

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y
CIVIL**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:

**Evaluación de la funcionalidad del sumidero tipo cajón
del drenaje pluvial urbano, usando modelos de flujos
tridimensionales, Ayacucho 2024**

Para optar el título profesional de:
INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:

Bach. Joseph Machello GAMBOA GARCIA

ASESOR:

Mg. Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANÍ

AYACUCHO - PERÚ

2025

Dedicatoria

A mi mamá, mi mayor inspiración y fuerza. Gracias por tu amor incondicional, por tus palabras que curan, por tu abrazo que todo lo puede. Esta tesis es tan tuya como mía, porque fuiste tú quien me sostuvo cuando creí que no podía más, quien me impulsó a seguir cuando el camino se hacía cuesta arriba. Cada logro mío lleva tu huella.

A mi papá, por ser un pilar firme en mi vida, por enseñarme a luchar con humildad y disciplina, y por estar siempre con una palabra de aliento.

A mis hermanas, compañeras de vida, risas y aprendizajes. Gracias por su cariño, su paciencia y por ser mi refugio en los momentos difíciles.

A mi familia, con todo mi amor. Este logro es nuestro.

Agradecimientos

Con todo mi agradecimiento, quiero expresar mi reconocimiento a la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga por brindarme una formación académica integral y por permitirme adentrarme en el mundo de la Ingeniería Civil. Mi alma mater no solo me dotó de conocimientos técnicos, sino también de valores y habilidades que serán fundamentales en mi desarrollo profesional. Agradezco profundamente que haya cultivado en mí la pasión por construir, no solo edificaciones, sino también un futuro mejor.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi asesor, Mg. Ing. Alex Sander Ircañaupa Huamani, por su invaluable apoyo a lo largo de esta investigación. Su disposición, tiempo y orientación fueron esenciales para el progreso y la finalización de este trabajo. Estoy profundamente agradecido por su paciencia, sus oportunas observaciones y su constante compromiso, los cuales no solo enriquecieron este proyecto, sino que también jugaron un papel clave en mi formación académica y profesional. Gracias por confiar en mi potencial y por acompañarme en este proceso con tanta dedicación.

A los docentes, mi más sincero agradecimiento por su dedicación, paciencia y compromiso. Cada clase, cada proyecto y cada consejo han sido esenciales para mi desarrollo como futuro ingeniero. Su pasión por la enseñanza y por la ingeniería civil ha sido una fuente constante de inspiración.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA
AYACUCHO - PERÚ , ABRIL 2025

Joseph Machello Gamboa Garcia

Resumen

El uso del CFD (Computational Fluid Dynamics) para el estudio de flujos pluviales, los modelos tridimensionales han facilitado la obtención de una representación exacta del comportamiento del flujo en los sistemas de drenaje urbano en la Ciudad de Ayacucho. En esta investigación se han analizado 5 sumideros, todos ellos de tipo cajón que están situados en las intersecciones de las Av. 26 de Enero y Jr. Garcilazo de la Vega, Jr. San Martín y Jr. Sr. de Quinuapata y los sumideros Jr. Bellido, Jr. Callao y Jr. Lima. Cada simulación ha modelado los caudales específicos, logrando resultados que representan el comportamiento real durante las épocas de lluvia.

Para la validación de resultados se ha obtenido a partir de la simulación de Jr. San Martín y Jr. Sr. de Quinuapata donde en periodos de lluvia se ha evidenciado que el flujo no es retenido por los cuatro sumideros que se encuentran en esta intersección. Estos resultados destacan la importancia de dimensionar adecuadamente los sumideros, ya que cualquier aumento en el caudal podría provocar el fallo de la estructura, resultando en un rebose, así mismo el uso de modelos 3D es esencial para capturar la distribución espacial del flujo, considerando las direcciones de las velocidades en las tres dimensiones (x, y, z), lo que revela cómo las velocidades en las diferentes direcciones influyen en la dinámica del flujo en el sumidero. Estos datos permitieron observar fenómenos complejos como las zonas de recirculación o las corrientes secundarias, que afectan la eficiencia del proceso de drenaje, y que no son detectados en modelos simplificados 1D o 2D.

El caudal transitado es un factor crítico para determinar la funcionalidad de los sumideros. Si el caudal excede la capacidad de captación de la estructura, el flujo comienza a rebasar, lo que compromete la efectividad del sistema de drenaje. En esta investigación se ha determinado la eficiencia de estos drenajes obteniendo un 71.65 %, 88.21 %, 89.55 %, 91.23 % y 49.88 % respectivamente en condiciones actuales, la simulación muestra la necesidad de mejorar el diseño de los sumideros para eventos de lluvia más intensos. Entonces la utilización de la metodología CFD en modelos tridimensionales proporciona una herramienta fundamental para la evaluación precisa de los sistemas de drenaje urbano.

Palabras clave : CFD, flujos 3D, sumideros, drenaje urbano y Ansys Fluent.

Abstract

The use of CFD (Computational Fluid Dynamics) for the study of stormwater flows and three-dimensional modeling has facilitated the accurate representation of flow behavior in urban drainage systems in the city of Ayacucho. In this research, five box-type stormwater inlets were analyzed, all located at the intersections of Av. 26 de Enero and Jr. Garcilazo de la Vega, Jr. San Martín and Jr. Sr. de Quinuapata, and the collectors on Jr. Bellido, Jr. Callao, and Jr. Lima. Each simulation modeled specific flow rates, yielding results that closely represent real behavior during rainy seasons.

To validate the results, the simulation at the intersection of Jr. San Martín and Jr. Sr. de Quinuapata was used, where during rainfall events it was observed that the flow is not fully captured by the four inlets at this location. These findings highlight the importance of properly sizing the inlets, as any increase in flow rate could lead to structural failure and overflow. Moreover, the use of 3D models is essential for capturing the spatial distribution of the flow, considering velocity components in the three dimensions (x, y, z), which reveals how velocities in different directions influence the flow dynamics within the inlet. This approach allowed the observation of complex phenomena such as recirculation zones and secondary currents, which impact the drainage process efficiency and are not detected in simplified 1D or 2D models.

The flow rate is a critical factor in determining the functionality of stormwater inlets. If the flow exceeds the intake capacity of the structure, overflow occurs, compromising the effectiveness of the drainage system. In this study, the efficiency of these drainage structures under current conditions was determined, with results of 71.65 %, 88.21 %, 89.55 %, 91.23 %, and 49.88 %, respectively. The simulations highlight the need to improve the design of the inlets for more intense rainfall events. Therefore, the use of CFD methodology in three-dimensional models provides a fundamental tool for the accurate evaluation of urban drainage systems.

Keywords : CFD models, Three-dimensional flows, Inlets, Urban drainage and Ansys Fluent.

Índice general

Dedicatoria	II
Agradecimientos	III
Resumen	IV
Índice general	VI
Índice de tablas	IX
Índice de figuras	X
I: Introducción	1
1.1. Antecedentes de la investigación	1
1.1.1. Investigaciones internacionales.	1
1.1.2. Investigaciones nacionales.	2
1.2. Planteamiento del problema	4
1.3. Formulación del problema.	5
1.3.1. Problema general.	5
1.3.2. Problemas específicos.	5
1.4. Delimitación del problema.	5
1.4.1. Espacial (geográfica).	6
1.4.2. Temporal.	6
1.4.3. Temática y unidad de análisis.	6
1.5. Justificación e importancia.	6
1.6. Objetivos.	7
1.6.1. Objetivo general.	7
1.6.2. Objetivos específicos.	7
1.7. Limitaciones de la investigación.	8
II: Marco Teórico	9

2.1. Movimientos de fluidos	9
2.1.1. Modelos de flujos Lagrangiana y Euleriana	9
2.1.2. Propiedad de mecánica de fluidos	10
2.2. Ecuación de la continuidad	10
2.3. Ecuación de conservación de cantidad de movimiento	11
2.4. Ecuación de la conservación de energía	13
2.5. Ecuaciones de Navier-Stokes y Reynolds	14
2.6. Ecuación de la dinámica de fluidos computacional ANSYS FLUENT	15
2.7. Turbulencia en fluidos tridimensional	16
2.7.1. Solución numérica de las ecuaciones de la dinámica de fluidos computacional	17
2.7.2. Discretización de las ecuaciones	18
2.7.3. Discretización espacial	19
2.7.4. Discretización temporal	20
2.7.5. Discretización de las Ecu. diferenciales en Ansys Fluent	21
2.8. Errores en la simulación computacional	21
2.9. Consistencia, estabilidad y convergencia de Ansys Fluent	21
2.10. Volúmenes Finitos	22
2.10.1. Dimensionamiento del dominio	22
2.10.2. Modelos tridimensionales en flujos	23
2.10.3. Ventajas sobre los modelos 3D	24
2.11. ANSYS FLUENT CFD	24
2.12. Hidráulica urbana	25
2.12.1. Método racional para el cálculo de caudales	26
2.12.2. Intensidad de la Lluvia (<i>i</i>) - IILA-SENAMHI-UNI	27
2.12.3. Flujo de calles	27
2.12.4. Drenaje urbano	28
2.12.5. Sumideros en calles	28
III: Materiales y métodos	30
3.1. Enfoque.	30
3.2. Alcance de la investigación.	30
3.3. Diseño de investigación.	30
3.4. Hipótesis.	31
3.4.1. Hipótesis general.	31
3.4.2. Hipótesis específicas.	31
3.5. Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional. . . .	32
3.6. Técnicas e instrumentos.	33

3.7. Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información.	33
3.8. Nivel de Investigación	33
3.9. Unidad de investigación	34
3.10. Tipo de investigación	34
3.11. Población y muestra.	34
3.11.1. Población	35
3.11.2. Muestra	35
3.12. Metodología seleccionada y aplicada al proyecto	36
3.12.1. Caudal de Simulación	37
3.12.1.1. Caudal en la intersección de la Av. 26 de Enero y Jr. Garcilazo de la Vega	37
3.12.1.2. Caudal en los sumideros	45
3.13. Procesamiento de datos en ANSYS 2024R1	48
3.13.1. Geometría Av. 26 de Enero y Jr. Garcilazo de la Vega	48
3.13.1.1. Generación de la malla en Ansys Meshing CFD	49
3.13.1.2. Condiciones de Borde - Ansys Fluent	50
3.13.1.3. Condiciones de Iniciales - Ansys Fluent	50
3.13.2. Geometría Jr. San Martín y Jr. Señor de Quinuapata	53
3.13.3. Geometría Colector Jr. Bellido	55
3.13.4. Geometría Colector Jr. Callao	56
3.13.5. Geometría Colector Jr. Lima	58
IV: Resultados y discusiones	60
4.1. Aspectos generales.	60
4.2. Resultados de la simulación intersección Av. 26 de Enero y Jr. Garcilazo de la Vega	61
4.3. Resultados del Colector Jr. San Martín y Jr. Señor de Quinuapata	67
4.4. Resultados sumidero Jr. Bellido	68
4.5. Resultados sumidero Jr. Callao	70
4.6. Resultados sumidero Jr. Lima	72
4.7. Discusión de los resultados	73
V: Conclusiones	77
VI: Recomendaciones	79

Índice de tablas

3.1. Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional . . .	32
3.2. Datos de las cuencas	40
3.3. Datos de las Cuenca identificada	41
3.4. Cálculo de coeficientes de escorrentía método de ponderación.	42
3.5. Cálculo de intensidad para tiempos de retorno.	42
3.6. Resultados de caudales $T_r=10$ años	45
3.7. Características hidráulicas de las subcuencas	48
5.8. Características hidráulicas de las subcuencas	77

Índice de figuras

2.1. Modelo de flujo Lagrangiano y Euleriano	9
2.2. Principio de Continuidad	11
2.3. Ansys Fluent para modelos CFD	16
2.4. Solucion numérica del CFD	18
2.5. Simulación de flujos con modelos tridimensionales	23
2.6. Hidráulica urbana	26
2.7. Método Racional	26
2.8. Sumidero en la Av. 26 de Enero y Jr. Garcilazo de la Vega	29
2.9. Sumidero en el Jr. San Martín con Jr. Sr. de Quinuapata	29
3.10. Representación la población - Ciudad de Ayacucho	34
3.11. Representación de la muestra, intersección Av. 26 de Enero y Jr. Garcilazo de la Vega	36
3.12. Representación de la muestra, intersección Jr. San Martin y Jr. Sr. de Quinuapata	36
3.13. Identificación del punto de aforo - Ubicación del sumidero	37
3.14. Direccion del caudal en la intersección Av. 26 de Enero y Jr. Los Pinos	38
3.15. Delimitación de la cuenca	39
3.16. DEM de la cuenca identificada	39
3.17. Delimitación del cause para tiempo de concentración	40
3.18. Cálculo de tiempo de concentración (hr)	41
3.19. Cuenca urbana identificado	43
3.20. Obtención del coeficiente de escorrentía Clasificación no supervisada de cuencas	44
3.21. Flujo al ingresar al sumidero 3D, para un $Q=0.81\text{m}^3/\text{seg}$	46
3.22. Definición de la geometría sección de vía y sumidero - Ansys Geometry	48
3.23. Definición de la malla Ansys Meshing-CFD	49
3.24. Definición de la malla Ansys Meshing-CFD	49
3.25. Condición de borde - Ansys Fluent	50
3.26. Configuración del modelo - Ansys Fluent	50

3.27. Configuración del modelo - Ansys Fluent	51
3.28. Configuración del modelo - Ansys Fluent	51
3.29. Condición inicial Wall - Ansys Fluent	52
3.30. Definición del flujo - Ansys Fluent	52
3.31. Modelo tridimensional Jr. San Martín y Jr. Señor de Quinuapata	53
3.32. Discretización del modelo para el Jr. San Martín y Jr. Señor de Quinuapata	54
3.33. Definición de condiciones de borde para el modelo Jr. San Martín y Jr. Señor de Quinuapata	54
3.34. Modelo tridimensional para el Jr. Bellido	55
3.35. Discretización del modelo para el Jr. Bellido	56
3.36. Definición de condiciones de borde para el modelo Jr. Bellido	56
3.37. Modelo tridimensional para el Jr. Callao	57
3.38. Discretización del modelo para el Jr. Callao	57
3.39. Definición de condiciones de borde para el modelo Jr. Callao	58
3.40. Modelo tridimensional para el Jr. Lima	58
3.41. Discretización del modelo para el Jr. Lima	59
3.42. Definición de condiciones de borde para el modelo Jr. Lima	59
4.43. Vista panorámica de la identificación de la geometría del modelo a simular	60
4.44. Condiciones borde Outlet y wall en Ansys Fluent	61
4.45. Velocidades con la simulación de $Q=0.81\text{m}^3/\text{seg}$	62
4.46. Velocidades con la simulación de $Q=0.81\text{m}^3/\text{seg}$, superficie inferior	62
4.47. Velocidades en la dirección X, para un $Q=0.81\text{m}^3/\text{seg}$	63
4.48. Velocidades en la dirección Y, para un $Q=0.81\text{m}^3/\text{seg}$	63
4.49. Flujo al ingresar al sumidero, para un $Q=0.81\text{m}^3/\text{seg}$	64
4.50. Flujo al ingresar al sumidero, para un $Q=0.81\text{m}^3/\text{seg}$, superficie inferior	64
4.51. Flujo sobre las rejillas para un $Q=0.81\text{m}^3/\text{seg}$	65
4.52. Flujo al ingresar al sumidero 3D, para un $Q=0.81\text{m}^3/\text{seg}$	66
4.53. Flujo al ingresar al sumidero 3D, para un $Q=0.81\text{m}^3/\text{seg}$	66
4.54. Resultados para el modelo Jr. San Martín y Jr. Señor de Quinuapata	67
4.55. Velocidades superficie inferior para el modelo Jr. San Martín y Jr. Señor de Quinuapata	68
4.56. Resultados para el modelo Jr. Bellido	69
4.57. Velocidades superficie superior para el modelo Jr. Bellido	69
4.58. Velocidades superficie inferior para el modelo Jr. Bellido	70
4.59. Resultados para el modelo Jr. Callao	70
4.60. Velocidades superficie superior para el modelo Jr. Callao	71
4.61. Velocidades superficie inferior para el modelo Jr. Callao	71
4.62. Resultados para el modelo Jr. Lima	72

4.63. Velocidades superficie superior para el modelo Jr. Lima	72
4.64. Velocidades superficie inferior para el modelo Jr. Lima	73
4.65. Caudal Jr. San Martín y Jr. Señor de Quinuapata	74
4.66. Velocidad de flujo en la dirección Z en las rejillas, para un $Q=0.81\text{m}^3/\text{seg}$.	75
4.67. Vector velocidad y orientación en las rejillas, para un $Q=0.81\text{m}^3/\text{seg}$. . .	76

I: Introducción

1.1. Antecedentes de la investigación

1.1.1. Investigaciones internacionales.

Ventura, 2003 desarrolla un código HYDROFEM, creado como herramienta de simulación para representar los flujos de agua en el suelo no saturado, se presenta en la presentación. La aplicación se basa en la ecuación de Richards, que tiene una naturaleza muy no lineal, lo que hace que las técnicas numéricas sean el medio adecuado para su integración. La resolución de casos prácticos en dominios espaciales tridimensionales es facilitada por este modelo, el cual permite la simulación de sistemas complejos, cuya parametrización no permite el uso de esquemas simplificados a una o dos dimensiones.

Gómez y Russo, 2011 indica que para mantener el nivel de servicio de las calles y la seguridad del tráfico, los pavimentos de las carreteras deben drenarse correctamente. Las entradas de drenaje pluvial recogen la escorrentía de las ciudades y la descargan a un sistema de alcantarillado subterráneo. La eficiencia de la entrada depende de la geometría de la entrada y la carretera, así como del flujo hidráulico que se aproxima. Regula tanto la tasa de extracción de agua de la cuneta como la cantidad de agua que puede ingresar al sistema de alcantarillado pluvial. El presente estudio presenta una técnica para evaluar la eficiencia de la entrada utilizando pruebas experimentales.

Comport y Thornton, 2017 en su investigación realiza experimentalmente la entrada de acera y dos entradas combinadas (con una rejilla y una abertura de acera) utilizadas para el drenaje de aguas pluviales en distintas condiciones de la carretera, y se desarrollaron ecuaciones para su aplicación. La necesidad de este estudio surgió de una incertidumbre general en la correspondencia de las entradas probadas con los métodos publicados anteriormente. Esta incertidumbre se relaciona con el tamaño de las entradas y en la determinación del flujo capturado. Se diseñó y construyó un modelo

a escala de Froude de un tercio de una sección de carretera de dos carriles para la prueba.

Aurelio et al., 2017 también señaló que en el análisis hidrodinámico de un río existen muchas variables que describen el comportamiento del flujo y que se tienen en cuenta a la hora de resolver la ecuación de estado. Este artículo presenta una solución tridimensional de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds, incluido un modelo de turbulencia cerrado. Esta solución se utiliza para el caudal del río Tercero o Ctalamochita en la provincia de Córdoba, Argentina. El modelo SSIIM es un software libre desarrollado por la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología como herramienta computacional para la resolución de ecuaciones de estado. La complejidad de su solución numérica contrasta marcadamente con la importancia de estudiar los flujos en tres dimensiones.

1.1.2. Investigaciones nacionales.

Según Rivera Medina, Axel Fabrizio, 2023 en su tesis "Propuesta de diseño del sistema de drenaje pluvial superficial y sub superficial para el lado aire de un aeropuerto de Juliaca", menciona la falta de medidas técnicas adecuadas para el manejo del drenaje pluvial en el Perú genera daños a la infraestructura. En este contexto, la presente tesis propone el diseño del sistema de drenaje pluvial del lado del Aeropuerto Internacional Inca Manco Cápac (Juliaca), empleando la normativa AC 150/5320-5D de la FAA, ante la ausencia de una norma peruana específica. La metodología se desarrolló en tres fases: la primera incluyó la recopilación de información técnica de la zona; la segunda abordó el análisis hidrológico, empleando la función Log Normal 3 para ajustar datos pluviométricos y el método racional para calcular caudales máximos, dado que las áreas de las cuencas fueron menores a 809,371 m². En la tercera fase se desarrolló un modelo del aeropuerto y del sistema de drenaje, integrando los cálculos hidráulicos mediante el software EPA SWMM. El diseño contempló redes superficiales y subterráneas a gravedad, con líneas de gradiente hidráulico coincidentes con la profundidad del agua libre.

También Luna Victoria Narro, Pedro Diego, 2022 en su tesis "Diseño de un sistema de drenaje pluvial urbano en la ciudad de Otuzco, La Libertad mediante el uso del modelo matemático SWMM refiere que las lluvias intensas, agravadas por la impermeabilización del suelo, generan daños en sectores clave del país. Frente a esto, es esencial proyectar sistemas de drenaje pluvial urbano eficientes, que protejan el medio ambiente, promuevan la reutilización del agua y reduzcan impactos en las edificaciones.

En Otuzco (La Libertad), la falta de un sistema adecuado de evacuación pluvial justifica este estudio, alineado con la normativa nacional que exige dicho servicio en toda habilitación urbana. Esta tesis tiene como objetivo diseñar un sistema de drenaje pluvial urbano usando el modelo matemático SWMM, que permite simular el comportamiento hídrico con precisión. Se realiza un análisis hidrológico para obtener parámetros de diseño, se calibra y valida el modelo, y se calculan caudales y tirantes.

Así mismo Izquierdo Pérez, Anderson Hernán y Zeña Sampén, Junior Leandro 2017 en su tesis titulado "Diseño del drenaje pluvial urbano de la zona urbana del distrito de Santa Cruz, provincia de Santa Cruz, departamento de Cajamarca, 2017" donde tienen como objetivo esencial la de diseñar la red de drenaje pluvial de la zona urbana del Distrito de Santa Cruz, esto se realizará teniendo en cuenta los estudios topográficos, los estudios de mecánica de suelos y estudios hidrológicos. De igual manera será necesario elaborar un presupuesto del proyecto, así como también una evaluación de impacto ambiental. Para desarrollar el diseño del caudal por cada calle obteniendo los caudales de salida necesarios para el diseño del canal principal. Asimismo, los estudios geotécnicos se usaron para la clasificar el tipo de suelo del proyecto.

Según Cárdenas Quintero, Carvajal-Serna, y Marbello, 2017 en su investigación *Evaluación numérica tridimensional de un sumidero de reja de fondo (Three-Dimensional Numerical Assessment of Grate Inlet*, realiza múltiples simulaciones en sumideros a partir de modelos tridimensionales usando Ansys CFX, donde a partir de una sección geométrica, variando los caudales de ingreso longitudinal y transversal realizó simulaciones.

En su investigación también Cárdenas Quintero et al., 2017 refiere que varios estudios sobre la captación de los sumideros de rejillas de fondo utilizando modelación física. Algunos de estos estudios se concentran en la modelación física de rejillas específicas de cada ciudad o nación, utilizando diferentes parámetros geométricos para representar la eficiencia total de las rejillas. Esta técnica es muy útil para evaluar la eficiencia del proceso de captación de agua en rejillas que no han sido ensayadas físicamente.

Se han utilizado varios métodos numéricos para representar el proceso de captación en sumideros de reja de fondo, sumideros de ventana y sumideros transversales. Estos métodos se basan en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). En la mayoría de los estudios anteriores, se obtuvieron muy buenos resultados numéricos, comparados con mediciones en experimentos físicos. Los estudios se centraron en determinar el caudal captado, la profundidad del agua, los sentidos de flujo y la parametrización de modelos (como tamaños de malla y modelos de turbulencia). Además, se ha llegado a la conclusión de que la simulación numérica tridimensional puede ser una alternativa

económica para determinar la capacidad de captación de un sumidero en situaciones en las que la experimentación física no es factible, Cárdenas Quintero et al., 2017.

1.2. Planteamiento del problema

Segun Ramirez, Lopez Lopez, Lopez, y Vicente, 2013 en su publicación menciona que uno de los problemas es el comportamiento de ríos que generan inundaciones por desbordamiento y menciona el caso del Huracán Katrina, que provocó la muerte de 1619 personas entre el 27 y el 31 de agosto de 2005 en la ciudad de Nueva Orleans y otras ciudades costeras de los estados de Misisipi y Luisiana, hasta algunas ciudades fueron evacuados por completo después de que el agua superara los 9 metros. En Tabasco, especialmente en 2007, el estado enfrentó la inundación más grave en 50 años, la cual afectó a casi el 80 % del territorio nacional.

Vargas, 2014 en su trabajo de investigación titulada: *Modelación tridimensional del flujo de entrada en un sumidero*, también menciona uno de sus problemas es recrear estos ensayos mediante un código numérico del flujo tridimensional, con la solución directa de las ecuaciones de Navier-Stokes, incluyendo la contribución de las tensiones de Reynolds, usando el software Flow-3D. Para representar la llegada del flujo al sumidero lo más preciso posible, la simulación incluyo todas las características observando los tirantes, el caudal captado por la rejas y demás variables hidráulicas.

Así mismo Bugallo, González, y Gómez, 2015 define que el impacto de las inundaciones en los ríos ha aumentado en los últimos años debido al cambio climático, aunque siempre han sido motivo de preocupación y estudio. En muchas cuencas, los períodos de retorno se han modificado, lo que generalmente conduce a una mayor frecuencia y duración de las inundaciones. El conocimiento del comportamiento del flujo de agua en estos ríos debe realizarse con modelos que describen la veracidad de sus variables hidráulicas.

También Camargo, 2019 en su trabajo de tesis de maestría indica que las inundaciones son un problema constante en el país de Colombia por la existencia de un sistema de flujo fluvial y pluvial debido que existen población cercana a los causes naturales de las cuencas, así mismo indica la diferencia de los modelos para flujos newtonianos y no newtonianos.

Ballesteros, 2024 en su trabajo de investigación también indica que los efectos del desbordamiento de los ríos son cruciales, lo que provoca que las viviendas inundadas caigan; además, las vías son inundadas al transportar material colmatando las vías

y erosionando perdiendo la funcionalidad de vías de conexión.

1.3. Formulación del problema.

1.3.1. Problema general.

¿Como evaluar la funcionalidad del sumidero tipo cajón de un drenaje pluvial urbano, mediante el uso de modelos de Dinámica de Fluidos Computacional (ANSYS FLUMENT) en la ciudad de Ayacucho?

1.3.2. Problemas específicos.

- ¿Como conocer el comportamiento de flujos pluviales a través del uso de volúmenes finitos, para determinar la funcionalidad de los sumideros de drenaje pluvial en las intersecciones de las Av. 26 de Enero y Jr. Garcilazo de la Vega, Jr. San Martín y Jr. Sr. de Quinuapata y los sumideros Jr. Bellido, Jr. Callao y Jr. Lima, en la ciudad de Ayacucho ?
- ¿Como influye la velocidad de flujo pluvial en la funcionalidad de las cajas receptoras tipo sumidero de una drenaje urbano en las intersecciones de las Av. 26 de Enero y Jr. Garcilazo de la Vega, Jr. San Martín y Jr. Sr. de Quinuapata y los sumideros Jr. Bellido, Jr. Callao y Jr. Lima, en la ciudad de Ayacucho ?
- ¿Como influye el caudal de flujo pluvial en la funcionalidad de las cajas receptoras tipo sumidero de una drenaje urbano en las intersecciones de las Av. 26 de Enero y Jr. Garcilazo de la Vega, Jr. San Martín y Jr. Sr. de Quinuapata y los sumideros Jr. Bellido, Jr. Callao y Jr. Lima, en la ciudad de Ayacucho ?

1.4. Delimitación del problema.

El problema surge cuando la Norma OS060 de referente al drenaje urbano corresponde al año 2011, esto genera que la normativa vigente que regula los diseños y planteamientos de las estructuras de un drenaje pluvial urbano no corresponden a la actualidad y no funcionan adecuadamente en los puntos que fueron construidos.

Dentro de la ingeniería hidráulica trata de describir el comportamiento de flujos producto de la lluvia, así mismo como se comportan en un canal abierto, canal cerrado

y por ultimo en las cámaras de reunión que vienen a ser sumideros que funcionan para coleccionar este flujo.

1.4.1. Espacial (geográfica).

Esta investigación desarrolla la funcionalidad de la caja tipo sumidero ubicado en la intersecciones de las Av. 26 de Enero y Jr. Garcilazo de la Vega, Jr. San Martín y Jr. Sr. de Quinuapata y los sumideros Jr. Bellido, Jr. Callao y Jr. Lima del distrito de Ayacucho, provincia de Huamanga y departamento de Ayacucho, donde tiene como finalidad principal captar todo el volumen de flujo que baja a través de la Av. 26 de Enero.

1.4.2. Temporal.

Todos las variables hidráulicas evaluadas en el análisis para conocer la funcionalidad del sumidero tipo cajón para drenaje pluvial urbano se realizaran con los caudales máximos con un tiempo de retorno de 10 años, esta investigación se realizará durante el año 2024.

1.4.3. Temática y unidad de análisis.

En esta investigación se evaluará la funcionalidad de las obras de drenaje construidos (sumidero tipo cajón) y evaluar a través del uso del comportamiento de flujo tridimensional incluyendo las rejillas y evaluar si estas cajas trabajan adecuadamente.

1.5. Justificación e importancia.

El problema encontrado es conocer la funcionalidad de estos sumideros construidos para la captación de aguas pluviales urbanos y a través del uso de modelos tridimensionales de fluidos conocer si las cajas cumplen su propósito. Para ello usaremos la dinámica de fluidos computacional (ANSYS FLUMENT) y encontrar la relación que tiene las variables hidráulicas con la funcionalidad de estas obras de arte.

Esta investigación surge en el área de la ingeniería hidráulica para poder entender el comportamiento de flujos cuando estos atraviesan cambios en la sección de canales de flujo. Para la presente investigación se consideran sumideros compuestos

por rejillas que funcionan en el drenaje urbano y conocer si estas estructuras trabajan de manera adecuada.

Estas estructuras construida en la intersección de la Av. 26 de Enero y el Jr. Garcilazo de la Vega fueron dimensionados y diseñados a partir de ábacos, sin considerar un estudio hidráulico de la estructura. Esto genera que en la actualidad los flujos produzcan remanso, producto de las direcciones de flujo que tiene un comportamiento en sus tres ejes, los cuales a través de la simulación con la dinámica computacional de fluidos se evaluara.

1.6. Objetivos.

1.6.1. Objetivo general.

El objetivo principal de la investigación esta en relación directa al problema identificado:

- Evaluar la funcionalidad de sumideros tipo cajón del drenaje urbano a través de la simulación de fluidos tridimensionales mediante el uso de la dinámica computacional de fluidos-ANSYS FLUENT aplicado en la ciudad de Ayacucho.

1.6.2. Objetivos específicos.

- Conocer el comportamiento de los flujos a través de modelos de volúmenes finitos y poder estimar los volúmenes que son captados y el volumen que rebasa la estructura en las intersecciones de las Av. 26 de Enero y Jr. Garcilazo de la Vega, Jr. San Martín y Jr. Sr. de Quinuapata y los sumideros Jr. Bellido, Jr. Callao y Jr. Lima, en la ciudad de Ayacucho .
- Conocer como influye la dirección de las velocidades del flujo a través de la simulación tridimensional donde se conoce las velocidades en sus tres componentes en la funcionalidad del sumidero tipo cajón ubicado en las intersecciones de las Av. 26 de Enero y Jr. Garcilazo de la Vega, Jr. San Martín y Jr. Sr. de Quinuapata y los sumideros Jr. Bellido, Jr. Callao y Jr. Lima, en la ciudad de Ayacucho .
- Determinar como influye el caudal de diseño en determinar la funcionalidad de sumideros tipo cajón del drenaje urbano en las intersecciones de las Av. 26 de

Enero y Jr. Garcilazo de la Vega, Jr. San Martín y Jr. Sr. de Quinuapata y los sumideros Jr. Bellido, Jr. Callao y Jr. Lima, en la ciudad de Ayacucho .

1.7. Limitaciones de la investigación.

Esta investigación esta desarrollada en las intersecciones de las Av. 26 de Enero y Jr. Garcilazo de la Vega, Jr. San Martín y Jr. Sr. de Quinuapata y los sumideros Jr. Bellido, Jr. Callao y Jr. Lima, su limitación abarca al uso de parámetros propios de la zona de estudio, como condiciones iniciales se ha tenido en cuenta las dimensiones de la estructura, caudal pico, dimensiones de la calle y a partir de esto conocer si las estructuras de sumidero tipo cajón cumple su función.

La investigación trata de determinar si el sumidero capta todo el caudal producto de la lluvia en el área identificada, a partir de esto determinar las variables hidráulicas y como influye el tipo de flujo en la relación de volumen retenido y volumen que pasa, así poder estimar la funcionalidad de la estructura y validar la hipótesis.

II: Marco Teórico

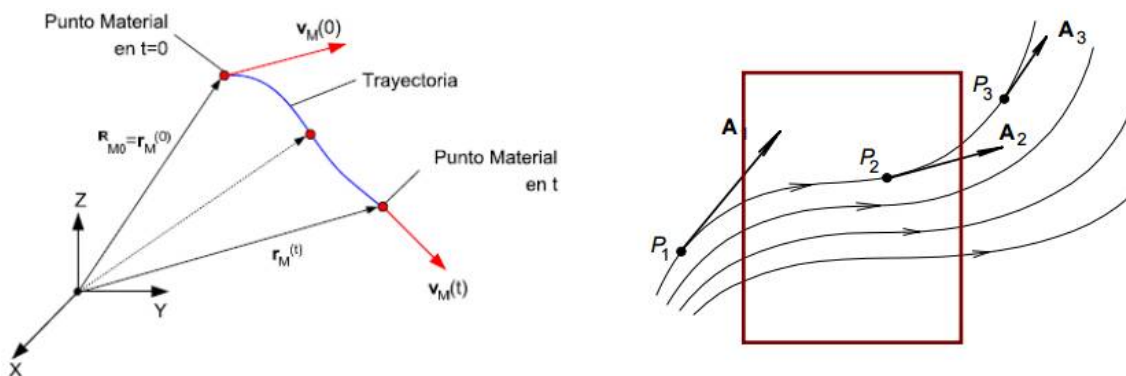
2.1. Movimientos de fluidos

Para desarrollar una base sólida para la investigación durante una práctica en flujos tridimensionales de canales abiertos, se consideran los siguientes conceptos:

2.1.1. Modelos de flujos Lagrangiana y Euleriana

Según Landau y Lifshitz, 1987 la dinámica de fluidos y la teoría de la plasticidad de deformación finita, la representación lagrangiana del campo de flujo ofrece una perspectiva del movimiento del fluido en la que el observador sigue una parcela de fluido individual a medida que se desplaza a través del espacio y el tiempo. Al trazar la posición de dicha parcela a lo largo del tiempo, se obtiene la línea de corriente correspondiente, lo cual puede compararse con la experiencia de sentarse en un bote y dejarse llevar por la corriente de un río.

Figura 2.1: Modelo de flujo Lagrangiano y Euleriano



Fuente: Mejoradownwww.hidraulicafacil.com.mx

Por otro lado, la representación Euleriana del campo de flujo se enfoca en ubicaciones específicas en el espacio, observando cómo el fluido fluye a través de ellas a

medida que transcurre el tiempo. Esta perspectiva puede visualizarse como estar en la orilla de un río y observar el flujo del agua en una posición fija.

1. **Flujo Lagrangiano** En este método, el observador sigue el desplazamiento de una parcela de fluido individual a medida que esta se desplaza a través del espacio y el tiempo. Se enfoca más en el seguimiento de partículas individuales. Esta perspectiva puede ser imaginada como la experiencia de sentarse en un bote y dejarse llevar por la corriente de un río.
2. **Flujo Euleriano** Este enfoque se dirige hacia ubicaciones específicas en el espacio a través de las cuales el fluido fluye a medida que transcurre el tiempo. Se presta mayor atención a las propiedades de flujo de un volumen de control en términos de funciones de espacio y tiempo. Puede ser visualizado como estar en la orilla de un río y observar el paso del agua en una posición fija.

2.1.2. Propiedad de mecánica de fluidos

La mecánica de fluidos es una rama de la física que estudia el comportamiento de los fluidos, tanto en reposo (estática de fluidos) como en movimiento (dinámica de fluidos), según Mott, 1995 indica que la mecánica de los fluidos se encuentran en varios campos, como la meteorología, la oceanografía y la histología, entre otros. A medida que las computadoras se han vuelto más utilizadas, el campo de la dinámica de fluidos computacional se ha desarrollado, permitiendo la solución rápida de problemas matemáticos complejos mediante el uso de herramientas sofisticadas .

2.2. Ecuación de la continuidad

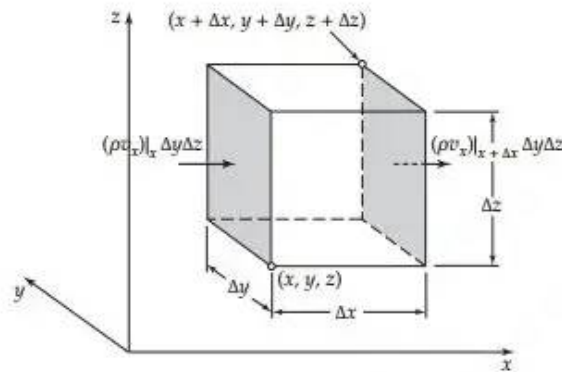
La ecuación de continuidad representa un principio físico que establece que la cantidad de masa o fluido que entra en un sistema cerrado es igual a la cantidad que sale del sistema en el mismo intervalo de tiempo. Matemáticamente, esta ecuación se formula como:

$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 \quad (2.1)$$

Donde:

A_1 y A_2 son las áreas de las secciones transversales en los puntos 1 y 2 del conducto. V_1 y V_2 son las velocidades del flujo en los puntos 1 y 2 de la tubería.

Figura 2.2: Principio de Continuidad



Fuente: <https://mecanica-de-fluidos-2.webnode.mx/>

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \left(\frac{\partial}{\partial x} \rho v_x + \frac{\partial}{\partial y} \rho v_y + \frac{\partial}{\partial z} \rho v_z \right) \quad (2.2)$$

Cuando nos encontramos con un fluido en un espacio tridimensional y una superficie dentro de ese espacio, el flujo a través de esa superficie se define como la velocidad con la que el fluido la atraviesa. El cálculo del flujo se expresa mediante la siguiente integral de superficie:

$$\iint_S \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} d\Sigma \quad (2.3)$$

Donde:

S :representa la superficie a través de la cual se mide el flujo.

$F(x, y, z)$: es un campo vectorial tridimensional que describe el flujo del líquido.

$n(x, y, z)$: asigna un vector unitario normal a cada punto de S .

$d\Sigma$: puede considerarse como una unidad pequeña de área de la superficie S .

2.3. Ecuación de conservación de cantidad de movimiento

La ecuación de conservación de la cantidad de movimiento, también conocida como la ecuación de impulso, se deriva de la aplicación de la segunda ley de Newton

a un fluido. Según esta ley, la suma de las fuerzas externas aplicadas a un sistema es igual a la tasa de cambio de su cantidad de movimiento. Matemáticamente, esto se expresa como:

$$\sum F = m \frac{d\mathbf{V}}{dt} \quad (2.4)$$

Donde:

$\sum F$ = es la suma de las fuerzas externas.

m = es la masa del sistema.

\mathbf{V} = es la velocidad del sistema 1.

Cuando se trata de un fluido en movimiento tridimensional, esta ecuación se vuelve más compleja y se conoce como la ecuación de Navier-Stokes. Esta ecuación describe el movimiento de fluidos viscosos e incompresibles y es fundamental en la dinámica de fluidos

La forma general de la ecuación de Navier-Stokes en tres dimensiones es:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f} \quad (2.5)$$

Donde:

ρ = es la densidad del fluido.

\mathbf{v} = es el campo de velocidad del fluido.

t = es el tiempo.

p = es la presión del fluido.

μ = es la viscosidad dinámica del fluido.

\mathbf{f} = es la densidad de fuerza, como la gravedad

Esta ecuación, siendo una ecuación diferencial parcial no lineal, describe cómo cambia la velocidad del fluido en el espacio y el tiempo. Es importante destacar que esta ecuación es bastante compleja y generalmente se resuelve mediante métodos numéricos.

2.4. Ecuación de la conservación de energía

Para una exploración más detallada de la conservación de la energía en fluidos, es esencial comprender los principios fundamentales expresados mediante las ecuaciones de Bernoulli y la ley de conservación de la masa. En el contexto de un flujo constante de un fluido incompresible, la ecuación de Bernoulli se presenta como:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{constante} \quad (2.6)$$

Donde P es la presión del fluido, ρ es su densidad, v representa la velocidad del flujo, g es la aceleración debida a la gravedad, y h denota la altura sobre un nivel de referencia. Esta ecuación revela cómo la energía total del fluido se mantiene constante a lo largo de su trayectoria, mostrando la relación inversa entre la presión y la velocidad.

Paralelamente, la ley de conservación de la masa postula que la masa de fluido que ingresa a un sistema es igual a la masa que sale, sin acumulación interna. Matemáticamente, se expresa como:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (2.7)$$

Aquí, ρ es la densidad del fluido, A es el área de la sección transversal del conducto, y v es la velocidad del fluido. Esta ecuación subraya la conservación de la masa a lo largo de un flujo, facilitando un análisis más profundo de situaciones fluidodinámicas.

La aplicación conjunta de estas ecuaciones, junto con consideraciones adicionales como la viscosidad y las pérdidas de energía debidas a la fricción, permite un análisis más preciso y detallado. Esta comprensión profunda es esencial para el diseño efectivo de sistemas de fluidos, como redes de tuberías, sistemas de bombeo y la aerodinámica en el diseño de aeronaves. En el contexto de un estudio más avanzado, estas ecuaciones forman la base para modelar y comprender fenómenos fluidodinámicos complejos, proporcionando una herramienta valiosa para la ingeniería y la investigación en ciencias aplicadas.

2.5. Ecuaciones de Navier-Stokes y Reynolds

Las ecuaciones de Navier-Stokes constituyen un sistema de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el comportamiento de un fluido viscoso. Este conjunto de ecuaciones recibe su nombre en honor a Claude-Louis Navier y George Gabriel Stokes. Matemáticamente, las ecuaciones de Navier-Stokes expresan la conservación del momento y la conservación de la masa en el contexto de fluidos newtonianos. Su relevancia es destacada principalmente desde una perspectiva matemática.

Las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds, también conocidas como ecuaciones RANS, representan ecuaciones de movimiento para el flujo de fluidos promediadas en el tiempo. Esta formulación es una versión simplificada de las ecuaciones de Navier-Stokes y se emplea comúnmente en la dinámica de fluidos computacional (CFD) para modelar flujos turbulentos.

Las cuales definimos de la siguiente manera

Las ecuaciones de Navier-Stokes

describen el movimiento de un fluido viscoso y son fundamentales en la mecánica de fluidos. Se expresan como un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales que describen la conservación de la masa y el momento para un fluido incompresible. Las ecuaciones son:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (2.8)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} \quad (2.9)$$

Donde:

ρ es la densidad del fluido.

\mathbf{v} es el vector de velocidad del fluido.

P es la presión.

μ es la viscosidad dinámica del fluido.

\mathbf{g} es el vector de gravedad.

Ecuaciones de Reynolds

Las ecuaciones de Reynolds son una aproximación promediada de las ecuaciones de Navier-Stokes, útiles para describir el flujo de fluidos turbulentos. Estas ecuaciones introducen términos adicionales para modelar la fluctuación del flujo. Las ecuaciones para

el flujo promedio son:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \mathbf{v}) = 0 \quad (2.10)$$

$$\bar{\rho} \left(\frac{\partial \bar{\mathbf{v}}}{\partial t} + (\bar{\mathbf{v}} \cdot \nabla) \bar{\mathbf{v}} \right) = -\nabla \bar{P} + \nabla \cdot (\mu_t \nabla \bar{\mathbf{v}}) + \bar{\rho} \mathbf{g} \quad (2.11)$$

Donde:

$\bar{\rho}$ es la densidad promediada del fluido.

$\bar{\mathbf{v}}$ es el vector de velocidad promediado.

\bar{P} es la presión promediada.

μ_t es la viscosidad turbulenta.

Estas ecuaciones representan una herramienta esencial en la simulación de flujos turbulentos y son clave en la simulación numérica de fenómenos complejos en ingeniería y ciencias aplicadas.

2.6. Ecuación de la dinámica de fluidos computacional ANSYS FLUENT

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es una rama de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas que involucran flujos de fluidos. Los ingenieros utilizan CFD en una amplia gama de aplicaciones para predecir y analizar donde y cómo los fluidos se moverán.

ANSYS FLUENT es un software de CFD muy popular que permite a los ingenieros modelar el flujo de fluidos y transferencia de calor en 3D. Este software utiliza las ecuaciones de Navier-Stokes para describir el movimiento de fluidos.

En ANSYS FLUENT, puedes resolver simulaciones CFD entendiendo toda su estructura, proceso y sentido físico. Comprenderás el fundamento teórico de cada problema, entendiendo todas las ecuaciones y modelos a resolver y partiendo desde cero. La ecuación de Navier-Stokes, que es fundamental en la dinámica de fluidos computacional (CFD), se expresa de la siguiente manera:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} \quad (2.12)$$

Donde:

ρ es la densidad del fluido.

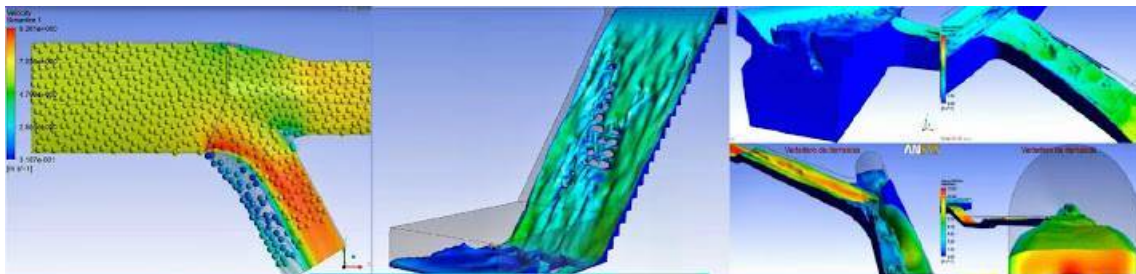
\mathbf{v} es el vector de velocidad del fluido.

P es la presión.

μ es la viscosidad dinámica del fluido.

\mathbf{g} es el vector de gravedad.

Figura 2.3: Ansys Fluent para modelos CFD



Fuente: <https://www.udemy.com/course/simulación-hidráulica-tridimensional-con-ansys-cfx/>

En resumen, ANSYS FLUENT es una herramienta poderosa que permite a los ingenieros y científicos modelar, simular y predecir el comportamiento de los fluidos y la transferencia de calor en situaciones del mundo real

2.7. Turbulencia en fluidos tridimensional

La turbulencia en fluidos tridimensionales se presenta como un fenómeno complejo caracterizado por el movimiento irregular, caótico y altamente intermitente de las partículas del fluido. Algunas de sus características clave incluyen:

1. **Irregularidad:** El flujo turbulento se destaca por el movimiento caótico e irregular de las partículas del fluido.
2. **Difusividad:** En el flujo turbulento, se observa una distribución de velocidad relativamente plana en la sección de la tubería, lo que lleva a que el fluido fluya a un único valor y caiga rápidamente cerca de las paredes.

3. **Rotacionalidad:** La turbulencia se caracteriza por un fuerte mecanismo tridimensional de generación de vórtices, conocido como estiramiento de vórtice.
4. **Disipación:** La energía cinética en el flujo turbulento experimenta un proceso disipativo, transformándose en energía interna debido al esfuerzo de corte viscoso.

La descripción de la turbulencia en fluidos tridimensionales se puede agregar a la ecuación de Navier-Stokes de la siguiente manera:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} - \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (2.13)$$

Donde:

ρ es la densidad del fluido.

\mathbf{v} es el vector de velocidad del fluido.

P es la presión.

μ es la viscosidad dinámica del fluido.

\mathbf{g} es el vector de gravedad.

$\boldsymbol{\tau}$ es el tensor de esfuerzo turbulento.

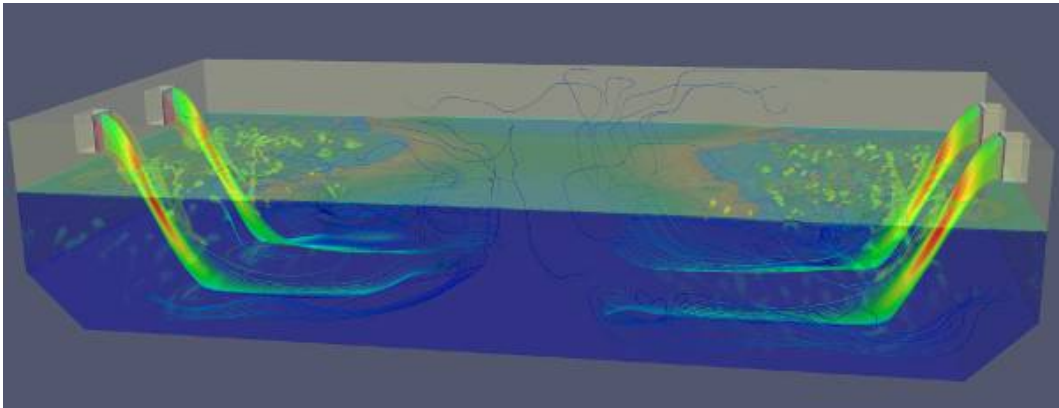
El término adicional $\boldsymbol{\tau}$ representa la contribución de la turbulencia al esfuerzo en el fluido. La simulación específica de la turbulencia puede implicar el uso de modelos como el modelo de mezcla de longitud de escala o el modelo de esfuerzo de Reynolds.

El análisis de la turbulencia es esencial en la ingeniería, particularmente en la ingeniería nuclear, y se lleva a cabo mediante la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). CFD, una rama de la mecánica de fluidos, emplea métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas relacionados con flujos de fluidos turbulentos. Las ecuaciones de Navier-Stokes son la base de todos los códigos CFD.

2.7.1. Solución numérica de las ecuaciones de la dinámica de fluidos computacional

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) utiliza métodos numéricos para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes que describen el comportamiento de los fluidos. La discretización es esencial para convertir ecuaciones continuas en un formato numérico, según Çengel y Cimbala, 2017.

Figura 2.4: Solucion numérica del CFD



Fuente: <https://www.gii.udc.es/investigacion/detalle/2>

2.7.2. Discretización de las ecuaciones

La discretización de las ecuaciones en la solución numérica de dinámica de fluidos es un proceso fundamental en la simulación computacional de flujos fluidos. Este proceso involucra la conversión de ecuaciones diferenciales parciales (EDP) que describen el comportamiento del fluido en un dominio continuo en ecuaciones algebraicas que se resuelven en un dominio discretizado.

Discretización de la Ecuación de Navier-Stokes para Fluidos Tridimensionales, la ecuación de Navier-Stokes para un fluido incompresible en tres dimensiones es:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2.14)$$

donde \mathbf{u} es el vector de velocidad, p es la presión, ρ es la densidad y ν es la viscosidad cinemática.

Discretización en el Tiempo, utilizaremos el método de diferencias finitas centradas en el tiempo (Euler implícito) para discretizar la derivada temporal:

$$\frac{\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^n}{\Delta t} + (\mathbf{u}^{n+1} \cdot \nabla) \mathbf{u}^{n+1} = -\frac{1}{\rho} \nabla p^{n+1} + \nu \nabla^2 \mathbf{u}^{n+1} \quad (2.15)$$

Discretización en el Espacio, para discretizar las derivadas espaciales, utilizamos diferencias finitas centradas:

$$(\mathbf{u}^{n+1} \cdot \nabla) \mathbf{u}^{n+1} \approx (\mathbf{u}^{n+1} \cdot \nabla_x u^{n+1}, \mathbf{u}^{n+1} \cdot \nabla_y v^{n+1}, \mathbf{u}^{n+1} \cdot \nabla_z w^{n+1}) \quad (2.16)$$

$$\nabla^2 \mathbf{u}^{n+1} \approx \left(\frac{u_{i+1,j,k}^{n+1} - 2u_{i,j,k}^{n+1} + u_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2}, \frac{v_{i,j+1,k}^{n+1} - 2v_{i,j,k}^{n+1} + v_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y^2}, \frac{w_{i,j,k+1}^{n+1} - 2w_{i,j,k}^{n+1} + w_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z^2} \right) \quad (2.17)$$

Ecuaciones Discretizadas, finalmente, sustituimos las aproximaciones en la ecuación de Navier-Stokes discretizada:

2.7.3. Discretización espacial

Discretización Espacial en 3D para CFD, consideremos las ecuaciones de la dinámica de fluidos en su forma general:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot ((E + p) \mathbf{u}) = \mu \nabla \cdot (\nabla \mathbf{u}) + \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{g} \quad (2.20)$$

donde ρ es la densidad, \mathbf{u} es la velocidad, p es la presión, μ es la viscosidad dinámica, E es la energía total, y \mathbf{g} es el campo de gravedad.

Discretización Espacial, utilizaremos un esquema de diferencias finitas para discretizar las derivadas espaciales. En un dominio tridimensional con una malla regular, la discretización de la derivada espacial en la dirección x puede expresarse como:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} \approx \frac{\phi_{i+1,j,k} - \phi_{i,j,k}}{\Delta x} \quad (2.21)$$

Similarmente, para las derivadas en las direcciones y y z :

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} \approx \frac{\phi_{i,j+1,k} - \phi_{i,j,k}}{\Delta y}, \quad \frac{\partial \phi}{\partial z} \approx \frac{\phi_{i,j,k+1} - \phi_{i,j,k}}{\Delta z} \quad (2.22)$$

Aplicamos estas aproximaciones a las ecuaciones de la dinámica de fluidos para discretizarlas en el espacio.

Esquema de Diferencias Finitas, consideremos la ecuación de conservación de la masa para discretizarla en el espacio:

$$\frac{\rho_{i+1,j,k} - \rho_{i,j,k}}{\Delta t} + \frac{(\rho u)_{i+1,j,k} - (\rho u)_{i,j,k}}{\Delta x} + \frac{(\rho v)_{i,j+1,k} - (\rho v)_{i,j,k}}{\Delta y} + \frac{(\rho w)_{i,j,k+1} - (\rho w)_{i,j,k}}{\Delta z} = 0 \quad (2.23)$$

Esta aproximación se puede extender a las demás ecuaciones utilizando un enfoque similar.

2.7.4. Discretización temporal

La discretización temporal es un paso esencial en la solución numérica de las ecuaciones de la dinámica de fluidos, como las ecuaciones de Navier-Stokes. Este procedimiento implica la aproximación de las variables de campo (ρ, u, v, w, p, \dots) mediante un conjunto finito de valores en puntos denominados nodos.

Las ecuaciones de movimiento también experimentan una discretización, es decir, se aproximan en función de los valores en los nodos. Para la aproximación del término temporal, se puede emplear el esquema de bajo orden CDS (*Central Difference Scheme* o Esquema de las Diferencias Centradas).

Al definir la discretización temporal, es posible establecer un tiempo característico τ_0 , que, en el caso de un problema hidráulico, podría representar el tiempo necesario para recorrer el ancho de la sección con la velocidad media, aproximadamente 1 segundo. Además, τ se define como la escala temporal más pequeña a discretizar, y la relación entre ambos viene dada por:

$$\frac{\tau}{\tau_0} = \frac{1}{\sqrt{Re}} \quad (2.24)$$

Donde Re es el número de Reynolds. Es fundamental considerar que la discretización temporal debe ser lo suficientemente pequeña para capturar con precisión los fenómenos físicos relevantes, pero no tan pequeña como para volver computacionalmente prohibitiva la simulación.

2.7.5. Discretización de las Ecu. diferenciales en Ansys Fluent

La discretización de las ecuaciones diferenciales en ANSYS Fluent se realiza de dos maneras principales:

- **Discretización de la ecuación de continuidad:** ANSYS Fluent utiliza algoritmos de acoplamiento de presión-velocidad como SIMPLE, SIMPLER, PISO, COUPLED para discretizar la ecuación de continuidad. Estos algoritmos utilizan una relación entre las correcciones de velocidad y presión para imponer la conservación de la masa y obtener el campo de presión.
- **Discretización de la ecuación de momento:** La ecuación de momento se discretiza aplicando la forma integral más general de la ecuación de conservación de momento, que incluye los términos de difusividad y fuente. Esta ecuación se aplica para cada volumen de control en el dominio computacional.

Es importante mencionar que ANSYS Fluent proporciona varios esquemas para interpolar los valores de la cara a partir de los valores en el centro de los volúmenes. Estos esquemas incluyen el Esquema Upwind de Primer Orden, Esquema Power – law y Esquema Upwind de Segundo Orden.

2.8. Errores en la simulación computacional

Es importante tener en cuenta que la precisión de las simulaciones computacionales depende en gran medida de la correcta configuración de los parámetros y de la comprensión de las limitaciones de los modelos utilizados. Por lo tanto, siempre es recomendable validar los resultados de las simulaciones con datos experimentales cuando sea posible según Bertolino, Cantero, Storti, y Teruel, 2014.

2.9. Consistencia, estabilidad y convergencia de Ansys Fluent

En ANSYS Fluent, los conceptos de consistencia, estabilidad y convergencia son fundamentales para la solución numérica de las ecuaciones de la dinámica de fluidos.

Es importante tener en cuenta que la consistencia y la estabilidad son necesarias pero no suficientes para garantizar la convergencia de un esquema numérico. Además,

la convergencia de la solución puede verse afectada por factores como la calidad de la malla, las condiciones de contorno y el modelo de turbulencia utilizado.

2.10. Volúmenes Finitos

El método de volúmenes finitos para flujos tridimensionales en canales abiertos implica dividir el dominio de interés en una malla tridimensional de volúmenes finitos. Cada uno de estos volúmenes finitos representa una celda de control en la cual se discretizan y resuelven las ecuaciones fundamentales de conservación de masa, momento y energía del flujo, lo cual implica:

2.10.1. Dimensionamiento del dominio

El dimensionamiento del dominio en simulaciones de volúmenes finitos para flujos tridimensionales es un proceso crucial que implica establecer las dimensiones y la extensión del área en la cual se llevará a cabo la simulación. Este concepto es esencial para garantizar resultados precisos y representativos del fenómeno que se está estudiando.

- **Definición del Espacio de Estudio:** Se debe identificar claramente el espacio tridimensional que se va a simular, teniendo en cuenta las características físicas del flujo y los objetivos de la simulación.
- **Consideración de las Condiciones de Contorno:** Las condiciones de contorno son esenciales para limitar el dominio de simulación. Deben reflejar de manera precisa las condiciones del entorno y los límites del sistema en estudio.
- **Ubicación de Puntos de Interés:** Es crucial determinar la ubicación de los puntos de interés dentro del dominio tridimensional. Esto puede incluir la ubicación de objetos, zonas de interacción, o lugares donde se desean obtener datos específicos.
- **Zonas de Interés y Regiones Críticas:** Se deben identificar las zonas de interés y las regiones críticas donde se espera que ocurran fenómenos importantes. El dominio debe extenderse lo suficiente para abarcar estas áreas cruciales.
- **Consideración de las Características del Flujo:** La velocidad del flujo, los patrones de turbulencia, y otros factores característicos del fenómeno deben ser consi-

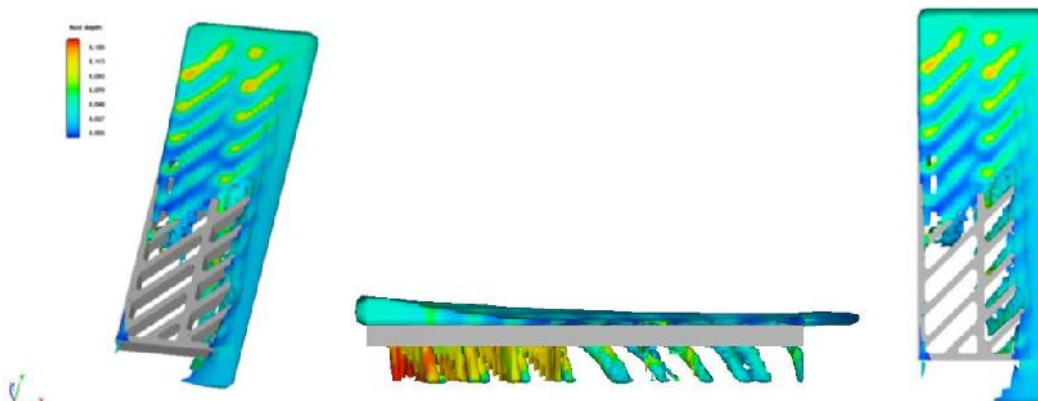
derados al dimensionar el dominio para asegurar que se capturen adecuadamente.

- **Análisis de Sensibilidad:** Se puede realizar un análisis de sensibilidad para evaluar cómo varían los resultados con cambios en las dimensiones del dominio. Esto ayuda a optimizar el tamaño del dominio y evitar bordes artificiales que puedan afectar los resultados.
- **Condiciones de Frontera Transparentes:** Se deben establecer condiciones de frontera que minimicen las reflexiones de ondas o perturbaciones en los límites del dominio, especialmente en simulaciones de flujos tridimensionales.
- **Optimización del Uso de Recursos Computacionales:** El dimensionamiento del dominio también debe tener en cuenta la capacidad computacional disponible. Se busca lograr un equilibrio entre la precisión de la simulación y los recursos necesarios para llevar a cabo el cálculo.

2.10.2. Modelos tridimensionales en flujos

Los modelos tridimensionales en flujos usando volúmenes finitos son una técnica avanzada en el campo de la dinámica de fluidos computacional (CFD). Estos modelos permiten simular con gran detalle y precisión el comportamiento de flujos tridimensionales en dominios complejos.

Figura 2.5: Simulación de flujos con modelos tridimensionales



Fuente: Vargas, 2014

La validación y verificación de los modelos tridimensionales son procesos críticos para asegurar que los resultados simulados sean consistentes con la realidad física y sean confiables para aplicaciones específicas.

2.10.3. Ventajas sobre los modelos 3D

Las ventajas de emplear modelos tridimensionales de volúmenes finitos en comparación con modelos bidimensionales para flujos tridimensionales incluyen:

- **Mayor Precisión:** Los modelos tridimensionales ofrecen una representación más precisa de la geometría y la dinámica del flujo en situaciones donde la variación tridimensional es significativa.
- **Captura de Fenómenos Tridimensionales:** Permiten la captura de fenómenos complejos como la interacción fluido-estructura, vórtices tridimensionales y distribuciones no uniformes de velocidad y presión.
- **Mejora en la Resolución de la Malla:** Posibilitan una mayor densidad de la malla, brindando una representación más detallada de la geometría y capturando gradientes locales de velocidad y presión de manera más efectiva.
- **Consideración de Condiciones de Contorno Tridimensionales:** Permite la aplicación de condiciones de contorno más realistas en las fronteras del dominio, mejorando la precisión.
- **Simulación de Superficies Libres:** En flujos con superficies libres, como ríos o canales, los modelos tridimensionales posibilitan una simulación más precisa de la interfaz aire-agua, capturando la dinámica tridimensional de las ondas y la interacción con estructuras circundantes.
- **Aplicabilidad a Geometrías Complejas:** Son esenciales para representar con precisión la interacción fluido-estructura en presencia de geometrías complejas o obstáculos tridimensionales.
- **Mejora en la Validación con Datos Experimentales:** Los resultados de los modelos tridimensionales tienden a acercarse más a los datos experimentales, mejorando la confiabilidad y aplicabilidad de las simulaciones en situaciones del mundo real.

2.11. ANSYS FLUENT CFD

ANSYS Fluent CFD:

ANSYS Fluent es un programa de simulación CFD que utiliza el método de volúmenes finitos para resolver ecuaciones fundamentales, como las ecuaciones de Navier-Stokes, que gobiernan el comportamiento de los fluidos. El término "Fluent" refleja la

capacidad del software para manejar una amplia variedad de problemas de flujo, desde flujos simples hasta flujos complejos y multifásicos.

Principales Características y Funcionalidades:

- **Modelado Tridimensional:** ANSYS Fluent permite la simulación tridimensional, capturando con precisión la complejidad de los flujos en entornos reales.
- **Diversidad de Fluidos:** Puede modelar una amplia gama de fluidos, incluyendo gases, líquidos, y flujos multifásicos, lo que lo hace aplicable en diversas industrias.
- **Transferencia de Calor:** Incluye capacidades para simular la transferencia de calor en conjunción con los flujos fluidos, lo que es esencial para análisis termohidráulicos.
- **Interacciones Fluido-Estructura:** Permite la simulación de interacciones fluido-estructura, donde los efectos del flujo en las estructuras y viceversa son tenidos en cuenta.
- **Modelos de Turbulencia:** Ofrece varios modelos de turbulencia para capturar fenómenos turbulentos en diferentes aplicaciones.
- **Interfaz Gráfica Intuitiva:** ANSYS Fluent proporciona una interfaz gráfica intuitiva que facilita la configuración de simulaciones y la visualización de resultados.
- **Posprocesamiento Avanzado:** Ofrece herramientas avanzadas de posprocesamiento para analizar y visualizar de manera efectiva los resultados de la simulación.

2.12. Hidráulica urbana

La hidráulica urbana es una rama de la ingeniería hidráulica que se centra en el estudio y diseño de sistemas hidráulicos aplicados a entornos urbanos. Este campo aborda la gestión del agua en áreas urbanas, considerando aspectos como el suministro de agua potable, el drenaje pluvial, el tratamiento de aguas residuales y la gestión sostenible de los recursos hídricos, según Binnquist Cervantes, Hevia del Puerto Puente, y Chávez Cortés, 2013.

Figura 2.6: Hidráulica urbana



Fuente: Propia del tesista

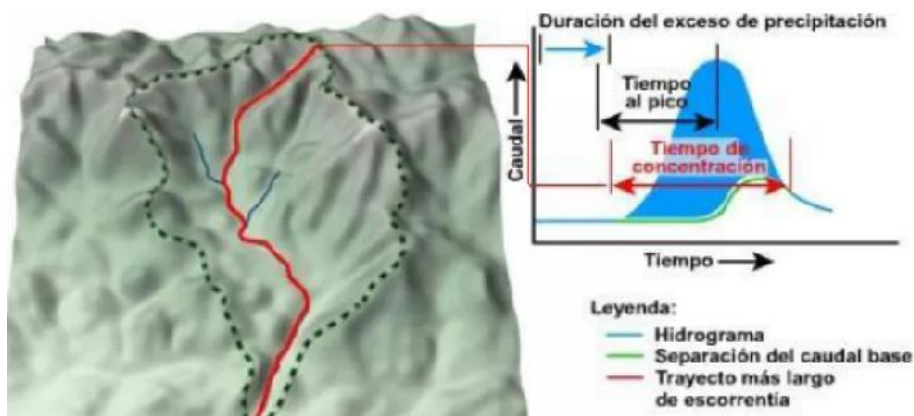
2.12.1. Método racional para el cálculo de caudales

El método racional es una herramienta comúnmente utilizada en hidrología urbana para calcular caudales de diseño en sistemas de drenaje pluvial. Este método proporciona una estimación simple y rápida del caudal de escorrentía superficial en función de factores como la intensidad de la lluvia, la duración y las características del área de drenaje. Aquí hay un resumen del método racional y sus principales conceptos aplicados a la hidráulica urbana:

La fórmula fundamental del método racional es: $Q = CiA$

Donde: Q es el caudal de escorrentía (m^3/s), C es el coeficiente de escorrentía, i es la intensidad de la lluvia (m/s), y A es el área de drenaje (m^2).

Figura 2.7: Método Racional



Fuente: Mejorado de <https://1library.co/document/>

2.12.2. Intensidad de la Lluvia (*i*) - IILA-SENAMHI-UNI

La intensidad de la lluvia representa la tasa de precipitación en un determinado periodo de tiempo. Puede obtenerse a partir de datos históricos de precipitación o mediante métodos estadísticos basados en la duración de la tormenta.

El método IILA-SENAMHI-UNI constituye una herramienta confiable y práctica para la estimación de intensidades de lluvia en función de la duración y el periodo de retorno, especialmente en regiones del Perú. Su desarrollo responde a la necesidad de contar con un modelo adaptado a las condiciones pluviométricas nacionales, fruto del convenio entre el Instituto Ítalo-Latinoamericano (IILA), el SENAMHI y la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) en 1983, lo que garantiza su pertinencia y validez técnica (SENAMHI, 1983).

El uso de este método se emplea por la disponibilidad de parámetros zonificados: ofrece coeficientes y ecuaciones diferenciadas para las principales regiones del país (costa, sierra y selva), lo que permite obtener estimaciones representativas según la realidad pluviométrica local (SENAMHI, 2009).

Así mismo se tiene el respaldo normativo: es recomendado en el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) para el diseño de sistemas de drenaje pluvial urbano, lo que asegura que su aplicación cumple con estándares oficiales (RNE, 2014).

Su uso se basa por la simplicidad y aplicabilidad: su formulación matemática permite calcular curvas IDF de manera rápida y precisa, sin necesidad de recurrir a registros continuos extensos que muchas veces no están disponibles (Flores, 2017 Aplicación del método IILA-SENAMHI en el diseño de drenaje urbano en la región andina. Tesis de Ingeniería Civil).

Limitaciones:

- El método racional asume que la intensidad de la lluvia es uniforme en todo el área de drenaje.
- Se utiliza mejor para eventos de tormenta de corta duración.
- No considera la infiltración y otras características complejas del flujo de agua.

2.12.3. Flujo de calles

. El flujo de calles en hidráulica urbana se refiere al movimiento y transporte del agua a lo largo de las vías urbanas, incluyendo carreteras, calles y aceras. Este aspecto

de la hidráulica urbana es fundamental para el diseño adecuado de sistemas de drenaje pluvial y la gestión de las aguas pluviales en entornos urbanos. Algunos aspectos clave relacionados con el flujo de calles en hidráulica urbana incluyen:

Drenaje Pluvial en Calles:

- **Sistemas de Alcantarillado:** Las calles suelen estar equipadas con sistemas de alcantarillado pluvial que recogen y transportan el agua de lluvia hacia los desagües.
- **Sumideros y Rejillas:** Los sumideros y rejillas a lo largo de las calles permiten la entrada del agua al sistema de drenaje y evitan la acumulación excesiva en la superficie.

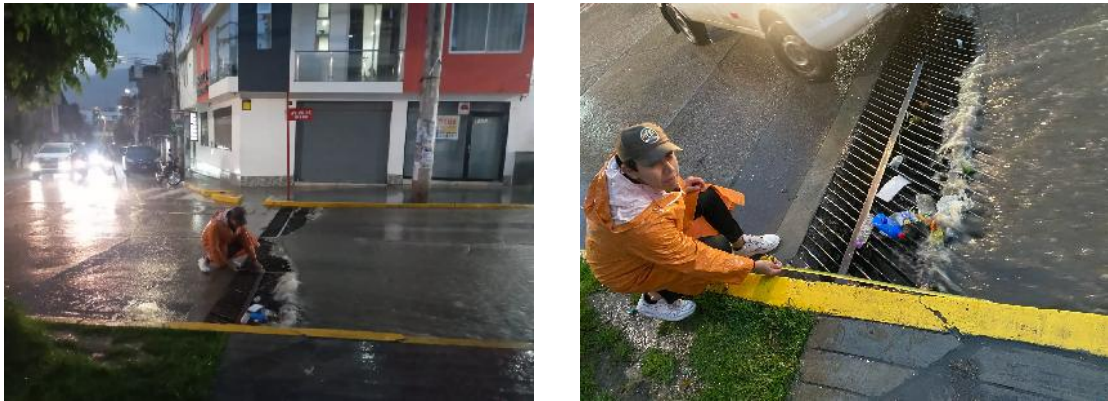
2.12.4. Drenaje urbano

El drenaje urbano en hidráulica urbana se refiere al sistema de gestión del agua de lluvia y escorrentía en áreas urbanas. Este sistema busca prevenir inundaciones, controlar la erosión y garantizar la eliminación eficiente del exceso de agua de lluvia de las calles, carreteras y áreas urbanizadas. Utiliza técnicas como alcantarillado pluvial, sumideros, canales y sistemas de retención para dirigir el agua hacia lugares seguros, evitando problemas de inundación y minimizando los impactos ambientales en entornos urbanos.

2.12.5. Sumideros en calles

En hidráulica urbana, los sumideros son elementos esenciales del sistema de drenaje pluvial en calles. Un sumidero es una abertura en la superficie de la calle, generalmente ubicada en la acera o a lo largo del borde de la carretera, diseñada para recoger y drenar el agua de lluvia que se acumula en la superficie de la vía. El concepto básico de sumideros en calles de hidráulica urbana implica la captación y evacuación controlada de aguas pluviales. Estos elementos están conectados a sistemas de alcantarillado pluvial y canales subterráneos, permitiendo que el agua de lluvia fluya desde la superficie de la calle hacia el sistema de drenaje.

Figura 2.8: Sumidero en la Av. 26 de Enero y Jr. Garcilazo de la Vega



Fuente: Trabajo de campo/

Figura 2.9: Sumidero en el Jr. San Martín con Jr. Sr. de Quinuapata



Fuente: Trabajo de campo

III: Materiales y métodos

3.1. Enfoque.

Esta investigación se enmarca a un enfoque cualitativo, en el cual se trata de identificar la funcionalidad de la estructura del sumidero tipo cajón para captar las aguas pluviales, usando modelos de la dinámica computacional de fluidos en zonas urbanas y donde se identificaran la formación de turbulencia por el cambio de dirección de velocidades que según Sampieri, Collado, y Lucio, 2014 este enfoque esta sujeto a la medición de variables (magnitud), sobre un área concreto y delimitado.

3.2. Alcance de la investigación.

La investigación aplica a un alcance exploratorio - descriptivo, según Sampieri et al., 2014 señala que generalmente el enfoque de toda investigación se centra en un enfoque exploratorio. En este caso, este enfoque busca investigar el comportamiento del flujo mediante modelos de la dinámica computacional de fluidos e identificar su comportamiento en sumideros tipo cajón para recolectar volúmenes de agua pluvial mediante la simulación de obstáculos como rejillas, modificaciones de sección, variaciones de rugosidad, entre otros; así se comprende que el alcance alcanza.

3.3. Diseño de investigación.

El diseño de este estudio es de naturaleza no experimental transversal, pues la meta es comprender el comportamiento del caudal cuando se modifican las secciones y características del canal por el que fluye el agua pluvial en las intersecciones de las Av. 26 de Enero y Jr. Garcilazo de la Vega, Jr. San Martín y Jr. Sr. de Quinuapata y los

sumideros Jr. Bellido, Jr. Callao y Jr. Lima, Huamanga - Ayacucho mediante la aplicación de modelos computacionales de dinámica de fluidos CFD.

3.4. Hipótesis.

Según Sampieri et al., 2014 indica que la hipótesis es como lo que se busca verificar y se caracteriza como una explicación limitada, señalando que provienen de la revisión bibliográfica y que son soluciones a los problemas propuestos.

3.4.1. Hipótesis general.

- A través de la simplificación de dominio discreto del problema, la dinámica de fluidos computacional (CFD) muestra mejor el comportamiento al incorporar cambios en las secciones del canal, obstáculos, rugosidades y coberturas, entre otras variables.

3.4.2. Hipótesis específicas.

- El uso de volúmenes finitos mejorará la descripción del comportamiento de flujos en los sumideros tipo cajón para el drenaje pluvial urbano, además de permitir mostrar el porcentaje de caudal captado y el caudal rebosado.
- La dirección de las velocidades de un flujo tridimensional aumenta la veracidad del comportamiento de el cálculo de variables hidráulicas sobre estructuras, pudiendo evaluar la funcionalidad de estas.
- El caudal transitado determinará la funcionalidad de sumideros tipo cajón en los drenajes urbanos de flujos pluviales, pudiendo validar e identificar los caudales captados y los caudales que rebosan la estructura.

3.5. Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional.

La Operacionalización de las variables se indica en la tabla siguiente, donde muestra la relación de las variables , indicadores y su medición:

Tabla 3.1: Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional

Variable de estudio	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicador	Escala de medición
Variable dependiente funcionalidad de estructuras hidráulicas	Generado a partir del análisis de resultados en función de los caudales y obstáculos presentes en el estudio	Cuantificación de la funcionalidad de la estructura	Tirantes	Caudal	Ordinal
Variable independiente Variables hidráulicas	Este variables resultan de la simulación para condiciones iniciales cambio de sección de canal, cambio de rugosidad, caudal, obstáculos como rejillas y pendientes del sumidero tipo cajón para drenaje urbano	Viene determinado por el cálculo de las variables hidráulicas	Cuantificación del volumen captado y rebosado	Dirección de flujo	Nominal
			Medición de la Velocidad	Velocidad de flujo	Nominal
			Medición de la Caudal	Caudal de flujo	Nominal

Fuente: Elaboración propia.

3.6. Técnicas e instrumentos.

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) puede verse como una herramienta de medición virtual que posibilita el análisis del comportamiento de un fluido sin requerir pruebas experimentales. El CFD brinda información detallada acerca de variables como la presión, la temperatura, la turbulencia o la velocidad en cualquier parte del dominio mediante el cálculo numérico de ecuaciones que modelan el flujo. Con una resolución espacial y temporal elevada, a diferencia de los instrumentos tradicionales, proporciona una imagen integral y no intrusiva del sistema.

3.7. Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información.

En este proyecto de investigación, buscaremos determinar la eficacia de las estructuras de un sistema de drenaje urbano para ríos como los sumideros de tipo cajón y valorarlas mediante el uso de modelos CFD para evaluar el comportamiento de los fluidos. Para ello, emplearemos programas como ANSYS FLUENT, ArcGIS y AutoCAD. Por lo tanto, las técnicas estadísticas no son relevantes en el estudio.

3.8. Nivel de Investigación

Las precipitación máximas producen caudales extraordinarios y a su vez generan flujos turbulentos, especialmente cuando las secciones cambian de forma inesperada como los sumideros de los drenajes urbanos mediante el uso de rejillas de metal, notándose una formación de flujo de agua al entrar en estas rejillas. Este fenómeno puede ser detectado mediante modelos tridimensionales para examinar las variables hidráulicas que se generan.

Investigación Correlacional: Relación con las condiciones iniciales del lugar para la simulación con el caudal máximo usando volúmenes finitos.

Investigación explicativa: Explica de manera detallada el principio de continuidad para flujos sobre rejillas metálicas y su comportamiento.

3.9. Unidad de investigación

La unidad de investigación esta definido por el porcentaje que no entra al sumidero y pasa por las rejillas, impactando la vía más baja, creando así vías con presencia de aguas pluviales, usando como fuente primaria la información de la sección de las intersecciones evaluadas y como fuente secundaria el caudal de diseño asociado al coeficiente de escorrentía y a la intensidad de lluvia.

3.10. Tipo de investigación

El tipo de investigación esta definido por ser **descriptivo y explicativo**, porque describe las características, propiedades del flujo y conociendo los caudales podemos explicar su comportamiento a través del uso de modelos tridimensionales de flujos con el uso de métodos iterativos.

3.11. Población y muestra.

Según Sampieri et al., 2014 señala que la delimitación poblacional simboliza un grupo de casos que comparten similitudes en sus propiedades, mientras que la muestra es uno de los componentes del grupo detectado.

Figura 3.10: Representación la población - Ciudad de Ayacucho



Fuente: Trabajo de campo del tesista

3.11.1. Población

En este estudio se han tomado en cuenta todas las calles donde se han edificado los sumideros de cajón para recoger aguas pluviales en la ciudad de Ayacucho. Se tiene conocimiento del tipo de flujo caudaloso característico de las ciudades de la sierra peruana, demostrado con periodos de concentración breves y las variaciones en las inclinaciones de las calles provocan comportamientos variables. Además, las precipitaciones anuales generan inundaciones características de la región, figura 3.10.

Unidad de análisis.- La variación de sección mediante las rejillas metálicas del sumidero provoca alteraciones en la preservación de la continuidad del flujo, creando un porcentaje que no entra al sumidero. Esta intersección se selecciona por conveniencia, disponiendo de datos de campo e información de la estructura.

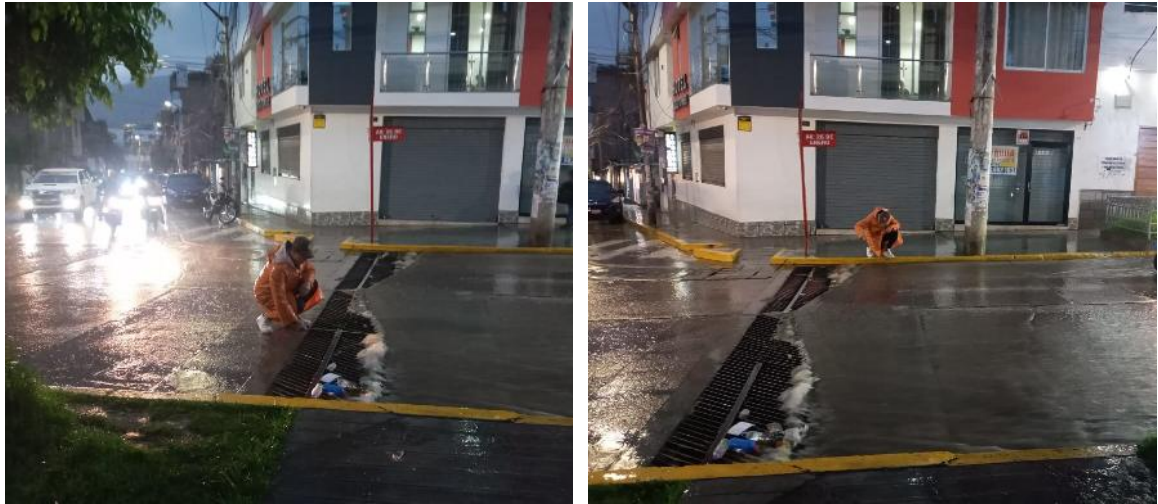
Delimitación de la población.- El límite de la población se establece por todas las intersecciones de calles donde se hallan los sumideros para el drenaje de aguas pluviales en la ciudad.

3.11.2. Muestra

Dentro de la población a lo largo de las calles de Huamanga se encuentran tramos donde se ejecutaron sumideros tipo cajón (obras de drenaje pluvial urbano), para captar estas aguas, sin embargo para la presente investigación se elige como muestra 5 sumideros las que se encuentran entre las intersecciones de las Av. 26 de Enero y Jr. Garcilazo de la Vega, Jr. San Martín y Jr. Sr. de Quinuapata, los sumideros Jr. Bellido, Jr. Callao y Jr. Lima, Huamanga - Ayacucho donde se presentan remansos por las rejillas del sumidero, eligiendo estas estructuras por **conveniencia** por lo tanto es una muestra no probabilístico. 3.11.

Unidad muestral.- La unidad muestral viene a ser definido por las zonas donde se ubica los sumideros en las intersecciones de las Av. 26 de Enero y Jr. Garcilazo de la Vega, Jr. San Martín y Jr. Sr. de Quinuapata, los sumideros Jr. Bellido, Jr. Callao y Jr. Lima, esto se logrará estudiando el comportamiento del flujo a través de modelos tridimensionales.

Figura 3.11: Representación de la muestra, intersección Av. 26 de Enero y Jr. Garcilazo de la Vega



Fuente: Trabajo de campo del tesista

Figura 3.12: Representación de la muestra, intersección Jr. San Martín y Jr. Sr. de Quinuapata



Fuente: Trabajo de campo del tesista

3.12. Metodología seleccionada y aplicada al proyecto

Esta investigación busca aplicar el conocimiento para valorar la funcionalidad del sumidero tipo cajón situado en la intersección de las calles mencionadas al paso del caudal máximo, y determinar el porcentaje del volumen que entra al sumidero. De esta forma, se puede entender y comprender el comportamiento del flujo y el volumen

que circula. Por lo tanto, sintetizamos la metodología como aplicada y descriptiva en la ingeniería hidráulica.

3.12.1. Caudal de Simulación

3.12.1.1. Caudal en la intersección de la Av. 26 de Enero y Jr. Garcilazo de la Vega

En este estudio, nuestro principal desafío es valorar la eficacia del sumidero de tipo cajón situado en la cruce de las Av. 26 de Enero y Jr. Garcilazo de la Vega, estudiando el comportamiento del caudal de diseño mediante modelos tridimensionales, dado que estos en avenidas de alta densidad podrían provocar fallos en la estructura y provocar congestión en esta vía de tránsito. Mediante el análisis de los flujos, si se tiene una rejilla por la que ingresa, el comportamiento será desordenado, provocando turbulencia y potencialmente la obstrucción del mismo caudal debido a una interrupción en la continuidad del flujo (Zona de salida inferior a la zona de ingreso). Para conseguir las primeras condiciones, se establecerán mediante el método racional para cuencas urbanas.

Figura 3.13: Identificación del punto de aforo - Ubicación del sumidero



Fuente: Trabajo de campo

La cuenca aportante al punto de aforo que baja por la Av. 26 de Enero tiene una extensión de 0.098km², sin embargo existe una segunda cuenca que aporta una cantidad de agua para lluvias extremas ingresando por la intersección de las calles Av. 26

de Enero y la Av. Los Pinos, sin embargo por la topografía de la vía este caudal desconocido se desvía hacia el Jr. Libertad como se muestra la figura 3.14. Según la NORMA OS.060 para DRENAJE PLUVIAL URBANO, en el inciso 6.1 de consideraciones del caudal de diseño, del ítem 6 Consideraciones, de la misma norma menciona que "...Los caudales para sistemas de drenaje urbano menor deberán ser calculados por el método racional si el área de la cuenca es igual o menor a 13 km²...", y el periodo de retorno deberá ser entre 2 y 10 años.

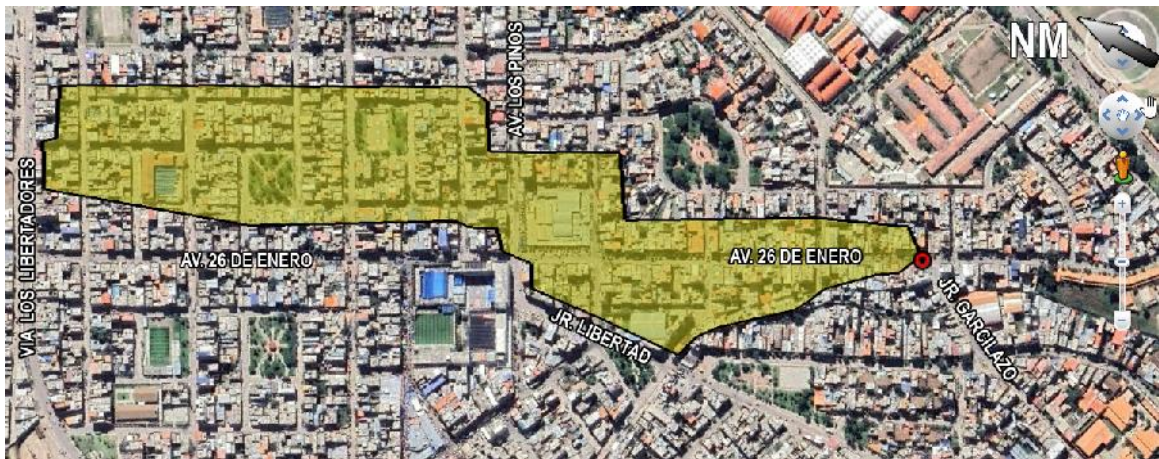
Figura 3.14: Dirección del caudal en la intersección Av. 26 de Enero y Jr. Los Pinos



Fuente: Trabajo de campo

En esta investigación, la cartografía empleada se ha adquirido directamente del servidor web de ALOS PALSAR DEM donde provee múltiples recursos cartográficos disponibles dentro de los productos del satélite ALOS (Advanced Land Observation Satellite) de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA). Estos se han empleado para definir las pequeñas cuencas que fluyen sobre el camino. Estos archivos se procesaron utilizando el software ArcGis.

Figura 3.15: Delimitación de la cuenca



Fuente: Trabajo de campo

En la figura 3.16 se muestra el DEM de la cuenca identificada, donde se observa que la altura varía desde los 2765msnm hasta los 2823msnm

Figura 3.16: DEM de la cuenca identificada



Fuente: Trabajo de gabinete

El diseño de las cuencas de drenaje para las obras del sistema de drenaje pluvial y el cálculo de los flujos de diseño se llevó a cabo empleando ArcGis y Autocad, así como programas de ingeniería.

Las cunetas pueden describirse como un área longitudinal ubicada en el final de la vía y que discurre paralelamente a la misma, cuya función es la de captar y canalizar las aguas pluviales provenientes de la misma vía. Además de su papel principal, las cunetas del sistema de drenaje de aguas pluviales cumplen con otras funciones esenciales para el adecuado desempeño de la estructura.

El diseño de la cuenca se llevó a cabo basándose en las líneas divisorias de las aguas, considerando que las líneas de flujo son perpendiculares a las curvas de nivel del suelo y hasta un punto de aforo. Cada cuenca que se define por una línea compuesta por los puntos de mayor nivel topográfico y que atraviesa las corrientes de flujo en los puntos de inicio, se conoce como DIVORTIUM AQUARUM (límite de cuenca), estos parametros se definen en el cuadro 3.2.

Tabla 3.2: Datos de las cuencas

Cuenca	Calles involucradas	Area (km2)	Zmax	Zmin	DZ
Cuenca Identificada	Av. 26 de Enero	0.098143	2823	2765	58

Fuente: Trabajo de gabinete

Drenaje longitudinal

Las estructuras de drenaje longitudinal, dirigen el agua descendiendo hacia el lado situado al lado de las carreteras. Estas zonas conforman líneas de drenaje paralelas que se ubican perpendicularmente en toda la longitud en contacto con el sistema de drenaje pluvial como se muestra en la figura 3.17. Los pasos siguientes se realizan para los cálculos de drenaje longitudinal en las calles:

1. Cada zona de drenaje paralelo, situada sobre las calles, se determina la inclinación de su flujo de agua más extenso.
2. Se determina el tiempo de concentración a través de la fórmula de Kirpich u otros, o sea, el periodo que toma concentrar las aguas en toda la zona al recorrer desde el punto mas alto al punto mas bajo.

Figura 3.17: Delimitación del cause para tiempo de concentración



Fuente: Trabajo de gabinete

Tabla 3.3: Datos de las Cuenca identificada

Cuenca aportante al sumidero				
Item	Parametros geomorfologicos	Simbolo	Valor	Und.
1.0	Area de la cuenca de drenaje	A	0.098143	Km2
2.0	Perimetro de la Cuenca de drenaje	P	3.181	Km
3.0	Longitud del drenaje	L	2.084	km
4.0	Coef. de Compac. ó Indice de Gravelious	Kc	1.836	
5.0	Pendiente del drenaje pluvial	S	5.709	%
7.0	Tc: Metodo de Kirpich	Tc	12.012	min

Fuente: Elaboración propia

$$t_c = 0.01947L^{0.77}S^{-0.385}$$

Donde: T_c representa el tiempo de concentración (min), L =Longitud del cauce principal (m) y S =pendiente promedio de la cuenca (m/m), a partir de la figura 3.18 podemos estimar el tiempo de concentración con diferentes métodos.

Figura 3.18: Cálculo de tiempo de concentración (hr)

Input →

Área cuenca (km²):

Longitud cauce principal (km):

Cota inicial-Cauce principal (msnm):

Cota final-Cauce principal (msnm):

Output →

Temez (hr): **0.2181**

California C-P (hr): **0.2023**

Giandotti (hr): **0.4603**

Pilgrim McDermott (hr): **0.3198**

Williams (hr): **0.5497**

Ven Te Chow (hr): **0.2429**

Kirpich (hr): **0.2020**

Scs-Ranser (hr): **0.1310**

Clark (hr): **0.2028**

Passini (hr): **0.0819**

Johnstone-Cross (hr): **8.1275**

Pérez (hr): **0.0786**

Fuente: Trabajo de gabinete

Para el Cálculo del coeficiente de escorrentía, representa la proporción de agua del total de precipitaciones que produce escorrentía superficial una vez que el suelo ya ha sido totalmente saturado. Su valor se basa en las propiedades específicas del terreno que establecen la infiltración del agua en el mismo.

Los distintos métodos empleados para su cálculo (todos ellos de carácter empírico) varían tanto en su confiabilidad como en su complejidad; lógicamente, a mayor cantidad de información empleada, mayor complejidad y fiabilidad, y viceversa. Sin embargo, en cualquier situación, es crucial considerar la mayor o menor uniformidad de la

cuenca, tal como se muestra en el cuadro 3.4.

Tabla 3.4: Cálculo de coeficientes de escorrentía método de ponderación.

Superficie	Area (pixel)	C	A*C	C
Concreto semi pulido	487060	0.75	365295	0.68
Vegetación alta	266741	0.5	133370.5	
Vegetación baja	283714	0.6	170228.4	
Techo de ladrillo o teja	548511	0.7	383957.7	
Concreto frotachado	500761	0.75	375570.8	

Fuente: Elaboración propia

Intensidad de la lluvia mm/hr

Primero, se definirá el diseño del hietograma de precipitación total utilizando las ecuaciones del IILA SENAMHI UNI para un periodo de tiempo, teniendo en cuenta los historiales de lluvias registrados en la localidad. La ecuación siguiente se aplicará para precipitaciones que no superen las 3 horas:

$$I_t, T_r = a(1 + K \log T_r) (t + b)^{n-1} < 3hr \quad (3.25)$$

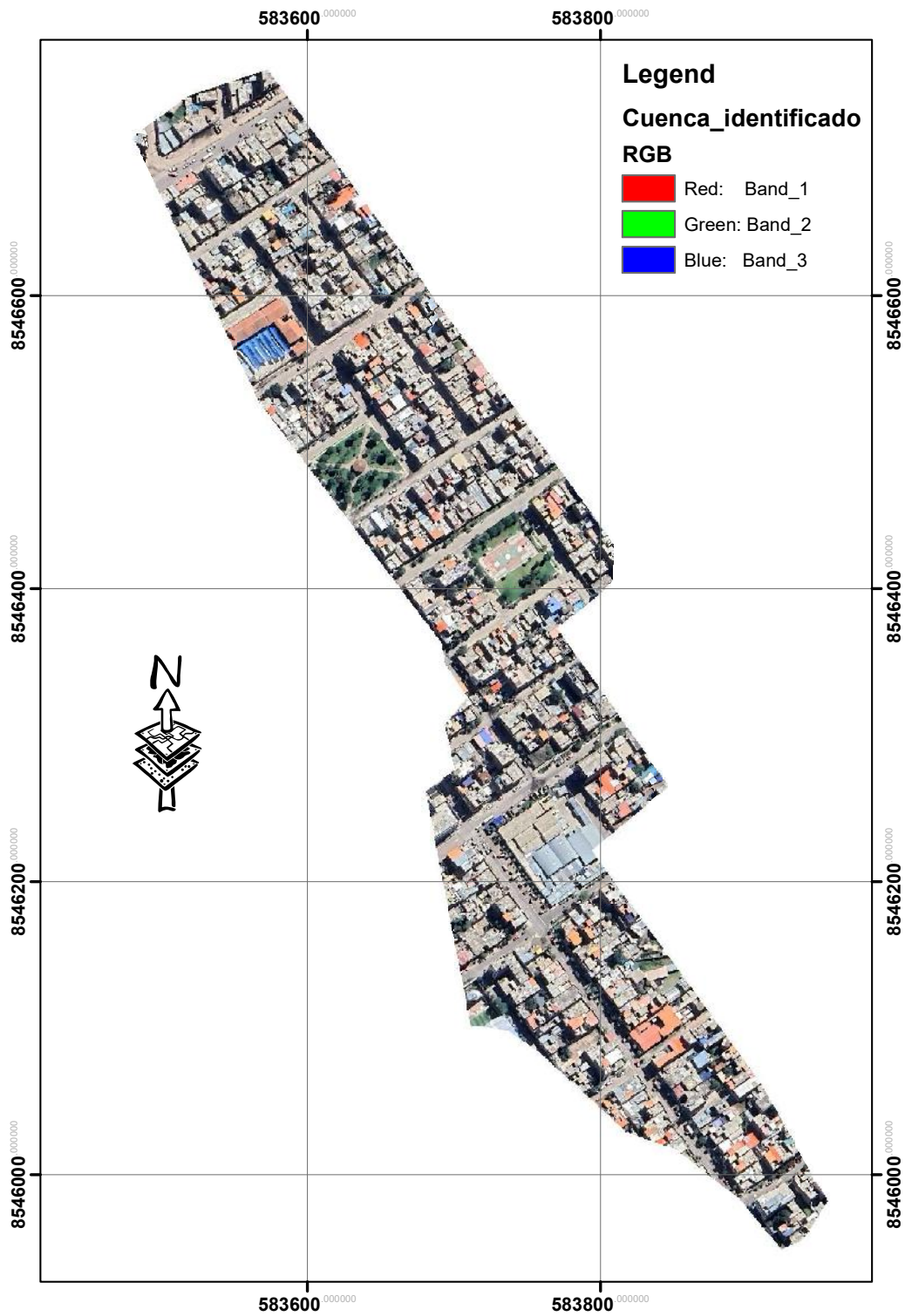
Donde a es el parámetro de intensidad mm , K es parámetro de frecuencia (adimensional), b es el parámetro (hora) igual 0.4 horas (sierra), n parámetro de duración (adimensional) y t duración (horas), a partir de la figura ?? se obtienen los valores de $a=18$, $K=0.553$ y $n=0.242$, de donde para nuestra investigación para un tiempo de concentración de 12.012min y un periodo de retorno de 10 años se tiene 41.854mm/hr.

Tabla 3.5: Cálculo de intensidad para tiempos de retorno.

t (min)	t (hrs)	Tr = 5 años i (mm/hr)	Tr = 10 años i (mm/hr)	Tr = 20 años i (mm/hr)	Tr = 30 años i (mm/hr)	Tr = 50 años i (mm/hr)
5	0.083	43.305	48.505	53.704	56.746	60.577
10	0.167	38.387	42.995	47.604	50.300	53.697
20	0.333	31.572	35.363	39.153	41.371	44.164
40	0.667	23.766	26.619	29.473	31.142	33.245
60	1.000	19.339	21.661	23.983	25.341	27.052
80	1.333	16.449	18.423	20.398	21.554	23.009
100	1.667	14.396	16.124	17.852	18.863	20.137
120	2.000	12.853	14.396	15.939	16.842	17.979
140	2.333	11.646	13.045	14.443	15.261	16.291
160	2.667	10.674	11.955	13.237	13.986	14.931
180	3.000	9.871	11.056	12.241	12.934	13.807

Fuente: Elaboración del tesista

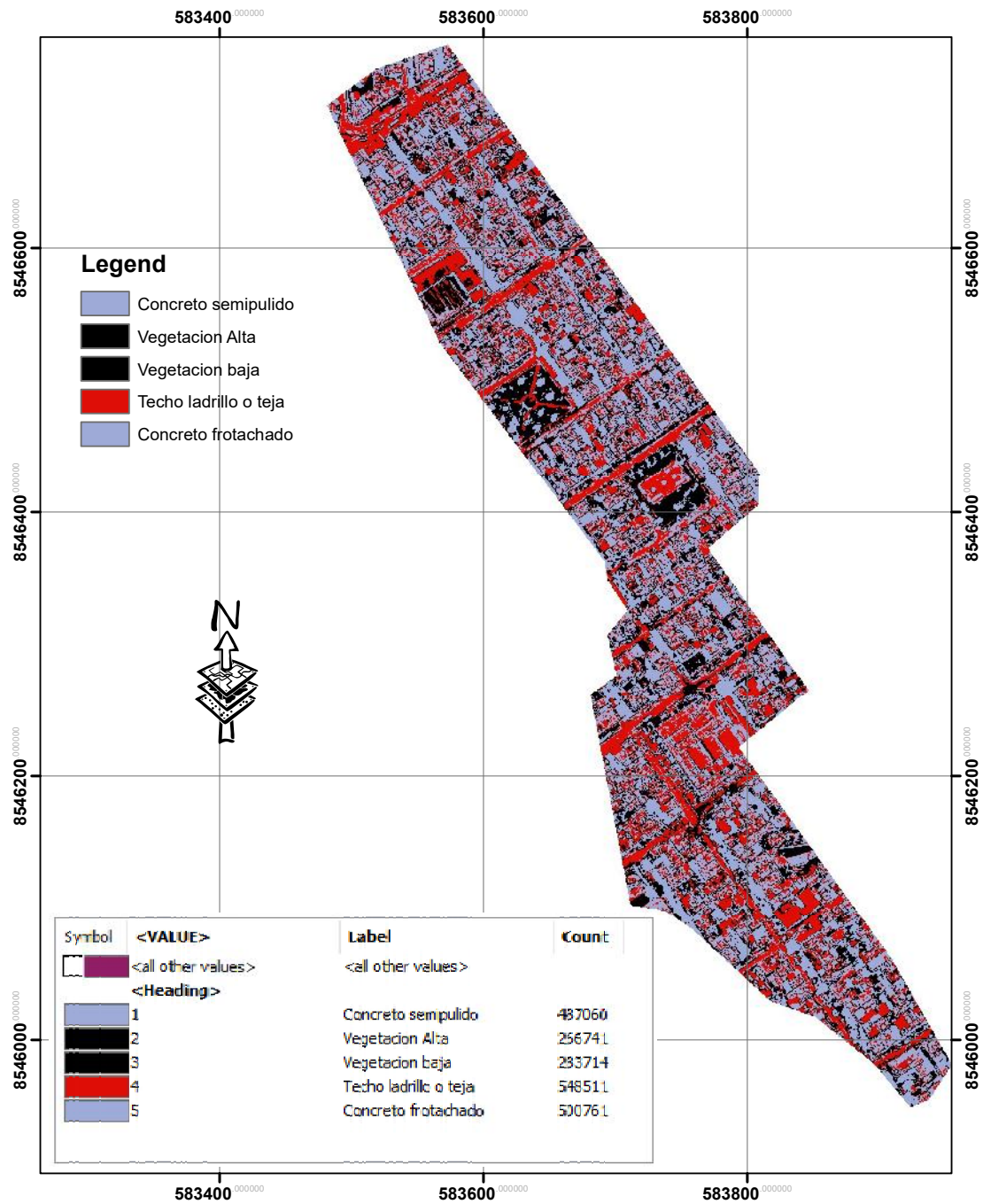
Figura 3.19: Cuenca urbana identificado



Fuente:

Elaboración propia

Figura 3.20: Obtención del coeficiente de escorrentía Clasificación no supervisada de cuencas



Fuente: Elaboración propia del tesista

Caudal de diseño para Tr=10años.

Se estima el caudal máximo a partir de la precipitación, abarcando todas las abstracciones en un solo coeficiente C (coef. escorrentía) estimado sobre la base de las características de la cuenca. Muy usado para cuencas, $A < 10Km^2$. Considerar que la duración de P es igual a T_c . Así mismo la Norma Técnica Peruana OS.06 Drenajes Urbanos considera el periodo de retorno de 2 a 10 años, para la investigación se considera 10 años.

$$Q = C.I.A/360(m^3/seg)$$

Tabla 3.6: Resultados de caudales Tr=10años

	I_{max} (mm/hr)	A(km²)	A(Ha)	C	Q(m³/seg)
Cuenca	41.854	0.10247	10.247	0.68	0.810102772

Fuente: Elaboración propia

Con el caudal calculado se estima el tirante de flujo con que ingresa al sumidero, asumiendo una sección de canal rectangular con una base igual al ancho de vía (4 m), se obtiene una velocidad de 1.88m/seg, para un caudal de 0.81m³/seg y un tirante de 0.075m.

3.12.1.2. Caudal en los sumideros

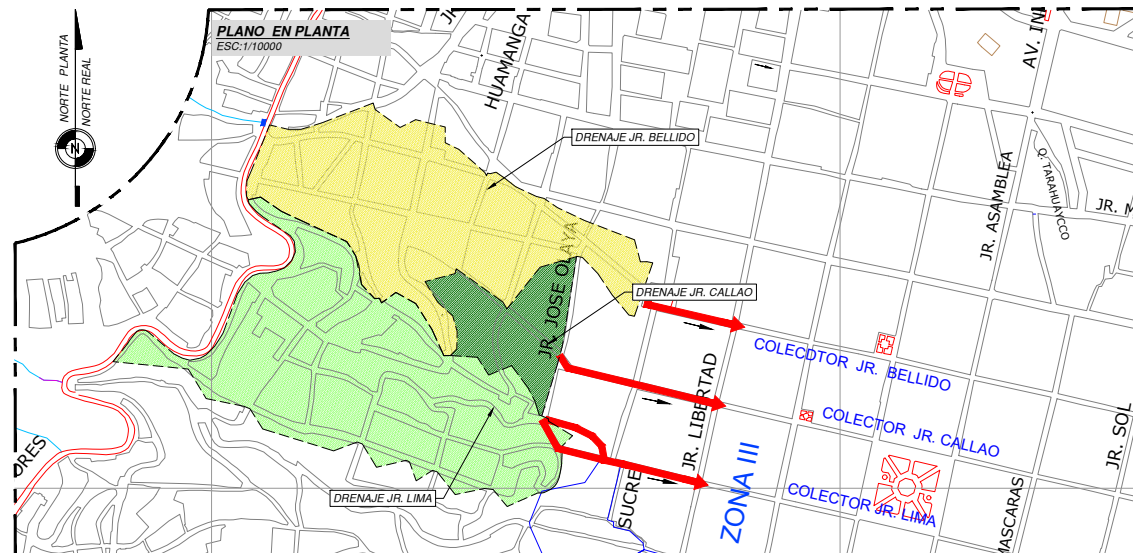
Para la Simulación del modelo se han realizado tres escenarios extraídos desde los documentos del expediente técnico CONSTRUCCIÓN Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE DRENAJE PLUVIAL DE LA MARGEN IZQUIERDA DEL RIÓ ALAMEDA Y CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE AYACUCHO-V ETAPA”, ÍTEM I: JR. LIMA, JR. CALLAO, JR. BELLIDO Y COLECTOR 7 VUELTAS CON TRANSVERSALES COD SNIP 89319”.

En estos documentos hacen referencia el porcentaje de obstrucción de las rejillas planteadas en cada calle. estos valores se asociaran a través de la simulación para validar estos resultados.

La Figura 3.21 ilustra las cuencas analizadas, donde se representan las zonas de recolección de aguas pluviales, con impacto en cada uno de los sumideros. Jr. Lima, Jr. Callao y Jr. Bellido y se establecen las fronteras de cada uno de los sumideros.

Para los sumideros que vierten sus aguas en cada una de las calles del mismo nombre, se requirió al comienzo ubicar los pozos de detención de avenidas. Cada una de ellas posee sus respectivas rejillas de captación, considerando principalmente la inclinación de cada una de las calles.

Figura 3.21: Flujo al ingresar al sumidero 3D, para un $Q=0.81\text{m}^3/\text{seg}$



Fuente: Resultados Ansys Fluent

Caudal en el colector Jr. Bellido

Para el caso de Jr. Bellido, se tiene en cuenta los datos siguientes, que se han extraído del expediente técnico de del sistema del drenaje pluvial urbano de la ciudad de Ayacucho.

- Coeficiente de rugosidad de Manning: 0.014.
- Pendiente de la calle: 0.082 m/m.
- Ancho del fondo: 4.00 m.
- Caudal: 5 m³/s.
- Ancho de la rejilla: 4.00 m.
- Longitud de la rejilla: 1.20 m (se consideran dos, sobre el pozo de detención).
- Porcentaje de obstrucción: 10 %

Caudal en el colector Jr. Callao

Para el caso de Jr. Callao, se tiene en cuenta los datos siguientes, que se han extraído del expediente técnico de del sistema del drenaje pluvial urbano de la ciudad de Ayacucho.

- Coeficiente de rugosidad de Manning: 0.014.
- Pendiente de la calle: 0.092 m/m.
- Ancho del fondo: 4.00 m.
- Caudal: 2 m³/s.
- Ancho de la rejilla: 4.00 m.
- Longitud de la rejilla: 0.60 m.
- Porcentaje de obstrucción: 10 %

Caudal en el colector Jr. Lima

Para el caso de Jr. Lima, se tiene en cuenta los datos siguientes, que se han extraído del expediente técnico de del sistema del drenaje pluvial urbano de la ciudad de Ayacucho.

- Coeficiente de rugosidad de Manning: 0.014.
- Pendiente de la calle: 0.073 m/m.
- Ancho del fondo: 4.00 m.
- Caudal: 3 m³/s.
- Ancho de la rejilla: 4.00 m.
- Longitud de la rejilla: 0.60 m.
- Porcentaje de obstrucción: 10 %

Caudal en el sumidero Jr. San Martín y Jr. Sr. de Quinuapata

Para el caso del Jr. San Martín y Jr. Sr. de Quinuapata, se tiene en cuenta los datos siguientes, que se han extraído del expediente técnico de del sistema del drenaje pluvial urbano de la ciudad de Ayacucho.

- Coeficiente de rugosidad de Manning: 0.014.
- Pendiente de la calle: 0.14 m/m.
- Ancho del fondo: 4.00 m.
- Caudal: 6.1 m³/s.
- Ancho de la rejilla: 4.00 m.
- Longitud de la rejilla: 2.40 m.
- Porcentaje de obstrucción: 10 %

La Tabla 3.7 presenta en resumen los datos para la simulación, donde se observa que el caudal con mayor aportación es para el drenaje de Jr. San Martín y Jr. Sr. de Quinuapata con un caudal de 6.1m³/seg y una velocidad de 7.5m/seg.

Tabla 3.7: Características hidráulicas de las subcuencas

Denominación	Caudal (m ³ /seg)	Velocidad (m/seg)	Tirante (m)	Pendiente (%)
Av. 26 de Enero y Jr. Garcilazo de la Vega	0.81	2.80	0.07	5.7
Jr. Bellido	5.00	6.10	0.19	8.2
Jr. Callao	2.00	4.50	0.10	9.2
Jr. Lima	3.00	5.10	0.15	7.3
Jr. San Martín y Jr. Sr. de Quinuapata	6.10	7.50	0.18	14.0

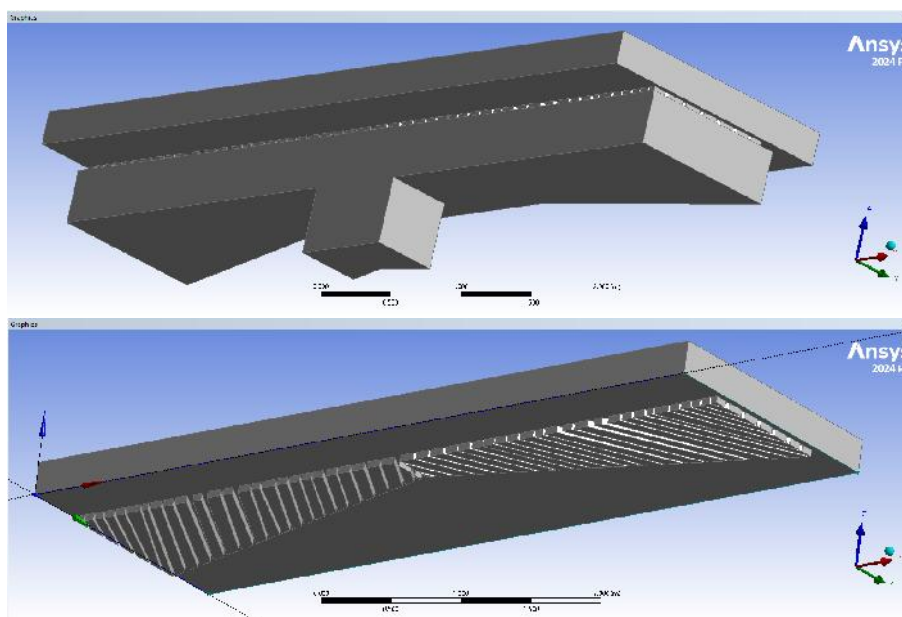
Fuente: Mejorado Expediente técnico

3.13. Procesamiento de datos en ANSYS 2024R1

3.13.1. Geometría Av. 26 de Enero y Jr. Garcilazo de la Vega

En este punto, se ha procurado reproducir la geometría de la estructura mediante la información recolectada. Como se puede apreciar en la figura 3.22 se presenta la sección de la Av. 26 de Enero, acompañada de las propiedades del sumidero de forma de cajón, elaborado a través del software Ansys Geometry. El ambiente gráfico del programa facilita la creación de figuras y sólidos. Además, se establece la altura del nivel de agua que llega a una altura específica de 0.07m, como se muestra en la figura 3.22.

Figura 3.22: Definición de la geometría sección de vía y sumidero - Ansys Geometry

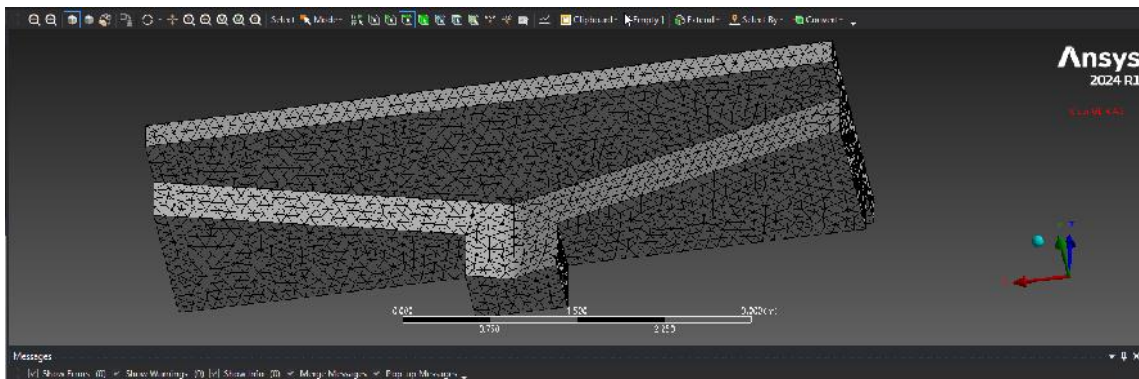


Fuente: Elaboración propia - Ansys Geometry

3.13.1.1. Generación de la malla en Ansys Meshing CFD

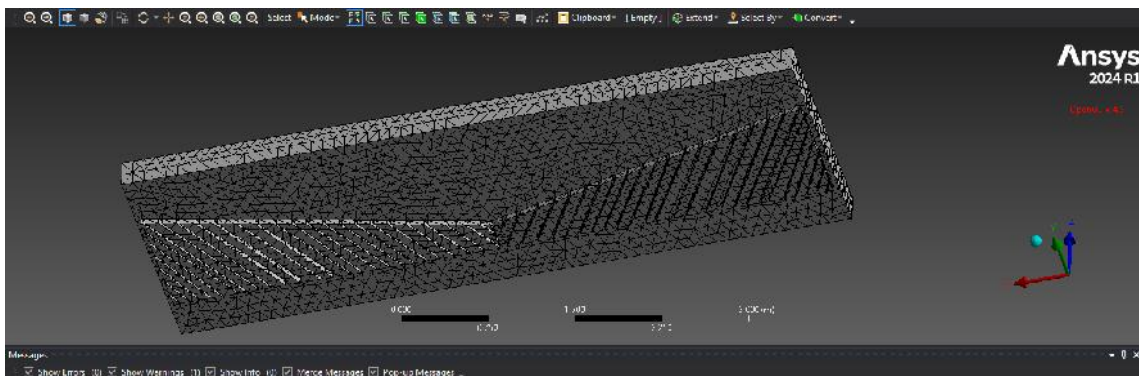
Como se puede observar en las figuras 3.23 y 3.24, se establece el área de entrada del caudal mediante Ansys Meshing CFD, para luego asignar un valor del caudal adquirido y una velocidad promedio para la sección del camino. Asimismo, en la misma ilustración se pueden observar todas las condiciones de frontera, tales como las capas de entrada, salida, apertura y pared, así como el tipo de fluido.

Figura 3.23: Definición de la malla Ansys Meshing-CFD



Fuente: Elaboración propia - Ansys Meshing-CFD

Figura 3.24: Definición de la malla Ansys Meshing-CFD



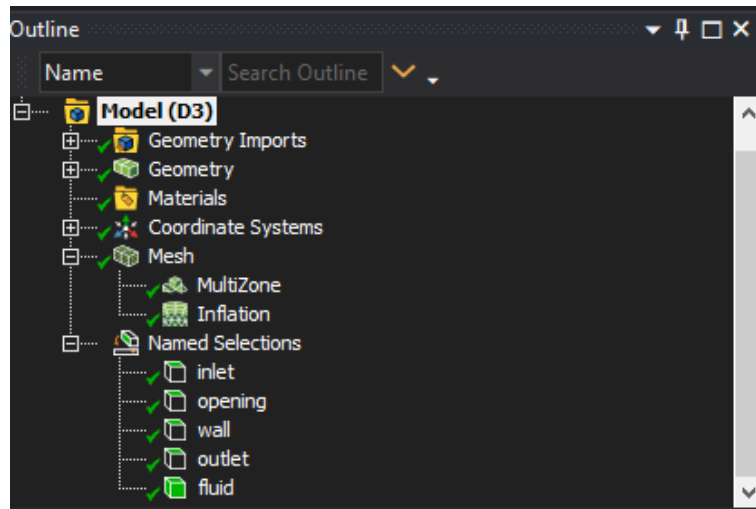
Fuente: Elaboración propia - Ansys Meshing-CFD

La figura 3.24 ilustra el proceso de refinamiento en la zona donde se encuentran las rejillas metálicas del sumidero, utilizando la inflación de Ansys Meshing para producir la malla.

3.13.1.2. Condiciones de Borde - Ansys Fluent

En la figura 3.25 se muestra las condiciones de borde para el modelo planteado en Ansys Fluent.

Figura 3.25: Condición de borde - Ansys Fluent

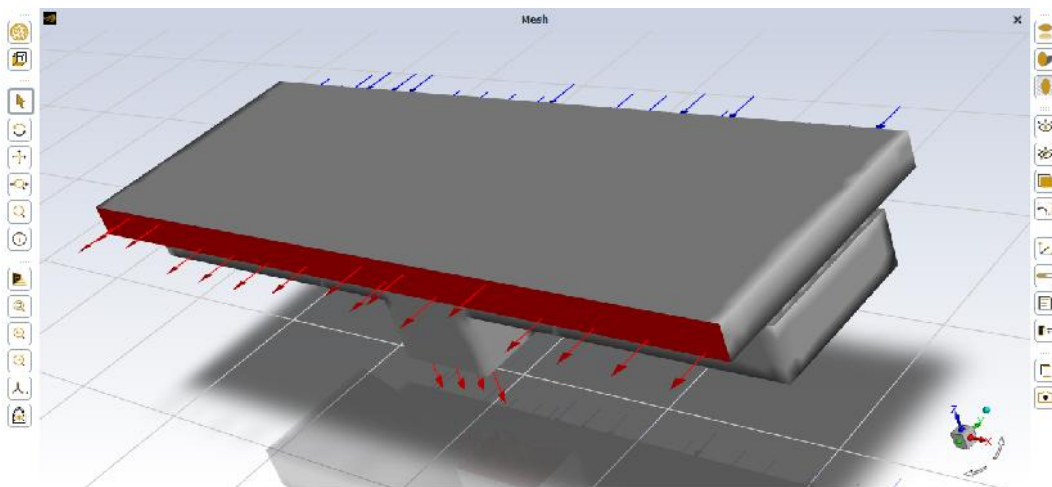


Fuente: Elaboración propia - Ansys Fluent

3.13.1.3. Condiciones de Iniciales - Ansys Fluent

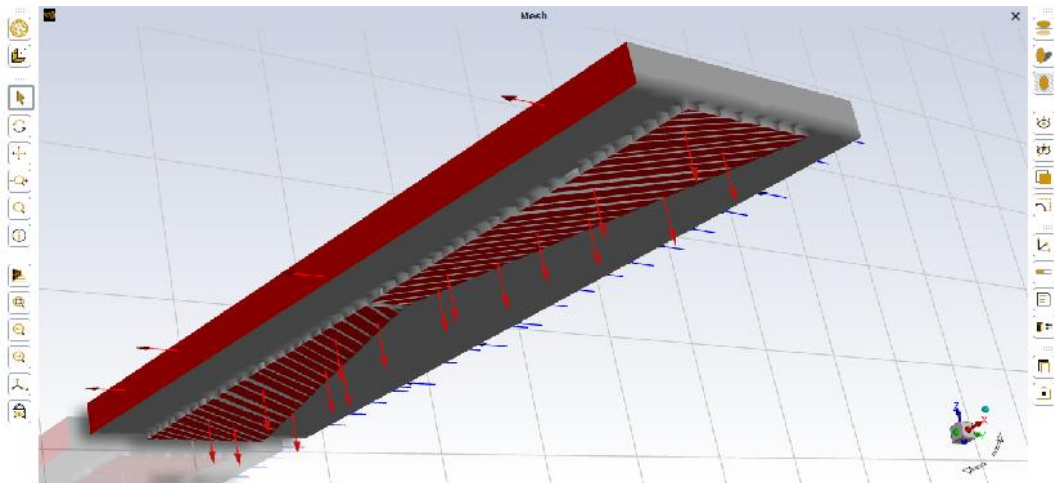
Este punto define las circunstancias iniciales para iniciar la simulación del modelo. La imagen 3.26 y 3.27 muestra las superficies previamente definidas en Ansys Meshing, en las que se establecieron las áreas de entrada y salida de flujo relacionadas con la Av. 26 de Enero y el sumidero y rejilla metálica.

Figura 3.26: Configuración del modelo - Ansys Fluent



Fuente: Elaboración propia - Ansys Fluent

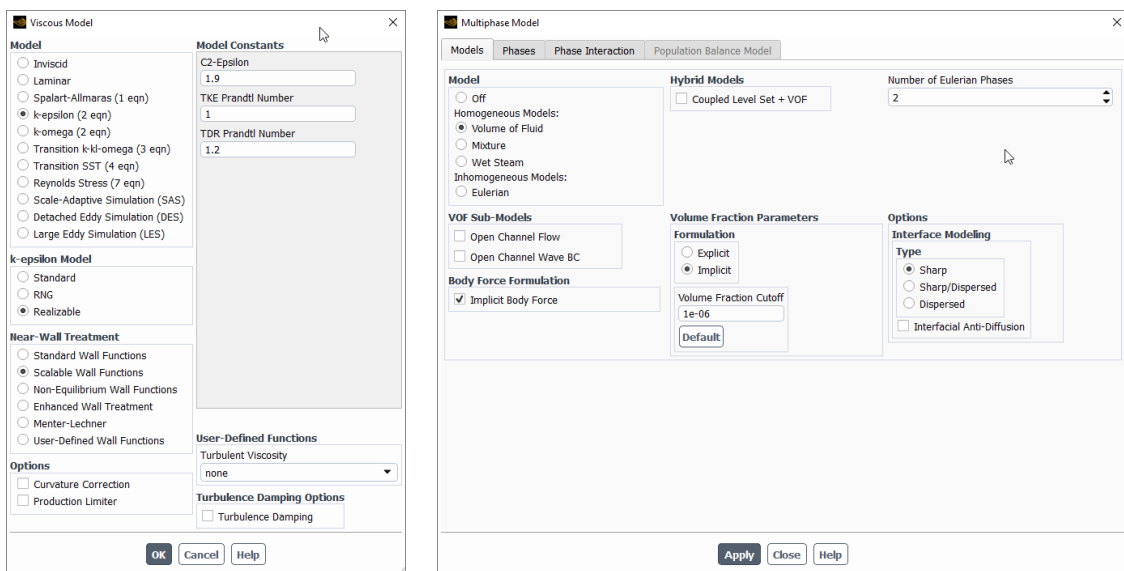
Figura 3.27: Configuración del modelo - Ansys Fluent



Fuente: Elaboración propia - Ansys Fluent

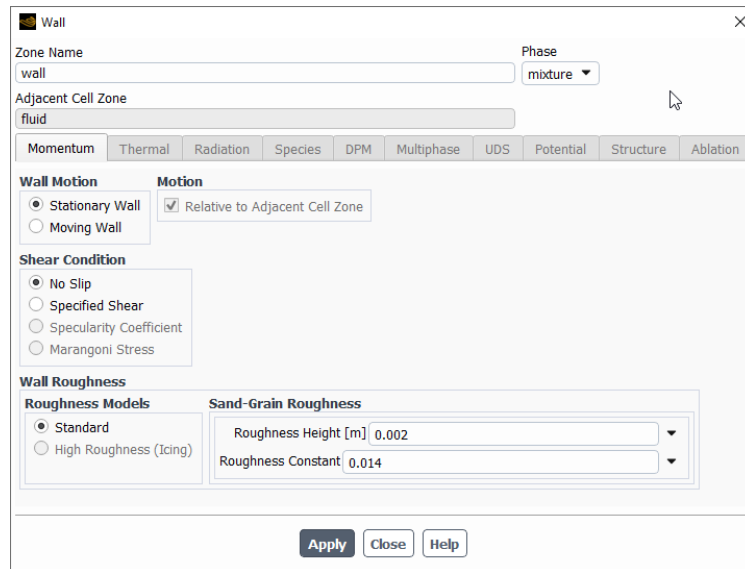
En esta sección se determina la categoría de fluido, las etapas del modelo líquido (agua) y aire, ambos flujos se entrelazan. Se pueden observar estas configuraciones en la figura 3.28, también determinamos el modelo k-epsilon (el modelo fue escogido por su simplicidad) como un modelo realizable y establecemos una función de pared escalable. De igual forma, establecemos las condiciones iniciales del modelo para comenzar la simulación, introducimos las velocidades en sentido perpendicular al plano, así como la intensidad de turbulencia, y también establecemos las condiciones de salida del flujo.

Figura 3.28: Configuración del modelo - Ansys Fluent



Fuente: Elaboración propia - Ansys Fluent

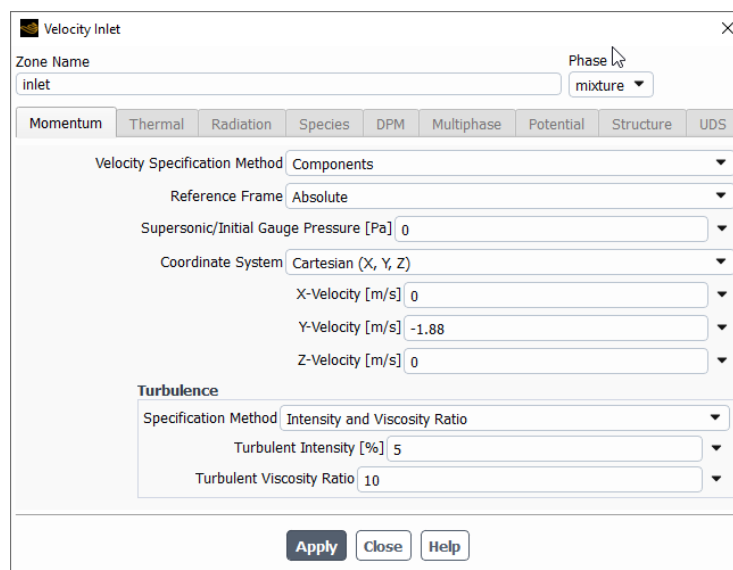
Figura 3.29: Condición inicial Wall - Ansys Fluent



Fuente: Elaboración propia - Ansys Fluent

Adicionalmente, incorporamos las condiciones de las paredes del modelo de espesor junto con el coeficiente de rugosidad para la simulación, como se muestra en la figura 3.29, que indica el tamaño de la rugosidad asociado al coeficiente de rugosidad. En este escenario, la profundidad de la rugosidad es de 0.002m para las paredes de hormigón vinculadas a un coeficiente de 0.014, así mismo se define la magnitud y dirección de la velocidad y el porcentaje de turbulencia se asume lo que recomienda el software (3.30).

Figura 3.30: Definición del flujo - Ansys Fluent



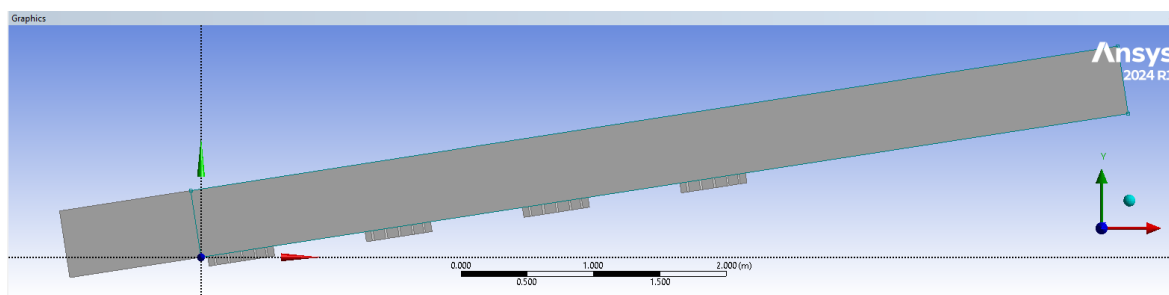
Fuente: Elaboración propia - Ansys Fluent

3.13.2. Geometría Jr. San Martín y Jr. Señor de Quinuapata

En este punto, se ha procurado reproducir la geometría de la estructura mediante la información recolectada. Como se puede apreciar en la figura 3.31 se presenta la sección del colector Jr. San Martín y Jr. Señor de Quinuapata, acompañada de las propiedades del sumidero tipo cajón, elaborado a través del software Ansys Geometry. Además, se establece la altura del nivel de agua que llega a una altura específica de 0.18m.

La figura 3.31 muestra el modelo tridimensional de la sección de calle Jr. San Martín y Jr. Señor de Quinuapata generada en el software ANSYS 2024 R1. El modelo representa la vía con pendiente, a partir de un sólido de geometría rectangular alargada. La superficie superior del cuerpo presenta una inclinación según los datos del expediente técnico.

Figura 3.31: Modelo tridimensional Jr. San Martín y Jr. Señor de Quinuapata

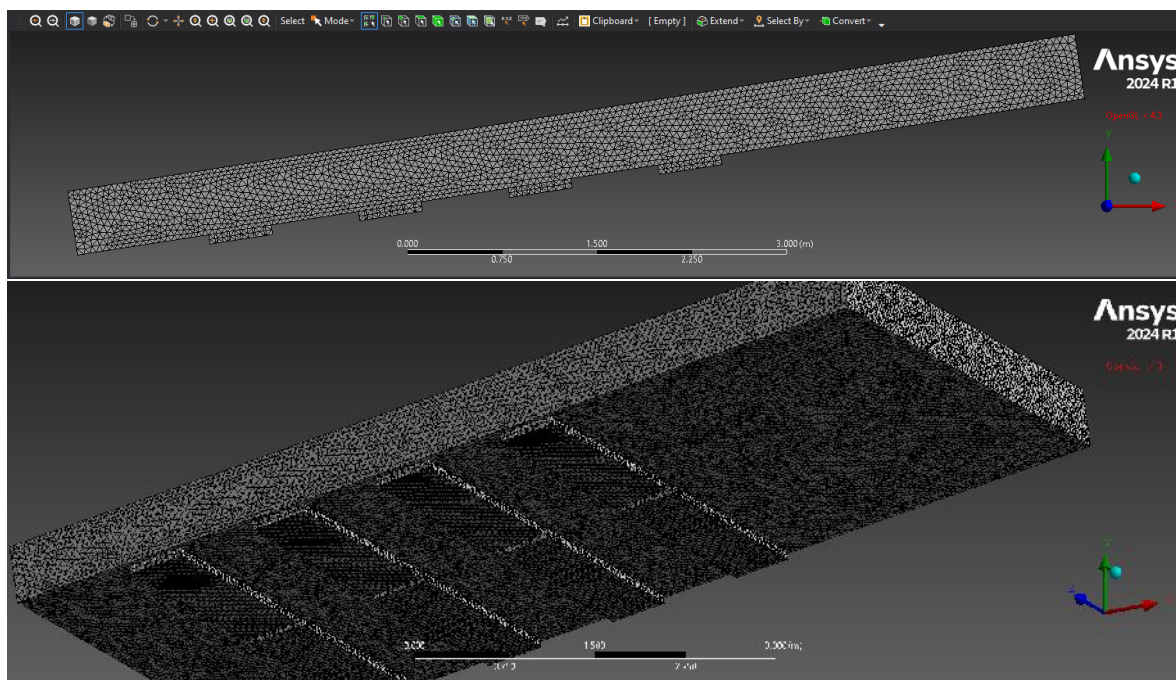


Fuente: Resultados Ansys Geometry in DesingModeler

En la parte inferior del sólido se aprecian un sumidero a lo largo del eje longitudinal de la calle. Este componente representa una rejilla metálica, cuya función se asocia comúnmente a sistemas de drenaje pluvial planteado en el Jr. San Martín y Jr. Señor de Quinuapata, se dibuja este modelo para evaluar el comportamiento hidráulico o estructural del conjunto ante condiciones de caudal transitado de 3m³/seg.

Así mismo en la figura 3.32 muestra el proceso de mallado (discretización) aplicado al modelo tridimensional de la sección del Jr. San Martín y Jr. Sr. de Quinuapata. Este proceso permite dividir el dominio continuo en un conjunto finito de elementos para su análisis numérico en ANSYS, se observa una malla compuesta por elementos tetraédricos de forma triangular en su proyección, lo cual es característico del mallado tridimensional automático empleado en geometrías complejas. La malla cubre todo el sólido, incluidas las rejillas metálicas inferiores, asegurando que dichas zonas estén también consideradas en el análisis.

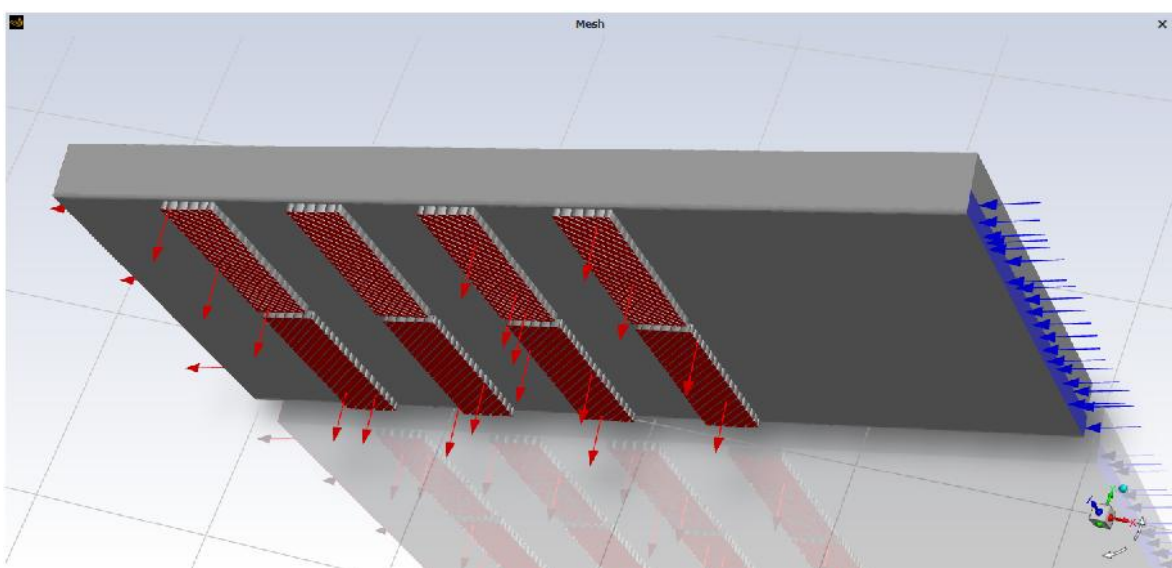
Figura 3.32: Discretización del modelo para el Jr. San Martín y Jr. Señor de Quinuapata



Fuente: Discretización Ansys Meshing

La figura 3.33 muestra el modelo con la asignación de condiciones de contorno (boundary conditions) en ANSYS, fundamentales para el análisis de dinámica de fluidos (CFD) o simulaciones estructurales. En este caso, se ha definido un conjunto de zonas que representan entradas, salidas y límites del dominio.

Figura 3.33: Definición de condiciones de borde para el modelo Jr. San Martín y Jr. Señor de Quinuapata



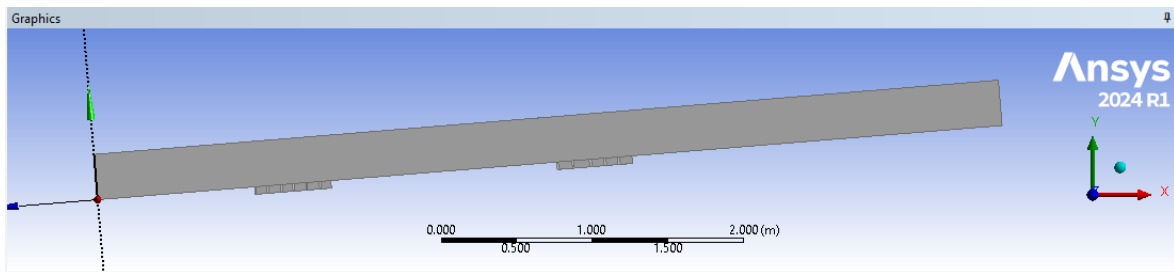
Fuente: Ansys Fluent

3.13.3. Geometría Colector Jr. Bellido

En este punto, se ha procurado reproducir la geometría de la estructura mediante la información recolectada. Como se puede apreciar en la figura 3.34 se presenta la sección del colector Jr. Bellido, acompañada de las propiedades del sumidero de forma de cajón, elaborado a través del software Ansys Geometry. Además, se establece la altura del nivel de agua que llega a una altura específica de 0.19m.

La figura 3.34 muestra el modelo tridimensional de la sección de calle Jr. Bellido generada en el software ANSYS 2024 R1. El modelo representa la vía con pendiente, a partir de un sólido de geometría rectangular alargada. La superficie superior del cuerpo presenta una inclinación según los datos del expediente técnico.

Figura 3.34: Modelo tridimensional para el Jr. Bellido

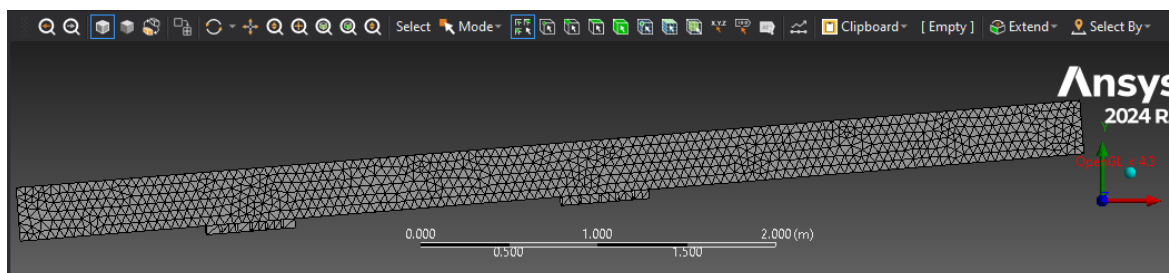


Fuente: Resultados Ansys Geometry in DesingModeler

En la parte inferior del sólido se aprecian dos sumideros a lo largo del eje longitudinal de la calle. Estos componentes representan una rejilla metálica, cuya función se asocia comúnmente a sistemas de drenaje pluvial planteado en el Jr. Bellido, se dibuja este modelo para evaluar el comportamiento hidráulico o estructural del conjunto ante condiciones de caudal transitado de $5\text{m}^3/\text{seg}$.

Así mismo en la figura 3.35 muestra el proceso de mallado (discretización) aplicado al modelo tridimensional de la sección del Jr. Bellido. Este proceso permite dividir el dominio continuo en un conjunto finito de elementos para su análisis numérico en ANSYS, se observa una malla compuesta por elementos tetraédricos de forma triangular en su proyección, lo cual es característico del mallado tridimensional automático empleado en geometrías complejas. La malla cubre todo el sólido, incluidas las rejillas metálicas inferiores, asegurando que dichas zonas estén también consideradas en el análisis.

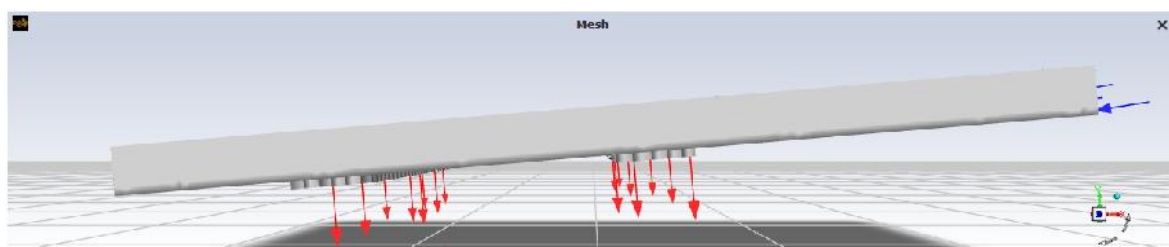
Figura 3.35: Discretización del modelo para el Jr. Bellido



Fuente: Discretización Ansys Meshing

La figura 3.36 muestra el modelo con la asignación de condiciones de contorno (boundary conditions) en ANSYS, fundamentales para el análisis de dinámica de fluidos (CFD) o simulaciones estructurales. En este caso, se ha definido un conjunto de zonas que representan entradas, salidas y límites del dominio.

Figura 3.36: Definición de condiciones de borde para el modelo Jr. Bellido



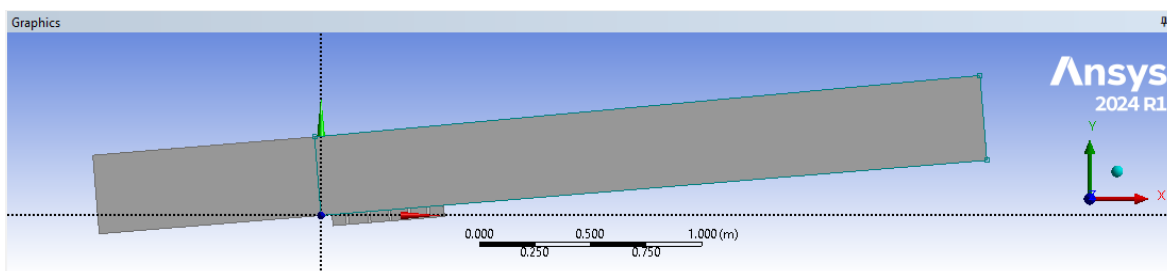
Fuente: Ansys Fluent

3.13.4. Geometría Colector Jr. Callao

En este punto, se ha procurado reproducir la geometría de la estructura mediante la información recolectada. Como se puede apreciar en la figura 3.37 se presenta la sección del colector Jr. Callao, acompañada de las propiedades del sumidero de forma de cajón, elaborado a través del software Ansys Geometry. Además, se establece la altura del nivel de agua que llega a una altura específica de 0.10m.

La figura 3.37 muestra el modelo tridimensional de la sección de calle Jr. Callao generada en el software ANSYS 2024 R1. El modelo representa la vía con pendiente, a partir de un sólido de geometría rectangular alargada. La superficie superior del cuerpo presenta una inclinación según los datos del expediente técnico.

Figura 3.37: Modelo tridimensional para el Jr. Callao

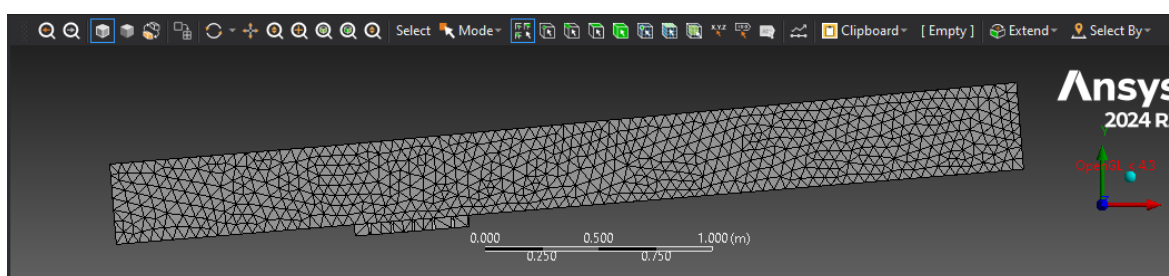


Fuente: Resultados Ansys Geometry in DesingModeler

En la parte inferior del sólido se aprecian un sumidero a lo largo del eje longitudinal de la calle. Este componente representa una rejilla metálica, cuya función se asocia comúnmente a sistemas de drenaje pluvial planteado en el Jr. Callao, se dibuja este modelo para evaluar el comportamiento hidráulico o estructural del conjunto ante condiciones de caudal transitado de $2\text{m}^3/\text{seg}$.

Así mismo en la figura 3.38 muestra el proceso de mallado (discretización) aplicado al modelo tridimensional de la sección del Jr. Callao. Este proceso permite dividir el dominio continuo en un conjunto finito de elementos para su análisis numérico en ANSYS, se observa una malla compuesta por elementos tetraédricos de forma triangular en su proyección, lo cual es característico del mallado tridimensional automático empleado en geometrías complejas. La malla cubre todo el sólido, incluidas las rejillas metálicas inferiores, asegurando que dichas zonas estén también consideradas en el análisis.

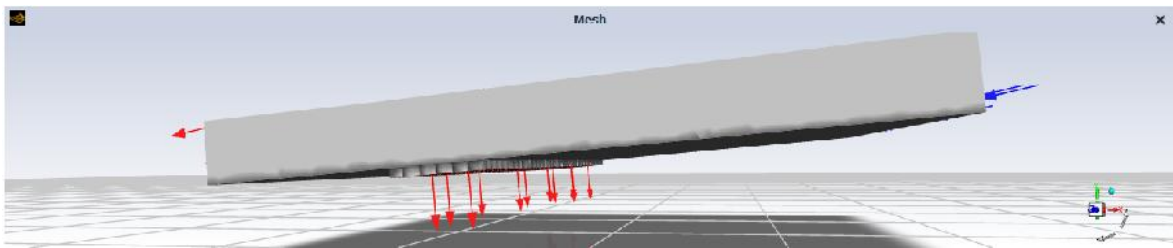
Figura 3.38: Discretización del modelo para el Jr. Callao



Fuente: Discretización Ansys Meshing

La figura 3.39 muestra el modelo con la asignación de condiciones de contorno (boundary conditions) en ANSYS, fundamentales para el análisis de dinámica de fluidos (CFD) o simulaciones estructurales. En este caso, se ha definido un conjunto de zonas que representan entradas, salidas y límites del dominio.

Figura 3.39: Definición de condiciones de borde para el modelo Jr. Callao



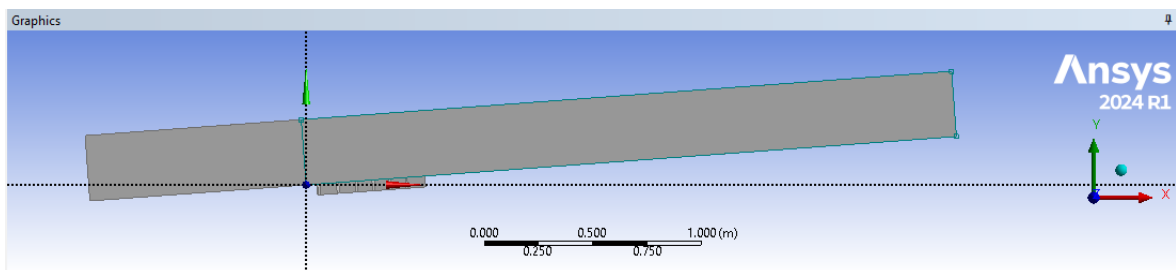
Fuente: Ansys Fluent

3.13.5. Geometría Colector Jr. Lima

En este punto, se ha procurado reproducir la geometría de la estructura mediante la información recolectada. Como se puede apreciar en la figura 3.40 se presenta la sección del colector Jr. Lima, acompañada de las propiedades del sumidero de forma de cajón, elaborado a través del software Ansys Geometry. Además, se establece la altura del nivel de agua que llega a una altura específica de 0.10m.

La figura 3.40 muestra el modelo tridimensional de la sección de calle Jr. Lima generada en el software ANSYS 2024 R1. El modelo representa la vía con pendiente, a partir de un sólido de geometría rectangular alargada. La superficie superior del cuerpo presenta una inclinación según los datos del expediente técnico.

Figura 3.40: Modelo tridimensional para el Jr. Lima



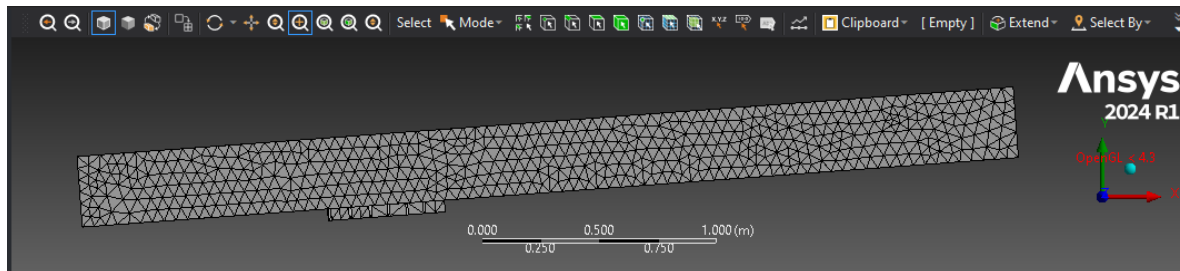
Fuente: Resultados Ansys Geometry in DesingModeler

En la parte inferior del sólido se aprecian un sumidero a lo largo del eje longitudinal de la calle. Este componente representa una rejilla metálica, cuya función se asocia comúnmente a sistemas de drenaje pluvial planteado en el Jr. Lima, se dibuja este modelo para evaluar el comportamiento hidráulico o estructural del conjunto ante condiciones de caudal transitado de $3\text{m}^3/\text{seg}$.

Así mismo en la figura 3.41 muestra el proceso de mallado (discretización) aplicado al modelo tridimensional de la sección del Jr. Lima. Este proceso permite dividir

el dominio continuo en un conjunto finito de elementos para su análisis numérico en ANSYS, se observa una malla compuesta por elementos tetraédricos de forma triangular en su proyección, lo cual es característico del mallado tridimensional automático empleado en geometrías complejas. La malla cubre todo el sólido, incluidas las rejillas metálicas inferiores, asegurando que dichas zonas estén también consideradas en el análisis.

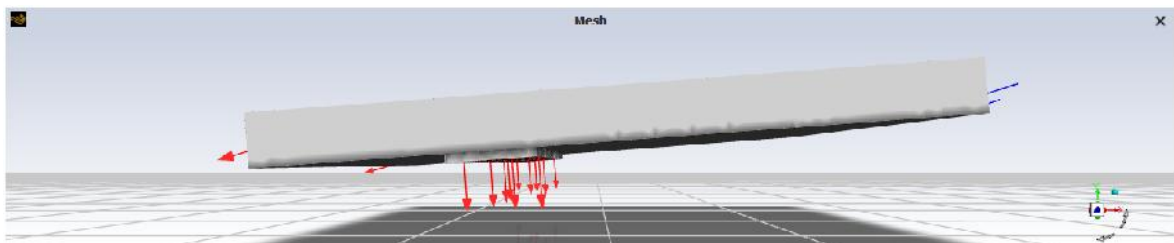
Figura 3.41: Discretización del modelo para el Jr. Lima



Fuente: Discretización Ansys Meshing

La figura 3.42 muestra el modelo con la asignación de condiciones de contorno (boundary conditions) en ANSYS, fundamentales para el análisis de dinámica de fluidos (CFD) o simulaciones estructurales. En este caso, se ha definido un conjunto de zonas que representan entradas, salidas y límites del dominio.

Figura 3.42: Definición de condiciones de borde para el modelo Jr. Lima



Fuente: Ansys Fluent

IV: Resultados y discusiones

Esta investigación examina la eficacia del sumidero de tipo cajón situado en la intersecciones de las Av. 26 de Enero y Jr. Garcilazo de la Vega, Jr. San Martín y Jr. Sr. de Quinuapata, Jr. Bellido, Jr. Callao y Jr. Lima, este estudio se lleva a cabo mediante el modelo computacional Ansys Fluent, que implica un sistema estacionario.

4.1. Aspectos generales.

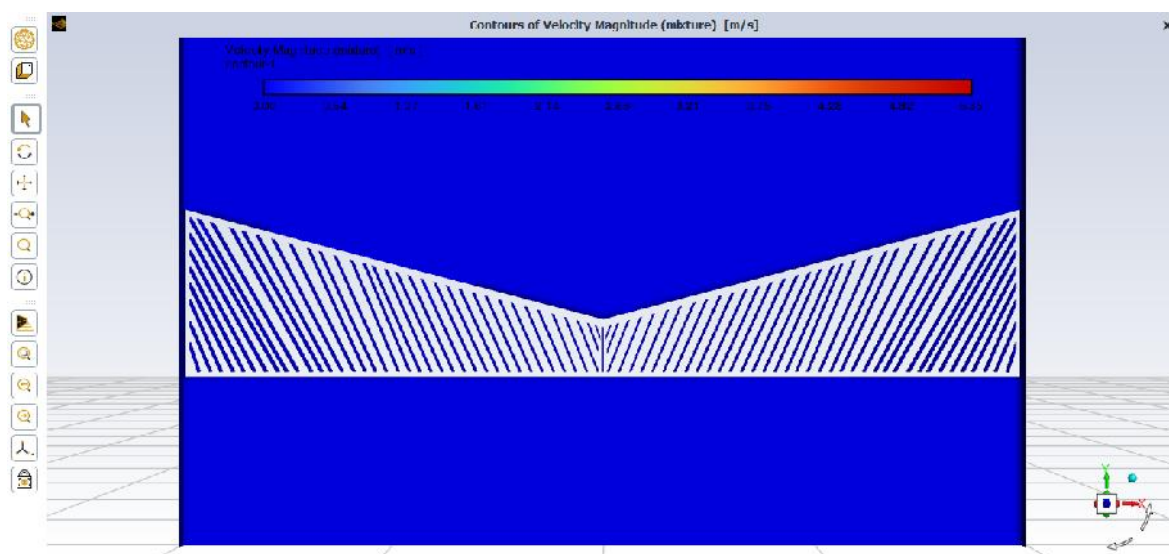
En nuestro modelo, nuestro objetivo es ilustrar la realidad como un bosquejo matemático de un sólido donde tomamos como referencia el flujo. Como se puede apreciar en la figura 4.43 y 4.44, la representación de esta área se asemeja a una figura geométrica como se muestran en ambas figuras.

Figura 4.43: Vista panorámica de la identificación de la geometría del modelo a simular



Fuente: Trabajo de campo .

Figura 4.44: Condiciones borde Outlet y wall en Ansys Fluent



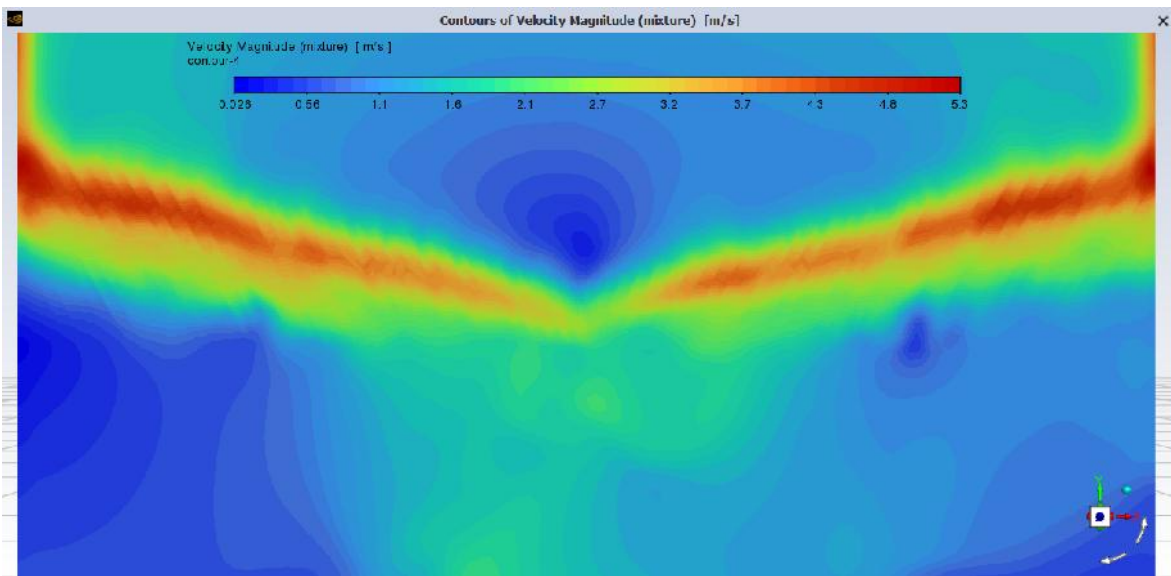
Fuente: Trabajo de campo .

Esta investigación se lleva a cabo en el área donde se ubica el sumidero tipo cajón y se analiza su funcionalidad. Además, se expande el conocimiento a través de la simulación del flujo utilizando modelos tridimensionales en este tipo de rejillas de metal, el segmento evaluado tiene una altura que varía entre los 2765msnm, y se examinará un segmento de 2m de longitud con un ancho de 6m, en el que se mueve el caudal de diseño de 0.81m³/s. En la imagen 4.44, se nota que el área determinada abarca el ancho total de la vía, la geometría del sumidero y la dirección del caudal de entrada, reconociendo la rejilla como zona de salida. En este punto el flujo cambia de dirección de velocidad.

4.2. Resultados de la simulación intersección Av. 26 de Enero y Jr. Garcilazo de la Vega

En esta simulación se puede apreciar el modelo con los parámetros establecidos. Es importante destacar que en la simulación se aplicó un sistema estacionario, disminuyendo las variables en relación al tiempo, para contrastar los objetivos propuestos en el estudio. En la figura 4.45 se presentan los resultados de velocidades para la simulación para un caudal de 0.81m³/s.

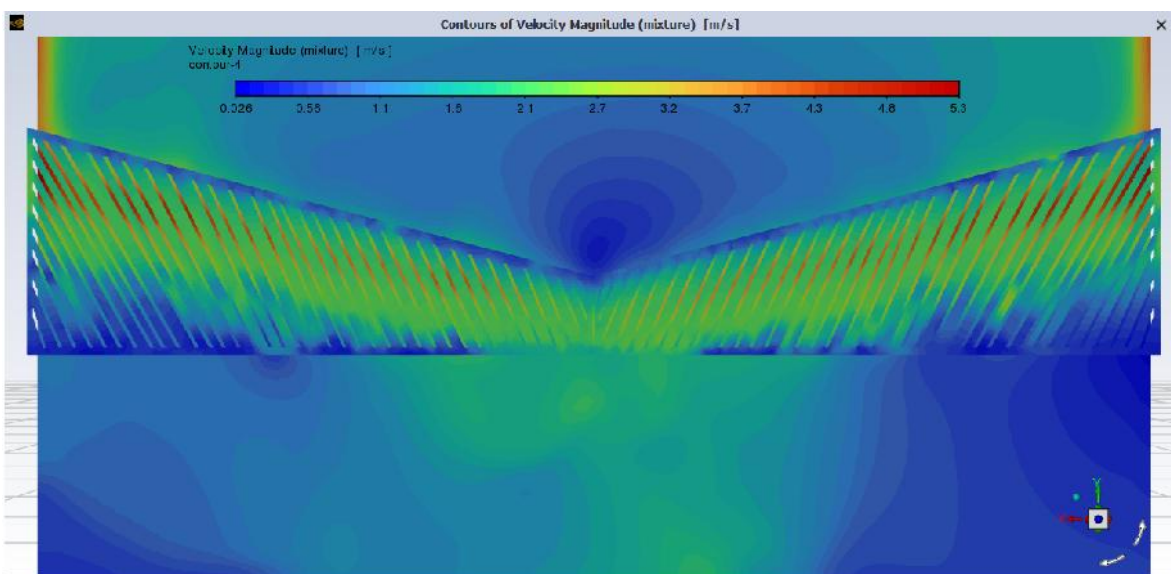
Figura 4.45: Velocidades con la simulación de $Q=0.81\text{ m}^3/\text{seg}$



Fuente: Resultados Ansys Fluent

La figura 4.45 y 4.46 muestra una gradiente de velocidad que va desde velocidades bajas, hasta a zonas de mayor intensidad del flujo igual a $5.3\text{ m}/\text{seg}$. Las velocidades más elevadas se producen en los lugares donde se producen cambios drásticos en las condiciones de borde. Se muestra en el punto con una leyenda roja que muestra que el flujo al entrar a las rejillas, inmediatamente genera velocidades elevadas. Los mismos resultados se logran en los lugares donde el flujo cambia de dirección, produciendo velocidades elevadas.

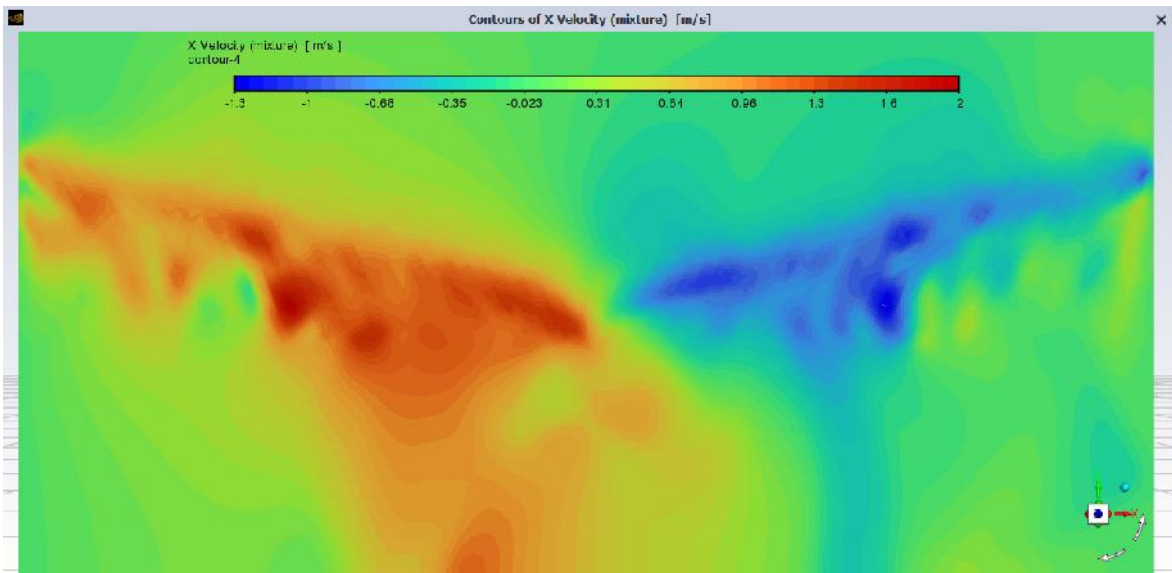
Figura 4.46: Velocidades con la simulación de $Q=0.81\text{ m}^3/\text{seg}$, superficie inferior



Fuente: Resultados Ansys Fluent

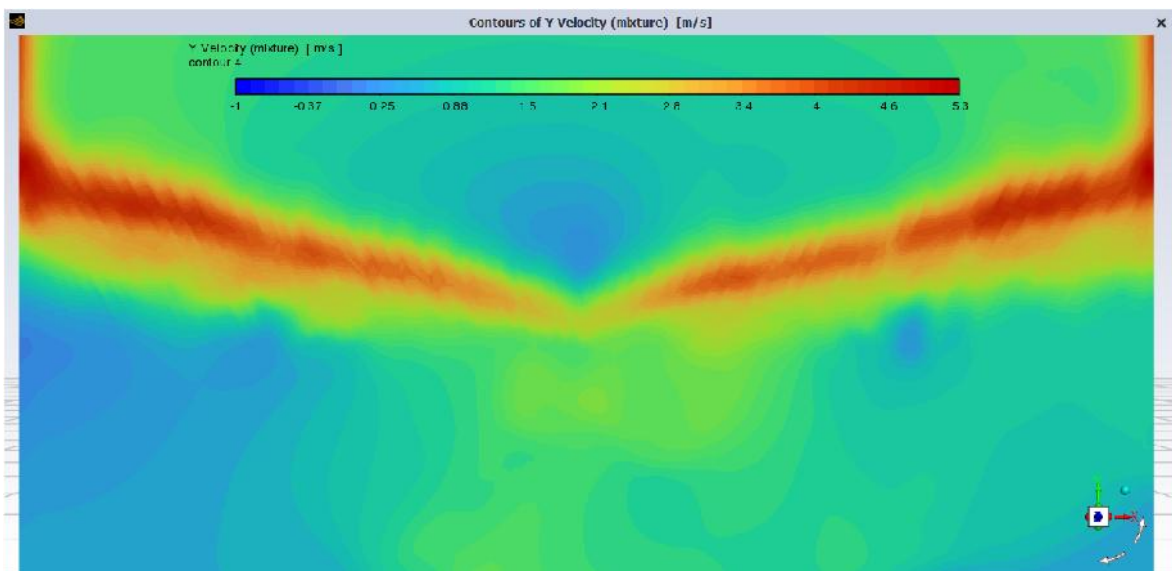
La imagen 4.47 y 4.48 presenta los resultados de una simulación CFD (Dinámica de Fluidos Computacional), en la que se analiza el comportamiento del flujo en las direcciones X e Y dentro de un dominio tridimensional. Se observa un mapa de colores que representa la magnitud de una variable relacionada a la velocidad, distribuida espacialmente a lo largo del campo simulado.

Figura 4.47: Velocidades en la dirección X, para un $Q=0.81\text{m}^3/\text{seg}$



Fuente: Resultados Ansys Fluent

Figura 4.48: Velocidades en la dirección Y, para un $Q=0.81\text{m}^3/\text{seg}$

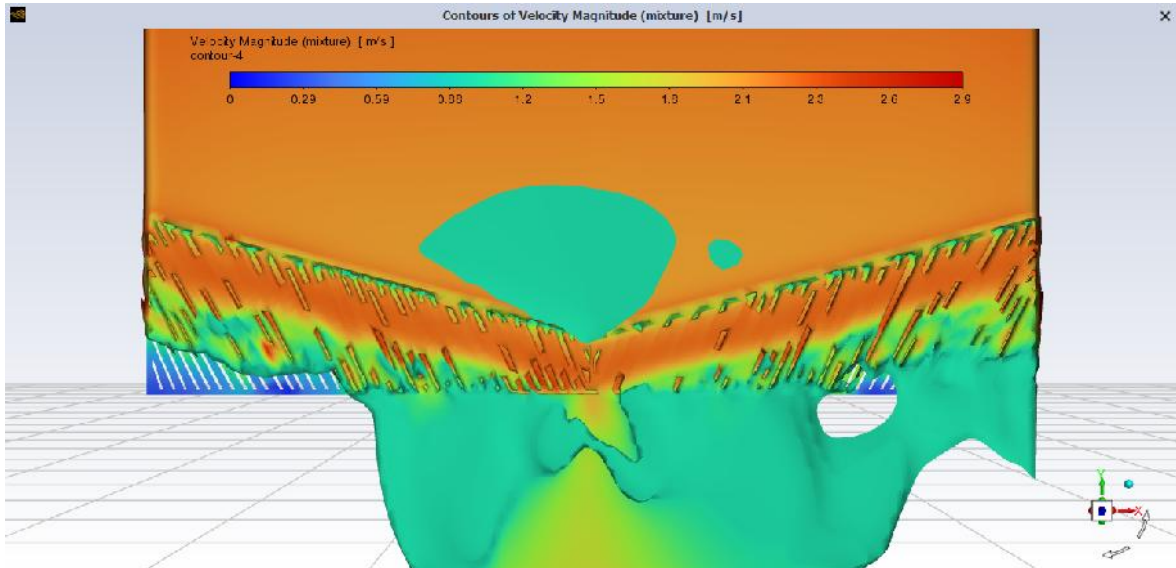


Fuente: Resultados Ansys Fluent

El flujo en la dirección Y muestra una tendencia dominante, evidenciada por la

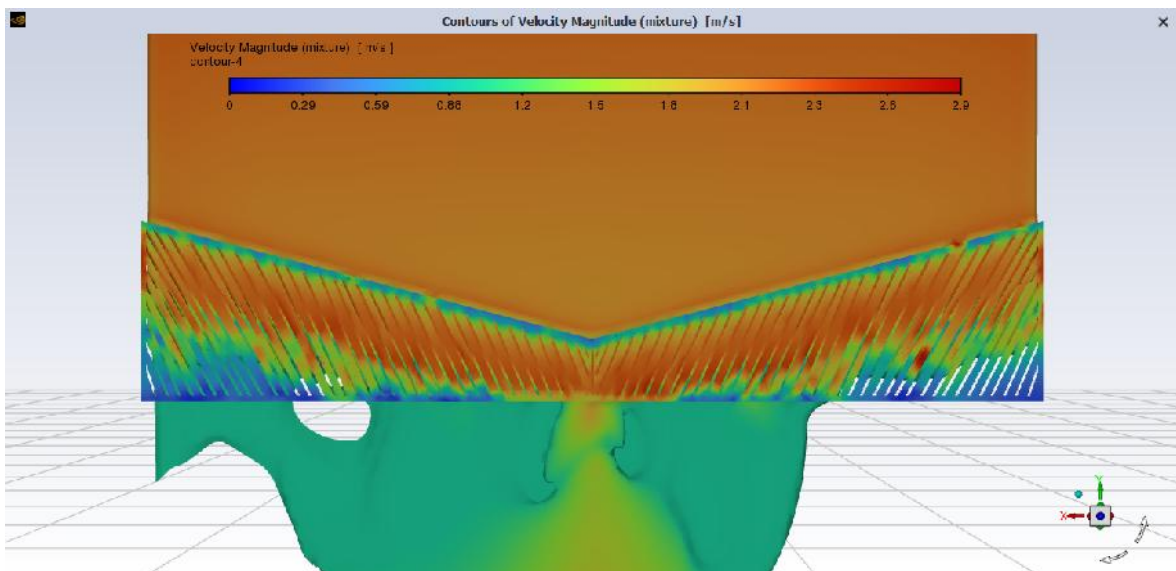
alineación y distribución de las zonas de alta velocidad. En cambio, la dirección X presenta variaciones locales que podrían indicar efectos de recirculación o interacción con obstáculos, estos resultados permite identificar regiones críticas, como puntos de estancamiento, zonas de alta velocidad o cambios de dirección abruptos, fundamental para evaluar el rendimiento del sumidero.

Figura 4.49: Flujo al ingresar al sumidero, para un $Q=0.81\text{m}^3/\text{seg}$



Fuente: Resultados Ansys Fluent

Figura 4.50: Flujo al ingresar al sumidero, para un $Q=0.81\text{m}^3/\text{seg}$, superficie inferior



Fuente: Resultados Ansys Fluent

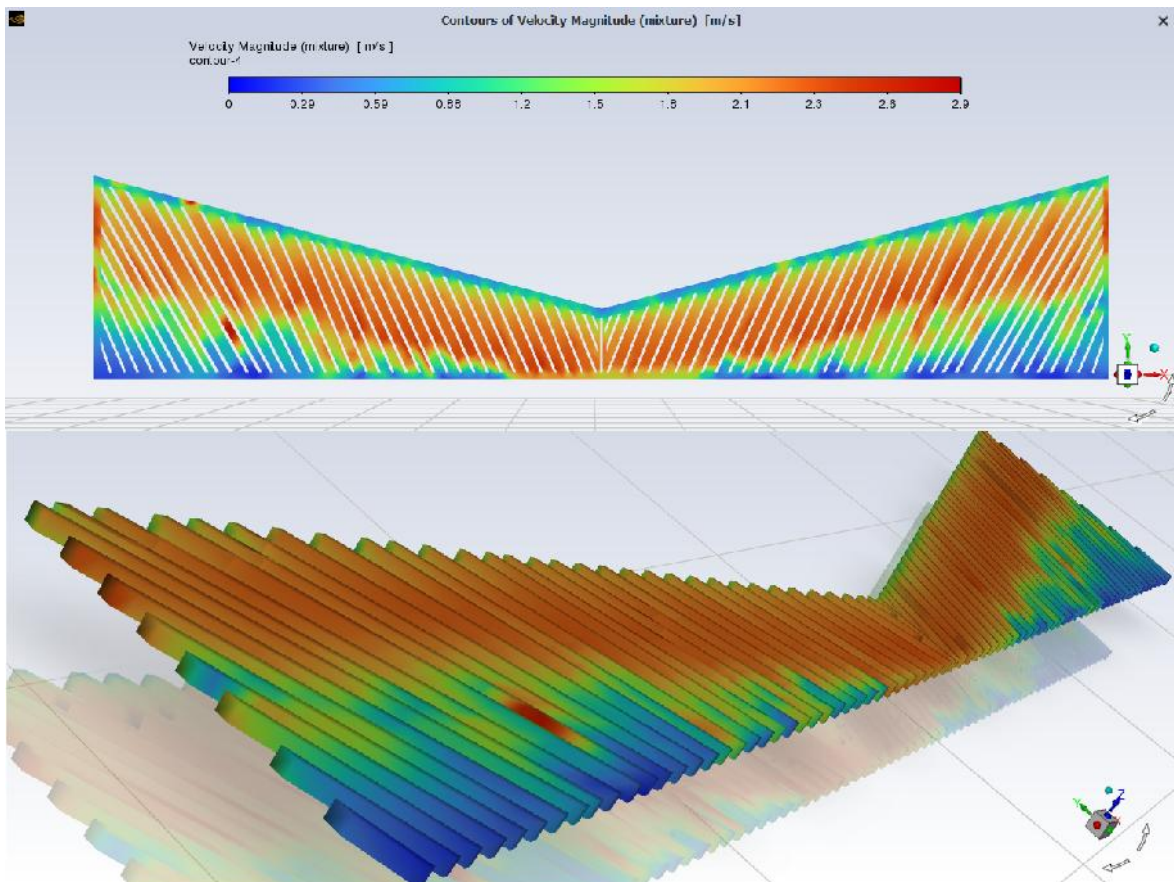
La imagen 4.49 y 4.50 muestra los resultados de una simulación CFD, específicamente el campo de velocidades de un flujo que se desplaza sobre una superficie

con rejilla metálica inclinada. El contorno representa la magnitud de la velocidad de la mezcla en unidades de metros por segundo (m/s), visualizada mediante una escala de colores desde velocidades más bajas hasta las velocidades más altas, según la leyenda ubicada en la parte superior.

De la figura imagen 4.49 se observa la rejilla, caracterizada por un patrón inclinado donde se concentran los vectores de velocidad, los cuales indican tanto la dirección como la intensidad del flujo. Las velocidades más bajas se encuentran cerca de la superficie de la rejilla alejadas y donde el flujo interactúa con los elementos metálicos genera una zona de gradiente elevado. La simetría del campo sugiere un patrón uniforme en la geometría y las condiciones de frontera, mientras que la inclinación de los vectores destaca el efecto de la rejilla en la dirección predominante del flujo.

Mientras que en la 4.50, se observa que el flujo llena la rejilla, también se observa que en la zona media de la rejilla el flujo pasa la rejilla invadiendo la zona posterior, no ingresando todo el flujo al sumidero, así mismo se tiene las velocidades con el cual ingresa al sumidero mostradas en la figura 4.51.

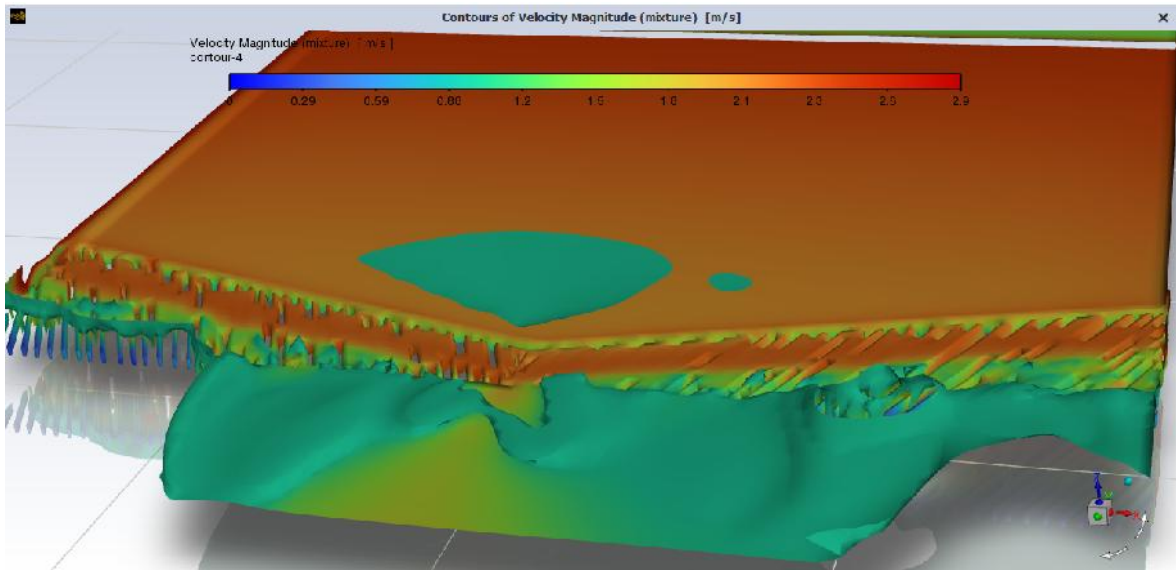
Figura 4.51: Flujo sobre las rejillas para un $Q=0.81\text{m}^3/\text{seg}$



Fuente: Resultados Ansys Fluent

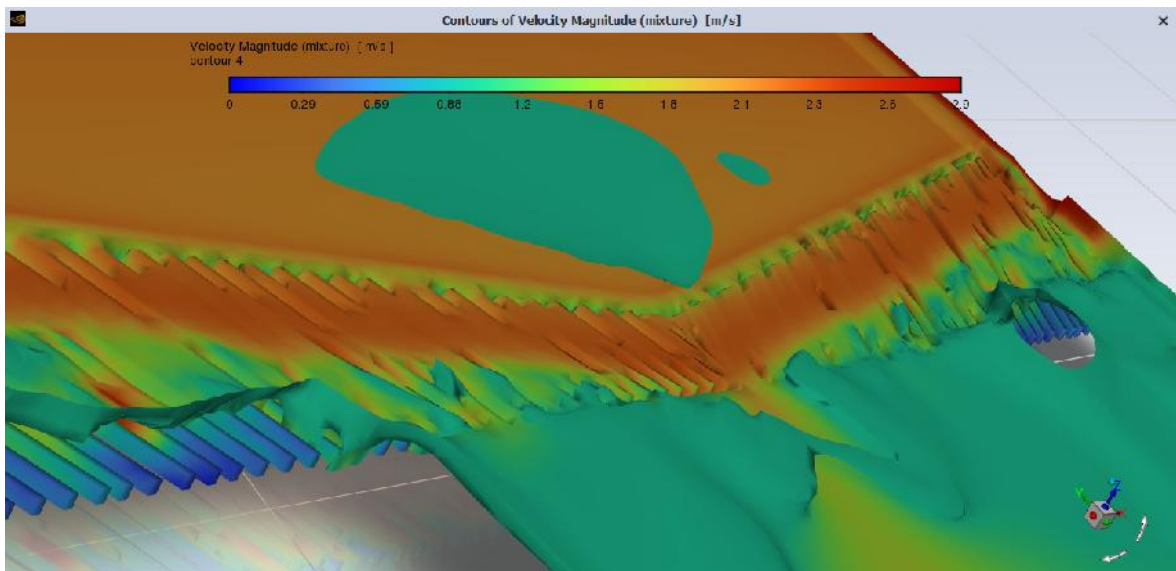
En la figura 4.52 y 4.53 presenta los resultados del análisis CFD tridimensional del comportamiento del flujo de una mezcla al incidir sobre una rejilla metálica inclinada (sumidero). El contorno muestra la magnitud de la velocidad en un rango de 0 a 2.93 m/s. El flujo incidente ingresa al sumidero aproximadamente 2.00–2.30 m/s, se aproxima desde la parte superior hacia la superficie de la rejilla, la cual presenta una estructura de aletas paralelas.

Figura 4.52: Flujo al ingresar al sumidero 3D, para un $Q=0.81\text{m}^3/\text{seg}$



Fuente: Resultados Ansys Fluent

Figura 4.53: Flujo al ingresar al sumidero 3D, para un $Q=0.81\text{m}^3/\text{seg}$



Fuente: Resultados Ansys Fluent

La región previa a la rejilla muestra un perfil de velocidad uniforme, característico

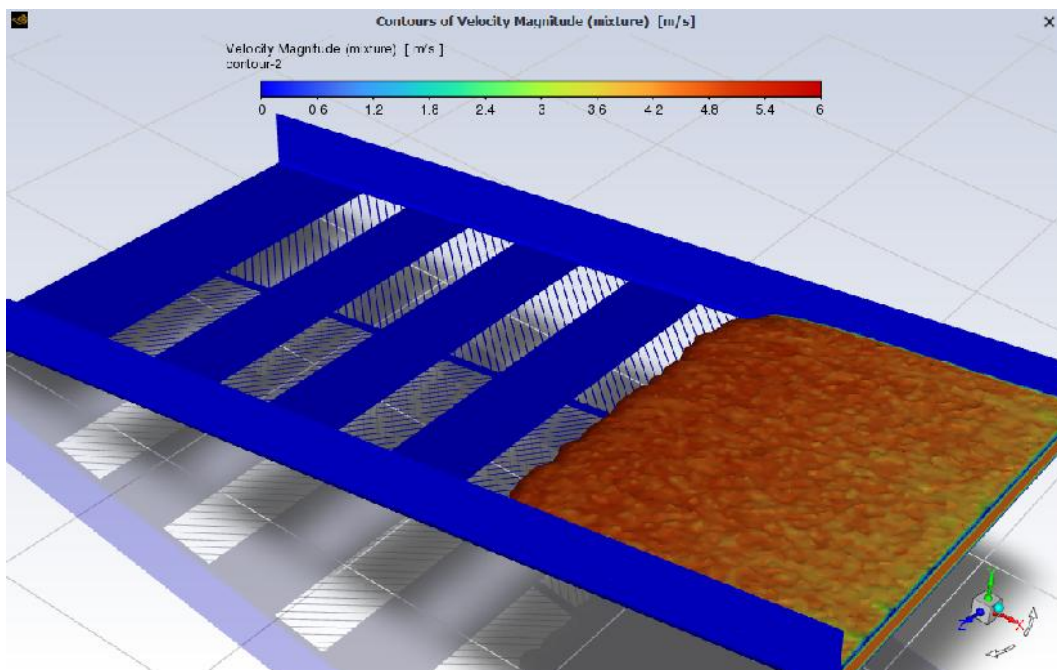
de un flujo desarrollado. Sin embargo, al llegar a la rejilla, se observa una caída abrupta de la magnitud de la velocidad (zona azul), indicando una significativa pérdida de energía cinética, posiblemente por la interacción con la geometría sólida. Este fenómeno puede deberse tanto a la obstrucción directa del flujo como al desarrollo de una capa límite sobre la superficie de la rejilla.

Adicionalmente, se asume una posible recirculación o zona de estancamiento en la interfaz entre el flujo y la estructura, especialmente en las cavidades entre las rejillas, lo que podría generar pérdidas por fricción o turbulencia localizada. Este tipo de configuración es típico en aplicaciones de cambio de sección (principio de continuidad), donde la distribución de velocidad es crítica para el rendimiento del sistema.

4.3. Resultados del Colector Jr. San Martín y Jr. Señor de Quinuapata

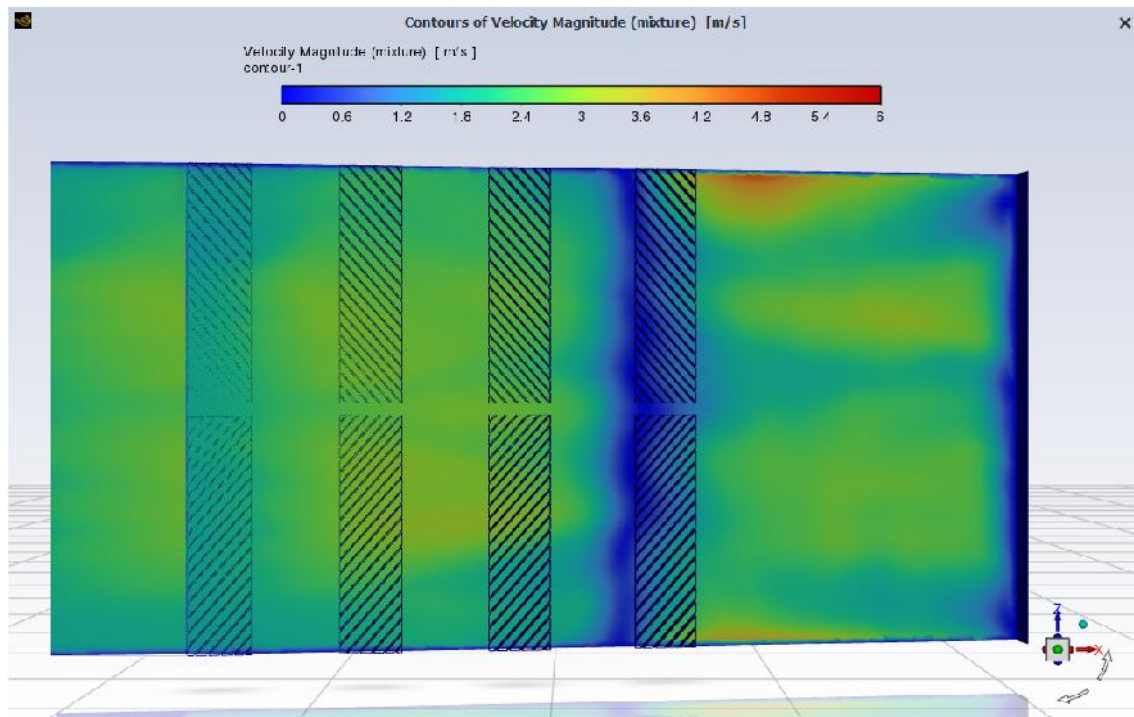
En las figuras 4.54 y 4.55 representa el caudal en el Jr. Bellido, lo cual demuestra que los dos sumideros planteados cumplen el objetivo de captar el caudal pluvial, sin embargo se registran caudales mínimos que llegan a pasar por el segundo sumidero, así mismo en la figura 4.55 muestra las velocidades en la superficie superior e inferior respectivamente.

Figura 4.54: Resultados para el modelo Jr. San Martín y Jr. Señor de Quinuapata



Fuente: Ansys Fluent

Figura 4.55: Velocidades superficie inferior para el modelo Jr. San Martín y Jr. Señor de Quinuapata



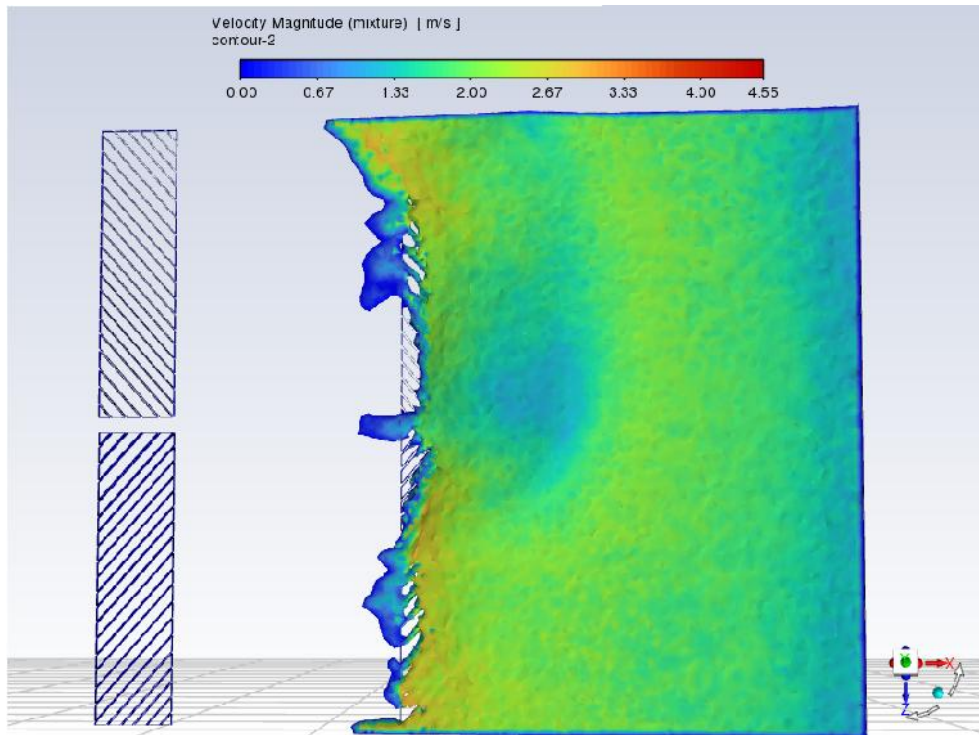
Fuente: Ansys Fluent

En esta figura muestra los contornos de velocidad (m/s) obtenidos mediante CFD en una sección con cuatro sumideros tipo rejilla. Se observa una aceleración del flujo tras atravesar las ranuras, con velocidades que superan los 5.4 m/s, indicando turbulencia. Antes de los sumideros, las velocidades son moderadas, mientras que zonas de baja velocidad (casi 0 m/s) cerca de los bordes indican posibles recirculaciones. Este comportamiento tridimensional evidencia la importancia del modelado 3D para evaluar correctamente la eficiencia hidráulica de los sumideros, permitiendo identificar zonas críticas y posibles fallos estructurales ante eventos de alta intensidad.

4.4. Resultados sumidero Jr. Bellido

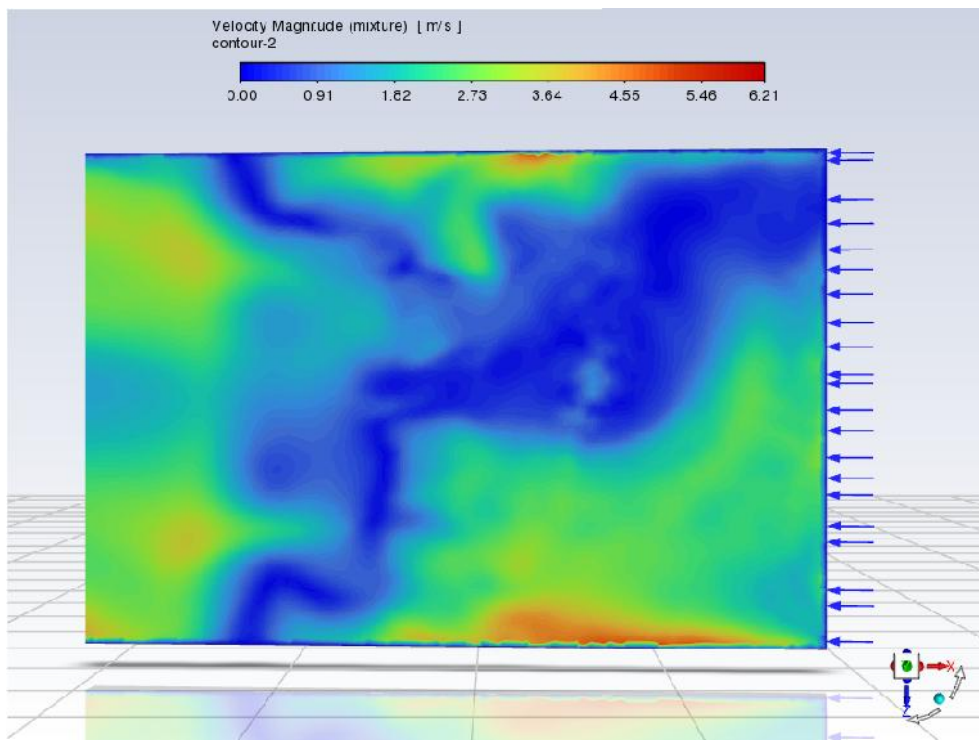
En las figuras 4.56, 4.57 y 4.58 representa el caudal en el Jr. Bellido, lo cual demuestra que los dos sumideros planteados cumplen el objetivo de captar el caudal pluvial, sin embargo se registran caudales mínimos que llegan a pasar por el segundo sumidero, así mismo en la figura 4.57 y 4.58 muestra las velocidades en la superficie superior e inferior respectivamente.

Figura 4.56: Resultados para el modelo Jr. Bellido



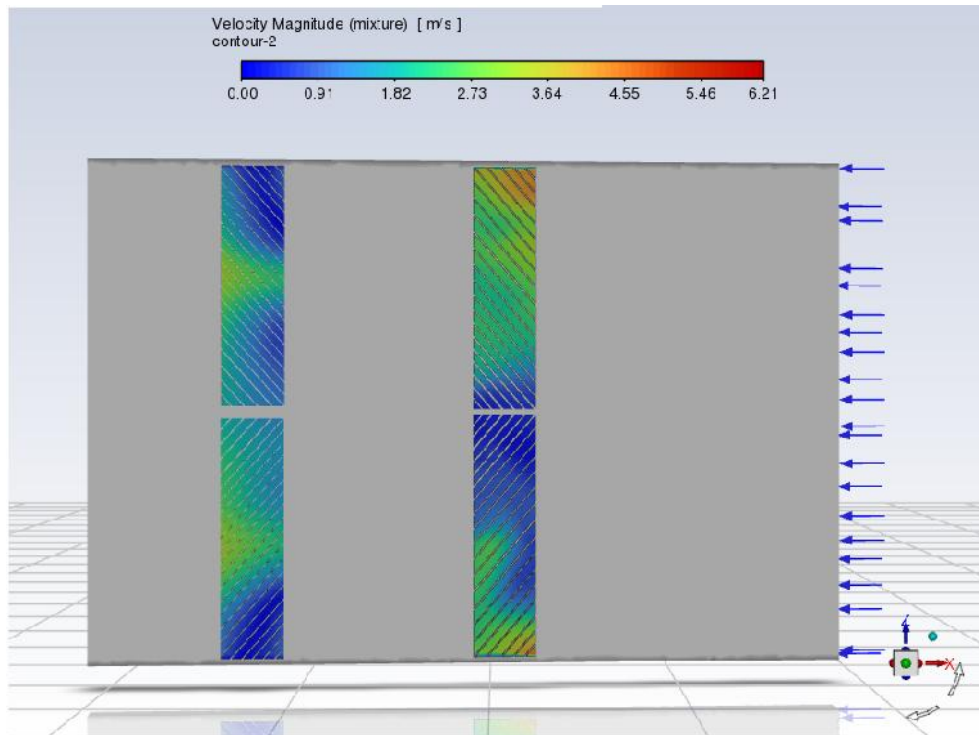
Fuente: Ansys Fluent

Figura 4.57: Velocidades superficie superior para el modelo Jr. Bellido



Fuente: Ansys Fluent

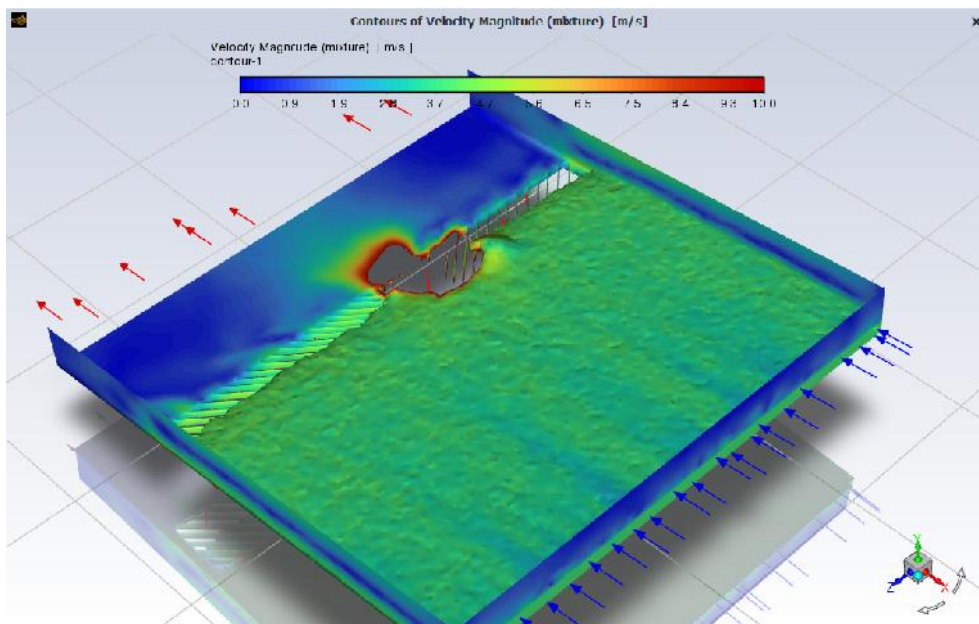
Figura 4.58: Velocidades superficie inferior para el modelo Jr. Bellido



Fuente: Ansys Fluent

4.5. Resultados sumidero Jr. Callao

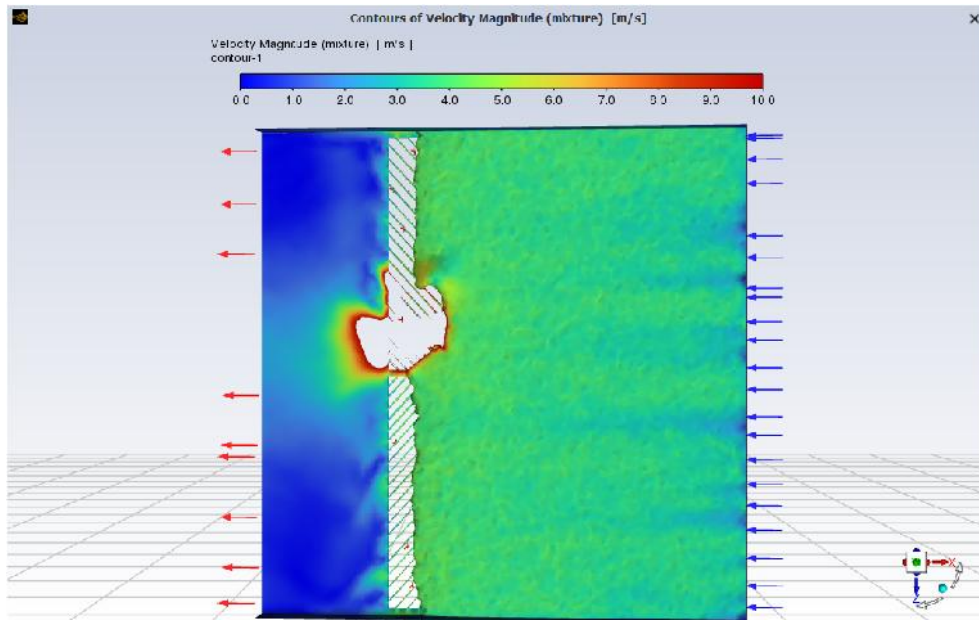
Figura 4.59: Resultados para el modelo Jr. Callao



Fuente: Ansys Fluent

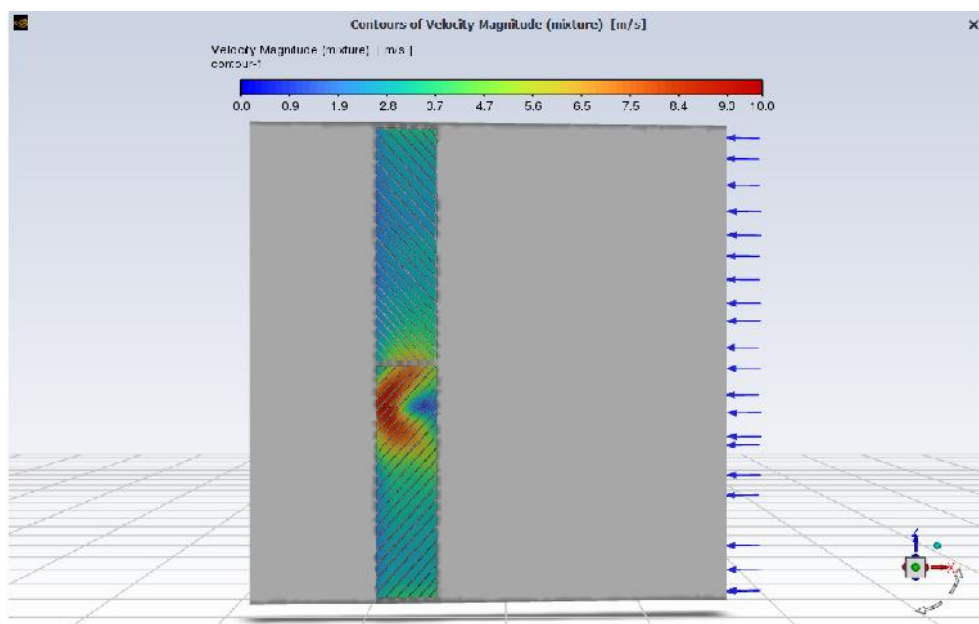
En las figuras 4.59 representa el caudal en el Jr. Callao, lo cual demuestra que el sumidero planteado cumplen el objetivo de captar el caudal pluvial, así mismo en la figura 4.60 y 4.61 muestra las velocidades en la superficie superior e inferior respectivamente.

Figura 4.60: Velocidades superficie superior para el modelo Jr. Callao



Fuente: Ansys Fluent

Figura 4.61: Velocidades superficie inferior para el modelo Jr. Callao

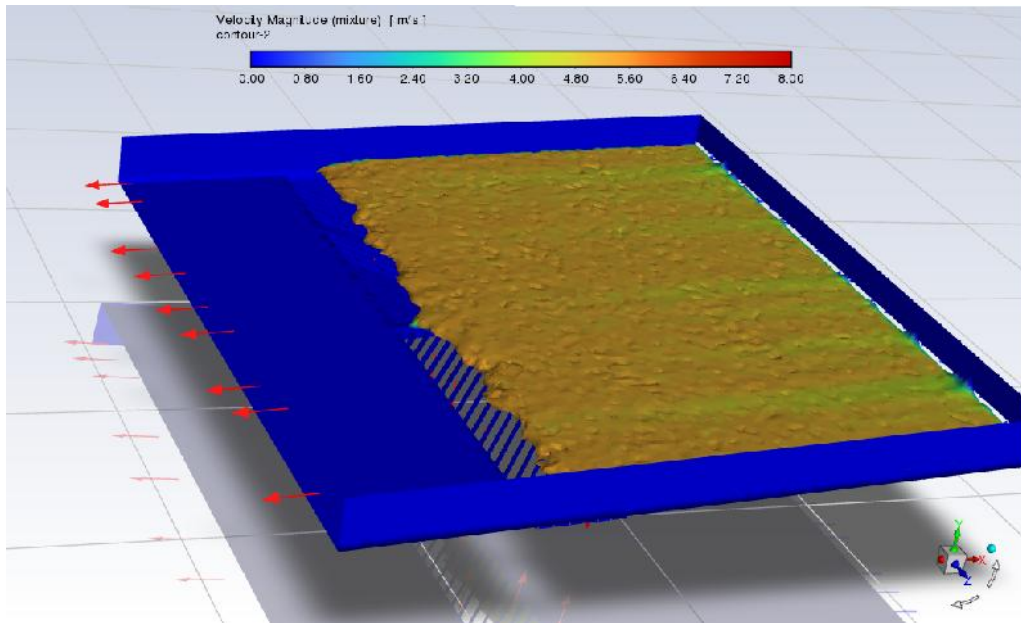


Fuente: Ansys Fluent

4.6. Resultados sumidero Jr. Lima

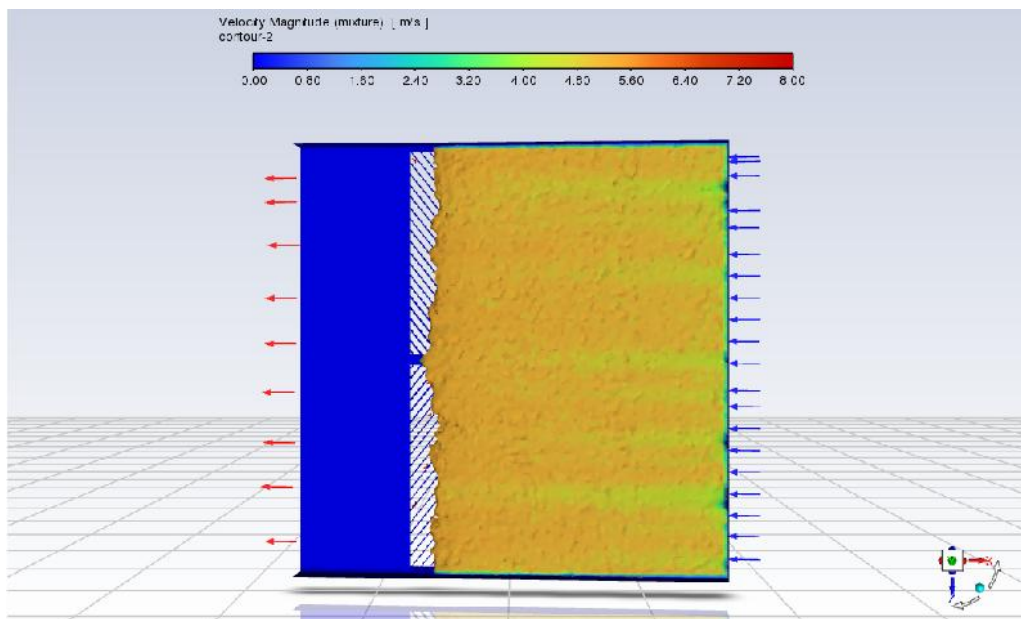
En las figuras 4.62 representa el caudal en el Jr. Lima, lo cual demuestra que el sumidero cumplen el objetivo de captar el caudal pluvial, así mismo en la figura 4.63 y 4.64 muestra las velocidades en la superficie superior e inferior respectivamente.

Figura 4.62: Resultados para el modelo Jr. Lima



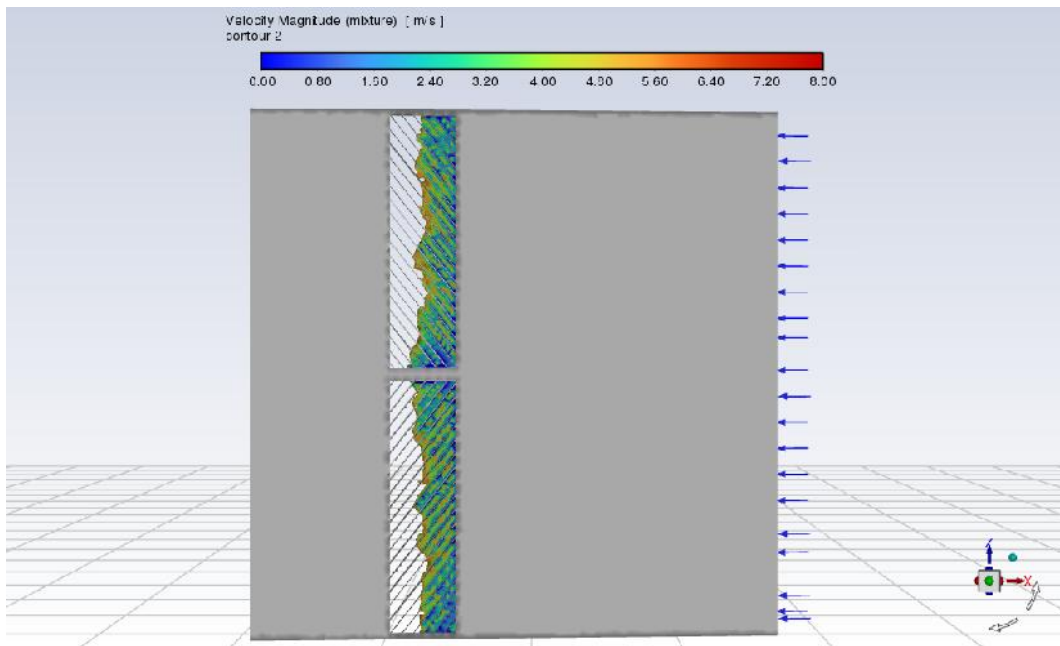
Fuente: Ansys Fluent

Figura 4.63: Velocidades superficie superior para el modelo Jr. Lima



Fuente: Ansys Fluent

Figura 4.64: Velocidades superficie inferior para el modelo Jr. Lima



Fuente: Ansys Fluent

4.7. Discución de los resultados

Hipótesis general

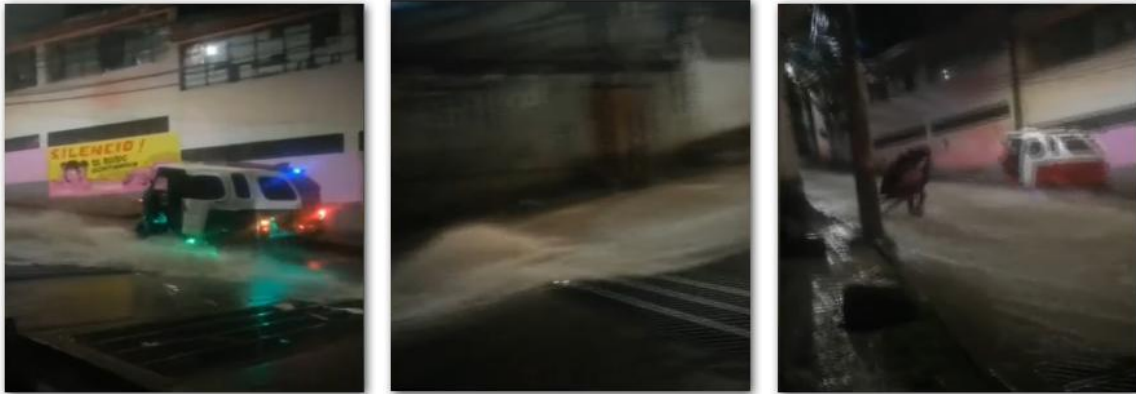
Como se puede apreciar en las simulaciones anteriores, se confirma la primera hipótesis. En estas imágenes, se muestra el comportamiento del flujo al entrar en un sumidero de cajón con una rejilla metálica, utilizando la dinámica de fluidos computacional CFD. Se considera también la solución de las Ecuaciones de Navier-Stokes mediante el uso del régimen estacionario.

De igual forma, es posible determinar las magnitudes y direcciones de las velocidades en cada coordenada del espejo de agua en las secciones, donde se ubica el sumidero de tipo cajón con rejillas metálicas. Estas variables se pueden identificar mediante el uso de la dinámica computacional de fluidos.

A partir de las figuras 4.53, 4.55, 4.56, 4.59 y 4.62 se observa el comportamiento de los caudales, existe porcentajes que pasa el sumidero, se realizo un analisis de cuantificación para cada simulación, para nuestro caso del total de superficie analizado aguas abajo de la rejilla el área cubierta, esto permite evaluar el desempeño hidráulico del sistema de captación de forma más completa.

A partir de las simulaciones se obtiene que en la intersección Jr. San Martín y Jr. Señor de Quinuapata como se evidencia en el canal nacional de **TVPerú Noticias** de fecha 25 de octubre del 2024 se ha visto los efectos que produce una cierta cantidad de agua como muestra la figura 4.65, estas imágenes muestran la importancia de evaluar estos flujos con modelos apropiados.

Figura 4.65: Caudal Jr. San Martín y Jr. Señor de Quinuapata



Fuente: TVPerú Noticias

Hipótesis específico 1

El uso de volúmenes finitos en un entorno de simulación tridimensional como ANSYS Fluent mejora significativamente la descripción del comportamiento del flujo en sumideros tipo cajón, al proporcionar una representación más detallada de las variables hidráulicas y permitir el cálculo preciso del caudal captado y rebosado. Esto representa una ventaja frente a los modelos 1D y 2D, que presentan limitaciones en la resolución espacial y en la interpretación física del fenómeno como se muestra en las figuras 4.52 y 4.53.

El modelo con volúmenes finitos permitió visualizar y cuantificar con precisión el comportamiento hidráulico en 3D, mostrando la distribución de velocidades, presiones y trayectorias del flujo en el entorno del sumidero tipo cajón como muestra las figura 4.45.

El modelo 1D y 2D, en cambio, no permite observar fenómenos locales como turbulencias, remolinos o zonas muertas, limitando su capacidad para representar con precisión el comportamiento del flujo en zonas complejas.

Por lo tanto el uso de volúmenes finitos mejora sustancialmente la descripción del comportamiento del flujo en sumideros tipo cajón, al proporcionar un marco numérico que permite evaluar con mayor fidelidad tanto el desempeño hidráulico como los

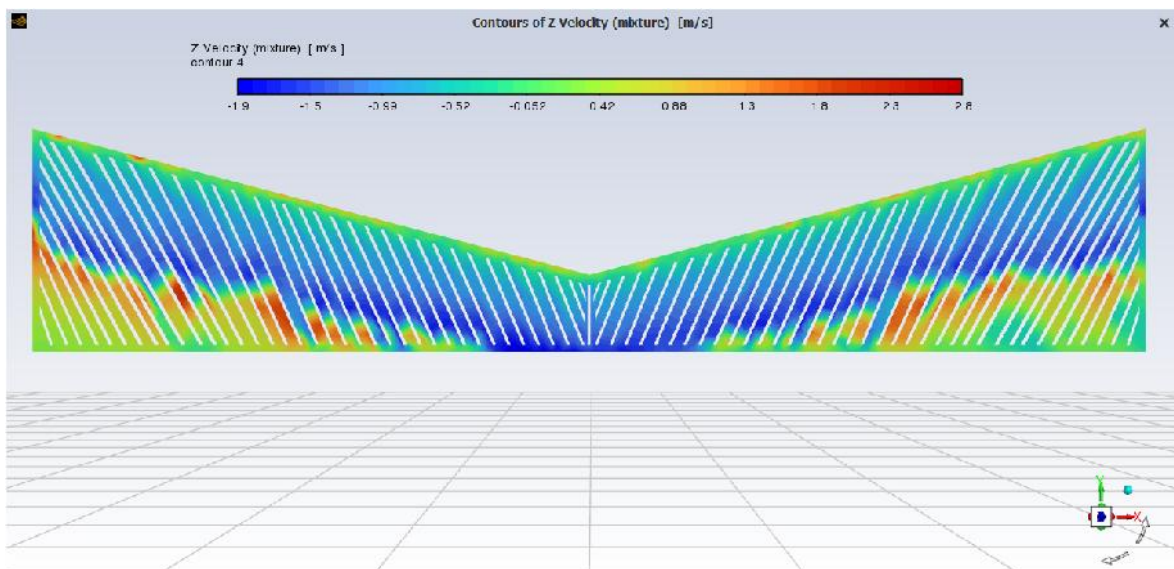
mecanismos de captación y rebose del sistema.

Hipótesis específico 2

El análisis de flujo en sumideros tipo rejilla se realizó mediante simulaciones tridimensionales utilizando ANSYS Fluent, donde se resolvieron las componentes de velocidad en las tres direcciones del espacio. Los resultados mostraron que las velocidades varían entre 0 m/s y 2.93 m/s dentro del dominio de la estructura, y la dirección de esas velocidades tiene un impacto considerable en la distribución del flujo, particularmente al ingresar al sumidero tipo rejilla, como muestra las figuras 4.46 y 4.66.

La capacidad del modelo 3D para representar las velocidades en tres direcciones espaciales permitió capturar fenómenos que no son visibles en modelos 1D o 2D. Específicamente, el cambio de dirección de las velocidades al ingresar al sumidero es mucho más representativo y detallado en el modelo tridimensional, lo que mejora la veracidad de la descripción del flujo en las proximidades de la rejilla y a lo largo de todo el sistema.

Figura 4.66: Velocidad de flujo en la dirección Z en las rejillas, para un $Q=0.81\text{m}^3/\text{seg}$

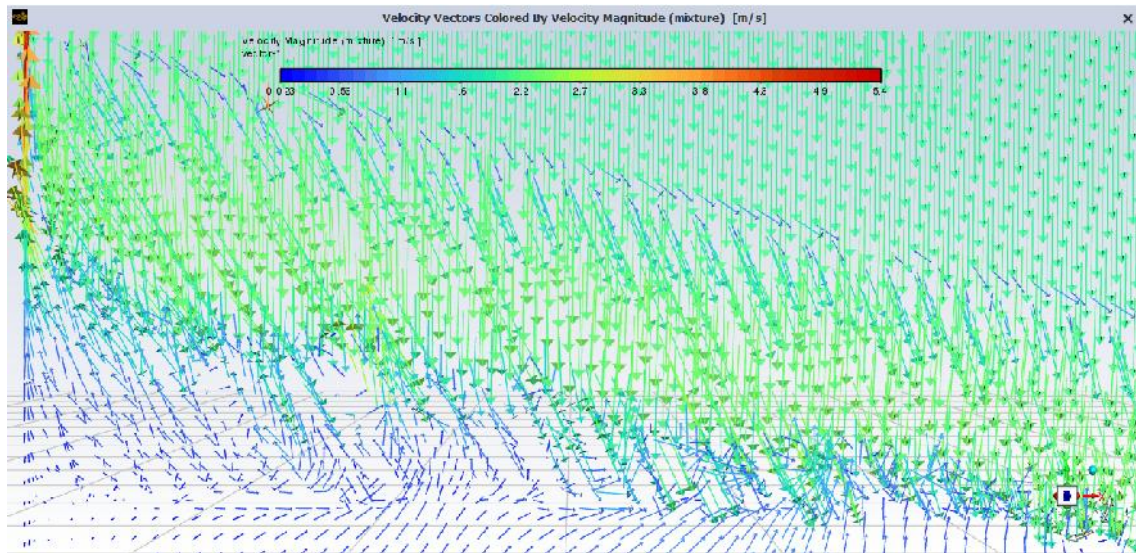


Fuente: Resultados Ansys Fluent

La hipótesis se confirma y se refuerza. El uso de un modelo tridimensional con las direcciones de velocidad adecuadamente representadas no solo mejora la precisión en el cálculo de las variables hidráulicas, sino que también permite una evaluación más realista de la funcionalidad de las estructuras, como los sumideros tipo rejilla. En particular, el cambio de dirección de las velocidades al ingresar al sumidero es un aspecto

crucial que se observa de manera más precisa en el modelo 3D, y es esencial para una evaluación precisa de la capacidad de captación y manejo de flujos en sistemas urbanos de drenaje pluvial, los resultados del cambio de velocidad de observan en la figura 4.67.

Figura 4.67: Vector velocidad y orientación en las rejillas, para un $Q=0.81\text{ m}^3/\text{seg}$



Fuente: Resultados Ansys Fluent

Hipótesis específico 3

El caudal transitado desempeña un papel determinante en la funcionalidad de los sumideros tipo cajón, ya que influye directamente en la capacidad de captación y en la cantidad de flujo que rebosa la estructura. Los resultados obtenidos para la intersección de la Av. 26 de Enero y Jr. Garcilazo de la Vega y el sumidero de Jr. San Martín y Jr. Señor de Quinuapata existe un porcentaje que rebasa los sumideros, lo que refleja la importancia de dimensionar adecuadamente las estructuras para evitar desbordes y mejorar la eficiencia en el manejo de flujos pluviales en zonas urbanas. Este análisis de caudal es esencial para validar la eficiencia de los sistemas de drenaje y para identificar posibles áreas de mejora en el diseño de sumideros urbanos.

V: Conclusiones

De acuerdo con los objetivos establecidos en el primer capítulo y las variables de diseño analizadas en el tercer capítulo, la investigación llevada a cabo y el posterior análisis de resultados se concluye lo siguiente:

1. La importancia del CFD radica en su capacidad de simular el flujo de agua en condiciones realistas, permitiendo identificar fenómenos como recirculaciones y corrientes secundarias que los modelos 1D o 2D no consideran. Esto lo convierte en una herramienta clave para optimizar el diseño de sumideros y asegurar su funcionamiento ante caudales extremos. Los resultados obtenidos como muestra la tabla 5.8 muestran que, en condiciones críticas, se requiere un diseño adecuado para evitar fallos en el drenaje. Así, el análisis tridimensional ofrece una evaluación más precisa del rendimiento y seguridad de las infraestructuras hidráulicas frente a lluvias intensas.

Tabla 5.8: Características hidráulicas de las subcuencas

Sumidero	Caudal total (m ³ /s)	Caudal retenido (m ³ /s)	Caudal rebasado (m ³ /s)	Eficiencia (%)
Av. 26 de Enero y Jr. Garcilazo de la Vega	0.81	0.58	0.23	71.65
Jr. San Martín y Jr. Señor de Quinuapata	6.10	3.04	3.06	49.88
Sumidero Bellido	5.00	4.41	0.59	88.21
Sumidero Callao	2.00	1.79	0.21	89.55
Sumidero Lima	3.00	2.74	0.26	91.23

Fuente: Mejorado Expediente técnico

2. El modelo tridimensional basado en volúmenes finitos demostró ser más robusto y detallado para representar el comportamiento hidráulico en sumideros tipo cajón de drenaje pluvial urbano. La simulación en ANSYS Fluent resolvió las ecuaciones de Navier-Stokes en 3D, capturando con precisión variables clave como velocidades, presiones y líneas de corriente, lo que permitió cuantificar indicadores críticos

como el caudal captado. En contraste, los modelos 1D y 2D, aunque útiles en análisis preliminares o geometrías simples, presentan limitaciones para describir el flujo en estructuras complejas de captación superficial.

3. Las simulaciones tridimensionales en ANSYS Fluent evidencian que la dirección de las velocidades influye de forma decisiva en el comportamiento hidráulico de sumideros tipo rejilla. Al considerar las tres componentes del flujo (x, y, z), el modelo captura fenómenos complejos como recirculaciones y turbulencias que los enfoques 1D y 2D no representan. El análisis muestra que los cambios de dirección al ingresar al sumidero determinan la distribución del flujo y la eficiencia de la captación, así como la formación de zonas de alta velocidad cerca de las rejillas. En conclusión, el modelado 3D ofrece una evaluación más precisa y confiable del desempeño hidráulico, superando las limitaciones de modelos simplificados.
4. Las simulaciones con distintos caudales confirman que el volumen de agua transitada es determinante en la funcionalidad de los sumideros tipo cajón en drenaje urbano. Los resultados muestran que solo una parte del caudal es captada, mientras el exceso rebosa, evidenciando que la capacidad de captación depende directamente del caudal ingresado. Un incremento en el flujo, por lluvias intensas o variaciones pluviales, puede superar dicha capacidad y provocar el fallo de la estructura. Esto resalta la necesidad de dimensionar sumideros y sistemas de drenaje capaces de manejar variaciones de caudal, garantizando un desempeño seguro y eficiente.

VI: Recomendaciones

De la investigación realizada podemos recomendar lo siguiente:

1. Se recomienda el uso de CFD en el diseño de sumideros urbanos, pues permite analizar el flujo, identificar puntos críticos y predecir el desempeño ante lluvias intensas. Estas simulaciones deben complementarse con datos de campo y ser aplicadas por especialistas en hidráulica y modelado numérico para asegurar resultados confiables, según las simulaciones, se recomienda proponer nuevas dimensiones para el sumidero Jr. San Martín y Jr. Señor de Quinuapata, en el cual se a obtenido un 49.88 % de eficiencia.
2. Se recomienda el método de volúmenes finitos para simular flujos en sumideros pluviales, ya que representa con precisión el comportamiento hidráulico y maneja geometrías complejas. Para garantizar resultados confiables, es esencial un buen mallado y la validación con datos reales.
3. Se recomienda considerar el tipo y la dirección del flujo superficial en el diseño de sumideros urbanos, pues influyen en la geometría y ubicación óptima del dispositivo. En flujos laminares conviene captadores longitudinales, mientras que en flujos concentrados o turbulentos se requieren rejillas transversales o cámaras de caída. Además, pendientes e intersecciones deben evaluarse para ubicar sumideros estratégicamente. Un análisis hidráulico detallado, tanto en condiciones normales como extremas, es esencial para garantizar eficiencia y evitar acumulaciones de agua.
4. El diseño de sumideros urbanos requiere un cálculo riguroso de caudales de escorrentía, considerando intensidad y duración de lluvias, superficie, pendiente, cobertura y coeficientes de escorrentía de la cuenca. Estos factores determinan el volumen y velocidad del agua, claves para dimensionar la captación: subestimar genera inundaciones y sobreestimar, costos innecesarios. Se recomienda complementar con simulaciones hidráulicas que validen el desempeño del sistema ante distintos escenarios de lluvia, logrando diseños más seguros y eficientes.

Referencia Bibliográfica

- Aurelio, O. G. S., Reyna, T., García, M., Herrero, H., Díaz, J. M., & Heredia, A. (2017). Analisis de la implementación de un modelo hidrodinámico tridimensional al flujo de un cauce natural. *Ingeniería del agua*, 21(2), 103-117.
- Ballesteros, F. I. R. (2024). *Simulación de crecientes de diseño para el control de inundaciones del río san pablo en el canton babahoyo* (Tesis pregrado, Universidad Politecnica Salesiana Ecuador).
- Bertolino, G., Cantero, M., Storti, M., & Teruel, F. (2014, Setiembre 23-26). Evaluación de simulaciones numericas bi y tridimensionales del flujo en una confluencia fluvial. En G. Bertolino, M. Cantero, M. Storti, & F. Teruel (Eds.), *Mecánica computacional* (Vol. 33, pp. 323-336). San Carlos de Bariloche.
- Binnquist Cervantes, G. S., Hevia del Puerto Puente, C., & Chávez Cortés, M. M. (2013, enero-abril). Intervención hidráulica para controlar la contaminación y prevenir el riesgo hidrometeorológico en el río eslava, d.f. *Ingeniería*, 17(1), 67-79.
- Bugallo, B. F., González, E. P., & Gómez, L. C. (2015, -). Caracterización de la estructura 3d del flujo en tramos meandriformes en condiciones de inundación mediante modelo numérico. interacción caucellanura e influencia de la rugosidad. *GEAMA*, 17(1), 67-79.
- Camargo, J. R. T. (2019). *Evaluacion del efecto de la consideracion de fluido newtoniano vs no newtoniano para la modelacion de inundaciones en rondas hidricas caso aplicativo quebrada la palmichala, municipio de la floridablanca, departamento de santander* (Tesis maestria, Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga).
- Cárdenas Quintero, M., Carvajal-Serna, F., & Marbello, R. (2017, enero). Evaluación numérica tridimensional de un sumidero de reja de fondo (three-dimensional numerical assessment of grate inlet). *SSRN Electronic Journal*. doi:10.2139/ssrn.3112980
- Çengel, Y. A. & Cimbala, J. M. (2017). *Fluid mechanics: fundamentals and applications* (4th). McGraw-Hill Education. Recuperado desde <https://www.mheducation.com/highered/product/fluid-mechanics-fundamentals-applications-cengel-cimbala/M9781259696534.html>

- Comport, B. & Thornton, C. (2017, enero). Hydraulic efficiency of grate and curb inlets for urban storm drainage). *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000552
- Gómez, M. & Russo, B. (2011). Methodology to estimate hydraulic efficiency of drain inlets. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 164(2), 81-90. doi:10.1680/wama.900070. eprint: <https://doi.org/10.1680/wama.900070>
- Landau, L. & Lifshitz, E. (1987). *Mecánica de fluidos* (2ª edición). Curso de física teórica, volumen 6. Butterworth-Heinemann.
- Mott, R. (1995). *Mecánica de fluidos aplicada* (4ª edición). México: Pearson Educación.
- Ramirez, J. A., Lopez Lopez, J., Lopez, J. L. H., & Vicente, D. D. L. F. (2013). *Modelación matemática y computacional de una inundación* (1ra). Villahermosa tabasco. Recuperado desde Universidad%20Juarez%20Autonoma%20de%20Mexico
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, P. B. (2014). *Metodología de la investigación* (6ta edición). metodologí de la Investigacion. Butterworth-Heinemann.
- Vargas, J. R. (2014). *Modelación tridimensional del flujo de entrada en un sumidero* (Tesis pregrado, Escuela de Caminos, Escuela tecnica Superior de Ingeneiria de Caminos, Canales y Puertos - España).
- Ventura, A. A. (2003). Hydrofem: un modelo tridimensional para la simulación del flujo de agua en medios porosos de saturación variable. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, 6, 271.



UNSCH

FACULTAD DE
INGENIERÍA
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 032-2025-FIMGC

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga de la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **RESOLUCIÓN DECANAL N° 241-2025-FIMGC-D**, a los **veintiocho días del mes de agosto de 2025**, siendo las **10:00 a.m.**, reunidos en el **Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil**, bajo la presidencia del **MSc. Ing. José Ernesto Estrada Cárdenas**, y los miembros: **Ing. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO** y **Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANI**, actuando como secretario docente el **Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNÁNDEZ**, para proceder a la sustentación de tesis para optar el **Título Profesional de Ingeniero Civil**, del bachiller:

JOSEPH MACHELLO GAMBOA GARCIA

Quien presentó la tesis denominada:

EVALUACIÓN DE LA FUNCIONALIDAD DEL SUMIDERO TIPO CAJÓN DEL DRENAJE PLUVIAL URBANO, USANDO MODELOS DE FLUJOS TRIDIMENSIONALES, AYACUCHO 2024

Los señores miembros del jurado, luego de expuesta la tesis y absueltas las preguntas, deliberaron y declararon:

Aprobado con diecisiete (17)

Siendo las **11:30 a.m.** del día **28 de agosto de 2025**, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad con lo actuado, los miembros del jurado firman al pie del presente.

MSc. Ing. José Ernesto Estrada Cárdenas
Presidente

Ing. Jaime Leonardo BENDEZÚ PRADO
Miembro

Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANI
Miembro - Asesor

Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNANDEZ
Secretario docente de la FIMG

FACULTAD DE INGENIERÍA
DE MINAS Y CIVIL
Av. Independencia S/N
Ciudad Universitaria
Central Tel. 066 312510
Anexo 151



UNSCH

FACULTAD DE
INGENIERÍA
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL



"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana "

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CONSTANCIA N° 018-2025-FIMGC/ASIH

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajos de tesis de pregrado con el software Turnitin, de la Escuelas Profesional de **Ingeniería Civil** de la **Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil**; en cumplimiento a la **Resolución de Consejo Universitario N° 039-2021-UNSCH-CU**, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga y **Resolución Decanal N° 697-2024-FIMGC-UNSCH-D**, dejo constancia de originalidad de trabajo de investigación, que el/la Sr./Srta.

Apellidos y Nombres : JOSEPH MACHELLO GAMBOA GARCIA
Escuela Profesional : INGENIERÍA CIVIL
Título de la Tesis : EVALUACIÓN DE LA FUNCIONALIDAD DEL SUMIDERO TIPO CAJÓN DEL DRENAJE PLUVIAL URBANO, USANDO MODELOS DE FLUJOS TRIDIMENSIONALES, AYACUCHO 2024
Evaluación de la Originalidad : 11 % Índice de Similitud
Identificador de la entrega : 2767807369

Por tanto, según los Artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es **PROCEDENTE** otorgar la **Constancia de Originalidad** para los fines que crea conveniente.

En señal de conformidad y verificación se firma la presente constancia

Ayacucho, 01 de octubre del 2025



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil

Mg. Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANI
Verificador de Originalidad de Trabajos de Tesis de Pregrado
Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Civil

EVALUACIÓN DE LA FUNCIONALIDAD DEL SUMIDERO TIPO CAJÓN DEL DRENAJE PLUVIAL URBANO, USANDO MODELOS DE FLUJOS TRIDIMENSIONALES, AYACUCHO 2024

por JOSEPH MACHELLO GAMBOA GARCIA

Fecha de entrega: 01-oct-2025 09:05a. m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2767807369

Nombre del archivo: Te_Joseph_Machello_Gamboa_Garcia.pdf (24.56M)

Total de palabras: 20960

Total de caracteres: 109148

EVALUACIÓN DE LA FUNCIONALIDAD DEL SUMIDERO TIPO CAJÓN DEL DRENAJE PLUVIAL URBANO, USANDO MODELOS DE FLUJOS TRIDIMENSIONALES, AYACUCHO 2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

11%

INDICE DE SIMILITUD

9%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

7%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga	3%
Trabajo del estudiante		
2	hdl.handle.net	2%
Fuente de Internet		
3	Submitted to Universidad Peruana Del Centro	1%
Trabajo del estudiante		
4	www.coursehero.com	1%
Fuente de Internet		
5	es.wikipedia.org	<1%
Fuente de Internet		
6	modern-physics.org	<1%
Fuente de Internet		
7	pdfcookie.com	<1%
Fuente de Internet		
8	bdigital.unal.edu.co	<1%
Fuente de Internet		
9	riunet.upv.es	<1%
Fuente de Internet		

10	archive.org Fuente de Internet	<1 %
11	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1 %
12	Submitted to Universidad Politecnica Salesiana del Ecuador Trabajo del estudiante	<1 %
13	hugepdf.com Fuente de Internet	<1 %
14	repositorio.unsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
15	www.studysmarter.es Fuente de Internet	<1 %
16	wiki2.org Fuente de Internet	<1 %
17	Submitted to Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC Trabajo del estudiante	<1 %
18	upcommons.upc.edu Fuente de Internet	<1 %
19	issuu.com Fuente de Internet	<1 %
20	www.munihuamanga.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
21	Submitted to Universidad Autónoma de Nuevo León Trabajo del estudiante	<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias

< 30 words

Excluir bibliografía

Activo