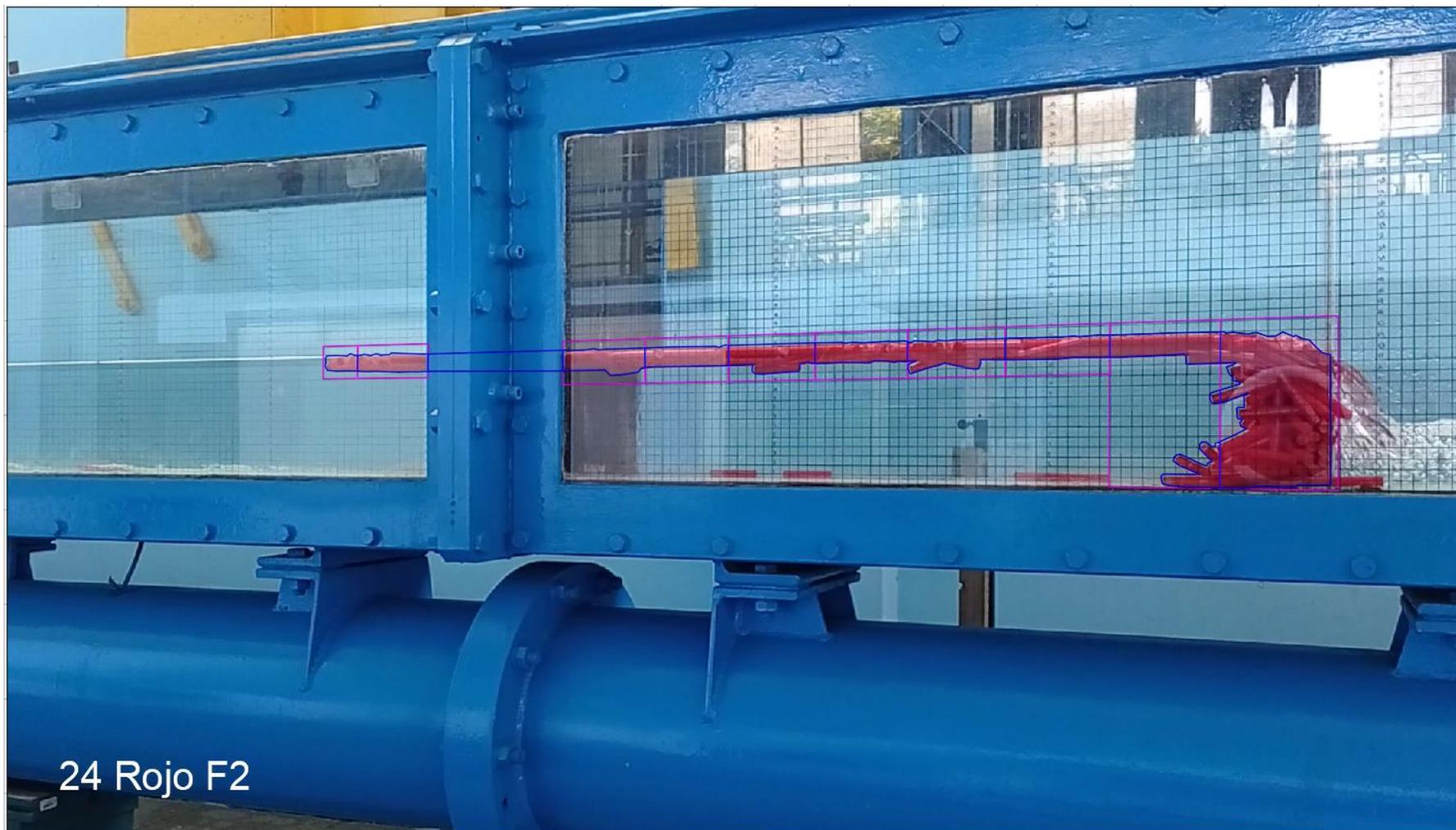
Fotografía 19: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo = 0.3$, $\rho_T = 800 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 646.50 \text{ cm}^2$.



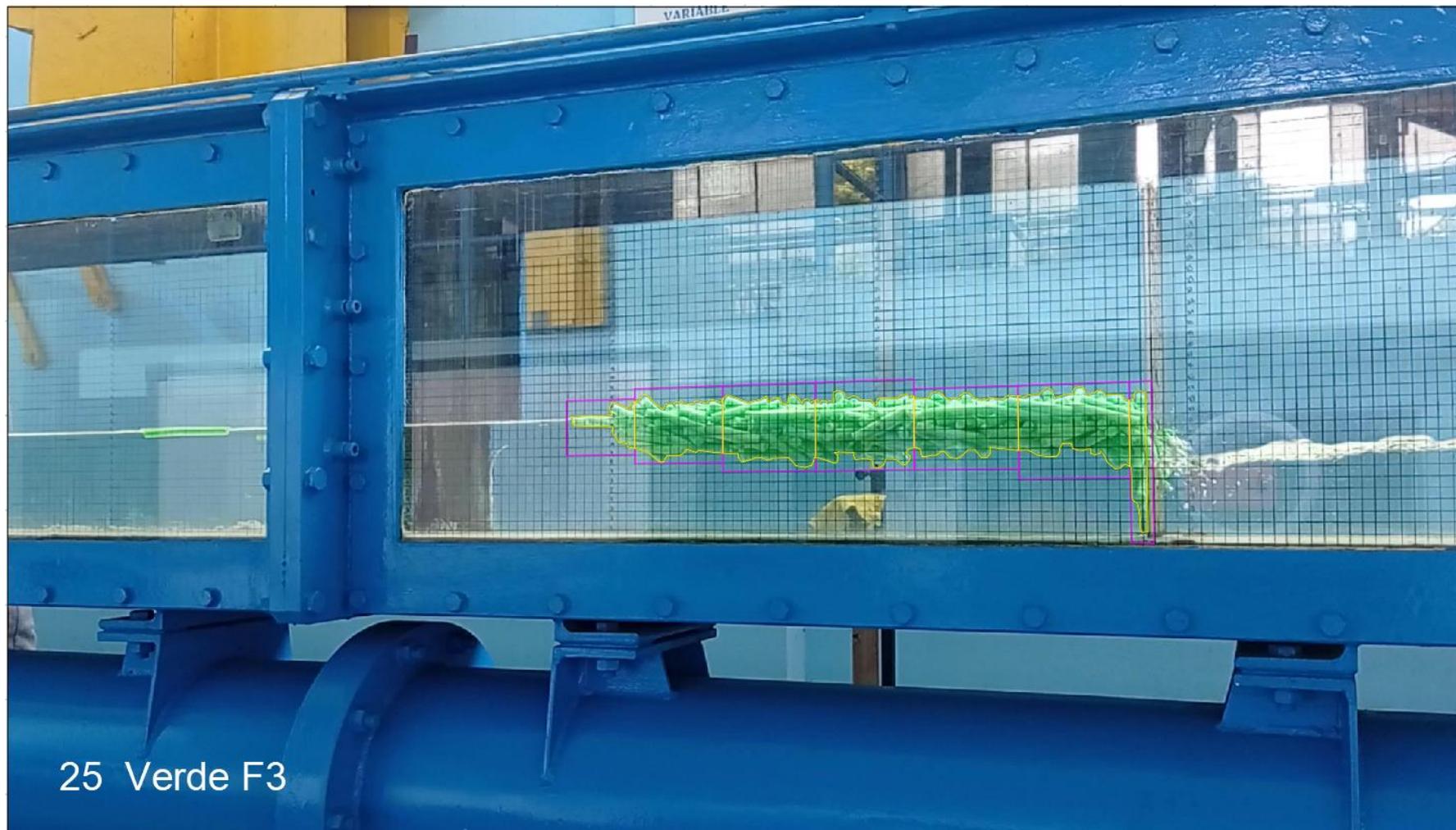
Fotografía 20: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.3$, $\rho_T=950 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 789.91 \text{ cm}^2$.



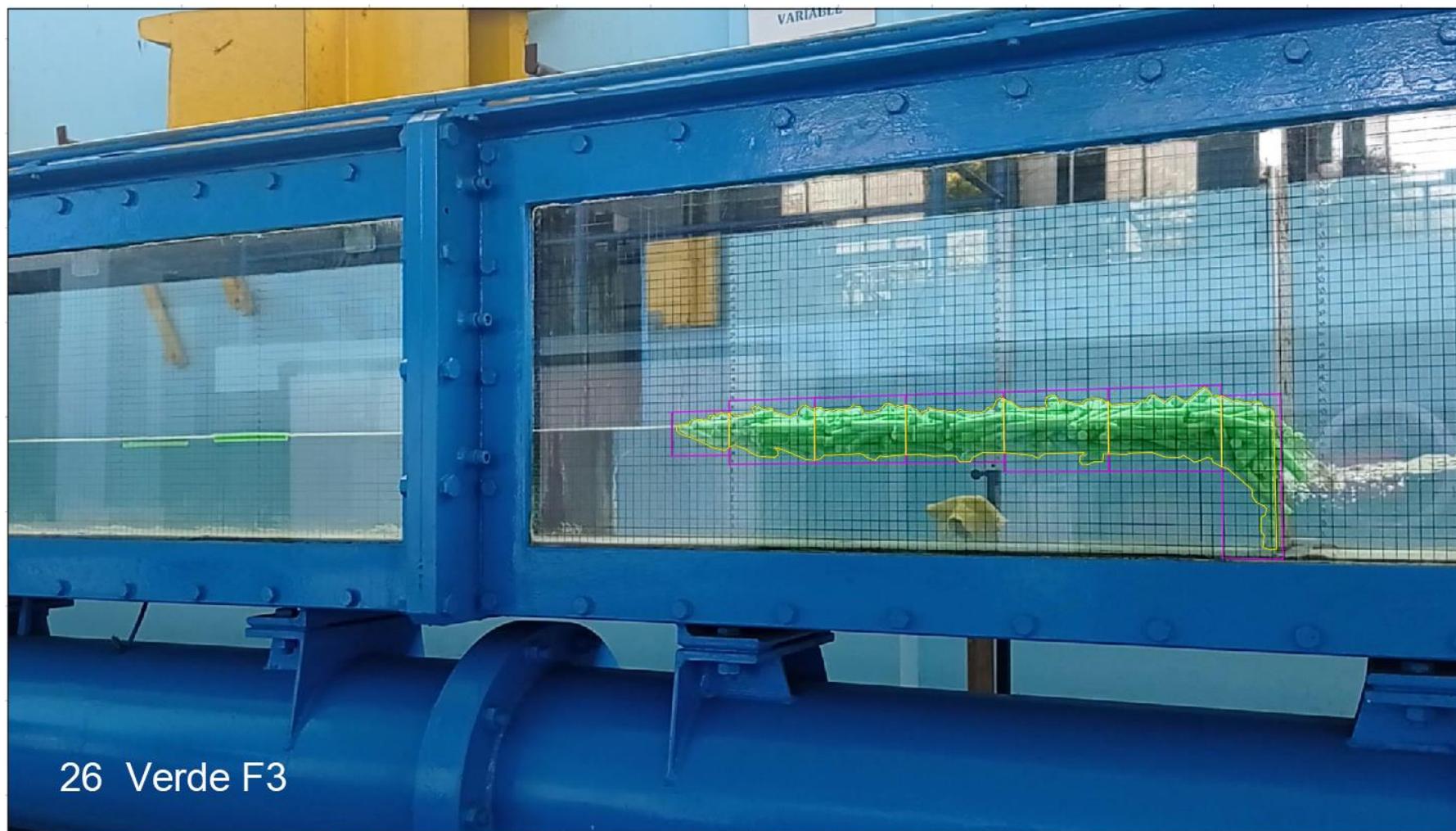
Fotografía 21: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.3$, $\rho_T=950 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 734.96 \text{ cm}^2$.



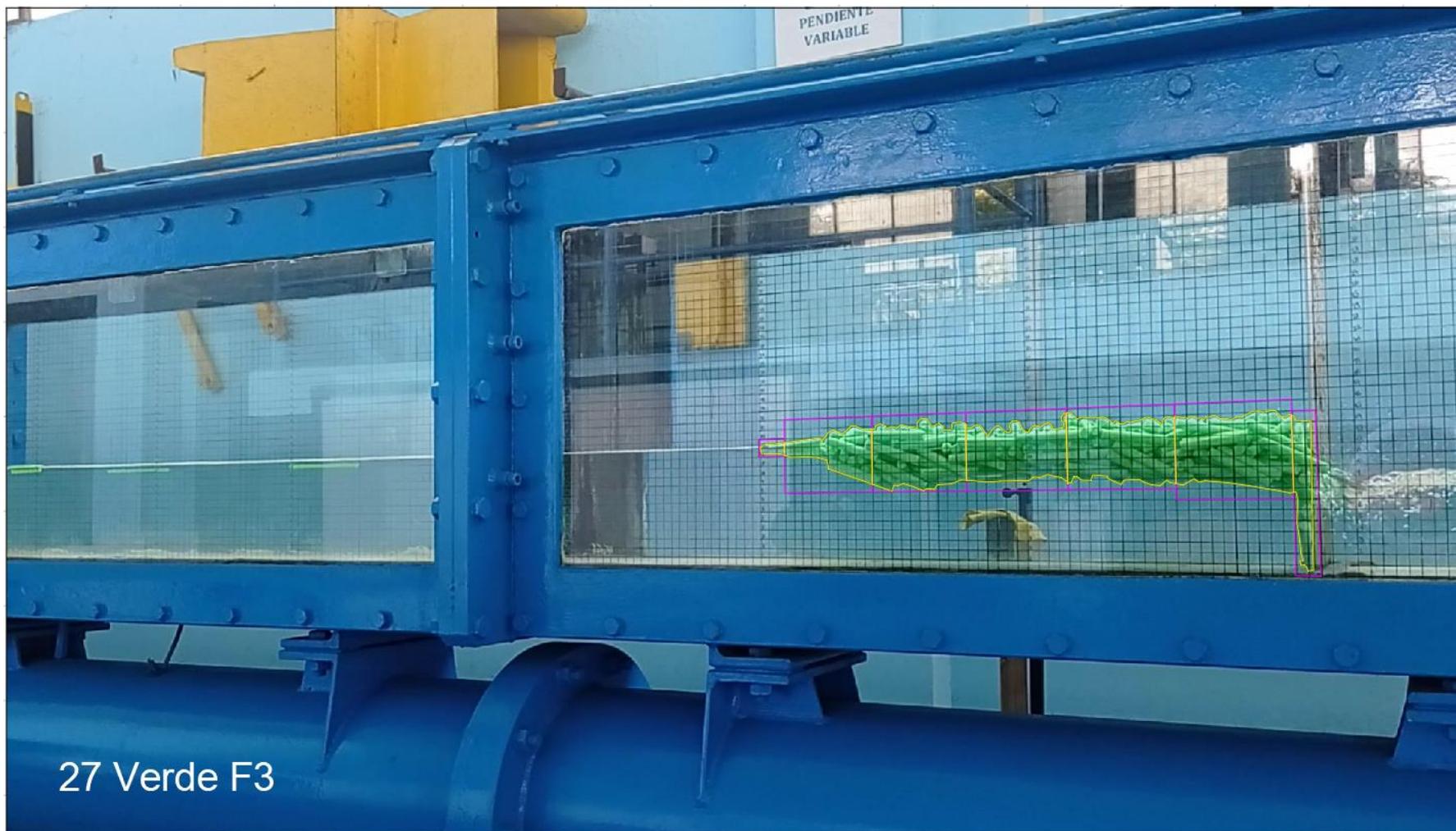
Fotografía 22: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.3$, $\rho_T=950 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 717.58 \text{ cm}^2$.



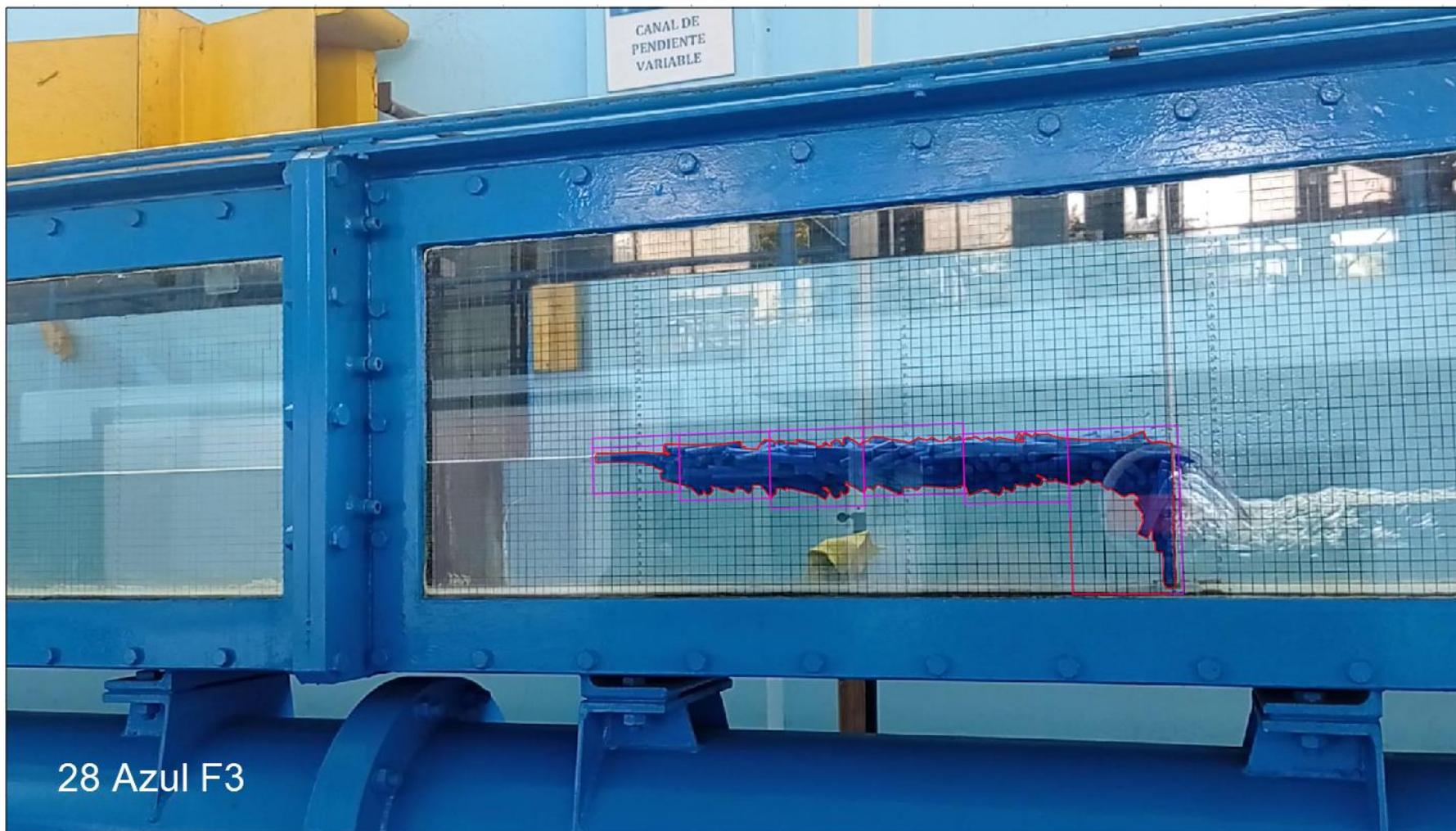
Fotografía 23: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.4$, $\rho_T=400 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 323.37 \text{ cm}^2$.



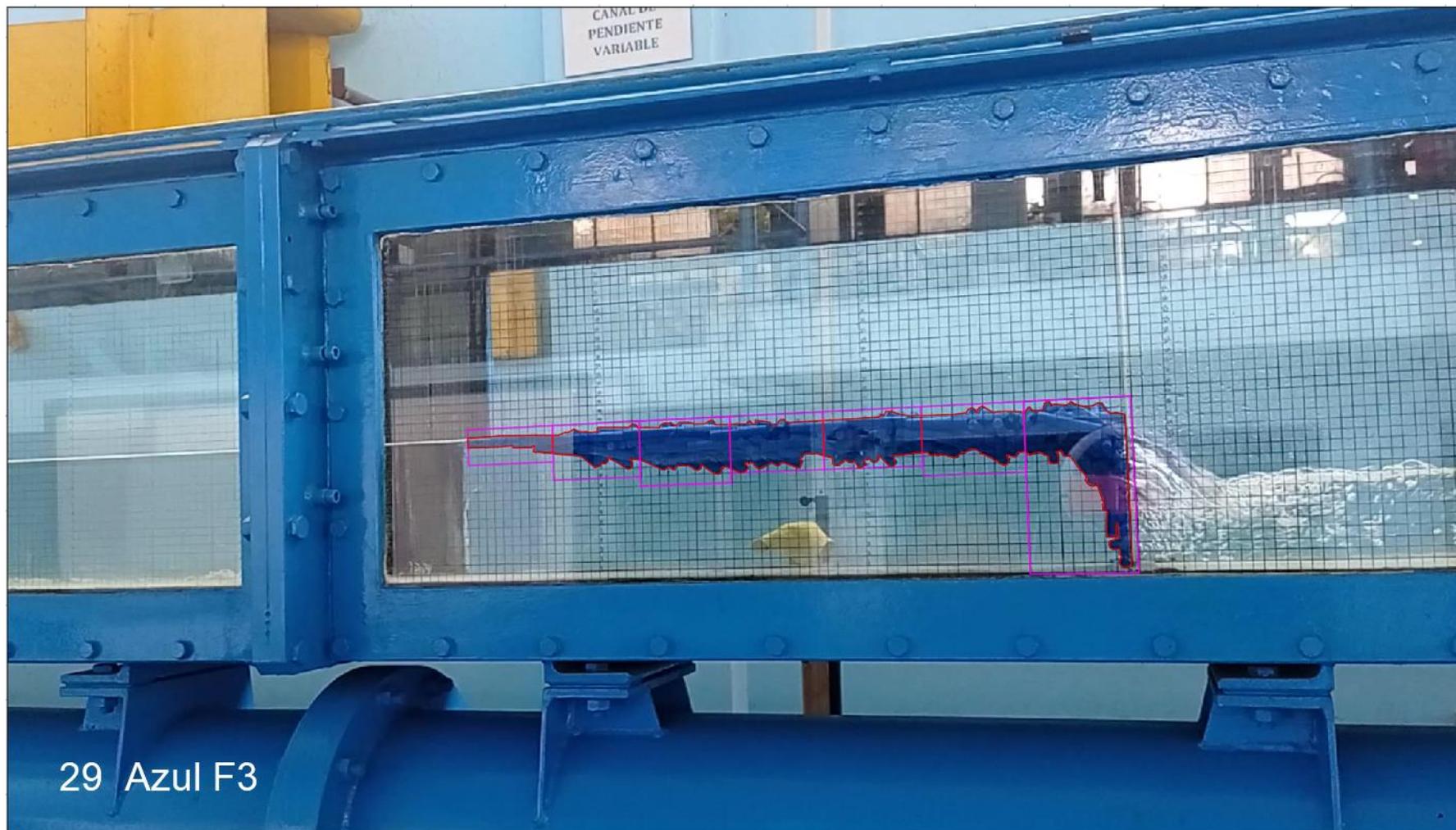
Fotografía 24: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.4$, $\rho_T=400 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 305.57 \text{ cm}^2$.



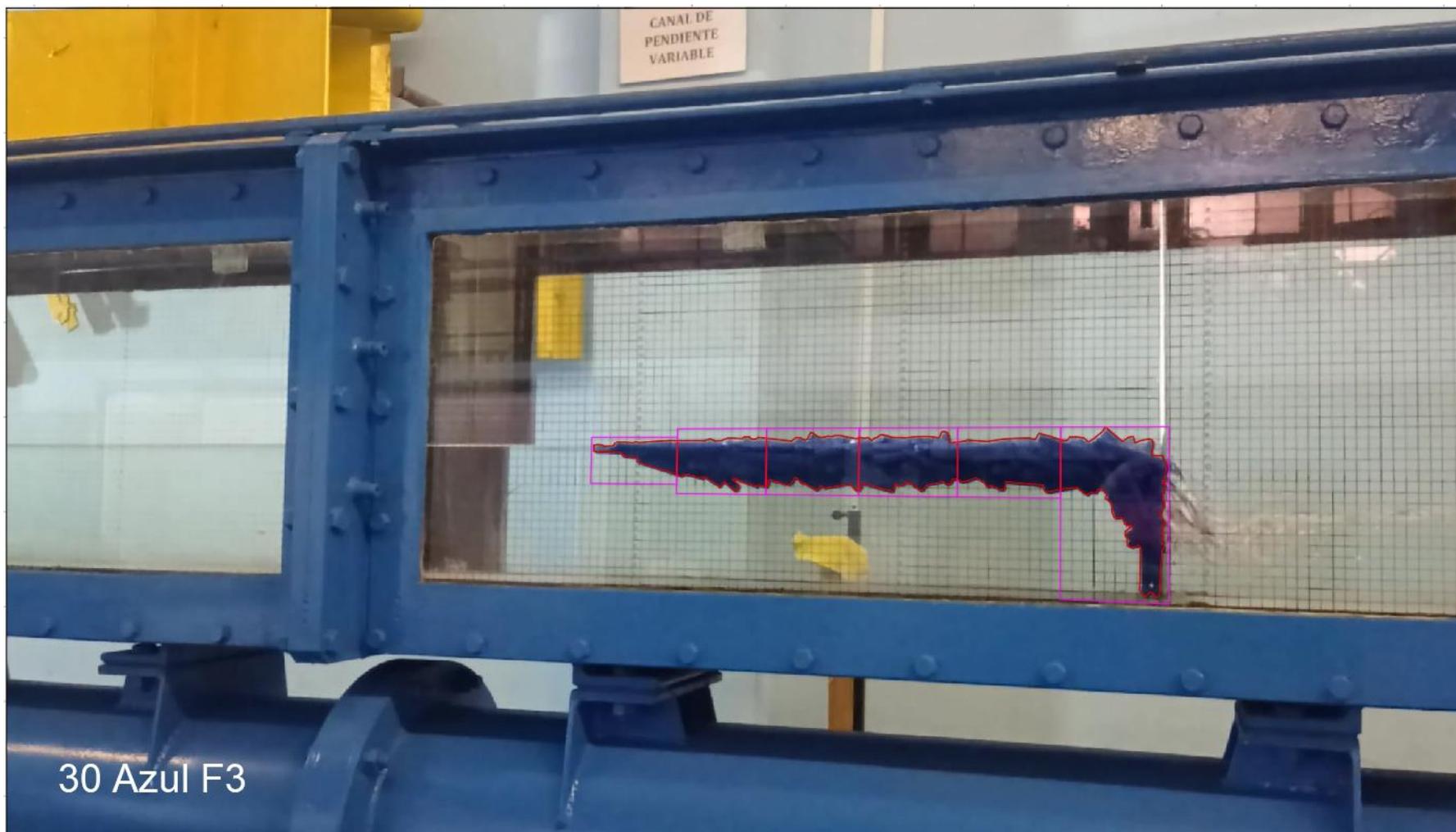
Fotografía 25: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.3$, $\rho_T=400 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 294.21 \text{ cm}^2$.



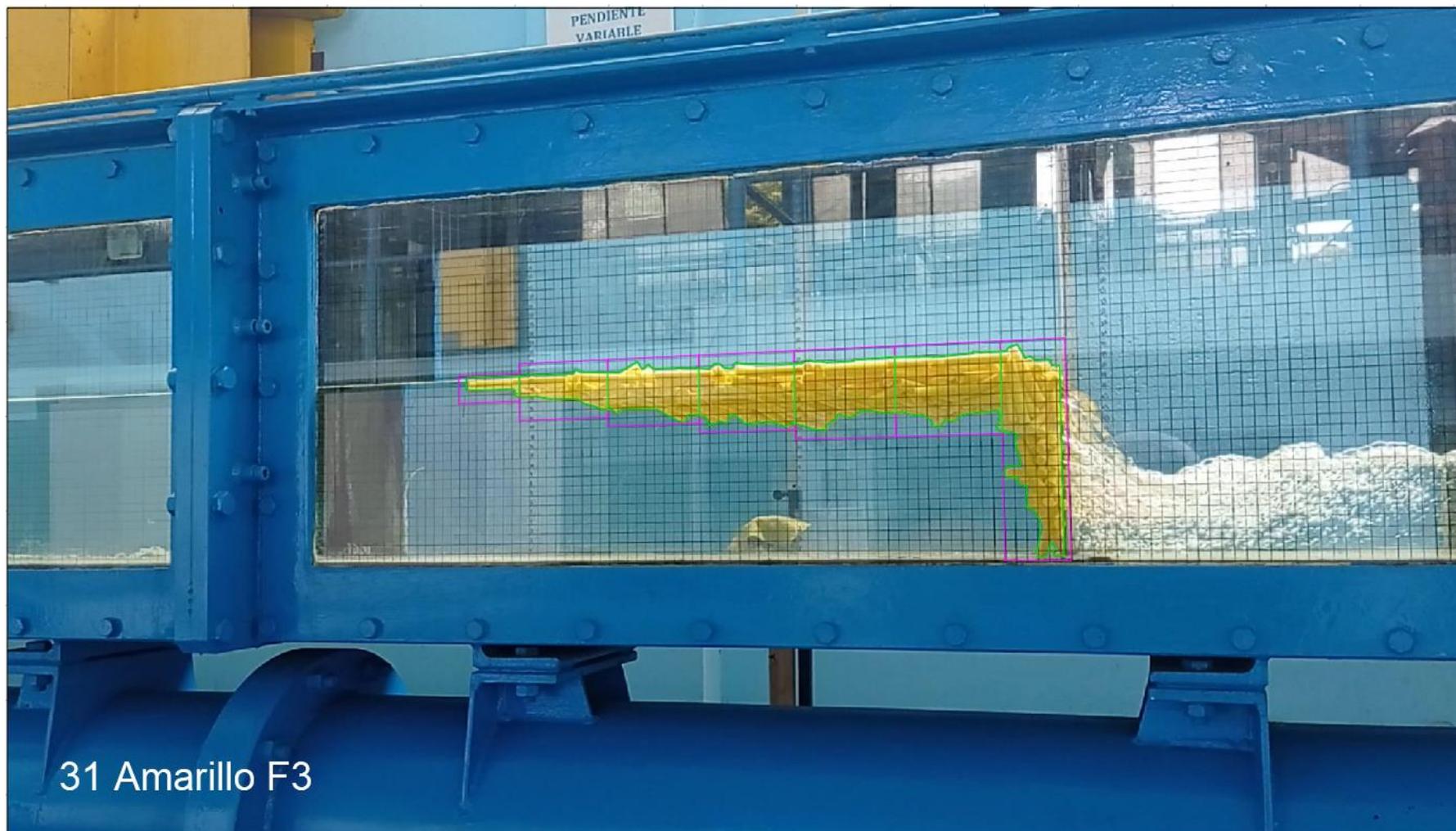
Fotografía 26: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.3$, $\rho_T=600 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 277.97 \text{ cm}^2$.



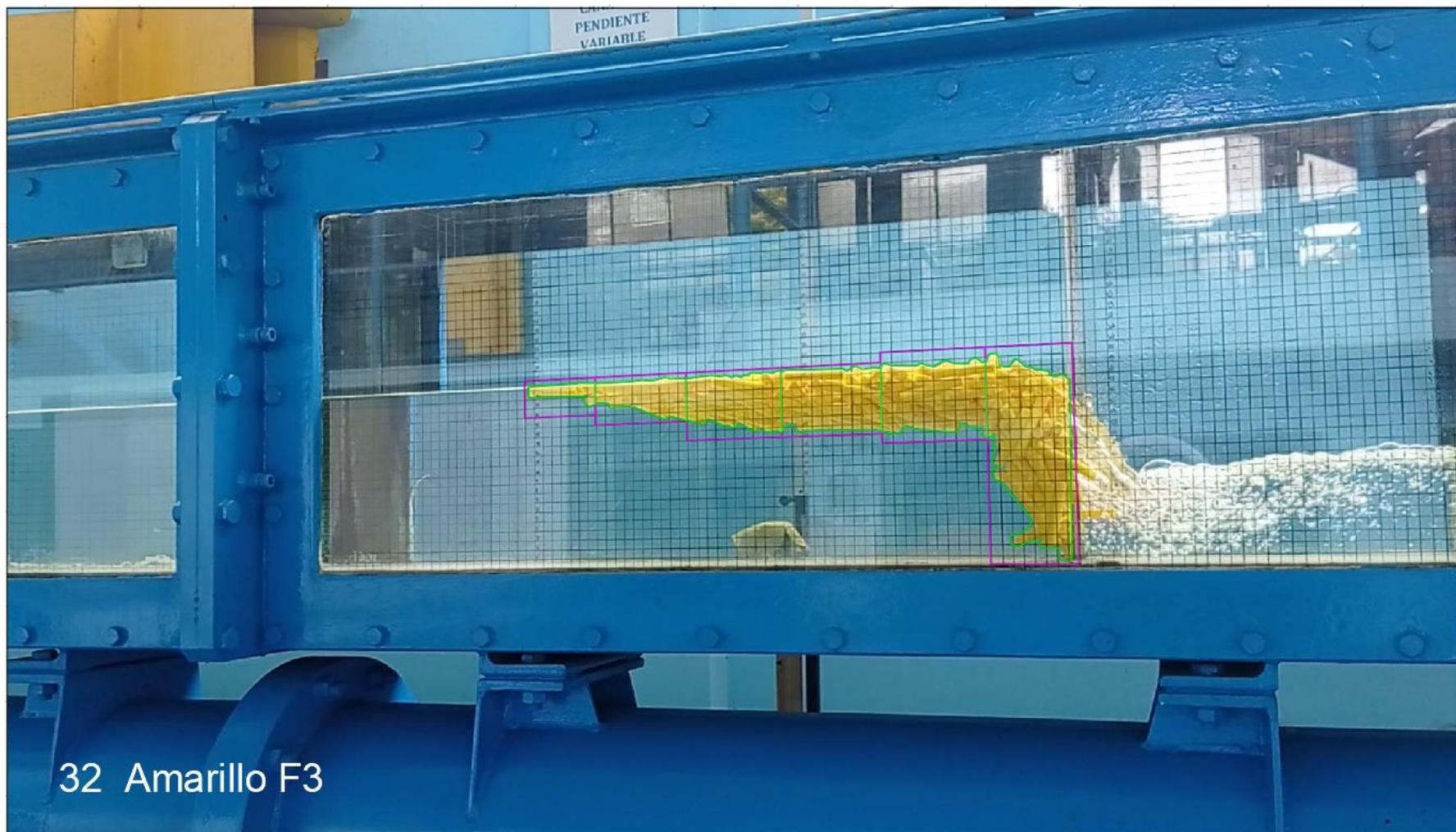
Fotografía 27: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.3$, $\rho_T=600 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 294.32 \text{ cm}^2$.



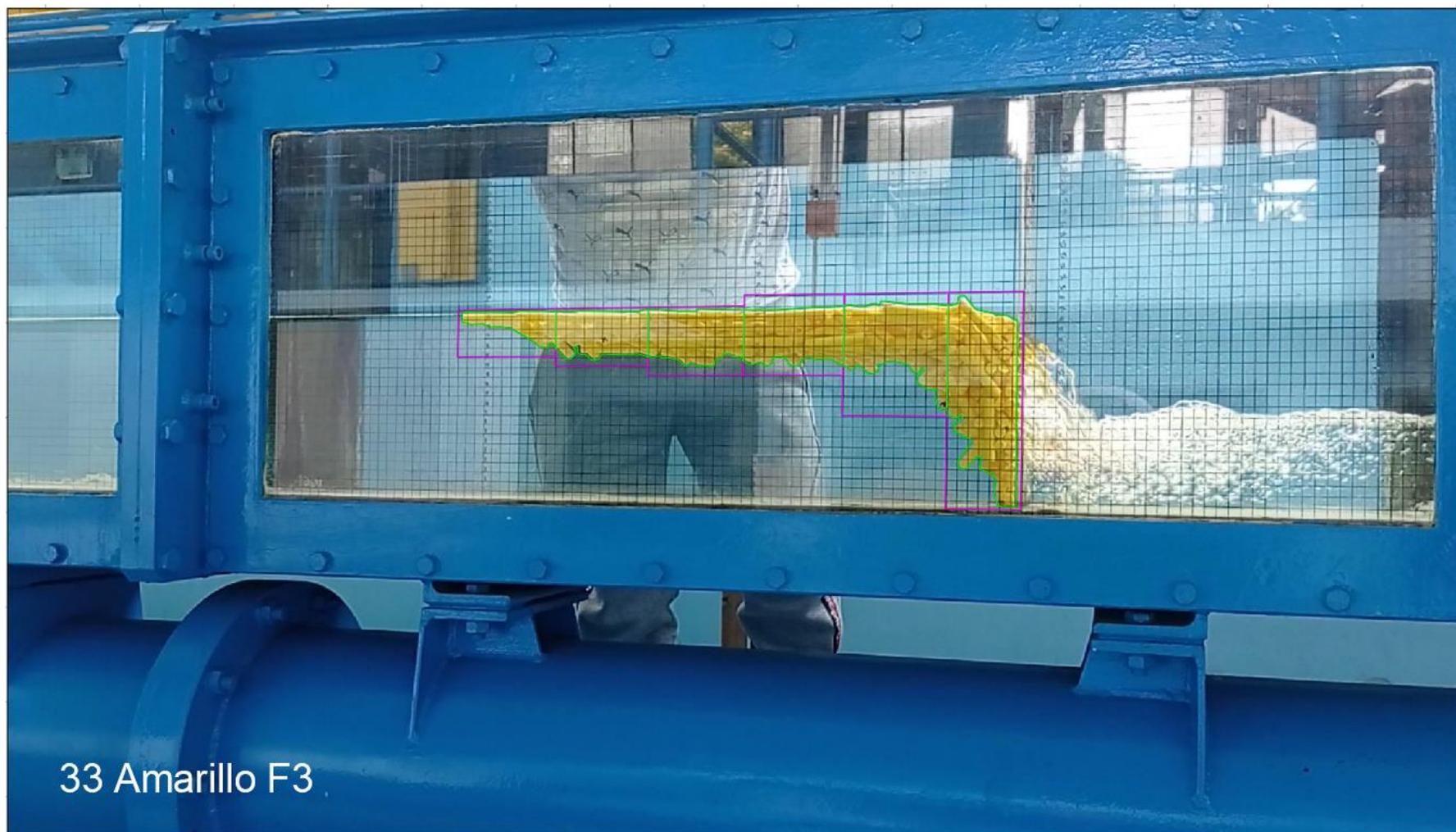
Fotografía 28: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.3$, $\rho_T=600 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 287.29 \text{ cm}^2$.



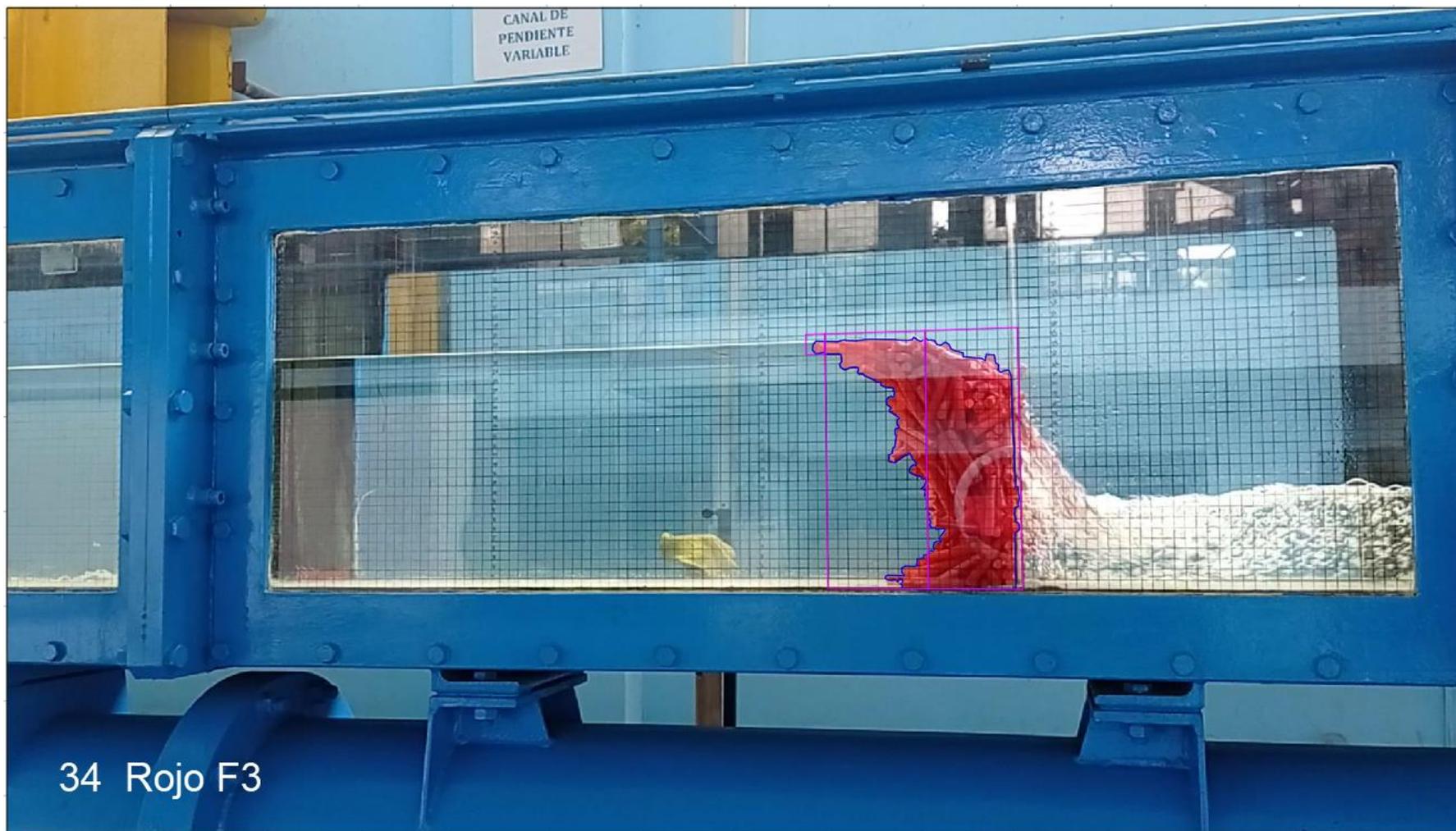
Fotografía 29: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.3$, $\rho_T=800 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 338.79 \text{ cm}^2$.



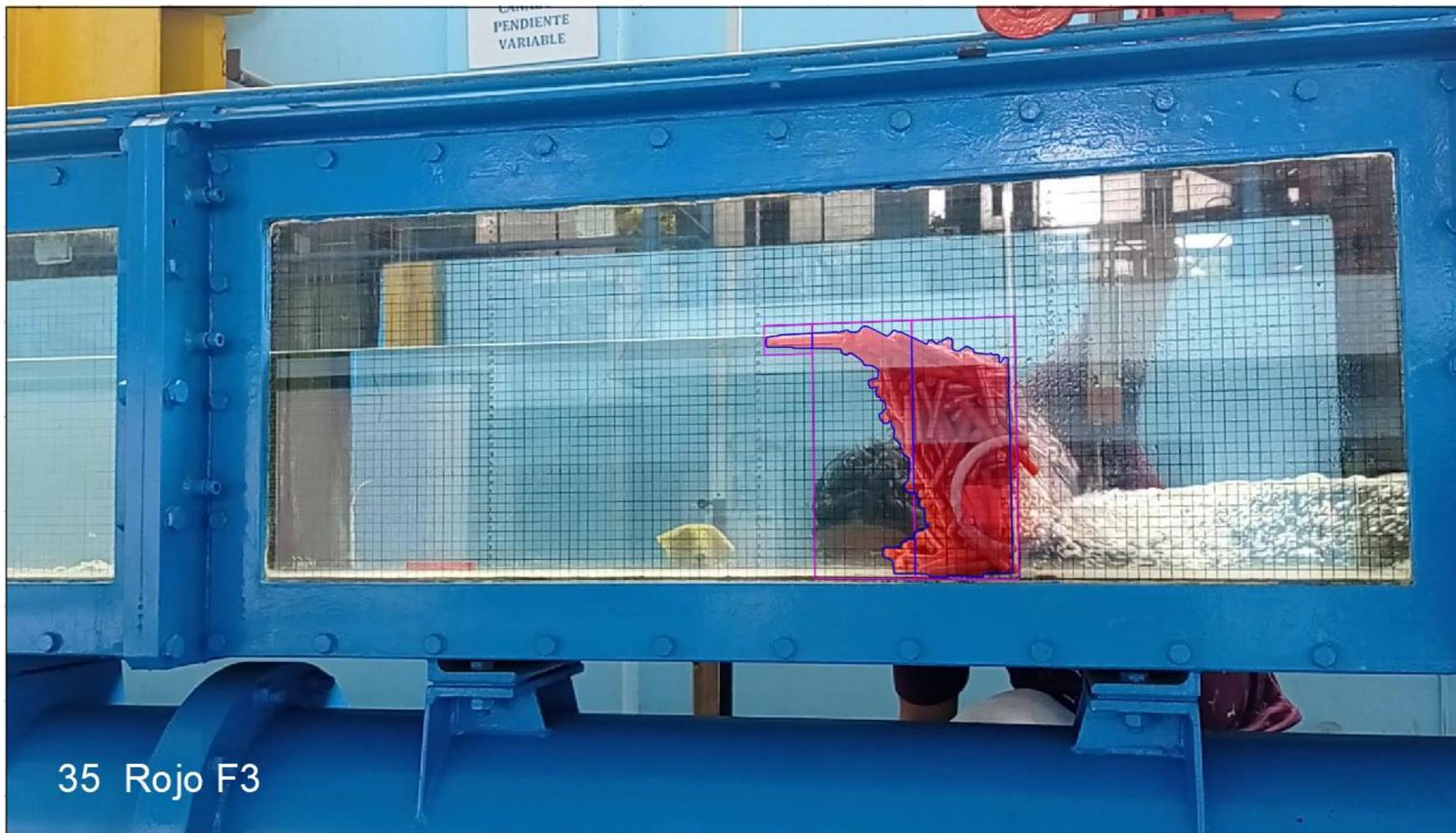
Fotografía 30: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.3$, $\rho_T=800 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 333.43 \text{ cm}^2$.



Fotografía 31: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.3$, $\rho_T=950 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 340.28 \text{ cm}^2$.



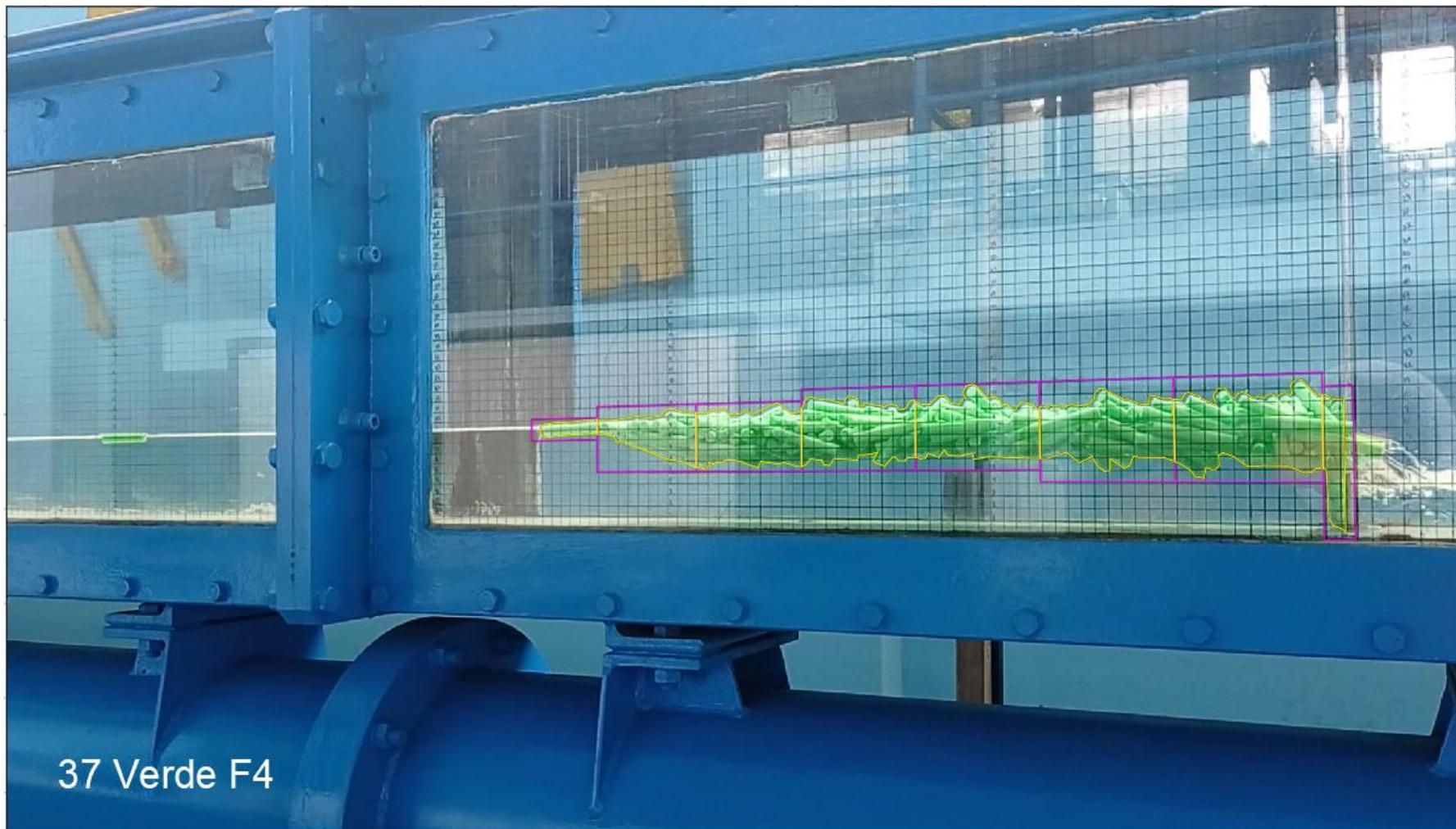
Fotografía 32: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.3$, $\rho_T=950 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 268.50 \text{ cm}^2$.



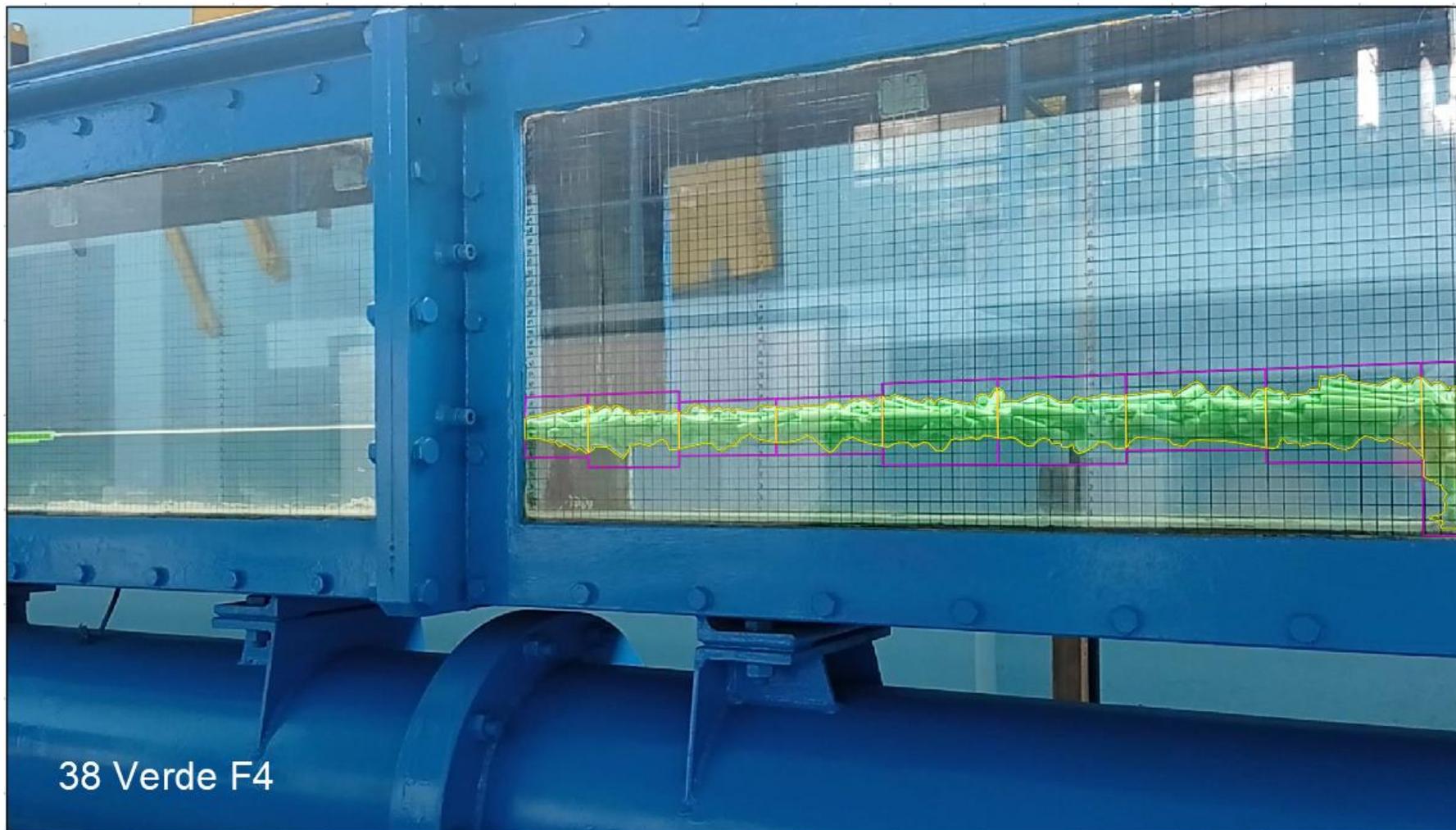
Fotografía 33: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.3$, $\rho_T=950 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 278.97 \text{ cm}^2$.



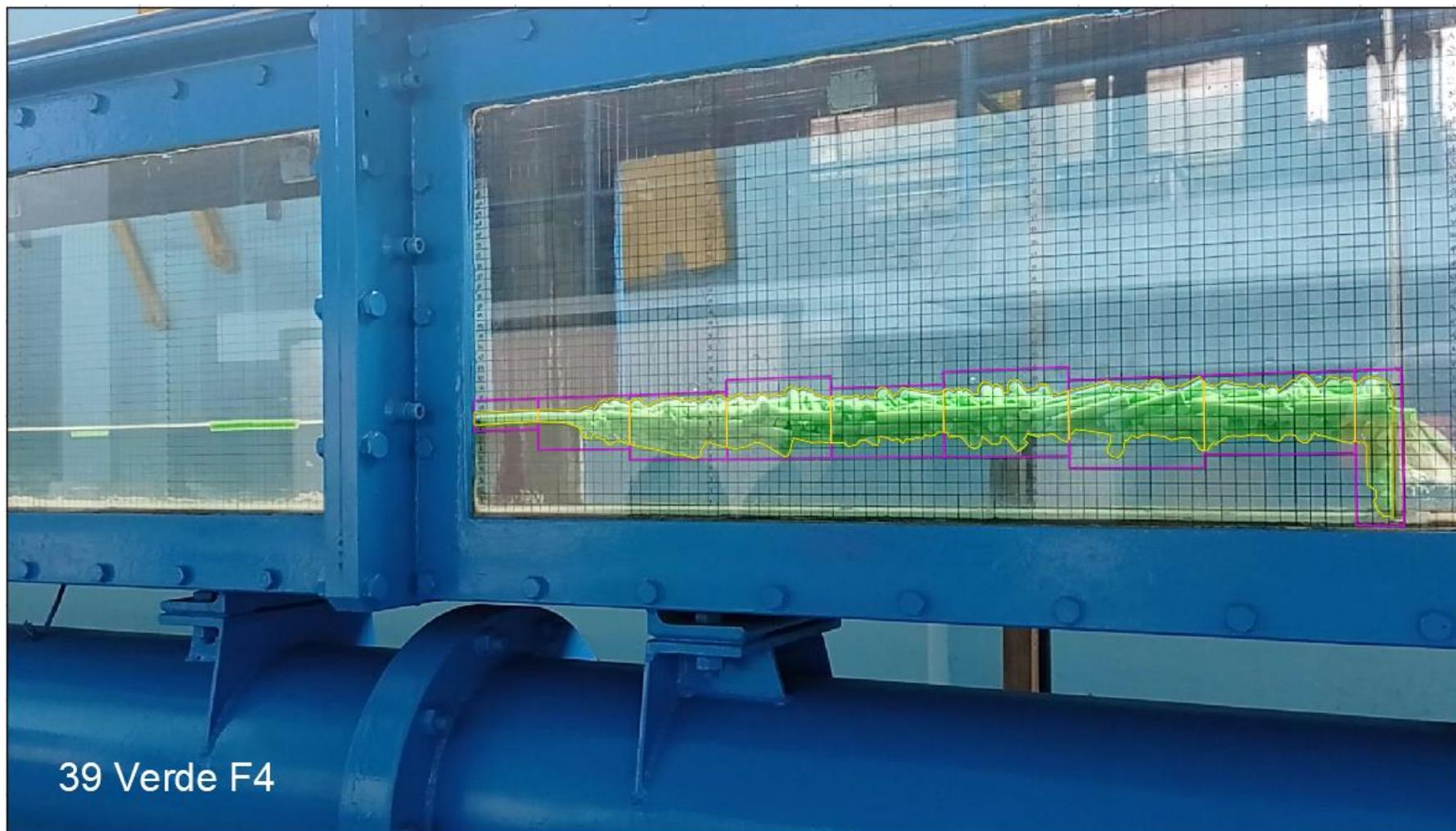
Fotografía 34: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.3$, $\rho_T=950 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 268.83 \text{ cm}^2$.



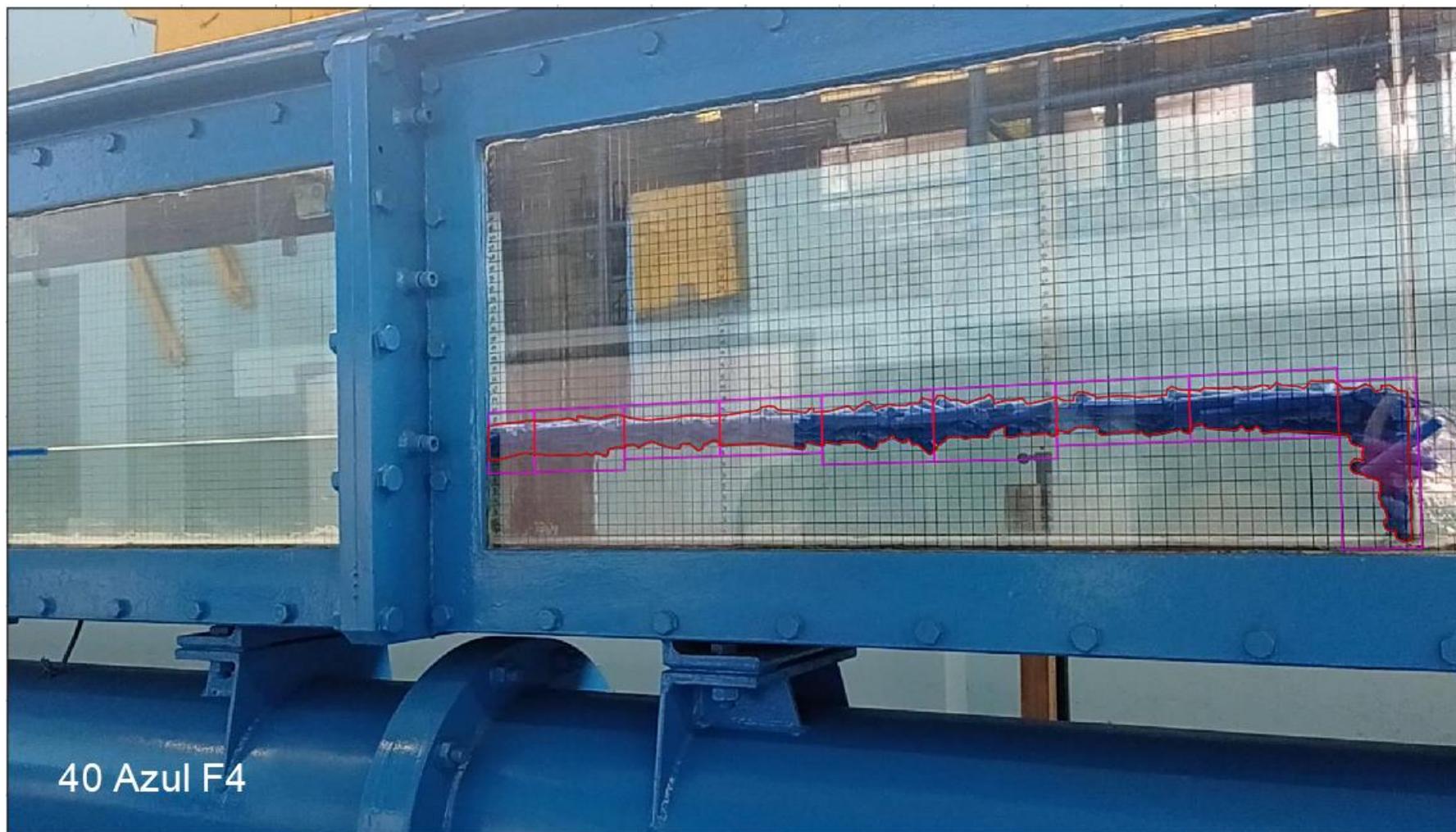
Fotografía 35: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.4$, $\rho_T=400 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 593.38 \text{ cm}^2$.



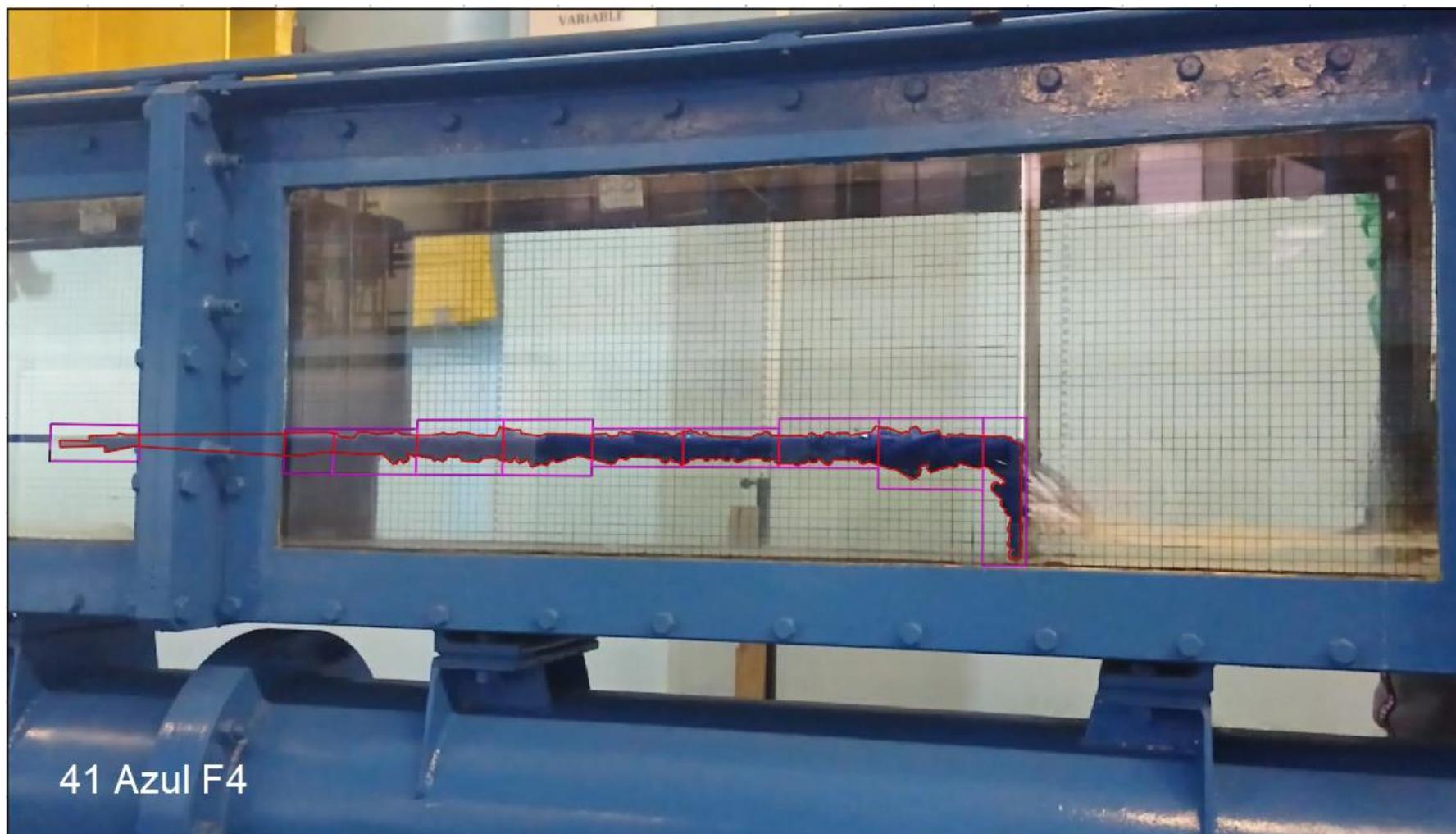
Fotografía 36: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo=0.$, $\rho_T=400 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 375.50 \text{ cm}^2$.



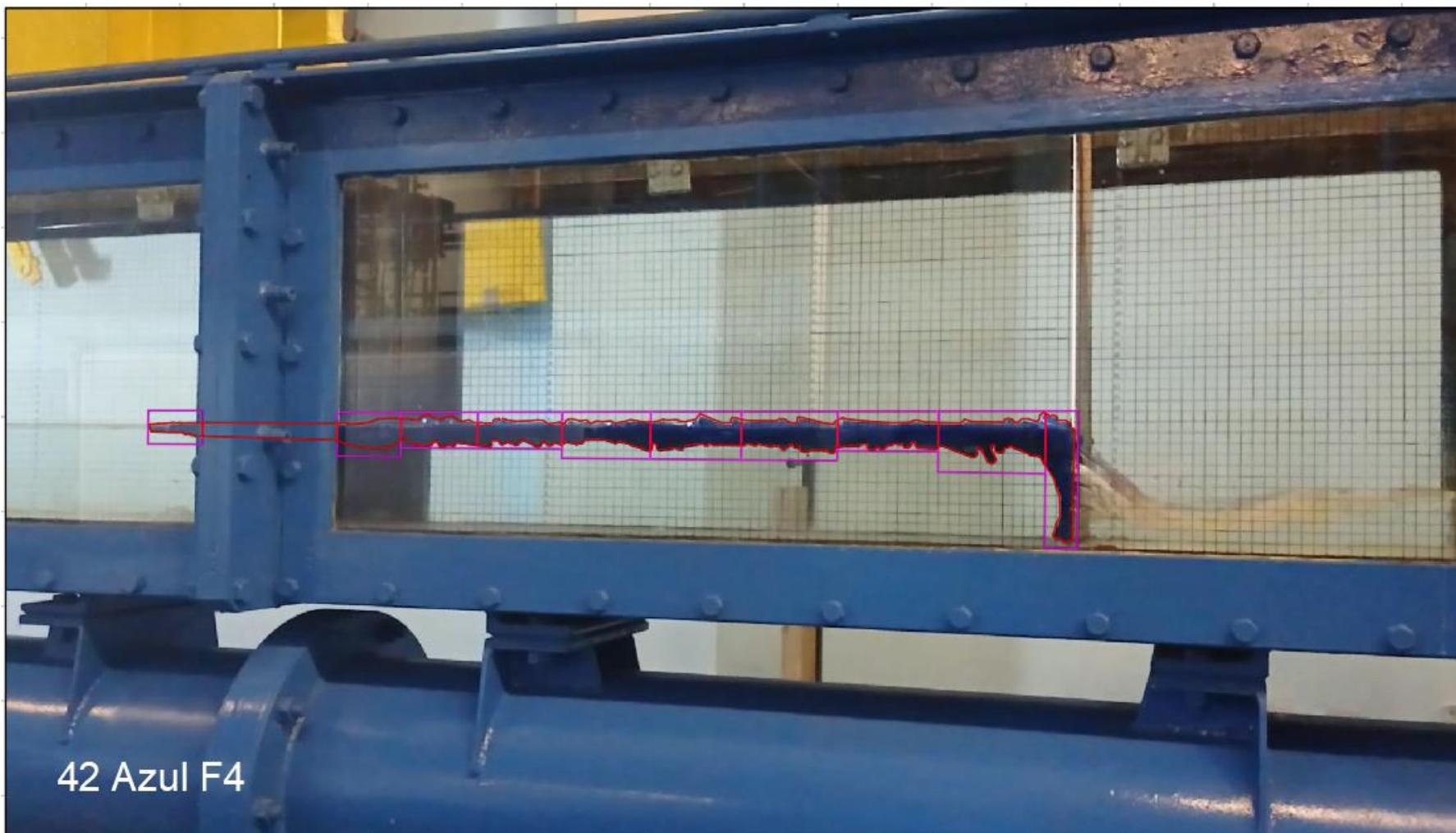
Fotografía 37: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.4$, $\rho_T=400 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 705 \text{ cm}^2$.



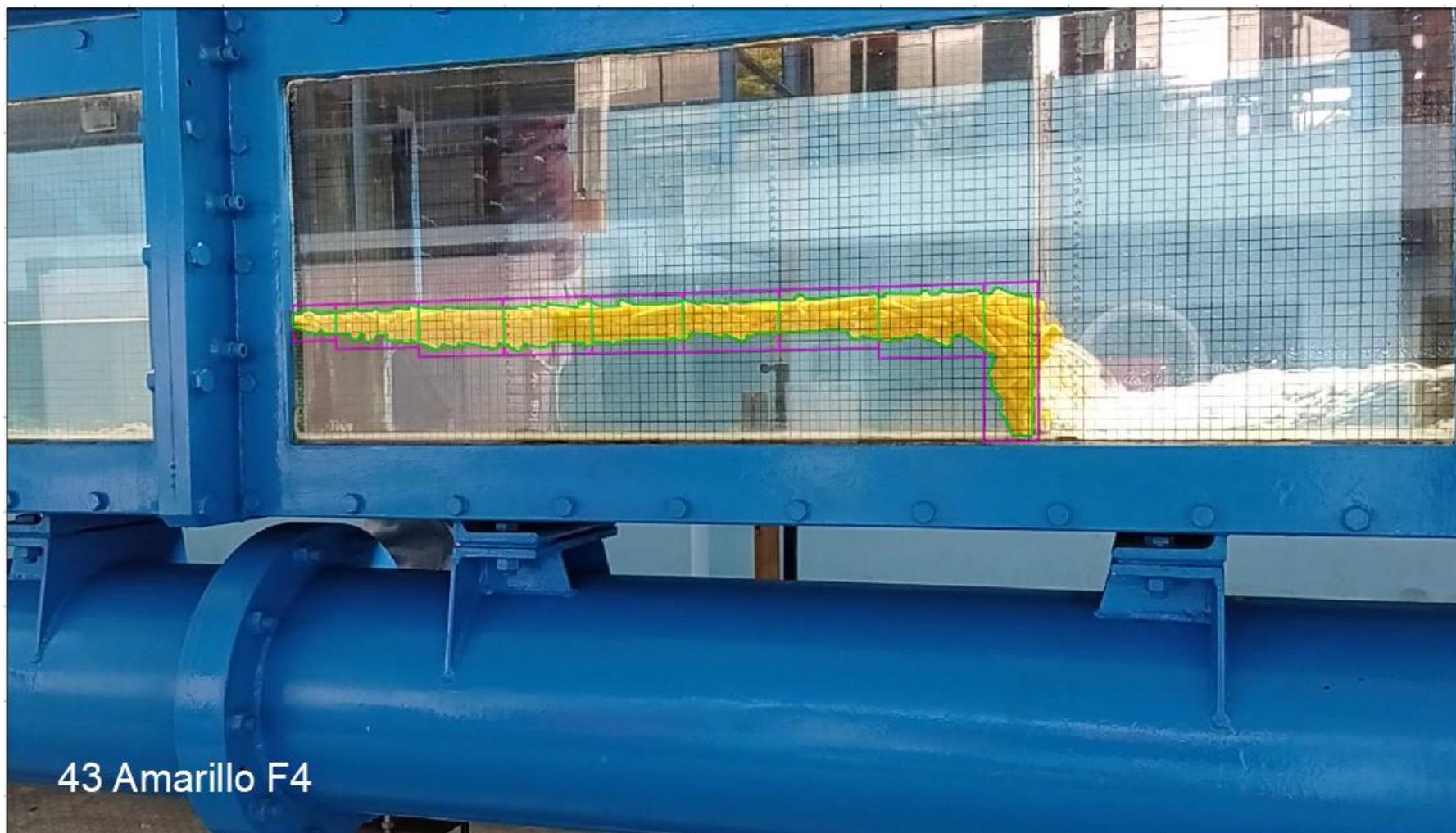
Fotografía 38: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.4$, $\rho_T=600 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 592.29 \text{ cm}^2$.



Fotografía 39: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.4$, $\rho_T=600 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 616.30 \text{ cm}^2$.

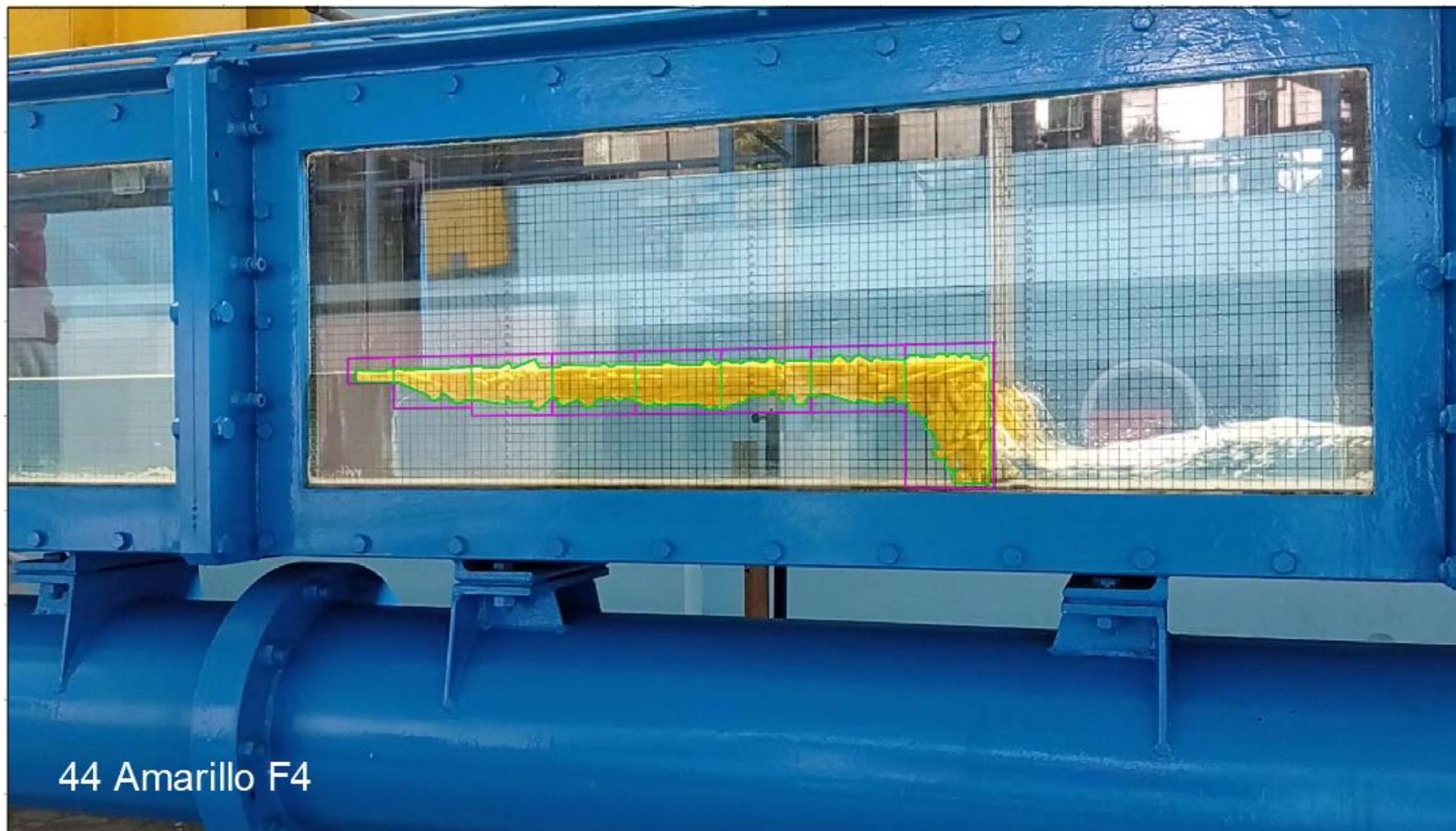


Fotografía 40: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.4$, $\rho_T=600 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 513.81 \text{ cm}^2$.

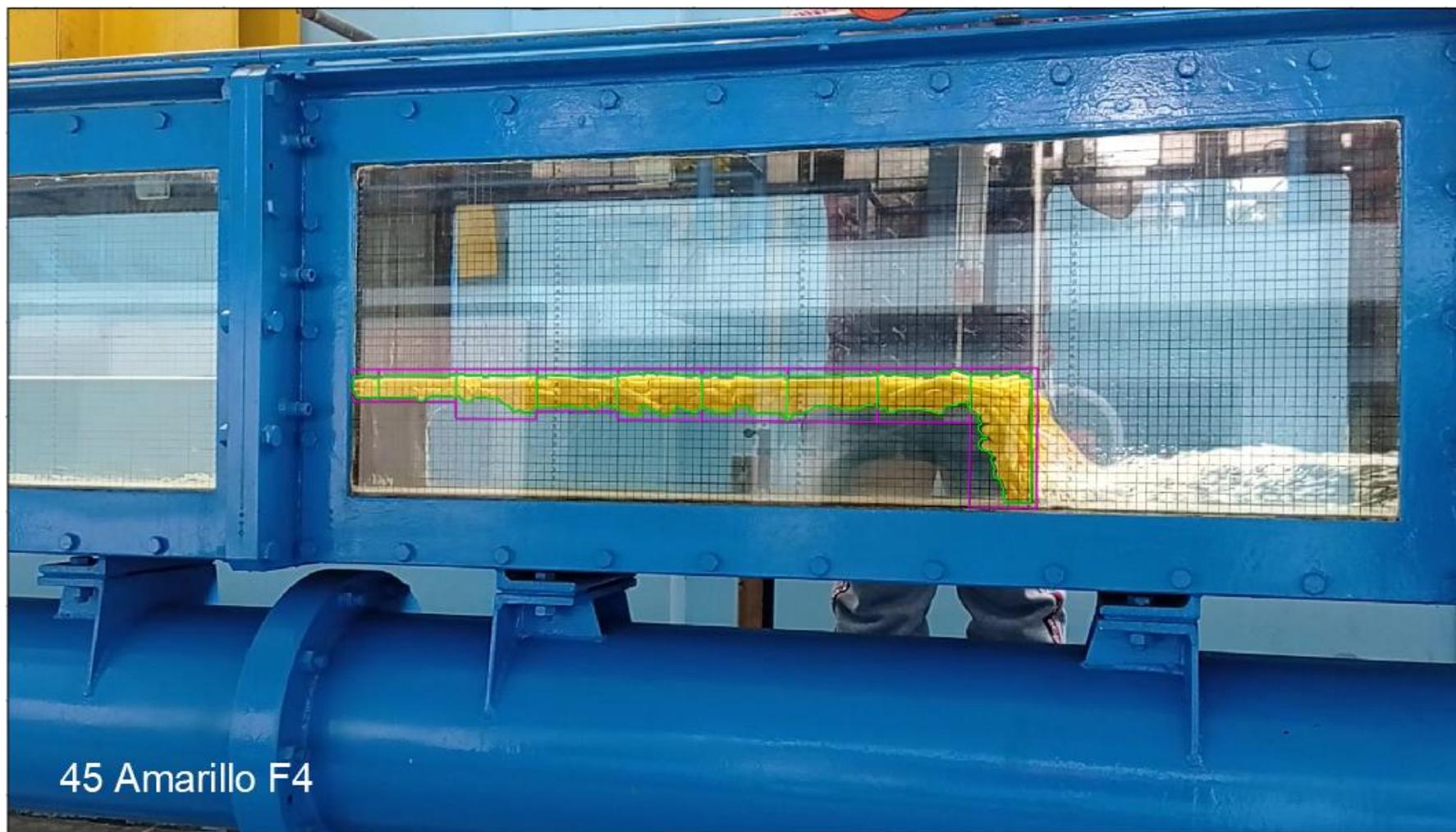


43 Amarillo F4

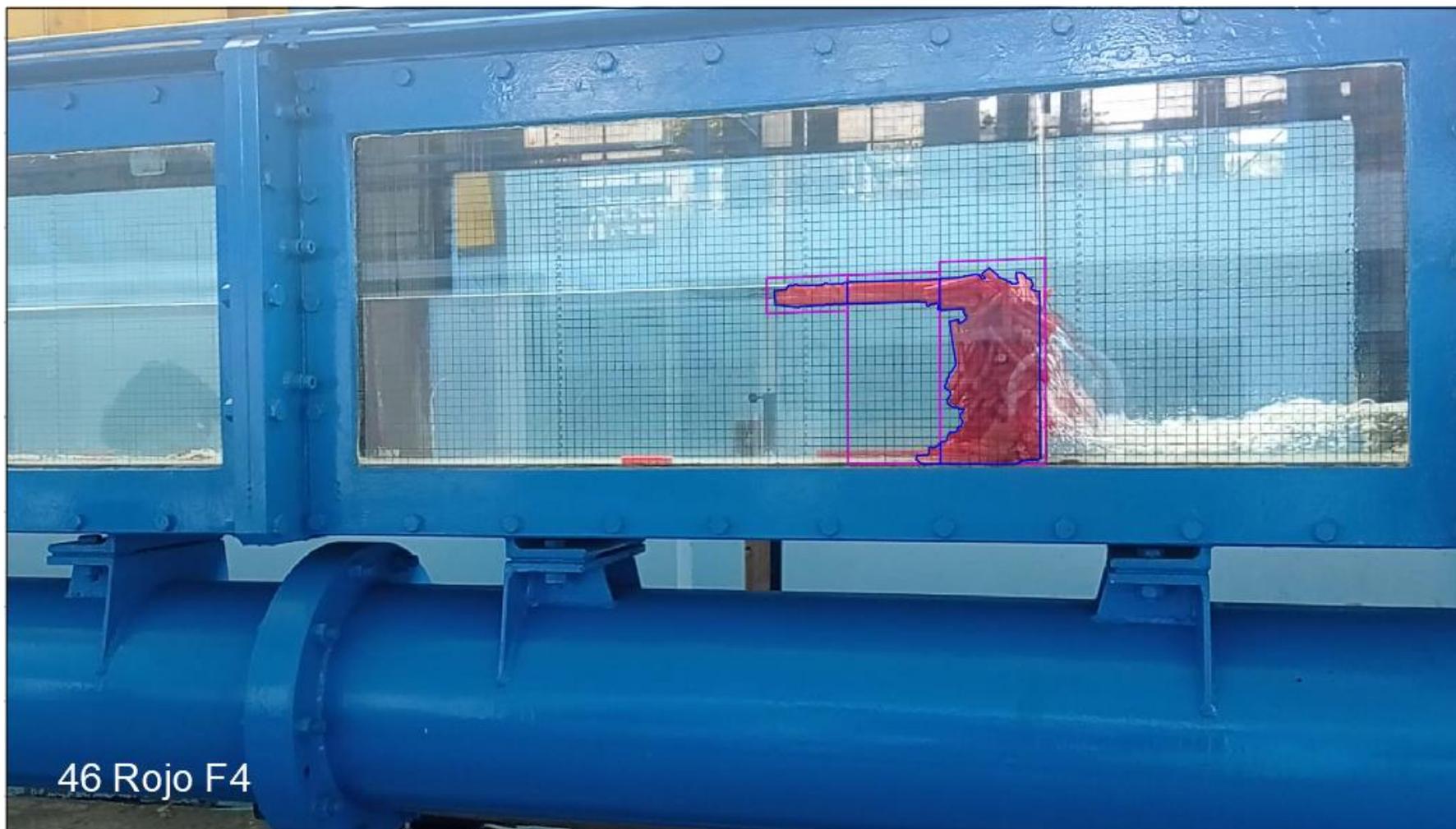
Fotografía 41: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.4$, $\rho_T=800 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 751.50 \text{ cm}^2$.



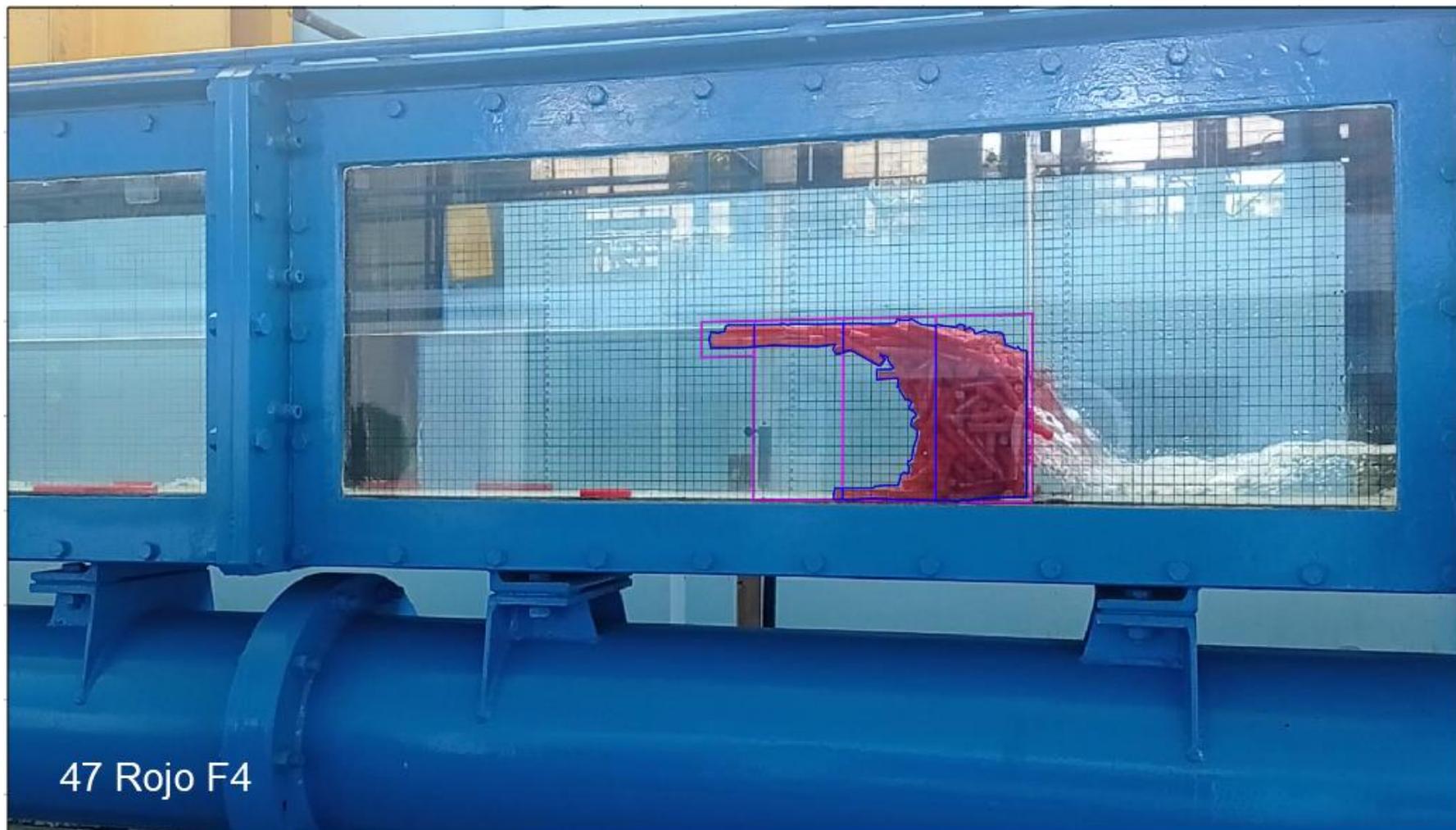
Fotografía 42: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.4$, $\rho_T=800 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 678.87 \text{ cm}^2$.



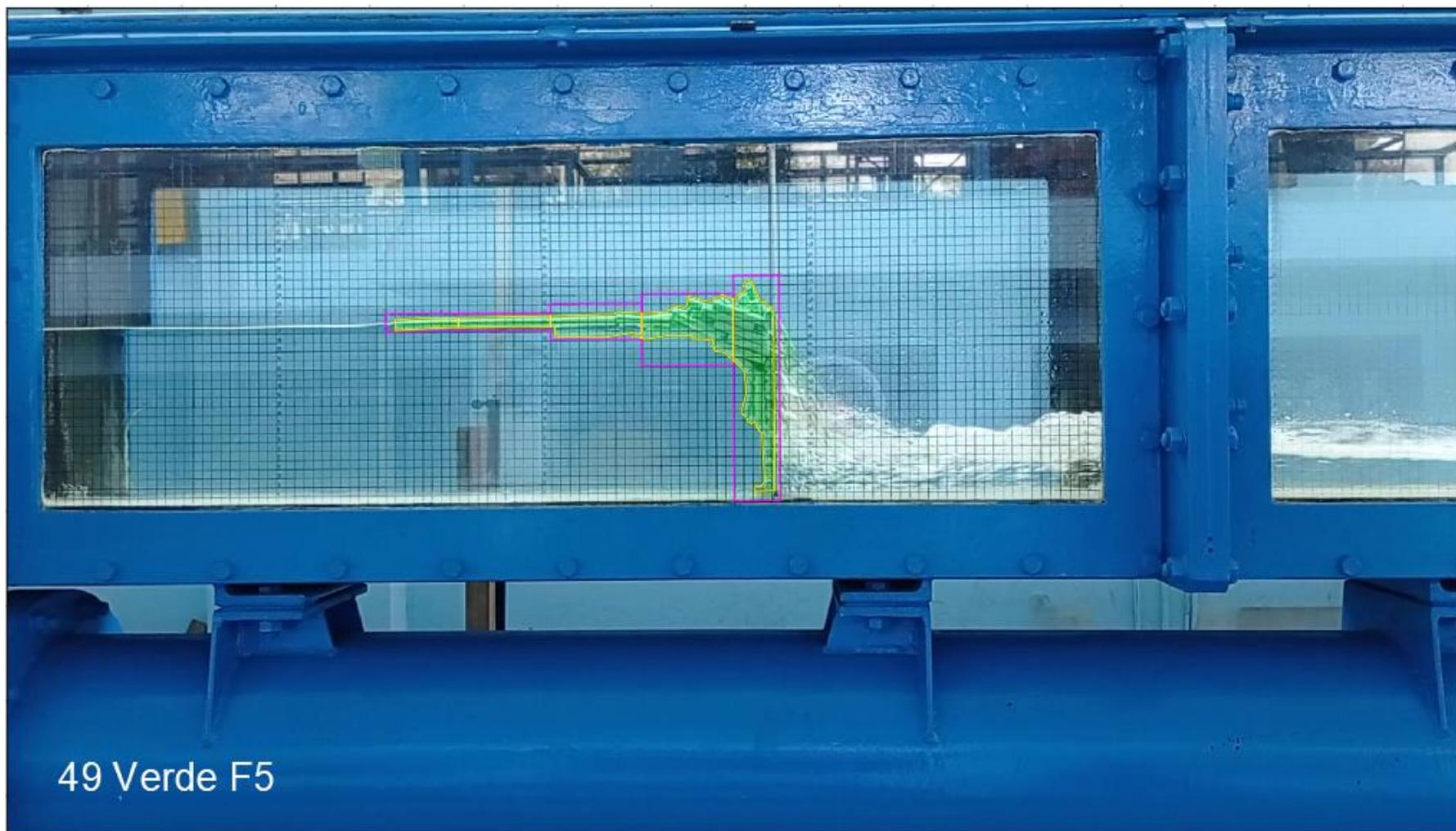
Fotografía 43: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.4$, $\rho_T=800 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 759.72 \text{ cm}^2$.



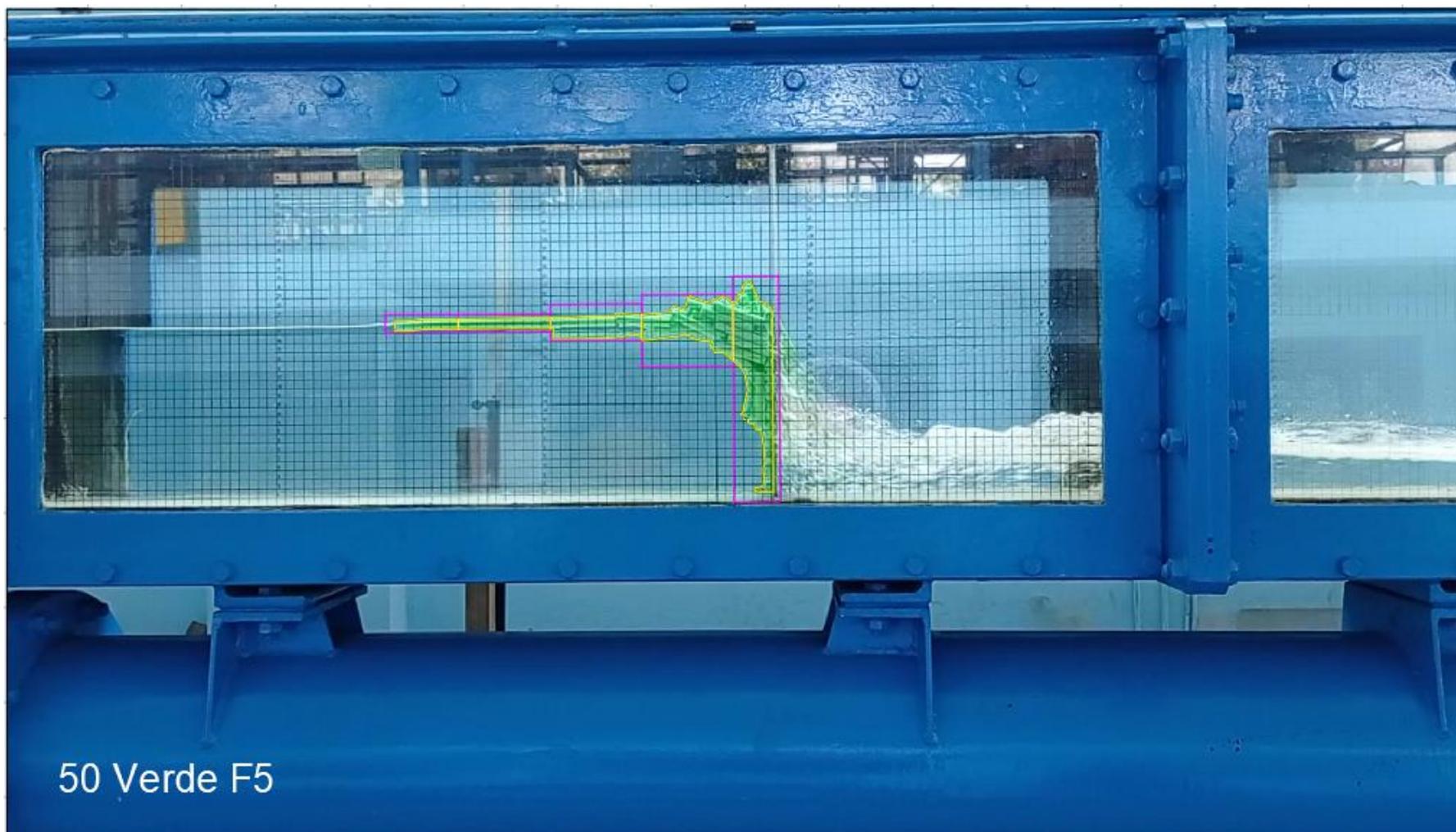
Fotografía 44: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.4$, $\rho_T=950 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 235.05 \text{ cm}^2$.



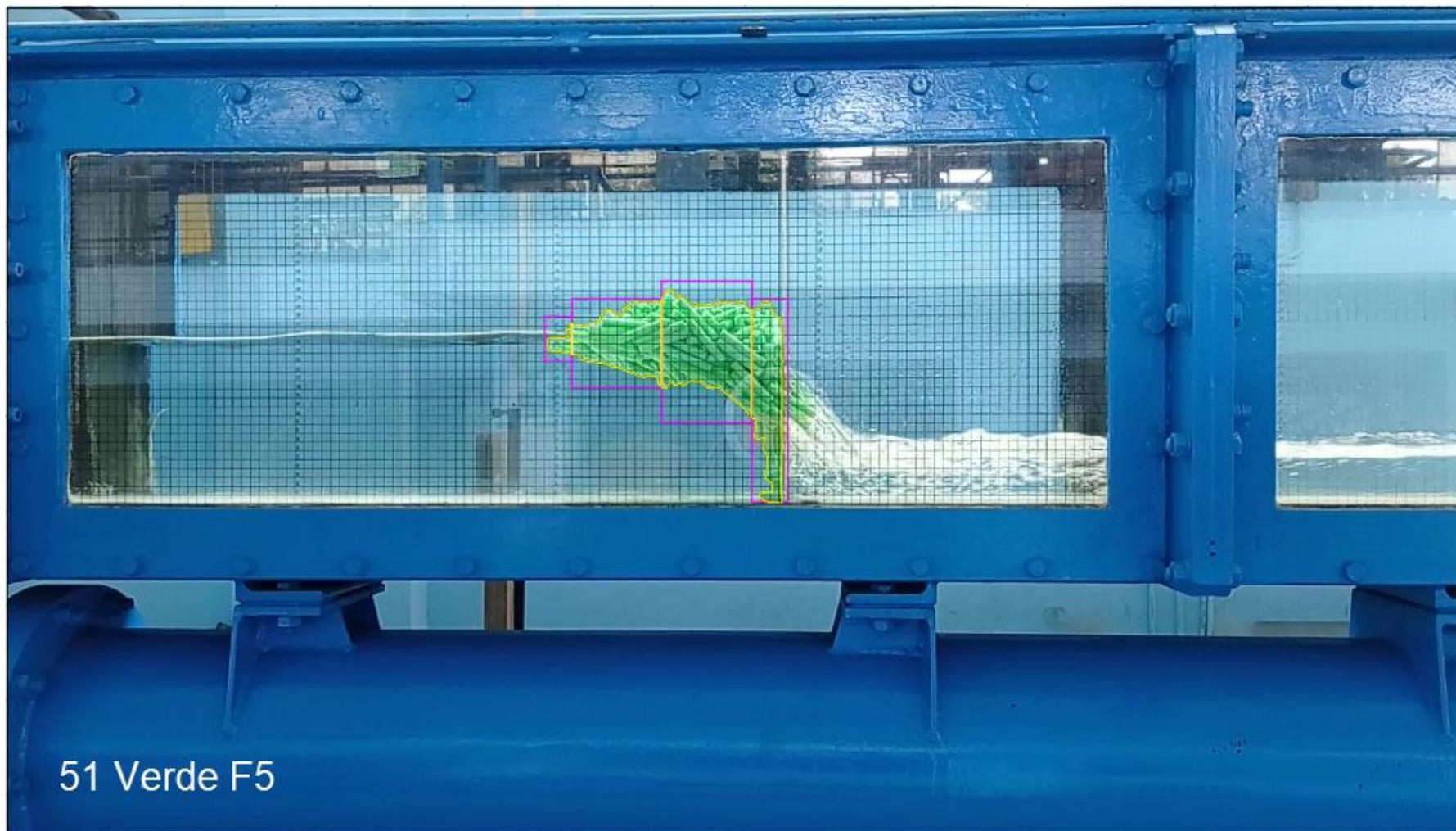
Fotografía 45: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.4$, $\rho_T=950 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 302.07 \text{ cm}^2$.



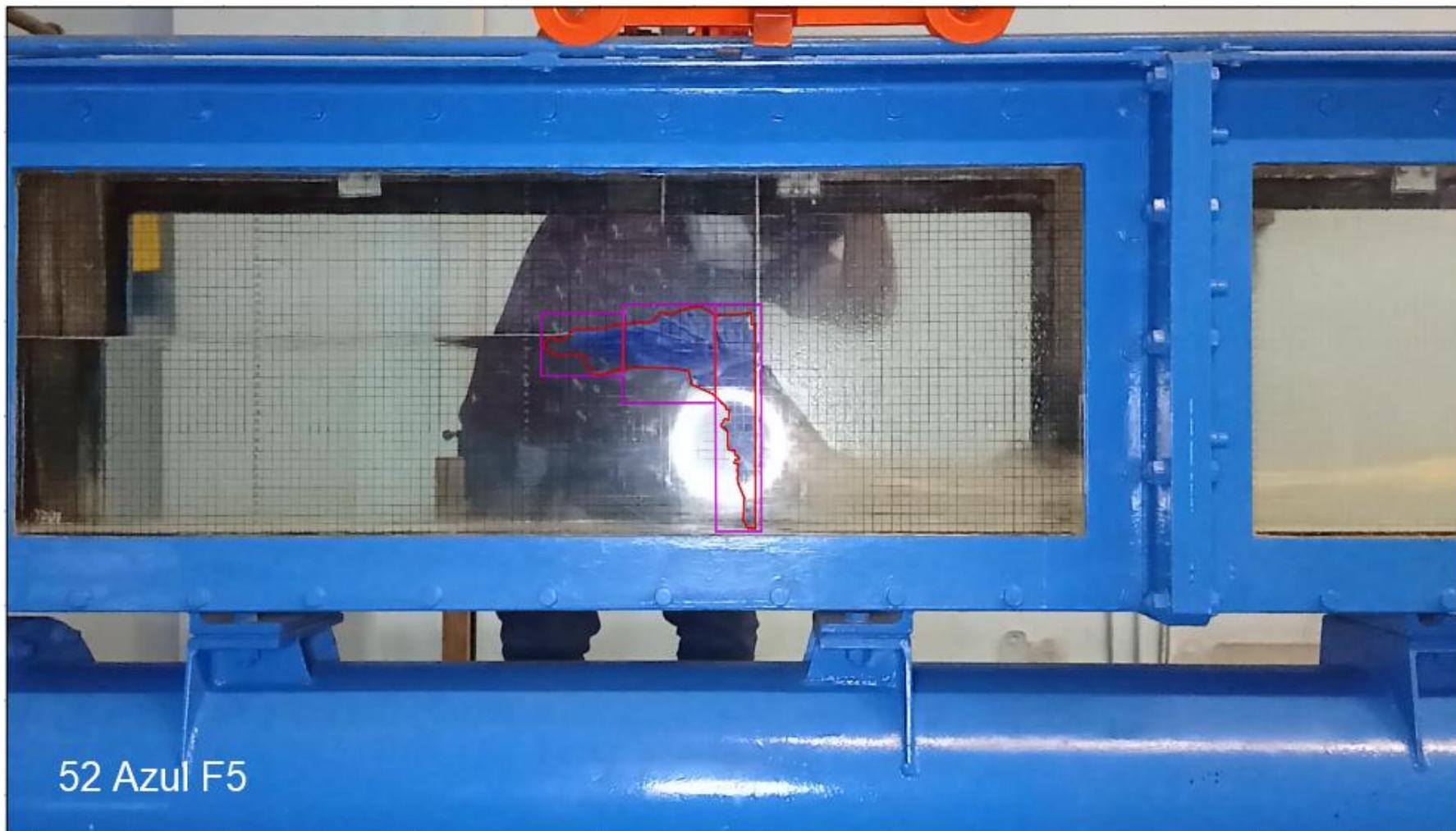
Fotografía 46: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 0.4$, $\rho_T=950 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 298.09 \text{ cm}^2$.



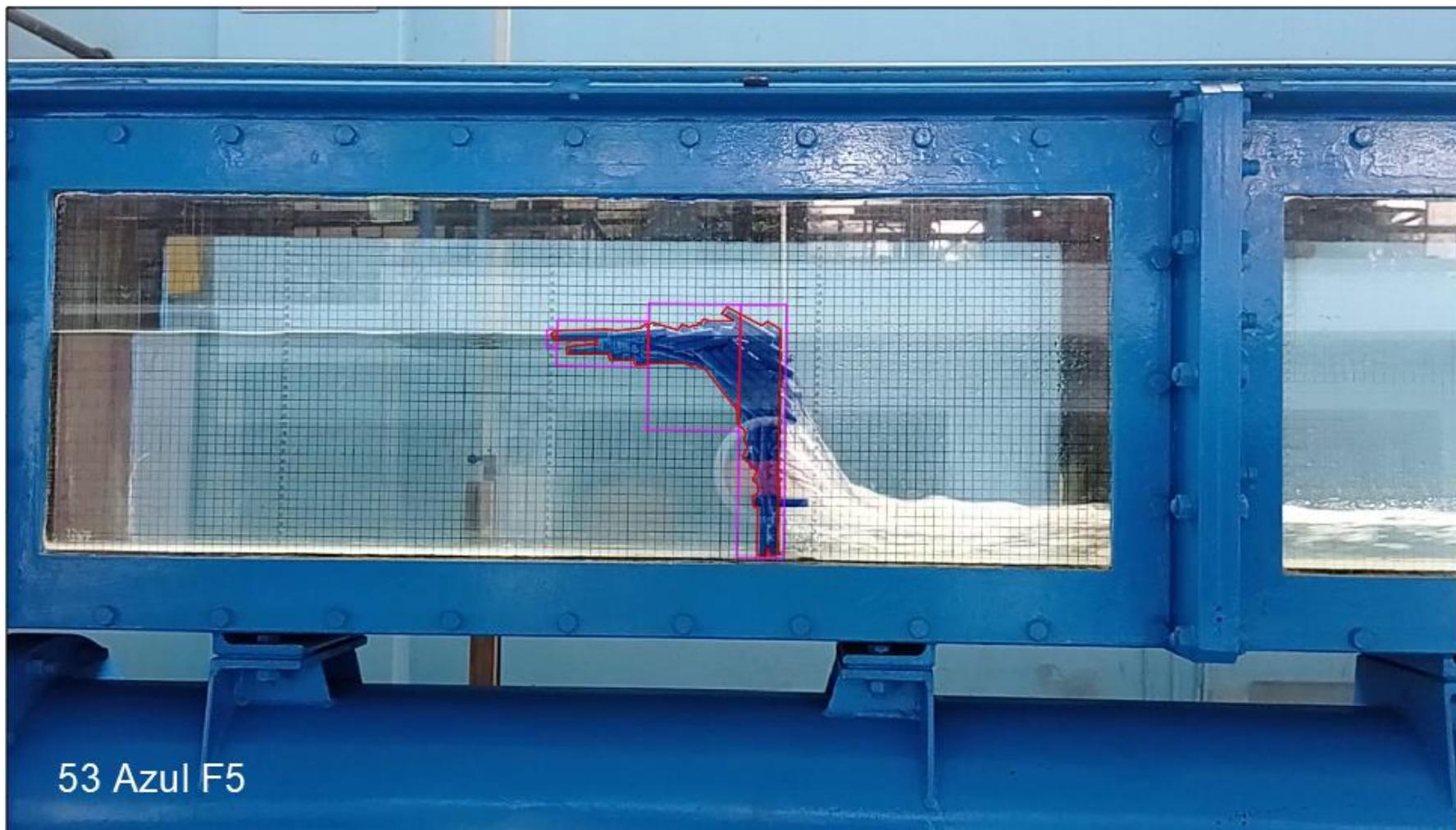
Fotografía 47: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 1.4$, $\rho_T=400 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 290.36 \text{ cm}^2$.



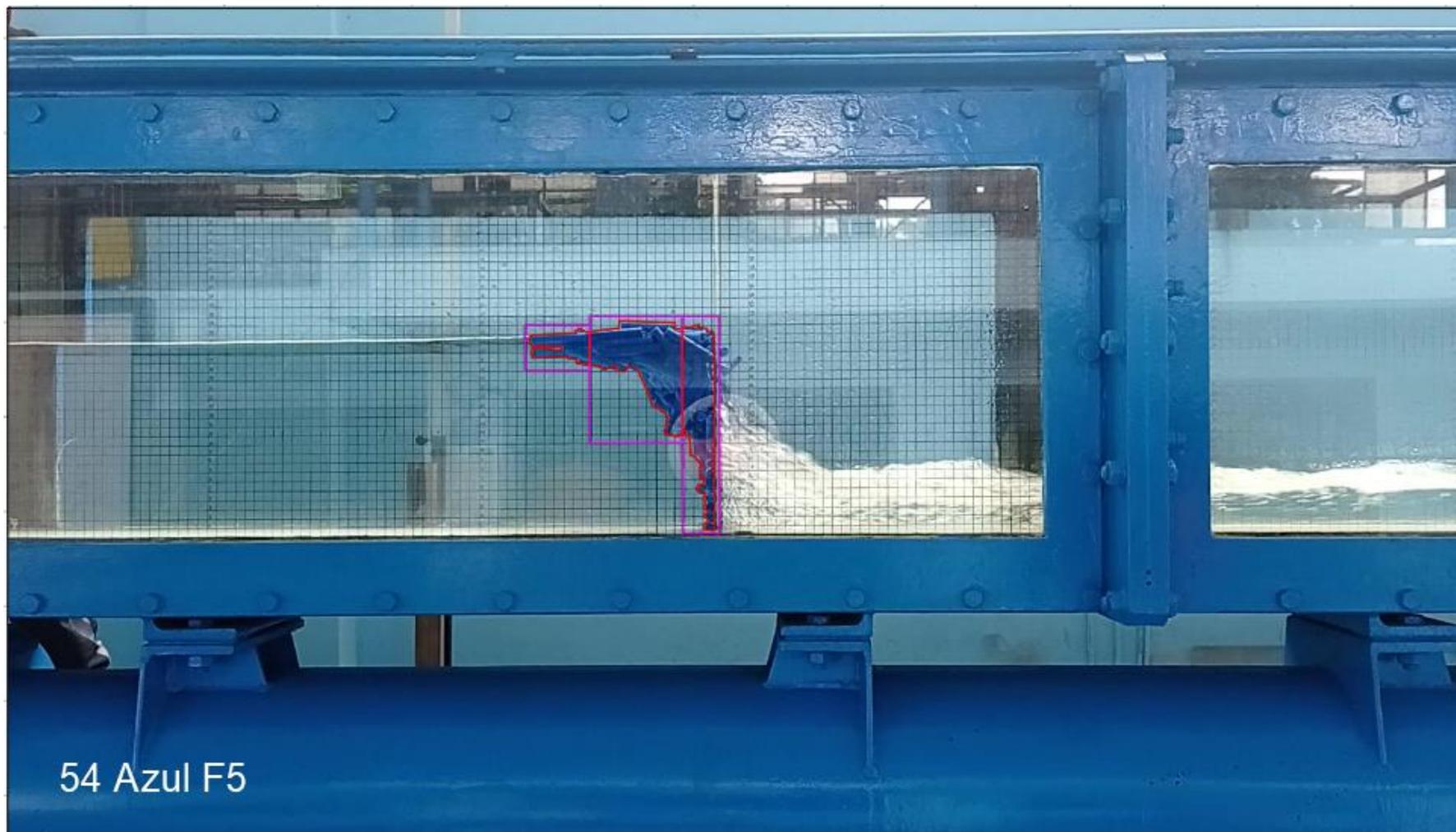
Fotografía 48: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 1.4$, $\rho_T=400 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 459.69 \text{ cm}^2$.



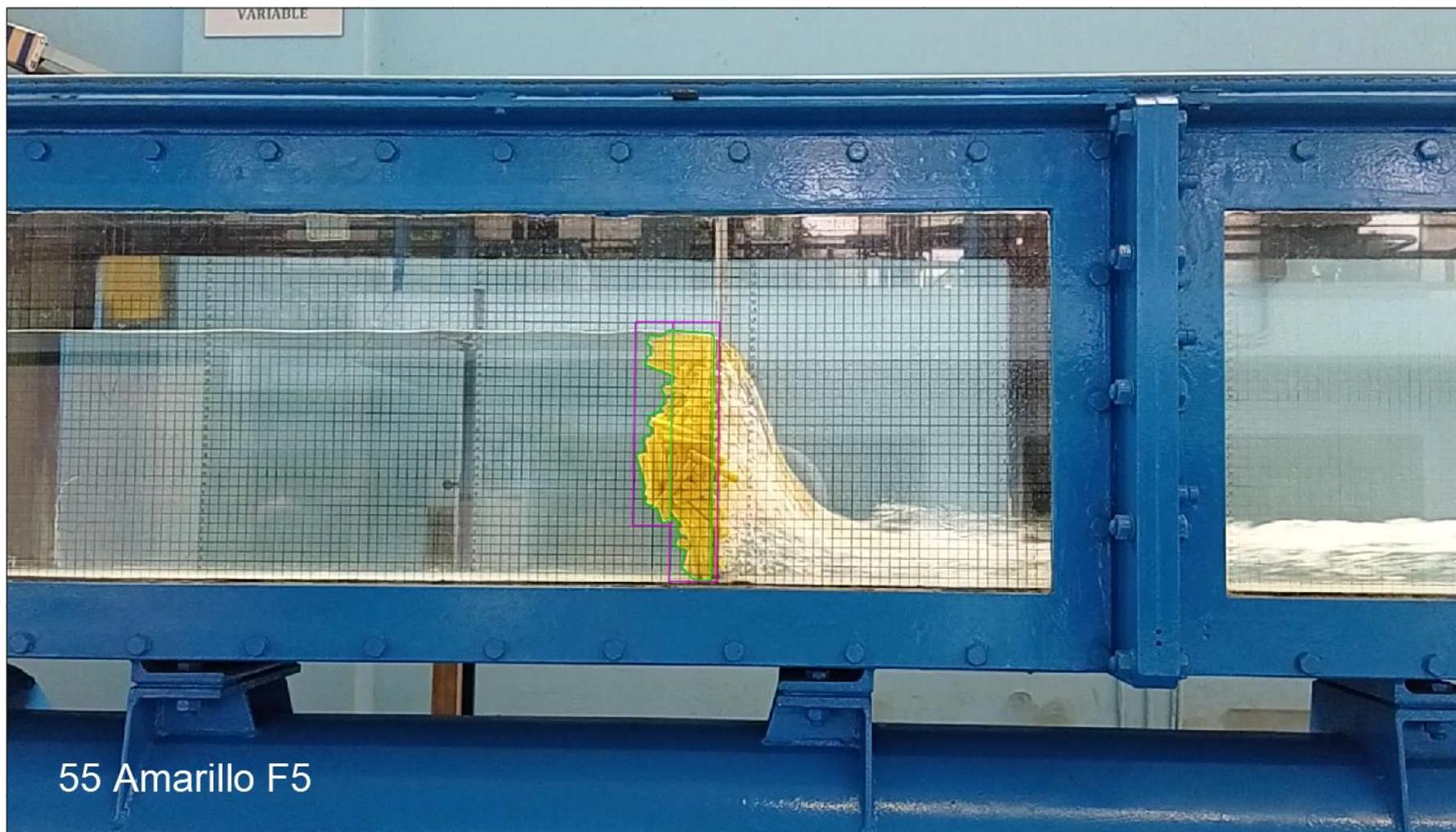
Fotografía 49: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 1.4$, $\rho_T=600 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 168.31 \text{ cm}^2$.



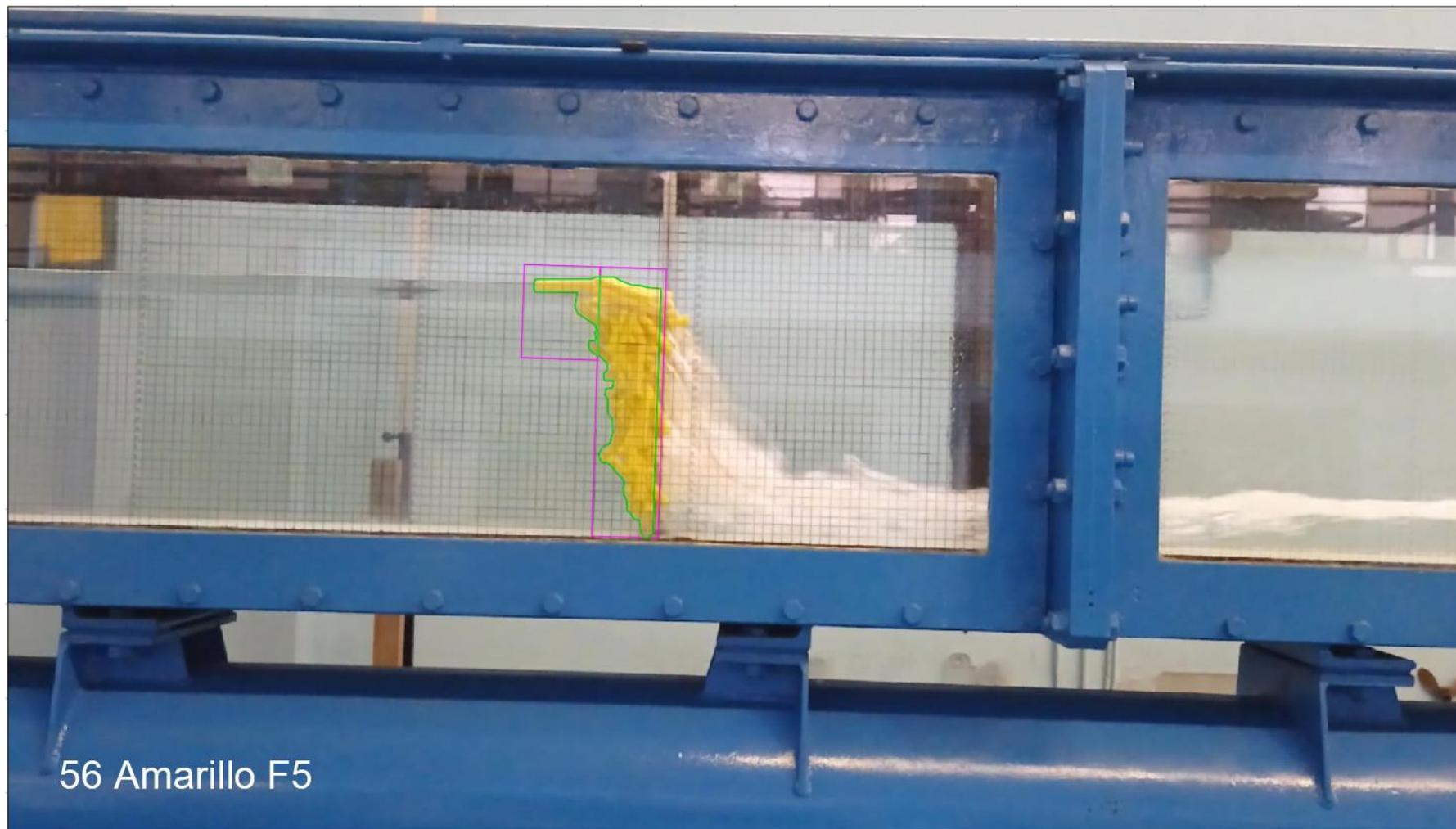
Fotografía 50: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 1.4$, $\rho_T=600 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 346.18 \text{ cm}^2$.



Fotografía 51: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 1.4$, $\rho_T=600 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 145.26 \text{ cm}^2$.

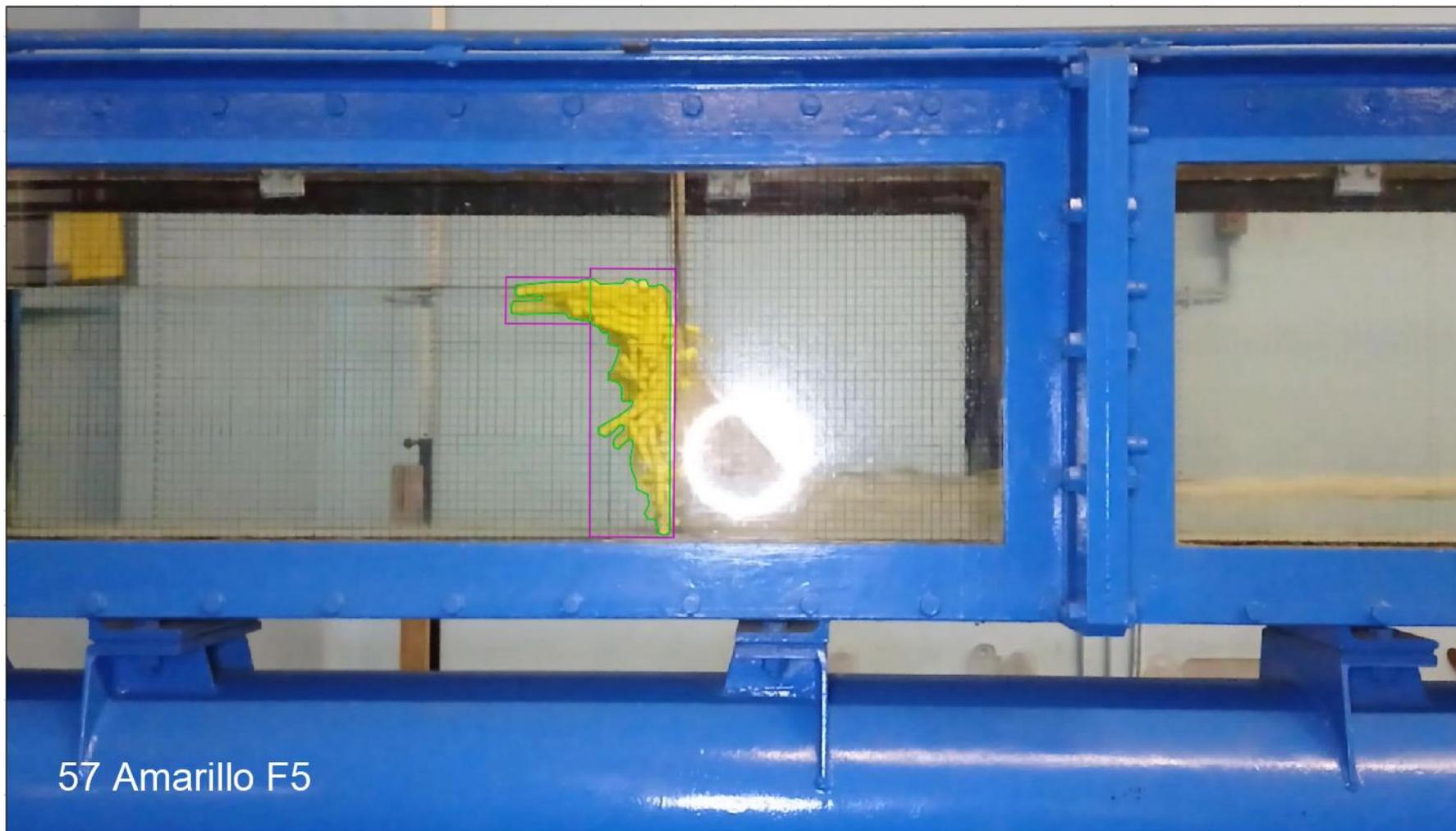


Fotografía 52: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 1.4$, $\rho_T=800 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 154.75 \text{ cm}^2$.

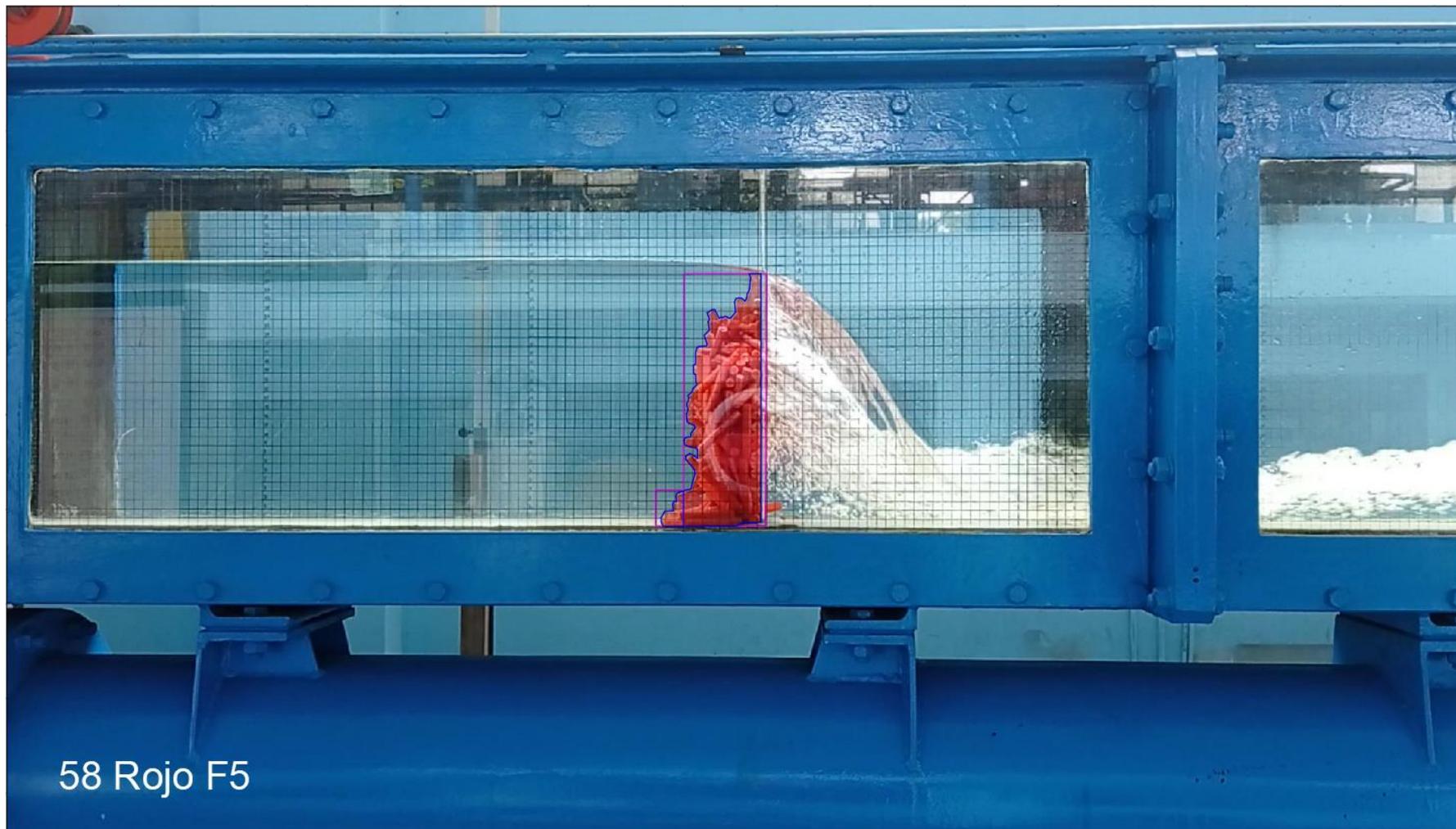


56 Amarillo F5

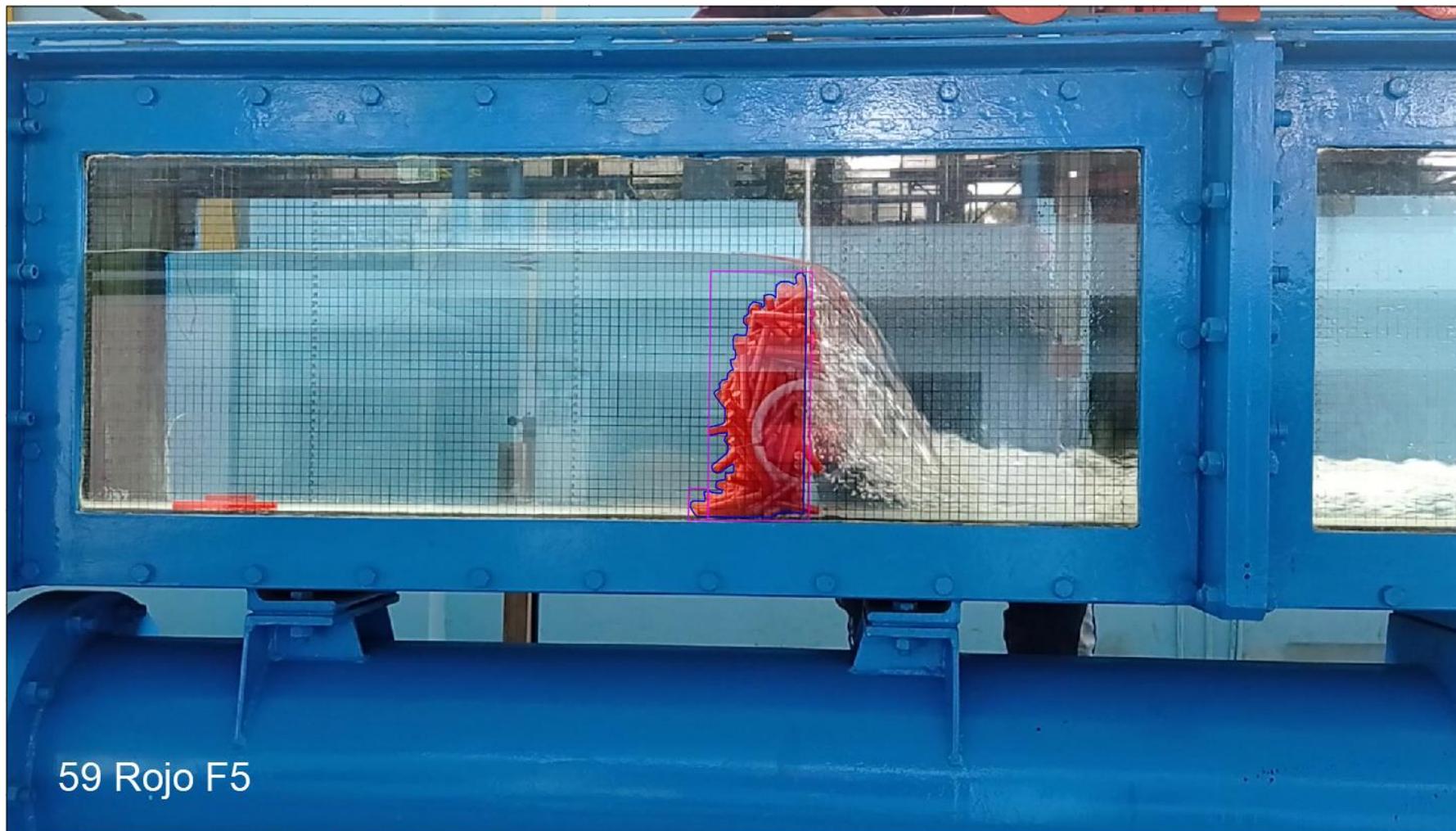
Fotografía 53: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 1.4$, $\rho_T=800 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 152.44 \text{ cm}^2$.



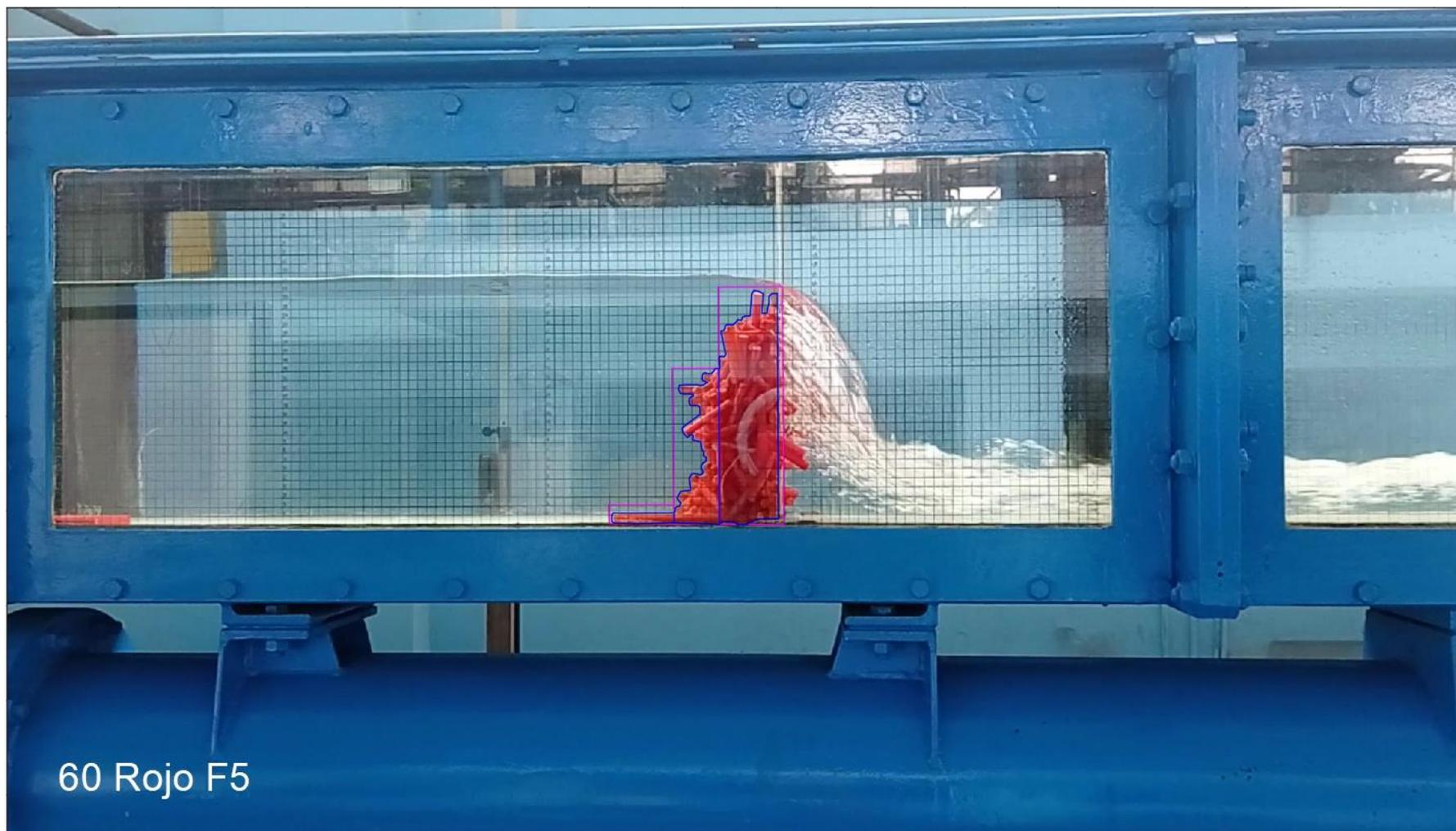
Fotografía 54: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 1.4$, $\rho_T=800 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 171.52 \text{ cm}^2$.



Fotografía 55: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 1.4$, $\rho_T=950 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 195.00 \text{ cm}^2$.

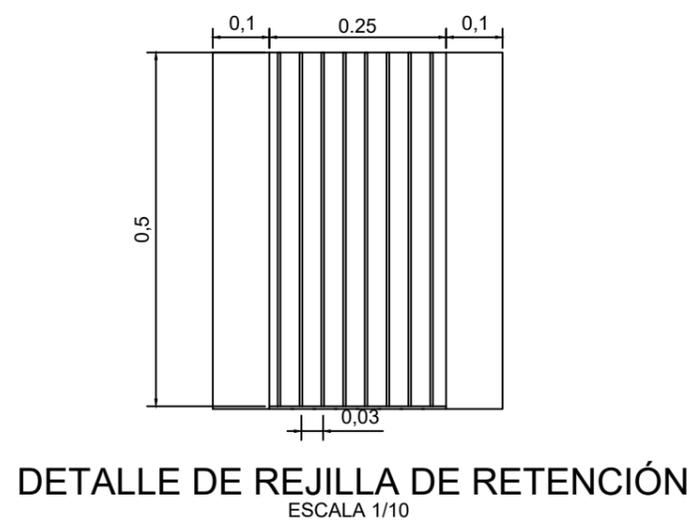
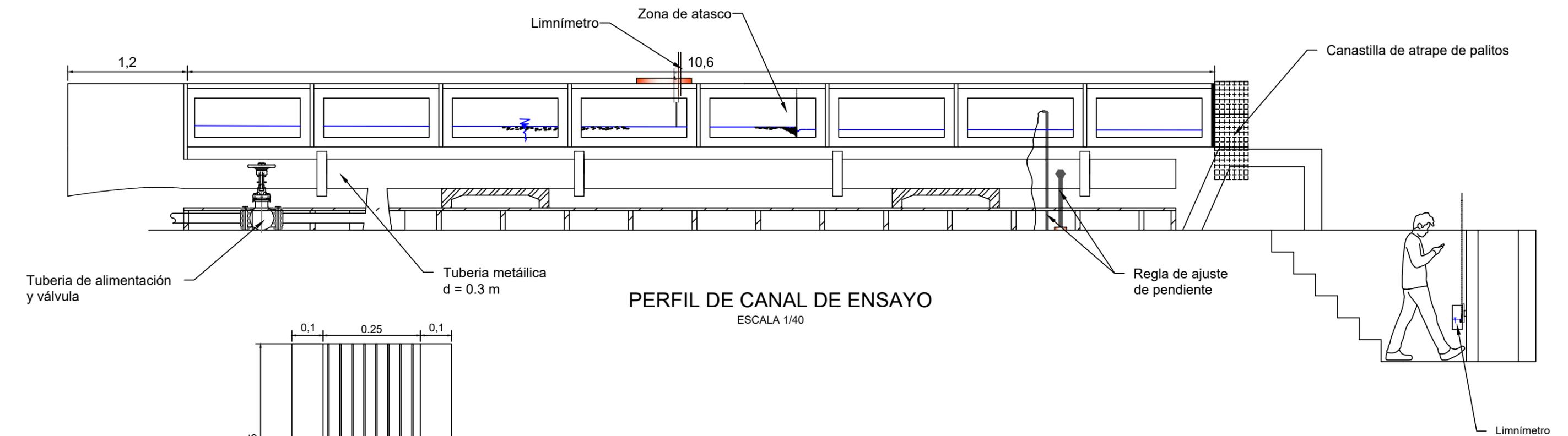
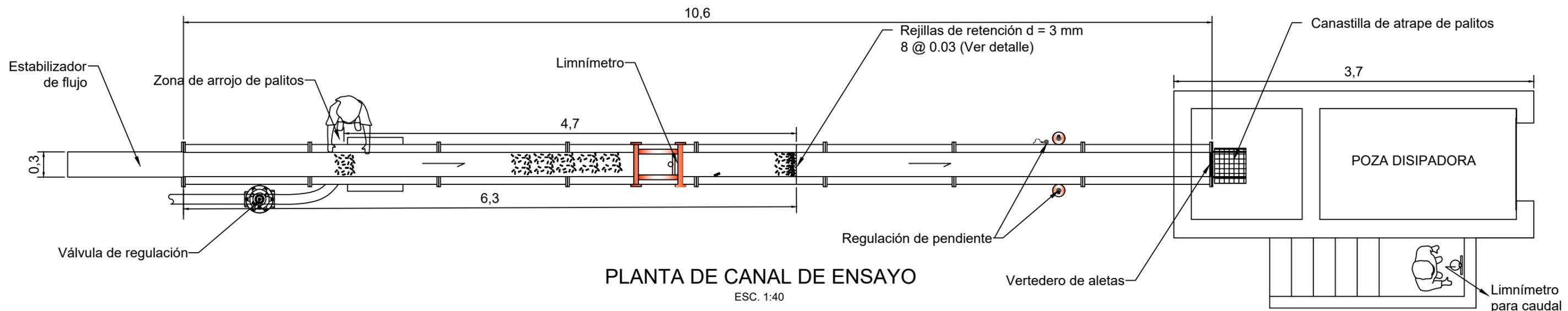


Fotografía 56: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 1.4$, $\rho_T=950 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 218.27 \text{ cm}^2$.



Fotografía 57: Análisis videométrico para la acumulación con $Fo= 1.4$, $\rho_T=950 \text{ kg/m}^3$, $A_L = 203.82 \text{ cm}^2$.

ANEXO C: PLANO DE CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL



**LABORATORIO
NACIONAL DE
HIDRÁULICA**

TESISTA:
BSC. MAGGIE REBECA MALLQUI ASTOCAZA

ASESOR:
MSC. ING. JUAN WALTER CABRERA CABRERA

TESIS:
"INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE LA MADERA
EN LA ACUMULACIÓN DE MATERIAL
LEÑOSO AGUAS ARRIBA
DE UNA REJILLA DE RETENCIÓN"

TITULO DEL PLANO:
PLANOS DE PLANTA, PERFIL Y DETALLES
DE CANAL DE PENDIENTE
VARIABLE

ESCALA: **INDICADA**

FECHA: **MAYO, 2022**

DISTRITO: **RÍMAC**

PROVINCIA: **LIMA**

DEPARTAMENTO: **LIMA**

LAMINA N°:
H-01