

DOI: 10.24850/j-tyca-14-02-02

Artículos

Evolución espacial de las estructuras turbulentas sobre una zona de vegetación flexible

Space evolution of turbulent structures over a flexible vegetation area

Edwin Jonathan Pastrana¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8403-3701>

Ariosto Aguilar-Chávez², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2884-5908>

Ángel Mendoza-González³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2883-2330>

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, edwin.pastrana@posgrado.imta.edu.mx

²Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, México, aaguilar@tlaloc.imta.mx

³Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, angelmg@comunidad.unam.mx



Autor para correspondencia: Edwin Jonathan Pastrana,
edwin.pastrana@posgrado.imta.edu.mx

Resumen

En un cauce natural o artificial es usual la presencia de vegetación en el fondo y en la pared. Los efectos que produce la presencia de ésta es una alteración en el campo de flujo. La magnitud de las alteraciones en el campo del flujo depende de la extensión, altura, densidad y flexibilidad de la vegetación. Para analizar a detalle las estructuras turbulentas, en este trabajo se realizó un estudio experimental en laboratorio en un canal de sección rectangular con un tramo de vegetación sumergida, flexible y artificial. La región de medición se ubicó aguas arriba de la zona de vegetación hasta el final de esta misma, además se determinó la asimetría que puede inducir la presencia de la pared del canal. Las mediciones se realizaron con equipo de velocimetría acústica de efecto Doppler (ADV). Los resultados obtenidos identifican el desarrollo de la capa de mezcla a partir de los patrones de velocidad media y los esfuerzos de Reynolds. En el caso de los perfiles de velocidad media sobre la capa de vegetación fue posible identificar un punto de inflexión donde se identificaron inestabilidades tipo Kelvin-Helmholtz. Con el fin de analizar los procesos en la capa de mezcla se propone un modelo fenomenológico basado en el análisis de la curvatura de las velocidades promediadas. Además, se determinó la aportación en el transporte de momento de las estructuras turbulentas con un análisis de cuadrantes con las velocidades fluctuantes.



Palabras clave: vegetación flexible, modelo fenomenológico, ADV, capa de mezcla, estructuras turbulentas.

Abstract

In a natural or artificial channel, the presence of vegetation at the bottom and on the wall is usual. The effects produced by the presence of this is an alteration of the flow field. The magnitude of the changes in the flow field depends on the extension, height, density, and flexibility of the vegetation. To analyze the turbulent structures in detail in this work, an experimental study was carried out in a laboratory, in a rectangular channel with a section of submerged, flexible and artificial vegetation. The measurement region was located upstream of the vegetation zone until the end of it, in addition, the asymmetry that the presence of the channel wall can induce was determined. The measurements were performed with an Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) instrument. The results allow to identify the development of the mixing layer from the average velocity patterns and the Reynolds stress. In the case of the average velocity profiles over the vegetation layer, it was possible to identify an inflection point where Kelvin-Helmholtz instabilities type were identified. In order to analyze the processes in the mixing layer, a phenomenological model is proposed based on the analysis of the curvature of the averaged velocities. In addition, the contribution to the moment transport rate by the identified turbulent structures were determined with a quadrant analysis of fluctuating velocities.

Keywords: Flexible vegetation, phenomenological model, ADV, mixing layer, turbulent structures.

Recibido: 11/11/2020

Aceptado: 20/09/2021

Introducción

En un cauce artificial, la interacción del flujo con la vegetación produce una zona de estelas y se generan regiones de producción de turbulencia que alteran los patrones de flujo medio, con una tasa tridimensional muy alta.

En el caso de un cauce natural, la presencia de vegetación sumergida es normal, pero los cambios en su morfología están relacionados con su presencia e interfieren en función de su altura, densidad y flexibilidad. La vegetación genera cambios en las estructuras turbulentas en sentido vertical y transversal, además de flujos secundarios importantes. Para evaluar la magnitud de estos cambios es recomendable estimar patrones de flujos medios y esfuerzos de Reynolds,



como una condición de caracterización de baja frecuencia, pero además se deben evaluar estadísticamente las velocidades fluctuantes.

En esta parte del documento se describen las condiciones de sumergencia, flexión y densidad de la vegetación. La condición de sumergencia, según Palmer (1945), la establece como la relación entre la altura de la vegetación respecto al tirante del cauce. La composición interna de ésta es muy importante, ya que influye de forma muy específica en la modificación del fondo del canal. Asimismo, un parámetro importante a considerar debe ser la relación entre la respuesta de la flexión de los elementos de vegetación en relación con la cinética del campo de flujo.

La flexión de la vegetación (J) es la respuesta dinámica de la estructura de los tallos de la vegetación a la acción de la velocidad principal del flujo (Okamoto & Nezu, 2010; Ghani, *et al.*, 2013; Jeon, 2015), la cual se encuentra en función de la velocidad principal y se puede clasificar de acuerdo con los resultados experimentales obtenidos por Carollo, *et al.* (2005), y Okamoto & Nezu esta clasificación se enlista a continuación:

- I. Rígido. La vegetación se mantiene en su posición vertical y no presenta oscilaciones en la copa.
- II. Oscilación suave. La vegetación tiene una deformación suave y tiene una oscilación suave no organizada.

- III. Monami. La vegetación tiene una deformación significativa, y se observa un movimiento oscilatorio coherente y armónico.
- IV. Propensa. La vegetación tiene un abatimiento de todos sus elementos y las oscilaciones son pequeñas con alta frecuencia.

Adicional al comportamiento a la flexión, la vegetación se puede clasificar respecto a su ubicación y distribución, que puede ser en la pared o fondo del canal exclusivamente, o en ambos lugares. También es importante establecer la densidad de la vegetación, que puede inducir diferentes comportamientos para un mismo tipo de relación entre la velocidad y la flexión (Poggi, *et al.* 2004; Nezu & Sanjou, 2008).

La relación entre la altura de la vegetación y el nivel de agua, definida por Nepf & Vivoni (2000), se clasifica en tres tipos:

- I. Flujos bajos: el flujo que pasa a través de los tallos y el follaje son deformados.
- II. Flujos intermedios: se tiene una sumergencia completa de la vegetación, pero afecta al comportamiento del campo de flujo.
- III. Flujos altos: el campo de flujo no se ve afectado por la presencia de la vegetación; para esta condición, la vegetación se considera como una rugosidad de fondo uniforme.

El estudio de flujos intermedios se ha convertido en un tema importante a analizar debido a los efectos que se generan en el flujo medio y turbulento, ya que modifican los perfiles de velocidad media, generando estructuras turbulentas coherentes cerca de la copa de la

vegetación; estos vórtices son principalmente de gran escala, provocando una zona de intercambio de masa y momento entre la copa de vegetación y zona exterior, es decir, sobre la vegetación, una condición semejante a una capa límite. En la práctica de la ingeniería, la vegetación sumergida se analiza como una condición de resistencia uniforme, similar a un flujo alto. Entonces, para evaluar su efecto, se aplica el concepto usual de la resistencia del flujo por efecto de la vegetación sumergida y sus efectos en los parámetros de rugosidad, obteniendo valores generales de coeficiente de rugosidad de Manning en función de la relación de sumergencia (Järvelä, 2004; Wilson, 2007).

En este trabajo se realizará un estudio más localizado de los efectos de la vegetación sumergida, considerando que el desarrollo del campo de flujo sobre la copa de la vegetación es similar a la condición de dos campos de flujo a diferente velocidad, con una capa de interacción entre éstas y que produce pequeñas perturbaciones, que inducen una inestabilidad del flujo del tipo Kelvin-Helmholtz (KH). Por lo anterior se generan vórtices de gran escala, como muestra Finnigan (2000). Para analizar con mayor detalle la generación de las estructuras turbulentas, en principio se puede decir que se tiene una capa límite y esta se desarrolla longitudinalmente, pero Ghisalberti & Nepf (2002) demuestran que los flujos sobre vegetación sumergida pueden analizarse como una capa de mezcla, más que como una capa límite. El perfil de velocidad de una capa de mezcla se aproxima a la forma de una curva tipo tangente hiperbólica (Ho & Huerre, 1984), como se muestra en la Figura 1.

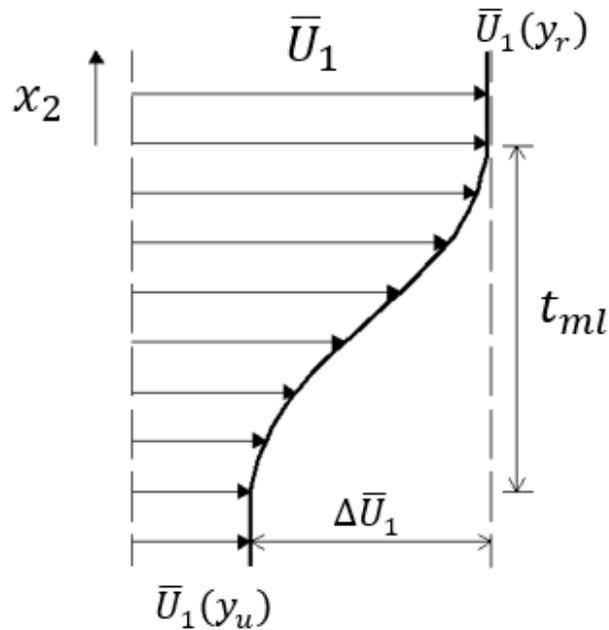


Figura 1. Perfil de velocidad en una capa de mezcla (Ghisalberti & Nepf, 2002).

De acuerdo con Poggi *et al.* (2004), en la zona de vegetación se pueden identificar en tres regiones, según el tamaño de los vórtices, como se muestra en la Figura 2. La primera región está dominada principalmente por vórtices de pequeña escala (vórtices de von Kármán). La segunda región, que está cerca de la copa de la vegetación, está dominada por los vórtices de Kelvin-Helmholtz generados por la

inestabilidad en el punto de inflexión. La tercera región es similar a una zona de desarrollo tipo capa límite.

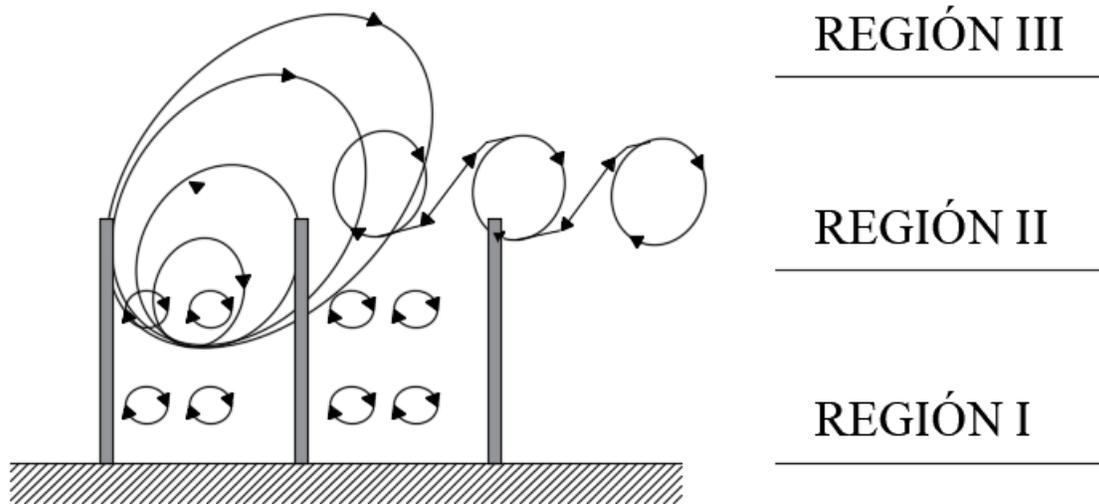


Figura 2. Tres escalas de vórtices en un canal con vegetación sumergida (Poggi *et al.*, 2004).

Sukhodolov & Sukhdolova (2006) realizaron mediciones en campo para verificar la aplicabilidad de la analogía de la capa de mezcla en un cauce natural sobre un parche de *Sagittaria sagittifolia* implantados con un cierto arreglo variando su densidad. Los resultados confirman la eficacia de la analogía de la capa de mezcla. Sukhodolov & Sukhdolova (2006), y Maltese *et al.* (2007) se enfocaron en el patrón espacial de la estructura turbulenta que se desarrolla sobre la vegetación sumergida.

Además, aplicaron el análisis de cuadrantes, revelando que la estructura dominante es la expulsión sobre la copa de vegetación.

Ghisalberti & Nepf (2002) revelaron que los flujos con vegetación sumergida se pueden modelar como una capa de mezcla en lugar de una zona de capa límite debido a que los perfiles de velocidad que se presentan en un canal con vegetación sumergida se aproximan a un perfil de tipo tangente hiperbólico (Figura 1). Además, a partir de los perfiles de velocidad media identifican un punto de inflexión, lo cual implica que el flujo es susceptible a las inestabilidades de Kelvin-Helmholtz. Nikora *et al.* (2008) examinaron el efecto de la vegetación sumergida en la resistencia hidráulica en una variedad de patrones de parches de vegetación. Okamoto, *et al.* (2012) realizaron experimentos con inyección continua de tinta para evaluar la estructura del transporte de masa en un flujo de canal abierto con modelos rígidos de vegetación y una configuración de tiras rígidas variando la densidad, y obtuvieron los efectos de los vórtices coherentes en la difusión turbulenta vertical. Okamoto & Nezu (2013) examinaron la transición de una capa límite desarrollada aguas arriba del parche de vegetación a un flujo de tipo de capa de mezcla desarrollada sobre la vegetación; además desarrollaron un modelo fenomenológico para el proceso de desarrollo en el flujo con vegetación sumergida. En estos experimentos utilizaron la técnica PIV (*Particle Image Velocimetry*) y los elementos de vegetación estaban compuestos por tiras rígidas.

Como ya se mencionó, las características de flujo medio y turbulencia en flujos de canal abierto con vegetación sumergida han recibido mucha atención. Sin embargo, aún no se dispone de información detallada de la evolución de la capa de mezcla y las estructuras turbulentas coherentes generadas por la presencia de la vegetación. Por esto, en el presente estudio se considera el efecto de un parche de vegetación flexible de longitud finita y un flujo intermedio para identificar las estructuras turbulentas, al igual que su evolución longitudinal y transversal a partir de un modelo fenomenológico. La zona de análisis inicia aguas arriba del parche hasta el límite del parche, pero se realizaron mediciones en secciones transversales y verticalmente se consideró la zona por debajo de la copa de vegetación hasta el flujo exterior.

Materiales y métodos

La estación experimental es un canal con pendiente fija S_0 de sección rectangular, con una longitud de 10 m, ancho de 0.60 m y con una altura de 0.60 m. Las paredes del canal son de vidrio y fondo de acero. La representación de los elementos de vegetación es de un material plástico

flexible. Las condiciones hidráulicas del estudio experimental se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones hidráulicas donde Q es el gasto; $U = Q/A$ es la velocidad media del flujo; S_0 es la pendiente de la plantilla del canal; $Re = UR_h/\nu$ es el número de Reynolds; $Fr = U/\sqrt{gR_h}$ es el número de Froude; $R_h = A/P$ es el radio hidráulico; A es el área de la sección transversal; P es el perímetro de la sección transversal; ν es la viscosidad cinemática, y g es la aceleración de la gravedad.

h (cm)	h_p (cm)	h/h_p	Q (ls ⁻¹)	U (cm s ⁻¹)	S_0	Re	Fr
33	11	3	41.20	20	0.005	32698	0.11

El sistema de referencia de la toma de muestras de la estación experimental se muestra en la Figura 3, donde el sistema coordenado es la tríada de valores de x_i , para $i = 1, 2, 3$, y se denominará coordenada longitudinal, vertical y transversal, respectivamente. El dominio del espacio de medición en metros es $\Omega(x_i) \in [-0.5, 3.7] \times [0.0, 0.33] \times [0.0, 0.3]$.

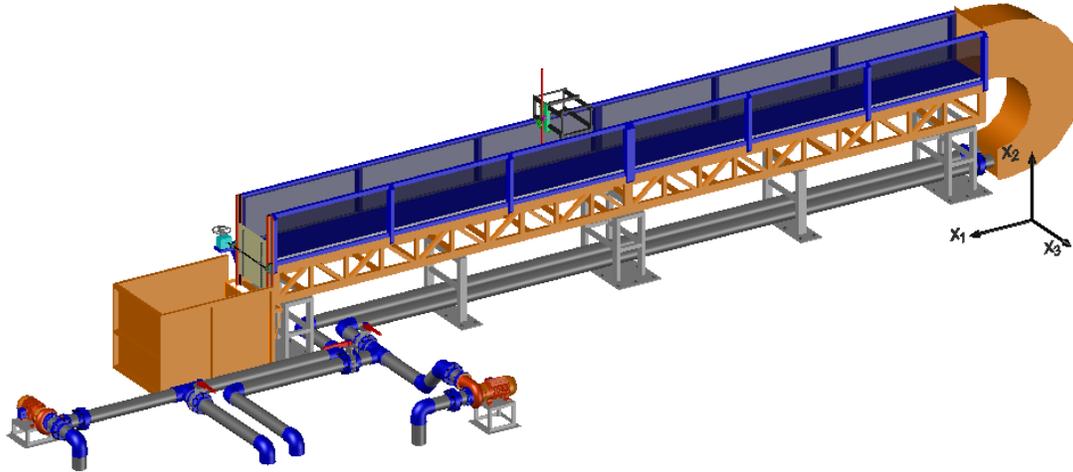


Figura 3. Estación experimental.

Para la toma de las velocidades instantáneas en las tres componentes (u_i) se utilizó un dispositivo de velocimetría acústica de efecto Doppler (ADV, *Acoustic Doppler Velocimeter*) a una frecuencia de muestreo de 100 Hz durante un periodo $T = 60$ s. El dispositivo ADV es de la marca Nortek® o también llamado Vectrino Profiler™ (Vectrino II). Para el proceso de los datos experimentales se consideró el modelo de descomposición de Reynolds $u_i \equiv U_i + u'_i$, considerando los promediados temporales de las velocidades en cada componente como U_i y las velocidades fluctuantes como u'_i .

La configuración de la vegetación es un parche con una longitud de 3.70 m y el arreglo de elementos flexibles es lineal, con una separación entre elementos en sentido longitudinal de $l_{x_1} = 0.025$ m y en sentido

transversal de $l_{x_3} = 0.025 \text{ m}$, tal como se muestra en la Figura 4 y Figura 5, respectivamente. El inicio del parche de vegetación se considera en $x_1 = 0$.



Figura 4. Zona de vegetación.

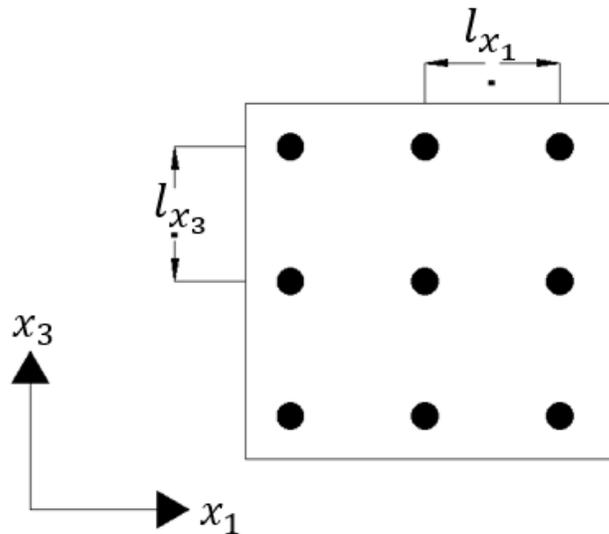


Figura 5. Patrón de los elementos de vegetación.

Los puntos de muestreo fueron del centro de canal hacia la margen derecha en cinco secciones, indicadas con las letras A, B, C, D, E (Figura 6); en sentido longitudinal se analizaron 43 puntos y 19 en sentido vertical (Figura 7a). Los puntos de medición en la vertical se muestran en la Figura 7b.

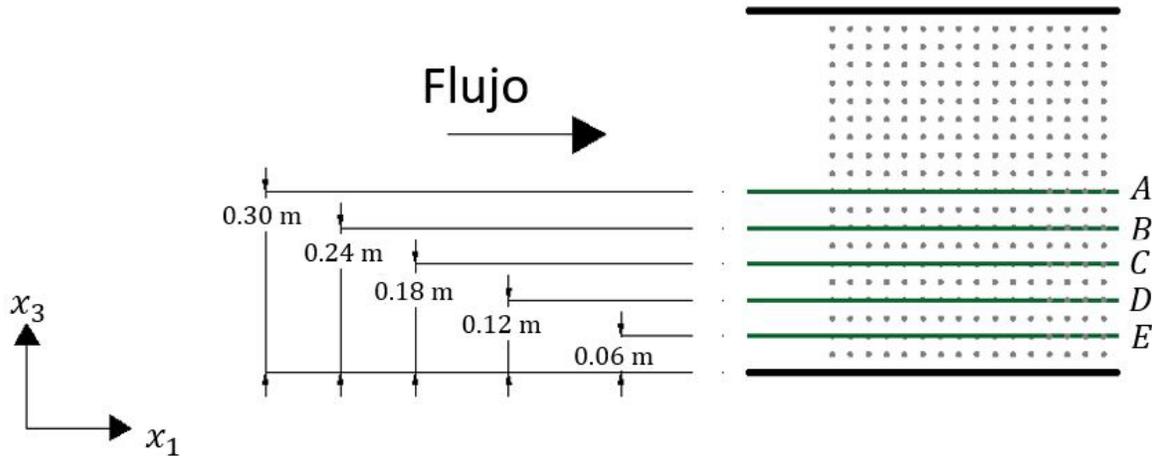


Figura 6. Mediciones en sentido transversal.

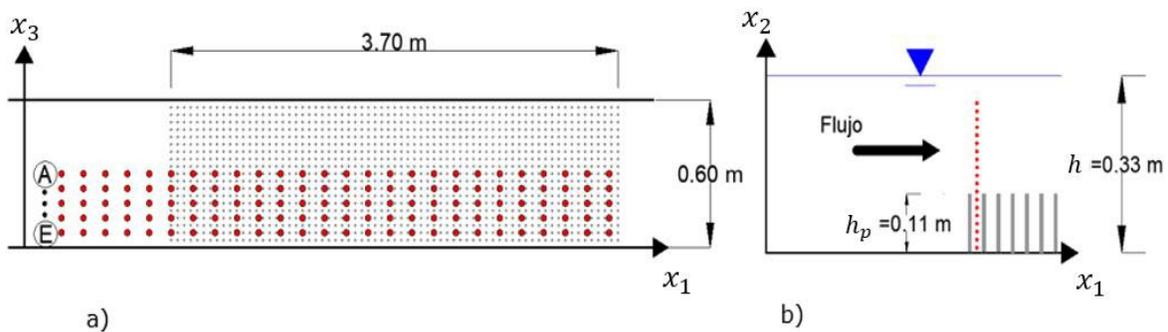


Figura 7. Puntos de medición con el equipo ADV, con un total de 4 085 puntos: a) puntos de muestreo en el plano (x_1, x_3) con una separación de 0.10 m en sentido x_1 y 0.06 m en sentido x_3 ; b) puntos de muestreo en el plano (x_1, x_2) , con una separación de 0.015 m en sentido x_2 . En la zona de vegetación se tienen siete puntos en el interior y 12 encima de la vegetación.

De acuerdo con Vargas *et al.* (2015), la vegetación real puede ser simulada con barras cilíndricas. Con esto, se propuso utilizar barras cilíndricas para simular la vegetación con las siguientes características físicas: altura de $h_p = 0.11$ m y diámetro de $\emptyset = 7.3$ mm. El material de los elementos de vegetación es silicón.

Para la caracterización de la vegetación se utilizaron los parámetros de densidad de vegetación λ_f , rigidez a la flexión J y la relación de sumergencia h/h_p . La densidad de vegetación adimensional λ_f se determinó con la expresión propuesta por Okamoto & Nezu (2013):

$$\lambda_f = \frac{\sum_i^{n_v} A_{f_i} h_p}{A_b h_p} \quad (1)$$

Donde A_f es el área frontal total de los elementos de vegetación y A_b es el área ocupada por la vegetación. En el caso de la rigidez a la flexión (J) de los elementos de vegetación se utilizó la ecuación propuesta por Wilson, et al. (2003), que es:

$$J = EI = \frac{F L^3}{\delta_{x_1} 3} \quad (2)$$

Donde E es el módulo de elasticidad e I es el segundo momento del área (también llamado como momento de inercia). En el lado derecho de

la expresión se tiene que F es la relación entre la fuerza; δ_{x_1} es la deflexión del elemento; L , la longitud del elemento de vegetación (Figura 8). Entonces, se obtiene un valor de $J = 3.42 \times 10^{-3} \text{ Nm}^2$ y un valor $\lambda_f = 1.37$.

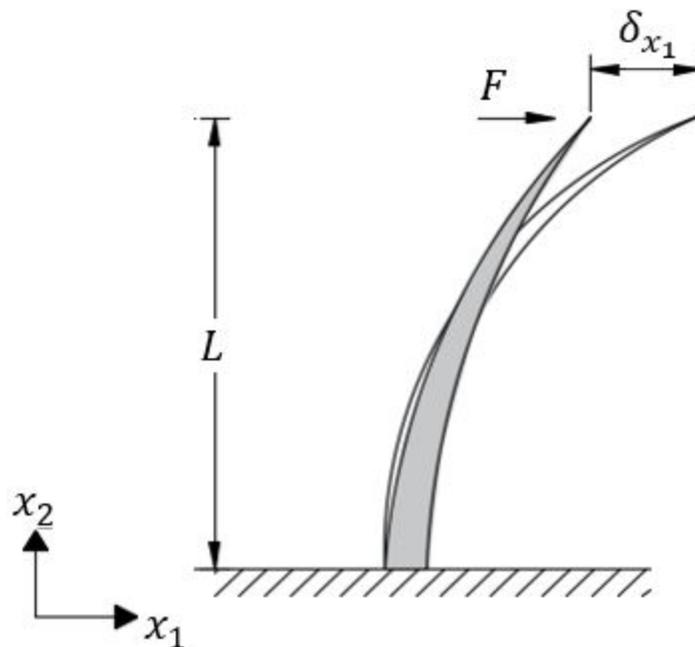


Figura 8. Diagrama del elemento de vegetación con deflexión.

Para este estudio se simuló un tipo de vegetación real llamado *Lespedeza sericea*, con una longitud de $h_p = 10 - 20 \text{ cm}$ y con un $J = 5 \times 10^{-6}$ a $1 \times 10^{-3} \text{ Nm}^2$ (Kouwen & Li, 1980; Nepf & Vivoni, 2000). Los parámetros utilizados en este experimento, tales como la relación de sumergencia, la densidad, la rigidez a la flexión y el patrón de los elementos de vegetación

fue con base en varios experimentos de laboratorio realizados por diversos autores (Palmer, 1945; Wilson *et al.*, 2003; Nezu & Sanjou, 2008; Okamoto & Nezu, 2013). Los patrones lineales y escalonados son los más utilizados en laboratorio debido a que tienen una mejor representación del efecto de la vegetación en un canal con flujo intermedio (Vargas-Luna *et al.*, 2015).

Resultados

De acuerdo con lo anterior, la condición de flujo que se está analizando es un flujo intermedio. Además, para una mejor comprensión de los resultados se consideró un espacio adimensional del dominio de nuestro $\theta(\xi_i = x_i/h_p) \in [-4.54, 33.63] \times [0.0, 3.0] \times [0.0, 2.72]$; la copa de la vegetación se tiene para $\xi_2 = 1$, y el inicio de la vegetación para $\xi_1 = 0$. Los valores para las secciones en sentido transversal se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de ξ_3 para los puntos de medición en el sentido transversal.

Sección	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
$\xi_3 = x_3/h_p$	2.72	2.18	1.63	1.09	0.54

Características de flujo medio

De las mediciones obtenidas, primero se analizaron los campos de flujos medios. En la Figura 9 se muestran los contornos de velocidad promediada temporal en el sentido principal U_1 . La velocidad promediada en los puntos de muestreo (ξ_i) se determinó con la siguiente expresión:

$$U_i(\xi_i) = \frac{1}{T} \int_0^{\eta=T} u_i(\xi_i, \eta) d\eta \quad (3)$$

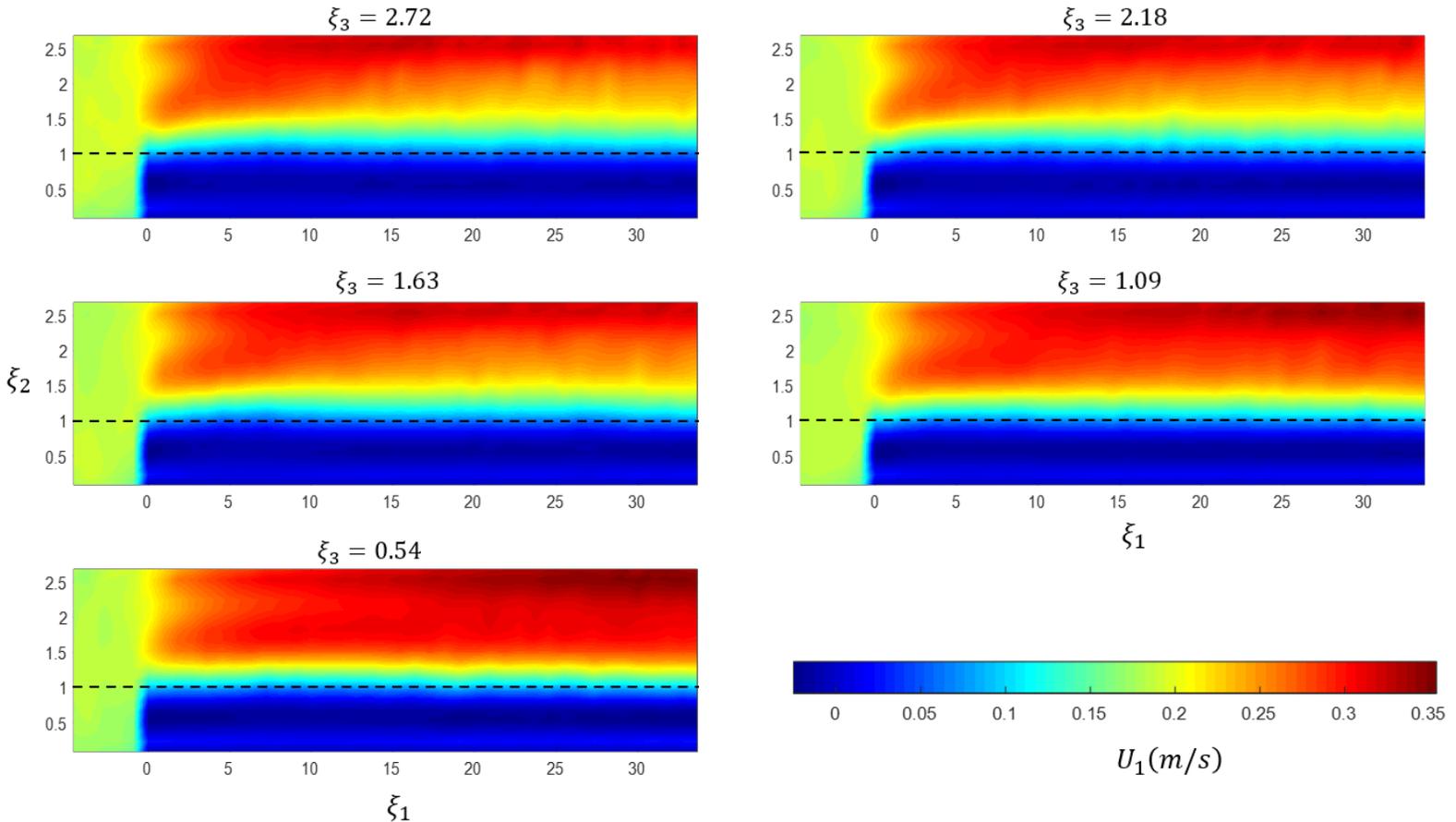


Figura 9. Contornos de velocidad media en sentido principal U_1 , donde la línea discontinua representa la copa de la vegetación $\xi_2 = 1$.

Por la presencia de la vegetación se observa una desaceleración de la velocidad principal cerca de la copa de vegetación $\xi_2 \approx 1$, que se compensa con un incremento de ésta en la zona exterior. Esta distorsión del campo de flujo origina un punto de inflexión justo en la copa de

vegetación $\xi_2 = 1$, lo anterior genera una inestabilidad de Kelvin-Helmholtz y por consiguiente se presentan vórtices de diferentes escalas; esta observación se asemeja a resultados presentados por Nepf & Vivoni (2000).

En la Figura 10 se muestran los perfiles de velocidad media para todas las secciones transversales, observando un perfil tipo hiperbólico. Dichas características del campo de flujo son similares a las que se presentan en la vegetación terrestre, presentada por Finnigan (2000). La inestabilidad se mantiene en el sentido transversal, pero disminuye el espesor de la capa de mezcla por la presencia de la pared.

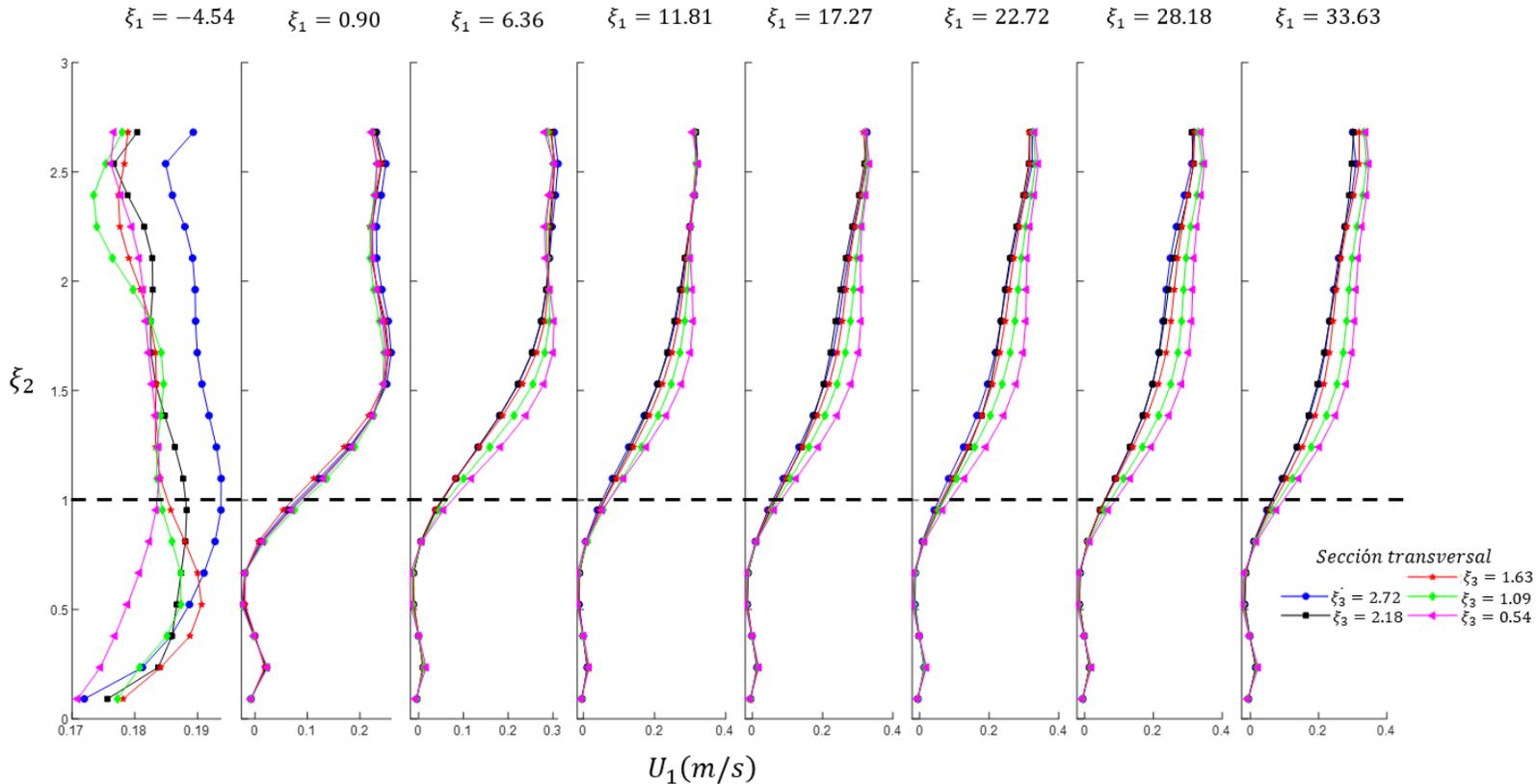


Figura 10. Perfiles de velocidad media en sentido principal, U_1 , donde la línea discontinua indica la copa de la vegetación.

En el perfil de velocidad media en $\xi_1 = -4.54$ (Figura 10) en la zona pegada a la superficie libre ($\xi_2 \geq 2.5$) se observa una aceleración del flujo por el efecto de remanso ocasionado por la vegetación.

Esfuerzos de Reynolds

Analizando los esfuerzos de Reynolds $-\overline{u_1' u_2'}$ de los experimentos (Figura 11), se puede observar el desarrollo de la capa de mezcla, que es muy representativa para la zona central ($\xi_3 = 2.72$), pero ésta va disminuyendo a medida que se tiene la influencia de las paredes, $\xi_3 < 2.72$.

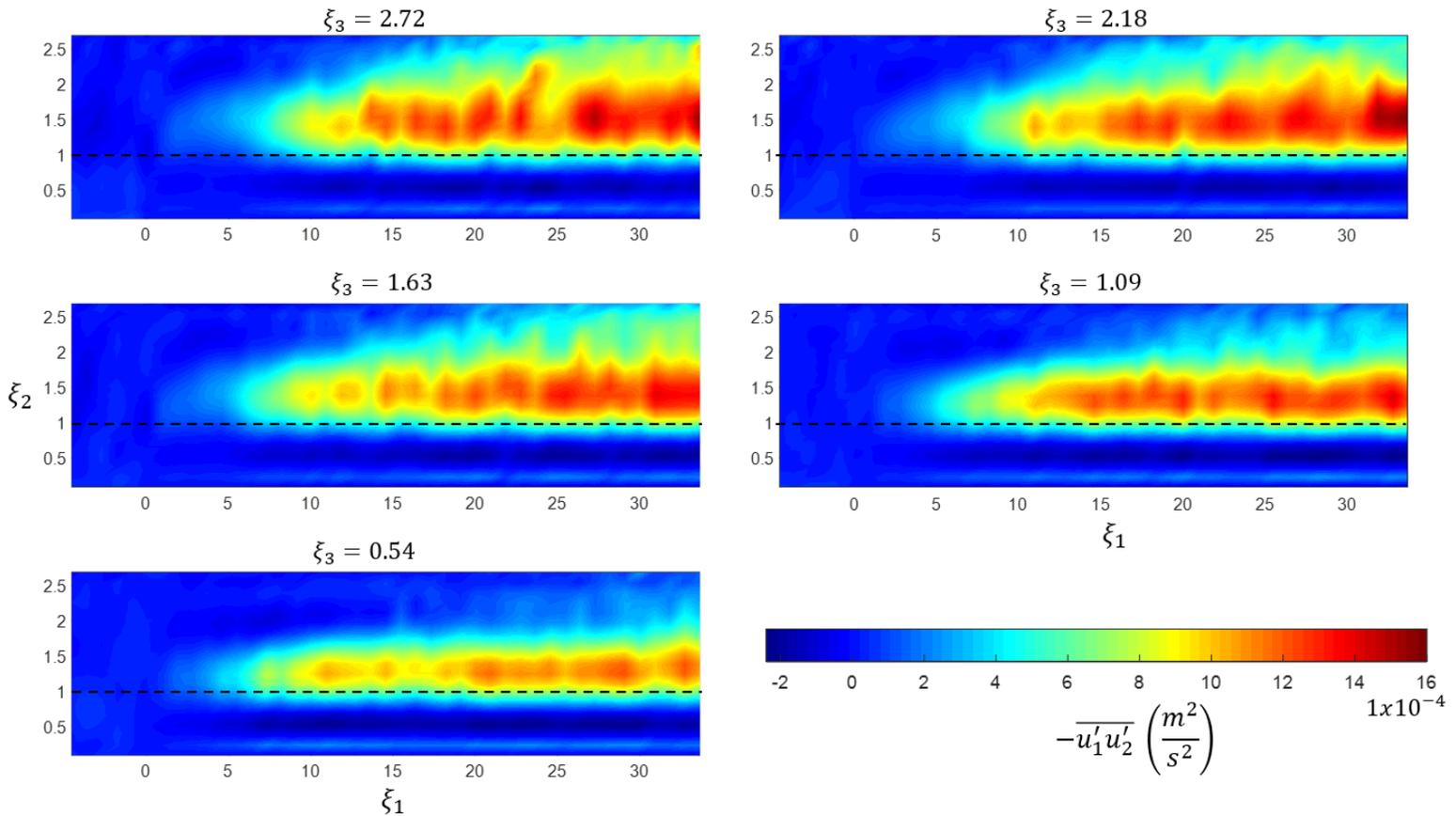


Figura 11. Contornos de esfuerzos de Reynolds $-\overline{u'_1 u'_2}$, donde la línea discontinua representa la copa de la vegetación $\xi_2 = 1$.

Nepf & Vivoni (2000), Nezu & Sanjou (2008), definen el tamaño de la capa de mezcla a partir de los perfiles de esfuerzos de Reynolds $-\overline{u'_1 u'_2}$, donde el límite superior e inferior están definidos por el 10 % del esfuerzo máximo $|\overline{u'_1 u'_2}|_{max}$, es decir, como se muestra en la siguiente expresión:

$$y_u, y_r = \frac{1}{|-u'_1 u'_2|_{max}} \frac{\partial (|-u'_1 u'_2|_{max})}{\partial x_2} \quad (4)$$

Donde y_r es el límite superior y y_u es el límite inferior de la capa de mezcla. Los límites superior e inferior de la capa de mezcla para $\xi_3 = 2.72$ y $\xi_3 = 0.54$ se muestran en los perfiles de esfuerzos de Reynolds (Figura 12). De acuerdo con el perfil de los esfuerzos de Reynolds para la posición longitudinal $\xi_1 = 33.63$ y en la sección transversal $\xi_3 = 2.72$, se tiene un espesor de capa de mezcla de $t_{ml_A} \approx 0.19 \text{ m}$ y para $\xi = 0.54$ de $t_{ml_E} \approx 0.15 \text{ m}$. Con esto se observa que al centro del canal se tiene un tamaño de capa de mezcla mayor al que se tiene pegado a la pared.

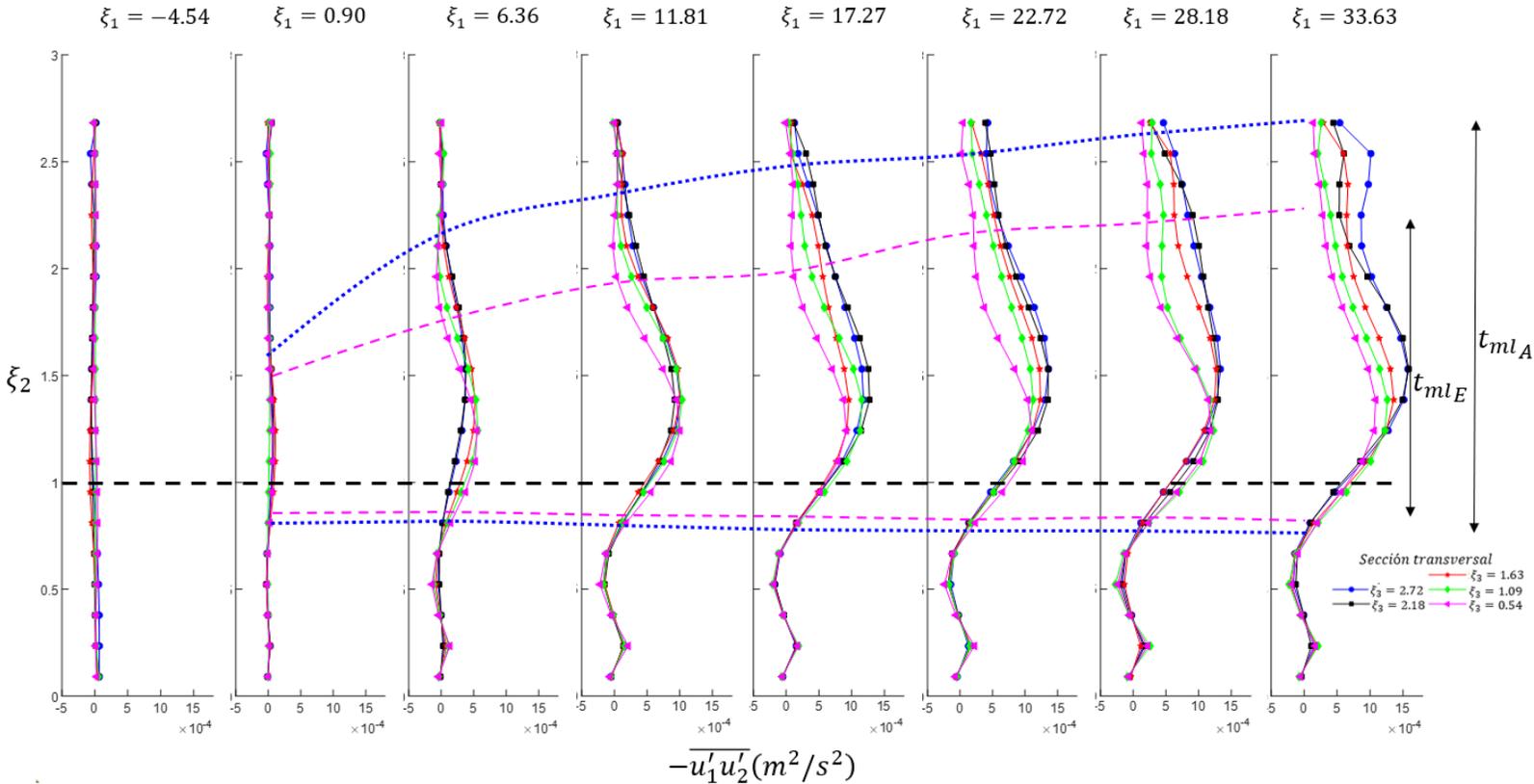


Figura 12. Perfiles de esfuerzos de Reynolds $-\overline{u_1' u_2'}$, donde las líneas discontinuas color azul y magenta representan la variación espacial en sentido longitudinal del espesor de la capa de mezcla en la sección central $\xi_3 = 2.72$ y pegada a la pared $\xi_3 = 0.54$, respectivamente, y la línea discontinua color negro representa la copa de la vegetación $\xi_2 = 1$.

Capa de mezcla

Según Raupach, *et al.* (1996), y Ghisalberti & Nepf (2002), el perfil de velocidad de una capa de mezcla se puede analizar con la siguiente expresión:

$$\frac{U_1 - U_m}{\Delta U_1} = \frac{1}{2} \tanh\left(\frac{x_2 - \bar{y}}{2\theta}\right) \quad (5)$$

Para una mejor comprensión en la Figura 1 se muestran las variables de la capa de mezcla. Donde $U_m = U_1(y_r) + U_1(y_u)/2$; ΔU_1 es la diferencia de velocidad para cada sección transversal: $\Delta U_1 = U_1(y_r) - U_1(y_u)$; $U_1(y_r)$ y $U_1(y_u)$ indican la velocidad promediada en el límite superior e inferior de la capa de mezcla, respectivamente; y_u y y_r es la distancia del fondo del canal al valor del esfuerzo de Reynolds con valor cero por debajo y encima del valor máximo de esfuerzo de Reynolds, respectivamente, $\bar{y} = (y_r + y_u)/2$. Este análisis se desarrolla para cada perfil de velocidad en las secciones longitudinales y transversales. El espesor de *momentum* θ se define con la siguiente expresión:

$$\theta = \int_0^\infty \left[\frac{1}{4} - \left(\frac{U_1 - U_m}{\Delta U_1} \right)^2 \right] dx_2 \quad (6)$$

En la Figura 13 se hace una comparación entre el modelo teórico para evaluar los perfiles de velocidad de tangente hiperbólica de una capa de mezcla pura y los datos experimentales.

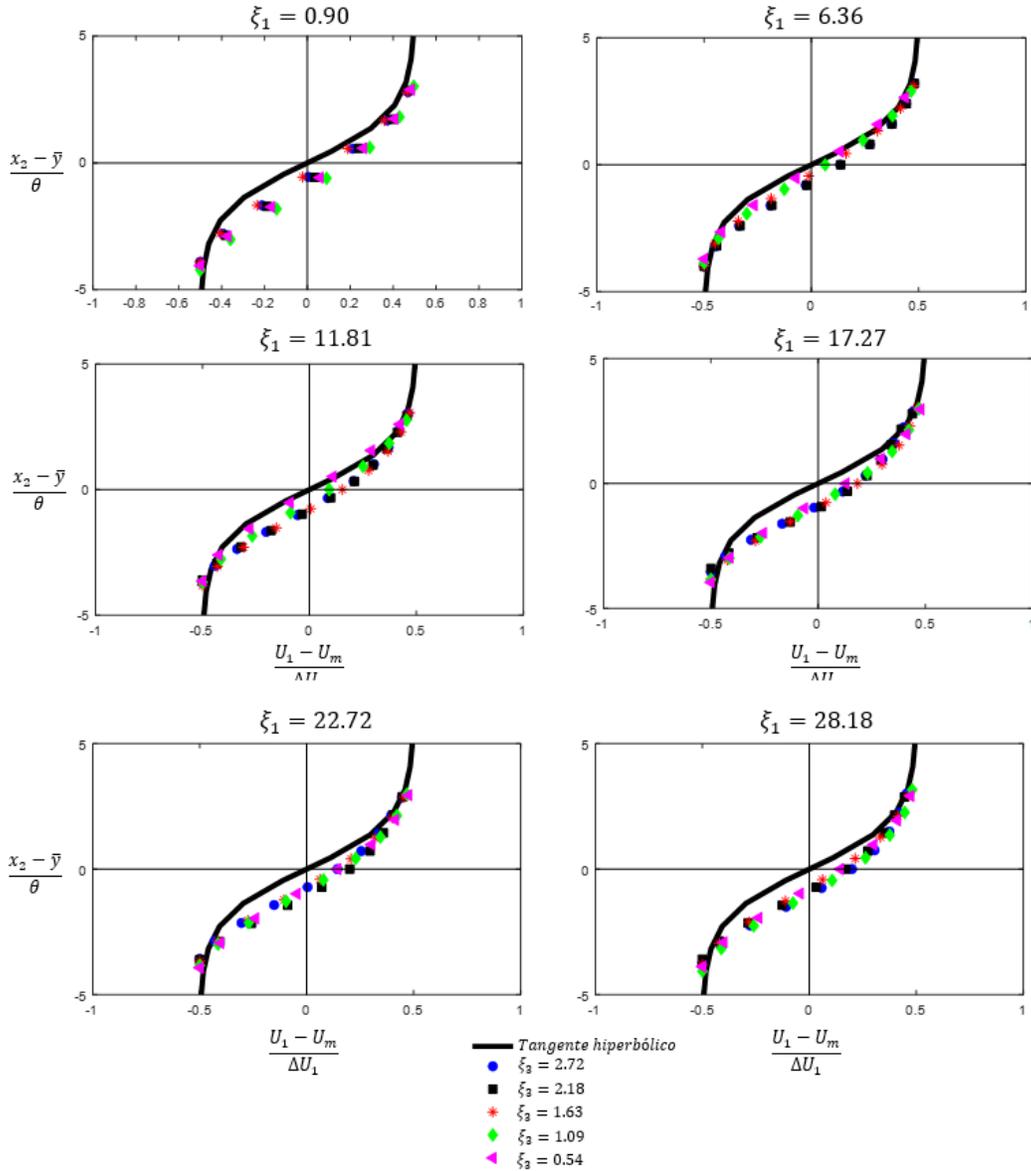


Figura 13. Comparación de los perfiles de velocidad media con el perfil de tangente hiperbólica de una capa de mezcla para cada sección transversal para diferentes posiciones en sentido longitudinal.

De acuerdo con los resultados, se observa que los perfiles de velocidad obtenidos en la experimentación se asemejan a un perfil de capa de mezcla, por lo tanto se concluye que se forma una capa de mezcla en un flujo intermedio.

Modelo fenomenológico

Para evaluar la evolución de la capa de mezcla en sentido longitudinal para cada sección de análisis se propone aplicar una división del campo de flujo en cuatro zonas, como se describe en la Tabla 3 y se muestra en la Figura 14.

Tabla 3. División de las zonas de modelo fenomenológico, donde X_i es el inicio de análisis (zona aguas arriba de la vegetación); X_{FL} , el inicio de la zona divergente; X_{FD} , el inicio de la zona de desarrollo; X_{ZD} , el inicio de la zona completamente desarrollada, y X_L es el fin del campo de análisis.

Zona	Condición de flujo	Espacio de análisis
I	Inicial	$[X_i, X_{FL}]$
II	Divergente	$[X_{FL}, X_{FD}]$
III	Desarrollo	$[X_{FD}, X_{ZD}]$
IV	Completamente desarrollado	$[X_{ZD}, X_L]$

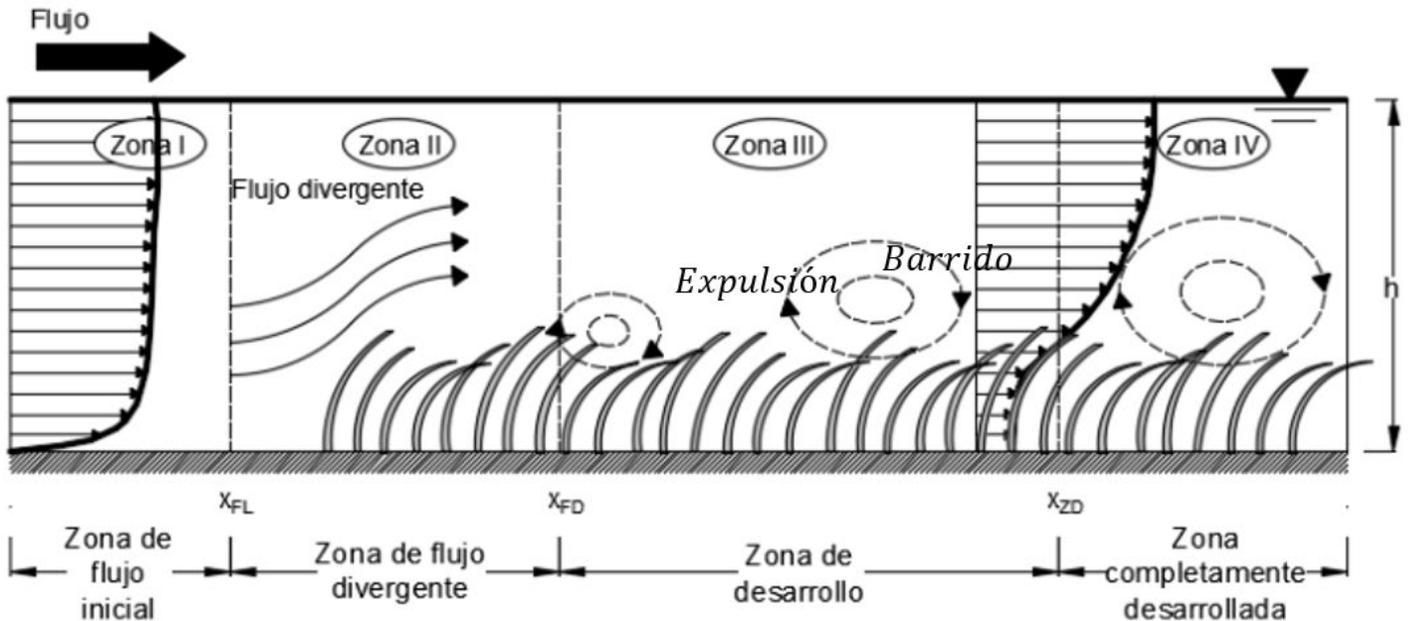


Figura 14. Modelo fenomenológico del desarrollo del flujo a través de una zona de vegetación sumergida (Okamoto & Nezu, 2013; Huai & Qian, 2015).

Aguas arriba de la zona de vegetación ($\xi_1 \leq X_{FL}$), los perfiles de velocidad se asemejan a un perfil encontrado en un flujo canal abierto, ya que la vegetación no afecta el flujo. En el inicio de la vegetación ($\xi_1 = 0$) existe una alta resistencia al flujo, e inicia un incremento de la velocidad por encima de la vegetación y una desaceleración dentro de ésta. Es decir, que parte del flujo se desvía al inicio de la zona de vegetación. Zong &

Nepf (2010) denominan este fenómeno como flujo divergente. El fin del flujo divergente es denotado como X_{FD} .

Aguas abajo de la zona de flujo divergente ($\xi_1 \geq X_{FD}$), los perfiles de velocidad tienen un alto gradiente de velocidad, como se muestra en la Figura 1. Este gradiente crea un punto de inflexión en $\xi_2 \approx 1$, induciendo una inestabilidad tipo Kelvin-Helmholtz, generando vórtices aguas abajo. El crecimiento de estos vórtices se observa en los perfiles de distribución de los esfuerzos de Reynolds. Esta zona se define como zona de desarrollo y el fin de la misma se define como X_{ZD} .

Aguas abajo de la zona de desarrollo ($\xi_1 \geq X_{ZD}$) el tamaño de los vórtices se mantiene constante y se denomina zona completamente desarrollada.

En la Figura 15 se muestra el efecto de la vegetación en la velocidad principal promediada en la vertical U_{1m} en la zona sin y con vegetación. Para determinar la velocidad promediada se utiliza la siguiente expresión:

$$U_{i_m} = \frac{1}{h} \int_0^{\zeta=h} U_i (\xi_1, \zeta, \xi_3 = cte) d\zeta \quad (7)$$

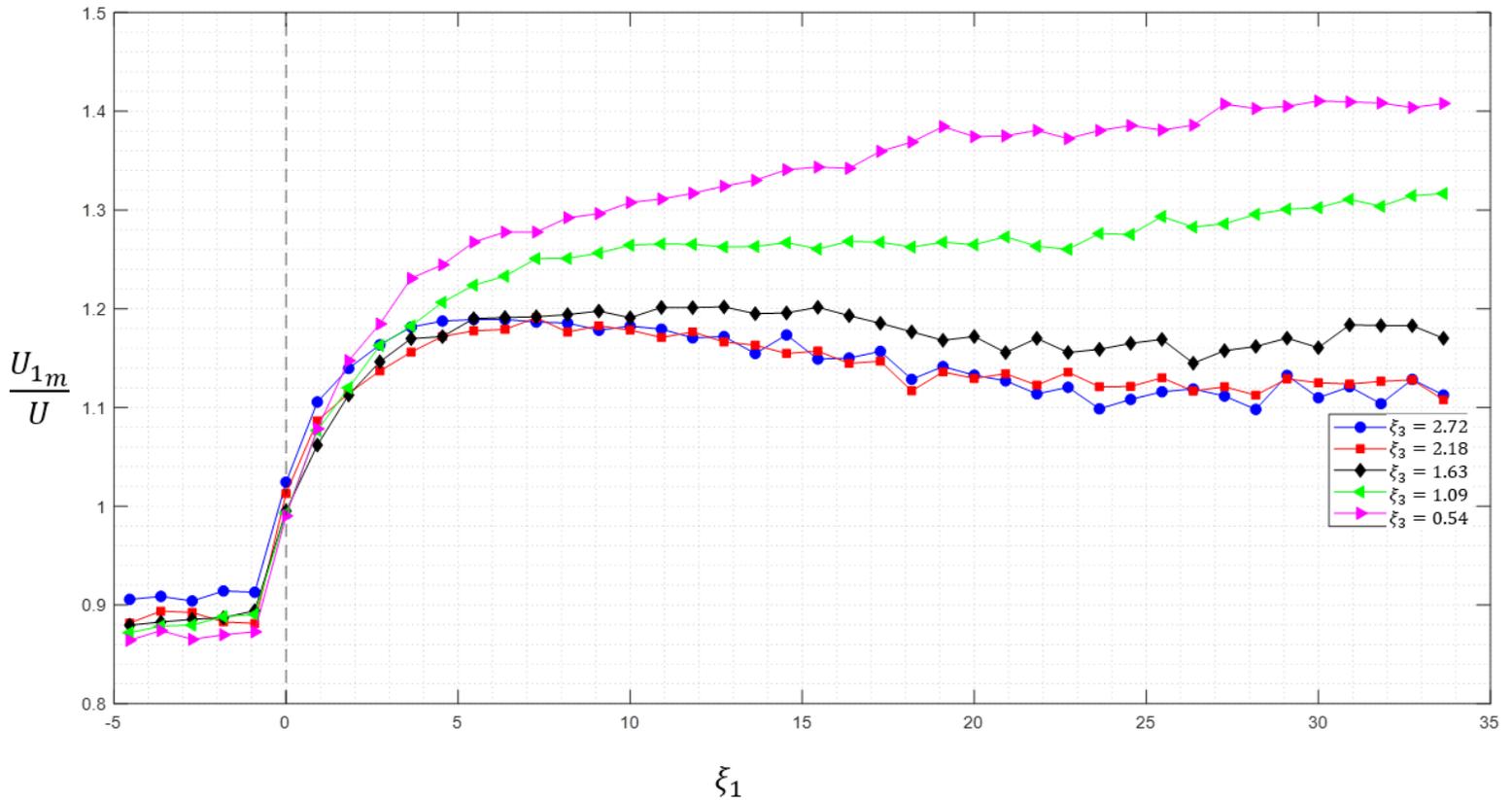


Figura 15. Variación de la velocidad media en sentido principal, aguas arriba y sobre la vegetación.

Observando en la zona aguas arriba de la vegetación, $-5 \leq \xi_1 \leq 0$, se tiene una velocidad con poca variabilidad, $\partial U_{1m}/\partial x \approx 0$. Para la zona central del canal $\xi_3 = 1.63, 2.18, 2.72$, la velocidad del flujo incrementa hasta un valor máximo en un rango $0 \leq \xi_1 \leq 5$, aguas debajo de este valor máximo la velocidad disminuye debido a que la capa de mezcla alcanza

la superficie libre, como se muestra en la Figura 11, siendo una zona de alta turbulencia. Sin embargo, para la zona pegada a la pared $\xi_3 = 0.54, 1.09$, el incremento de la velocidad se mantiene constante, debido a que la capa de mezcla no alcanza la superficie libre, por lo tanto, la zona de turbulencia es menor y no se genera la desaceleración del flujo (Figura 11).

El punto de inicio del flujo divergente, X_{FL} , y la longitud de la zona divergente (Zona II), $L_{FD} = X_{FD} - X_{FL}$, se determina a partir de la velocidad vertical promediada en la vertical, U_{2m} . Aplicando la Ecuación (7) se evalúa el flujo divergente, como se muestra en la Figura 16. Se observa un incremento rápido de la velocidad vertical en $-2.73 \leq \xi_1 \leq 0$, donde el máximo valor se encuentra al inicio de la zona de vegetación ($\xi_1 = 0$) para cada sección. El inicio del flujo divergente, X_{FL} , se determina cuando la velocidad vertical incrementa, es decir, cuando $dU_{2m}/dx_1 > 0$, por lo tanto, para las cinco secciones $X_{FL} = -2.73$. Sin embargo, el inicio de la zona de desarrollo, X_{FD} , para cada sección varía a medida que se acerca a la pared. X_{FD} se obtiene hasta el punto donde la velocidad vertical se aproxima a cero, $U_{2m} \approx 0$, como se muestra en la Figura 16. En la Tabla 4 se muestra la longitud de la Zona II, L_{FD} .

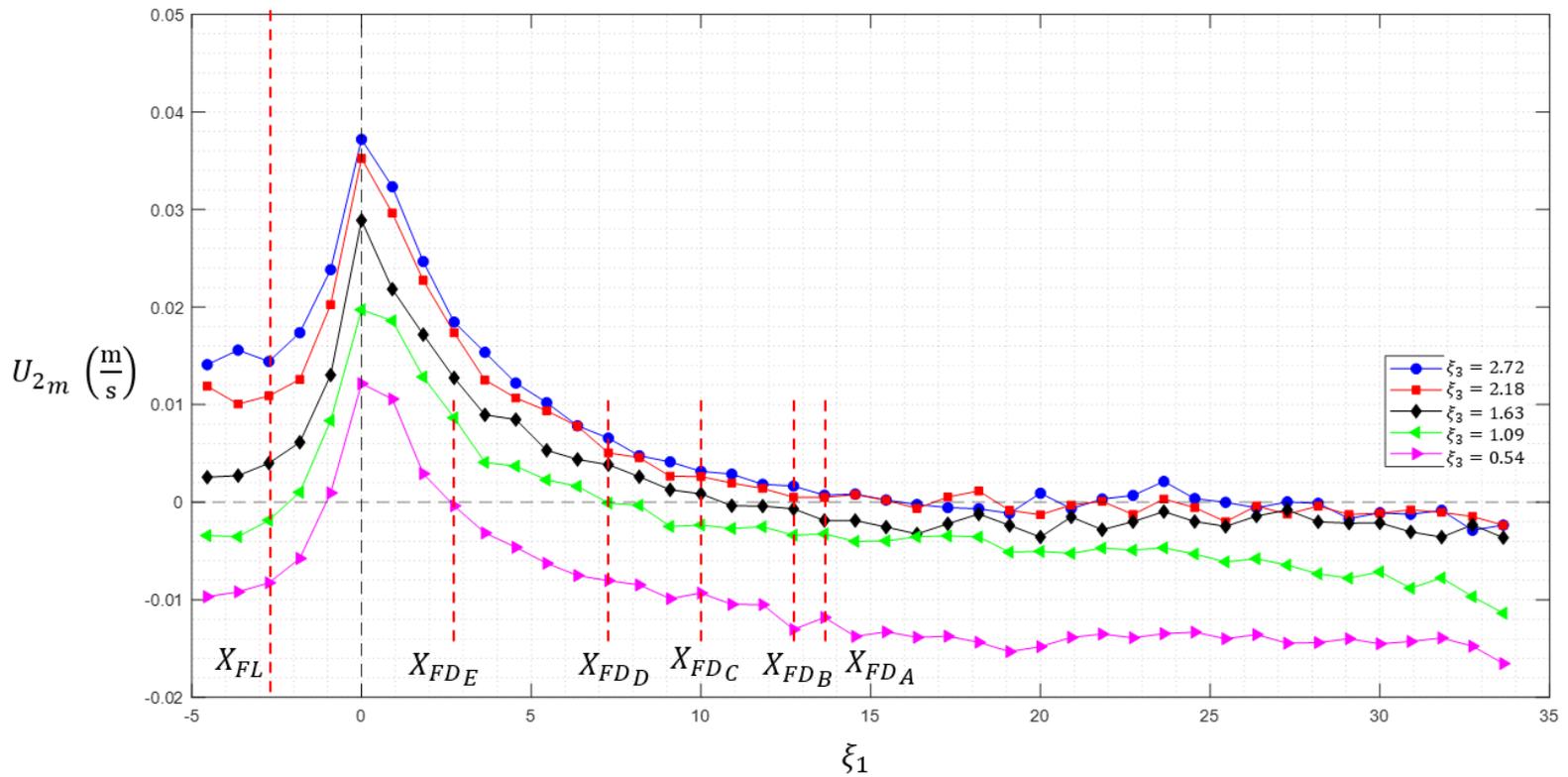


Figura 16. Variación de la velocidad media en sentido vertical para cada sección.

Tabla 4. Longitud de flujo divergente, L_{FD} .

Zona \ ξ_3	2.72	2.18	1.63	1.09	0.54
X_{FL}	-2.73	-2.73	-2.73	-2.73	-2.73
X_{FD}	13.63	12.72	10	7.27	2.72
L_{FD}	16.36	15.45	12.73	10	5.45

Para visualizar de mejor manera la zona de flujo divergente, en la Figura 17 se muestra la zona de mayor velocidad vertical U_2 .

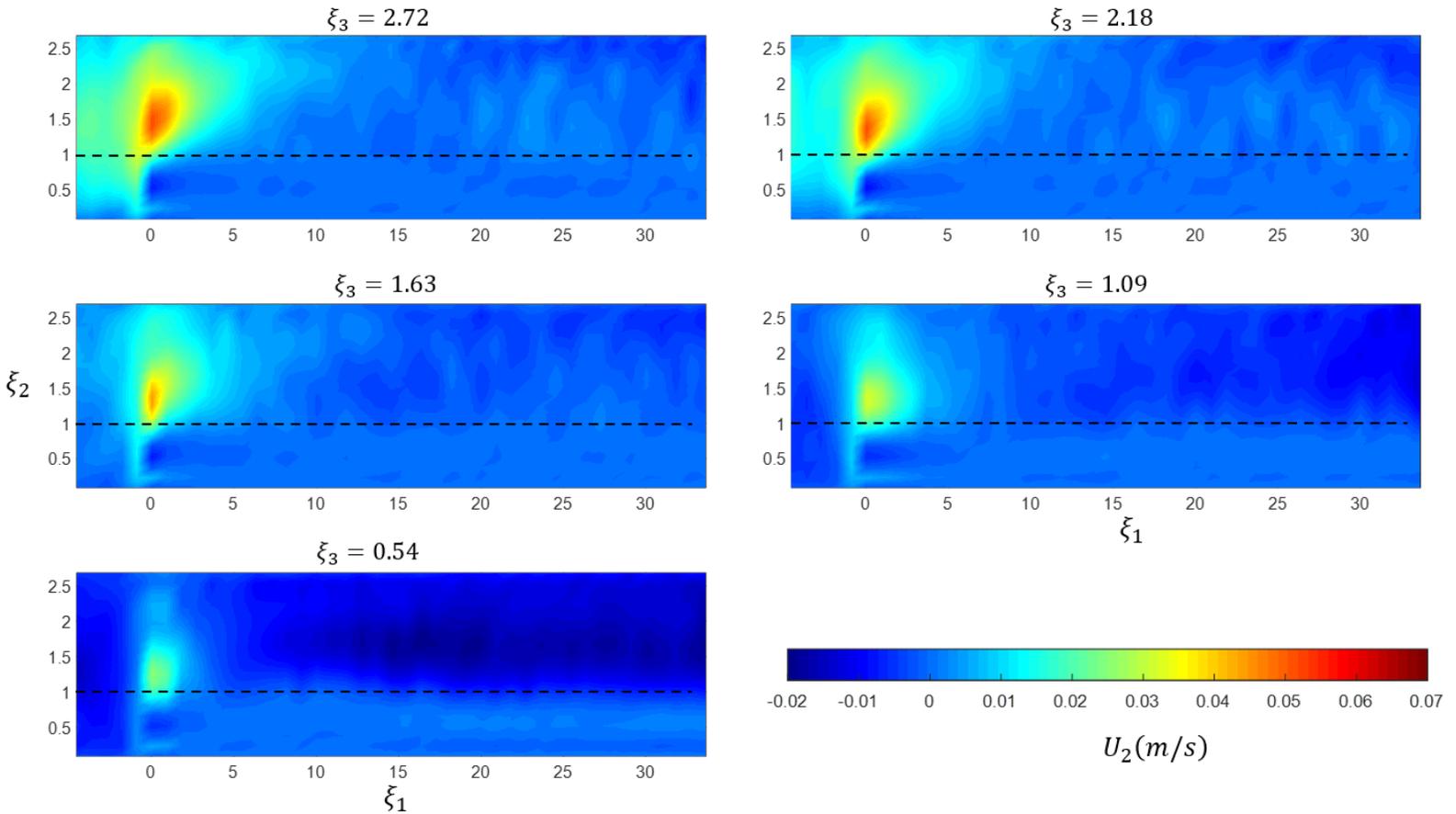


Figura 17. Contornos de velocidad media en sentido vertical U_2 , donde la línea discontinua representa la copa de la vegetación $\xi_2 = 1$.

Aguas abajo de la zona de flujo divergente, las velocidades en sentido vertical se vuelven pequeñas, observando valores de velocidad negativos, $U_2 < 0$. Entonces, para $\xi_2 \geq X_{FD}$, la capa de mezcla crece de forma gradual hasta que el tamaño de la capa de mezcla, t_{ml} , se mantiene constante, es decir, cuando $dt_{ml}/dx_1 \approx 0$, se ubica el inicio de la zona completamente desarrollada, X_{ZD} . En la Figura 12 se observa la variación espacial de la capa de mezcla. Entonces, para cada sección, X_{ZD} se obtiene con la variación espacial del tamaño de la capa de mezcla, como se muestra en la Figura 18.

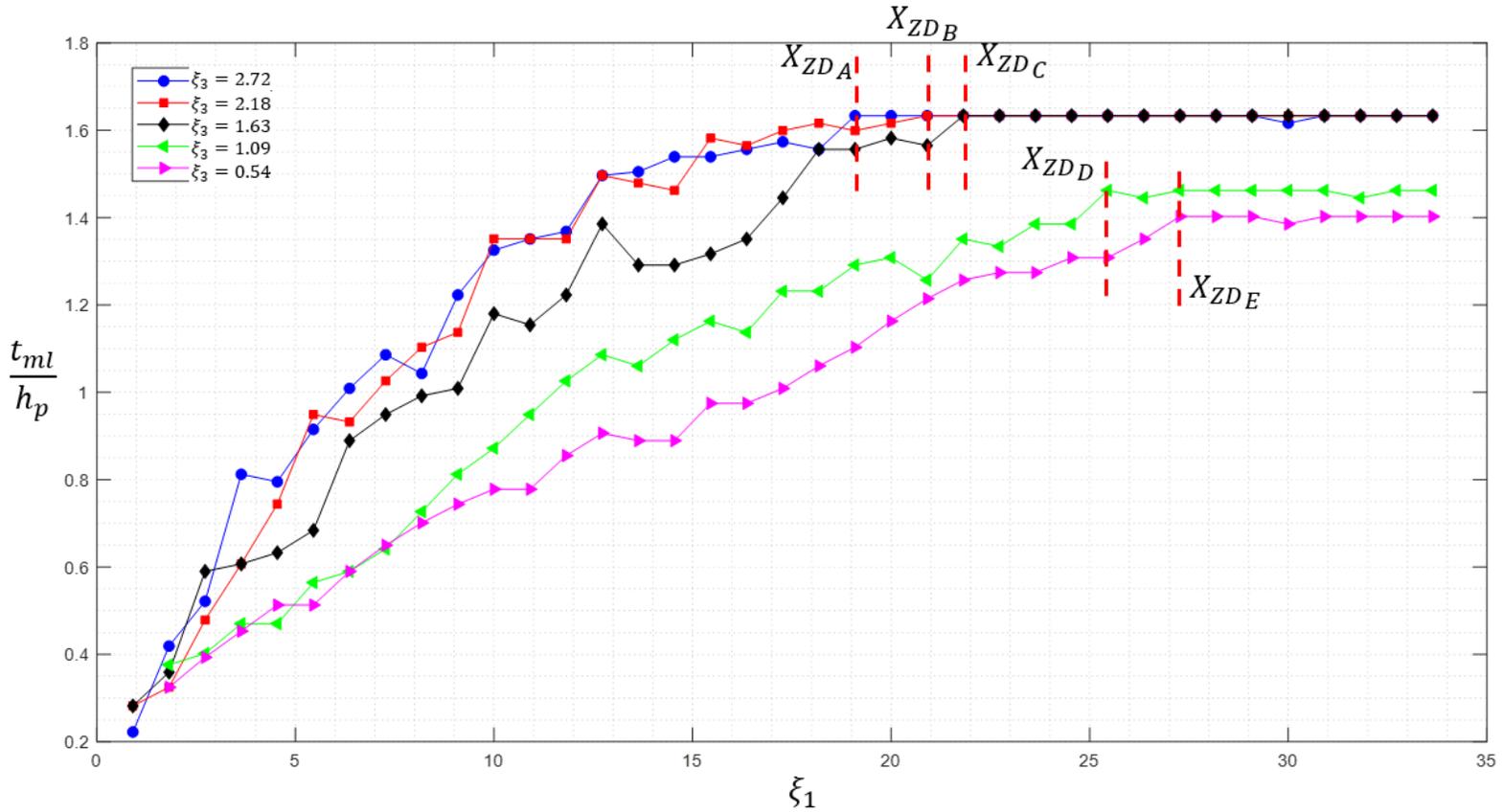


Figura 18. Variación espacial del tamaño de la capa de mezcla, t_{ml} , para cada sección.

Para comparación, en la Figura 19 se muestra la variación del espesor de *momentum*, θ , que es una medida de crecimiento de la capa de corte. Se observa que t_{ml} y θ crecen rápidamente aguas abajo del inicio de la zona de vegetación.

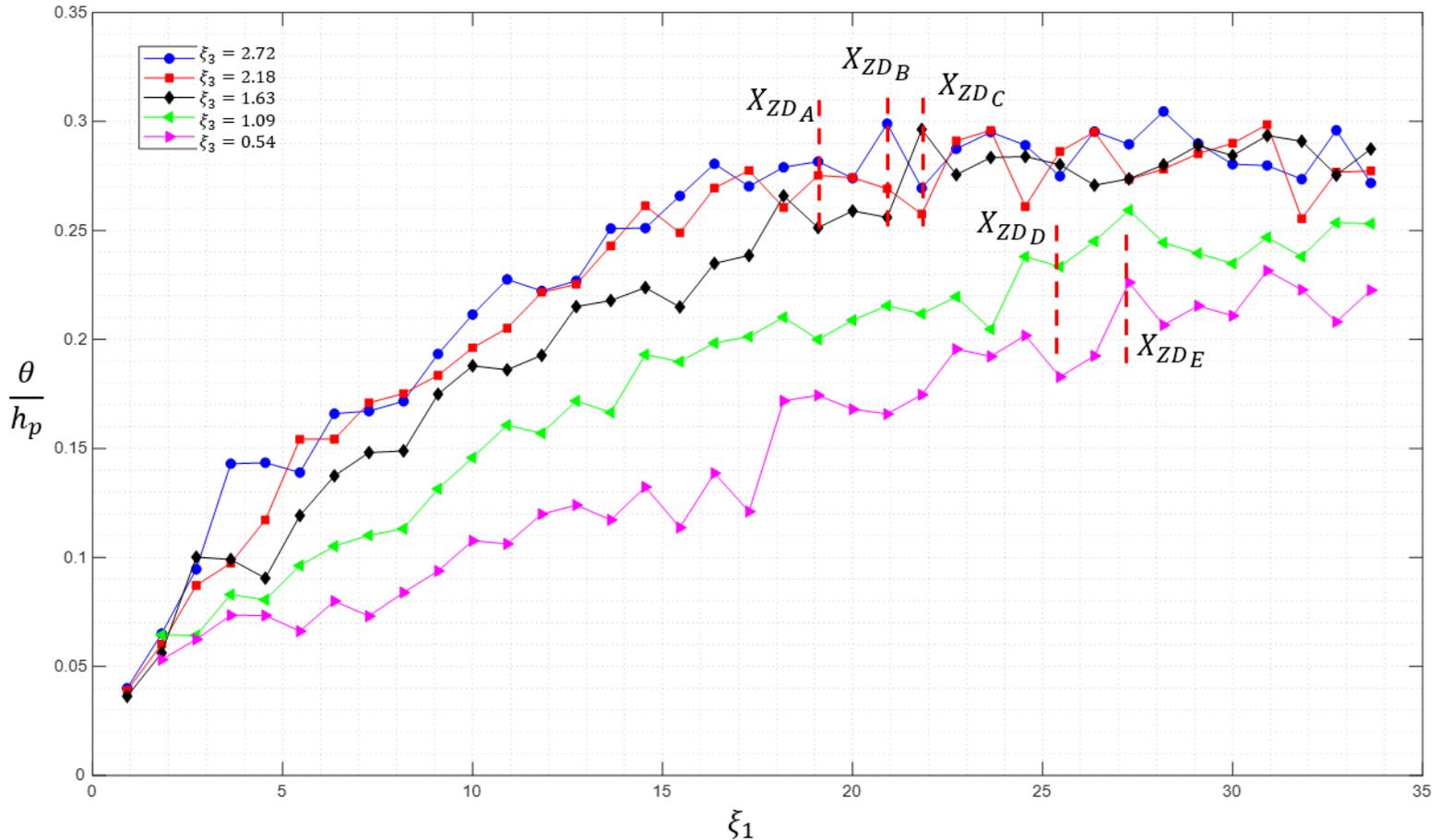


Figura 19. Variación espacial del espesor de *momentum*, θ , para cada sección.

Entonces la longitud de la zona de desarrollo se obtiene con $L_{ZD} = X_{ZD} - X_{FD}$. En la Tabla 5 se muestran las longitudes de la Zona III para cada sección.

Tabla 5. Longitud de zona de desarrollo, L_{ZD} .

Zona \ ξ_3	2.72	2.18	1.63	1.09	0.54
X_{FD}	13.63	12.72	10	7.27	2.72
X_{ZD}	19.09	20.91	21.82	25.45	27.27
L_{ZD}	5.45	8.19	11.82	18.18	24.55

Por último, aguas debajo de la Zona III, $\xi_1 \geq X_{ZD}$, se encuentra la zona completamente desarrollada (Zona IV), L_{CD} , hasta donde termina la zona de vegetación. En la Figura 20 se muestra el modelo fenomenológico del desarrollo del flujo para esta prueba, donde se observan las variaciones de las cuatro zonas en sentido transversal, x_3 .

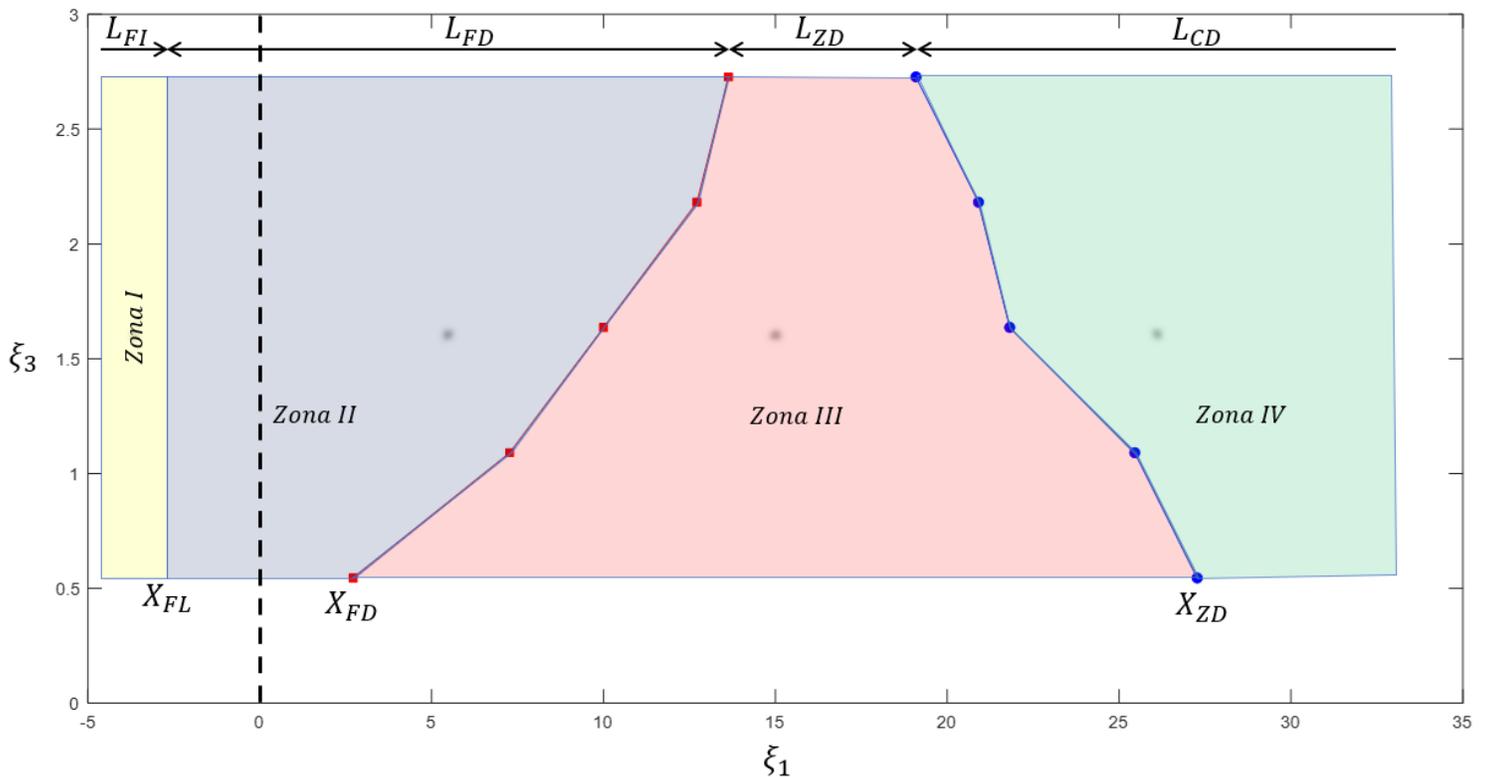


Figura 20. Modelo fenomenológico, donde la línea discontinua color negro indica el inicio de la zona de vegetación, $\xi_1 = 0$.

Se observa que la longitud de la Zona III, L_{ZD} , para el centro del canal, $\xi_3 = 2.72$, es menor con respecto a la zona pegada a la pared, $\xi_3 = 0.54$. Esto indica que en el centro del canal existe mayor resistencia, ya que en el centro se tiene una desaceleración del flujo alta en comparación con la zona pegada a la pared (ver Figura 15).

Análisis de cuadrantes

Se realizó un análisis de cuadrantes para los esfuerzos de Reynolds instantáneos $-u'_1(t)u'_2(t)$ para el análisis de las estructuras turbulentas que contribuyen en el transporte de *momentum*. El principio básico del análisis de cuadrantes es descomponer los esfuerzos de Reynolds en cuatro tipos de flujos, denominados Q_1 , Q_2 , Q_3 y Q_4 , en el plano $u'_1 - u'_2$, en función de los signos de la fluctuación de la velocidad principal u'_1 y vertical u'_2 , como se muestra en la Figura 21.

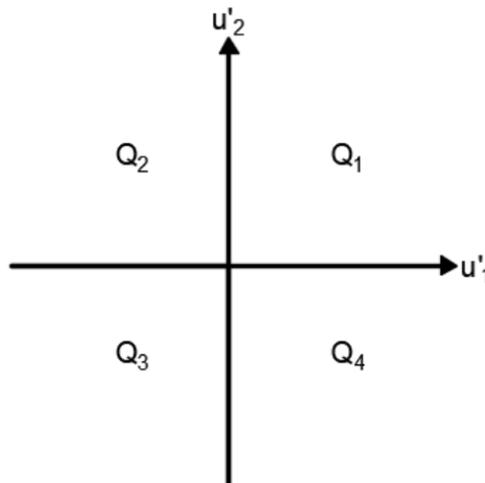


Figura 21. Diagrama de cuadrantes $u'_1 - u'_2$.

El cuadrante de esfuerzos de Reynolds RS_i se define de la siguiente manera (Okamoto *et al.*, 2012; Okamoto & Nezu, 2013):

$$RS_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (u'_1 u'_2) I_i dt \quad (8)$$

Donde T es la duración de la medición. Si (u'_1, u'_2) existen en cuadrante Q_i , entonces $I_i = 1$; en caso contrario, $I_i = 0$.

Cada cuadrante de (u'_1, u'_2) corresponde a los eventos coherentes siguientes:

$Q_1 (u'_1 > 0, u'_2 > 0)$: interacción externa, que es el movimiento ascendente del flujo de alta velocidad.

$Q_2 (u'_1 < 0, u'_2 > 0)$: expulsión, que es el movimiento ascendente del flujo de baja velocidad.

$Q_3 (u'_1 > 0, u'_2 < 0)$: interacción interna, que es el movimiento descendente del flujo de baja velocidad.

$Q_4 (u'_1 < 0, u'_2 < 0)$: barrido, que es el movimiento descendente del flujo de alta velocidad.

En la Figura 22 se muestra la distribución vertical de los cuadrantes de esfuerzos de Reynolds, RS_i , para las cuatro zonas del modelo fenomenológico en $\xi_3 = 2.72$. Además, se presenta el plano de las

velocidades fluctuantes ($u'_1 - u'_2$) para $\xi_2 = 1.2$, donde se indica el porcentaje de contribución de cada cuadrante. En la zona de flujo inicial, $\xi_1 = -2.72$, se observa que los valores son pequeños y el porcentaje de aportación de las estructuras turbulentas al transporte de *momentum* es similar, es decir, no se observan estructuras organizadas.

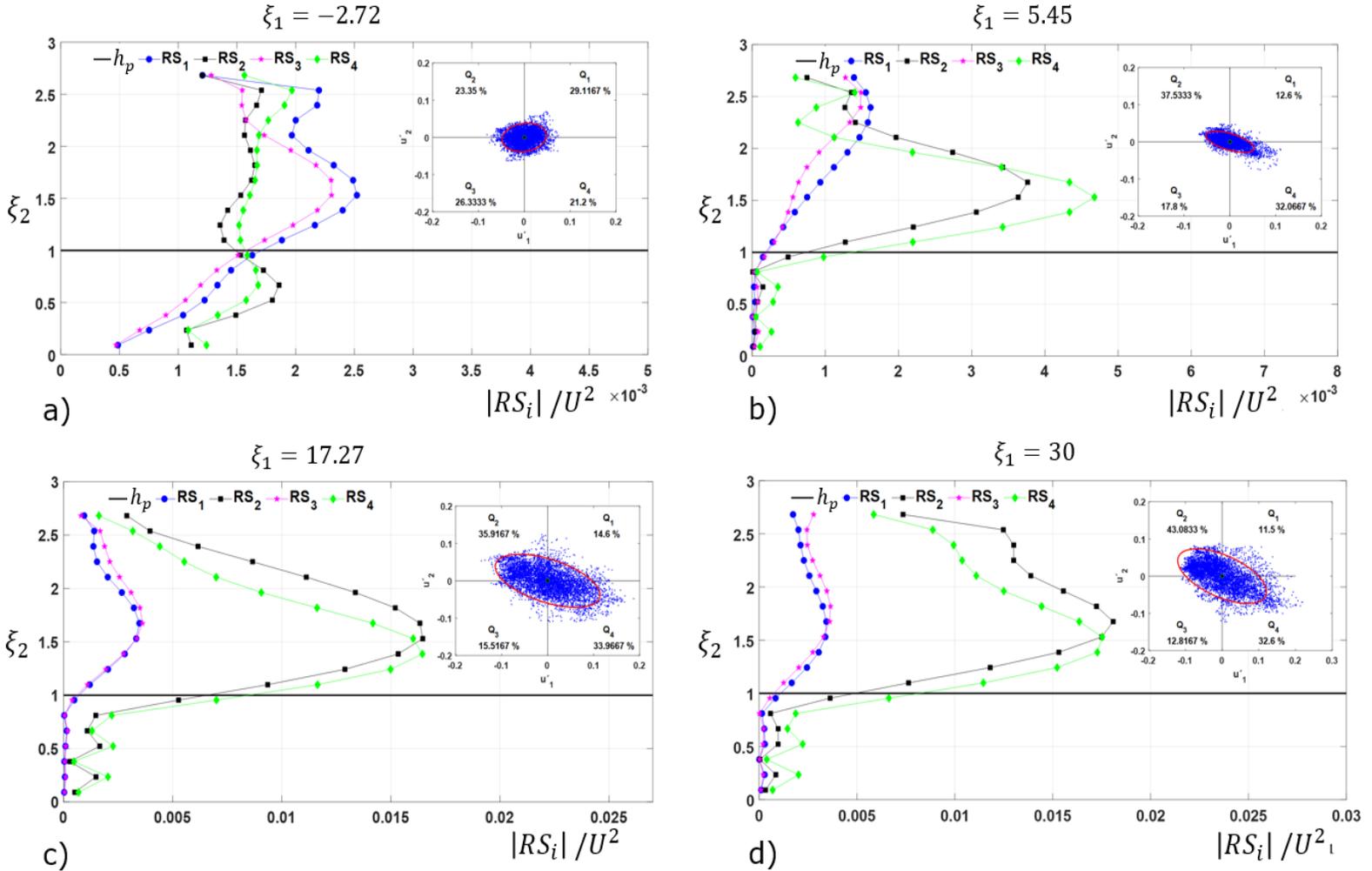


Figura 22. Cuadrantes de esfuerzos de Reynolds para la sección central del canal $\xi_3 = 2.72$: a) zona inicial ($\xi_1 = -2.72$); b) zona divergente ($\xi_1 = 5.45$); c) zona desarrollada ($\xi_1 = 17.27$); d) zona completamente desarrollada ($\xi_1 = 30$).

En la zona de flujo divergente, $\xi_1 = 5.45$, sobre la zona de vegetación ($\xi_2 \geq 1$) se observa que la estructura dominante es el barrido, RS_4 (Figura 22b).

En la zona de desarrollo, $\xi_1 = 17.27$, las estructuras dominantes son la expulsión y el barrido por efecto de los vórtices en la capa de mezcla, que son los movimientos ascendentes de baja velocidad y descendente de alta velocidad, respectivamente Huai *et al.* (2019). Esto se observa en $\xi_2 \approx 1.5$, donde se encuentra el valor máximo de esfuerzos de Reynolds (Figura 22c).

En la zona de flujo completamente desarrollada $\xi_1 = 30$, la estructura de expulsión y barrido aumentan un 11 % con respecto a la zona de desarrollo. Estos resultados indican que la contribución del transporte de *momentum* entre la zona de vegetación y la zona sobre ésta es principalmente por las condiciones de expulsión y barrido.

Para visualizar las estructuras turbulentas en toda la región de flujo, en la Figura 23 se muestran los contornos de los cuadrantes de esfuerzos de Reynolds para todas las secciones. Se observa que para todas las secciones, las estructuras que mayor contribuyen al transporte de *momentum* son la de estructura de expulsión y barrido. Además, se observa que los valores máximos están en la zona de capa de mezcla.

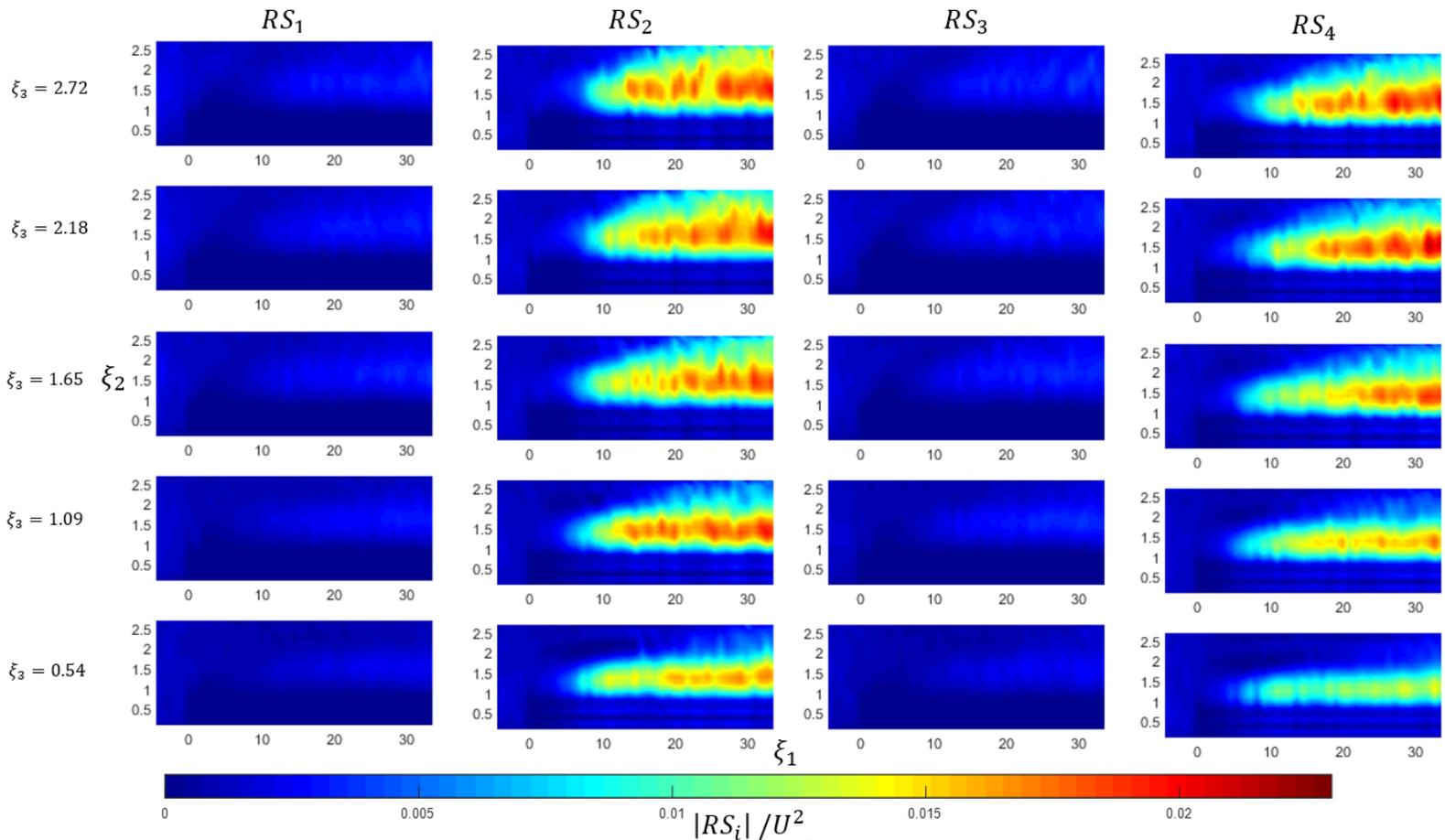


Figura 23. Contornos de los cuadrantes de esfuerzos de Reynolds, RS_i , para cada sección transversal ξ_3 , evaluado sobre el espacio $x_1 - x_2$.

Una vez encontradas las estructuras turbulentas con mayor contribución, en la Figura 24 se comparan las contribuciones del movimiento de barrido y expulsión utilizando la Ecuación (9):

$$R_{S/E} = \frac{1}{h} \int_0^{\zeta=h} \frac{RS_A}{RS_2} d\zeta \quad (9)$$

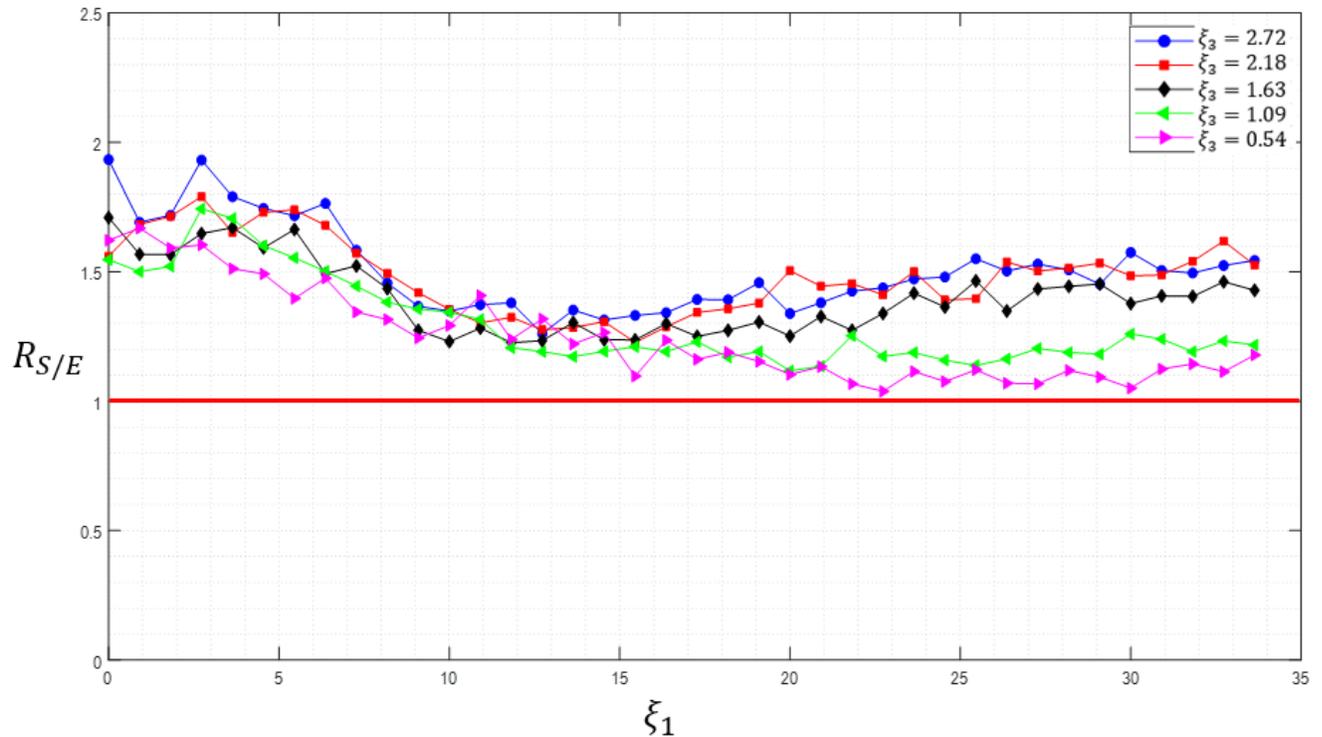


Figura 24. Relación entre las estructuras de barrido y expulsión.

Aplicando la Ecuación (9) para cada sección se obtienen las relaciones entre barrido y expulsión $R_{S/E}$, observando una relación $R_{S/E} > 1$ para todas las secciones transversales, por lo tanto, la estructura con mayor contribución al transporte de momento vertical se debe al movimiento de barrido.

Conclusiones

En este estudio, las mediciones de turbulencia se realizaron en un canal con un parche de vegetación de longitud finita para examinar la creación y evolución aguas abajo de las estructuras turbulentas en la capa de mezcla sobre la vegetación.

En los perfiles de velocidad media se confirma la presencia de un punto de inflexión ocasionado por la inestabilidad de tipo Kelvin-Helmholtz similar al análisis teórico cuando se presentan dos flujos potenciales de diferente velocidad. Mediante la distribución vertical de los esfuerzos de Reynolds se identificó la capa de mezcla, así como la variación del tamaño a lo largo del parche de vegetación y en sentido transversal. Se observa que el tamaño de la capa de mezcla deja de crecer en la zona completamente desarrollada ($x_1 \geq X_{ZD}$) debido a que la capa de mezcla se extiende a la superficie libre. Además, el tamaño de la capa de mezcla para $\xi_3 = 2.72$ (sección *A*) es de un 2 % más grande en comparación con $\xi_3 = 0.54$ (sección *E*); esto se observa claramente en los contornos de esfuerzos de Reynolds (Figura 11) debido a que el campo de flujo de alta

velocidad es más grande al de baja velocidad, como se muestra en la Figura 9.

Con el modelo fenomenológico del flujo se identificaron las cuatro zonas del flujo para las cinco secciones de análisis; se obtuvieron las longitudes de estas zonas para las secciones, como se muestra en la Figura 20. Se observa que para $\xi_3 = 0.54$ (sección *E*) requiere mayor distancia, para que la capa de mezcla se desarrolle completamente, en comparación con $\xi_3 = 2.72$ (sección *A*). Esto se visualiza en la magnitud de los esfuerzos de Reynolds.

Se aplicó un análisis de cuadrantes para identificar las estructuras turbulentas que contribuyen al transporte de *momentum*; para la zona de flujo inicial no se observa una estructura organizada; en las zonas de desarrollo y completamente desarrollada aparecen estructuras de expulsión y barrido cerca de la copa de la vegetación; tales resultados indican que la contribución del transporte de *momentum* entre la zona de vegetación y la zona sobre ésta es principalmente por las estructuras de expulsión y barrido.

Con la metodología empleada en este artículo es posible identificar la presencia de una capa de mezcla y las características de las estructuras turbulentas presentes en ella. Además, con el uso de un modelo fenomenológico aplicado a varias secciones se generó un mapa que muestra la variación de las cuatro zonas a lo largo de un canal con vegetación, lo cual puede emplearse para canales con vegetación con características similares a las utilizadas en este experimento, tales como

la relación de sumergencia, rigidez a la flexión, densidad adimensional y velocidad media principal.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Dr. Jorge Armando Laurel Castillo por realizar una revisión previa de este trabajo. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

Referencias

- Carollo, F. G., Ferro, V., & Termini, D. (2005). Flow resistance law in channels with flexible submerged vegetation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 554-564.
- Finnigan, J. (2000). Turbulence in plant canopies. *Annual Reviews Fluid Mechanics*, 519-571.
- Ghani, U., Ali, S., & Latif, A. (October, 2013). Impact of vegetation density on flow characteristics in a straight compound channel. *Journal of Engineering & Technology*, 32(4), 631-638.
- Ghisalberti, M., & Nepf, H. M. (2002). Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows. *Journal of Geophysical Research*, 107(C2), 1-11. DOI: 10.1029/2001JC000871
- Ho, C.-M., & Huerre, P. (1984). Perturbed free shear layers. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 16, 365-424.

- Huai, W.-X., & Qian, Z.-D. (2015). Large-eddy simulation of turbulent rectangular open-channel flow with an emergent rigid vegetation patch. *Advances in Water Resources*, 80, 30-42. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.03.006>
- Huai, W.-X., Zhang, J., Wang, W.-J., Katul, G. G., Tang, X., & Cheng, Y.-G. (2019). The structure of turbulent flow through submerged flexible vegetation. *Journal of Hydrodynamics*, 31, 274-292.
- Järvelä, J. (2004). Determination of flow resistance caused by non-submerged woody vegetation. *International Journal of River Basin Management*, 2(1), 61-70. DOI: 10.1080/15715124.2004.9635222
- Jeon, H.-S. (2015). *Flow and sediment-POM transport in stream with vegetation*. Nagoya, Japan: Nagoya University.
- Kouwen, N., & Li, R.-M. (1980). Biomechanics of vegetative channel linings. *Journal of the Hydraulics Division*, 106, 1085-1103.
- Maltese, A., Cox, E., Folkard, A. M., Ciruolo, G., Loggia, G., & Lambardo, G. (2007). Laboratory measurements of flow and turbulence in discontinuous distributions of ligulate seagrass. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(7), 750-760.
- Nepf, H., & Vivoni, E. (2000). Flow structure in depth-limited, vegetated flow. *Journal of Geophysical Research*, 105(28), 28.547-28.557. Recuperado de <https://doi.org/10.1029/2000JC900145>
- Nezu, I., & Sanjou, M. (2008). Turbulence structure and coherent motion in vegetated canopy open-channel flows. *Journal of Hydro-*

Environment Research, 2(2), 62-90. DOI:
10.1016/j.jher.2008.05.003

Nikora, V., Larned, S., Nikora, N., Debnath, K., Cooper, G., & Reid, M. (2008). Hydraulic resistance due to aquatic vegetation in small streams: Field study. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(9), 1326-1332.

Okamoto, T. A., & Nezu, I. (2009). Turbulence structure and "Monami" phenomena in flexible vegetated open-channel flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 47(6), 798-810. Recuperado de <https://doi.org/10.3826/jhr.2009.3536>

Okamoto, T. A., & Nezu, I. (2010). Flow resistance law in open-channel flows with rigid and flexible vegetation. *River Flow*, 261-268. Recuperado de https://izw.baw.de/e-medien/river-flow-2010/PDF/A2/A2_03.pdf

Okamoto, T.-A., & Nezu, I. (2013). Spatial evolution of coherent motions in finite-length vegetation patch flow. *Environmental Fluid Mechanics*, 13(5), 417-434. DOI: 10.1007/s10652-013-9275-6.

Okamoto, T.-A., Nezu, I., & Ikeda, H. (2012). Vertical mass and momentum transport in open-channel flows with submerged vegetations. *Journal of Hydro-Environment Research*, 6(4), 287-297. DOI: 10.1016/j.jher.2012.03.002

Palmer, V. (1945). A method for designing vegetated waterways. *Agricultural Engineering*, 26(12), 516-520.

- Poggi, D., Porporato, A., & Ridolfi, L. (2004). The effect of vegetation density on canopy sub-layer turbulence. *Boundary-Layer Meteorology*, 111, 565-587.
- Raupach, M. R., Finnigan, J. J., & Brunet, Y. (1996). Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: The mixing-layer analogy. *Boundary-Layer Meteorology*, 78, 351-382.
- Sukhodolov, A., & Sukhodolova, T. (2006). Evolution of mixing layers in turbulent flow over submerged vegetation: Field experiments and measurement study. *Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics River Flow 2006* September 6–8, 2006 Lisbon, Portugal, Taylor and Francis, London, v. 1: 525–534.
- Vargas-Luna, A., Crosato, A., & Uijttewaal, W. S. (2015). Effects of vegetation on flow and sediment transport: Comparative analyses and validation of predicting models. *Earth Surface Processes and Landforms*, 157-176. Recuperado de <https://doi.org/10.1002/esp.3633>
- Wilson, C. (2007). Flow resistance models for flexible submerged vegetation. *Journal of Hydrology*, 342(3-4), 213-222.
- Wilson, C. A., Stoesser, T., Bates, P. D., & Btemann-Pinzen, A. (2003). Open channel flow through different forms of submerged flexible vegetation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(11), 847-853.
- Zong, L., & Nepf, H. (2010). Flow and deposition in and around a finite patch of vegetation. *Geomorphology*, 116(3-4), 363-372. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.11.020>