

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**



**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TRABAJO EXPERIMENTAL PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**TEMA:**

---

---

“MODELACIÓN NUMÉRICA PARA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE  
LOS SUMIDROS DE AGUAS LLUVIAS TIPO T45 MODIFICADO CON  
BARROTES CIRCULARES APLICANDO MECÁNICA DE FLUIDOS  
COMPUTACIONALES”

---

---

**AUTOR:** MOROCHO AVEMAÑAY BRAULIO DARÍO

**TUTOR:** ING. MG. GEOVANNY PAREDES

**AMBATO-ECUADOR**

**2019**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo experimental bajo el tema: “MODELACIÓN NUMÉRICA PARA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LOS SUMIDEROS DE AGUAS LLUVIAS TIPO T45 MODIFICADO CON BARROTOS CIRCULARES APLICANDO MECÁNICA DE FLÚIDOS COMPUTACIONALES”, realizado por el Sr. Braulio Darío Morocho Avemañay, egresado de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, se desarrolló bajo mi tutoría, el cual se ha concluido de manera satisfactoria.

Ambato, Agosto de 2019.



Ing. Mg. Geovanny Paredes

TUTOR DE TESIS

## AUTORÍA

El contenido del presente trabajo experimental bajo el tema: “MODELACIÓN NUMÉRICA PARA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LOS SUMIDEROS DE AGUAS LLUVIAS TIPO T45 MODIFICADO CON BARROTES CIRCULARES APLICANDO MECÁNICA DE FLUÍDOS COMPUTACIONALES”, son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, Agosto de 2019.



Egdo. Braulio Darío Morocho Avemañay

C.I. 060451157-6

## DERECHOS DE AUTOR

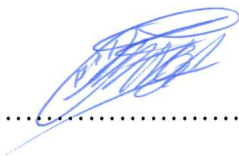
Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este trabajo experimental o parte de él un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi trabajo experimental, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de éste trabajo experimental, dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando ésta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor

Ambato, Agosto de 2019.

---

AUTOR



.....

Braulio Darío Morocho Avemañay

## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del tribunal examinador aprueban el Informe del trabajo experimental, bajo el tema: “MODELACIÓN NUMÉRICA PARA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LOS SUMIDEROS DE AGUAS LLUVIAS TIPO T45 MODIFICADO CON BARROTES CIRCULARES APLICANDO MECÁNICA DE FLUÍDOS COMPUTACIONALES”, de Braulio Darío Morocho Avemañay, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Ambato, Agosto de 2019.

Para constancia firman:



Ing. Mg. Fabián Morales



Ing. MEng. Lenin Maldonado

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Efraín y Simona que son los principales motores y motivación, razón por la cual he logrado culminar con esta etapa de mi vida, por creer en mí, brindarme su amor y comprensión en los momentos de fortaleza y debilidad.

A mis abuelitos, Pedro y María, por su aliento y cariño siempre.

A mis tíos, Mariano y Juliana, por estar conmigo en toda situación y ayudarme a cumplir mis objetivos.

A Sandrita, por brindarme su amistad, cariño y amor.

Braulio Darío Morocho A.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por permitirme culminar con esta etapa de mi vida, sé que sin su bendición no lo habría logrado.

A mis padres y familia por sus consejos, guiarme en el camino correcto y su apoyo incondicional en todo momento.

Al Ing. Lenin Maldonado por su guía en la realización de este trabajo experimental.

Y a todas esas amistades que me apoyaron, y que durarán para siempre, gracias.

Braulio Darío Morocho A.

## ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

<b>CAPÍTULO I</b> .....	1
<b>1.1 Antecedentes Investigativos</b> .....	1
<b>1.1.1 Antecedentes</b> .....	1
<b>1.1.2 Justificación</b> .....	5
<b>1.1.3 Fundamentación teórica</b> .....	7
<b>1.1.3.1 Análisis de la normativa para el diseño vial</b> .....	7
<b>1.1.3.2 Análisis hidrológico</b> .....	10
<b>1.1.3.3 Análisis hidráulico</b> .....	16
<b>1.1.3.4 Introducción a los Modelos Hidráulicos</b> .....	25
<b>1.1.4 Hipótesis</b> .....	28
<b>1.2 Objetivos</b> .....	29
<b>1.2.1 Objetivo General:</b> .....	29
<b>1.2.2 Objetivos Específicos:</b> .....	29
<b>CAPÍTULO II</b> .....	30
<b>2.1 Materiales</b> .....	30
<b>2.2 Métodos</b> .....	30
<b>2.2.1 Nivel o tipo de investigación</b> .....	30
<b>2.2.2 Población y muestra</b> .....	31
<b>2.2.3 Plan de recolección de información</b> .....	32
<b>2.2.4 Plan de procesamiento y análisis</b> .....	32
<b>CAPÍTULO III</b> .....	33
<b>3.1 Análisis y Discusión de resultados</b> .....	33
<b>3.1.1 Análisis</b> .....	33
<b>3.1.1.1 Representación gráfica de investigaciones</b> .....	33
<b>3.1.1.2 Descripción general del Modelo numérico</b> .....	36
<b>3.1.1.3 Calibración del modelo numérico</b> .....	41
<b>3.1.1.4 Curva de eficiencia del modelo numérico</b> .....	52
<b>3.1.1.5 Curvas caudal en vía vs. Caudal en sumidero</b> .....	63
<b>3.1.1.6 Ecuaciones de tendencia y eficiencia</b> .....	69
<b>3.2 Discusión de resultados</b> .....	74



<b>3.2 Verificación de hipótesis</b> .....	78
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	79
<b>4.1 Conclusiones</b> .....	79
<b>4.2 Recomendaciones</b> .....	80
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	81
<b>ANEXOS</b> .....	83

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Velocidades de diseño .....	7
<b>Tabla 2.</b> Radios de curvatura mínimos (m) .....	7
<b>Tabla 3.</b> Ancho de secciones transversales .....	8
<b>Tabla 4.</b> Porcentajes de pendiente transversal de vía.....	9
<b>Tabla 5.</b> Porcentajes de pendiente longitudinal.....	9
<b>Tabla 6.</b> Número de Froude.....	18
<b>Tabla 7.</b> Población .....	31
<b>Tabla 8.</b> Muestra .....	32
<b>Tabla 9.</b> Recolección de la información.....	32
<b>Tabla 10.</b> Caudales de ingreso para cada combinación de pendiente transversal y longitudinal.....	40
<b>Tabla 11.</b> Eficiencia de captación Modelo Físico T45, S1, pendiente transversal 2% y longitudinal 0.5% .....	42
<b>Tabla 12.</b> Eficiencia de captación Modelo T45 normal S1, pendiente transversal 2% y longitudinal 0.5% .....	42
<b>Tabla 13.</b> Eficiencia de captación Modelo T45 modificado con barrotes circulares S1, pendiente transversal 2% y longitudinal 0.5% .....	43
<b>Tabla 14.</b> Diferencia entre el Modelo Físico y Sumidero T45, con pendiente transversal de 2% y longitudinal de 0.5%, modelo S1 .....	44
<b>Tabla 15.</b> Diferencia entre el modelo Físico y sumidero T45 modificado con barrotes circulares, con pendiente transversal de 2% y longitudinal de 0.5%, modelo S1 .....	44
<b>Tabla 16.</b> Diferencia entre el sumidero T45 y T45 modificado con barrotes circulares, con pendiente transversal de 2% y longitudinal de 0.5%, modelo S1 .....	44
<b>Tabla 17.</b> Promedio de la diferencia de eficiencia, pendiente transversal 2% y longitudinal 0.5%, modelo S1 .....	45
<b>Tabla 18.</b> Promedio de la eficiencia de los diferentes modelos, pendiente transversal 2% y longitudinal 0.5%, modelo S1 .....	46
<b>Tabla 19.</b> Eficiencia de captación Modelo Físico T45, S1, pendiente transversal 2% y longitudinal 4%.....	47
<b>Tabla 20.</b> Eficiencia de captación Modelo T45 normal, S1, pendiente transversal 2% y longitudinal 4%.....	47
<b>Tabla 21.</b> Eficiencia de captación Modelo T45 modificado con barrotes circulares S1, pendiente transversal 2% y longitudinal 4% .....	47
<b>Tabla 22.</b> Diferencia entre el Modelo Físico y Sumidero T45, con pendiente transversal de 2% y longitudinal de 4%, modelo S1 .....	48
<b>Tabla 23.</b> Diferencia entre el modelo Físico y sumidero T45 modificado con barrotes circulares, con pendiente transversal de 2% y longitudinal de 4%, modelo S1 .....	49
<b>Tabla 24.</b> Diferencia entre el sumidero T45 y T45 modificado con barrotes circulares, con pendiente transversal de 2% y longitudinal de 4%, modelo S1 .....	49

<b>Tabla 25.</b> Promedio de la diferencia de eficiencia, pendiente transversal 2% y longitudinal 4%, modelo S1 .....	49
<b>Tabla 26.</b> Promedio de eficiencia de los diferentes modelos, pendiente transversal 2% y longitudinal 4%, modelo S1 .....	50
<b>Tabla 27.</b> Eficiencia de captación del sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S1, con pendiente transversal del 2% y con diferentes pendientes longitudinales (0.5%, 4%).....	52
<b>Tabla 28.</b> Eficiencia de captación del sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S1, con pendiente transversal del 4% y con diferentes pendientes longitudinales (0.5%, 4%).....	53
<b>Tabla 29.</b> Porcentaje promedio de la eficiencia del sumidero T45 modificado con barrotes circulares de los escenarios analizados, modelo S1 .....	54
<b>Tabla 30.</b> Eficiencia de captación del sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S2, con pendiente transversal del 2% y con diferentes pendientes longitudinales de (0.5%, 4%).....	55
<b>Tabla 31.</b> Eficiencia de captación del sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S2, con pendiente transversal del 4% y longitudinales de (0.5%, 4%) .....	56
<b>Tabla 32.</b> Promedio de eficiencia del sumidero T45 modificado con barrotes circulares de los escenarios analizados para el modelo S2 .....	57
<b>Tabla 33.</b> Eficiencia de captación sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S1 y S2, con pendiente transversal del 2% y longitudinal de 0.5% .....	58
<b>Tabla 34.</b> Eficiencia de captación sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S1 y S2, con pendiente transversal del 2% y longitudinal de 4% .....	59
<b>Tabla 35.</b> Eficiencia de captación sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S1 y S2, con pendiente transversal del 4% y longitudinal de 0.5% .....	60
<b>Tabla 36.</b> Eficiencia de captación sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S1 y S2, con pendiente transversal del 4% y longitudinal de 4% .....	61
<b>Tabla 37.</b> Promedio del porcentaje de incremento de eficiencia de captación, diferentes escenarios, entre los modelos S1 y S2 .....	62
<b>Tabla 38.</b> Caudal en vía vs caudal en sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S1, pendiente transversal de 2% y longitudinal (0.5%, 4%) .....	63
<b>Tabla 39.</b> Caudal en vía vs caudal en sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S1, pendiente transversal de 4% y longitudinal (0.5%, 4%) .....	64
<b>Tabla 40.</b> Promedio de caudal captado por el sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S1, para diferentes escenarios .....	65
<b>Tabla 41.</b> Caudal en vía vs caudal en sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S2, pendiente transversal de 2% y longitudinal (0.5%, 4%) .....	66
<b>Tabla 42.</b> Caudal en vía vs. caudal en sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S2, pendiente transversal de 4% y pendientes longitudinales de (0.5%, 4%) ....	67
<b>Tabla 43.</b> Promedio del caudal captado por el sumidero T45 modificado con barrotes circulares, diferentes escenarios, modelo S2.....	68

<b>Tabla 44.</b> Valores numéricos de los parámetros $\alpha$ y $\beta$ para el modelo S1, con sus respectivas pendientes analizadas .....	73
<b>Tabla 45.</b> Valores numéricos de los parámetros $\alpha$ y $\beta$ para el modelo S2, con sus respectivas pendientes analizadas .....	74
<b>Tabla 46.</b> Comparación del Incremento de eficiencia del modelo S1 y S2 .....	77
<b>Tabla 47.</b> Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 2% y longitudinal 0.5%, modelo S1 .....	83
<b>Tabla 48.</b> Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 2% y longitudinal 4%, modelo S1.....	84
<b>Tabla 49.</b> Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 4% y longitudinal 0.5%, modelo S1 .....	86
<b>Tabla 50.</b> Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 4% y longitudinal 4%, modelo S1.....	87
<b>Tabla 51.</b> Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 2% y longitudinal 0.5%, modelo S2.....	89
<b>Tabla 52.</b> Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 2% y longitudinal 4%, modelo S2.....	90
<b>Tabla 53.</b> Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 4% y longitudinal 0.5%, modelo S2.....	92
<b>Tabla 54.</b> Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 4% y longitudinal 4%, modelo S2.....	93

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Sección típica de una carretera que muestra la ubicación de instalación de algunos grupos.....	10
<b>Figura 2.</b> Curva de intensidad, duración y frecuencia. ....	16
<b>Figura 3.</b> Representación de las variables para la demostración de las ecuaciones de la conservación de la energía. ....	20
<b>Figura 4.</b> Vista de perfil longitudinal de un canal .....	22
<b>Figura 5.</b> Sección transversal de un canal .....	23
<b>Figura 6.</b> Vista en planta canal .....	23
<b>Figura 7.</b> Esquema de modelo hidráulico unidimensional 1D .....	26
<b>Figura 8.</b> Esquema de modelo hidráulico bidimensional 2D .....	27
<b>Figura 9.</b> Esquema de modelo hidráulico tridimensional 3D.....	27
<b>Figura 10.</b> Combinaciones de los sumideros T45 utilizados en el laboratorio: Modelos S1 (un solo sumidero) y S2 (dos en serie).....	33
<b>Figura 11.</b> Sumidero tipo T45 normal .....	34
<b>Figura 12.</b> Eficiencia de captación (E) vs. Caudal (Q), en el modelo S1, con bombeo del 2% (i=2) y diferentes valores de pendiente longitudinal (j=0,5, 4, 8, 12%). ....	34
<b>Figura 13.</b> Eficiencia de captación (E) vs. Caudal (Q), en el modelo S1, con bombeo del 4% (i=4) y diferentes valores de pendiente longitudinal (j=0,5, 4, 8, 12%). ....	35
<b>Figura 14.</b> Eficiencia de captación (E) vs. Caudal (Q), en el modelo S2, con bombeo del 2% (i=2) y diferentes valores de pendiente longitudinal (j = 0,5, 4, 8, 12%). ....	35
<b>Figura 15.</b> Eficiencia de captación (E) vs. Caudal (Q), en el modelo S2, con bombeo del 4% (i=4) y diferentes valores de pendiente longitudinal (j= 0,5, 4, 8, 12%). ....	36
<b>Figura 16.</b> Depósito ubicado al inicio de la vía.....	37
<b>Figura 17.</b> Media vía con diferentes pendientes tanto transversal como longitudinal....	37
<b>Figura 18.</b> Sumidero tipo T45 modificado con barrotes circulares .....	38
<b>Figura 19.</b> Modelo S1, media vía con todos sus componentes.....	38
<b>Figura 20.</b> Modelo S2, media vía con todos sus componentes.....	39
<b>Figura 21.</b> Estabilización del flujo de captación mediante la gráfica del Tiempo vs. Caudal captado. ....	41
<b>Figura 22.</b> Comparación de la eficiencia de captación del modelo S1, con pendiente transversal del 2% y longitudinal 0.5%, de las diferentes investigaciones realizadas....	43
<b>Figura 23.</b> Promedio de la diferencia de eficiencia de los modelos, pendiente transversal 2% y longitudinal 0.5% .....	45
<b>Figura 24.</b> Promedio de eficiencia de los modelos analizados, modelo S1, pendiente transversal 2% y longitudinal 0.5%. ....	46
<b>Figura 25.</b> Comparación de la eficiencia de captación del modelo S1, con pendiente transversal del 2% y longitudinal 4%, de las diferentes investigaciones realizadas. ....	48
<b>Figura 26.</b> Promedio de la diferencia de eficiencia, pendiente transversal 2% y longitudinal 4%, modelo S1. ....	50

<b>Figura 27.</b> Promedio de eficiencia de los diferentes modelos analizados, modelo S1, pendiente transversal 2% y longitudinal 4% .....	51
<b>Figura 28.</b> Eficiencia de captación del sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S1, con pendiente transversal del 2% y con diferentes pendientes longitudinales (0.5%, 4%).....	52
<b>Figura 29.</b> Eficiencia de captación del sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S1, con pendiente transversal del 4% y con diferentes pendientes longitudinales (0.5%, 4%).....	53
<b>Figura 30.</b> Porcentaje promedio de las eficiencias del sumidero T45 modificado con barrotes circulares de los escenarios analizados en el modelo S1.....	54
<b>Figura 31.</b> Eficiencia de captación del sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S2, con pendiente transversal del 2% y con diferentes pendientes longitudinales de (0.5%, 4%).....	55
<b>Figura 32.</b> Eficiencia de captación del sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S2, con pendiente transversal del 4% y longitudinal de (0.5%, 4%).....	56
<b>Figura 33.</b> Promedio de eficiencia del sumidero T45 modificado con barrotes circulares de los escenarios para el modelo S2.....	57
<b>Figura 34.</b> Comparación de la Eficiencia de captación sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S1 y S2, con pendiente transversal del 2% y longitudinal de 0.5%.....	58
<b>Figura 35.</b> Comparación de la Eficiencia de captación sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S1 y S2, con pendiente transversal del 2% y longitudinal de 4%.....	59
<b>Figura 36.</b> Comparación de la Eficiencia de captación sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S1 y S2, con pendiente transversal del 4% y longitudinal de 0.5%.....	60
<b>Figura 37.</b> Comparación de la Eficiencia de captación sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S1 y S2, con pendiente transversal del 4% y longitudinal de 4%.....	61
<b>Figura 38.</b> Promedio del porcentaje de incremento de eficiencia de captación, diferentes escenarios, entre el modelo S1 y S2 .....	62
<b>Figura 39.</b> Curva de caudal en vía vs caudal en sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S1, pendiente transversal de 2% y longitudinal (0.5%, 4%).....	63
<b>Figura 40.</b> Curva de caudal en vía vs caudal en sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S1, pendiente transversal de 4% y longitudinal (0.5%, 4%).....	64
<b>Figura 41.</b> Promedio del caudal captado por el sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S1, para diferentes escenarios.....	65
<b>Figura 42.</b> Curva de caudal en vía vs caudal en sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S2, pendiente transversal de 2% y longitudinal (0.5%, 4%).....	66
<b>Figura 43.</b> Curva de caudal en vía vs caudal en sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S2, pendiente transversal de 4% y pendientes longitudinales de (0.5%,4%).....	67

<b>Figura 44.</b> Promedio de caudal captado por el sumidero T45 modificado con barrotes circulares, diferentes escenarios, modelo S2.....	68
<b>Figura 45.</b> Representación de la eficiencia de captación, modelo S1, mediante la ecuación que se presenta, para una pendiente transversal de 2% y longitudinal de 0.5%. .....	69
<b>Figura 46.</b> Representación de la eficiencia de captación, modelo S1, mediante la ecuación que se presenta, para una pendiente transversal de 2% y longitudinal de 4%..	70
<b>Figura 47.</b> Representación de la eficiencia de captación, modelo S1, mediante la ecuación que se presenta, para una pendiente transversal de 4% y longitudinal de 0.5%. .....	70
<b>Figura 48.</b> Representación de la eficiencia de captación, modelo S1, mediante la ecuación que se presenta, para una pendiente transversal de 4% y longitudinal de 4%..	71
<b>Figura 49.</b> Representación de la eficiencia de captación, modelo S2, mediante la ecuación que se presenta, para una pendiente transversal de 2% y longitudinal de 0.5% .....	71
<b>Figura 50.</b> Representación de la eficiencia de captación, modelo S2, mediante la ecuación que se presenta, para una pendiente transversal de 2% y longitudinal de 4%..	72
<b>Figura 51.</b> Representación de la eficiencia de captación, modelo S2, mediante la ecuación que se presenta, para una pendiente transversal de 4% y longitudinal de 0.5%. .....	72
<b>Figura 52.</b> Representación de la eficiencia de captación, modelo S2, mediante la ecuación que se presenta, para una pendiente transversal de 4% y longitudinal de 4%..	73
<b>Figura 53.</b> Comportamiento del incremento de la eficiencia, al comparar el modelo S1 y S2, pendiente transversal 2% y longitudinal (0.5%, 4%).....	77
<b>Figura 54.</b> Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 2% y longitudinal 0.5%, modelo S1.....	84
<b>Figura 55.</b> Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 2% y longitudinal 4%, modelo S1.....	85
<b>Figura 56.</b> Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 4% y longitudinal 0.5%, modelo S1.....	87
<b>Figura 57.</b> Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 4% y longitudinal 4%, modelo S1.....	88
<b>Figura 58.</b> Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 2% y longitudinal 0.5%, modelo S2.....	90
<b>Figura 59.</b> Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 2% y longitudinal 4%, modelo S2.....	91
<b>Figura 60.</b> Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 4% y longitudinal 0.5%, modelo S2.....	93
<b>Figura 61.</b> Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 4% y longitudinal 4%, modelo S2.....	94

## **RESUMEN EJECUTIVO**

**Tema:** Modelación Numérica para determinación de la eficiencia de los sumideros de aguas lluvias tipo T45 modificado con barrotes circulares aplicando mecánica de fluidos computacionales

**Autor:** Braulio Darío Morocho Avemañay

**Tutor:** Ing. Mg. Geovanny Paredes

El presente trabajo experimental, determina la eficiencia hidráulica en la captación de agua en sumideros implantados en vías urbanas, además compara diferentes configuraciones de sumideros en cuanto a su eficiencia hidráulica basándose en investigaciones previas, y valida el presente trabajo insertando nuevos parámetros geométricos de la configuración de sumideros sugeridos por la normativa actual.

Con la finalidad de dar cumplimiento a los objetivos propuestos, se utilizó un software con aplicación de mecánica de fluidos computacional, donde se realizan simulaciones en tres dimensiones y es una herramienta que permite la resolución de problemas relacionados con el movimiento de fluidos. Se modeló la plataforma de ensayo a escala real, con pendiente transversal de 2% y 4 % y longitudinal de 0.5% y 4%, los caudales de ingreso en la vía varían de 16.91 l/s a 111.65 l/s. Se consideraron dos modelos para el análisis de la eficiencia hidráulica, modelo S1: un sumidero ubicado en la vía, modelo S2: dos sumideros colocados en serie en la vía. Posterior a esto se realiza la simulación de cada escenario, los valores de caudal captado por el sumidero se toman a los 25 segundos debido a que el flujo se estabiliza desde los 20 segundos. Con los valores de caudal captado se calcula la eficiencia hidráulica para el sumidero tipo T45 modificado con barrotes circulares.

Los resultados indican que el modelo T45 modificado con barrotes circulares, tiene mayor eficiencia hidráulica que el T45 normal, por lo tanto, es posible la implementación de estos en las vías para una mejor eficiencia de captación de aguas lluvias, además la eficiencia hidráulica del modelo S2 es mayor que el modelo S1, por lo que, si se tienen las condiciones geométricas apropiadas en la vía, se puede utilizar el modelo S2, si se desea una captación hidráulica mayor.



## **EXECUTIVE SUMMARY**

**Subject:** Numerical modeling to determine the efficiency of rainwaters sumps type T45 modified with circular bars applying computational fluid mechanics

**Author:** Braulio Darío Morocho Avemañay

**Tutor:** Ing. Mg. Geovanny Paredes

The present experimental work, determines the hydraulic efficiency in the collection of water in drains implanted in urban roads, also compares different configurations of sinks in terms of their hydraulic efficiency based on previous research, and validates the present work by inserting new geometric parameters of the configuration of sinks suggested by current regulations.

In order to comply with the proposed objectives, a software with application of computational fluid mechanics was used, where three-dimensional simulations are carried out and is a tool that allows the resolution of problems related to fluid movement. The test platform was modeled on a real scale, with a transverse slope of 2 and 4% and a longitudinal slope of 0.5 and 4%, the flow rates on the road vary from 16.91 l/s to 111.65 l / s. Two models were considered for the analysis of hydraulic efficiency, model S1: a sump located on the track, model S2: two sinks placed in series on the track. After this, the simulation of each scenario is performed, the flow values captured by the sump are taken at 25 seconds because the flow stabilizes from 20 seconds. The hydraulic efficiency for the modified type T45 sump with circular bars is calculated using the flow rate values.

The results indicate that the modified T45 model with circular bars, has greater hydraulic efficiency than the normal T45, therefore, it is possible to implement these on the roads for better rainwater collection efficiency, in addition to the hydraulic efficiency of the model S2 is larger than the S1 model, so if you have the appropriate geometric conditions on the track, you can use the S2 model, if you want a larger hydraulic feedback.

## **CAPÍTULO I**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **1.1 Antecedentes Investigativos**

##### **1.1.1 Antecedentes**

La modelación numérica en la actualidad es importante en el desarrollo de la ingeniería, ya que permite revisar, diseñar y tomar decisiones en proyectos, por lo tanto, es indispensable ser aplicado bajo conceptos de teoría de modelación, estadística, probabilidad y calidad, además de los factores propios que afectan el campo de aplicación del modelo. [1]

El diseño hidráulico de las obras civiles antes del desarrollo de la Mecánica de Fluidos Computacional, se basaba en la experimentación mediante modelos físicos de las obras, conllevando restricciones como el análisis dimensional o el análisis matemático simplificado. La modelación numérica es importante ya que es una herramienta que permite el diseño complementario de los trabajos teóricos como experimentales. [2]

El proceso de modelación numérica permite pasar de lo real a lo virtual, como en todo proceso, existen factores que intervienen en la calibración, los cuales permiten establecer una “interfase” entre lo real y virtual. La modelación numérica surge en muchos casos como la opción más viable para el estudio del comportamiento de sistemas complejos, pero no se debe separar definitivamente el estudio de los modelos físicos y sus mediciones, es decir, que para la calibración de los modelos numéricos se debe tener datos de los modelos físicos. [2-3]

La Mecánica de Fluidos Computacional consiste en el empleo de técnicas, para resolver numéricamente, los fenómenos físicos de movimiento de fluidos mediante la utilización de ordenadores. La resolución de ecuaciones complejas que gobiernan la mecánica de fluidos son factibles debido a que los ordenadores realizan gran cantidad de cálculos por unidad de tiempo, y el desarrollo de softwares permite la modelación a detalle de las obras hidráulicas. [3]

Para optimizar los sumideros existentes y nuevos del drenaje urbano en las ciudades, es importante comprender los patrones de flujos en las vías y con eso disponer sistemas de captación eficientes y seguros. Los estudios hidráulicos sobre la eficiencia de captación de sumideros, así como el análisis de los mismos mediante modelación numérica son escasos. [4]

En la actualidad existen modelos físicos de sumideros tanto a escala real como escala reducida, en los que se estudia el comportamiento del flujo de captación, se estiman los coeficientes de descarga para diferentes escenarios y mediante los cuales se puede determinar la eficiencia de los sumideros expuestos a diferentes condiciones. [5]

Las investigaciones existentes sobre eficiencia hidráulica de sumideros se han enfocado en encontrar fórmulas empíricas o semi-teóricas para conocer el comportamiento de los mismos sin realizar modelos físicos en los que se haga la experimentación. Existen pocas investigaciones sobre captación de agua por los sumideros en las cuales se hayan realizado las comparaciones y calibraciones de la modelación física con la modelación numérica que permitan validar los resultados. [2-6]

Se han realizado estudios, analizando datos experimentales y comparando el comportamiento hidráulico de sumideros de aguas lluvias con resultados de diferentes

modelos teóricos, con los datos obtenidos se validaron los modelos, y propusieron una formulación distinta para la determinación de la eficiencia de captación. En esta investigación se analizó la dimensionalidad del fenómeno en estudio buscando la relación entre las variables que afectan la eficiencia de captación, con lo cual se propone una relación potencial de la eficiencia hidráulica de los sumideros en función del cociente entre el ancho del sumidero y la altura de escurrimiento. [7]

De la misma manera en la investigación realizada con la rejilla denominada Barcelona, utilizando mecánica de fluidos computacional y una plataforma a escala real, se relacionó la eficiencia de una rejilla de manera proporcional con el número de Froude. Por lo que se calibró el modelo y en la investigación se demuestra una fiabilidad bastante alta. [8]

Para determinar la eficiencia hidráulica de entrada en rejas y bordillos, se desarrollaron ecuaciones empíricas que se basan principalmente en las características del flujo y que pueden ser aplicadas a otras entradas, los datos obtenidos sobre la eficiencia se compararon con métodos publicados con anterioridad. También existen datos experimentales de la evaluación de la capacidad de la rejilla de entrada, sin embargo, existen muy pocos datos y experiencia en el modelado computacional. [9]

Los datos experimentales para la evaluación de la capacidad de la rejilla de entrada Los modelos numéricos pueden replicar características complejas de flujo en tres dimensiones, como se presenta en la investigación experimental y numérica de las interacciones entre el flujo de inundación superficial en áreas urbanas y el flujo en sistemas de drenaje subterráneos, en la cual se demuestra la influencia de la pendiente transversal de la superficie sobre las características del flujo. [10]

Los estudios hidráulicos sobre la capacidad y eficiencia de captación de los sumideros, pero no es frecuente la aplicación de modelos tridimensionales en la determinación de la eficiencia de captación de caudal proveniente de la escorrentía superficial a través de las rejillas. En el trabajo experimental con el tema “Cálculo experimental de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas pluviales”, se determina la eficiencia del sumidero tipo T45, utilizando una plataforma a escala. [11]

De la misma manera, en el trabajo denominado “Modelación hidráulica para la determinación de la eficiencia de los sumideros de aguas lluvias”, se determina la eficiencia hidráulica en la captación de agua en sumideros, utilizando el sumidero tipo T45 y puesto a prueba en diferentes escenarios y diferentes pendientes transversales y longitudinales. [12]

Con el presente trabajo experimental se pretende probar el sumidero cambiando su geometría aplicando mecánica de fluidos computacional, tomando como base investigaciones anteriores, el cuál sea una solución técnica para mejorar la eficiencia de captación de aguas pluviales.

### **1.1.2 Justificación**

En nuestro país, no se ha realizado un mayor esfuerzo en modelaciones numéricas de sumideros para establecer las eficiencias de captación, tampoco se ha realizado modelos matemáticos que permitan establecer relaciones entre el comportamiento del flujo en la vía y el tipo de sumidero utilizado. [5]

En los últimos años se realizaron numerosos ensayos con diversos tipos de rejillas que han permitido estudiar la eficiencia de los mismos. Estas investigaciones se han realizado en laboratorios para la caracterización de las rejillas y sumideros, y no siempre es factible la realización de los mismos en laboratorio, ya sea por costes o tiempo. [8]

Debido a que un elemento de gran importancia dentro de la infraestructura de los alcantarillados pluviales es el sumidero, es necesario realizar el estudio de diferentes modelos, ya sea cambiando la geometría del sumidero o creando estructuras que permitan mejorar la eficiencia del mismo. [11]

Los estudios experimentales realizados para determinar la eficiencia de captación de agua lluvia por los sumideros, no ofrecen una propuesta factible y que pueda extenderse a otros sumideros. [13]

En vista de estos inconvenientes surge la idea de realizar los ensayos hidráulicos de captación de caudal por parte de los sumideros con la ayuda de mecánica de fluidos computacional y observar el comportamiento del mismo.

Mediante la utilización de mecánica de fluidos computacionales se pueden realizar simulaciones numéricas que son importantes tanto para la validación de diseños o estudios teóricos como los trabajos experimentales.

Por tal motivo, es permitente mencionar que el presente proyecto servirá para determinar de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas lluvias aplicando mecánica de fluidos computacional. Este trabajo es un alcance para el Proyecto de Investigación “Cálculo experimental de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas de lluvias”, aprobado por la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Universidad Técnica de Ambato.

### 1.1.3 Fundamentación teórica

#### 1.1.3.1 Análisis de la normativa para el diseño vial

##### Velocidad de Diseño

El MTOP dispone de velocidades permisibles para vehículos en general como lo indica la tabla 1:

**Tabla 1.** Velocidades de diseño

CLASE	LL	O	M
I	110	100	80
II	100	90	70
III	90	80	60
IV	80	60	50
V	60	50	40

Fuente: MTOP [14]

Donde:

- LL: Terreno Llano
- O: Terreno Ondulado
- M: Terreno montañoso

##### Radio de curvatura

Se conoce como radio de curvatura mínimo de curva horizontal es el valor más bajo que posibilita la seguridad en el tránsito a una velocidad de diseño dada en función de un peralte (e) adoptado y el coeficiente (f) de fricción lateral correspondiente. Los valores de radios de curvatura mínimos se presentan en la tabla 2. [14]

**Tabla 2.** Radios de curvatura mínimos (m)

Clase de Carretera	Llano	Ondulado	Montañoso
I 3000 A 8000 TPDA	430	350	210
II 1000 A 3000 TPDA	350	275	160
III 300 A 1000 TPDA	275	210	110
IV 100 A 300 TPDA	210	110	75
V MENOS DE 100 TPDA	110	75	42

Fuente: MTOP [14]



**Donde:**

TDPA: Tráfico Promedio Diario Anual

**Ancho de las secciones transversales típicas**

Se constituye por el ancho requerido de la vía, espaldones, taludes interiores y cunetas.

[14]

Los valores del ancho de secciones trasversales se presentan en la tabla 3.

**Tabla 3.** Ancho de secciones transversales

Clase de Carretera	Ancho de la Calzada (m)	
	Recomendable	Absoluto
R-I o R-II > 8000 TPDA	7.30	7.30
I 3000 A 8000 TPDA	7.30	7.30
II 1000 A 3000 TPDA	7.30	6.50
III 300 A 1000 TPDA	6.70	6.00
IV 100 A 300 TPDA	6.00	6.00
V MENOS DE 100 TPDA	4.00	4.00

Fuente: MTOP [14]

**Pendiente Transversal**

La pendiente transversal en diseño vial, con el fin de permitir el escurrimiento óptimo del agua en la calzada, parte desde el eje de la vía hacia los costados de la misma, esta pendiente se conoce como bombeo.

El ministerio de Obras Públicas del Ecuador en su normativa vigente recomienda los siguientes criterios en cuanto a pendientes transversales. [14]

En la tabla 4, se presenta los porcentajes de pendientes transversales de vía.

**Tabla 4.** Porcentajes de pendiente transversal de vía

Clase de Carretera	Tipo de superficie	Gradiente Transversal (%)
R-I o R-II > 8000 TPDA	Alto grado estructural: concreto asfáltico u hormigón	1.5-2
I 3000 A 8000 TPDA	Alto grado estructural: concreto asfáltico u hormigón	1.5-2
II 1000 A 3000 TPDA	Grado estructural intermedio	2.00
III 300 A 1000 TPDA	Bajo grado estructural: doble tratamiento superficial Bituminoso D.T.S.B.	2.00
IV 100 A 300 TPDA	Grava o D.T.S.B.	2.5-4
V MENOS DE 100 TPDA	Grava, Empedrado, Tierra	4.00

Fuente: MTOP [14]

### Pendiente Longitudinal

Para La pendiente longitudinal se basa en el criterio de eficiencia de operación de los vehículos de transporte, pues al ser alto el valor de la pendiente el costo de transporte aumenta, en cambio al ser bajo el valor de la pendiente el costo de la vía es alta. [14]

En la tabla 5 se presentan los valores de pendientes longitudinales que el MTOP determina según la categoría de la vía y las características topográficas de la misma.

**Tabla 5.** Porcentajes de pendiente longitudinal

CATEGORÍA	RECOMENDABLE (%)			MÁXIMO (%)		
	LL	O	M	LL	O	M
I	3	4	6	3	5	7
II	3	4	6	4	6	8
III	3	5	7	4	7	9
IV	4	6	8	6	8	10
V	4	6	8	6	8	12

Fuente: MTOP [14]

## Norma INEN 2496

### Definiciones

Sumidero es la obra destinada a recibir en superficie a las aguas de escorrentía y permitir su evacuación hacia una red de alcantarillado, en la figura 1 se representa la ubicación del sumidero en una sección transversal típica de una vía. [15]

Rejilla es la pieza que a través de ella permite la evacuación de la escorrentía superficial al sistema de alcantarillado. [15]

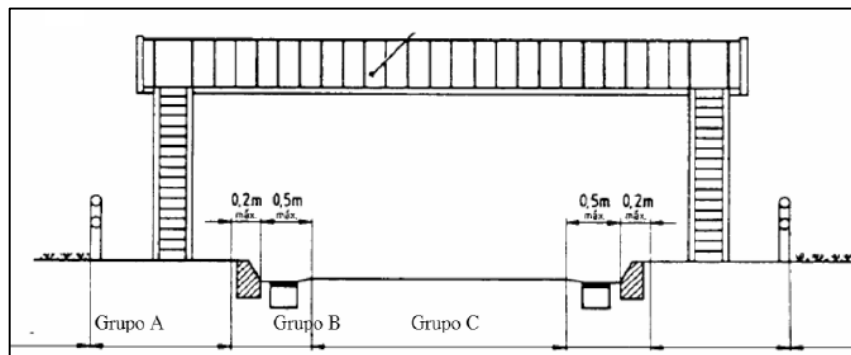


Figura 1. Sección típica de una carretera que muestra la ubicación de instalación de algunos grupos.

Fuente: INEN 2496 [15]

### 1.1.3.2 Análisis hidrológico

#### Método Racional

Es un método que permite calcular el caudal máximo de crecida y es utilizado para el drenaje rural y urbano. La ventaja de este método es que requiere de pocos datos para la determinación del caudal de diseño. [16]

La hipótesis del método racional consiste en que a lluvia constante y uniforme sobre un área produce un caudal de descarga que tiene su valor máximo cuando toda el área contribuye a dicho caudal. [16]

La ecuación del método racional es la siguiente:

$$Q = 0.278 \times CiA \quad (1)$$

Donde:

- Q: Caudal (m<sup>3</sup>/s)
- C: Coeficiente de escorrentía
- i: Intensidad de precipitación (mm/h)
- A: Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

### **Área de drenaje**

El área de drenaje en zonas urbanas debe calcularse a partir de la superficie que contribuye al sistema de drenaje. En las zonas rurales el área de drenaje corresponde al área de la cuenca. Si el área de drenaje se compone de diferentes tipos y características de superficie, se debe tomar sub\_áreas y relacionar un coeficiente de escorrentía por cada sub\_área. [16]

### **Coeficiente de escorrentía**

El coeficiente de escorrentía representa la porción de la precipitación que se convierte en escorrentía. [16]

Los factores que afectan la escorrentía son los siguientes:

- Uso de suelo. - afecta la capacidad de infiltración y la escorrentía superficial.
- Topografía. – La pendiente influye en la infiltración de la escorrentía superficial.
- Otros factores. – Almacenamiento por depresiones, humedad antecedente del suelo, proximidad al nivel freático, grado de compactación del suelo.

La elección del coeficiente de escorrentía requiere una amplia experiencia del diseñador.

### **Intensidad de Precipitación**

Para determinar la intensidad de precipitación es necesario conocer constantes de ajustes, intensidad de precipitación para cualquier periodo de retorno y el tiempo de duración de la lluvia. [16]

$$I_{TR} = \frac{K \times Id_{TR}}{t^n} \quad (2)$$

Donde:

$I_{TR}$ : Intensidad de precipitación para cualquier periodo de retorno, mm/h.

T: Duración de la precipitación, min.

K, n: Constantes de ajuste

$Id_{TR}$ : Intensidad diaria para un periodo de retorno, mm/h.

### **Tiempo de concentración**

Es el tiempo en el que el agua se demora en recorrer desde el punto más lejano de la cuenca hasta su salida. El tiempo de concentración debe ser menor o igual a la duración de la precipitación. Y es la suma del tiempo de entrada más el tiempo de flujo. [16]

$$t_c = t_o + t_f \quad (3)$$

Donde:

$T_c$ : tiempo de concentración, min.

$T_o$ : tiempo de entrada, min.

$T_f$ : tiempo de flujo, min.

Para determinar el tiempo de entrada existen diferentes métodos los cuales se describen a continuación.

### **Federal Aviation Administration**

Este método fue desarrollado mediante información recopilada por el Corps of Engineers y tiene como finalidad resolver problemas de drenaje en aeropuertos, generalmente se utiliza para caracterizar el flujo superficial en cuencas urbanas. [16]

$$t_c = 0.7035 \frac{(1.1 - C)L^{0.50}}{S^{0.333}} \quad (4)$$

Donde:

- C: coeficiente de escorrentía del método racional
- L: longitud del flujo superficial, m.
- S: pendiente de la superficie, m/m

### **Kirpich**

Este método fue desarrollado a partir de información proporcionada por el SCS. La información de ha recolectado de siete cuencas rurales con canales definidas y pendientes que varían de 3 a 10%. En superficies de concreto o asfalto se debe multiplicar por 0.4, para canales de concreto multiplicar por 0.2, no se debe realizar ningún tipo de ajuste para flujo superficial en suelo descubierto o para flujo en cunetas. [16]

$$t_c = 0.01947 * L^{0.77} * S^{-0.385} \quad (5)$$

Donde:

- L: longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida, m.
- S: pendiente promedio de la cuenca, m/m.

### **Ecuaciones de onda cinemática Morgali y Linsley**

Fue desarrollado a partir del análisis de onda cinemática de la escorrentía superficial para flujo superficial. Este método requiere iteraciones debido a que la intensidad de lluvia como el tiempo de entrada son desconocidos. [16]

$$t_c = \frac{7 * L^{0.6} * n^{0.6}}{I^{0.4} * S^{0.3}} \quad (6)$$

Donde:

- L: longitud del flujo superficial, m.
- N: coeficiente de rugosidad de Manning.
- I: Intensidad de lluvia, mm/h.
- S: pendiente promedio del terreno-m/m.

### California Culverts Practice

Este método fue desarrollado a partir de la ecuación de Kirpich para pequeñas cuencas montañosas en California. [16]

$$t_c = 0.0195 \left( \frac{L^3}{H} \right)^{0.385} \quad (7)$$

Donde:

- L: longitud del curso de agua más largo, m.
- H: diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida, m.

### Ecuación de retardo SCS

Esta ecuación fue desarrollada a partir de información de cuencas de uso agrícola. Ha sido adaptada a pequeñas cuencas urbanas con áreas inferiores a 800Ha. Es eficiente cuando se lo utiliza en áreas totalmente pavimentadas, mientras que en áreas mixtas tiende a sobreestimar, por lo que se aplican factores de ajuste para corregir efectos de mejoras en canales e impermeabilización de superficies. [16]

$$t_c = \frac{0.0136 * L^{0.8} \left( \frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{S^{0.5}} \quad (8)$$

Donde:

L: longitud hidráulica de la cuenca (mayor trayectoria de flujo), m.

CN: número de curva SCS

S: pendiente promedio de la cuenca, m/m.

### **Izzard**

Este método fue desarrollado mediante la experimentación en laboratorio por el bureau of Public Roads para flujo superficial en caminos y áreas de césped. La solución requiere de procesos iterativos y donde el producto de  $i$  por  $L$  debe ser menor o igual a 3800. [16]

$$t_c = \frac{525.(0.0000276i + c).L^{0.33}}{S^{0.333} i^{0.667}} \quad (9)$$

Donde:

$i$ : intensidad de lluvia, mm/h.

$c$ : coeficiente de retardo

$L$ : longitud de la trayectoria de flujo, m.

$S$ : pendiente de la trayectoria de flujo, m/m.

### **Curvas de intensidad duración y frecuencia**

Los datos de precipitación son obtenidos de los registros pluviográficos denominados pluviogramas o diagramas de precipitación acumulada a lo largo del tiempo, correspondiendo a 24 horas de registro continuo y a una altura equivalente a 10mm de precipitación. De estos gráficos se puede establecer para diversas duraciones las intensidades máximas ocurridas durante una lluvia dada, sin que necesariamente las duraciones deban incluir a las menores, en la figura 2 se presenta las curvas de intensidad, duración y frecuencia. [17]



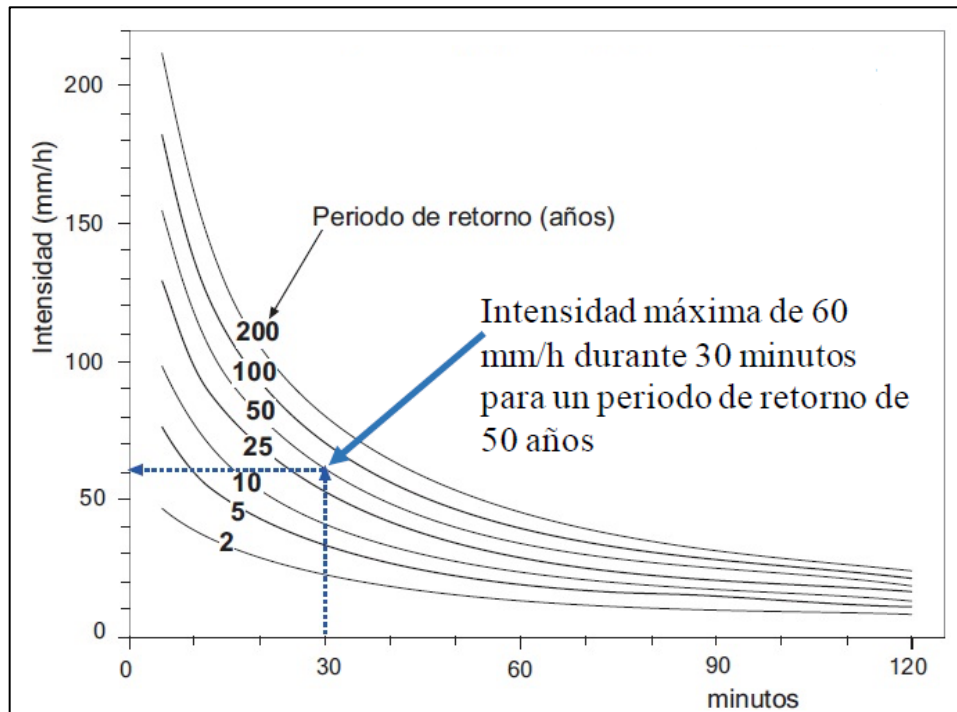


Figura 2. Curva de intensidad, duración y frecuencia.

Fuente: INAMHI [17]

### 1.1.3.3 Análisis hidráulico

#### Hidráulica de canales

Tipos de flujos

Existen dos tipos de flujos:

#### Flujo a presión PF

En este tipo de flujo la presión generalmente es constante ya que circula por una tubería.

Estos se los puede identificar de la siguiente manera: [18]

- Flujo sin contacto directo con la presión atmosférica

- Solamente presión hidráulica

### **Flujo en canales abiertos OCF**

En este tipo de flujo la determinación de coeficientes de rugosidad y factores de fricción tienen mayor dificultad, además la geometría de canales abiertos puede cambiar de una sección a otra y la resolución y el manejo de problemas son empíricos. Se los identifica de la siguiente manera: [18]

- Flujo con superficie libre
- Sujeto a la presión atmosférica

El flujo en canales abiertos se clasifica de la siguiente manera:

- Flujo continuo
  - Flujo uniforme
  - Flujo variado
    - Flujo gradualmente variado
    - Flujo rápidamente variado
- Flujo discontinuo
  - Flujo no continuo-uniforme
  - Flujo no continuo-variado
    - Flujo no continuo-gradualmente variado
    - Flujo no continuo-rápidamente variado

### **Estado de flujo**

#### **Número de Reynolds**

Es un número adimensional utilizado para conocer las características de flujo dentro de una tubería. Indica de la pérdida de energía causada por efectos de viscosidad. [19]

$$Re = \frac{V * De * \rho}{\mu} = \frac{V * De}{\nu} \quad (10)$$

$$De = 4Rh = 4 \frac{A}{P} \quad (11)$$

Flujo laminar

$$Re < 2000 \quad (12)$$

Flujo transitorio

$$2000 \leq Re \leq 4000 \quad (13)$$

Flujo Turbulento

$$Re > 4000 \quad (14)$$

### Número de Froude

El número de Froude es adimensional y representa el efecto gravitacional, en la tabla 6 se presenta la diferenciación de los diferentes tipos de flujo que sostiene en un canal abierto. Es utilizado en el cálculo de resaltos hidráulicos.

$$\frac{dE}{dy} = 0 \Rightarrow 1 - \frac{v^2}{g*y} = 0 \Rightarrow F_r = \frac{v}{\sqrt{g*y}} = \frac{\text{Fuerza de inercia}}{\text{Fuerza de gravedad}} = 1 \quad (15)$$

**Tabla 6.** Número de Froude

<b>Flujo</b>	<b># Froude</b>
Sub-crítico	< 1
Crítico	= 1
Super crítico	> 1

**Fuente:** Braulio Morocho

### **Flujo sub-crítico**

Es este estado la información puede propagarse en dos direcciones, aguas arriba y abajo, esto ya que es influenciado y controlado desde aguas abajo. [18]

$$F_r < 1 \Leftrightarrow V < V_c \Leftrightarrow y > y_c \quad (16)$$

### **Flujo crítico**

Es el estado del flujo en el que el número de Froude es igual a 1. [15]

$$F_r = 1 \Leftrightarrow V = V_c \Leftrightarrow y = y_c \quad (17)$$

### **Flujo súper crítico**

En este estado la información puede propagarse hacia aguas abajo. El flujo puede ser controlado desde aguas arriba. [18]

$$F_r > 1 \Leftrightarrow V > V_c \Leftrightarrow y < y_c \quad (18)$$

Donde:

$$V_c = \sqrt{g * y} \quad (19)$$

### **Ecuación de la conservación de la energía**

En todos los sistemas hidráulicos existen 3 tipos de energía: energía potencial, energía cinética y energía de presión, en la figura 3 se presentan las variables que se utilizan en las ecuaciones de la conservación de la energía. [20]

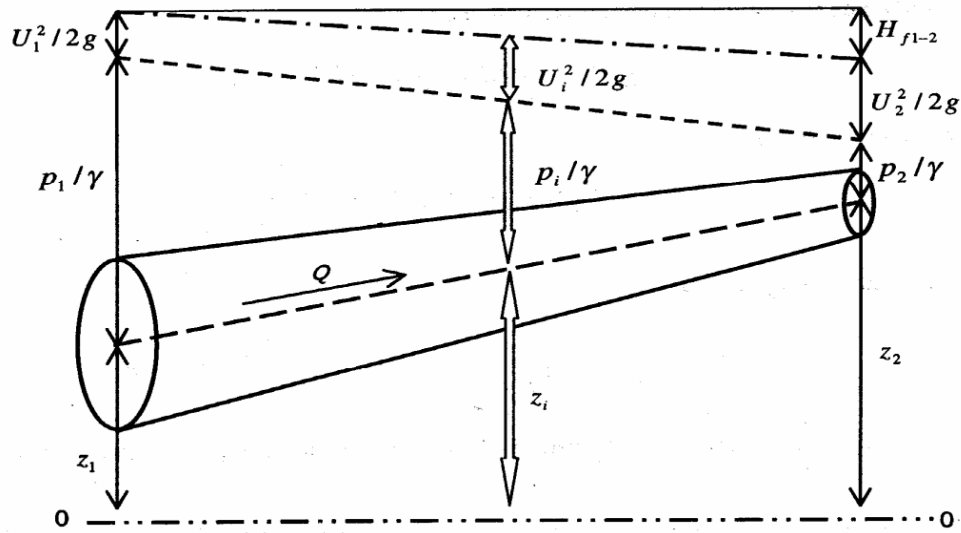


Figura 3. Representación de las variables para la demostración de las ecuaciones de la conservación de la energía.

Fuente: Ecuaciones fundamentales de flujo [20]

### Energía de presión

$$h = \frac{P}{\gamma} \quad (20)$$

### Energía cinética

$$Ec = \frac{V^2}{2g} \quad (21)$$

### Energía potencial

$$E = W * z \quad (22)$$

### Ecuación de la energía

Se obtiene al sumar las ecuaciones de presión, cinética y potencial, aplicados de una sección a otra. [20]

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_{f1-2} \quad (23)$$

**Donde:**

$Z_1$  y  $Z_2$ = Cargas o energía de presión

$\frac{P_1}{\gamma}$  y  $\frac{P_2}{\gamma}$  = Cargas o energías de presión

$\frac{V_1^2}{2g}$  y  $\frac{V_2^2}{2g}$ = Cargas o energías de velocidad

$h_{f1-2}$ = Pérdidas de energía de la sección 1 a la sección 2.

### **Ecuación de la cantidad de movimiento**

Se conoce como cantidad de movimiento de un elemento de masa, al producto de esta por la velocidad. La suma vectorial de todas las fuerzas que actúan sobre una masa de fluido es igual a la rapidez del cambio de vector lineal cantidad de movimiento de la masa del fluido. [21]

$$\overline{\Sigma F} = \beta * \rho * Q * V_x \quad (18)$$

Donde:

$\beta$  = Coeficiente de Boussinesq, depende únicamente de la distribución de velocidades en la sección de estudio.

$\rho$ = Densidad

$Q$ = Caudal

$V_x$ = Velocidad

### **Ecuación de Saint Venant**

Son un conjunto de ecuaciones diferenciales, los cuales modelan los cambios de caudal y nivel de un líquido a lo largo del espacio unidimensional y el tiempo de manera no permanente como un canal o tubería a superficie libre o abierto. [22]

Para el desarrollo de las ecuaciones requiere de las siguientes suposiciones:

- El flujo es unidimensional e incompresible
- El tirante hidráulico y la velocidad del flujo varían sólo en la dirección del eje longitudinal del canal.
- La velocidad es uniforme y la superficie libre es horizontal a través de cualquier sección perpendicular al eje.
- Las líneas de flujo no tienen curvatura pronunciada
- La pendiente es pequeña
- El fondo de canal es fijo
- La profundidad y la velocidad del flujo varían solo en la dirección longitudinal del canal.

Teniendo como base las hipótesis de Saint Venant y aplicando los principios de conservación de la masa y de la conservación de la cantidad de movimiento a un volumen de control elemental de longitud  $dx$  en un canal, resultan las ecuaciones de Continuidad y de Momentum de Saint Venant. En la figura 4, 5 y 6, se presentan las variables utilizadas para las ecuaciones de continuidad y momentum. [22]

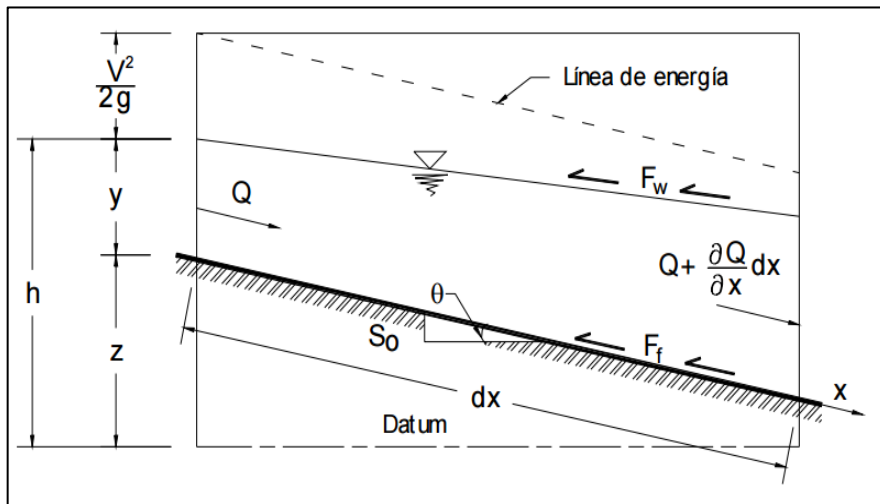
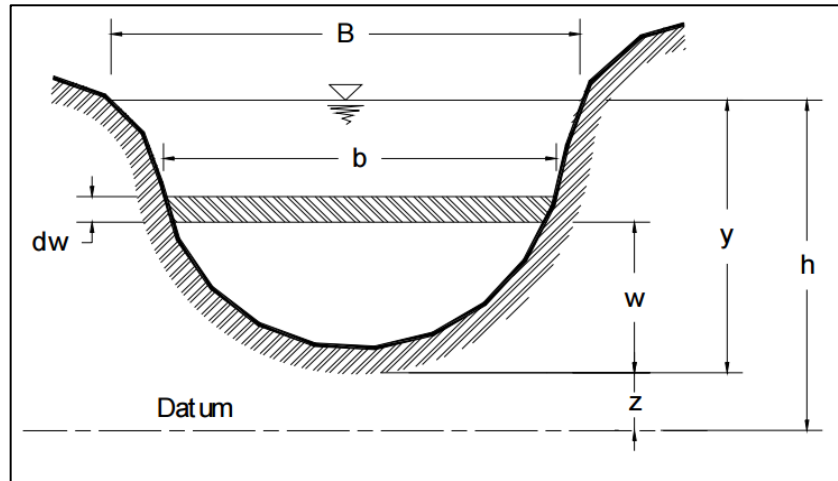


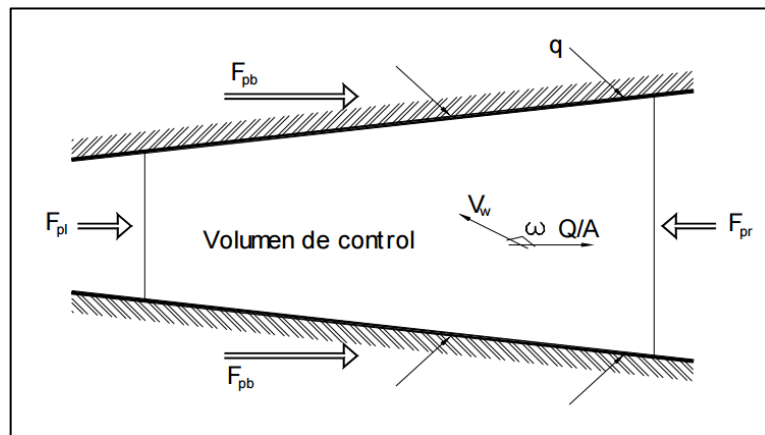
Figura 4. Vista de perfil longitudinal de un canal

Fuente: Ecuaciones fundamentales de la hidráulica [22]



**Figura 5.** Sección transversal de un canal

**Fuente:** Ecuaciones fundamentales de la hidráulica [22]



**Figura 6.** Vista en planta canal

**Fuente:** Ecuaciones fundamentales de la hidráulica [22]



### **Ecuación de la continuidad**

Esta ecuación tiene en cuenta un balance de masa sobre un volumen de control.

Se puede escribir en términos de caudal (Q) y área (A): [22]

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (19)$$

En términos de la velocidad media longitudinal (V) y la profundidad (y):

$$V \frac{\partial Q}{\partial x} + y \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (20)$$

### **Ecuación de Momentum**

Esta ecuación surge al igualar las fuerzas externas aplicadas al volumen de control como la gravedad, la presión, la fricción, entre otras. Se puede escribir la ecuación en términos del caudal (Q), área (A), profundidad (y), y pendiente del canal (S<sub>0</sub>), pendiente de fricción (S<sub>f</sub>) y de la gravedad (g). [22]

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (21)$$

En términos de la velocidad media longitudinal (V).

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (22)$$

La pendiente de la línea de fricción S<sub>f</sub> se determina a partir de la fórmula de Manning.

$$S_f = \frac{Q^2 n^2}{A^2 R^{\frac{2}{3}}} \quad (23)$$

#### **1.1.3.4 Introducción a los Modelos Hidráulicos**

Los problemas relacionados con la dinámica de movimiento de flujo pueden llegar a ser extremadamente complejos, esto ha conllevado la construcción de modelos físicos a escala como la única herramienta para el estudio y diseño de estructuras hidráulicas. En los últimos años debido al incremento de las capacidades computacionales, el desarrollo y mejoras de algoritmos computacionales ha permitido el desarrollo de modelos numéricos que simulan flujo superficial.

##### **Tipos de modelo**

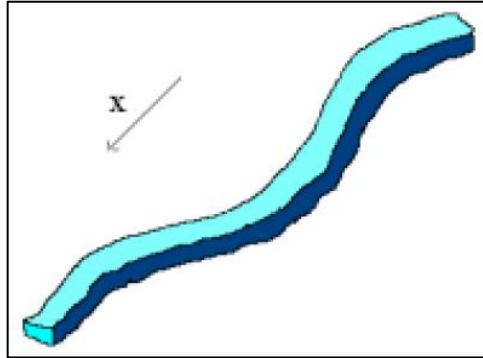
Los modelos numéricos se desarrollaron exclusivamente para resolver problemas relacionados con el flujo de agua. En la actualidad los modelos numéricos son genéricos con capacidad para resolver una gama de condiciones de flujo similares, con módulos que permiten la resolución de otros tipos de fenómenos como la dispersión de contaminantes, transporte de sedimentos, calidad de agua e inclusive la modelación de hábitat de peces u otras criaturas acuáticas. [23]

##### **Dimensionalidad de un modelo**

###### **Modelo 1D**

Este modelo se rige por las ecuaciones de Saint Venant 1-D y el trinomio de Bernoulli. En este modelo se asume que una de las dimensiones prevalece sobre las otras dos. Esta dimensión es la longitudinal a lo largo del eje del río o canal, en la figura 7 se presenta el esquema del modelo 1D. La información topográfica e hidráulica se introduce mediante secciones transversales, en las cuales se calculan el tirante y la velocidad promedios en toda la sección transversal. [23]

En el caso de captación de agua mediante el sumidero es más complicado ya que se podría simular una pendiente longitudinal pero no una pendiente transversal. Por lo que un modelo 1D no puede cumplir con esa función.



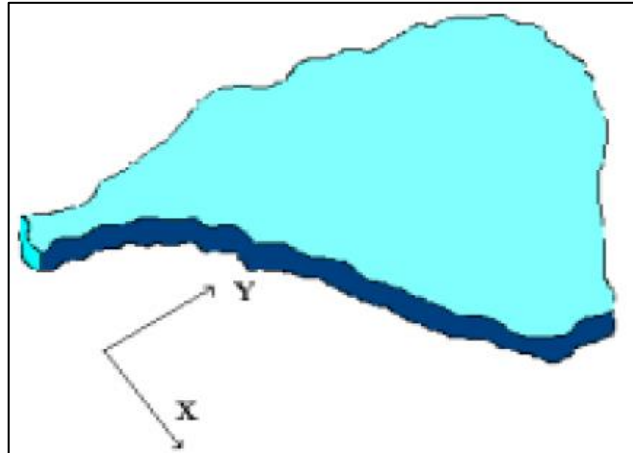
**Figura 7.** Esquema de modelo hidráulico unidimensional 1D

**Fuente:** Modelación Numérica en hidráulica [23]

### **Modelo bidimensional 2D**

Este modelo considera las variaciones en las dos dimensiones del plano horizontal. Las variaciones de la velocidad u otra magnitud en la columna vertical de agua se promedian y se asume un único valor. Este modelo no es aplicable donde la variación vertical de la velocidad es apreciable, como el flujo sobre un vertedero, como se observa en la figura 8. [23]

En el caso de sumideros el modelo 2D no puede ser aplicado ya que se necesita conocer aceleraciones y velocidades en el eje Z.

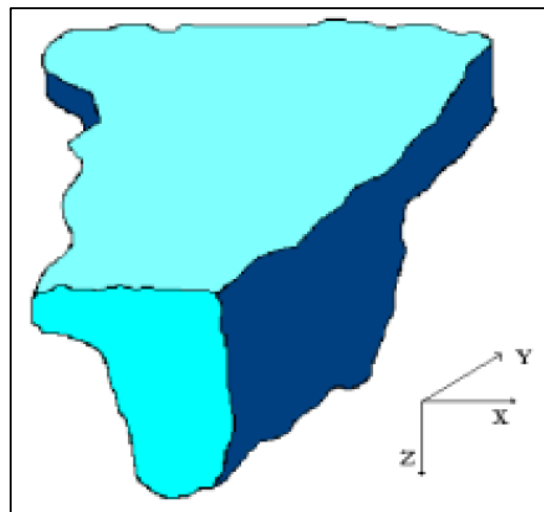


**Figura 8.** Esquema de modelo hidráulico bidimensional 2D

**Fuente:** Modelación Numérica en hidráulica [23]

### **Modelo tridimensional 3D**

Este modelo representa el estado más avanzado de la modelación. En la figura 9 se observa 3 componentes. En este caso los modelos pueden calcular las tres componentes espaciales de la velocidad, y por tanto son aplicables a cualquier caso práctico. [23]



**Figura 9.** Esquema de modelo hidráulico tridimensional 3D

**Fuente:** Modelación Numérica en hidráulica [23]

### **Modelo físico vs numérico**

La modelación de tramos muy grandes, de varios kilómetros de extensión prácticamente la modelación numérica es la mejor opción ya que no se puede realizar un modelo físico. Los modelos físicos son excelentes al momento de estudiar erosión local, pero en caso de erosión general demanda modelar grandes extensiones de terreno. Los modelos físicos modelan bien el transporte de fondo de sedimentos, pero tiene limitaciones en la escala para la correcta modelación, sin embargo, ya existen modelos numéricos desarrollados para el correcto análisis de los mismos. [23]

Por lo tanto, los modelos numéricos y modelos físicos son complementarios y en el futuro se debería buscar la modelación híbrida físico-matemática, en la cual se emplea cada tipo de modelo donde los resultados maximicen la relación beneficio-costos.

#### **1.1.4 Hipótesis**

##### **Hipótesis de trabajo**

Los sumideros de aguas lluvias tipo T45 modificado con barrotes circulares aumenta la eficiencia en la captación de caudal de escorrentía superficial.

##### **Hipótesis nula**

Los sumideros de aguas lluvias tipo T45 modificado con barrotes circulares no aumenta la eficiencia en la captación de caudal de escorrentía superficial.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General:**

Determinar la eficiencia hidráulica en la captación de agua en sumideros implantados en vías urbanas mediante la aplicación de un modelo numérico.

### **1.2.2 Objetivos Específicos:**

Comparar diferentes configuraciones de sumideros en cuanto a su eficiencia hidráulica basándose en investigaciones previas.

Seleccionar uno o varios modelos de sumideros en base a la eficiencia hidráulica comparando con el prototipo actual.

Validar la investigación insertando nuevos parámetros geométricos de la configuración de los sumideros sugeridos por la normativa actual.

## **CAPÍTULO II**

### **METODOLOGÍA**

#### **2.1 Materiales**

##### **Software de modelación numérica**

Gracias al avance de la tecnología, la capacidad de los ordenadores ha aumentado grandemente, debido a esto los modelos numéricos tienen un importante desarrollo en la simulación de flujo a superficie libre. Según la dimensionalidad para el modelo numérico, en esta investigación es tridimensional. [3]

La modelación numérica mediante software es una alternativa que puede ser utilizada para validar investigaciones experimentales aportando mayores datos que permiten analizar diferentes tipos de escenarios a los que se encuentran sometidos los elementos de análisis prediciendo el comportamiento de los mismos. [8]

La calidad de un modelo numérico depende de los datos e información disponible para calibrar, esto permite analizar los resultados y tener una mejor comprensión de la eficiencia de captación de flujo de entrada por el sumidero. [24]

#### **2.2 Métodos**

##### **2.2.1 Nivel o tipo de investigación**

Esta investigación se desarrolla bajo el nivel de investigación ASOCIACIÓN DE VARIABLES. En este nivel de investigación se tiene como objetivo evaluar las

variaciones de comportamiento de una variable, medir el grado de relación entre variables y determinar tendencias.

Para el presente trabajo experimental se pretende obtener resultados que permitan mejorar la eficiencia de drenaje de aguas lluvias con el sumidero propuesto, de esta manera se busca dar solución los problemas de inundaciones que ocurren después de una precipitación.

## 2.2.2 Población y muestra

### 2.2.2.1 Población

La población está conformada por un conjunto de combinaciones propuestas para la calzada tanto en porcentaje de pendiente longitudinal y transversal. [12]

**Tabla 7.** Población

<b>Pendiente Transversal</b>	<b>Pendiente Longitudinal</b>	<b>Combinaciones</b>
1.50%	3%	(1.5, 2, 2.5, 4)
	4%	(1.5, 2, 2.5, 4)
2%	5%	(1.5, 2, 2.5, 4)
	6%	(1.5, 2, 2.5, 4)
2.50%	7%	(1.5, 2, 2.5, 4)
	8%	(1.5, 2, 2.5, 4)
4%	9%	(1.5, 2, 2.5, 4)
	10%	(1.5, 2, 2.5, 4)
	12%	(1.5, 2, 2.5, 4)

**Fuente:** Modelación Hidráulica para la determinación de la eficiencia de los sumideros de agua lluvia [12]

### 2.2.2.2 Muestra

En el presente trabajo experimental se realizará el análisis y estudio de 8 combinaciones como se muestra a continuación.



**Tabla 8.** Muestra

<b>Combinaciones propuestas</b>		
<b>Pendiente Transversal</b>	<b>Pendiente Longitudinal</b>	<b>Combinaciones</b>
2%	0.5%	2%, 0.5%
	4%	2%, 4%
4%	0.5%	4%, 0.5%
	4%	4%, 4%

**Fuente:** Braulio Morocho

### 2.2.3 Plan de recolección de información

**Tabla 9.** Recolección de la información

<b>Preguntas Básicas</b>	<b>Explicación</b>
1. ¿Para qué?	Para determinar si la forma del sumidero influye en la eficiencia de captación de aguas lluvia
2. ¿De qué personas u objetos?	De modelación numérica aplicando Mecánica de fluidos computacional
3. ¿Sobre qué aspectos?	Sobre el porcentaje de eficiencia y comportamiento a diferentes escenarios sometidos a los sumideros
4. ¿Quién?	El Sr. Braulio Darío Morocho Avemañay autor del presente trabajo experimental y el Ing. Mg. Geovanny Paredes
5. ¿Dónde?	Laboratorio de hidráulica y estudios hídricos de la Facultad de ingeniería Civil y Mecánica, Universidad Técnica de Ambato.
6. ¿Cómo?	-Investigación Bibliográfica -Modelación numérica

**Fuente:** Braulio Morocho

### 2.2.4 Plan de procesamiento y análisis

- Revisión de la normativa para el diseño vial del Ecuador
- Análisis hidrológico
- Análisis hidráulico
- Análisis dimensional y Modelación numérica de los parámetros geométricos del modelo
- Calibración del modelo en base a resultados de investigaciones previas
- Análisis y comparación de los criterios de diseño obtenidos con los vigentes

## CAPÍTULO III

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

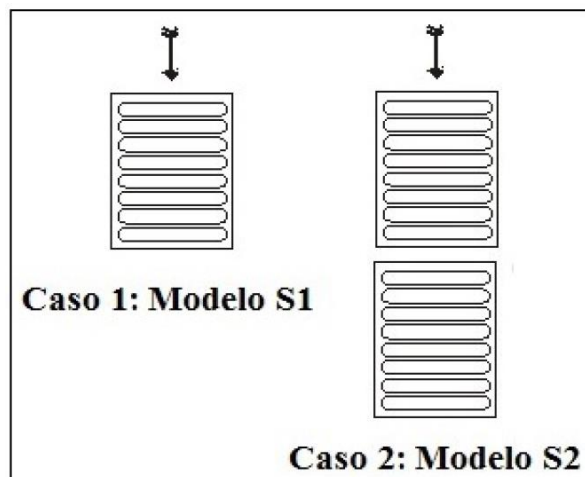
#### 3.1 Análisis y Discusión de resultados

##### 3.1.1 Análisis

##### 3.1.1.1 Representación gráfica de investigaciones

En el estudio experimental, realizado en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad Técnica de Ambato, se utilizó una plataforma experimental de sumideros para diferentes caudales a escala reducida 1:4. En el cual se ubicaron sumideros en la calle, con dos casos S1 y S2, a ser analizados para determinar la eficiencia hidráulica de las mismas. [11]

Los modelos S1 y S2 mencionados se muestran en la figura 10.



**Figura 10.** Combinaciones de los sumideros T45 utilizados en el laboratorio: Modelos S1 (un solo sumidero) y S2 (dos en serie)

**Fuente:** Cálculo experimental de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas pluviales [11]

El sumidero tipo T45 modelado en 3 dimensiones, se observa en la figura 11.

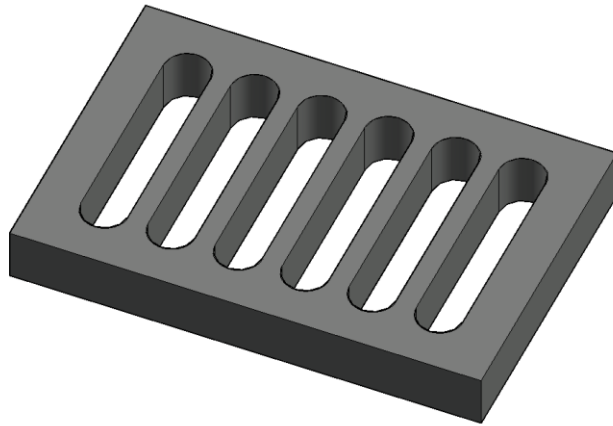


Figura 11. Sumidero tipo T45 normal

Fuente: Braulio Morocho [11]

En las figuras 12, 13, 14 y 15 se presentan las gráficas de la investigación realizada en el artículo con el tema de “Cálculo experimental de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas pluviales”.

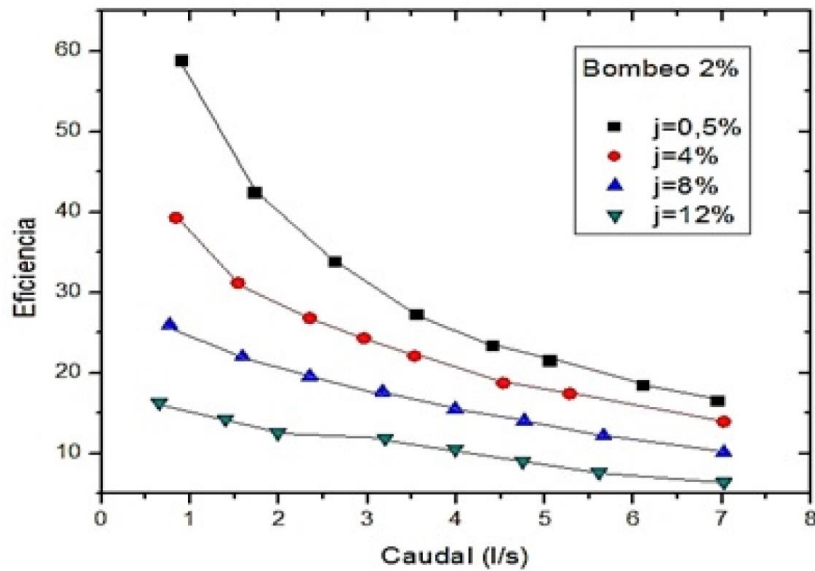
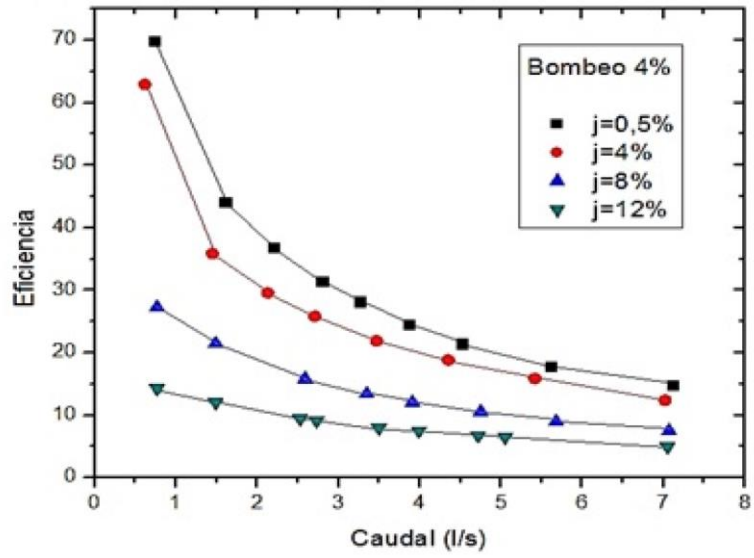


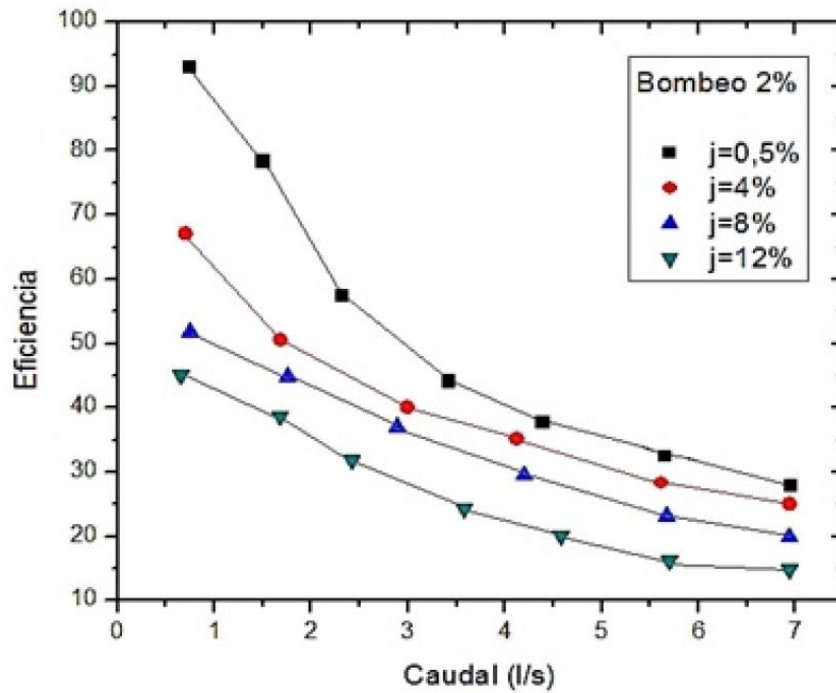
Figura 12. Eficiencia de captación (E) vs. Caudal (Q), en el modelo S1, con bombeo del 2% ( $i=2$ ) y diferentes valores de pendiente longitudinal ( $j=0,5, 4, 8, 12\%$ ).

Fuente: Cálculo experimental de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas pluviales [11]



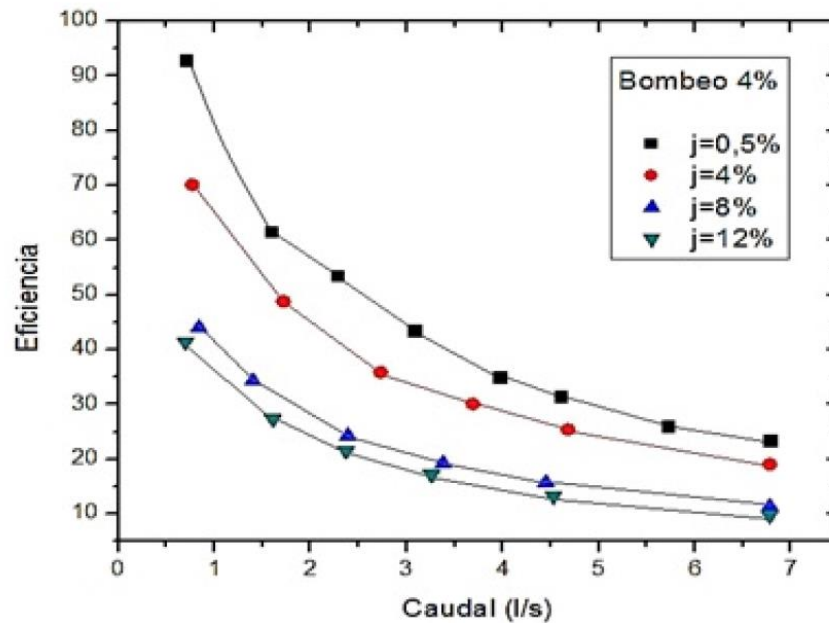
**Figura 13.** Eficiencia de captación (E) vs. Caudal (Q), en el modelo S1, con bombeo del 4% ( $i=4$ ) y diferentes valores de pendiente longitudinal ( $j=0,5, 4, 8, 12\%$ ).

**Fuente:** Cálculo experimental de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas pluviales [11]



**Figura 14.** Eficiencia de captación (E) vs. Caudal (Q), en el modelo S2, con bombeo del 2% ( $i=2$ ) y diferentes valores de pendiente longitudinal ( $j = 0,5, 4, 8, 12\%$ ).

**Fuente:** Cálculo experimental de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas pluviales [11]



**Figura 15.** Eficiencia de captación (E) vs. Caudal (Q), en el modelo S2, con bombeo del 4% ( $i=4$ ) y diferentes valores de pendiente longitudinal ( $j= 0,5, 4, 8, 12\%$ ).

**Fuente:** Cálculo experimental de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas pluviales [11]

### 3.1.1.2 Descripción general del Modelo numérico

#### Trabajo Experimental

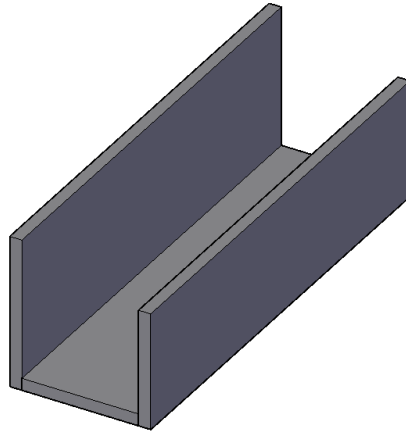
Para la modelación se dibujó una plataforma que consta de las siguientes partes:

- Depósito
- Medía vía
- Sumidero tipo T45 modificado con barrotes circulares

#### Geometría de las partes

##### Depósito

El depósito ahoga y uniformiza el flujo hacia la salida al modelo, como se indica en la figura 16, dicho canal se inundó previamente para ahorrar tiempo en los cálculos numéricos. El depósito tiene 1m de alto, 1m de profundidad y 3.8 metros de ancho. Las paredes tienen un espesor de 0.10m.

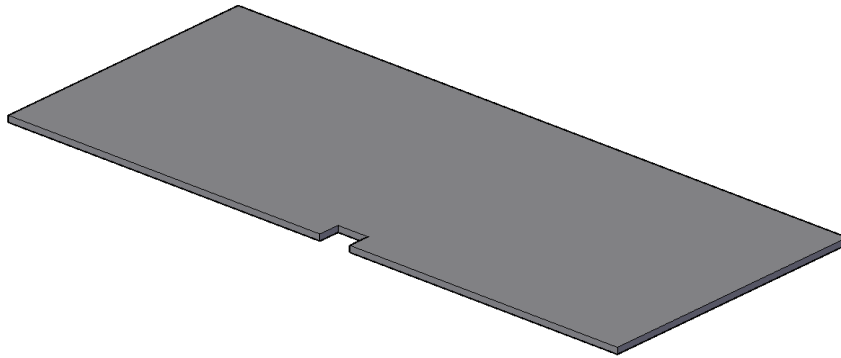


**Figura 16.** Depósito ubicado al inicio de la vía

**Fuente:** Braulio Morocho

## **Media vía**

Es la plataforma por donde circulará el agua, simula la media vía, se observa en la figura 17. Tiene pendiente longitudinal y transversal (bombeo). La pendiente longitudinal varía de 0.5% a 12%, mientras que la transversal varía de 2% a 4%. La media vía tiene 3.8 m de ancho, 9 m de largo y tiene un espesor de 0.1 m.

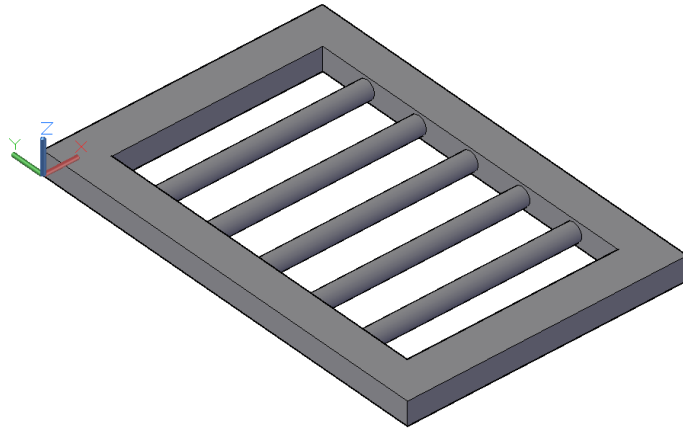


**Figura 17.** Media vía con diferentes pendientes tanto transversal como longitudinal.

**Fuente:** Braulio Morocho

### Sumidero tipo T45 modificado con barrotes circulares

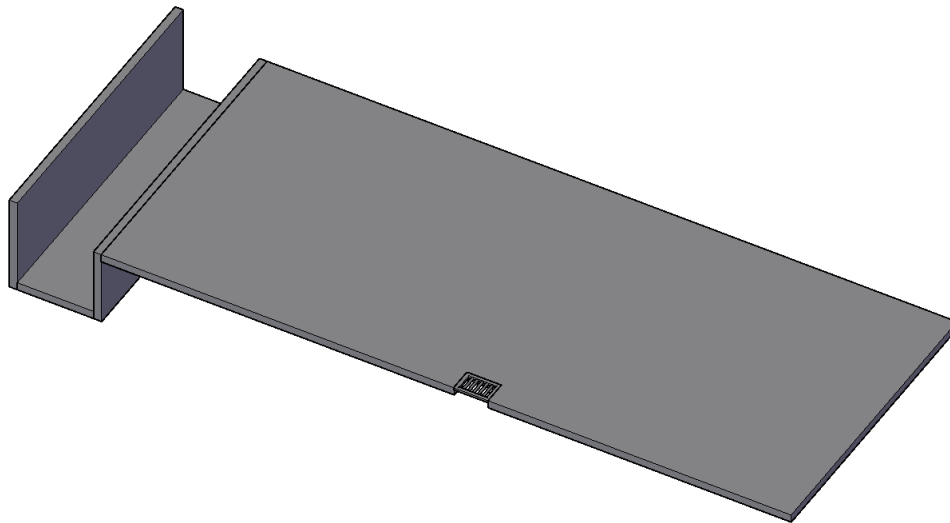
Este sumidero tiene la función de captar agua proveniente de la media vía, como se observa en la figura 18. Tiene un largo de 45 cm y un ancho de 30 cm, el diámetro de las barras son de 1.9 centímetros. Este se ubica a 4.6 m del inicio de la media vía.



**Figura 18.** Sumidero tipo T45 modificado con barrotes circulares

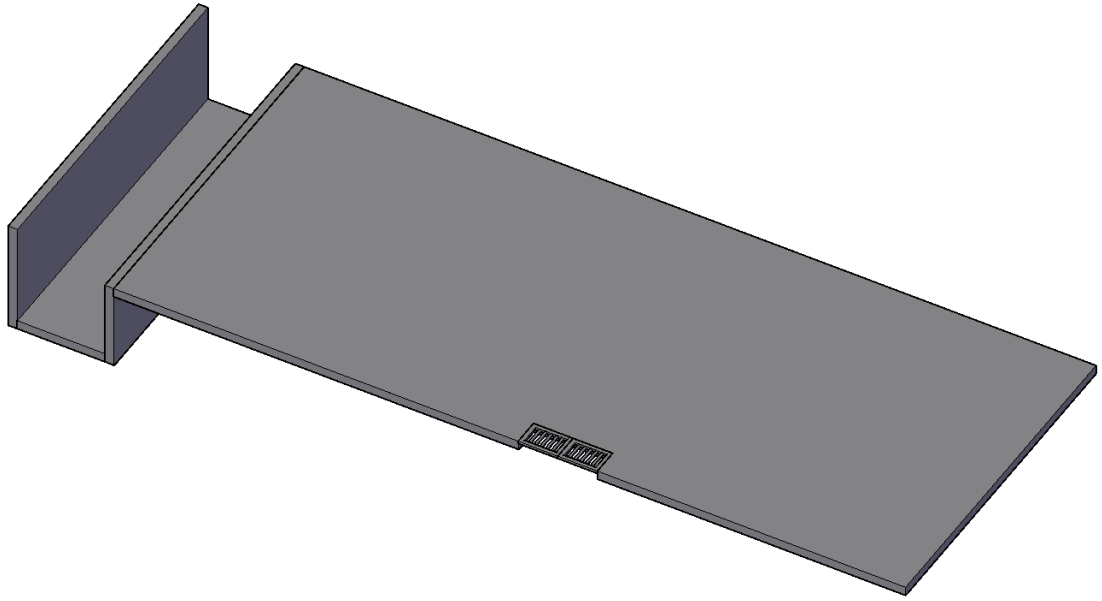
**Fuente:** Braulio Morocho

Este sumidero tipo T45 modificado se colocará como indica la figura 19 y 20, tanto para el modelo “S1” y modelo “S2” respectivamente.



**Figura 19.** Modelo S1, media vía con todos sus componentes.

**Fuente:** Braulio Morocho



**Figura 20.** Modelo S2, media vía con todos sus componentes.

**Fuente:** Braulio Morocho

### **Condiciones del fluido**

El fluido para el caso de estudio es el agua, se consideró a una temperatura de 20°C y una viscosidad de 0.001002 Kg/(m\*s)

### **Condiciones de borde**

Las condiciones de borde o contorno para cada bloque o malla se asigna simetría. Para la salida del fluido se asigna salida de flujo, que permite la salida libre del agua por la gravedad.

Estas condiciones de borde se aplicaron de acuerdo a la disposición de la vía.



## Mallado

El mallado de los bloques de la vía es de 2cm, mientras que el sumidero tipo T45 es de 1cm. Se realizó el mallado de esta manera ya que es recomendable tener simetría en el mallado para disminuir los errores y tiempo de procesamiento al momento del análisis de los modelos.

Los caudales ingresados varían para cada escenario, según se indica en la tabla 10. Los valores de caudales se tomaron de la tesis “Modelación Hidráulica para la Determinación de la Eficiencia de los Sumideros de Aguas Lluvias”.

**Tabla 10.** Caudales de ingreso para cada combinación de pendiente transversal y longitudinal

<b>Pendiente Transversal</b>	<b>Pendiente Longitudinal</b>	<b>Caudal l/s</b>
2%	0.5%	<b>16.91</b>
		47.85
	4%	79.75
		111.65
4%	0.5%	20.74
		48.17
	4%	79.11
		111.65

**Fuente:** Braulio Morocho

## Tiempo de simulación

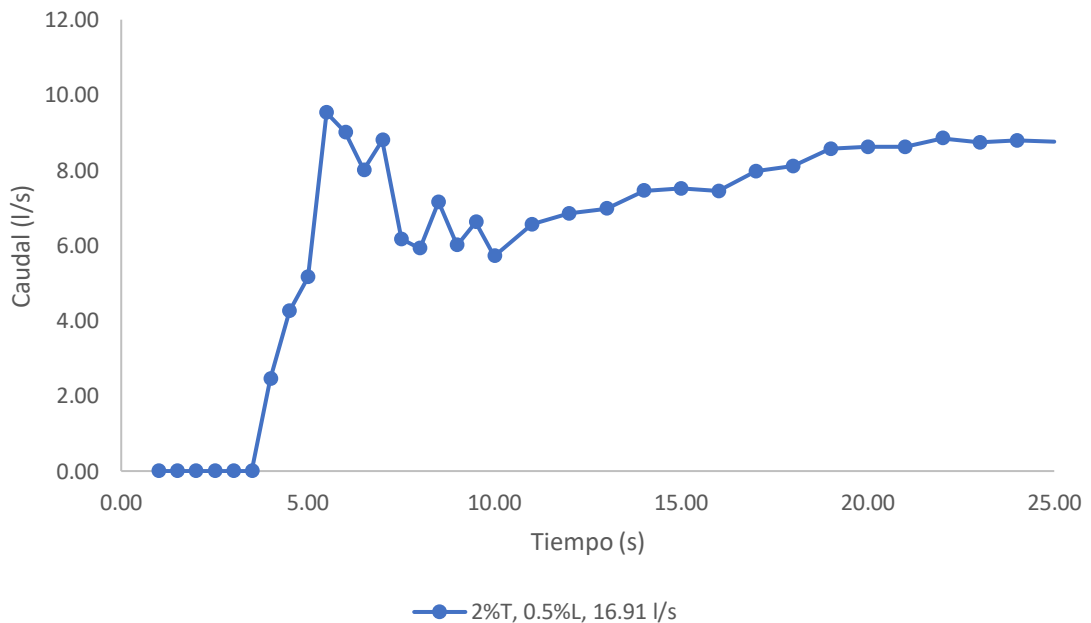
El tiempo de simulación es el tiempo necesario para que el flujo se estabilice, es decir no varíe en un gran porcentaje.

El tiempo en el que se realiza las simulaciones de eficiencia del sumidero es a los 25 segundos, esto debido a que no varía en gran porcentaje pasado este tiempo. Para todos los modelos se ha determinado 25 segundos para el análisis en el software de modelación numérica.

### 3.1.1.3 Calibración del modelo numérico

El proceso de calibración consistió en determinar el tiempo que toma el flujo de captación en estabilizarse, el tiempo necesario fue de 25 segundos. Como se observa en la figura 21, a partir del segundo 20 se observa que no existen picos ni valles, es decir el flujo de captación no varía en gran proporción, además con un mayor tiempo de procesamiento se observó que no existe mayor variación en los resultados, por tanto, se toma los 25 segundos para el procesamiento de todos los modelos analizados y por lo cual se determina que el flujo de captación está estabilizado.

A continuación, se presenta la gráfica tiempo vs caudal, en el cual se aprecia el intervalo de tiempo en el que se estabiliza el flujo de captación.



**Figura 21.** Estabilización del flujo de captación mediante la gráfica del Tiempo vs. Caudal captado.

**Fuente:** Braulio Morocho

Para determinar la tendencia y el porcentaje de diferencia entre los resultados del modelo físico expuesto en el artículo “Cálculo experimental de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas pluviales”, la realizada en la tesis con el tema de “Modelación Numérica Para determinación de la eficiencia de los Sumideros De Aguas Lluvias Tipo T45 aplicando mecánica de fluidos computacionales” y los resultados en la presente investigación, se procede a dividir los valores de caudales para 31.9, la cual es la escala de trabajo, como se observa en las tablas 10, 11 y 12. La ecuación presentada se empleó en la investigación para realizar ensayos mencionados en el artículo.

$$\frac{Q_{via}}{Q_{lab}} = \frac{230}{7.21} = L_e^{5/2} = 31.9 \quad (24)$$

Cabe mencionar que los resultados obtenidos tienen la misma tendencia, esto de acuerdo a la figura 22, lo que representa un similar comportamiento del sumidero analizado en esta investigación.

En las tablas 11, 12 y 13 se presentan los caudales a escala reducida y el porcentaje de eficiencia de captación, para el escenario S1, tanto del modelo físico, modelo numérico T45 normal y modelo T45 modificado con barroses circulares respectivamente.

**Tabla 11.** Eficiencia de captación Modelo Físico T45, S1, pendiente transversal 2% y longitudinal 0.5%

Q Real	Q Escala	%Eficiencia
16.91	0.53	92.86
47.85	1.5	45.78
79.75	2.5	32.34
111.65	3.5	25.73

Fuente: Braulio Morocho

**Tabla 12.** Eficiencia de captación Modelo T45 normal S1, pendiente transversal 2% y longitudinal 0.5%

Q Real	Q Escala	Q capt. Real	Q cap. Escala	% Eficiencia
16.91	0.53	7.91	0.248	46.78
47.85	1.5	13.46	0.422	28.13
79.75	2.5	17.46	0.547	21.89
111.65	3.5	19.56	0.613	17.52

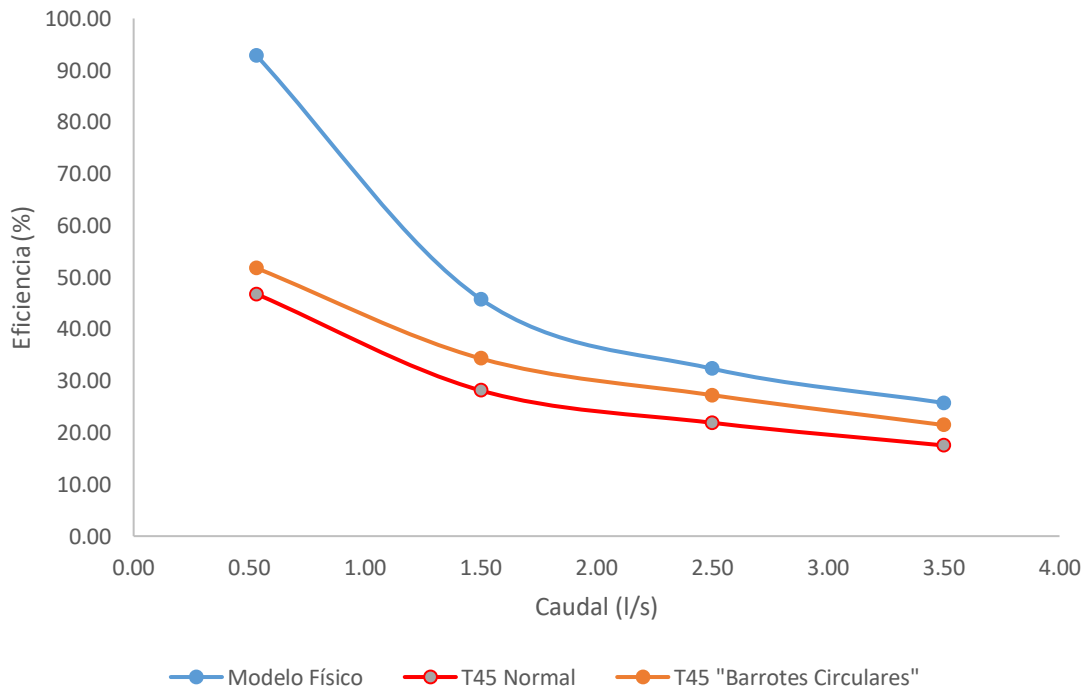
Fuente: Braulio Morocho

**Tabla 13.** Eficiencia de captación Modelo T45 modificado con barroses circulares S1, pendiente transversal 2% y longitudinal 0.5%

Q Real	Q Escala	Q capt. Real	Q cap. Escala	% Eficiencia
16.91	0.53	8.76	0.274	51.78
47.85	1.50	16.42	0.515	34.31
79.75	2.50	21.72	0.681	27.24
111.65	3.50	23.96	0.751	21.46

Fuente: Braulio Morocho

Al realizar la comparación de la eficiencia de captación del modelo S1, de acuerdo a la figura 22 se observa una similar tendencia.



**Figura 22.** Comparación de la eficiencia de captación del modelo S1, con pendiente transversal del 2% y longitudinal 0.5%, de las diferentes investigaciones realizadas.

Fuente: Braulio Morocho

En las tablas 14, 15 y 16, se presenta el porcentaje de diferencia entre los diferentes modelos para el escenario S1, además en la tabla 17, se presenta el promedio del porcentaje de diferencia de captación.

**Tabla 14.** Diferencia entre el Modelo Físico y Sumidero T45, con pendiente transversal de 2% y longitudinal de 0.5%, modelo S1

Q (l/s)	Eficiencia (%)		% ΔE
	Modelo Físico	T45 Normal	
16.91	92.86	46.78	46.08
47.85	45.78	28.13	17.65
79.75	32.34	21.89	10.45
111.65	25.73	17.52	8.21
<b>Promedio % ΔE</b>			20.60

Fuente: Braulio Morocho

**Tabla 15.** Diferencia entre el modelo Físico y sumidero T45 modificado con barrotes circulares, con pendiente transversal de 2% y longitudinal de 0.5%, modelo S1

Q (l/s)	Eficiencia (%)		% ΔE
	Modelo Físico	T45 "Barrotes Circulares"	
16.91	92.86	51.78	41.08
47.85	45.78	34.31	11.47
79.75	32.34	27.24	5.11
111.65	25.73	21.46	4.27
<b>Promedio % ΔE</b>			15.48

Fuente: Braulio Morocho

**Tabla 16.** Diferencia entre el sumidero T45 y T45 modificado con barrotes circulares, con pendiente transversal de 2% y longitudinal de 0.5%, modelo S1

Q (l/s)	Eficiencia (%)		% ΔE
	T45 "Barrotes Circulares"	T45 Normal	
16.91	51.78	46.78	5.01
47.85	34.31	28.13	6.18
79.75	27.24	21.89	5.34
111.65	21.46	17.52	3.94
<b>Promedio % ΔE</b>			5.12

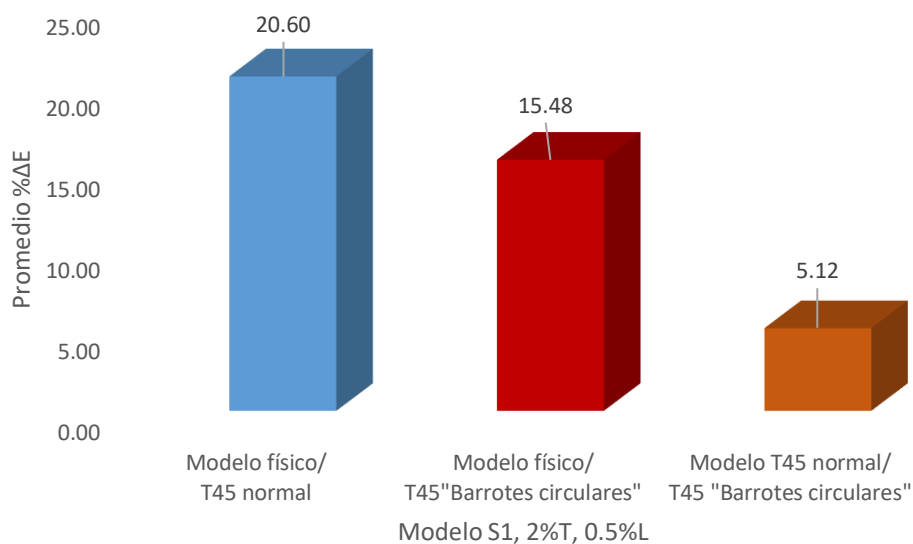
Fuente: Braulio Morocho

**Tabla 17.** Promedio de la diferencia de eficiencia, pendiente transversal 2% y longitudinal 0.5%, modelo S1

<b>Modelos</b>	<b>Promedio %Δ E</b>
Modelo físico/ T45 normal	20.60
Modelo físico/ T45 "Barrotes circulares"	15.48
Modelo T45 normal/ T45 "Barrotes circulares"	5.12

**Fuente:** Braulio Morocho

En la figura 23, se observa el promedio de diferencia de eficiencia de captación entre cada modelo, para el escenario S1.



**Figura 23.** Promedio de la diferencia de eficiencia de los modelos, pendiente transversal 2% y longitudinal 0.5%

**Fuente:** Braulio Morocho

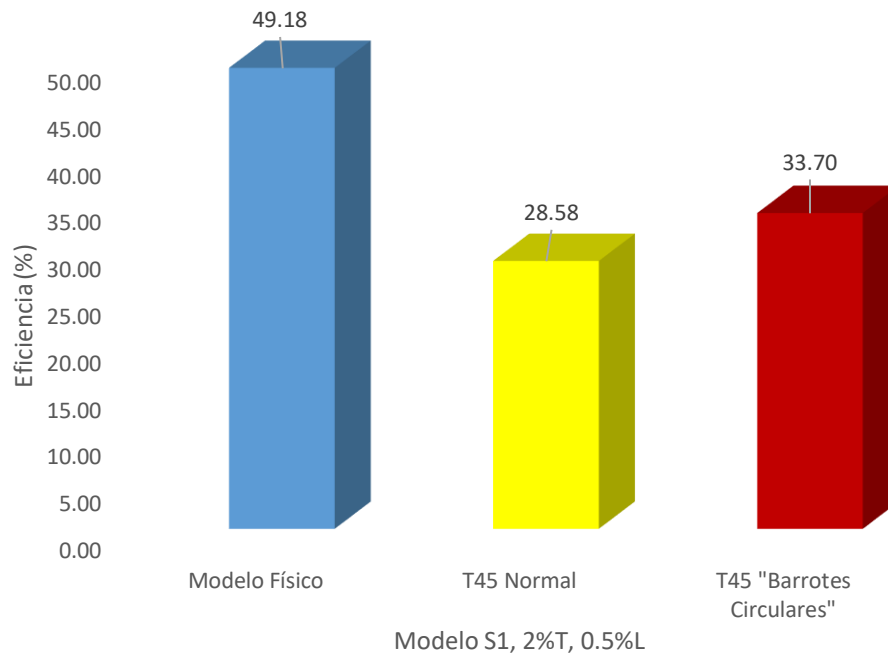
El promedio de eficiencia de los diferentes modelos para el escenario S1, se presenta en la tabla 18.

**Tabla 18.** Promedio de la eficiencia de los diferentes modelos, pendiente transversal 2% y longitudinal 0.5%, modelo S1

Q (l/s)	Eficiencia (%)		
	Modelo Físico	T45 Normal	T45 "Barrotes Circulares"
16.91	92.86	46.78	51.78
47.85	45.78	28.13	34.31
79.75	32.34	21.89	27.24
111.65	25.73	17.52	21.46
<b>Promedio E</b>	49.18	28.58	33.70

Fuente: Braulio Morocho

La figura 24 representa la eficiencia del modelo físico, modelo numérico T45 normal y T45 modificado con barrotes circulares.



**Figura 24.** Promedio de eficiencia de los modelos analizados, modelo S1, pendiente transversal 2% y longitudinal 0.5%.

Fuente: Braulio Morocho

En las tablas 19, 20 y 21, se presentan los caudales a escala y su porcentaje de eficiencia de captación para el escenario S1, con pendiente 2%T y 4%L.

**Tabla 19.** Eficiencia de captación Modelo Físico T45, S1, pendiente transversal 2% y longitudinal 4%

Q Real	Q Escala	%Eficiencia
16.91	0.53	71.29
47.85	1.5	36.26
79.75	2.5	26.01
111.65	3.5	20.90

Fuente: Braulio Morocho

**Tabla 20.** Eficiencia de captación Modelo T45 normal, S1, pendiente transversal 2% y longitudinal 4%

Q Real	Q Escala	Q capt. Real	Q cap. Escala	% Eficiencia
16.91	0.53	6.75	0.212	39.92
47.85	1.5	14	0.439	29.26
79.75	2.5	18.4	0.577	23.07
111.65	3.5	21.36	0.670	19.13

Fuente: Braulio Morocho

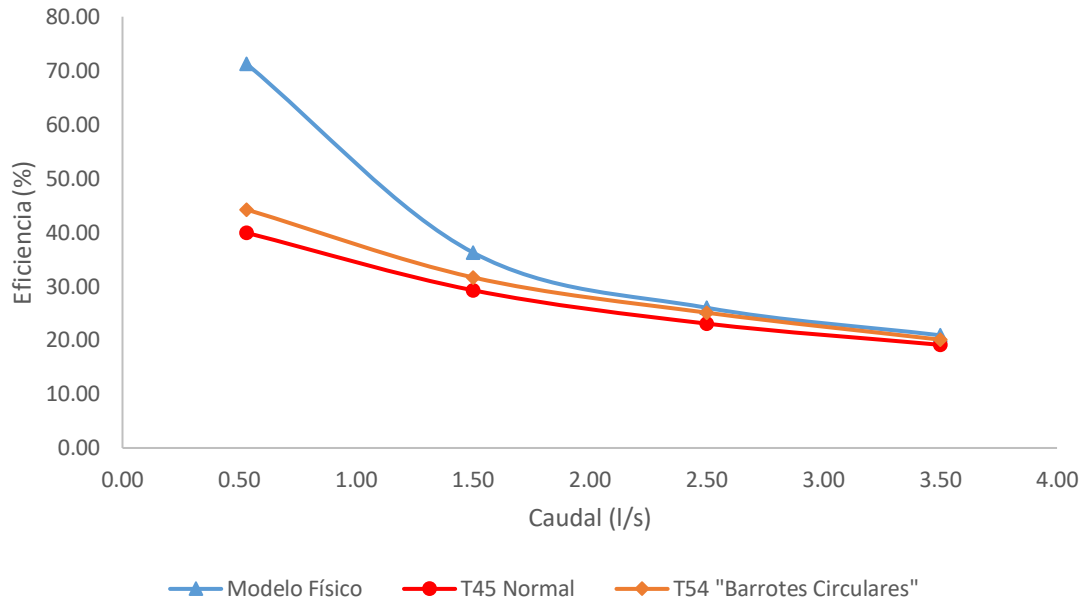
**Tabla 21.** Eficiencia de captación Modelo T45 modificado con barrotes circulares S1, pendiente transversal 2% y longitudinal 4%

Q Real	Q Escala	Q capt. Real	Q cap. Escala	% Eficiencia
16.91	0.53	7.48	0.235	44.24
47.85	1.50	15.14	0.475	31.64
79.75	2.50	20.01	0.627	25.10
111.65	3.50	22.43	0.703	20.09

Fuente: Braulio Morocho



De acuerdo a la figura 25, la tendencia de los diferentes modelos analizados en investigaciones anteriores y la actual es similar.



**Figura 25.** Comparación de la eficiencia de captación del modelo S1, con pendiente transversal del 2% y longitudinal 4%, de las diferentes investigaciones realizadas.

**Fuente:** Braulio Morocho

En las tablas 22, 23 y 24, se presenta el porcentaje de diferencia entre los diferentes modelos para el escenario S1, además en la tabla 25, se presenta el promedio del porcentaje de diferencia de captación.

**Tabla 22.** Diferencia entre el Modelo Físico y Sumidero T45, con pendiente transversal de 2% y longitudinal de 4%, modelo S1

Q (l/s)	Eficiencia (%)		% ΔE
	Modelo Físico	T45 Normal	
16.91	71.29	39.92	31.37
47.85	36.26	29.26	7.00
79.75	26.01	23.07	2.94
111.65	20.90	19.13	1.77
<b>Promedio % ΔE</b>			<b>10.77</b>

**Fuente:** Braulio Morocho

**Tabla 23.** Diferencia entre el modelo Físico y sumidero T45 modificado con barrotes circulares, con pendiente transversal de 2% y longitudinal de 4%, modelo S1

Q (l/s)	Eficiencia (%)		% ΔE
	Modelo Físico	T45 "Barrotes Circulares"	
16.91	71.29	44.24	27.05
47.85	36.26	31.64	4.61
79.75	26.01	25.10	0.92
111.65	20.90	20.09	0.81
<b>Promedio % ΔE</b>			<b>8.35</b>

Fuente: Braulio Morocho

**Tabla 24.** Diferencia entre el sumidero T45 y T45 modificado con barrotes circulares, con pendiente transversal de 2% y longitudinal de 4%, modelo S1

Q (l/s)	Eficiencia (%)		% ΔE
	T45 "Barrotes Circulares"	T45 Normal	
16.91	44.24	39.92	4.32
47.85	31.64	29.26	2.39
79.75	25.10	23.07	2.02
111.65	20.09	19.13	0.96
<b>Promedio % ΔE</b>			<b>2.42</b>

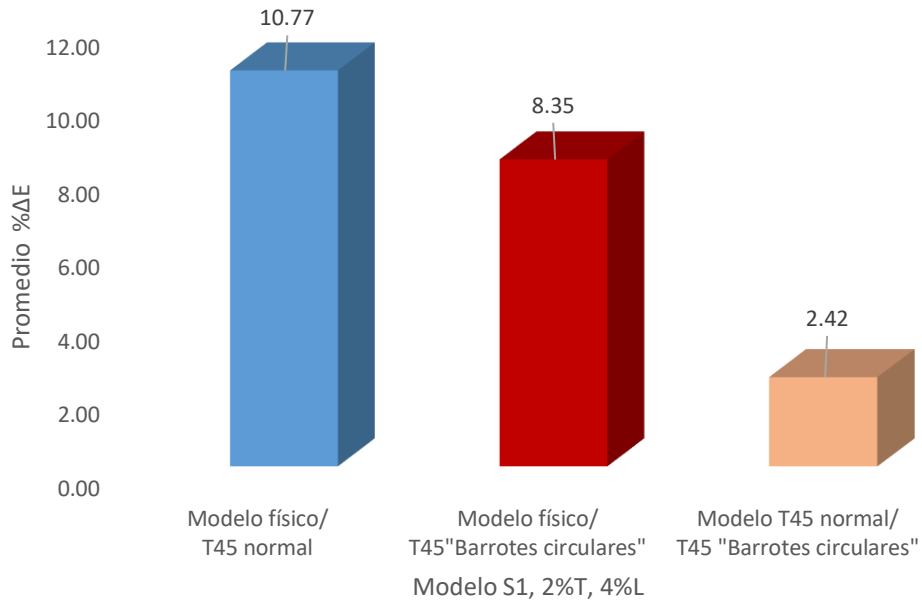
Fuente: Braulio Morocho

**Tabla 25.** Promedio de la diferencia de eficiencia, pendiente transversal 2% y longitudinal 4%, modelo S1

Modelos	Promedio %Δ E
Modelo físico/ T45 normal	10.77
Modelo físico/ T45"Barrotes circulares"	8.35
Modelo T45 normal/ T45 "Barrotes circulares"	2.42

Fuente: Braulio Morocho

El promedio de la diferencia de eficiencias de captación para pendiente 2%T y 4%L, se observa en la figura 26.



**Figura 26.** Promedio de la diferencia de eficiencia, pendiente transversal 2% y longitudinal 4%, modelo S1.

**Fuente:** Braulio Morocho

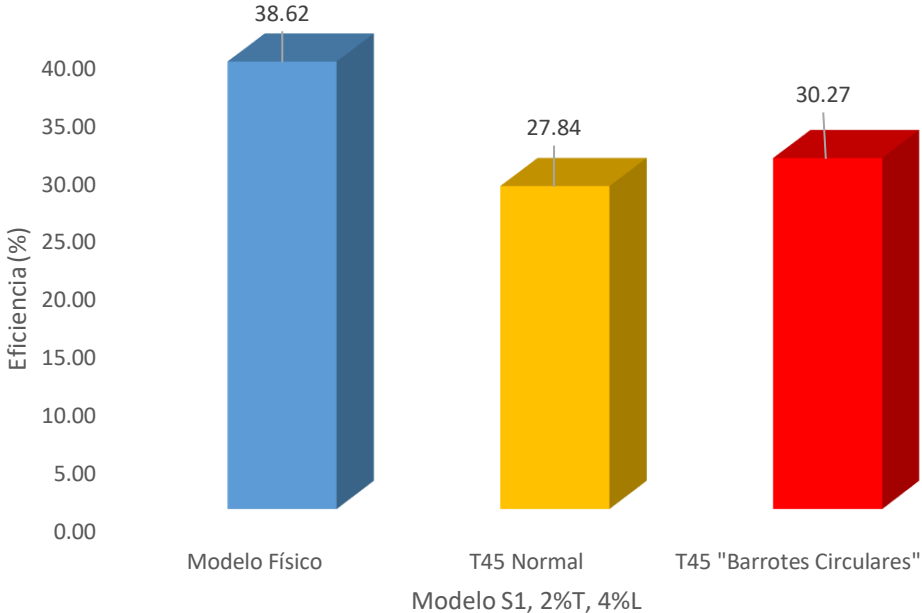
Los valores de eficiencia de los modelos analizados se presentan en la tabla 26, esto para pendiente 2%T y 4%L.

**Tabla 26.** Promedio de eficiencia de los diferentes modelos, pendiente transversal 2% y longitudinal 4%, modelo S1

Q (l/s)	Eficiencia (%)		
	Modelo Físico	T45 Normal	T45 "Barrotes Circulares"
16.91	71.29	39.92	44.24
47.85	36.26	29.26	31.64
79.75	26.01	23.07	25.10
111.65	20.90	19.13	20.09
<b>Promedio E</b>	<b>38.62</b>	<b>27.84</b>	<b>30.27</b>

**Fuente:** Braulio Morocho

En la figura 27 se observa los valores de promedio de eficiencia de los diferentes modelos analizados, del escenario S1 con pendiente 2%T y 4%L.



**Figura 27.** Promedio de eficiencia de los diferentes modelos analizados, modelo S1, pendiente transversal 2% y longitudinal 4%

**Fuente:** Braulio Morocho

### 3.1.1.4 Curva de eficiencia del modelo numérico

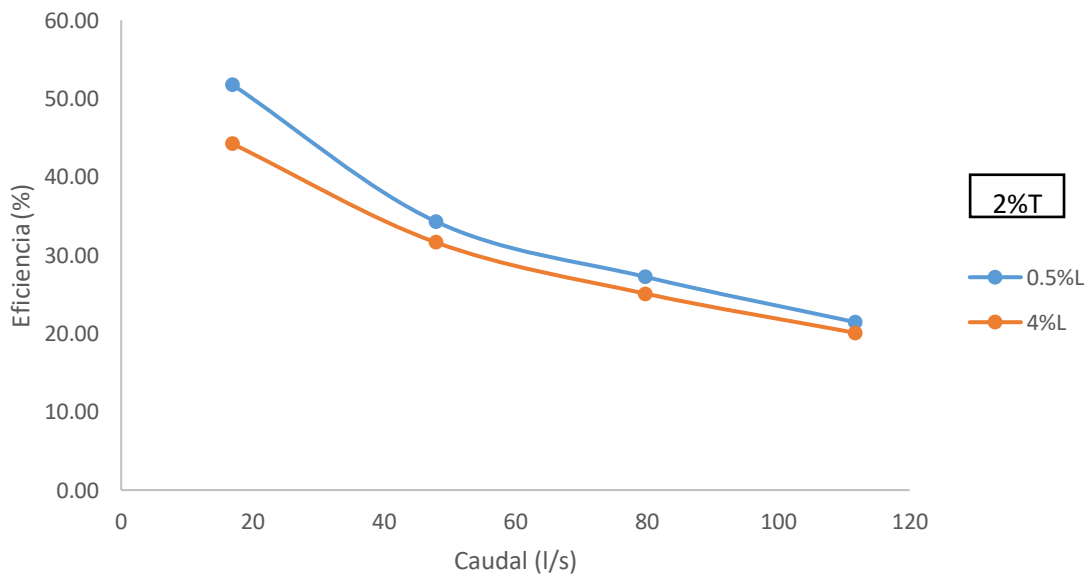
#### Modelo S1

En la tabla 27 se presentan los valores de eficiencia de captación, y en la figura 28 se observa la tendencia de los mismos, para pendiente 2% transversal y pendiente longitudinal de 0.5% y 4%, del modelo S1.

**Tabla 27.** Eficiencia de captación del sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S1, con pendiente transversal del 2% y con diferentes pendientes longitudinales (0.5%, 4%).

Caudal (l/s)	Eficiencia (%)	
	2%T, 0.5%L	2%T, 4%L
16.91	51.78	44.24
47.85	34.31	31.64
79.75	27.24	25.10
111.65	21.46	20.09

Fuente: Braulio Morocho



**Figura 28.** Eficiencia de captación del sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S1, con pendiente transversal del 2% y con diferentes pendientes longitudinales (0.5%, 4%).

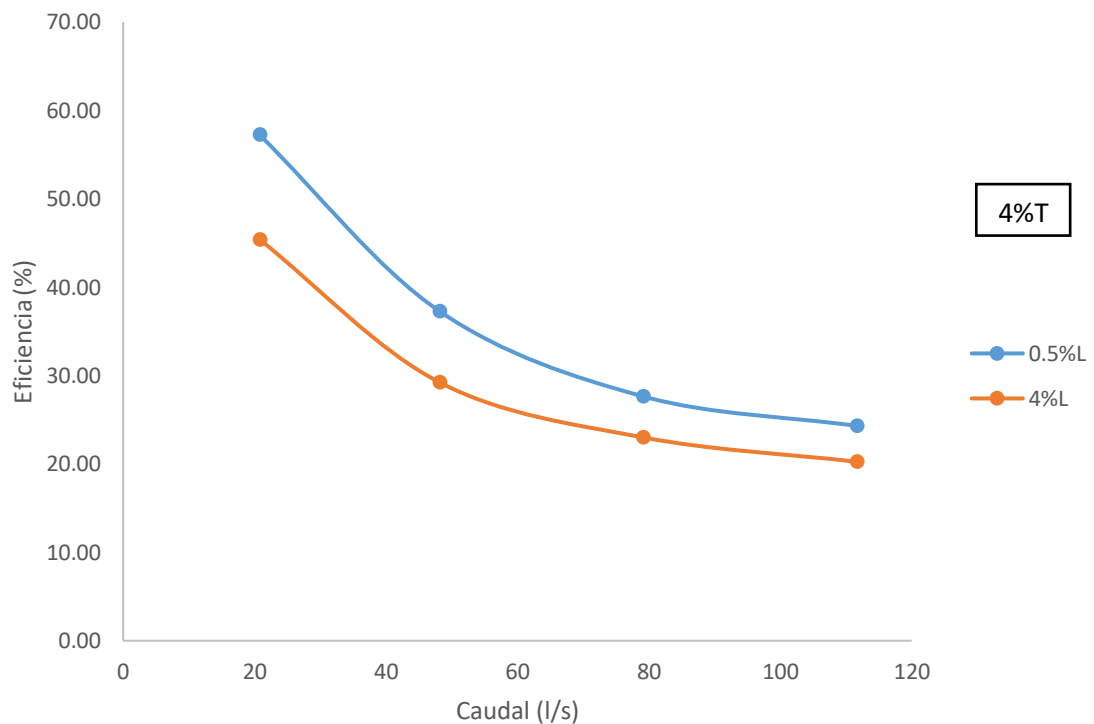
Fuente: Braulio Morocho

Los valores de eficiencia de captación se presentan en la tabla 28, y en la figura 29 se observa la tendencia de los mismos, para pendiente 4% transversal y pendiente longitudinal de 0.5% y 4%, del modelo S1.

**Tabla 28.** Eficiencia de captación del sumidero T45 modificado con barros circulares, modelo S1, con pendiente transversal del 4% y con diferentes pendientes longitudinales (0.5%, 4%).

Caudal (l/s)	Eficiencia (%)	
	4%T, 0.5%L	4%T, 4%L
20.74	57.24	45.41
48.17	37.26	29.22
79.11	27.65	23.01
111.65	24.30	20.25

Fuente: Braulio Morocho



**Figura 29.** Eficiencia de captación del sumidero T45 modificado con barros circulares, modelo S1, con pendiente transversal del 4% y con diferentes pendientes longitudinales (0.5%, 4%).

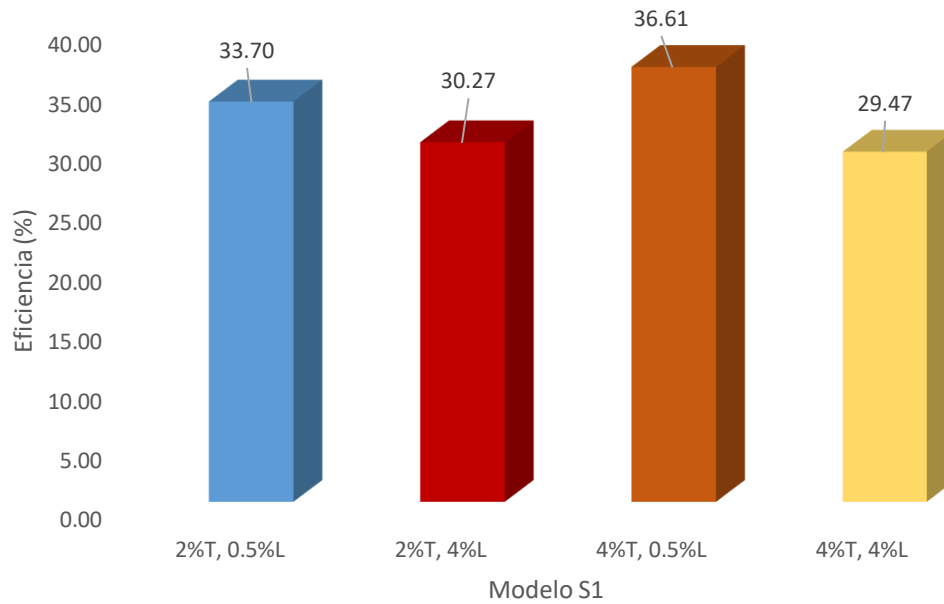
Fuente: Braulio Morocho

El porcentaje promedio de eficiencia de captación de los diferentes escenarios se presenta en la tabla 29, y en la figura 30 se observa la representación de dichos valores.

**Tabla 29.** Porcentaje promedio de la eficiencia del sumidero T45 modificado con barros circulares de los escenarios analizados, modelo S1

Pendiente	Promedio E
2%T, 0.5%L	33.70
2%T, 4%L	30.27
4%T, 0.5%L	36.61
4%T, 4%L	29.47

**Fuente:** Braulio Morocho



**Figura 30.** Porcentaje promedio de las eficiencias del sumidero T45 modificado con barros circulares de los escenarios analizados en el modelo S1.

**Fuente:** Braulio Morocho

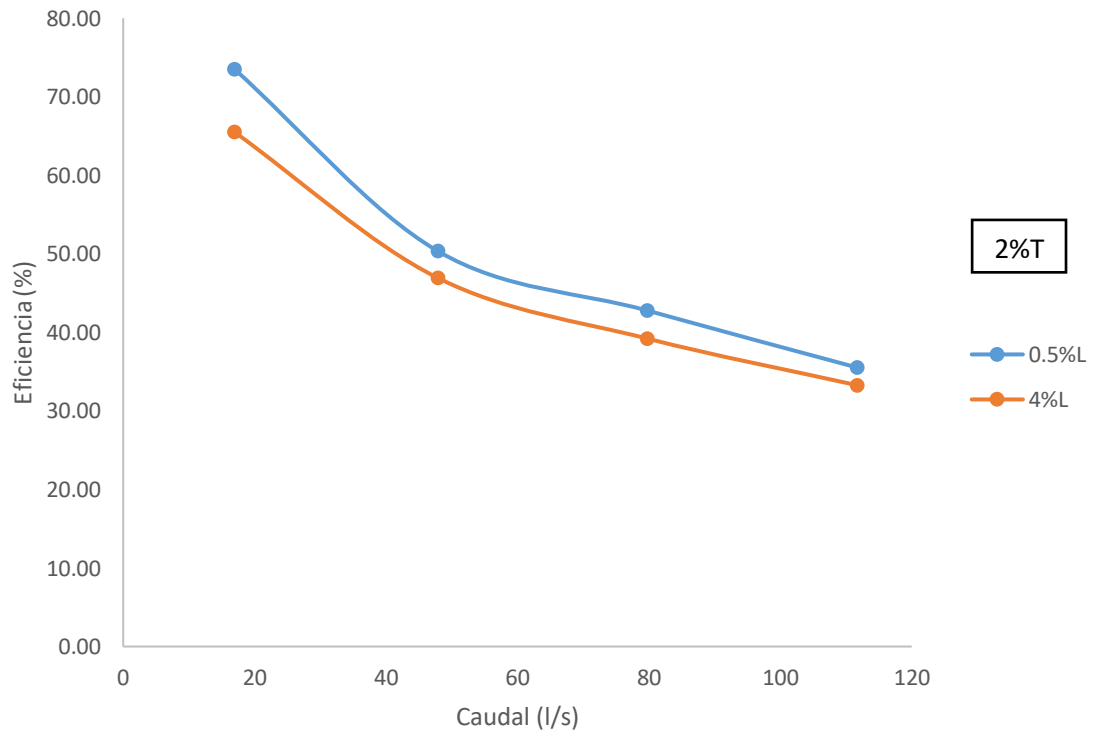
## Modelo S2

Los valores de eficiencia de captación se presentan en la tabla 30, y en la figura 31 se observa la tendencia de los mismos, para pendiente 2% transversal y pendiente longitudinal de 0.5% y 4%, del modelo S2.

**Tabla 30.** Eficiencia de captación del sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S2, con pendiente transversal del 2% y con diferentes pendientes longitudinales de (0.5%, 4%).

Caudal (l/s)	Eficiencia (%)	
	2%T, 0.5%L	2%T, 4%L
16.91	73.53	65.52
47.85	50.36	46.94
79.75	42.78	39.21
111.65	35.53	33.28

Fuente: Braulio Morocho



**Figura 31.** Eficiencia de captación del sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S2, con pendiente transversal del 2% y con diferentes pendientes longitudinales de (0.5%, 4%).

Fuente: Braulio Morocho

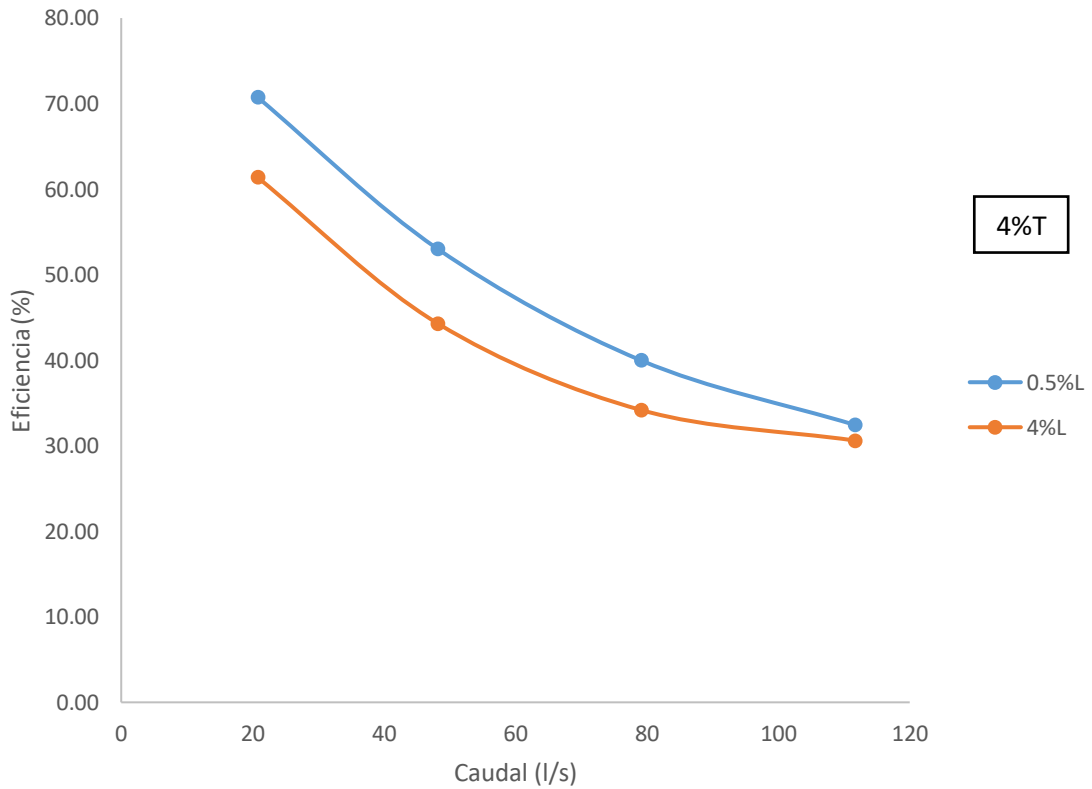


En la tabla 31 se presentan los valores de eficiencia de captación del modelo S2, mientras que en la figura 32 se representa la tendencia de dichos valores, esto para pendiente transversal de 4% y longitudinal de 0.5% y 4%.

**Tabla 31.** Eficiencia de captación del sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S2, con pendiente transversal del 4% y longitudinales de (0.5%, 4%)

Caudal (l/s)	Eficiencia (%)	
	4%T, 0.5%L	4%T, 4%L
20.74	70.75	61.38
48.17	53.00	44.29
79.11	39.97	34.17
111.65	32.44	30.60

Fuente: Braulio Morocho



**Figura 32.** Eficiencia de captación del sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S2, con pendiente transversal del 4% y longitudinales de (0.5%, 4%).

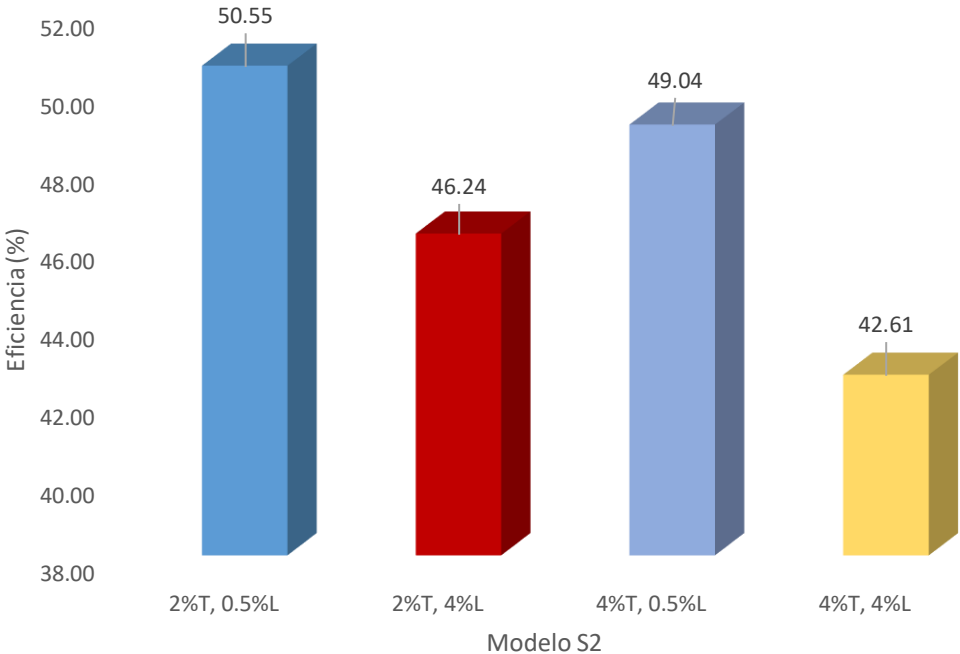
Fuente: Braulio Morocho

Los valores promedio de eficiencia se presentan en la tabla 32, esos valores se observan gráficamente en la figura 33, esto para el modelo S2 con diferentes escenarios.

**Tabla 32.** Promedio de eficiencia del sumidero T45 modificado con barros circulares de los escenarios analizados para el modelo S2

Pendiente	Promedio E
2%T, 0.5%L	50.55
2%T, 4%L	46.24
4%T, 0.5%L	49.04
4%T, 4%L	42.61

**Fuente:** Braulio Morocho



**Figura 33.** Promedio de eficiencia del sumidero T45 modificado con barros circulares de los escenarios para el modelo S2.

**Fuente:** Braulio Morocho

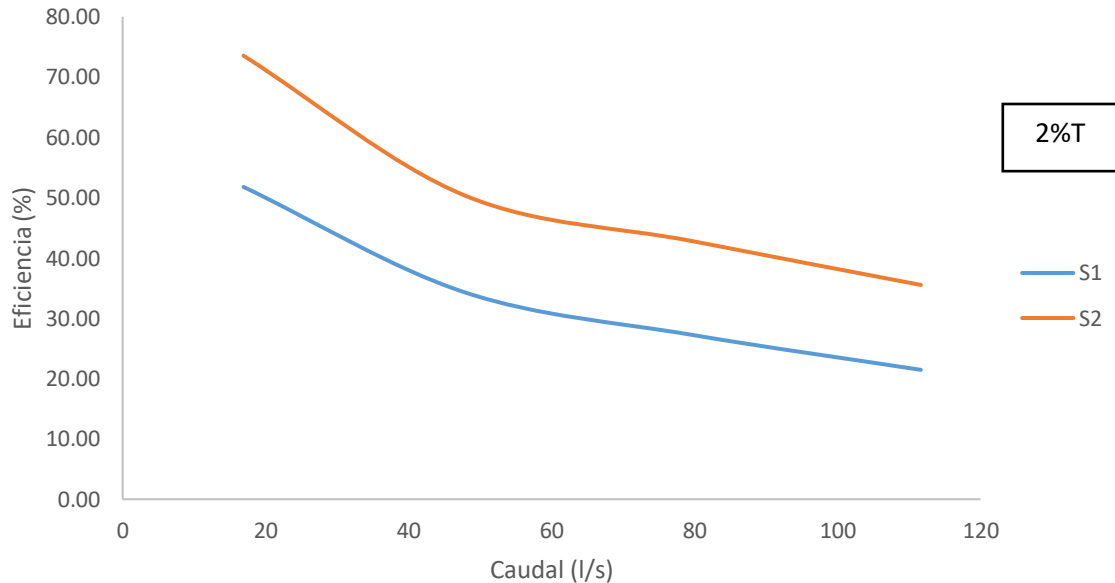
## Comparación de resultados Modelo S1 y S2

En la tabla 33 se representa las eficiencias de los modelos S1 y S2, también los valores de la diferencia de eficiencia, para diferentes escenarios. En la figura 34 se observa la curva de eficiencia de los modelos analizados, para pendiente transversal 2% y longitudinal de 0.5%.

**Tabla 33.** Eficiencia de captación sumidero T45 modificado con barroses circulares, modelo S1 y S2, con pendiente transversal del 2% y longitudinal de 0.5%

Q l/s	Eficiencia (%)		%ΔEficiencia
	Modelo S1	Modelo S2	
16.91	51.78	73.53	21.75
47.85	34.31	50.36	16.05
79.75	27.24	42.78	15.55
111.65	21.46	35.53	14.07
<b>Promedio %Δ Eficiencia</b>			<b>16.86</b>

Fuente: Braulio Morocho



**Figura 34.** Comparación de la Eficiencia de captación sumidero T45 modificado con barroses circulares, modelo S1 y S2, con pendiente transversal del 2% y longitudinal de 0.5%.

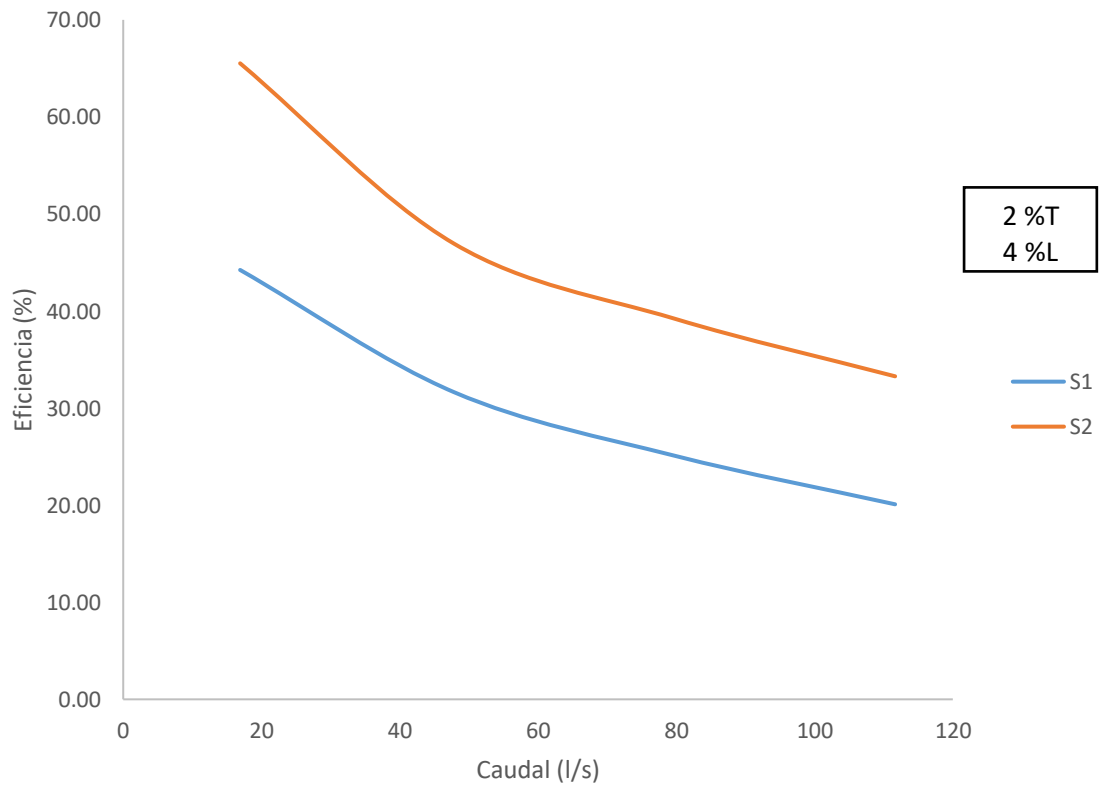
Fuente: Braulio Morocho

La diferencia de eficiencia de captación de los diferentes escenarios, de los modelos S1 y S2, se representan en la tabla 34, además las curvas de eficiencia se observan en la figura 35, para pendiente transversal 2% y longitudinal de 4%.

**Tabla 34.** Eficiencia de captación sumidero T45 modificado con barros circulares, modelo S1 y S2, con pendiente transversal del 2% y longitudinal de 4%

Q l/s	Eficiencia (%)		%ΔEficiencia
	Modelo S1	Modelo S2	
16.91	44.24	65.52	21.29
47.85	31.64	46.94	15.30
79.75	25.10	39.21	14.12
111.65	20.09	33.28	13.19
<b>Promedio %Δ Eficiencia</b>			<b>15.97</b>

Fuente: Braulio Morocho



**Figura 35.** Comparación de la Eficiencia de captación sumidero T45 modificado con barros circulares, modelo S1 y S2, con pendiente transversal del 2% y longitudinal de 4%.

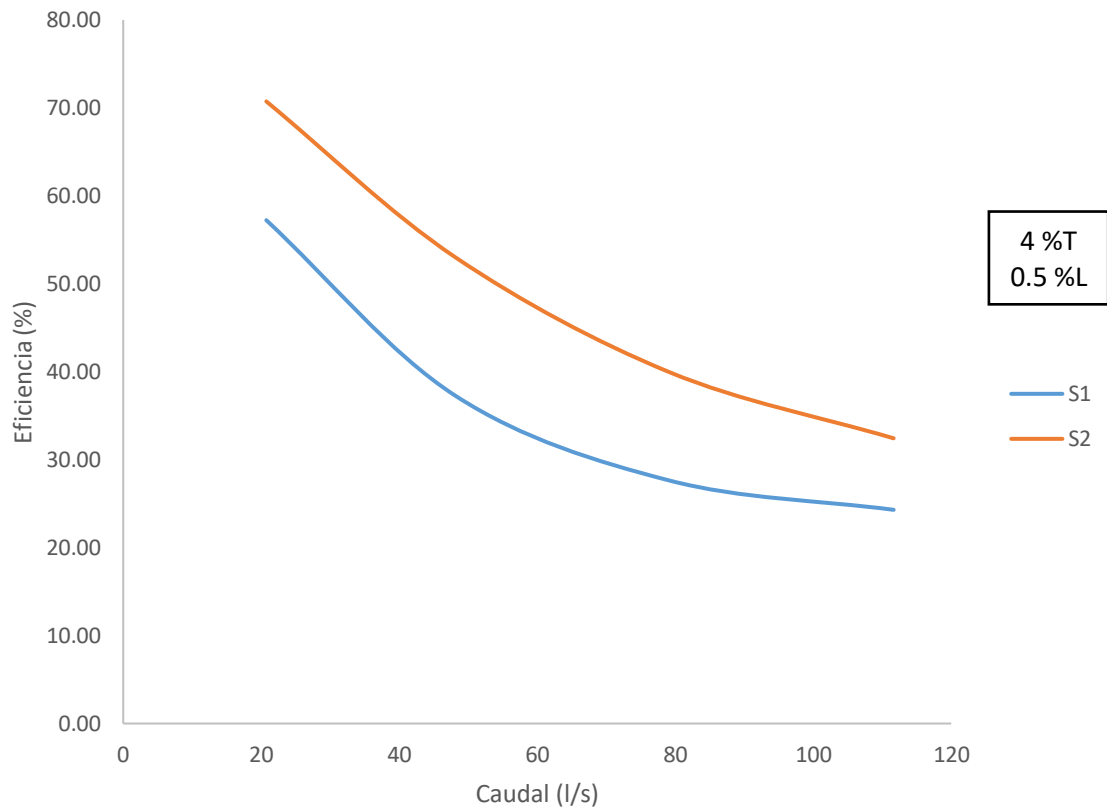
Fuente: Braulio Morocho

Las eficiencias de los modelos S1 y S2, y el porcentaje de diferencia entre estos, se encuentra en la tabla 35, la representación de las curvas de eficiencia de estos modelos se observa en la figura 36, para pendiente transversal 4% y longitudinal 0.5%.

**Tabla 35.** Eficiencia de captación sumidero T45 modificado con barroses circulares, modelo S1 y S2, con pendiente transversal del 4% y longitudinal de 0.5%

Q l/s	Eficiencia (%)		%ΔEficiencia
	Modelo S1	Modelo S2	
20.74	57.24	70.75	13.51
48.17	37.26	53.00	15.74
79.11	27.65	39.97	12.33
111.65	24.30	32.44	8.13
<b>Promedio %Δ Eficiencia</b>			<b>12.43</b>

Fuente: Braulio Morocho



**Figura 36.** Comparación de la Eficiencia de captación sumidero T45 modificado con barroses circulares, modelo S1 y S2, con pendiente transversal del 4% y longitudinal de 0.5%.

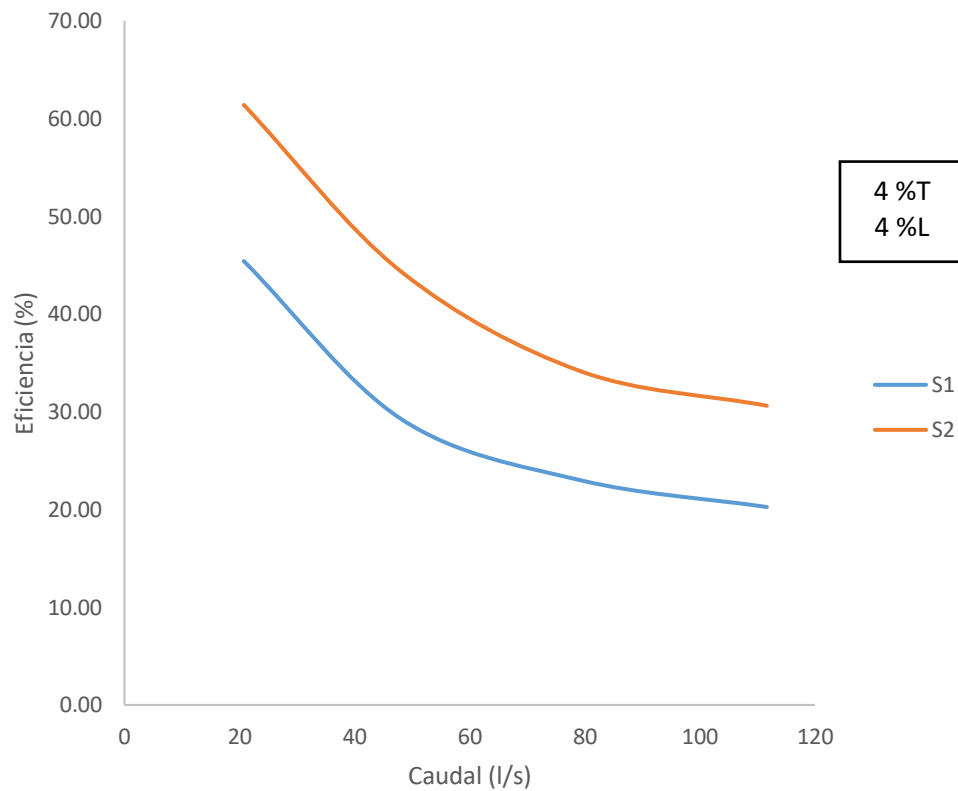
Fuente: Braulio Morocho

En la tabla 36, se presentan los valores de la diferencia de eficiencia de los modelos S1 y S2, junto con las eficiencias de cada modelo, las curvas de eficiencia de las mismas se observan en la figura 37, para pendiente transversal y longitudinal de 4%.

**Tabla 36.** Eficiencia de captación sumidero T45 modificado con barros circulares, modelo S1 y S2, con pendiente transversal del 4% y longitudinal de 4%

Q l/s	Eficiencia (%)		%ΔEficiencia
	Modelo S1	Modelo S2	
20.74	45.41	61.38	15.97
48.17	29.22	44.29	15.07
79.11	23.01	34.17	11.17
111.65	20.25	30.60	10.36
<b>Promedio %Δ Eficiencia</b>			<b>13.14</b>

Fuente: Braulio Morocho



**Figura 37.** Comparación de la Eficiencia de captación sumidero T45 modificado con barros circulares, modelo S1 y S2, con pendiente transversal del 4% y longitudinal de 4%.

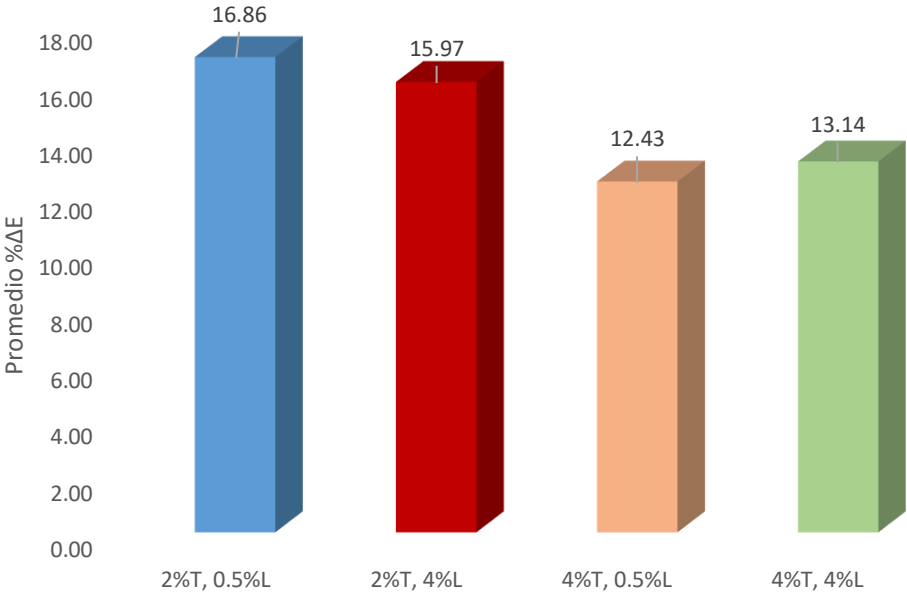
Fuente: Braulio Morocho

El promedio de diferencia de las eficiencias de captación de entre el modelo S1 y S2 de los diferentes escenarios propuestos se encuentran en la tabla 37, y la representación gráfica de los mismos se observa en la figura 38.

**Tabla 37.** Promedio del porcentaje de incremento de eficiencia de captación, diferentes escenarios, entre los modelos S1 y S2

Pendiente	Promedio % $\Delta E$
2%T, 0.5%L	16.86
2%T, 4%L	15.97
4%T, 0.5%L	12.43
4%T, 4%L	13.14

Fuente: Braulio Morocho



**Figura 38.** Promedio del porcentaje de incremento de eficiencia de captación, diferentes escenarios, entre el modelo S1 y S2

Fuente: Braulio Morocho

### 3.1.1.5 Curvas caudal en vía vs. Caudal en sumidero

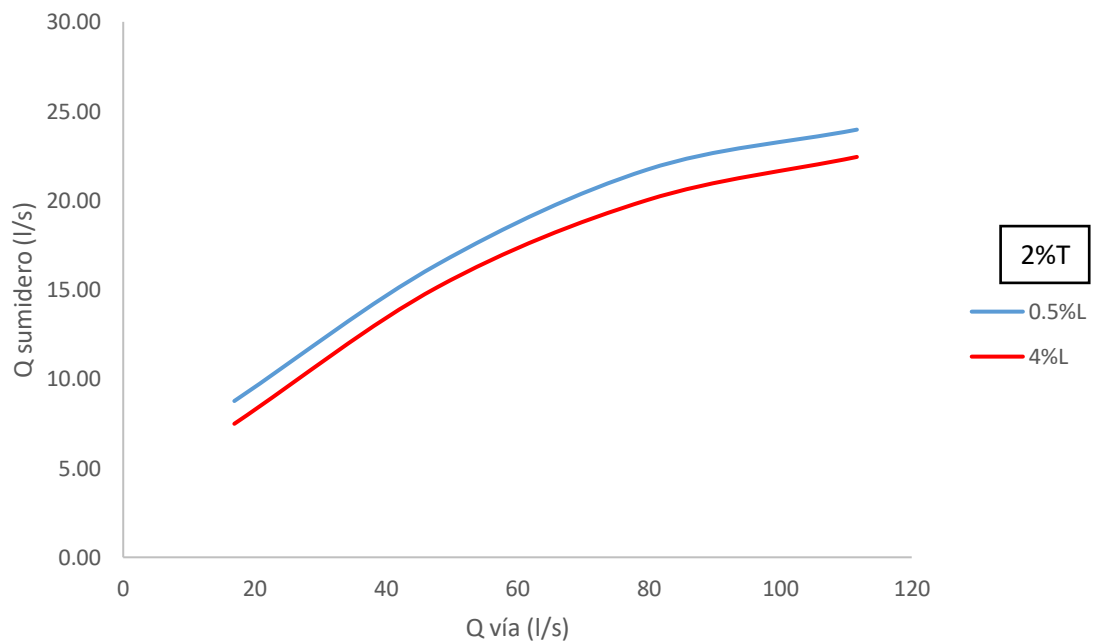
#### Modelo S1

En la tabla 38, son presentados los valores de caudal en vía y caudal en sumidero, mientras que en la figura 39 se observa las curvas de los mismos, para el modelo S1 con pendiente transversal de 2% y longitudinales de 0.5 y 4%.

**Tabla 38.** Caudal en vía vs caudal en sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S1, pendiente transversal de 2% y longitudinal (0.5%, 4%)

Q vía	Q sumidero	
l/s	l/s	
16.91	8.76	7.48
47.85	16.42	15.14
79.75	21.72	20.01
111.65	23.96	22.43

Fuente: Braulio Morocho



**Figura 39.** Curva de caudal en vía vs caudal en sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S1, pendiente transversal de 2% y longitudinal (0.5%, 4%).

Fuente: Braulio Morocho

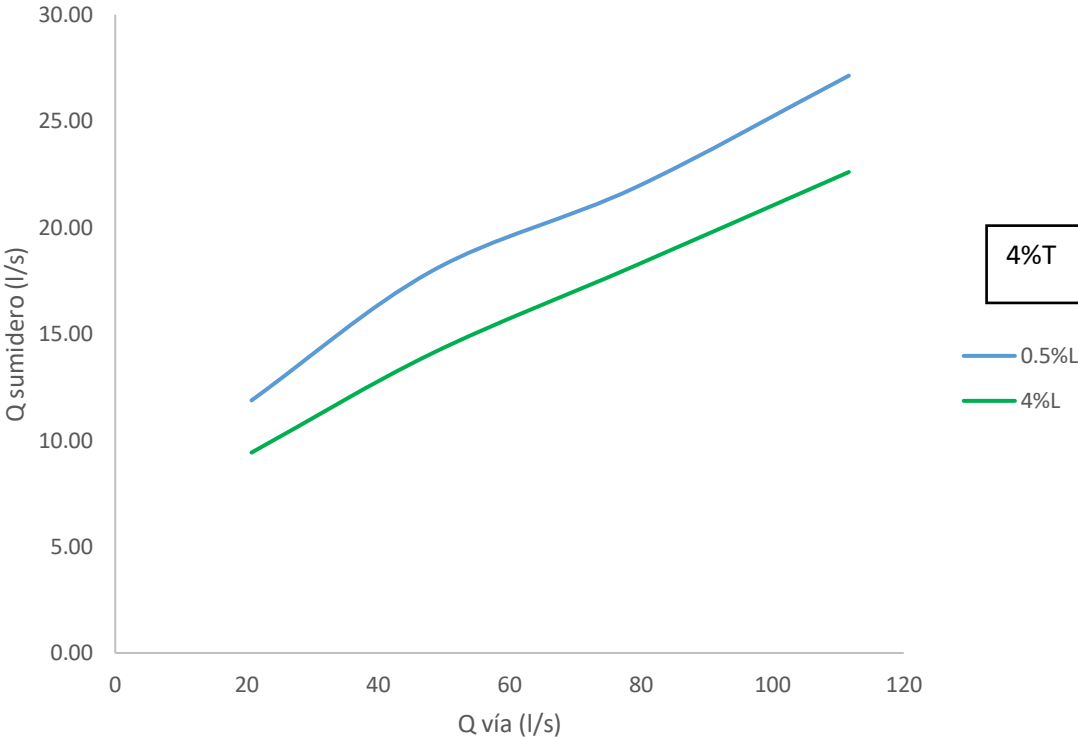


Los valores de caudal en vía y caudal en sumidero son presentados en la tabla 39, y las curvas de los mismos se aprecian en la figura 40, para pendiente transversal 4% y longitudinales 0.5% y 4% del modelo S1.

**Tabla 39.** Caudal en vía vs caudal en sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S1, pendiente transversal de 4% y longitudinal (0.5%, 4%)

Q vía	Q sumidero	
l/s	l/s	
20.74	11.87	9.42
48.17	17.95	14.07
79.11	21.87	18.20
111.65	27.14	22.61

Fuente: Braulio Morocho



**Figura 40.** Curva de caudal en vía vs caudal en sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S1, pendiente transversal de 4% y longitudinal (0.5%, 4%).

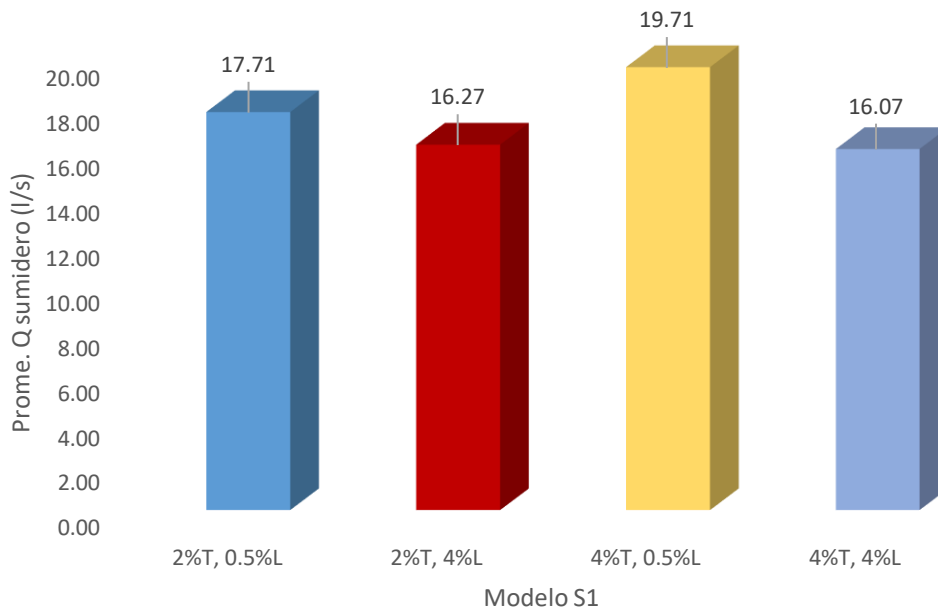
Fuente: Braulio Morocho

El promedio de captación de caudal por el sumidero del modelo S1, para diferentes escenarios, se presenta en la tabla 40, además en la figura 41, se observa la representación de los mismos gráficamente.

**Tabla 40.** Promedio de caudal captado por el sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S1, para diferentes escenarios

Pendiente	Promedio Q Sumidero
2%T, 0.5%L	17.71
2%T, 4%L	16.27
4%T, 0.5%L	19.71
4%T, 4%L	16.07

**Fuente:** Braulio Morocho



**Figura 41.** Promedio del caudal captado por el sumidero T45 modificado con barrotes circulares, modelo S1, para diferentes escenarios.

**Fuente:** Braulio Morocho

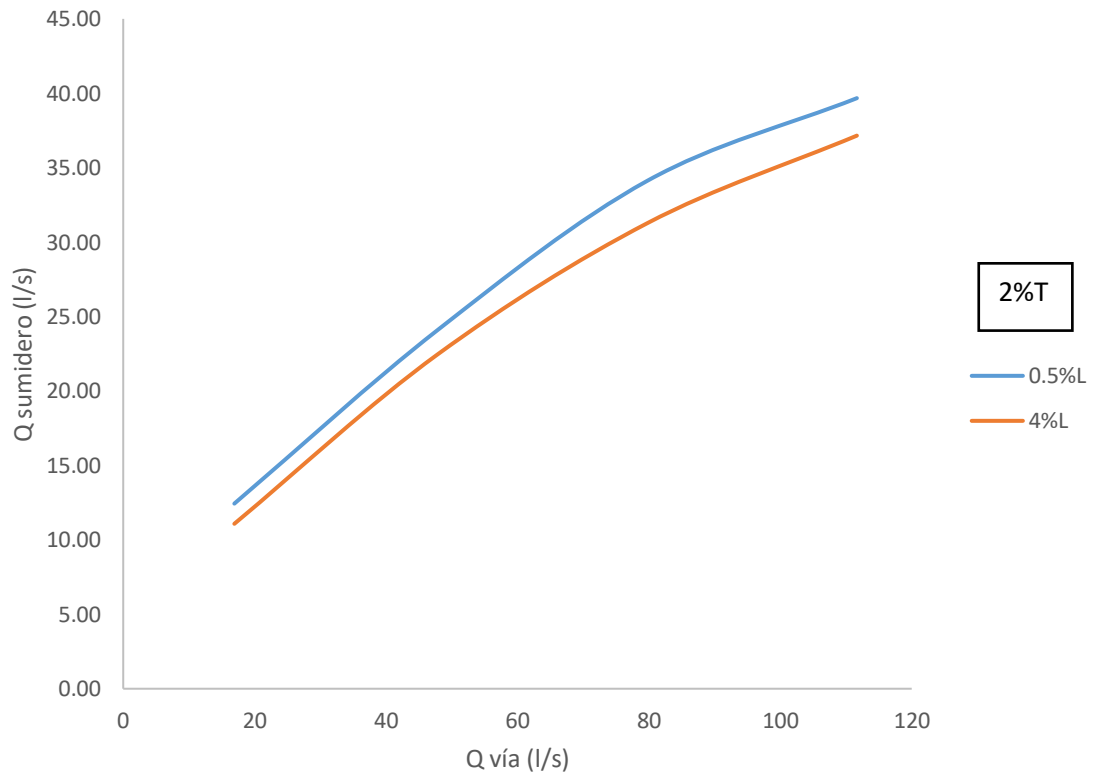
## Modelo S2

Para pendiente transversal 2% y longitudinales de 0.5% y 4%, los valores de caudal en vía y sumidero se encuentran en la tabla 41, las curvas de los mismos se observan en la figura 42, para el modelo S2.

**Tabla 41.** Caudal en vía vs caudal en sumidero T45 modificado con barros circulares, modelo S2, pendiente transversal de 2% y longitudinal (0.5%, 4%)

Q vía	Q sumidero	
l/s	l/s	
16.91	12.43	11.08
47.85	24.10	22.46
79.75	34.12	31.27
111.65	39.67	37.16

Fuente: Braulio Morocho



**Figura 42.** Curva de caudal en vía vs caudal en sumidero T45 modificado con barros circulares, modelo S2, pendiente transversal de 2% y longitudinal (0.5%, 4%).

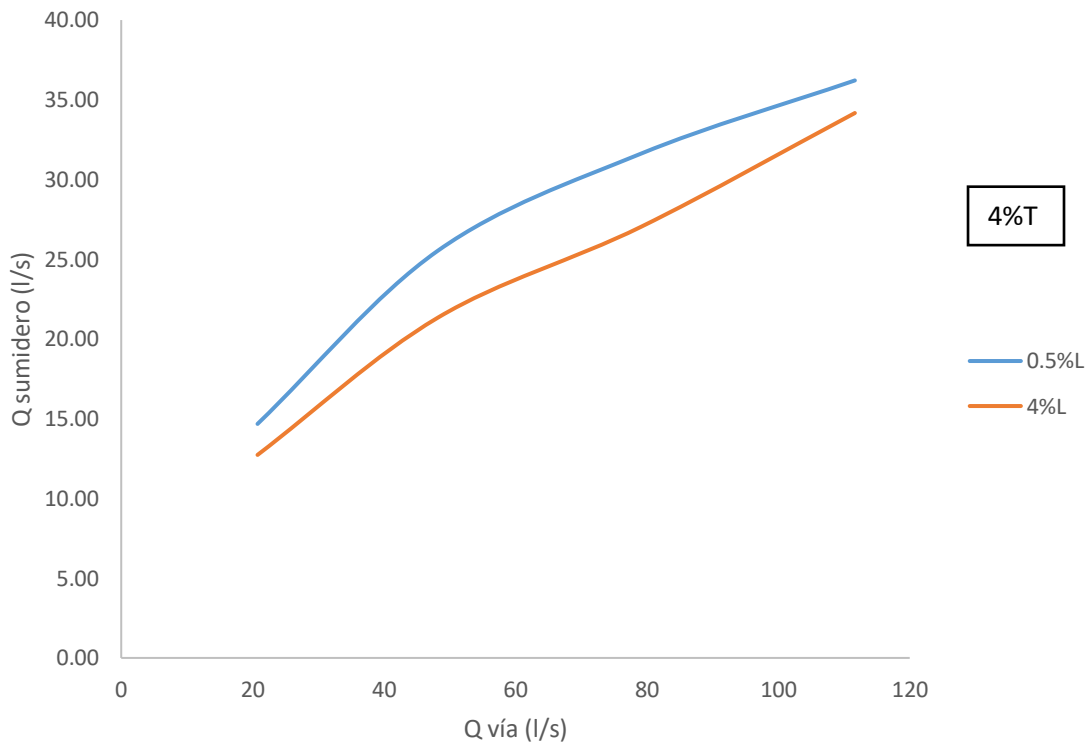
Fuente: Braulio Morocho

Los valores de caudal en vía y sumidero se presentan en la tabla 42, mientras que las curvas de los mismos se observan en la figura 43, para pendiente transversal 4% y longitudinales de 0.5% y 4% del modelo S2.

**Tabla 42.** Caudal en vía vs. caudal en sumidero T45 modificado con barroses circulares, modelo S2, pendiente transversal de 4% y pendientes longitudinales de (0.5%, 4%)

Q vía	Q sumidero	
l/s	l/s	
20.74	14.67	12.73
48.17	25.53	21.33
79.11	31.62	27.03
111.65	36.21	34.17

Fuente: Braulio Morocho



**Figura 43.** Curva de caudal en vía vs caudal en sumidero T45 modificado con barroses circulares, modelo S2, pendiente transversal de 4% y pendientes longitudinales de (0.5%,4%)

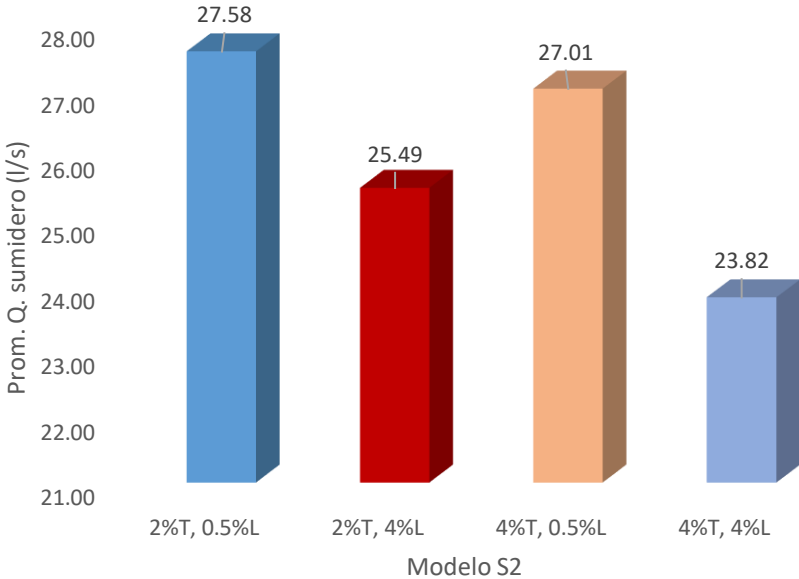
Fuente: Braulio Morocho

Los valores de los promedios de caudales captados por el sumidero T45 modificado con barrotes circulares para diferentes escenarios del modelo S2, se presentan en la tabla 43, y la representación gráfica de los mismos se observa en la figura 44.

**Tabla 43.** Promedio del caudal captado por el sumidero T45 modificado con barrotes circulares, diferentes escenarios, modelo S2

Pendientes	Promedio Q sumidero
2%T, 0.5%L	27.58
2%T, 4%L	25.49
4%T, 0.5%L	27.01
4%T, 4%L	23.82

**Fuente:** Braulio Morocho



**Figura 44.** Promedio de caudal captado por el sumidero T45 modificado con barrotes circulares, diferentes escenarios, modelo S2.

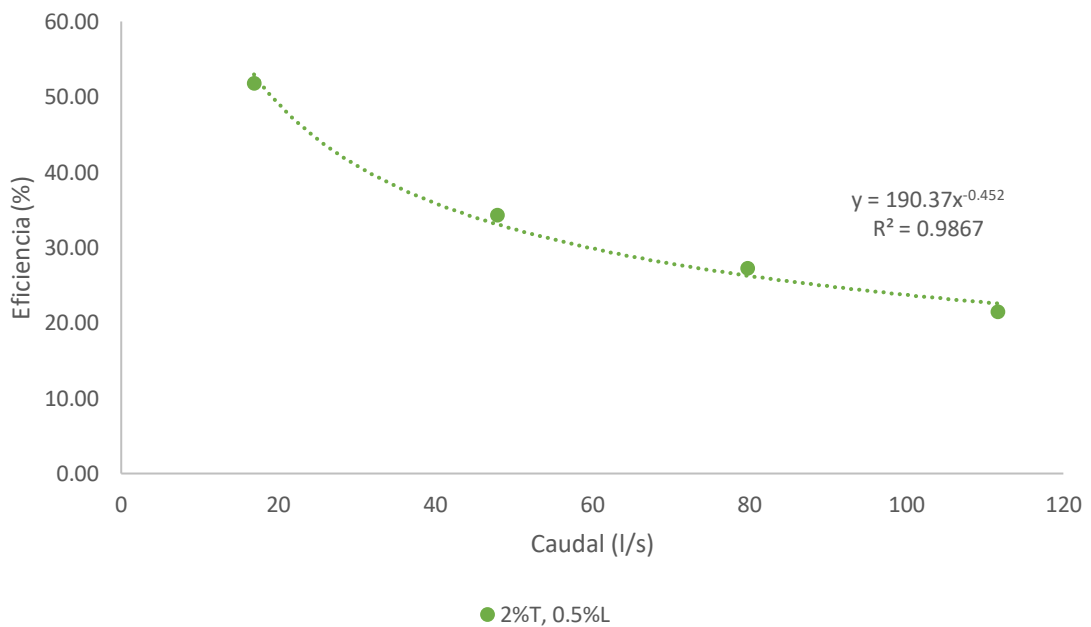
**Fuente:** Braulio Morocho

### 3.1.1.6 Ecuaciones de tendencia y eficiencia

Con los resultados obtenidos de los modelos, tanto de caudales de entrada y caudales captados por el sumidero, mediante la ecuación que se describirá más adelante, se determina ecuaciones para el modelo con las condiciones topográficas analizadas. Estas ecuaciones permitirán estimar la eficiencia de los sumideros tipo T45 modificado con barrotes circulares.

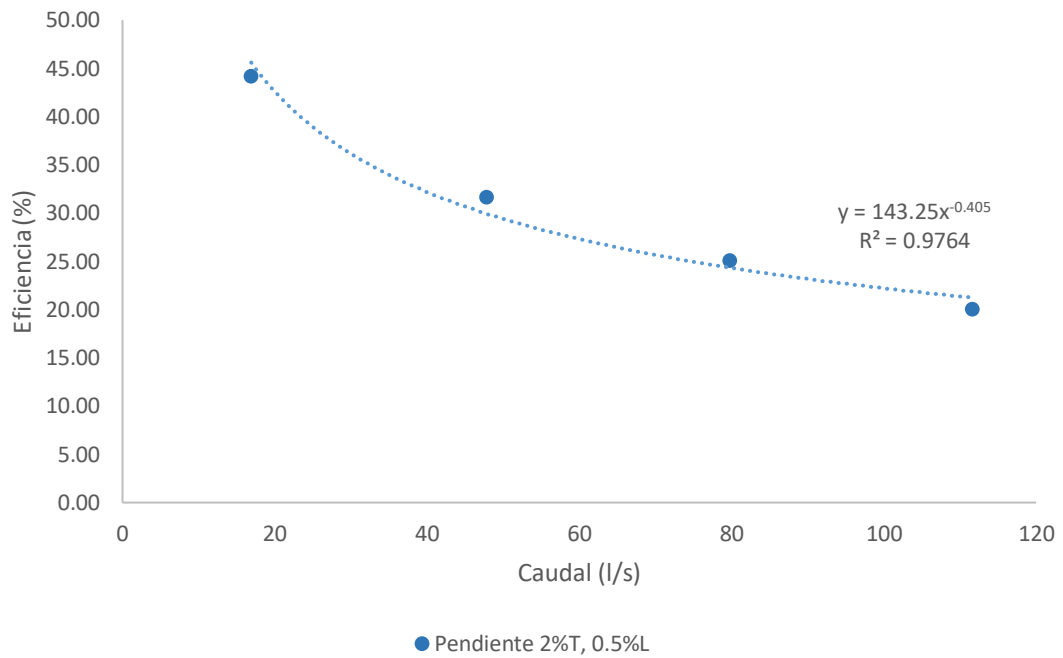
#### Modelo S1

En las figuras 45, 46, 47 y 48 se observan las ecuaciones y  $R^2$  de los diferentes escenarios del modelo S1.



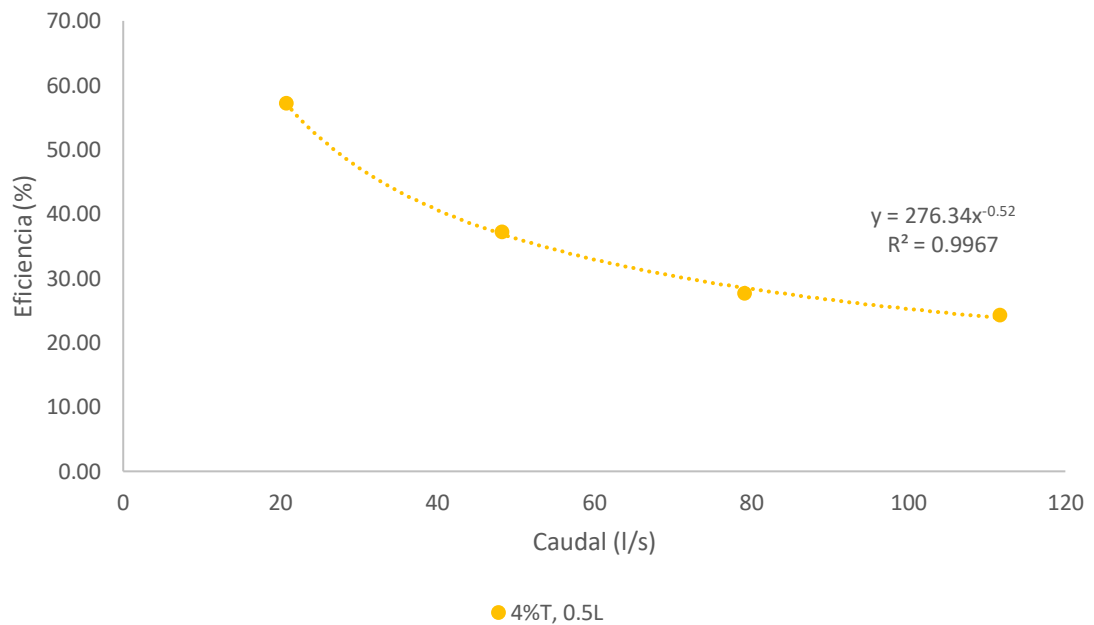
**Figura 45.** Representación de la eficiencia de captación, modelo S1, mediante la ecuación que se presenta, para una pendiente transversal de 2% y longitudinal de 0.5%.

**Fuente:** Braulio Morocho



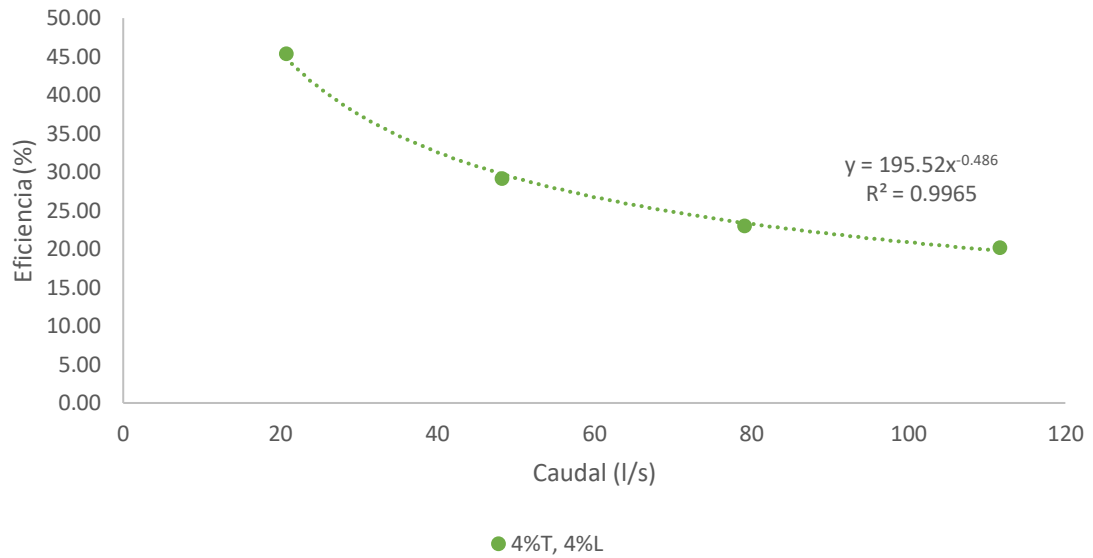
**Figura 46.** Representación de la eficiencia de captación, modelo S1, mediante la ecuación que se presenta, para una pendiente transversal de 2% y longitudinal de 4%.

**Fuente:** Braulio Morocho



**Figura 47.** Representación de la eficiencia de captación, modelo S1, mediante la ecuación que se presenta, para una pendiente transversal de 4% y longitudinal de 0.5%.

**Fuente:** Braulio Morocho

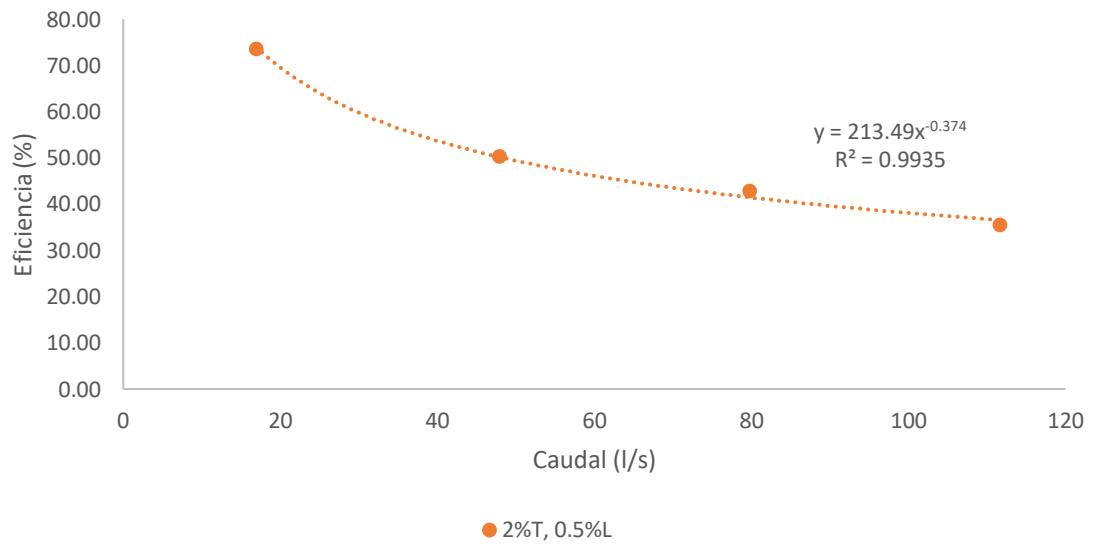


**Figura 48.** Representación de la eficiencia de captación, modelo S1, mediante la ecuación que se presenta, para una pendiente transversal de 4% y longitudinal de 4%.

**Fuente:** Braulio Morocho

## Modelo S2

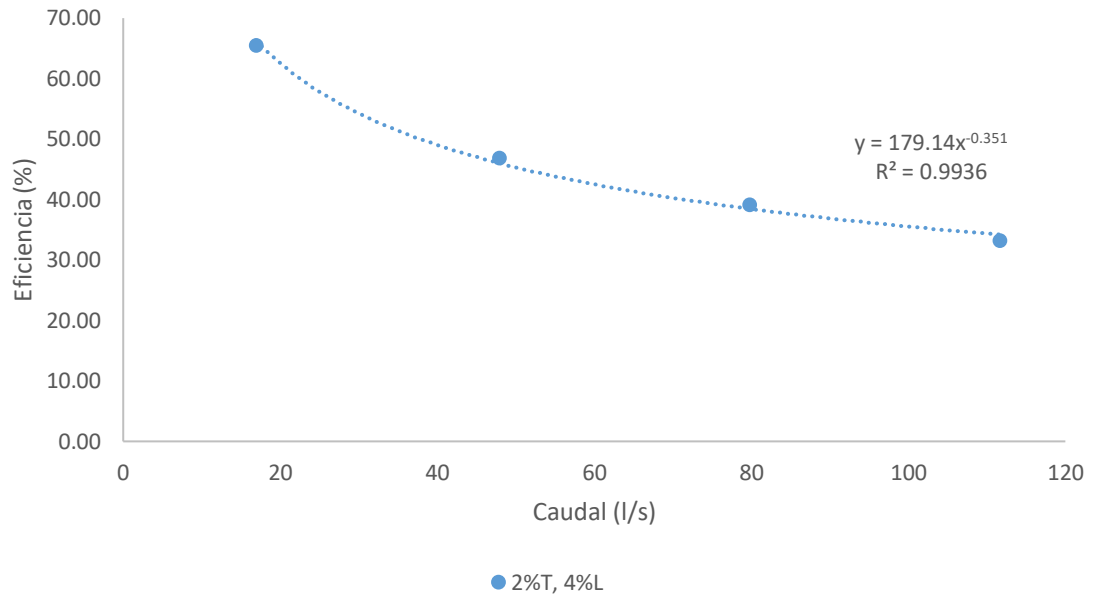
Las ecuaciones y  $R^2$  de los diferentes escenarios del modelo S2 se observan en las figuras 49, 50, 51 y 52.



**Figura 49.** Representación de la eficiencia de captación, modelo S2, mediante la ecuación que se presenta, para una pendiente transversal de 2% y longitudinal de 0.5%

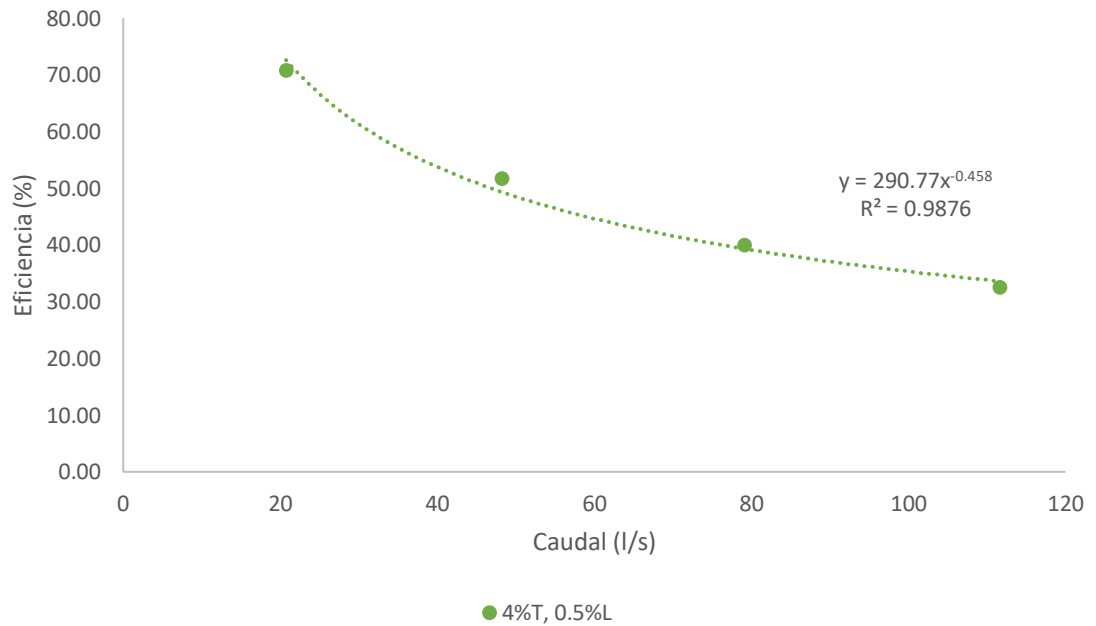
**Fuente:** Braulio Morocho





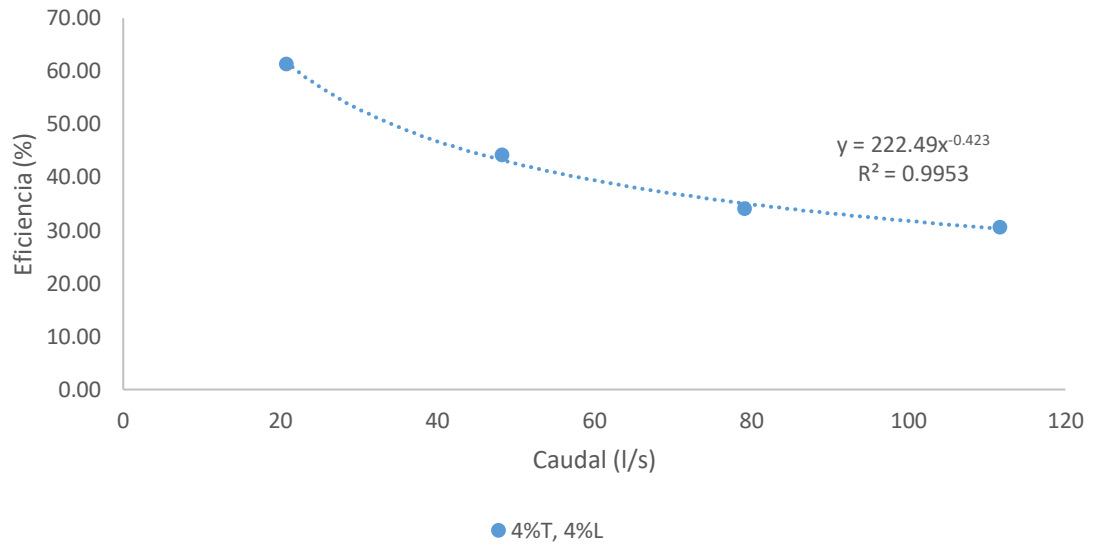
**Figura 50.** Representación de la eficiencia de captación, modelo S2, mediante la ecuación que se presenta, para una pendiente transversal de 2% y longitudinal de 4%.

**Fuente:** Braulio Morocho



**Figura 51.** Representación de la eficiencia de captación, modelo S2, mediante la ecuación que se presenta, para una pendiente transversal de 4% y longitudinal de 0.5%.

**Fuente:** Braulio Morocho



**Figura 52.** Representación de la eficiencia de captación, modelo S2, mediante la ecuación que se presenta, para una pendiente transversal de 4% y longitudinal de 4%.

**Fuente:** Braulio Morocho

Para estimar la eficiencia de drenaje de cualquier sistema se presenta la siguiente ecuación que se describe en el artículo “Cálculo experimental de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas pluviales”:

$$E(i, j, Q) = \beta(i, j) * Q^{-\alpha(i)} \quad (25)$$

La ecuación antes mencionada, depende de dos parámetros, los cuales son adimensionales y para cada caso de estudio son diferentes, se presentan a continuación en la tabla 44 y 45.

**Tabla 44.** Valores numéricos de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  para el modelo S1, con sus respectivas pendientes analizadas

	j= 0.5%	j= 4%
i= 2%	$\alpha= 0.452$ $\beta= 190.37$ $R^2= 0.986$	$\alpha= 0.405$ $\beta= 143.25$ $R^2= 0.976$
i= 4%	$\alpha= 0.52$ $\beta= 276.34$ $R^2= 0.996$	$\alpha= 0.486$ $\beta= 195.52$ $R^2= 0.996$

**Fuente:** Braulio Morocho

**Tabla 45.** Valores numéricos de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  para el modelo S2, con sus respectivas pendientes analizadas

	j= 0.5%	j= 4%
i= 2%	$\alpha= 0.374$ $\beta= 213.49$ $R^2= 0.993$	$\alpha= 0.351$ $\beta= 126.63$ $R^2= 0.993$
i= 4%	$\alpha= 0.458$ $\beta= 290.77$ $R^2= 0.987$	$\alpha= 0.423$ $\beta= 222.49$ $R^2= 0.995$

Fuente: Braulio Morocho

## 3.2 Discusión de resultados

### 3.2.1 Calibración del modelo numérico

En la Figura 22 se observa que la eficiencia del sumidero tipo T45 modificado con barrotes circulares tiene una mayor eficiencia que el sumidero tipo T45 normal, el incremento de la eficiencia de captación que se observa en la figura 23 en esta fase tiene un valor promedio de 5.12%, para el modelo S1 con pendiente transversal de 2% y longitudinal de 0.5%.

Analizando la misma figura 23 tenemos que el modelo físico tiene una mayor eficiencia que el modelo numérico T45 normal, con una eficiencia promedio de 20.60%, de la misma manera el modelo físico tiene un promedio de eficiencia de captación de 15.48% más que el modelo numérico T45 modificado con barrotes circulares, para pendiente transversal de 2% y longitudinal de 0.5% del modelo S1.

Como indica la figura 24 el modelo que tiene mayor eficiencia de captación es el modelo físico ya que su promedio de eficiencia de captación es 49.18%, seguido del modelo numérico T45 modificado con barrotes circulares con un valor de 33.70%, por último, el modelo numérico T45 normal de 28.58%, para el modelo S1, con pendiente transversal y longitudinal de 2% y 0.5% respectivamente.

Al analizar la Figura 25 en la que se tiene pendiente transversal de 2% y longitudinal de 4% se observa el mismo comportamiento que con pendiente longitudinal de 0.5%, donde las curvas tienen la misma tendencia.

De acuerdo a la figura 26, la diferencia promedio de eficiencia de captación entre el modelo físico y modelo numérico T45 normal es 10.77%, entre el modelo físico y modelo numérico T45 modificado con barrotes circulares es 8.35% y entre el modelo numérico T45 normal y modelo numérico T45 modificado con barrotes circulares es 2.42%, para el modelo S1 con pendientes transversal y longitudinal de 2% y 4%.

La eficiencia promedio de captación según la figura 27 para el modelo físico es de 38.62%, modelo numérico T45 normal es 27.84% y modelo numérico T45 modificado con barrotes circulares es 30.27, para el modelo S1 con pendiente transversal, 2% y longitudinal 4%.

Adicionalmente se evidencia que al observar la figura 22 y 25, sin importar el incremento de pendiente longitudinal, a partir de un caudal de 100 litros por segundo, la eficiencia para el sumidero T45 normal y T45 modificado con barrotes circulares tiende a establecerse en un rango de 20% a 30%.

### **3.2.3 Curvas de eficiencia del modelo numérico T45 modificado con barrotes circulares**

Como se observa en las Figuras 28 y 29, en el modelo S1, la eficiencia máxima para una pendiente transversal de (2%, 4%) y longitudinal de (0.5%, 4%), se da cuando los caudales son bajos, por el contrario, las eficiencias de captación mínimas se dan cuando los caudales son altos. De la misma manera se observa que la curva de eficiencia con pendiente longitudinal de 0.5% es mayor que con pendiente longitudinal de 4%, sin que influya de manera significativa la pendiente transversal.

Teniendo en cuenta la figura 30 para el modelo S1, la eficiencia de captación promedio de 36.61% se da cuando se tiene una pendiente transversal de 4% y longitudinal de 0.5%, seguido de una eficiencia promedio de 33.70% para pendiente transversal y longitudinal de 2% y 0.5% respectivamente, la eficiencia promedio de 30.27% se da cuando la pendiente transversal es de 2% y longitudinal de 4%, finalmente la eficiencia de 29.47% corresponde a una pendiente transversal y longitudinal de 4%. Además, se observa que con una pendiente longitudinal menor se tiene una mayor eficiencia de captación por el sumidero.

Al analizar las figuras 31 y 32 del modelo S2, se observa que tiene un comportamiento similar al modelo S1, ya que las curvas con pendiente longitudinal de 0.5% están por encima de las curvas de pendiente longitudinal de 4%, así mismo, el promedio de eficiencia de captación ha aumentado significativamente.

El mayor incremento al comparar el modelo S1 y S2, al observar la figura 38, se da cuando la pendiente transversal es 2% y longitudinal es 0.5%, con un promedio de incremento de eficiencia de captación de 16.86%, por el contrario, el mínimo incremento de promedio

de captación es de 12.43%, para el escenario de pendiente transversal 4% y longitudinal de 0.5%.

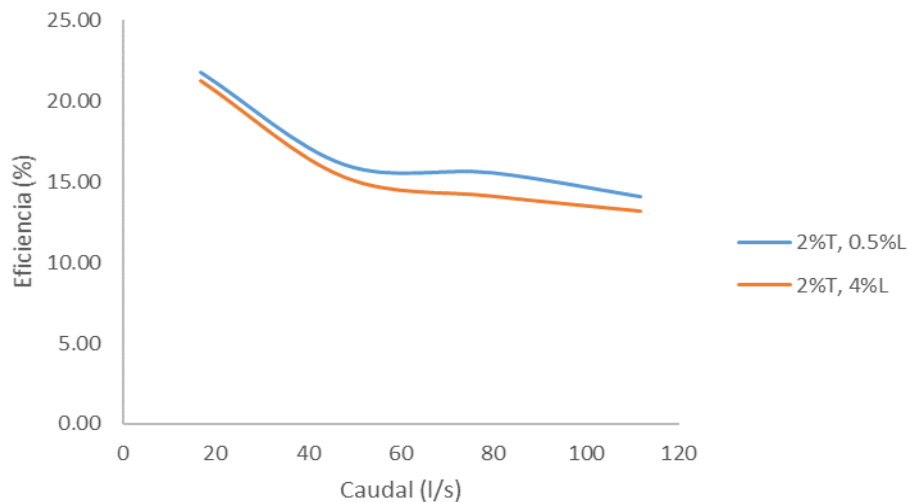
El incremento de eficiencia para el modelo S1 y S2 con pendiente transversal de 2% y longitudinal de (0.5%, 4%), tienen un comportamiento similar a medida que el caudal va incrementándose. A continuación, en la tabla 46, se presenta el incremento de eficiencia comparando los modelos S1 y S2.

**Tabla 46.** Comparación del Incremento de eficiencia del modelo S1 y S2

Q l/s	%ΔEficiencia	
	2%T, 0.5%L	2%T, 4%L
16.91	21.75	21.29
47.85	16.05	15.30
79.75	15.55	14.12
111.65	14.07	13.19

**Fuente:** Braulio Morocho

Se observa en la figura 53, que en ambos escenarios el comportamiento del incremento es similar, estabilizándose en un porcentaje del 10% al 15%.



**Figura 53.** Comportamiento del incremento de la eficiencia, al comparar el modelo S1 y S2, pendiente transversal 2% y longitudinal (0.5%, 4%)

**Fuente:** Braulio Morocho

De acuerdo a la figura 38, el mayor promedio de caudal captado en el modelo S1, corresponde al escenario con pendiente transversal de 4% y longitudinal de 0.5%, con un caudal de 19.71 l/s, por el contrario, el menor caudal captado corresponde al escenario de pendiente transversal y longitudinal de 4%.

Como se observa en la figura 41, en el modelo S2, el mayor promedio de caudal captado es 27.58 l/s que corresponde al escenario con pendiente transversal 2% y longitudinal de 0.5%, y el menor caudal captado corresponde al escenario de pendiente longitudinal y transversal de 4%, con un caudal de 23.82 l/s. Por lo tanto, se puede decir que la pendiente longitudinal influye significativamente en la captación, debido a que la velocidad del agua de escorrentía aumenta a medida que aumenta la pendiente, si la velocidad del agua es alta, el sumidero capta menos volumen de agua de escorrentía.

Las curvas de caudal en vía vs. caudal en sumidero son aplicativas para procesos de diseño, las ecuaciones son utilizadas para calcular la eficiencia de sumideros expuestos a diferentes factores como la pendiente transversal y longitudinal.

### **3.2 Verificación de hipótesis**

Los sumideros de agua lluvia tipo T45 modificado con barrotes circulares aumenta la eficiencia en la captación de caudal de escorrentía superficial en un valor promedio de 5.12% respecto al sumidero T45 normal con pendiente transversal de 2% y longitudinal de 0.5%, de la misma manera, la eficiencia promedio aumenta en un 2.42% para pendiente transversal de 2% y longitudinal de 4%.

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 Conclusiones

- Por medio del presente trabajo experimental se ha determinado la eficiencia hidráulica para el sumidero T45 modificado con barrotes circulares, el mismo que para el modelo S1, como promedio de eficiencias de captación son los siguientes valores, 33.70% para pendiente de 2% T y 0.5% L, 30.27% para pendiente de 2% T y 4% L, 36.61% para pendiente de 4% T y 0.5% L y 29.47% para pendiente transversal de y longitudinal de 4%, de igual manera se determinó las eficiencias de captación de caudal para el modelo S2, en donde el promedio de eficiencias son los siguientes, 50.55% para pendiente de 2% T y 0.5% L, 46.24% para pendiente 2% T y 4% L, 49.04% para pendiente de 4% T y 0.5% L, finalmente 42.61% para pendiente transversal y longitudinal de 4%.
- Al comparar la eficiencia hidráulica del modelo físico con el modelo numérico T45 modificado con barrotes circulares, se observa el mismo comportamiento obteniendo valores de eficiencia mayores en el modelo físico, se tiene que para el modelo S1 con pendiente transversal de 2% y longitudinal de 0.5% se tiene una diferencia promedio de 15.48%, y para el modelo S2 con pendiente transversal y longitudinal de 2% y 4% respectivamente, la diferencia promedio de eficiencia de captación es 8.35%, esta diferencia sustancial en los valores de eficiencia se da por el sistema de medición de caudales en el modelo físico.
- Al realizar la respectiva comparación entre la modelación numérica del sumidero T45 normal y el sumidero T45 modificado con barrotes circulares se observa el mismo comportamiento que con el modelo físico, se tiene que el sumidero T45 modificado con barrotes circulares en el modelo S1, la eficiencia promedio de captación aumenta 5.12% para una pendiente transversal de 2% y longitudinal de



0.5%, y la eficiencia promedio de captación con pendiente transversal de 2% y longitudinal de 4% aumenta 2.42%, esto debido a que se modificó la sección transversal de rectangular a circular, esto se da ya que las líneas de flujo se adaptan hidrodinámicamente al barrote circular oponiendo menor resistencia al momento de ingreso del agua de escorrentía al sumidero.

- Existe un incremento de eficiencia en el sumidero T45 modificado con barrotos circulares, los promedios de eficiencia de captación para pendiente 2%T y 0.5%L es 33.70% para el modelo S1 y 50.55% en el modelo S2, para pendiente de 2%T y 4%L es 30.27% en el modelo S1 y 46.24% en el modelo S2, para pendiente 4%T y 0.5%L es 36.61% para el modelo S1 y 49.04% para el modelo S2, para pendiente de 4%T y 4%L es de 29.47% para el modelo S1 y 42.61% para el modelo S2.

## **4.2 Recomendaciones**

- Realizar un modelo hidráulico físico a escala real, el cual permita obtener valores reales de captación de agua de escorrentía por el sumidero para el proceso de calibración del modelo numérico.
- Los valores de eficiencia calculados en este trabajo experimental se deben tomar en consideración siempre que la entrada del flujo al sumidero esté libre de obstáculos.
- Profundizar la investigación para caudales relativamente altos, modificando la geometría de captación, debido a la velocidad y cantidad de agua de escorrentía.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. García y B. Chocat, «La modelación en el campo de la Ingeniería Hidráulica: Reflexiones y discusiones sobre las causas de error y sus consecuencias,» *Aqua-LAC*, vol. 1, nº 1.
- [2] F. Rodríguez, «BIBDIGITAL ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL,» 2016. [En línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16626/1/CD-7255.pdf>.
- [3] E. Casa, Modelación Numérica del flujo rasante en una rápida escalonada aplicando la dinámica de fluidos computacional (CFD). Programa Flow-3D, Quito, 2016.
- [4] M. Cárdenas, Análisis del drenaje superficial en vías urbanas a partir de un modelo hidrodinámico bidimensional, Medellín, 2017.
- [5] V. Guamán, Modelación numérica y experimental de un canal rectangular abierto con diferentes tipos de vertederos, Quito, 2012.
- [6] J. Pérez, «Análisis de la eficiencia de rejillas de aguas pluviales mediante técnicas CFD,» 2015. [En línea]. Available: [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/53836/TFG%20completo\\_14361746771737215722673518693986.pdf?sequence=3](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/53836/TFG%20completo_14361746771737215722673518693986.pdf?sequence=3).
- [7] R. Morales, Análisis de estudios experimentales realizados por el Instituto Nacional de Hidráulica, Chile, sobre sumideros de aguas lluvias, Santiago de Chile, 2016.
- [8] J. Recasens, Modelación tridimensional del flujo de entrada en un sumidero, Barcelona, 2014.
- [9] B. Comport y C. Thornton, Hydraulic Efficiency of Grate and Curb Inlets for Urban Storm Drainage, 2012.
- [10] S. Djordjevic, A. Saul, G. Tabor, J. Blanksby, I. Galambos, N. Sabtu y G. Saibor, «Experimental and numerical investigation of interactions between above and below ground drainage systems,» *Water Science & Technology*, 2013.
- [11] F. Pazmiño, R. Hechavarría, F. Morales y J. León, Cálculo experimental de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas pluviales, Ambato, 2017.

- [12] I. Nuñez y E. Sánchez, Modelación Hidráulica para la determinación de la eficiencia de los sumideros de agua lluvia, Ambato, 2018.
- [13] M. Cárdenas, L. Carvajal y R. Marbello, Evaluación Numérica Tridimensional de un Sumidero de Reja de Fondo, Medellín, 2017.
- [14] MTOP, Norma Ecuatoriana Vial, Quito, 2002.
- [15] INEN, NTE INEN 2496. Tapas para uso en pozos y redes subterráneas, rejillas de alcantarillado. Requisitos e inspección, Quito, 2009.
- [16] L. Maldonado, Método Racional, Ambato, 2018.
- [17] I. N. d. M. e. H. INAMHI, Estudio de Lluvias Intensas, Quito, 1999.
- [18] V. T. Chow, Hidráulica de canales abiertos, Colombia : Nomos S. A., 2004.
- [19] J. Gaviria, «Número de Reynolds,» Noviembre 2014. [En línea]. Available: <http://mecanicadefluidoscod5131587.blogspot.com/2015/11/numero-de-reynolds.html>. [Último acceso: 17 04 2019].
- [20] S. Aquera, «Ecuaciones Fundamentales de Flujo,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.uco.es/termodinamica/ppt/pdf/fluidos%203.pdf>. [Último acceso: 14 02 2019].
- [21] A. Rocha, «Hidráulica de tuberías y canales,» 2013. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/VladimirLParedesL/hidraulica-detuberiasycanales>. [Último acceso: 17 04 2019].
- [22] I. I. d. i. d. T. Educativa, Ecuaciones Fundamentales de la hidráulica, Naucalpan de Juárez.
- [23] V. José, Modelación Numérica en Hidráulica.
- [24] M. Sámano, Desarrollo en integración de modelos numéricos de calidad del agua en un sistema de información geográfica, Santander, 2011.

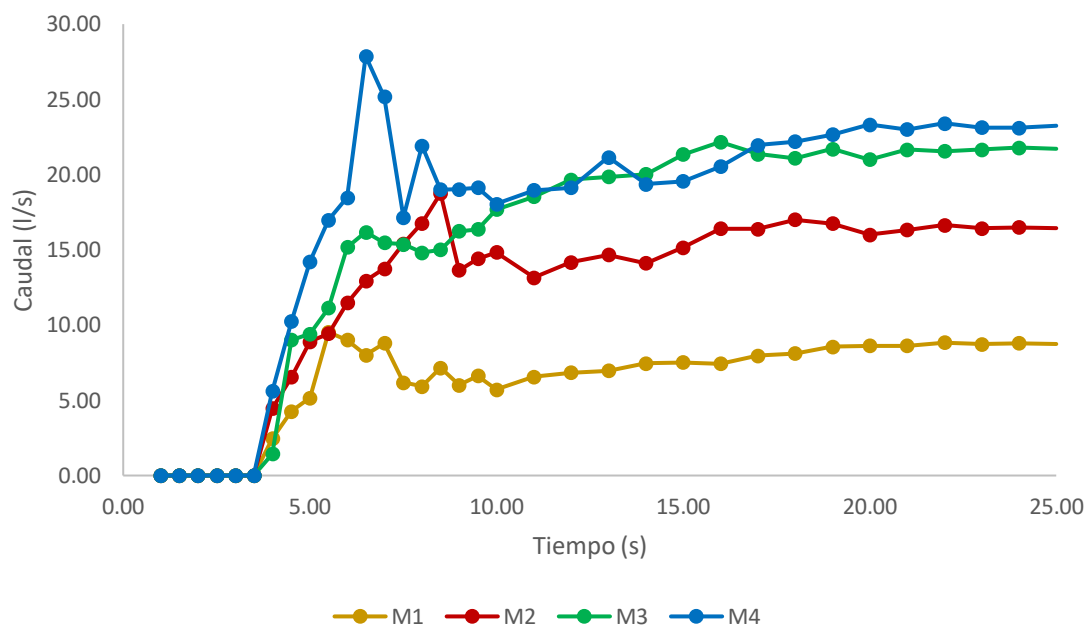
## ANEXOS

Las tablas y gráficos a continuación, representan el tiempo y caudales captados por el sumidero T45 modificado con barrotes circulares.

**Tabla 47.** Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 2% y longitudinal 0.5%, modelo S1

<b>Modelos</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>
<b>Tiempo(s)</b>	<b>Q (l/s)</b>	<b>Q (l/s)</b>	<b>Q (l/s)</b>	<b>Q (l/s)</b>
	<b>16.91 l/s</b>	<b>47.85</b>	<b>79.75</b>	<b>111.65</b>
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.50	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.50	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.50	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	2.45	4.46	1.43	5.59
4.50	4.25	6.54	9.01	10.25
5.00	5.16	8.90	9.42	14.21
5.50	9.53	9.43	11.14	16.98
6.00	9.01	11.47	15.17	18.47
6.50	8.00	12.94	16.17	27.88
7.00	8.80	13.75	15.48	25.17
7.50	6.17	15.42	15.37	17.15
8.00	5.92	16.77	14.82	21.91
8.50	7.15	18.75	15.00	19.00
9.00	6.00	13.65	16.25	19.03
9.50	6.61	14.42	16.37	19.13
10.00	5.72	14.83	17.68	18.04
11.00	6.56	13.15	18.54	18.95
12.00	6.85	14.17	19.66	19.13
13.00	6.97	14.67	19.86	21.16
14.00	7.45	14.10	20.02	19.36
15.00	7.51	15.15	21.35	19.55
16.00	7.44	16.42	22.17	20.54
17.00	7.97	16.38	21.37	21.95
18.00	8.11	17.00	21.08	22.20
19.00	8.56	16.74	21.70	22.67
20.00	8.61	16.01	20.99	23.31
21.00	8.61	16.33	21.65	23.01
22.00	8.84	16.64	21.55	23.41
23.00	8.74	16.43	21.66	23.13
24.00	8.79	16.48	21.78	23.11
25.00	8.76	16.42	21.73	23.26

Fuente: Braulio Morocho



**Figura 54.** Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 2% y longitudinal 0.5%, modelo S1

**Fuente:** Braulio Morocho

**Tabla 48.** Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 2% y longitudinal 4%, modelo S1

Modelos	M1	M2	M3	M4
Tiempo(s)	Q (l/s)	Q (l/s)	Q (l/s)	Q (l/s)
	<b>16.91 l/s</b>	<b>47.85</b>	<b>79.75</b>	<b>111.65</b>
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.50	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.50	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.50	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.50	0.00	0.00	0.00	3.63
5.00	0.00	0.00	4.01	6.45
5.50	1.05	3.14	16.00	7.98
6.00	5.67	4.90	26.27	17.77
6.50	9.61	5.62	23.65	27.52
7.00	9.23	14.52	16.41	15.12
7.50	6.80	18.52	11.96	13.14
8.00	2.81	15.39	11.34	12.22

8.50	3.66	9.14	11.29	16.49
9.00	2.92	4.40	13.61	15.82
9.50	3.26	6.54	11.43	13.25
10.00	5.92	6.33	15.03	16.19
11.00	5.49	8.14	16.02	15.95
12.00	5.96	4.85	14.33	16.40
13.00	5.71	9.77	16.33	18.33
14.00	6.45	10.09	17.37	19.47
15.00	6.72	13.78	18.64	19.63
16.00	6.49	14.28	18.32	20.16
17.00	6.88	13.45	19.35	21.60
18.00	7.31	14.37	19.76	22.40
19.00	7.82	14.81	18.75	21.87
20.00	7.56	14.86	19.86	22.16
21.00	7.41	15.03	19.53	22.56
22.00	7.53	15.25	19.43	22.50
23.00	7.44	15.35	19.87	22.35
24.00	7.47	15.20	19.87	22.45
25.00	7.48	15.14	20.01	22.43

Fuente: Braulio Morocho

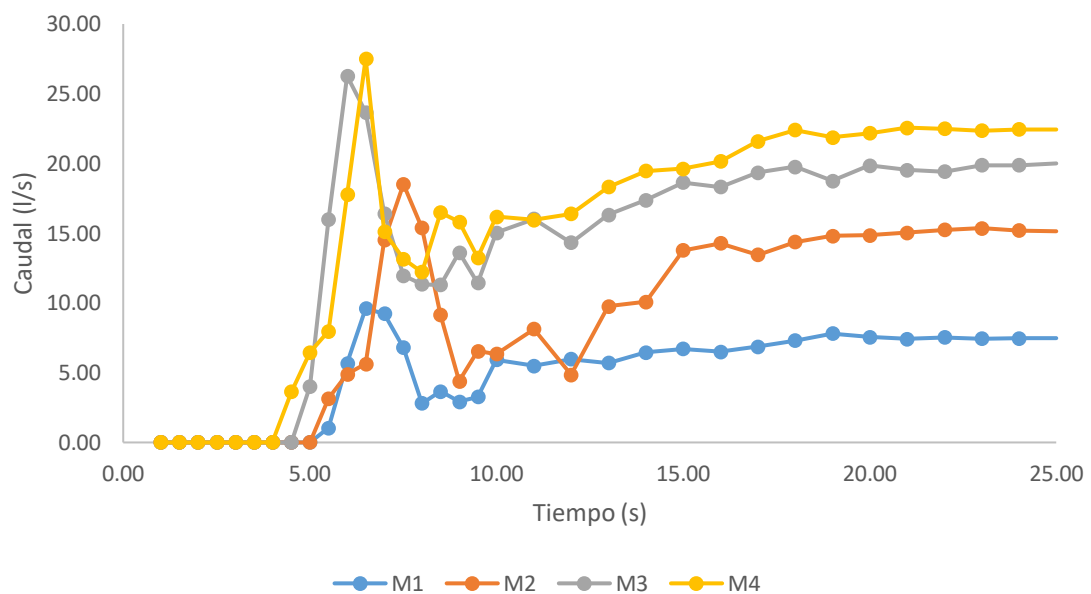


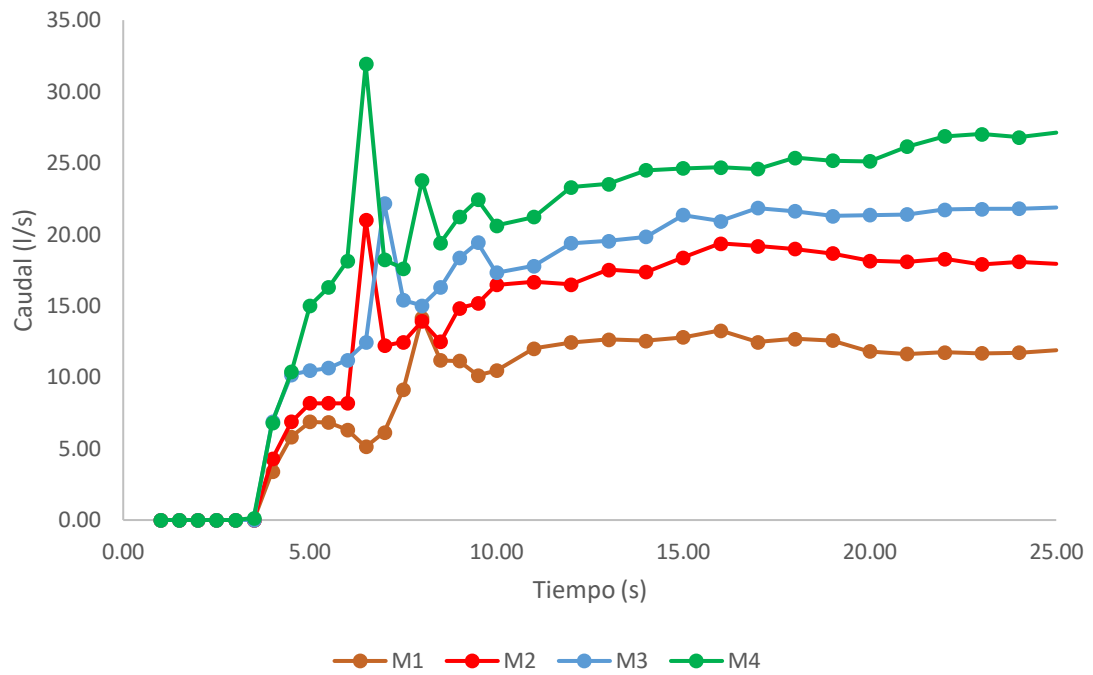
Figura 55. Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 2% y longitudinal 4%, modelo S1

Fuente: Braulio Morocho

**Tabla 49.** Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 4% y longitudinal 0.5%, modelo S1

<b>Modelos</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>
<b>Tiempo(s)</b>	<b>Q (l/s)</b>	<b>Q (l/s)</b>	<b>Q (l/s)</b>	<b>Q (l/s)</b>
	<b>20.74</b>	<b>48.17</b>	<b>79.11</b>	<b>111.65</b>
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.50	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.50	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.50	0.00	0.00	0.00	0.14
4.00	3.41	4.28	6.90	6.82
4.50	5.83	6.87	10.16	10.37
5.00	6.87	8.17	10.46	15.02
5.50	6.84	8.19	10.64	16.29
6.00	6.33	8.17	11.20	18.13
6.50	5.13	20.99	12.44	31.92
7.00	6.15	12.21	22.19	18.22
7.50	9.15	12.47	15.40	17.62
8.00	14.17	13.91	15.01	23.78
8.50	11.17	12.49	16.29	19.42
9.00	11.15	14.85	18.36	21.21
9.50	10.13	15.17	19.43	22.42
10.00	10.48	16.48	17.33	20.61
11.00	12.01	16.68	17.80	21.22
12.00	12.44	16.50	19.39	23.31
13.00	12.65	17.52	19.54	23.52
14.00	12.55	17.37	19.83	24.48
15.00	12.79	18.37	21.35	24.62
16.00	13.27	19.37	20.93	24.70
17.00	12.46	19.19	21.85	24.58
18.00	12.67	18.98	21.63	25.36
19.00	12.57	18.66	21.28	25.16
20.00	11.81	18.16	21.36	25.12
21.00	11.64	18.08	21.40	26.15
22.00	11.75	18.29	21.74	26.85
23.00	11.68	17.90	21.79	27.02
24.00	11.72	18.08	21.81	26.79
25.00	11.87	17.95	21.87	27.14

**Fuente:** Braulio Morocho



**Figura 56.** Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 4% y longitudinal 0.5%, modelo S1

**Fuente:** Braulio Morocho

**Tabla 50.** Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 4% y longitudinal 4%, modelo S1

<b>Modelos</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>
<b>Tiempo(s)</b>	<b>Q (l/s)</b>	<b>Q (l/s)</b>	<b>Q (l/s)</b>	<b>Q (l/s)</b>
	<b>20.74</b>	<b>48.17</b>	<b>79.11</b>	<b>111.65</b>
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.50	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.50	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.50	2.01	5.13	5.17	4.65
4.00	8.42	8.35	13.78	15.65
4.50	12.01	11.25	16.42	18.46
5.00	7.85	17.85	18.02	20.80
5.50	9.16	14.68	19.22	25.14
6.00	9.15	14.07	25.64	28.56
6.50	9.27	13.83	22.43	24.37
7.00	8.64	13.43	21.88	23.63
7.50	9.71	15.02	20.78	24.95
8.00	9.52	15.87	20.81	23.15



8.50	8.62	14.92	22.35	24.44
9.00	7.37	15.43	22.01	24.64
9.50	8.67	14.43	20.32	23.34
10.00	8.42	14.13	19.75	22.36
11.00	7.27	15.38	20.12	23.46
12.00	8.42	13.79	20.92	23.46
13.00	7.78	14.57	19.12	22.36
14.00	8.17	14.67	19.87	23.13
15.00	8.14	14.43	19.54	24.98
16.00	8.35	14.55	18.72	22.43
17.00	8.26	14.64	18.33	22.87
18.00	8.88	14.87	18.78	22.78
19.00	9.47	14.01	18.94	22.63
20.00	9.38	14.64	18.37	23.26
21.00	9.60	14.77	17.67	22.80
22.00	9.17	14.18	17.98	22.88
23.00	9.50	13.94	18.26	22.66
24.00	9.53	13.78	18.04	22.55
25.00	9.42	14.07	18.20	22.61

Fuente: Braulio Morocho

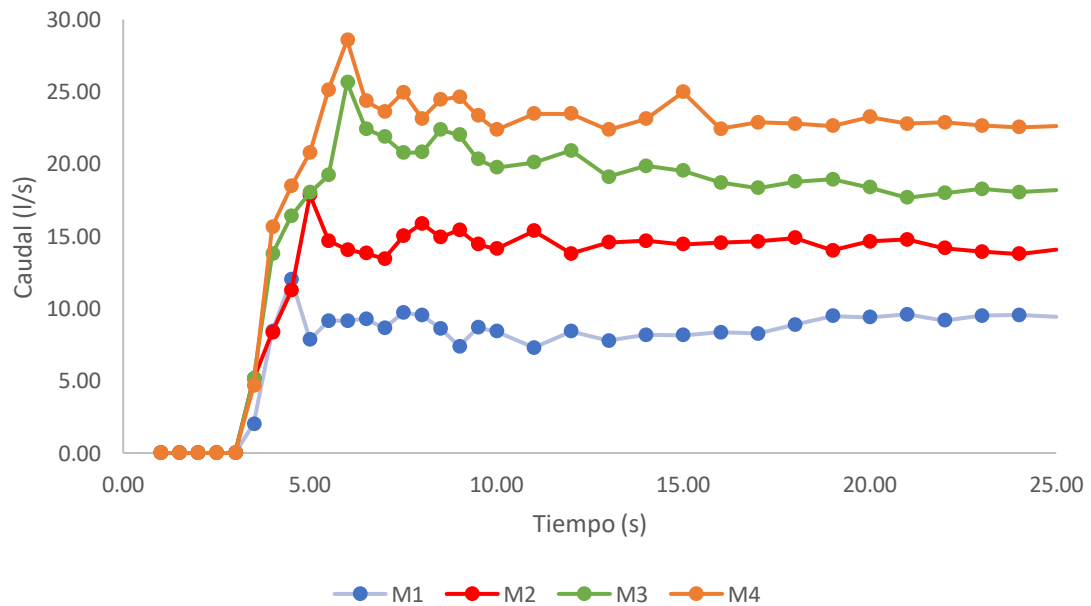


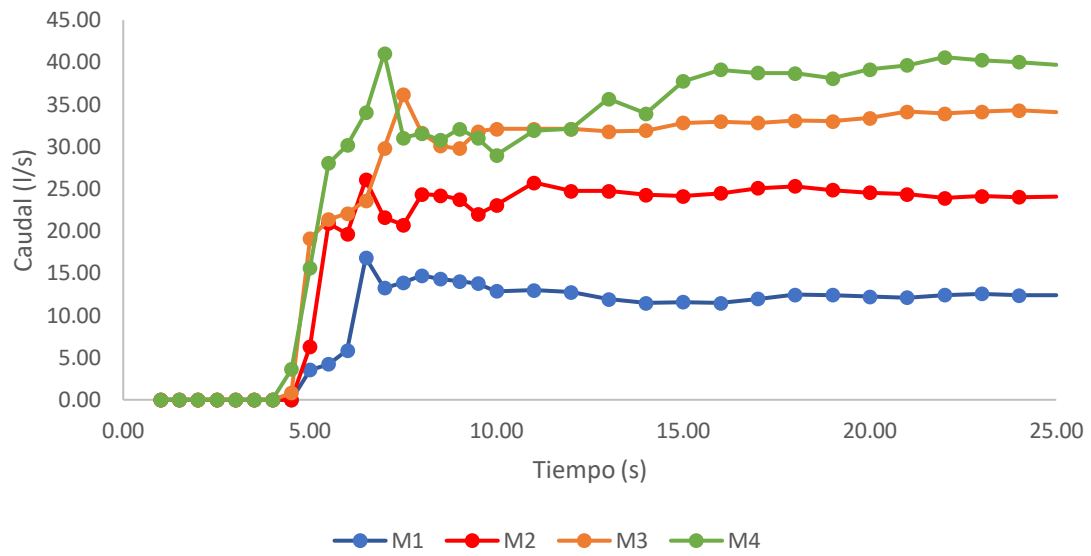
Figura 57. Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 4% y longitudinal 4%, modelo S1

Fuente: Braulio Morocho

**Tabla 51.** Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 2% y longitudinal 0.5%, modelo S2

<b>Modelos</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>
<b>Tiempo(s)</b>	<b>Q (l/s)</b>	<b>Q (l/s)</b>	<b>Q (l/s)</b>	<b>Q (l/s)</b>
	<b>16.91</b>	<b>47.85</b>	<b>79.75</b>	<b>111.65</b>
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.50	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.50	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.50	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.50	0.00	0.00	0.80	3.62
5.00	3.54	6.29	19.08	15.62
5.50	4.22	20.90	21.38	28.06
6.00	5.84	19.67	22.08	30.16
6.50	16.85	26.07	23.60	34.05
7.00	13.23	21.59	29.82	41.05
7.50	13.89	20.71	36.15	31.05
8.00	14.73	24.37	31.60	31.55
8.50	14.31	24.20	30.09	30.78
9.00	14.04	23.74	29.78	32.09
9.50	13.77	21.97	31.78	31.01
10.00	12.87	23.08	32.10	28.99
11.00	12.97	25.74	32.09	31.91
12.00	12.74	24.74	32.09	32.11
13.00	11.91	24.74	31.81	35.67
14.00	11.47	24.28	31.92	33.91
15.00	11.59	24.14	32.82	37.76
16.00	11.47	24.49	32.97	39.11
17.00	11.94	25.08	32.82	38.73
18.00	12.45	25.32	33.09	38.72
19.00	12.40	24.85	32.99	38.09
20.00	12.24	24.55	33.40	39.17
21.00	12.12	24.34	34.14	39.66
22.00	12.42	23.90	33.94	40.59
23.00	12.57	24.13	34.15	40.25
24.00	12.36	24.01	34.29	40.04
25.00	12.43	24.10	34.12	39.67

Fuente: Braulio Morocho



**Figura 58.** Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 2% y longitudinal 0.5%, modelo S2

**Fuente:** Braulio Morocho

**Tabla 52.** Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 2% y longitudinal 4%, modelo S2

<b>Modelos</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>
<b>Tiempo(s)</b>	<b>Q (l/s)</b>	<b>Q (l/s)</b>	<b>Q (l/s)</b>	<b>Q (l/s)</b>
	<b>16.91</b>	<b>47.85</b>	<b>79.75</b>	<b>111.65</b>
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.50	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.50	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.50	0.00	0.00	0.00	0.00
4.00	6.10	1.99	11.47	23.23
4.50	11.37	8.27	18.21	18.95
5.00	11.99	11.00	20.26	25.30
5.50	14.22	12.10	22.05	30.59
6.00	14.77	15.20	36.43	43.35
6.50	17.43	25.77	30.55	32.49
7.00	14.94	19.78	31.44	29.82
7.50	14.60	20.45	30.46	29.96
8.00	13.92	19.81	29.37	30.13
8.50	14.00	17.68	29.71	30.84
9.00	12.74	18.71	32.05	32.95
9.50	12.38	23.21	31.77	33.53

10.00	12.29	23.28	31.58	36.72
11.00	12.13	18.96	30.44	35.67
12.00	10.83	20.46	31.75	33.42
13.00	12.63	21.45	31.74	33.02
14.00	12.00	18.56	31.75	33.53
15.00	11.67	18.46	32.05	33.43
16.00	11.97	20.65	31.94	33.53
17.00	12.07	19.89	31.74	35.00
18.00	11.74	20.75	31.58	35.24
19.00	11.13	21.58	31.05	36.73
20.00	11.61	22.12	31.58	33.80
21.00	11.13	22.47	31.42	36.57
22.00	11.17	22.07	31.21	36.89
23.00	10.87	22.44	31.25	37.15
24.00	11.16	22.41	31.29	37.35
25.00	11.07	22.46	31.27	37.16

Fuente: Braulio Morocho

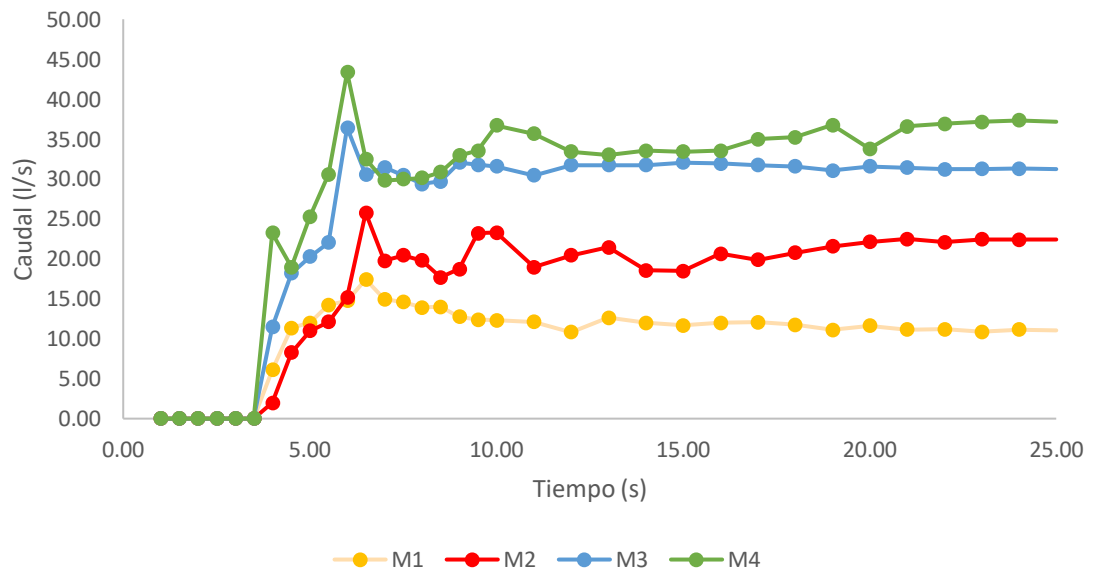


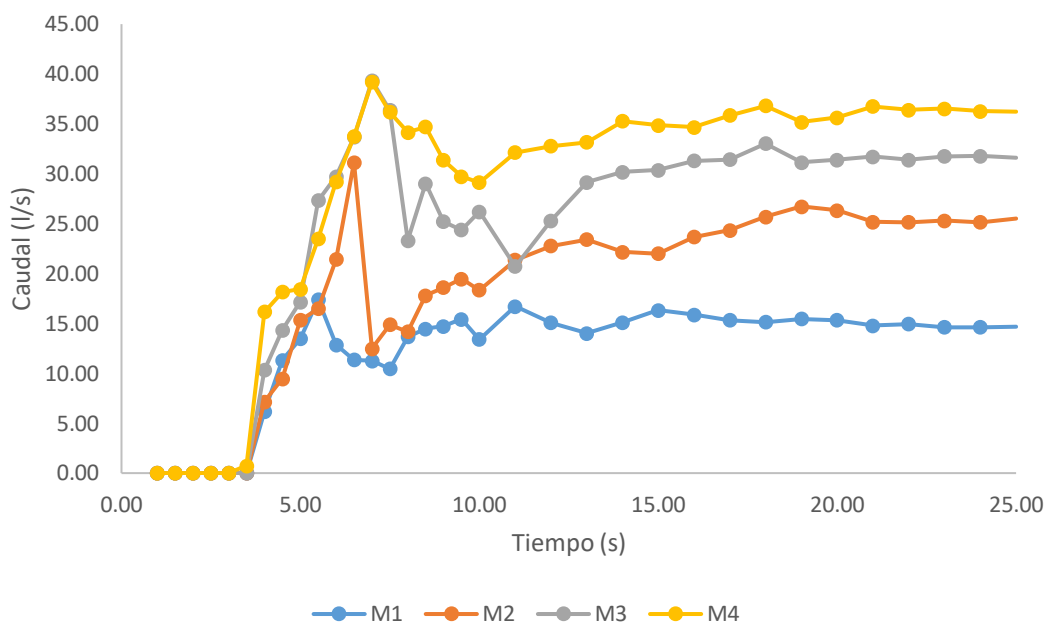
Figura 59. Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 2% y longitudinal 4%, modelo S2

Fuente: Braulio Morocho

**Tabla 53.** Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 4% y longitudinal 0.5%, modelo S2

<b>Modelos</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>
<b>Tiempo(s)</b>	<b>Q (l/s)</b>	<b>Q (l/s)</b>	<b>Q (l/s)</b>	<b>Q (l/s)</b>
	<b>20.74</b>	<b>48.17</b>	<b>79.11</b>	<b>111.65</b>
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.50	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.50	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.50	0.00	0.00	0.00	0.73
4.00	6.16	7.14	10.31	16.18
4.50	11.33	9.47	14.35	18.15
5.00	13.46	15.35	17.15	18.45
5.50	17.39	16.47	27.34	23.47
6.00	12.88	21.42	29.74	29.22
6.50	11.36	31.14	33.67	33.73
7.00	11.26	12.48	39.34	39.18
7.50	10.45	14.87	36.35	36.17
8.00	13.65	14.17	23.31	34.15
8.50	14.46	17.81	29.02	34.71
9.00	14.71	18.62	25.22	31.37
9.50	15.44	19.47	24.37	29.72
10.00	13.41	18.35	26.22	29.12
11.00	16.72	21.37	20.72	32.14
12.00	15.07	22.78	25.32	32.78
13.00	14.01	23.42	29.15	33.15
14.00	15.11	22.17	30.17	35.28
15.00	16.31	22.01	30.37	34.87
16.00	15.87	23.68	31.29	34.67
17.00	15.33	24.33	31.43	35.84
18.00	15.12	25.68	33.02	36.82
19.00	15.46	26.71	31.15	35.17
20.00	15.34	26.32	31.41	35.64
21.00	14.78	25.17	31.71	36.75
22.00	14.95	25.15	31.39	36.41
23.00	14.62	25.32	31.75	36.53
24.00	14.64	25.14	31.80	36.27
25.00	14.67	25.53	31.62	36.21

Fuente: Braulio Morocho



**Figura 60.** Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 4% y longitudinal 0.5%, modelo S2

**Fuente:** Braulio Morocho

**Tabla 54.** Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 4% y longitudinal 4%, modelo S2

<b>Modelos</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>
<b>Tiempo(s)</b>	<b>Q (l/s)</b>	<b>Q (l/s)</b>	<b>Q (l/s)</b>	<b>Q (l/s)</b>
	<b>20.74</b>	<b>48.17</b>	<b>79.11</b>	<b>111.65</b>
1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.50	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.50	0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.50	2.41	7.19	10.25	12.03
4.00	6.22	14.28	20.72	21.07
4.50	9.27	26.74	30.75	28.08
5.00	11.28	21.22	35.15	35.15
5.50	12.22	18.32	38.41	43.84
6.00	15.28	16.18	43.72	34.22
6.50	17.25	15.17	34.75	30.75
7.00	16.22	17.14	28.15	30.15
7.50	19.18	19.17	27.15	29.15
8.00	14.88	15.18	23.17	18.32
8.50	15.85	16.22	26.17	16.17

9.00	14.28	14.36	22.42	14.42
9.50	11.28	13.17	21.68	16.75
10.00	13.42	15.77	25.65	27.37
11.00	9.18	16.18	20.15	24.17
12.00	10.33	17.86	21.13	29.17
13.00	10.12	19.35	18.27	28.27
14.00	12.17	21.37	22.46	25.25
15.00	13.01	22.79	23.48	27.35
16.00	11.22	23.19	24.69	30.47
17.00	12.15	22.48	27.81	32.78
18.00	12.69	22.15	28.62	34.53
19.00	12.42	21.17	27.67	35.71
20.00	12.87	21.40	28.14	34.57
21.00	12.78	21.25	27.65	33.87
22.00	12.68	21.42	28.15	33.22
23.00	12.68	21.38	27.65	33.81
24.00	12.82	21.35	26.87	34.23
25.00	12.73	21.33	27.03	34.17

Fuente: Braulio Morocho

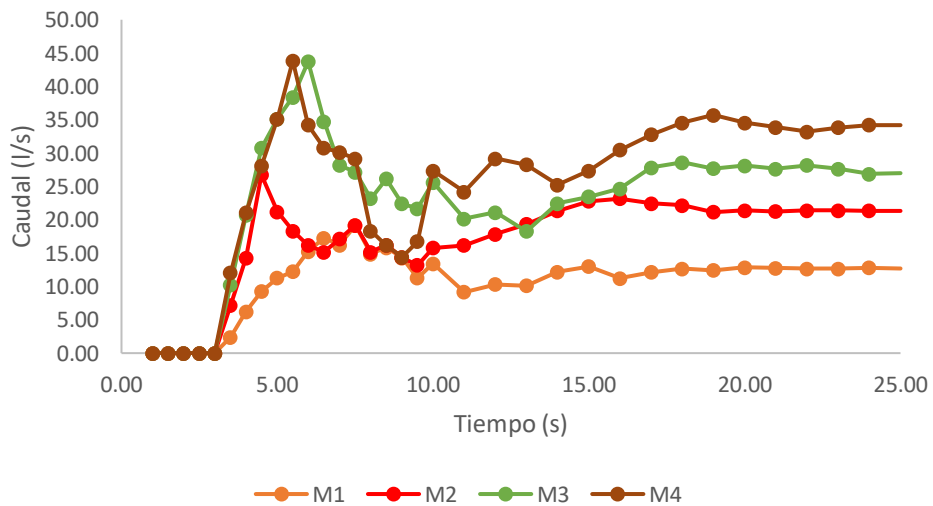


Figura 61. Estabilización del flujo de captación, pendiente transversal 4% y longitudinal 4%, modelo S2

Fuente: Braulio Morocho