

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil


Diseño integral de un sistema de drenaje para vías de pavimento y lastre en la parroquia de Santa Ana

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil


Autores:

Edwin Andrés Chuquimarca Peralta
Wilson Eduardo Jiménez Moscoso

Director:

Esteban Remigio Sánchez Cordero
ORCID: 0000-0002-8206-386X

Tutor:

Oscar Patricio Morales Matute
ORCID: 0000-0003-2109-7828

Cuenca, Ecuador

2025-09-24

Resumen

Cuando se habla de un diseño de drenaje eficiente se hace referencia a su importancia para proteger la infraestructura vial que conecta las poblaciones, previniendo encharcamientos, deslizamientos y el deterioro de la vía. Esto garantiza una transitabilidad segura y continua, esencial para el desarrollo y la comunicación comunitaria. La presente tesis se enfoca en el diseño y evaluación del sistema de drenaje para la vía que une las comunidades de San Pedro, Bella Unión, Santa Bárbara y Sigsicocha en la parroquia Santa Ana. La metodología empleada en este documento combina la aplicación de principios fundamentales de la hidráulica e hidrología para los cálculos de diseño, pues se utiliza los parámetros y cálculos suficientes para el diseño de cunetas, alcantarillas y subdrenes. Esta información se complementa con una modelación numérica en IBER y Hec-Ras para la verificación del dimensionamiento de alcantarillas y cunetas respectivamente. Este proyecto se enfoca en revelar si las dimensiones actuales de cunetas en el tramo pavimentado son suficientes para los caudales estimados. También, se propone dimensiones adecuadas para las cunetas en la vía lastrada y se analiza la necesidad de redimensionar y añadir alcantarillas en este segmento para asegurar la capacidad hidráulica. Adicionalmente, se recomienda la implementación de subdrenes para un manejo eficiente de los caudales superficiales. Estos hallazgos resaltan la importancia de un diseño de drenaje adecuado y contribuyen a mejorar la funcionalidad del sistema de drenaje existente.

Palabras clave del autor: drenaje vial, hidráulica, IBER, alcantarillas



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

Efficient drainage design refers to its importance in protecting the road infrastructure that connects populations, preventing waterlogging, landslides and road deterioration. This guarantees safe and continuous trafficability, essential for community development and communication. This thesis focuses on the design and evaluation of the drainage system for the road that connects the communities of San Pedro, Bella Unión, Santa Bárbara and Sigsicocha in the parish of Santa Ana. The methodology used in this document combines the application of fundamental principles of hydraulics and hydrology for the design calculations, since sufficient parameters and calculations are used for the design of ditches, culverts and subdrains. This information is complemented with numerical modeling in IBER and Hec-Ras for the verification of culvert and ditch sizing, respectively. This project focuses on revealing whether the current dimensions of the ditches in the paved section are sufficient for the estimated flows. It also proposes adequate dimensions for the ditches in the ballasted road and analyzes the need to resize and add culverts in this segment to ensure hydraulic capacity. In addition, the implementation of subdrains is recommended for efficient management of surface flows. These findings highlight the importance of proper drainage design and contribute to improving the functionality of the existing drainage system.

Author Keywords: road drainage, hydraulics, IBER, culverts



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	16
1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.....	16
1.2 LIMITACIONES Y ALCANCES	16
1.3 OBJETIVOS.	17
1.3.1 Objetivo general:.....	17
1.3.2 Objetivos específicos:	17
2. MARCO TEÓRICO.....	17
2.1 DEFINICIÓN.....	17
2.2 IMPORTANCIA DEL DRENAJE VIAL.....	18
2.2.1 Cunetas	18
2.2.2 Contracunetas	19
2.2.3 Sumideros.....	19
2.2.4 Subdrenes	20
2.2.5 Alcantarillas	20
2.2.6 Puentes.....	21
2.2.7 Puente cajón.....	21
2.3 ESTUDIOS PRELIMINARES	22
2.4 HERRAMIENTA IBER	24
2.4.1 Características y aplicaciones.....	24
2.4.2 Uso en proyectos	24
2.5 SOFTWARE HEC-RAS.	25
2.5.1 Principales capacidades	25
2.5.2 Usos comunes	25
3. METODOLOGÍA.	26
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA	26
3.1.1 Datos generales de la parroquia	26
3.1.2 Datos generales de la zona de estudio.....	27
3.1.2.1 Clasificación Taxonómica del Suelo	27
3.1.2.2 Población beneficiada.....	27
3.1.2.3 Clima	28
3.2 ANÁLISIS HIDROLÓGICO.....	28
3.2.1 Caudal de aporte directo de la Cuenca.....	28

3.2.1.1	Análisis Geomorfológico	29
3.2.1.2	Análisis de la precipitación.....	36
3.2.2	Caudal de aporte de la Calzada.....	41
3.2.3	Caudal de aporte del Talud.....	41
3.2.4	Caudal para subdrenaje.....	43
3.2.4.1	Caudal por infiltración	43
3.2.4.2	Caudal de abatimiento del nivel freático	44
3.3	ANÁLISIS HIDRÁULICO	46
3.3.1	Diseño de cunetas	46
3.3.2	Diseño de subdrenes.	47
3.3.3	Diseño de alcantarillas.....	47
3.3.4	Modelación de Cunetas	49
3.3.4.1	Definición del tramo de estudio.....	49
3.3.4.2	Datos de geometría.	51
3.3.4.3	Datos de flujo constante	51
3.3.4.4	Análisis de flujo constante	52
3.3.5	Modelación de Alcantarillas	52
3.3.5.1	Geometría de Análisis.....	53
3.3.5.2	Parámetros del comportamiento hidráulico.....	55
3.3.5.3	Generación de Mallado.....	57
3.3.5.4	Ejecución del Software	58
4.	RESULTADOS.....	60
4.1	CAUDAL DE ÁREAS DE APORTE	60
4.1.1	Áreas de Aporte	62
4.1.2	Intensidad de Diseño	64
4.1.3	Coeficiente de Escorrentía (C).....	64
4.2	CAUDAL DE LA CALZADA	69
4.3	CAUDALES MÁXIMOS PROBABLES EN CUNETAS.....	69
4.4	CAUDALES MÁXIMOS PROBABLES EN ALCANTARILLAS	72
4.5	CAUDAL DE DISEÑO EN SUBDRENES.	73
4.6	DISEÑO DE SUBDRÉN.....	74
4.7	DISEÑO DE CUNETAS.....	74
4.8	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE ALCANTARILLAS.....	76
4.9	MODELACIÓN DE CUNETAS	79

4.10	MODELACIÓN DE ALCANTARILLAS.....	84
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	89
5.1	CONCLUSIONES	89
5.2	RECOMENDACIONES.....	90
6.	REFERENCIAS.....	91
7.	ANEXOS	95

Índice de figuras

FIGURA 1. CUNETETA DE HORMIGONE EN SECCIÓN V (FUENTE: INTEC)	18
FIGURA 2. CONTRACUNETETA (FUENTE: MANUAL DE DISEÑO GEOMÉTRICO DE CARRETERA)	19
FIGURA 3. SUMIDERO DE REJILLA (FUENTE: MUNICIPIO DE OLAVARRÍA)	19
FIGURA 4. SUBDRENES (FUENTE: NÓBREGA PIMENTA CONSTRUCTORA)	20
FIGURA 5. ALCANTARILLA CON CABEZAL Y ALAS (FUENTE: AGROADS).....	20
FIGURA 6. PUENTE (FUENTE: PREFECTURA DE AZUAY).....	21
FIGURA 7. PUENTE CAJÓN (FUENTE: GARCÍA & BODÁN).....	21
FIGURA 8. MAPA DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS ECUADOR (FUENTE: INAMHI) 37	
FIGURA 9. MAPA DE ZONIFICACIÓN DE INTENSIDADES DE LA DEMARCACIÓN DEL SANTIAGO (FUENTE: INAMHI)	38
FIGURA 10. TRAMOS DE ESTUDIO CON EL SEFTWARE HEC-RAS (FUENTE: PROPIA)	50
FIGURA 11. CONFIGURACIÓN DE GEOMETRÍA PARA EL ANÁLISIS DE LA CUNETETA EN HEC-RAS	51
FIGURA 12. CONFIGURACIÓN DE LOS DATOS DE FLUJO CONSTANTE EN HEC-RAS	52
FIGURA 13. CONFIGURACIÓN DEL MODELAMIENTO DEL FLUJO EN LA CUNETETA EN HEC-RAS	52
FIGURA 14. IMAGEN GEORREFERENCIADA DE LA ZONA DE ESTUDIO Y LA GEOMETRÍA DEFINIDA PARA EL ANÁLISIS.....	54
FIGURA 15. UBICACIÓN DE LOS SEGMENTOS DE INGRESO Y SALIDA DEL CAUDAL	57
FIGURA 16. MAPA DE DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO (FUENTE: PROPIA)61	
FIGURA 17. MAPA DEL MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL UTILIZADO EN EL ANÁLISIS (FUENTE: PROPIA)	62
FIGURA 18. MAPA DE ÁREAS QUE APORTAN CAUDAL HACIA LOS ELEMENTOS DE DRENAJE (FUENTE: PROPIA).....	63

A). TRAMO DE VÍA PAVIMENTADA.....	63
B). TRAMO DE VÍA DE LASTRE.....	64
FIGURA 19. MAPA DE CARACTERÍSTICAS BIOFÍSICAS DEL SUELO EN LA ZONA DE ESTUDIO. (FUENTE: PROPIA).....	65
A). MAPA DE TIPO DE SUELO DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	65
B). MAPA DE USO DE SUELO DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	66
FIGURA 20. MAPA DE PENDIENTES DE LA ZONA DE ESTUDIO. (FUENTE: PROPIA).	67
FIGURA 21. MAPA DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA (CP) PARA CADA ÁREA DE APORTE. (FUENTE: PROPIA).....	68
A). TRAMO DE VÍA PAVIMENTADA.....	68
B). TRAMO DE VÍA DE LASTRE.....	69
FIGURA 22. SECCIÓN TRANSVERSAL DE CUNETAS TRIANGULAR ASIMÉTRICA. (FUENTE: CÁRDENAS QUINTERO & MARBELLO, 2011).....	74
FIGURA 23. PERFILES DE FLUJO GENERADOS EN HEC-RAS DEL TRAMO DE ANÁLISIS DE LA CUNETAS.....	79
FIGURA 24. SECCIÓN TRANSVERSAL EN LA ABSCISA 0+937.40 DEL MODELAMIENTO DEL FLUJO EN LA CUNETAS.....	80
FIGURA 25. SECCIÓN TRANSVERSAL EN LA ABSCISA 0+915.30 DEL MODELAMIENTO DEL FLUJO EN LA CUNETAS.....	81
FIGURA 26. SECCIÓN TRANSVERSAL EN LA ABSCISA 0+860.00 DEL MODELAMIENTO DEL FLUJO EN LA CUNETAS.....	82
FIGURA 27. SECCIÓN TRANSVERSAL EN LA ABSCISA 0+820.00 DEL MODELAMIENTO DEL FLUJO EN LA CUNETAS.....	83
FIGURA 28. SECCIÓN TRANSVERSAL EN LA ABSCISA 0+743.30 DEL MODELAMIENTO DEL FLUJO EN LA CUNETAS.....	83
FIGURA 29. DETALLE DE LOS RESULTADOS DEL MODELAMIENTO GENERADOS POR HEC-RAS.....	84
FIGURA 30. GEOMETRÍA UTILIZADA EN IBER PARA LA SIMULACIÓN DE LA ALCANTARILLA 10.....	85

FIGURA 31. SUPERFICIES GENERADAS EN IBER, PARA LA SIMULACIÓN.....	86
FIGURA 32. ASIGNACIÓN DEL COEFICIENTE DE MANNING PARA LA ZONA DE ANÁLISIS	87
FIGURA 33. MALLA GENERADA EN IBER, PARA LA SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LA ALCANTARILLA 10.....	88
FIGURA 34. SIMULACIÓN DEL CALADO MÁXIMO PRODUCIDO EN LA ENTRADA DE LA ALCANTARILLA 10	89

Índice de tablas

TABLA 1. ASPECTOS IMPORTANTES DE LA PARROQUIA SANTA ANA (FUENTE: QUICHIMBO, S. F.)	26
TABLA 2. DENSIDAD DE LA POBLACIÓN FUTURA (FUENTE: BORRADOR DIAGNÓSTICO PDOT CUENCA 2019-2023-CENSO POBLACIÓN Y VIVIENDA, INEC 2010)	27
TABLA 3. DISTRIBUCIÓN DE LAS COMUNIDADES DE SANTA ANA (FUENTE: GAD SANTA ANA, PDOT 2019-2023).	28
TABLA 4. VALORES DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA (FUENTE: MANUAL DE CARRETERAS DEL MOP, 2003).	34
TABLA 5. RECLASIFICACIÓN Y RELACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE CADA CAPA.	35
TABLA 6. DISTANCIAS ENTRE EL ÁREA DE ESTUDIO Y LAS ESTACIONES.....	38
TABLA 7. PERIODOS DE RETORNO PARA EL DISEÑO DE CADA ELEMENTO	39
TABLA 8. INTENSIDADES MÁXIMAS EN 24 HORAS PARA VARIOS PERIODOS DE RETORNO (FUENTE: INAMHI).....	40
TABLA 9. INTENSIDADES MÁXIMAS PARA LA ZONA 34 (FUENTE: INAMHI)	40
TABLA 10. FACTOR DE INFILTRACIÓN (FUENTE: MANUAL DE DISEÑO DE SUBDRENES Y GEOTEXILES, PAVCO).....	44
TABLA 11. FACTOR DE RETENCIÓN DE LA CAPA GRANULAR (FUENTE: MANUAL DE DISEÑO DE SUBDRENES Y GEOTEXILES, PAVCO)	44
TABLA 12. VALORES DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (FUENTE: NORMA PARA ESTUDIOS Y DISEÑO VIAL, NEVI-12-MTOP).....	45
TABLA 13. CAUDAL TOTAL DE DISEÑO PARA CUNETAS EN LA VÍA PAVIMENTADA DEL LADO DERECHO	70
TABLA 14. CAUDAL TOTAL DE DISEÑO PARA CUNETAS EN LA VÍA PAVIMENTADA DEL LADO IZQUIERDO	71
TABLA 15. CAUDAL TOTAL DE DISEÑO PARA CUNETAS EN LA VÍA LASTRADA.	72
TABLA 16. CAUDAL TOTAL DE DISEÑO PARA ALCANTARILLAS EN LA VÍA PAVIMENTADA.	72

TABLA 17. CAUDAL TOTAL DE DISEÑO PARA ALCANTARILLAS EN LA VÍA LASTRADA.	73
TABLA 18. CAUDALES DE DISEÑO PARA SUBDRENES.	73
TABLA 19. DISEÑO Y VERIFICACIÓN DE SUBDRENES.	74
TABLA 20. DISEÑO DE CUNETAS DEL LADO DERECHO PARA LA VÍA PAVIMENTADA	75
TABLA 21. DISEÑO DE CUNETAS DEL LADO DERECHO PARA LA VÍA PAVIMENTADA.	75
TABLA 22. DISEÑO DE CUNETAS DEL LADO IZQUIERDO PARA LA VÍA PAVIMENTADA.	75
TABLA 23. DISEÑO DE CUNETAS PARA LA VÍA LASTRADA.....	76
TABLA 24. CARACTERÍSTICAS DE LAS ALCANTARILLAS EXISTENTES EN LA VÍA PAVIMENTADA.....	77
TABLA 25. CARACTERÍSTICAS DE LAS ALCANTARILLAS EXISTENTES EN LA VÍA LASTRADA.....	77
TABLA 26. TABLA 26. VALIDACIÓN Y DISEÑO DE ALCANTARILLAS PARA LA VÍA PAVIMENTADA.....	78
TABLA 27. VALIDACIÓN Y DISEÑO DE ALCANTARILLAS PARA LA VÍA LASTRADA.	78
TABLA 28. TABLA DE CÁLCULO DEL CAUDAL DE DISEÑO PARA LAS ALCANTARILLAS EXISTENTES EN LA VÍA PAVIMENTADA.....	95
TABLA 29. CALCULO COMPLETO DEL CAUDAL DE DISEÑO PARA LAS ALCANTARILLAS DE LA VÍA DE LASTRE	96
TABLA 30. CALCULO COMPLETO DEL CAUDAL DE APOORTE POR BOMBEO DE LA CALZADA, EN CADA SUBTRAMO DE LA VÍA DE PAVIMENTO	97
TABLA 31. CALCULO COMPLETO DEL CAUDAL DE APOORTE POR BOMBEO DE LA CALZADA, EN CADA SUBTRAMO DE LA VÍA DE LASTRE	99
TABLA 32. CALCULO COMPLETO DEL CAUDAL DE APOORTE DEL TALUD, EN CADA SUBTRAMO DE LA VÍA DE PAVIMENTO	99
TABLA 33. CALCULO COMPLETO DEL CAUDAL DE APOORTE DEL TALUD, EN CADA SUBTRAMO DE LA VÍA DE LASTRE.....	101

TABLA 34. CAUDAL DE DISEÑO PARA CADA TRAMO DE CUNETETA DEL LADO DERECHO DE LA VÍA DE PAVIMENTO	101
TABLA 35. CAUDAL DE DISEÑO PARA CADA TRAMO DE CUNETETA DEL LADO IZQUIERDO DE LA VÍA DE PAVIMENTO	102
TABLA 36. CAUDAL DE DISEÑO PARA CADA TRAMO DE CUNETETA DEL LADO DERECHO DE LA VÍA DE LASTRE	102
TABLA 37. CÁLCULO DE PENDIENTES LONGITUDINALES PARA CADA SUBTRAMO DE LA VÍA PAVIMENTADA	103
TABLA 38. CÁLCULO DE PENDIENTES LONGITUDINALES PARA CADA SUBTRAMO DE LA VÍA DE LASTRE.....	103
TABLA 39. CÁLCULOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE ALCANTARILLAS DE LA VÍA PAVIMENTADA.....	104
TABLA 40. CÁLCULOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE ALCANTARILLAS DE LA VÍA DE LASTRE.....	105
TABLA 41. CAUDAL TOTAL PARA LAS ALCANTARILLAS DE LA VÍA DE PAVIMENTO	105
TABLA 42. CAUDAL TOTAL PARA LAS ALCANTARILLAS DE LA VÍA DE PAVIMENTO	105
TABLA 43. DISEÑO DE ALCANTARILLAS DE LA VÍA PAVIMENTADA	107
TABLA 44. DISEÑO DE ALCANTARILLAS PARA LA VÍA DE LASTRE	109
TABLA 45. CÁLCULOS DEL DISEÑO DE SUBDRENES	109

Agradecimientos

Es importante aprovechar la oportunidad para expresar nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad de Cuenca por brindarnos la gran oportunidad de cursar nuestros estudios. Su compromiso con la excelencia académica y el apoyo constante a la investigación fueron fundamentales para la culminación de este proyecto.

Un reconocimiento especial al Ingeniero Esteban Sánchez, nuestro director de tesis, no solo por su invaluable orientación al proporcionarnos el tema de investigación "Diseño Integral de sistema de drenaje para vías de Pavimento y Lastre de la parroquia de Santa Ana", sino también por su incondicional apoyo, facilitando así el inicio, progreso y finalización de este trabajo.

Asimismo, nuestra profunda gratitud se extiende al Ingeniero Oscar Morales, nuestro tutor de tesis, cuya supervisión meticulosa y guía experta fueron cruciales en cada etapa del proceso. Su dedicación y conocimientos aseguran la calidad y coherencia de este estudio.

Agradecimientos

Agradezco infinitamente a Dios por haberme guiado y fortalecido en cada paso de este camino. Su presencia ha sido la luz que iluminó mis momentos de incertidumbre y la fuerza que impulsó mis esfuerzos.

A mis padres, mi gratitud eterna por su amor incondicional, su apoyo inquebrantable y sus sacrificios. La fe que colocada en mí fue mi mayor motor y sus palabras de aliento, el refugio en cada dificultad. Este logro también es tuyo.

A mi hermano, gracias por acompañarme en cada etapa de este recorrido. Tu presencia y aliento han sido de gran valor.

Finalmente, a mis queridos amigos de universidad, gracias por sus valiosos consejos y por su apoyo en todo momento. Su amistad en esta etapa tan importante de nuestras vidas fue un pilar importante durante este proceso.

Edwin Andres Chuquimarca Peralta

A Dios, por bendecirme la sabiduría necesaria para afrontar cualquier situación y guiarme hacia resultados positivos. Su constante cuidado ha sido fundamental en mi vida, ya que, me ha protegido de todo mal y peligro, brindándome salud, tiempo y tranquilidad para concentrarme y dedicarme plenamente en mis estudios y demás actividades.

A toda mi familia, especialmente a mis padres y hermanos, por su apoyo incondicional, sus sabios consejos, la confianza depositada y el cariño constante, que han sido fundamentales en cada etapa de mi vida. También les agradezco por inculcarme valores sólidos, una enseñanza fundamental para alcanzar este logro.

A mis amigos de la universidad: Andres, Anthony, Cesar, Danny, Edwin, Jorge, Noé, Pedro, Remigio y Xavier, por todos los momentos compartidos, por ciertos consejos que me han servido muchísimo y sobre todo por el apoyo académico en los momentos claves.

A los docentes y tutores de la universidad, por las valiosas enseñanzas y experiencias compartidas que nos han permitido formarnos de la mejor manera posible. Agradezco de manera especial al ingeniero Esteban Sánchez y al ingeniero Óscar Morales, director y tutor de tesis, por su dedicación y apoyo fundamentales para alcanzar este objetivo.

Wilson Eduardo Jiménez Moscoso

Dedicatoria

A mi amada familia, pilar fundamental de mi existencia. Su amor incondicional, su apoyo constante y su fe en mí han sido la fuerza impulsora para alcanzar esta meta.

Especialmente a mis queridos padres, Manuel y Susana, por cada sacrificio, cada palabra de aliento y por enseñarme el valor de la perseverancia. Su ejemplo y amor han forjado la persona que soy hoy.

A mi hermano, Anthony, por su compañía, su paciencia y por compartir este camino conmigo. Su apoyo ha sido invaluable.

Y a la memoria de mi gran amigo, Juan Daniel. Aunque ya no esté físicamente a mi lado, su recuerdo perdura. Esta tesis es también un tributo a su amistad y a los momentos compartidos. Siempre vivirás en mi corazón.

Edwin Andres Chuquimarca Peralta

A mis padres, Manuel e Inés, por la vida, el amor, la dedicación, la educación y el ejemplo que me han brindado. Con cariño y profunda gratitud les digo: Este logro también es suyo.

A mis hermanos, Nasario, Elisabeth y Miguel, por inspirarme y demostrarme cómo superarme y vencer las adversidades de la vida. Sinceramente les admiro muchísimo.

Wilson Eduardo Jiménez Moscoso

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes y justificación

La infraestructura vial de un país consta de carreteras nacionales, regionales, y locales, las cuales varían en importancia y tamaño, dependiendo del plan nacional de transporte y el tráfico planeado o establecido (Garcés, s. f.). Este conjunto de instalaciones y servicios mantiene comunicado a una nación y por ende constituye el motor principal del desarrollo económico y social de la misma. Uno de los principales componentes de este concepto es el término de drenaje vial, cuyos objetivos principales radica en reducir la cantidad de agua que recibe una carretera y en la correcta gestión de este elemento. Todo esto, mediante procesos de recolección, transporte y evacuación del agua superficial y subterránea de cierta área en específico.

En nuestra región las vías que interconectan a las comunidades, pese a que generalmente no se encuentran en estado óptimo son de gran importancia en el desarrollo de una parroquia. Es por esto que el análisis y diseño del drenaje vial para una parroquia toma un rol fundamental a la hora de garantizar la funcionalidad, durabilidad y seguridad de las vías que entrelazan a las comunidades. Este es el caso de la vía que entrelaza las comunidades de Bella Unión, Santa Bárbara, San Pedro y Sigsicocha de la parroquia Santa Ana, Cuenca. Por ende, la función principal de este estudio se centra en la gestión eficiente del agua tanto superficial como subsuperficial, evitando que esta se acumule y cause daños a la infraestructura vial. Dentro de estos aspectos claves que involucran la importancia del drenaje para esta vía se encuentran: la preservación de la infraestructura civil, la seguridad vial con la prevención en la formación de charcos y zonas resbaladizas que pueden provocar accidentes, una maximización en la vida útil de las obras y una protección ambiental enfocada en el control de la escorrentía (Emesa, 2023).

1.2. Limitaciones y alcances

El proyecto nace de la necesidad del GAD Parroquial de Santa Ana en ejecutar obras que ayuden a mejorar y mantener la infraestructura vial de la parroquia, logrando así el desarrollo de las comunidades involucradas. Por ende, en cierta medida la factibilidad del trabajo radica en la colaboración de la población y del GAD, en cuanto a aspectos claves como información, toma de datos, accesibilidad y movilidad hacia los sitios de estudio. Con respecto al alcance del estudio, se busca que al finalizar el mismo, este documento represente el diseño completo, en todas sus aristas, de un sistema de drenaje para el tramo total de vía analizado.

La finalidad de este trabajo es servir como un documento técnico, el cual podrá ser utilizado posteriormente para un proceso de contratación y construcción de toda la infraestructura diseñada. Adicionalmente, se pretende realizar una parte del diseño en un software especializado y evaluar la concordancia de este método con los resultados obtenidos de forma tradicional.

1.3. Objetivos.

1.3.1. Objetivo general:

Desarrollar el diseño integral y funcional del sistema de drenaje para los tramos de vías que comunican a las comunidades de Bella Unión, Santa Barbara, San Pedro y Sigsicocha, de la parroquia de Santa Ana.

1.3.2. Objetivos específicos:

1. Caracterizar la zona de estudio mediante la recopilación y análisis de información, que permitan un óptimo desarrollo del diseño.
2. Realizar un análisis hidrológico de la zona de estudio, para identificar microcuencas de drenaje, características del suelo y caudales máximos esperados.
3. Desarrollar el diseño hidráulico del sistema de drenaje longitudinal (cunetas y subdrenes) y transversal (alcantarillas), según los requerimientos identificados.
4. Realizar una modelación de los elementos de drenaje, en software especializados.

2. MARCO TEÓRICO.

El sistema de drenaje vial es diseñado para la recepción, canalización y evacuación de las aguas que puedan afectar directamente a las características funcionales de cualquier elemento de la carretera (Caminos y Puentes Federales, 2024). Un drenaje adecuado no solo prolonga la vida útil de las carreteras, sino que también mejora la seguridad del tráfico al minimizar el riesgo de inundaciones y deslizamientos. Este marco teórico aborda los conceptos fundamentales, la importancia, y los aspectos técnicos necesarios para tener un conocimiento claro de lo que es un sistema de drenaje vial.

2.1. Definición

Un Sistema de drenaje vial se define como el conjunto de estructuras diseñadas para recolectar, transportar y evacuar las aguas superficiales generadas en el trazado de una carretera. Este sistema incluye elementos como cunetas, alcantarillas, sumideros y drenes subterráneos, que trabajan en conjunto para dirigir el agua hacia cauces naturales o artificiales, evitando así la acumulación en las superficies del camino (INVIAS, 2008).

2.2. Importancia del drenaje vial

La importancia del drenaje en las vías radica en varios factores:

- Prevención de daños: Un sistema de drenaje eficiente evita la erosión del material de la carretera y previene daños estructurales que pueden resultar costosos en reparaciones (Rojas, 2007).
- Seguridad vial: La acumulación de agua en las vías puede causar accidentes. Un buen drenaje asegura que las superficies permanezcan secas y seguras para los vehículos (Monroy, 2010).
- Conservación del medio ambiente: Un drenaje adecuado minimiza el impacto ambiental al controlar el escurrimiento y reduce la contaminación del agua (Pulecio, 2015).

2.3. Elementos del drenaje vial

2.3.1. Cunetas

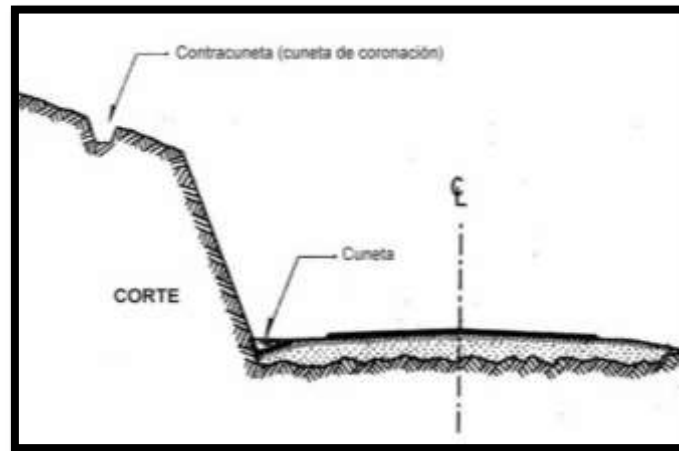
Figura 1. *Cuneta de hormigone en sección V (Fuente: Intec)*



Las cunetas son zanjas longitudinales ubicadas en ambos lados de la carretera, o en su defecto, a un solo lado, revestidas o no revestidas, con el objetivo de captar, conducir, y evacuar en forma adecuada los flujos de agua superficial. Estas presentan diferentes secciones transversales pero la cuneta triangular es la más usada, por su facilidad de construcción (ARGOS, 2020).

2.3.2. Contracunetas

Figura 2. *Contracuneta (Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Carretera)*



Son canales excavados en el terreno natural, que se localizan aguas arriba cerca de la corona de los taludes de los cortes, con la finalidad de interceptar el agua superficial que escurre ladera abajo desde mayores alturas, para evitar la erosión del talud y el incremento del caudal y su material de arrastre en la cuneta. (Ministerio de Obras Públicas (MOP), 2003)

2.3.3. Sumideros

Figura 3. *Sumidero de rejilla (Fuente: Municipio de Olavarría)*



Son estructuras encargadas de recolectar la escorrentía producida en la superficie de las áreas de drenaje y conducida al sistema de tuberías de alcantarillados dentro de unas condiciones seguras para vehículos, edificios y peatones (Servicios Públicos Yalí, 2023).

2.3.4. Subdrenes

Figura 4. *Subdrenes (Fuente: Nóbrega Pimenta Constructora)*



Son elementos que forman una red colectora por medio de tubos perforados o ranurados, alojados dentro de una zanja, para recolectar el agua subterránea con objeto de controlarla y retirarla, minimizando su efecto negativo en las capas estructurales del pavimento. (Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT), 2023)

2.3.5. Alcantarillas

Figura 5. *Alcantarilla con cabezal y alas (Fuente: Agroads)*



Estructuras subterráneas que permiten el paso del agua bajo la carretera. Son esenciales para mantener el flujo natural de ríos y arroyos (INVIAS, 2009).

2.3.6. Puentes

Figura 6. *Puente (Fuente: Prefectura de Azuay)*



Es la estructura que se construirá en una vía terrestre de comunicación, para cruzar un curso de agua (río, estero, arroyo, estuario, pantano, brazo de mar, etc.). (Ministerio de Obras Públicas (MOP), 2003)

2.3.7. Puente cajón

Figura 7. *Puente cajón (Fuente: García & Bodán)*



Un puente cajón se refiere a un tipo de estructura de puente que utiliza una sección transversal en forma de caja, generalmente hecha de hormigón o acero. Esta forma de caja

proporciona rigidez y resistencia a las cargas, especialmente a los momentos de flexión transversal y al esfuerzo cortante. (Recupero et al., 2017)

2.4. Estudios Preliminares

- **Topografía:** Un estudio topográfico es un análisis detallado de la superficie terrestre que implica la medición precisa de una parcela para determinar su superficie real, delimitar su ubicación exacta y señalar la posición de elementos naturales y artificiales. Este estudio produce un levantamiento topográfico, que es la representación gráfica en plano de todos los datos obtenidos, y se acompaña de un informe que resume los procedimientos y cálculos utilizados. (Tomé, 2022)
- **Estudio hidrológico:** Es un análisis que evalúa el comportamiento del agua en una zona específica, enfocándose en la distribución, movimiento y calidad del agua superficial. Este estudio es crucial para la gestión sostenible de recursos hídricos y la prevención de desastres naturales como inundaciones o sequías. Incluye la delimitación de zonas inundables, el cálculo del caudal hidrológico, y la creación de modelos hidrológicos para predecir el comportamiento del agua en diferentes condiciones. (ALLPE, s. f.)
- **Método de Henderson:** Este método está basado en las ecuaciones fundamentales de la hidráulica, para determinar la relación precipitación-escorrentía en superficies planas con pendiente transversal, considerando la intensidad de la precipitación constante y uniformemente distribuida, estableciendo una serie de ecuaciones simples para estimar el tiempo (t_e) en que se establece el caudal máximo, por unidad de ancho, y el valor del mismo al final de la superficie plana. (Ministerio de Obras Públicas (MOP), 2003)

Estas ecuaciones son:

$$V_0 = i / (3.6 * 10^6)$$

$$a = (S^{1/2} / n)$$

$$t_e = \left(L / (a * V_0^{2/3}) \right)^{3/5}$$

$$q = a * (V_0 * t)^{5/3} \quad \text{para } 0 < t < t_e$$

$$q_{max} = a * (V_0 * t_e)^{5/3} \quad \text{para } t_e < t < d$$

Donde:

d : Duración de la lluvia [s]

i : Intensidad de la precipitación [mm/h]

L : Longitud desde la parte aguas hasta la cuneta de intersección [mm]

n : Coeficiente de rugosidad [Adimensional]

q : Caudal unitario en el tiempo "t" [$m^3/s/m$]

q_{max} : Caudal unitario máximo durante el intervalo ($d - t_e$) [$m^3/s/m$]

S_0 : Pendiente media de la superficie [m/m]

t : Tiempo [s]

t_e : Tiempo de equilibrio para que se presenta el q_{max} [s]

- **Método racional:** Es uno de los métodos más utilizados para la estimación del caudal máximo asociado a determinada lluvia de diseño. Se utiliza normalmente en el diseño de obras de drenaje urbano y rural (EditorIngCivil, 2012).

La expresión utilizada por el método racional es:

$$Q = \frac{C * I * A}{0.36} \text{ [l/s]}$$

Donde:

Q : Caudal máximo [l/s]

C : Coeficiente de escorrentía [Adimensional]

I : Intensidad de la lluvia de diseño [mm/h]

A : Área de estudio [ha]

2.5. Estudios de diseño

- **Estudio hidráulico:** Es un análisis técnico que se realiza para comprender y gestionar el comportamiento del agua en un determinado sistema o área. Este tipo de estudio se centra en la evaluación del flujo de agua, los caudales, las características físicas y las condiciones de los cuerpos de agua, tales como ríos, lagos, embalses, canales o drenajes. Los estudios hidráulicos son fundamentales en la ingeniería civil para el diseño de infraestructuras como presas, puentes, sistemas de drenaje, y en la gestión de recursos hídricos y control de inundaciones. (Te Chow, 1994)

Ecuación de Manning:

Debido a la simplicidad de su forma y a los resultados satisfactorios que arroja en aplicaciones prácticas, la ecuación de Manning se ha convertido en la más utilizada

de todas las ecuaciones de flujo uniforme para cálculos de canales abiertos. (Te Chow, 1994)

$$V = \frac{R^{2/3} * S^{1/2}}{n} [m/s]$$

Siendo:

V: Velocidad del flujo [m/s]

R: Radio hidráulico [Adimensional]

S: Pendiente longitudinal del canal [m/m]

n: Coeficiente de rugosidad [Adimensional]

2.6. Herramienta IBER

IBER es un modelo matemático bidimensional utilizado para simular el flujo de agua en ríos y estuarios. Este software resuelve las ecuaciones de la hidrodinámica, la turbulencia y el transporte de sedimentos utilizando esquemas explícitos descentrados, lo que lo hace especialmente eficaz para el cálculo de flujos discontinuos, como resaltes hidráulicos y frentes de onda. Gracias a su capacidad para gestionar fenómenos complejos y no lineales, IBER es una herramienta clave en la modelización de flujos de agua en entornos fluviales y costeros. (Bladé et al., 2014)

2.6.1. Características y aplicaciones

- **Simulación de flujos superficiales:** IBER es capaz de simular flujos en terrenos complejos, incluyendo cambios en el estado de terreno de seco a mojado, lo cual es crucial para predecir inundaciones y gestionar riesgos asociados. (Buchaca, 2012)
- **Modelado 2D:** Permite realizar simulaciones en dos dimensiones, lo que facilita el análisis detallado de escenarios hidrológicos en áreas como ríos, humedales y zonas costeras. (Ramos y Marisol, 2018)
- **Análisis de sedimentación:** Se utiliza para evaluar la sedimentación en embalses y ríos, como en el caso de la Central Hidroeléctrica Ituango, donde se simuló el impacto de la sedimentación de diferentes escenarios. (León y Rodríguez, 2019)
- **Gestión ambiental:** Ayuda en la valoración económica de impactos ambientales, como la pérdida de cobertura vegetal y la modificación de la calidad del suelo debido a la sedimentación. (León y Rodríguez, 2019)

2.6.2. Uso en proyectos

- **Restauración de ecosistemas:** Se ha utilizado en proyectos de restauración de redes hídricas alteradas, como en el caso del arroyo en “El Partido”, donde se caracterizó la red hídrica para mejorar su gestión. (Rueda, Aguirre, y Sánchez, 2015)

- **Infraestructuras hídricas:** Es aplicado en el análisis hidráulico de infraestructuras, como puentes, para evaluar riesgos de inundación y garantizar su seguridad. (Lázaro et al., 2017)

2.7. Software HEC-RAS.

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) es un software desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, diseñado para modelar y analizar el flujo hidráulico en ríos naturales y canales artificiales. Su objetivo principal es simular el comportamiento del agua en cauces, permitiendo determinar niveles de agua, zonas inundables y analizar aspectos como el transporte de sedimentos y la calidad del agua («HEC-RAS», s. f.)

2.7.1. Principales capacidades

- **Simulación de flujo en régimen permanente y no permanente:** Permite calcular perfiles de superficie libre tanto en condiciones estables como variables en el tiempo, en una o dos dimensiones (Polo, 2014).
- **Transporte de sedimentos y modelado de lecho móvil:** Analiza cómo el flujo afecta el movimiento y depósito de sedimentos en el cauce («HEC-RAS», s. f.).
- **Análisis de calidad de agua:** Evalúa parámetros como temperatura y contaminantes, útiles para estudios ambientales y agrícolas (Polo, 2014).
- **Diseño hidráulico:** Incluye herramientas para el diseño de estructuras hidráulicas asociadas a los cauces, como puentes, alcantarillas y diques («HEC-RAS», s. f.).
- **Interfaz gráfica de usuario (GUI):** Facilita la creación, edición y visualización de modelos a través de una plataforma intuitiva («HEC-RAS», s. f.).

2.7.2. Usos comunes

- **Estudios de inundabilidad:** Determina zonas susceptibles a inundaciones bajo diferentes escenarios de caudal (Zainal y Abu Talib, 2024).
- **Gestión de recursos hídricos:** Apoya la planificación y operación de infraestructuras hidráulicas y la gestión de riesgos asociados al agua (Zainal y Abu Talib, 2024).
- **Evaluación de impactos ambientales:** Analiza cómo las intervenciones en el cauce afectan la dinámica fluvial y la calidad del agua (Zainal y Abu Talib, 2024).

3. METODOLOGÍA.

3.1. Caracterización de la Zona

3.1.1. Datos generales de la parroquia

La parroquia Santa Ana se ubica al sureste del cantón Cuenca a 17 km del centro de la ciudad. La principal vía de acceso desde Cuenca es por la vía interparroquial Cuenca - El Valle – Santa Ana y llega hasta Sigsig. (Quichimbo, s. f.)

Dentro de las características más representativas de la parroquia rural de Santa Ana se encuentran las siguientes:

Características	Valor	Unidades
Población (Censo 2022)	5366	Hab
Area	4495.31	Ha
N°. Comunidades	21	U
Zona de descarga hídrica	45.86	Ha

Tabla 1. Aspectos importantes de la parroquia Santa Ana (Fuente: Quichimbo, s. f.)

De acuerdo al Plan de Ordenamiento Territorial de Santa Ana 2019-2023, la parroquia presenta los siguientes aspectos claves a considerar en el diseño de la infraestructura vial:

- La parroquia de Santa Ana se ubica en la zona de los Andes, en la cordillera occidental, presenta una altura mínima de 2500 m.s.n.m y una máxima hasta los 3500 m.s.n.m., lo que lo lleva a contar con dos pisos bioclimáticos Montano y Montano Alto. Estos pisos climáticos favorecen a las actividades agrícolas, pero por la presencia de fuertes pendientes, la parroquia no tiene suelos aptos para realizar actividades productivas intensivas.
- El Relleno Sanitario de Pichacay dispone de una estación meteorológica para registrar permanentemente las condiciones climáticas del sector y una red de piezómetros e inclinómetros para monitorear la estabilidad de las terrazas conformadas con los desechos sólidos dispuestos.
- La red vial y áreas pobladas representan el 2,32%, de la extensión total de la parroquia, es decir 104,49 hectáreas.
- Santa Ana posee una tasa de crecimiento poblacional promedio anual de 2,34%, superior a la tasa de crecimiento nacional, que está alrededor del 1,54%.
- La densidad poblacional proyectada hasta el año 2030 se describe en la Tabla 2.

PARROQUIA	SUPERFICIE (KM2)	DENSIDAD AÑO 2010	DENSIDAD AÑO 2015	DENSIDAD AÑO 2020	DENSIDAD AÑO 2025	DENSIDAD AÑO 2030
Santa Ana	44.47	120.67	138.59	152.04	170.7	191.68

Tabla 2. Densidad de la población futura (Fuente: Borrador diagnóstico PDOT Cuenca 2019-2023- Censo población y vivienda, INEC 2010)

Los datos numerados describen un comportamiento característico de toda la parroquia y a su vez sirven como parámetros de apoyo necesarios para el diseño.

3.1.2. Datos generales de la zona de estudio

El proyecto se enfoca en el desarrollo del sistema de drenaje para un tramo aproximado de vía de 4.7 Km que comunica a las comunidades de Bella Unión, Santa Bárbara, San Pedro y Sigsicocha. Por ende, desde un punto más específico las cuatro comunidades involucradas conforman la zona de estudio para el diseño, por lo que es vital realizar una caracterización general del espacio comprometido.

3.1.2.1. Clasificación Taxonómica del Suelo

Los suelos Andisols son de origen volcánico de colores oscuros y muy porosos. Se desarrollan a partir de cenizas y otros materiales volcánicos ricos en elementos vítreos. Tienen altos valores en contenido de materia orgánica, que pueden ser alrededor de un 20%, además tienen una gran capacidad de retención de agua y (si el pH es alto) mucha capacidad de intercambio catiónico. Se localiza principalmente en la parte alta de la parroquia en las comunidades de Sigsicocha, San Pedro y Santa Bárbara, y cubren una superficie de 801 ha, es decir alrededor del 17,8%. (Quichimbo, s. f.)

Esto implica que la zona donde se lleva a cabo el estudio presenta suelos fértiles, ahora bien, desde el punto ambiental no es recomendable construir en este tipo de suelo porque significaría la reducción de la biodiversidad y la alteración de los ecosistemas locales. Sin embargo, si se analiza la relación efecto beneficio se puede asegurar que la ejecución del proyecto es necesaria para una mejor gestión vial. Por lo mismo, es necesario realizar consideraciones en el diseño para tratar de afectar lo menos posible las características del terreno, las cuales podrían ser la optimización del movimiento de volúmenes de tierra o el análisis de cambio de secciones de las cunetas para ciertos tramos.

3.1.2.2. Población beneficiada

El proyecto se encuentra dentro de la zona 4 según la distribución de comunidades del PDOT de Santa Ana, esto implica que la población a ser beneficiada será alrededor de unos 1233 habitantes, o lo que equivale aproximadamente al 18 % de la población total de la parroquia.

Este es uno de los aspectos decisivos a tener en cuenta para entender la importancia del diseño y la posterior ejecución de las obras civiles (Quichimbo, s. f.).

COMUNIDAD	ZONA	POBLACIÓN (2020) *	SUPERFICIE (HA)
BELLA UNIÓN	4	577	326.32
SAN PEDRO	4	163	255.24
SANTA BÁRBARA	4	325	71.39
SIGSICOCHA	4	168	912.31
TOTAL		1233	1565.26

Tabla 3. Distribución de las comunidades de Santa Ana (Fuente: GAD Santa Ana, PDOT 2019-2023).

3.1.2.3. Clima

Santa Ana está ubicada al sur de la región interandina, posee un clima Ecuatorial Mesotérmico Semi-húmedo. La época lluviosa está presente en los meses de febrero a mayo y de octubre a noviembre.(Quichimbo, s. f.)

En cuanto a la zona de estudio se asume el mismo comportamiento climatológico, habiendo que agregar información de temperatura anual promedio la cual varía entre 12° a 20°C, siendo la máxima de 30°C y una mínima de 6°C. Adicionalmente, la parroquia presenta precipitaciones anuales que van desde los 700 mm hasta 900 mm y se cuenta con una humedad relativa del 65% al 85%. (Quichimbo, s. f.)

3.2. Análisis Hidrológico

El análisis hidrológico como parte del diseño de un sistema de drenaje vial se constituye en un elemento fundamental de partida, ya que busca asegurar que la infraestructura de drenaje sea efectiva, segura y sostenible a largo plazo (Víctor M. Ponce, s. f.). Por lo mismo, en esta sección se va a describir el desarrollo sistemático del estudio hidrológico correspondiente al proyecto, el cual tiene como objetivo principal estimar el caudal que la estructura debería manejar durante su tiempo de vida útil.

3.2.1. Caudal de aporte directo de la Cuenca

El caudal de aporte directo en una cuenca hidrológica es un componente crucial para el diseño de sistemas de drenaje, este se refiere a la cantidad de agua que fluye rápidamente hacia los cursos de agua después de una lluvia, sin infiltrarse significativamente en el suelo. En el presente diseño, la determinación de este caudal se lleva a cabo mediante el método racional, por ende, es necesario estimar los parámetros necesarios para aplicar esta fórmula. En este caso, la metodología de desarrollo consta de dos partes:

- **Análisis geomorfológico:** el cual servirá para la valoración del coeficiente de escorrentía y la obtención de áreas de aporte.
- **Análisis de precipitaciones:** esta parte se enfoca en el cálculo de las intensidades que se producen en la zona de estudio.

3.2.1.1. Análisis Geomorfológico

Un estudio geomorfológico o morfométrico es el principal componente del análisis hidrológico, pues, este permite conocer las características físicas de una determinada cuenca mediante la exploración en variables de superficie, relieve y drenaje (Mata y González, 2011). Este análisis es crucial para comprender el comportamiento hidrológico de la cuenca, ya que evalúa parámetros como la forma, el tamaño y la composición de la cuenca y su influencia en la escorrentía, el caudal y otros procesos hidrológicos. Para el presente proyecto, la información necesaria para el análisis de la geomorfología de la zona, se obtiene a través de páginas webs de las entidades oficiales del estado ecuatoriano, tales como el IGM, MAGAP, SNI, etc.

Cabe destacar que, para el análisis de la información necesaria recolectada se emplea el uso del software libre y de código abierto "QGIS". Esta es una herramienta de Sistema de Información Geográfica que nos permite crear, editar, visualizar, analizar y publicar información geoespacial. Ahora bien, teniendo claro las fuentes de información y el software que se utilizará para su procesamiento, lo que continua es describir el proceso que se va a llevar a cabo para cumplir con el objetivo general de todo el estudio.

- **Delimitación de la Zona de Estudio:** Los tramos de vía sobre los que se va a diseñar el sistema de drenaje, forman parte de la infraestructura vial de la parroquia Santa Ana. Por ende, es importante indicar el trazado total de la vía y delimitar su ubicación en función de las comunidades que atraviesa. En este estudio, como parte del análisis inicial se otorga una primera ubicación de la ruta con la ayuda de los datos proporcionados por el OpenStreetMap (OSM). Esta, a su vez se debe representar conjuntamente con las comunidades a las que atraviesa e indicar su ubicación dentro de la parroquia, cantón y el país, tal como se ve en Figura 16.

Cabe destacar, que para realizar esta delimitación se utiliza archivos shapefile con información geoespacial de los límites cantonales, parroquiales y comunitarios. En este caso, la organización territorial a nivel cantonal y parroquial fue otorgada por la secretaria técnica del Comité Nacional de Límites Internos (CONALI), esta información es del año 2022 y cuenta con una precisión limitada en los archivos de dos metros en el mejor de los casos. Adicionalmente, el GAD de Santa Ana posee información del

año 2015 de los límites comunitarios de la parroquia y con una precisión limitada de dos metros en el mejor de los casos, la cual fue compartida y usada en este estudio.

- **Obtención de un Modelo de Elevación Digital (DEM):** A partir de estudios previos realizados en la parroquia mediante el programa SIGTIERRAS, se obtuvieron modelos digitales de elevación (DEM) en formato ráster, con un tamaño de píxel de 3x3m, que cubren toda la parroquia Santa Ana. Con base en esta información, se seleccionaron los ráster que abarcan las comunidades involucradas en el estudio. Posteriormente, utilizando QGIS, se procedió a unificar los datos ráster para crear un solo DEM, el cual representa la morfología de la superficie en la zona donde se encuentran las vías analizadas, ver Figura 17.
- **Obtención de Características Biofísicas del Suelo:** Un mapa de cobertura vegetal y uso de suelo, así como del tipo de suelo son una representación gráfica que muestra la distribución de la cubierta vegetal (como bosques, pastizales, cultivos, áreas urbanas, etc.) y la categorización que se le da al mismo en un área geográfica específica. Estos mapas se elaboran a partir de imágenes satelitales, datos de campo y herramientas de sistemas de información geográfica (SIG).

Para la actual zona de estudio se recurre al uso de la información existente, es decir, de la página oficial del Sistema Nacional de Información (SNI), se extrae un archivo shapefile de cobertura vegetal y uso de suelo del Ecuador Continental, del año 2013-2014 y con escala de 1:100000. Del mismo modo, también se obtiene un archivo shapefile del tipo de suelo del Ecuador Continental correspondiente al año 2019 y con escala 1:25000. Posteriormente, con el documento shapefile de límite parroquial se procede a delimitar la parroquia de Santa Ana y extrae la respectiva información del uso de la cobertura vegetal y del tipo de suelo para toda la parroquia, como se puede evidenciar en la Figura 19. Además, se inserta el tramo total de vía para poder observar y determinar el uso de suelo y la cobertura vegetal de la zona.

- **Creación de Mapa de Pendientes:** Un mapa de pendientes es una representación gráfica que indica las distintas inclinaciones o gradientes del terreno en una zona específica. Teóricamente, este mapa indica las variaciones de elevación del terreno en relación con la distancia horizontal entre dos puntos, permitiendo visualizar zonas planas, inclinadas o escarpadas.

Para la obtención del mapa de pendientes se utiliza un Sistema de Información Geográfica (QGIS) y un Modelo de Elevación Digital (DEM), para este caso, el DEM utilizado corresponde a un archivo de formato TIFF con tamaño de píxel de 3x3, como se mencionó anteriormente. Es importante mencionar que para mejorar la precisión

del mapa de pendientes se debe corregir los Pits (Depresiones Cerradas), ya que estos pueden interrumpir el flujo de agua simulado. En QGIS, hay herramientas específicas para realizar análisis de superficie y calcular la pendiente a partir de un DEM y básicamente la metodología es la siguiente:

- Dentro de las herramientas de análisis ráster o de superficie, se debe buscar y seleccionar el comando llamado Slope (Pendiente en español) ya que este es el que se va a utilizar.
 - Se inserta el ráster de elevación corregido y se definen las unidades de salida, el programa permite elegir que la pendiente sea expresada en grados o en porcentaje. En este caso se selecciona que los resultados sean expresados en grados para tener una mejor compatibilidad con los términos utilizados en el manual de MOP 2003 (**Tabla 3**).
 - Especificar el nombre de la capa de salida e indicar dónde se quiere guardar el mapa de pendientes resultante. Posteriormente, se ejecuta la herramienta que generará una nueva capa ráster donde el valor de cada píxel representará la pendiente en ese punto.
 - Un aspecto clave de esta metodología es la distribución de los resultados de estudio, esto implica agrupar los valores de pendiente en categorías significativas para su uso en el análisis espacial. En este caso, la clasificación se realiza mediante la herramienta “Calculadora Raster” en base a las distintas categorías de pendientes que usa el manual del MOP 2003 para la determinación del coeficiente de escorrentía (**Tabla 3**).
 - Una vez generado el mapa de pendientes, es importante aplicar la simbología adecuada. Generalmente, se utiliza diferentes colores para representar los rangos de pendiente, por ejemplo, dentro del mapa de pendientes resultante el color verde es para pendientes suaves, amarillo para moderadas y rojo para pronunciadas (Figura 20).
- **Delimitación de Áreas de Aporte.**
Creación de Microcuencas: La generación de microcuencas es fundamental en un análisis hidrológico porque permite desarrollar estrategias de manejo sostenible de los recursos hídricos, mejorando la toma de decisiones para proyectos de abastecimiento de agua, control de inundaciones y protección de ecosistemas. Adicionalmente, es vital para comprender con mayor detalle el ciclo del agua y los procesos hidrológicos en áreas específicas.

De manera similar, la generación de microcuencas dentro de un análisis hidrológico se realiza principalmente utilizando un Sistema de Información Geográfica (QGIS) y un Modelo Digital de Elevación (DEM). A continuación, se describen los pasos generales a seguir en este estudio:

- **Preprocesamiento del DEM:** Como se mencionó anteriormente, es vital corregir los errores de depresiones cerradas que no representan la realidad, con el fin de asegurar un flujo de agua continuo en el modelo.
 - **Realizar el Análisis de Flujo:** Se utiliza las herramientas de análisis hidrológico en el software QGIS, con el que se obtiene la Dirección de Flujo (Flow Direction) y Acumulación de Flujo (Flow Accumulation). El algoritmo dirección de flujo, determina para cada celda del DEM, hacia qué celda vecina fluiría el agua en función de la diferencia de elevación. Mientras que, el parámetro de acumulación de flujo calcula el número de celdas "aguas arriba" que drenan hacia cada celda. Las celdas con alta acumulación de flujo representan los cauces de los ríos y quebradas.
 - **Delimitar las Microcuencas:** La metodología que se aplica consiste en utilizar un umbral de acumulación de flujo, es decir, se establece una entrada principal en la capa de acumulación de flujo para definir los cauces principales que desembocan en los tramos de vía analizados. Posteriormente, el software delimita automáticamente las áreas que drenan hacia los segmentos específicos de estos cauces (alcantarillas), creando las microcuencas. Cabe destacar que un umbral más corto generará un gran número de microcuencas pequeñas, mientras que un umbral más largo resultará en pocas microcuencas, pero de mayor tamaño.
 - **Vectorizar las Microcuencas:** Una vez delimitadas las áreas de las microcuencas en formato ráster, es útil transformarla a formato vectorial en forma de polígonos. Esto facilita el cálculo de propiedades geométricas (área y perímetro), la visualización y la superposición con otras capas de información como tipo de suelos, cobertura vegetal, etc. (Figura 18)
- **Delimitación de Taludes de Aporte:** La delimitación de áreas de aporte de los taludes hacia la vía en estudio representa un pilar fundamental en la metodología de este trabajo de titulación. Este proceso permite identificar geográficamente las superficies que contribuyen directamente a la escorrentía superficial sobre la

infraestructura vial, siendo crucial en el cálculo del caudal de diseño. Sin esta delimitación detallada, cualquier estimación de caudal sería generalista. De forma similar, la delimitación de las áreas de taludes de aporte, fundamental en este análisis hidrológico, se realizó empleando un Sistema de Información Geográfica (QGIS) y el Modelo de Elevación Digital (DEM). Los pasos generales de este proceso se describen a continuación.

Para la creación de estos polígonos de taludes de aporte, se identificaron los espacios ubicados entre las microcuencas previamente delimitadas a lo largo de la vía. En QGIS, se generó un polígono rectangular para cada uno de estos tramos, donde la longitud de cada polígono se correspondió con la del tramo vial analizado, mientras que el ancho fue establecido en aproximadamente 15 metros. Este valor no fue arbitrario, sino que se determinó y justificó a partir de un análisis detallado de la topografía levantada en campo y de las observaciones directas realizadas durante las visitas al sitio de estudio. Por ende, se busca asegurar una representación de las áreas de aporte coherente con las condiciones físicas del terreno, ver Figura 18.

- **Determinación del Coeficiente de Escorrentía (C):** Este aspecto es crucial en hidrología porque permite cuantificar la relación entre el agua que escurre superficialmente y la recepción total recibida para un área definida. Dentro de la modelación hidrológica su importancia es clave para calcular caudales máximos en eventos extremos mediante métodos como la ecuación racional, utilizada en ingeniería civil para dimensionar obras de drenaje vial.

El cálculo del coeficiente de escorrentía (C) en QGIS se adapta a la complejidad requerida y a los datos disponibles. En este caso, el procedimiento se enfoca en el método empírico, que utiliza información sobre la cobertura vegetal y el tipo de suelo de la zona de estudio. Los pasos generales para llevar a cabo este proceso son los siguientes:

- **Obtención de información, cobertura del suelo y tipo de suelo:** Para el análisis se requiere utilizar de las capas vectoriales que clasifiquen el uso de la tierra, cobertura vegetal y los tipos de suelo del área de estudio, obtenidas previamente, ver Figura 19. En este caso, la información a utilizar un archivo shapefile del tipo de suelo del Ecuador Continental correspondiente al año 2019, con escala 1:25000; y un archivo shapefile de cobertura vegetal y uso

de suelo del Ecuador Continental, del año 2013-2014 y con escala de 1:100000.

A partir de estos mapas, se procede a extraer la información relevante para nuestra zona de estudio. Utilizando la capa de límite parroquial de Santa Ana y la herramienta "Cortar" de QGIS, se extrae la información específica del tipo de suelo y cobertura vegetal correspondiente a la parroquia.

- **Asignación de valores de C:** Es útil crear una tabla que asocie cada clase de cobertura, el tipo y la pendiente del suelo con un valor de coeficiente de escorrentía correspondiente. Se puede encontrar estos valores en manuales de hidrología, guías de diseño de drenaje urbano o estudios específicos de tu región. En este caso, los datos se obtuvieron del manual de carreteras del MOP del 2003 (**Tabla 3**).

Para asegurar la compatibilidad con los valores designados por el manual de carreteras del MOP 2003, es necesario verificar si los atributos de los archivos de tipo de suelo y de cobertura vegetal coinciden con los especificados en el manual. En el caso de no ser iguales, se procede a relacionar y reclasificar estas características, este proceso de correlación de valores se detalla en la Tabla 4.

COEFICIENTE DE ESCORRENTIA C						
COBERTURA VEGETAL	TIPO DE SUELO	PENDIENTE DEL TERRENO				
		PRONUNCIADA <50%	ALTA 20%-50%	MEDIA 5%-20%	SUAVE 1%-5%	DESPRECIABLE >1%
SIN VEGETACION	IMPERMEABLE	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60
	SEMIPERMEABLE	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	PERMEABLE	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
CULTIVOS	IMPERMEABLE	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	SEMIPERMEABLE	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	PERMEABLE	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
PASTOS VEGETACION LIGERA	IMPERMEABLE	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45
	SEMIPERMEABLE	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	PERMEABLE	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15
HIERBA, GRAMA	IMPERMEABLE	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	SEMIPERMEABLE	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
	PERMEABLE	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10
BOSQUES DENSA VEGETACION	IMPERMEABLE	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	SEMIPERMEABLE	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25
	PERMEABLE	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05

Tabla 4. Valores del Coeficiente de Escorrentía (Fuente: Manual de Carreteras del MOP, 2003).

COBERTURA VEGETAL		
ATRIBUTOS DE LA CAPA	MOP (TABLA 3)	VALOR
	SIN VEGETACION	100
Cultivos de Ciclo Corto/Maíz	CULTIVOS	200
Maíz-Pastos Plantados/Pastos Plantados	PASTOS VEGETACION LIGERA	300
Vegetación Arbustiva-Cultivos de Ciclo Corto	HIERBA, GRAMA	400
Bosque natural intervenido/Vegetación Arbustiva	BOSQUES-DENSA VEGETACION	500

TIPO DE SUELO		
ATRIBUTOS DE LA CAPA	MOP (TABLA 3)	VALOR
Mal Drenado	Impermeable	10
Drenaje Natural Bueno/Moderado	Semipermeable	20
Drenaje Natural Excesivo	Permeable	30

PENDIENTE	
MOP (TABLA 3)	VALOR
>= 1%	1
5-1 %	2
20-5%	3
50-20%	4
<50%	5

Tabla 5. Reclasificación y relación de las características de cada capa.

- **Rasterizar las capas en función de C:** Para integrar las variables de cobertura y tipo de suelo en el análisis espacial, se emplea un proceso de preparación de datos vectoriales. Inicialmente, se añade un nuevo campo a la tabla de atributos de cada capa vectorial correspondiente. Posteriormente, se asigna a este nuevo campo el valor de reclasificación pertinente para cada entidad, siguiendo los criterios establecidos en la Tabla 4. Tras la designación de valores, ambas capas vectoriales fueron convertidas a formato ráster para su procesamiento y análisis geoespacial subsiguiente.

Una vez preparadas las capas ráster de cobertura vegetal, tipo de suelo y el mapa de pendientes de la zona de estudio, se procede a su integración espacial. Para ello, se utiliza la herramienta "Calculadora Ráster" con el fin de sumar estas capas. El resultado de esta operación es una nueva capa ráster que representa la combinación ponderada de las variables originales, facilitando así el análisis a multicriterio del coeficiente de escorrentía.

- **Crear el mapa de coeficiente de escorrentía:** La capa ráster generada a partir de la sumatoria de las variables previas representa la distribución espacial de los valores combinados. Para facilitar su análisis y visualización, esta capa ráster fue vectorizada, dando como resultado un polígono que describe la forma del área de aporte (microcuenca o talud). La tabla de

atributos de este polígono contiene la distribución de los valores totales dentro del área de estudio.

Posteriormente, se añade un nuevo campo a la tabla de atributos de este polígono, donde se asigna un coeficiente de escorrentía (C) a cada valor resultante, basándose en los criterios establecidos en la Tabla 5. Este proceso de asignación culmina con la obtención de un mapa específico del coeficiente de escorrentía para el área de aporte analizada (Figura 21), lo que permite comprender mejor el comportamiento hidrológico del área.

Finalmente, se calcula el Coeficiente de Escorrentía Ponderado (C_p) de cada área de aporte. Este valor se obtiene de la suma de los productos del coeficiente de escorrentía (C) por su respectiva unidad de área, dividido para el área total de la superficie de aporte. La fórmula es la siguiente:

$$C_p = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i * A_i)}{A_{total}}$$

Donde:

C_p = Coeficiente de escorrentía ponderado de la microcuenca.

n = Número total de unidades de cobertura/suelo diferentes dentro de la microcuenca.

C_i = Coeficiente de escorrentía base de la unidad de cobertura/suelo i.

A_i = Área de la unidad de cobertura/suelo i.

A_{total} = Área total de la microcuenca.

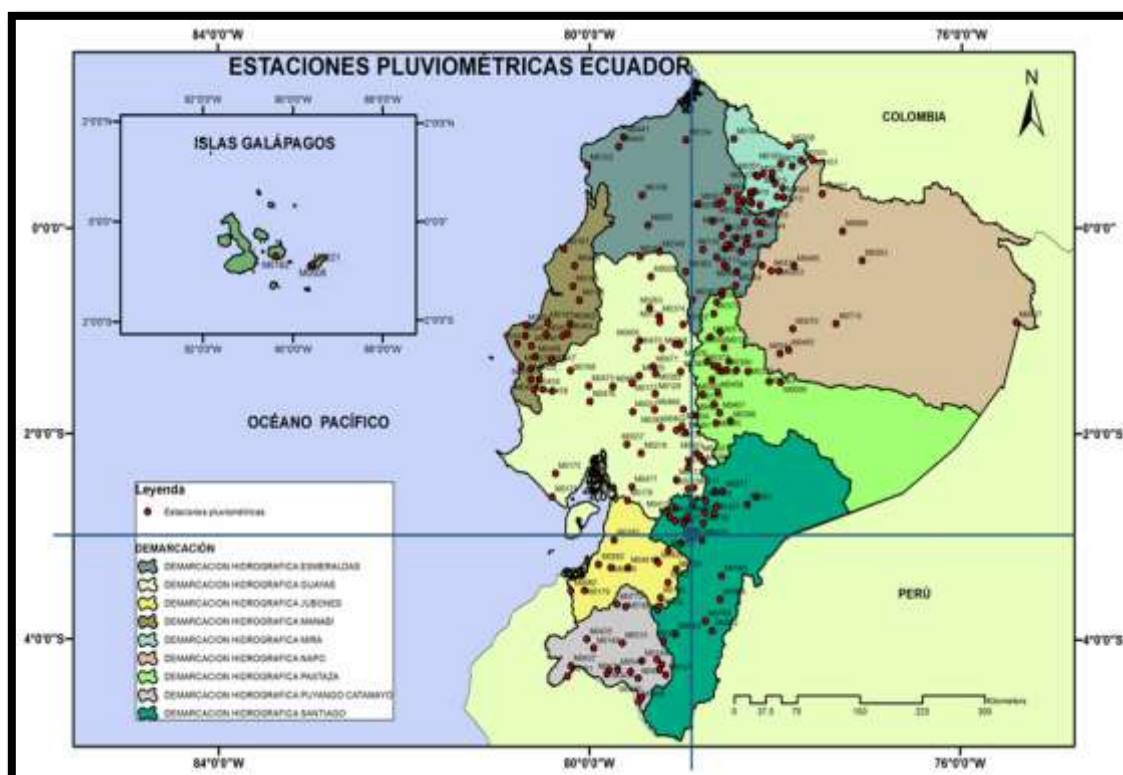
Los resultados de este proceso se muestran en los anexos.

3.2.1.2. Análisis de la precipitación

El análisis de precipitación es el estudio cuantitativo y cualitativo de la distribución, intensidad, frecuencia y variabilidad temporal-espacial de la lluvia en una región determinada. Incluye técnicas de medición, procesamiento estadístico, interpolación espacial y modelado para aplicaciones en hidrología, climatología y gestión de riesgos. (Dingman, 2015)

El área de estudio tiene una ubicación aproximada en coordenadas geográficas (latitud y longitud) de (-2°58'51", -78°54'3"), ahora, utilizando el "Mapa de estaciones pluviométricas Ecuador" se puede identificar, a qué área de demarcación hidrográfica pertenece el área de estudio, como se indica a continuación:

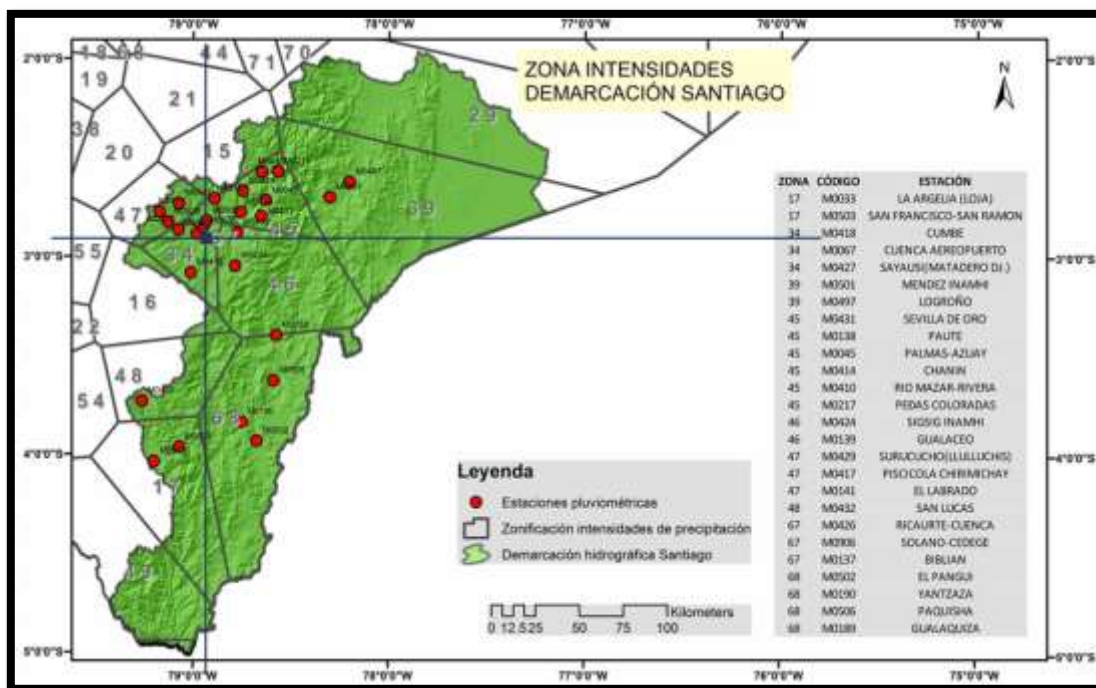
Figura 8. Mapa de estaciones pluviométricas Ecuador (Fuente: INAMHI)



Como se observa en la Figura 8, el área de estudio se ubica en la demarcación hidrográfica Santiago (INAMHI, 2015). La cual, se encuentra al sur del Ecuador, está conformada por cinco cuencas, que corresponde a cuatro centros zonales distribuidos en las provincias del Azuay, Loja, Morona Santiago y Zamora Chinchipe. Tiene un área de 34 479 km², aproximadamente 340 km de largo, norte a sur, y 240 km de ancho. (Changjiang Institute Of Survey, Planning, Design And Research (CISPDR), 2016)

Una vez identificada la demarcación hidrográfica correspondiente al área de estudio, el siguiente paso es determinar la zonificación de intensidades de precipitación a la que pertenece dicha área. Para esto, se utiliza el “Mapa de zonificación de intensidades de la demarcación de Santiago”, como se indica a continuación:

Figura 9. Mapa de zonificación de intensidades de la demarcación de Santiago (Fuente: INAMHI)



Como se ilustra en la Figura 9, el área de estudio se localiza aproximadamente entre las zonas 67 y 34, las cuales tienen 2 estaciones pluviométricas (una cada zona) que se encuentran muy próximas a la ubicación del área de estudio. Por tal razón, se procede a realizar el cálculo de distancias entre las estaciones pluviométricas y el área de estudio para identificar la estación más cercana, como se indica a continuación:

Distancias entre el área de estudio y las estaciones				
E. Pluviométrica	Zona	Este	Norte	Distancia (m)
Área de estudio	-	733315	9670313	-
Ricaurte – Cuenca	67	728036	9684691	15316.49
Cuenca Aeropuerto	34	724168	9680735	13866.71

Tabla 6. Distancias entre el área de estudio y las estaciones

La tabla 6 nos indica que la estación pluviométrica “Cuenca Aeropuerto” con código: M0067 es la más cercana al área de estudio, por lo que, esta estación es la que se toma en cuenta para el cálculo de las intensidades.

Periodo de retorno: Se define como periodo de retorno T de eventos hidrológicos máximos en obras de drenaje vial, el tiempo promedio, expresado en años, en que el valor del caudal pico de una creciente determinada es igualado o superado una vez. (INVIAS, 2009)

El periodo de retorno de la creciente de diseño de una obra de drenaje vial está ligado a la probabilidad de excedencia del caudal máximo instantáneo, al riesgo permisible de que el

caudal de diseño sea superado durante la vida útil de la obra (INVIAS, 2009), mediante la siguiente expresión:

$$T = \frac{1}{1 - (1 - k)^{1/n}}$$

Donde:

T: Periodo de retorno [años]

K: Riesgo permisible [adimensional]

n: Vida útil [años]

Los factores a considerar para el cálculo del periodo de retorno son: en el caso de las cunetas, una vida útil de 10 años con un riesgo de falla del 65%, mientras que, para las alcantarillas, una vida útil de 40 años con el mismo nivel de riesgo (NEVI-12-MTOP 2013). Estos valores permiten seleccionar un período de retorno adecuado.

Elemento	Vida útil (años)	Riesgo de falla (%)	Periodo de retorno (años)
Cunetas	10	65	10.03
Alcantarillas	40	65	38.60

Tabla 7. Periodos de retorno para el diseño de cada elemento

Como se observa en la tabla 7, se presentan los periodos de retorno apropiados para el diseño de cada elemento. Sin embargo, los periodos que se consideran al momento del diseño son de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. En este contexto, se adopta un periodo de retorno de 10 años tanto para las cunetas como para los subdrenes, mientras que para las alcantarillas se establece un periodo de retorno de 50 años. Estos valores serán utilizados posteriormente en el diseño de dichos elementos.

Tiempo de concentración: Se define como el tiempo necesario, desde el inicio de la precipitación, para que toda la cuenca contribuya al sitio de la obra de drenaje en consideración, o, en otras palabras, el tiempo que toma el agua desde los límites más extremos de la cuenca hasta llegar a la salida de la misma (INVIAS, 2009).

Debido a la limitación de información existente se recomienda tomar el tiempo de duración de la lluvia igual al tiempo de concentración, considerando que en ese lapso se produce la mayor aportación de la cuenca al cauce (Ministerio de Obras Públicas (MOP), 2003). En caso de que el cálculo del tiempo de concentración resulte menor a 5 minutos, se adopta un valor mínimo de 5 minutos como tiempo de concentración. Para el cálculo del tiempo de

concentración existen varias expresiones empíricas, siendo la más utilizada la fórmula de Rowe (Ministerio de Obras Públicas (MOP), 2003).

$$t_c = 0.0195 * (L^3 / H)^{0.385}$$

Donde:

t_c : Tiempo de concentración [minutos]

L : Longitud de l cauce principal [metros]

H : Desnivel entre el extremo de la cuenca y el punto de descarga [metros]

Intensidades máximas en 24 horas: La intensidad máxima en 24 horas para un periodo de retorno es el valor más alto de precipitación (expresado generalmente en milímetros por 24 horas). En este caso se tiene 2 periodos de retorno, de 10 años para cunetas y subdrenes, y 50 años para alcantarillas.

Código	Estación	UTM X	UTM Y	Elevación (msnm)	Serie datos	Nº de años	TR10	TR50
M0067	Cuenca Aeropuerto	724168	9680735	2800	1965-1997	22	2.06	2.55

Tabla 8. Intensidades máximas en 24 horas para varios periodos de retorno (Fuente: INAMHI)

Intensidades para la zona de estudio: Para el cálculo de intensidades se utiliza una ecuación corregida, la cual es representativa para toda la zona de estudio, esta considera la intensidad máxima en 24 horas correspondiente a un periodo de retorno y el tiempo de concentración, como se indica a continuación:

Zona	Código	Nombre de la estación	Duración	Ecuación
34	M0067	Cuenca Aeropuerto	5 min < 50.9 min	$I_{TR} = 123.39 * Id_{TR} * t^{-0.452}, R^2 = 0.9882$
			50.9 min < 1440 min	$I_{TR} = 695.37 * Id_{TR} * t^{-0.892}, R^2 = 0.9969$

Tabla 9. Intensidades máximas para la zona 34 (Fuente: INAMHI)

Donde:

I_{TR} : Intensidad máxima en 24 horas correspondiente a un tiempo de retorno [mm/24h]

t : Tiempo de concentración [minutos]

Finalmente, para determinar el caudal de aporte directo a cada alcantarilla existente, se incorporan todos los componentes necesarios a la ecuación del método racional. Este cálculo

permite estimar el caudal proveniente de las microcuencas generadas, proporcionando información crucial para el diseño y evaluación de la infraestructura de drenaje, véase la Tabla 13.

3.2.2. Caudal de aporte de la Calzada

Para calcular el caudal de aporte de la calzada, como se menciona en el marco teórico se utiliza el método de Henderson, este considera que, la duración de la lluvia debe ser por lo menos al tiempo pico del escurrimiento y se descarta la posibilidad de encharcamiento de la calzada (Ministerio de Obras Públicas (MOP), 2003).

Para este método se consideran dos caudales: el caudal unitario (n) en el tiempo t , expresado en $m^3/s/m$, y el caudal máximo durante el intervalo ($d - t_e$), también en $m^3/s/m$. Dentro de los parámetros considerados en el marco teórico, se establecen como constantes el tiempo de concentración (T_c), fijado en 5 minutos, y el ancho de la superficie de la calzada que contribuye al escurrimiento hacia la cuneta (L). Para la vía pavimentada, este ancho se define en 2.9 metros por cada lado, mientras que, para la vía lastrada el valor fue de 4.9 metros. Esta diferencia en el ancho para el camino de tierra se debe a la presencia de un único peralte que dirige el escurrimiento hacia el lado derecho de la vía. El coeficiente de rugosidad (Manning) es diferente para cada tipo de vía: para pavimento asfáltico se usa $\eta = 0.015$, y para superficie de tierra, $\eta = 0.02$ (Ministerio de Obras Públicas (MOP), 2003, tbl. IX.6). Los demás parámetros conjuntamente con los resultados de los respectivos cálculos al aplicar este método se presentan en los anexos.

3.2.3. Caudal de aporte del Talud

La consideración del caudal de aporte del talud en el diseño de un sistema de drenaje vial es fundamental porque garantiza la estabilidad y durabilidad de la infraestructura, previniendo problemas como la erosión, la saturación del suelo y posibles fallos estructurales. Cuando el agua de lluvia escurre por los taludes hacia la vía, puede aumentar significativamente el volumen y la velocidad del flujo que debe manejar el sistema de drenaje, por lo que ignorar este aporte puede causar desbordamientos, obstrucciones y daños tanto en la carretera como en las obras de drenaje (Víctor M. Ponce, s. f.).

Además, un cálculo adecuado del caudal permite dimensionar correctamente cunetas, alcantarillas y colectores, optimizando costos y facilitando el mantenimiento, ya que se evitan tanto el sobredimensionamiento innecesario como los frecuentes taponamientos por sedimentos. Por otra parte, cumplir con las técnicas normativas exige analizar todas las fuentes de escorrentía, incluyendo los taludes, para garantizar la seguridad vial y la eficiencia

hidráulica del sistema, especialmente en eventos de lluvias intensas. (WT Diseño Sustentable S.C., México et al. 2019)

El caudal de aporte directo proveniente del talud también se calcula utilizando el método racional. Para ello, los componentes necesarios se determinan de manera similar.

Se procede a delimitar el área del talud que contribuye con caudal a la cuneta durante eventos de precipitación. Este proceso se realiza mediante un análisis morfológico detallado, empleando herramientas como QGIS. Adicionalmente, esta información se complementa con observaciones visuales realizadas en las distintas visitas de campo, lo que permite identificar las zonas del talud que aportan agua directamente hacia las cunetas y las zonas que desembocan su caudal en las microcuencas adyacentes, ver Figura 18.

Para estimar la intensidad de precipitación que afecta cada talud, se sigue un procedimiento similar al empleado para las microcuencas. En breves rasgos el proceso se detalla a continuación:

- **Medición de la longitud de aporte:** Utilizando QGIS, se mide la longitud del área de aporte de cada talud, desde un punto donde iría ubicado la cuneta hasta el punto más lejano dentro del área de contribución.
- **Determinación del desnivel:** Se obtienen los valores de elevación de ambos puntos (cuneta y punto más lejano) para estimar el desnivel que tiene el talud.
- **Cálculo del tiempo de concentración (Tc):** Con los datos de longitud y desnivel, se procede a calcular el tiempo de concentración para cada talud, mediante la fórmula de Rowe.
- **Determinación de la intensidad:** Finalmente, se usa los tiempos de concentración calculados, para determinar las intensidades de precipitación correspondientes a cada talud. Al igual que con las microcuencas, la intensidad se estima con la formulación y condiciones de la Tabla 8 y 9 de este documento.

Para calcular el coeficiente de escorrentía (C) en QGIS, se emplea la misma metodología empírica utilizada en el análisis de microcuencas, la cual integra elementos como la cobertura vegetal y el tipo de suelo del área de estudio. El proceso inicia con la extracción únicamente de la información relevante para la parroquia de Santa Ana. Posteriormente, se asigna valores de C a cada clase de cobertura, tipo y pendiente de suelo, en base a las especificaciones del Manual de Carreteras del MOP de 2003 (Tabla 3); se verificó la compatibilidad de los atributos de los archivos con el manual, reclasificando y correlacionando la información según la Tabla 4.

Una vez asignados los valores, las capas vectoriales fueron rasterizadas para un mejor procesamiento. Las capas ráster de cobertura vegetal, tipo de suelo y pendientes se suman utilizando la "Calculadora Ráster" de QGIS, generando una capa ráster que representa la combinación ponderada de las variables. Esta capa ráster resultante se vectoriza, creando un polígono cuya tabla de atributos contiene la distribución de los valores totales. Finalmente, se añade un nuevo campo a esta tabla para asignar el coeficiente de escorrentía (C) a cada valor resultante, basándose en la Tabla 5, lo que permitió obtener un mapa específico del coeficiente de escorrentía para el talud analizado y estimar su respectivo Coeficiente de Escorrentía Ponderado (Cp), dividiendo la suma de los productos de C por su unidad de área respectiva entre el área total de la superficie de aporte, ver Figura 21.

Los resultados de todo el proceso pueden consultarse en los anexos.

3.2.4. Caudal para subdrenaje

Se ha identificado un nivel freático elevado en un tramo de la vía pavimentada, generado por la infiltración de agua desde los laterales de la calzada. Esta condición resalta la necesidad de analizar y dimensionar adecuadamente los caudales que deben ser evacuados mediante subdrenes, con el fin de preservar la integridad y durabilidad de la estructura vial, así como evitar daños irreversibles y reducir los costos de mantenimiento asociados a la presencia de humedad excesiva en la subrasante.

El tramo objeto de estudio comprende las abscisas 1+385 a 1+450. Dentro de este intervalo se localiza una alcantarilla en la abscisa 1+414.85, motivo por el cual el diseño del subdren se divide en dos sectores: el primero entre las abscisas 1+385 y 1+414.85, y el segundo entre las abscisas 1+414.85 y 1+450, ambos ubicados en el lateral izquierdo de la vía.

A continuación, se detallan los caudales que serán evaluados y gestionados mediante los subdrenes, con el objetivo de mitigar cualquier impacto negativo sobre la vía pavimentada:

3.2.4.1. Caudal por infiltración

Este caudal corresponde al agua de lluvia que, al precipitar sobre el pavimento asfáltico, logra infiltrarse a través de fisuras o juntas, considerando que la carpeta asfáltica no es completamente impermeable. Se determina a través de la siguiente ecuación:

$$Q_{inf} = I_R * B * L * F_i * F_R$$

Donde:

I_R : Precipitación máxima horaria de frecuencia anual en la zona [mm/h]

B : Semibanca de la vía (ancho de la vía/2)[m]

L : Longitud del tramo de drenaje [m]

F_i : Factor de infiltración [Adimensional], detallado en la tabla 10

F_R : Factor de retención de la capa granular [Adimensional], detallado en la tabla 11

Tipo de carpeta	F_i
Carpetas asfálticas muy bien conservadas	0.30
Carpetas asfálticas normalmente conservadas	0.40
Carpetas asfálticas pobremente conservadas	0.50
Carpeta de concreto de cemento Portland	0.67

Tabla 10. Factor de infiltración (Fuente: Manual de diseño de subdrenes y geotextiles, Pavco)

Tipo de Base	F_r
Bases bien gradadas, en servicio 5 años o más	¼
Bases bien gradadas, en servicio menos de 5 años	1/3
Bases mal gradadas, en servicio 5 años o más	1/3
Bases mal gradadas, en servicio menos de 5 años.	½

Tabla 11. Factor de retención de la capa granular (Fuente: Manual de diseño de subdrenes y geotextiles, Pavco)

La precipitación máxima horaria, estimada para un intervalo de 60 minutos y un periodo de retorno de 10 años, es de 37.15 mm/h. Dado que se asume una carpeta asfáltica en condiciones normales de conservación y bases bien gradadas con un tiempo de servicio inferior a cinco años, se adoptaron factores de infiltración y retención de 0.40 y 0.33, respectivamente. Considerando que la vía presenta un ancho total de 5.8 metros, se definió una semibanca de 2.9 metros. Finalmente, las longitudes de los tramos para el diseño del subdren son de 29.85 m y 35.15 m, respectivamente.

3.2.4.2. Caudal de abatimiento del nivel freático

Se refiere al volumen de agua subterránea que debe ser extraído para mantener el nivel freático por debajo de la subrasante, evitando así la saturación y pérdida de capacidad portante del terreno de fundación. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q_{NF} = k * i * A$$

$$i = \frac{(N_f - N_d)}{B}$$

$$A = (N_f - N_d) * L$$

Donde:

k: Coeficiente de permeabilidad del suelo adyacente [cm/s], detallado en la tabla 12

i: Gradiente hidráulico [Adimensional]

N_d: Cota inferior del subdren [cm]

N_f: Cota superior del nivel freático [cm]

A: Área efectiva para el caso de abatimiento de nivel freático [cm²]

B: Semibanca de la vía [cm]

L: Longitud del tramo de drenaje [cm]

Tipo de suelo (USCS)	Conductividad Hidráulica (cm/h)
SP,SW	11.78
SM	1.09
ML	0.34
ML-MH,CL	0.10
SM-SC,SC	0.06
MH	0.05
CL-CH, CH	0.03

Tabla 12. Valores de conductividad hidráulica (Fuente: Norma para estudios y diseño vial, NEVI-12-MTOP)

El análisis de estos caudales permitirá definir las características técnicas del sistema de subdrenaje, garantizando su eficiencia y contribuyendo a la estabilidad y vida útil de la infraestructura vial (Darcy, 1856).

Para el coeficiente de permeabilidad se adopta un valor de 1.09 cm/h, correspondiente al tipo de suelo SM presente en el área de estudio. La cota inferior del subdren se establece en 2946.12 m, mientras que la cota superior es de 2947.62 m. El resto de factores fueron expuestos previamente en la obtención del caudal por infiltración.

Finalmente, se aplica una suma entre el caudal de infiltración (Q_{inf}) y el caudal de abatimiento del nivel freático (Q_{NF}) para calcular el caudal de diseño de subdrenes (Q_s).

3.3. Análisis Hidráulico

El análisis hidráulico permite comprender, modelar y optimizar el flujo de agua en diferentes sistemas, como en este caso para las cunetas, subdrenes y alcantarillas. Su objetivo es determinar parámetros clave como el caudal, la velocidad y el calado del flujo, con el fin de validar su cumplimiento al contrastarlos con los valores admisibles. Esto posibilita el diseño eficiente y seguro de infraestructuras hidráulicas. (Bejarano Trujillo, 2022)

3.3.1. Diseño de cunetas

Para el diseño de las cunetas se opta por una sección transversal triangular, ya que, el uso de cunetas triangulares es generalizado, posiblemente, por su facilidad de construcción y mantenimiento, mientras que, la sección rectangular ha sido generalmente abandonada por razones de ingeniería de tránsito, debido a la sensación de peligro que siente quien transita cerca de ella (Ministerio de Obras Públicas (MOP), 2003).

Otro parámetro que es importante considerar en el diseño de cunetas es la pendiente longitudinal, la cual, será similar al perfil longitudinal de la vía, con un valor mínimo del 0.50% y un valor máximo que estará limitado por la velocidad del agua, la misma que condicionará la necesidad de revestimiento (Ministerio de Obras Públicas (MOP), 2003).

El número de cunetas varía dependiendo del tipo de vía. Para la pavimentada, se diseñan cunetas a ambos lados de la carretera, mientras que, para la vía lastrada, solo en el lado del talud. Asimismo, su composición es diferente: en la vía pavimentada se diseña una cuneta revestida de hormigón, mientras que en la vía lastrada la cuneta es sin revestimiento, utilizando el mismo material del terreno natural. Finalmente, como consecuencia, el coeficiente de rugosidad (Manning) es diferente para cada tipo de cuneta: para superficie de hormigón se usa $\eta = 0.014$, y para superficie de tierra, $\eta = 0.02$ (Ministerio de Obras Públicas (MOP) 2003, tbl. IX.6)

Para el diseño de la sección transversal, se consideran parámetros como las pendientes a cada lado de la cuneta y su profundidad. Para la sección transversal triangular se recomienda que el talud hacia la vía tenga como mínimo 3:1, preferentemente 4:1 y del lado del corte seguirá sensiblemente la inclinación del talud del mismo; considerando, para el caso, una lámina de agua no mayor a 30 cm (Ministerio de Obras Públicas (MOP), 2003).

Finalmente, se verifican que los caudales y las velocidades sean menores a los parámetros admisibles para asegurar su correcto funcionamiento. En el caso de los caudales, se calcula el caudal máximo que podría fluir por la sección transversal adoptada y se comprueban que sean mayores a los caudales de diseño para cada tramo, mientras que, los parámetros de velocidades máximas son de 4.5 m/s para cunetas de hormigón y 1.25 m/s para cunetas no revestidas (arcilla firme) (Ministerio de Obras Públicas (MOP) 2003, tbl. IX.1).

3.3.2. Diseño de subdrenes.

El cálculo de diámetros de los drenes se realiza utilizando la fórmula de Manning con un coeficiente de rugosidad adecuado al material de las tuberías, para este caso como se considera una tubería de PVC se adopta un coeficiente de 0.009 (NEVI-12-MTOP, 2013).

El diámetro mínimo que debe tener la tubería de recolección del flujo en el subdrén es de 150 mm (NEVI-12-MTOP, 2013). Sin embargo, debido a que el diámetro comercial más cercano al recomendado es de 160 mm, el primer diseño se realizará considerando esta dimensión.

3.3.3. Diseño de alcantarillas.

En toda la vía de estudio existen 24 alcantarillas. De estas, 11 se encuentran en el tramo pavimentado, de las cuales 9 son metálicas y 2 de hormigón, todas con dirección de flujo de izquierda a derecha. En el tramo de vía lastrada, hay 13 alcantarillas, todas construidas en hormigón y con dirección de flujo de derecha a izquierda.

No obstante, se identifican subtramos en la vía, que comprenden la distancia entre dos alcantarillas, o entre un punto cóncavo de una curva vertical y una alcantarilla, cuyas longitudes superan los 200 metros. Por esta razón, resulta necesario ubicar alcantarillas adicionales en dichos subtramos para reducir sus extensiones y, de este modo, evitar una acumulación excesiva de agua.

Pese a ello, en el tramo de vía pavimentada no se prevé la instalación de alcantarillas nuevas, debido a que dicha vía ha sido recientemente construida, lo que implica un costo elevado para realizar modificaciones. Por otra parte, en el tramo de vía lastrada se instalarán cuatro alcantarillas nuevas: tres en los subtramos cuya longitud supera los 200 metros y una adicional en una zona cóncava de la vía donde se acumula agua.

En este estudio se realiza la validación de las alcantarillas existentes, así como el diseño de las nuevas estructuras. Durante la validación, se formularán recomendaciones en caso de ser necesario modificar las dimensiones de la estructura y la tubería, además de verificar la necesidad de colocar enrocado en la salida de la alcantarilla. Por otro lado, las alcantarillas nuevas se ubicarán en puntos óptimos para llevar a cabo su diseño correspondiente.

Previo al diseño y validación de las alcantarillas, se llevó a cabo un levantamiento topográfico mediante el cual se obtuvieron las coordenadas de las entradas y salidas de las mismas. A partir de estos datos se calcularon las longitudes, diámetros, pendientes, rellenos y el esviajamiento de las alcantarillas. Este último se define como el ángulo de inclinación entre el eje longitudinal del conducto de la alcantarilla y una línea perpendicular al eje de la vía o camino que atraviesa, indicando que la alcantarilla no cruza la vía en ángulo recto, sino de manera oblicua o sesgada.

Para el diseño y validación de las alcantarillas se realizan tres verificaciones fundamentales. En primer lugar, se determina el caudal máximo para comprobar y seleccionar el diámetro adecuado del conducto. En segundo lugar, se verifica la velocidad admisible para establecer y validar la pendiente óptima. Finalmente, se evalúa la altura del calado en la entrada, la cual debe ser inferior a la altura de la calzada, con el fin de seleccionar el relleno apropiado sobre la alcantarilla.

Para el cálculo del caudal máximo se considera una relación entre la profundidad del flujo y el diámetro igual al 80% ($y/D = 0.8$). Utilizando la “tabla para el cálculo de canales circulares según Manning”, la cual está desarrollada con la ecuación de Manning presentada en el capítulo II (Marco teórico). Con parámetros conocidos como el diámetro, la pendiente, el coeficiente de rugosidad y el coeficiente $K_4 = 0.3047$ correspondiente, se determina el caudal máximo admisible que puede fluir a través de la alcantarilla. Finalmente, la verificación consiste en comprobar que el caudal de diseño sea menor al caudal máximo calculado.

Para calcular la velocidad del flujo a través de la alcantarilla, se emplea nuevamente la “tabla para el cálculo de canales circulares según Manning”, utilizando en esta ocasión el caudal de diseño para determinar el factor K_4 , al mismo tiempo este corresponde a un factor K_1 , con el cual se calcula el área mojada y, posteriormente, la velocidad del flujo. La verificación del diseño consiste en asegurar que la velocidad calculada sea menor que la admisible, la cual es de 4.5 m/s para superficies de hormigón (Ministerio de Obras Públicas (MOP), 2003, tbl. IX.1). Aunque las alcantarillas metálicas permiten velocidades admisibles mucho mayores, se considera el mismo límite que para las alcantarillas de hormigón, con el fin de evitar la erosión del terreno en la salida y minimizar la necesidad del enrocado.

Un parámetro fundamental para el análisis hidráulico de las alcantarillas es la identificación de flujo o perfil que se genera. Para ello, es necesario calcular inicialmente el calado normal (y_n) mediante la ecuación de Manning, el calado crítico (y_c) utilizando el Apéndice A del libro

de Ven Te Chow, y el calado real del agua (y) a partir de la “tabla para el cálculo de canales circulares según Manning”. Con estos valores se considera las siguientes condiciones:

Clasificación del régimen de flujo.

- $y_n > y_c \rightarrow$ Flujo suave (tipo M)
- $y_n = y_c \rightarrow$ Flujo crítico (tipo C)
- $y_n < y_c \rightarrow$ Flujo empinado (tipo S)

Determinación de la zona del perfil.

- $y > y_n; y > y_c \rightarrow$ Zona 1
- $y_n \geq y; y \geq y_c$ o $y \geq y_n; y_c \geq y \rightarrow$ Zona 2
- $y_n > y; y_c > y \rightarrow$ Zona 3

La combinación del tipo de flujo (M, C, S) y la zona (1, 2, 3) identifica el perfil hidráulico específico que se genera dentro de la estructura (Te Chow, 1994, fig. 9-2)

Para evaluar la altura del calado en la alcantarilla, se hace un balance energético considerando las pérdidas por entrada (h_e), fricción (h_f) y salida (h_v), para ajustar la cota y verificar que la lámina de agua en la entrada sea compatible con el diseño hidráulico.

Finalmente, se verifica la necesidad de protección mediante enrocado en la salida de la alcantarilla para prevenir la erosión del suelo natural. Para ello, se utiliza la velocidad calculada con base en la “tabla para el cálculo de canales circulares según Manning”. La comprobación consiste en garantizar que dicha velocidad sea inferior a la velocidad máxima admisible, establecida en 3.5 m/s, con el fin de evitar daños al terreno circundante y asegurar la estabilidad hidráulica del sistema.

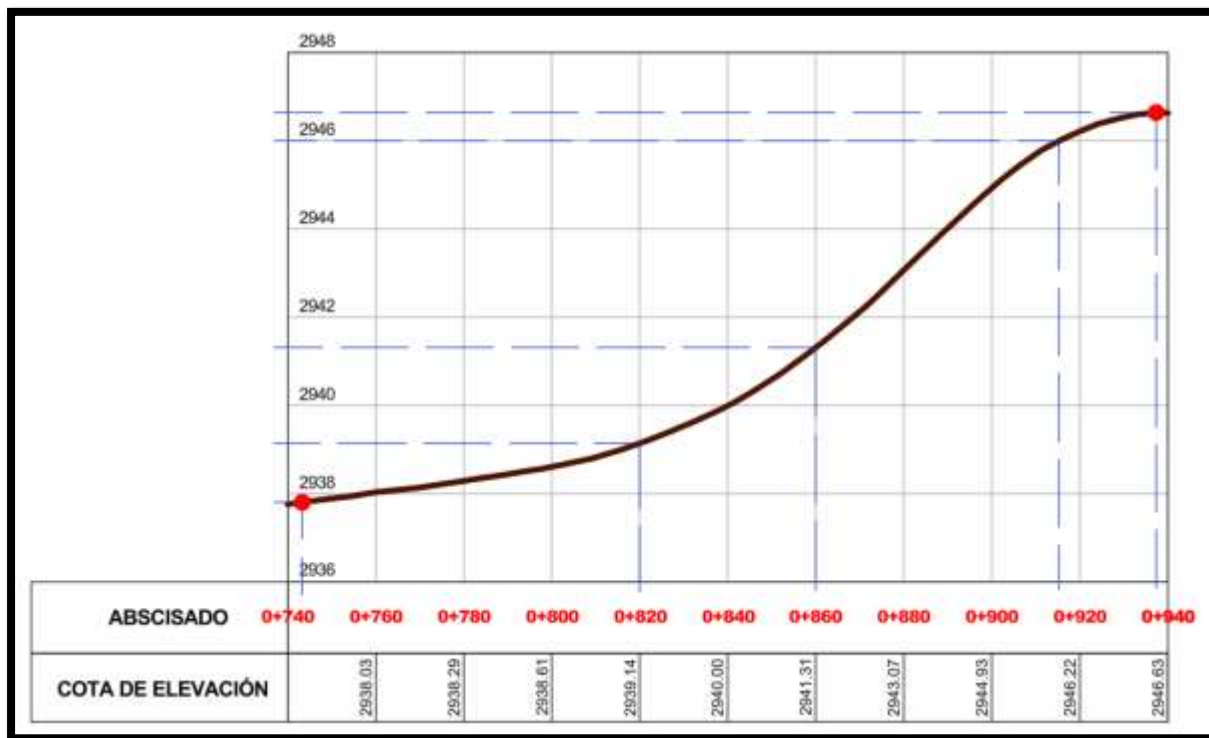
3.3.4. Modelación de Cunetas

Para comprender mejor el comportamiento del flujo en las cunetas, se decide utilizar el software HEC-RAS. Con esta herramienta se pretende modelar la hidráulica del flujo en las cunetas; sin embargo, dado que el objetivo es solo observar y comprender los perfiles generados, el estudio se realizará únicamente para un tramo de cuneta, el más interesante.

3.3.4.1. Definición del tramo de estudio

El tramo a ser estudiado se comprende entre las abscisas 0+743.3 y 0+937.4, contando así con una longitud de 194.1 metros. Se escoge un tramo con características particulares, que incluye diferentes pendientes (tanto pequeñas como grandes) y longitudes variadas, como se observa a continuación.

Figura 10. Tramos de estudio con el software HEC-RAS (Fuente: Propia)



Como se muestra en la Figura 10, el tramo de estudio inicia y termina en los puntos de color rojo, y está dividido en cuatro secciones delimitadas por líneas azules entrecortadas, las cuales serán analizadas con el software HEC-RAS. Describiendo las secciones desde aguas arriba hacia aguas abajo:

- La primera sección comprende las abscisas 0+937.4 a 0+915.3, con una longitud de 22.10 metros y un desnivel de 0.60 metros.
- La segunda sección abarca desde 0+915.3 hasta 0+860.0, con una longitud de 55.30 metros y un desnivel de 4.70 metros.
- La tercera sección se extiende entre 0+860 y 0+820, con una longitud de 40.00 metros y un desnivel de 2.20 metros.
- Finalmente, la cuarta sección comprende desde 0+820 hasta 0+743.3, con una longitud de 76.60 metros y un desnivel de 1.30 metros.

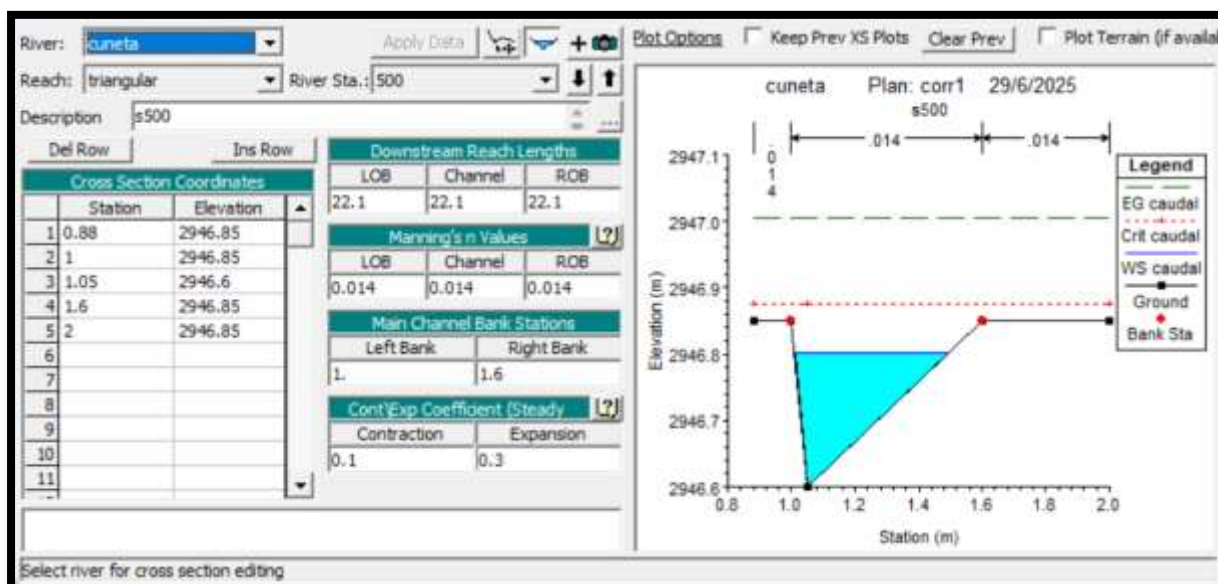
Es importante mencionar que la cuneta a analizar es la ubicada en el lado izquierdo de la vía pavimentada, ya que presenta un caudal mayor debido al aporte adicional proveniente del talud.

3.3.4.2. Datos de geometría.

Observando la Figura 22 en conjunto con la tabla 20, se entiende a detalle la sección transversal de la cuneta a analizar. La cual cuenta con una pendiente mayor de 1:0.2, una pendiente menor de 1:2.2 y una profundidad de 25 cm.

Para ingresar cada sección transversal en HEC-RAS, se especifican los siguientes datos: la estación del cauce junto con su descripción, las coordenadas de la sección transversal, la longitud de la sección, el coeficiente de rugosidad y los puntos donde se encuentran las banquetas del canal, tal como se muestra en la Figura 11. Este procedimiento se repite para todas las secciones transversales restantes.

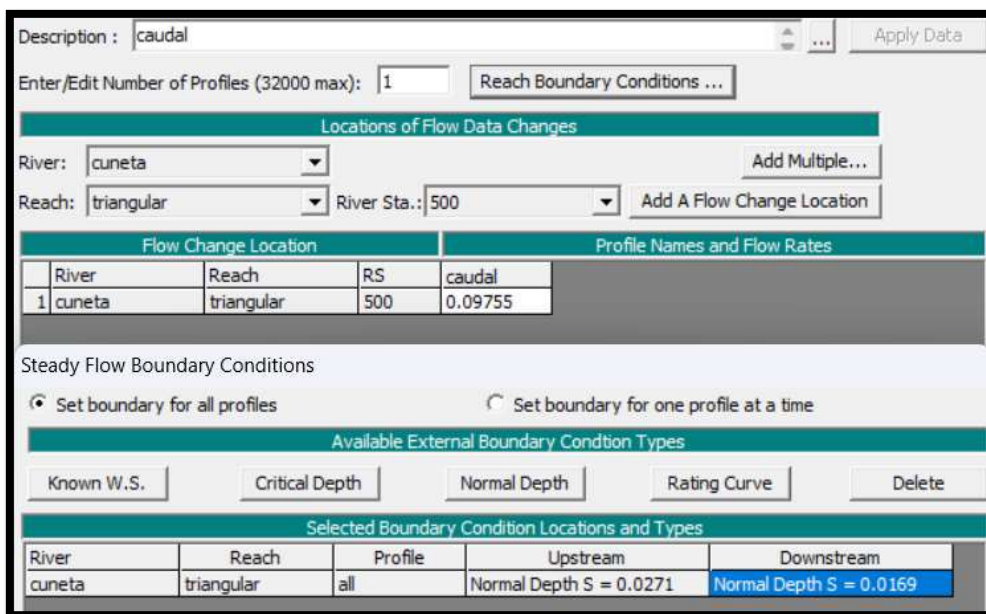
Figura 11. Configuración de geometría para el análisis de la cuneta en HEC-RAS



3.3.4.3. Datos de flujo constante

Para ingresar los datos de flujo constante, primeramente, se selecciona la primera estación del cauce donde nace el caudal, se ingresa el caudal en m³/s, después se ingresan las condiciones del flujo, en este caso se considera un control aguas arriba y aguas abajo con una pendiente de 2.71% y de 1.69% respectivamente, como se indica en la Figura 12.

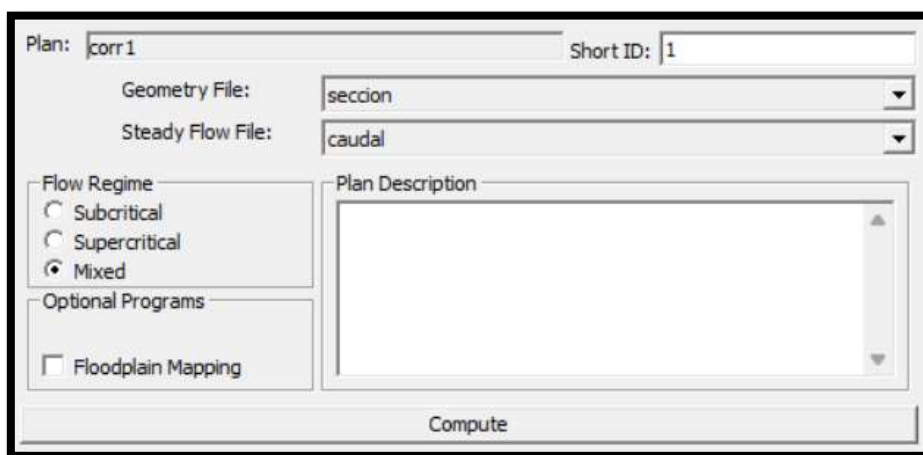
Figura 12. Configuración de los datos de flujo constante en HEC-RAS



3.3.4.4. Análisis de flujo constante

Finalmente, para completar la configuración del modelamiento del flujo en la cuneta, se ingresan los regímenes en los que se encuentra el flujo. En este caso, debido a la presencia de pendientes variables (tanto pequeñas como grandes), se selecciona un régimen mixto, ya que el perfil de flujo puede presentar zonas tanto subcríticas como supercríticas.

Figura 13. Configuración del modelamiento del flujo en la cuneta en HEC-RAS



3.3.5. Modelación de Alcantarillas

Como complemento al presente estudio, se realiza la modelación hidráulica de una alcantarilla utilizando el software IBER. El propósito de esta simulación es demostrar la utilidad de herramientas computacionales en el diseño y análisis de estructuras hidráulicas.

Además de, contrastar los resultados obtenidos del software con aquellos calculados mediante la metodología tradicional.

Dado que el alcance de esta tesis no incluye la modelación de todas las alcantarillas existentes, se selecciona una alcantarilla representativa. La alcantarilla 10 de la vía pavimentada fue la elegida por ser una de las que presenta el mayor caudal de diseño. Además, su relevancia se incrementa debido a que el agua que ingresa a esta estructura proviene de una quebrada que atraviesa ambos tramos de vía analizados (pavimentada y de lastre), lo que la convierte en un caso de estudio idóneo para validar los métodos de cálculo y la capacidad predictiva del software.

3.3.5.1. Geometría de Análisis

La geometría necesaria para la simulación en IBER se genera mediante la importación de datos externos, aprovechando la compatibilidad del software con programas CAD y SIG. Si bien IBER permite la creación directa de elementos geométricos como puntos, líneas y polilíneas, se opta por una aproximación que integra información ya existente y detallada.

Específicamente, se utilizaron los puntos topográficos obtenidos previamente y se emplea Autodesk Civil 3D para delimitar la geometría precisa de la zona de estudio alrededor de la alcantarilla 10. Este proceso implicó la conexión de los nodos mediante el comando "línea", asegurando una representación fiel del área relevante para la modelación hidráulica, ver Figura 14.

Figura 14. Imagen Georreferenciada de la Zona de Estudio y la geometría definida para el análisis



Una vez definida la geometría del área de estudio en Autodesk Civil 3D, esta se exporta en formato DXF, que es el estándar para la importación de geometrías vectoriales en IBER.

El proceso de importación en IBER se realiza de la siguiente manera:

- Se accede a la pestaña "Archivo".
- Se selecciona la opción "Importar DXF".
- Se elige el archivo DXF correspondiente desde su ubicación de guardado.
- La geometría se carga exitosamente en el programa.

Con la geometría vectorial insertada, se procede a la creación de superficies dentro de IBER. Este paso es fundamental para la posterior generación de la malla. El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Desde la pestaña "Geometría", se selecciona la opción "Crear".
- Se elige la sub-opción "Superficie NURBS".
- Se designan las líneas que conformaban cada polígono individual de la geometría importada.
- Este procedimiento se repitió para todas las secciones pertinentes hasta conformar la superficie total del modelo, como se ilustra en la Figura 31.

3.3.5.2. Parámetros del comportamiento hidráulico

Ingreso de Coeficiente de Manning: La rugosidad se representa en IBER mediante el coeficiente de Manning (n). IBER ofrece varias formas de asignar este coeficiente, desde un valor global uniforme hasta una distribución espacial detallada. La rugosidad es un parámetro de calibración importante en el modelo, ajustándolo para que los resultados de la simulación coincidan con datos medidos (calados, velocidades). La precisión de este coeficiente es vital para la simulación, por lo que se puede usar los valores que vienen por defecto en el programa o consultar tablas de rugosidad para diferentes materiales y tipos de vegetación (por ejemplo, Chow, Arcement y Schneider).

Para la modelación hidráulica, se opta por una asignación manual de la rugosidad por zonas. Esta decisión se basó en la similitud de los coeficientes de rugosidad de Manning (n) propuestos por defecto en el programa con los valores obtenidos de tablas de referencia.

Se definieron cuatro zonas específicas para la asignación de rugosidad:

- **Vía:** Corresponde a la superficie de la calzada.
- **Terraplén:** Hace referencia a la superficie del talud ubicado entre la vía y las estructuras de entrada y salida de la alcantarilla.
- **Estructuras:** Incluye la estructura de doble ala presente tanto en la entrada como en la salida de la alcantarilla.
- **Área:** Designa el terreno adyacente, tanto aguas arriba como aguas abajo de la alcantarilla, asumiendo su homogeneidad.

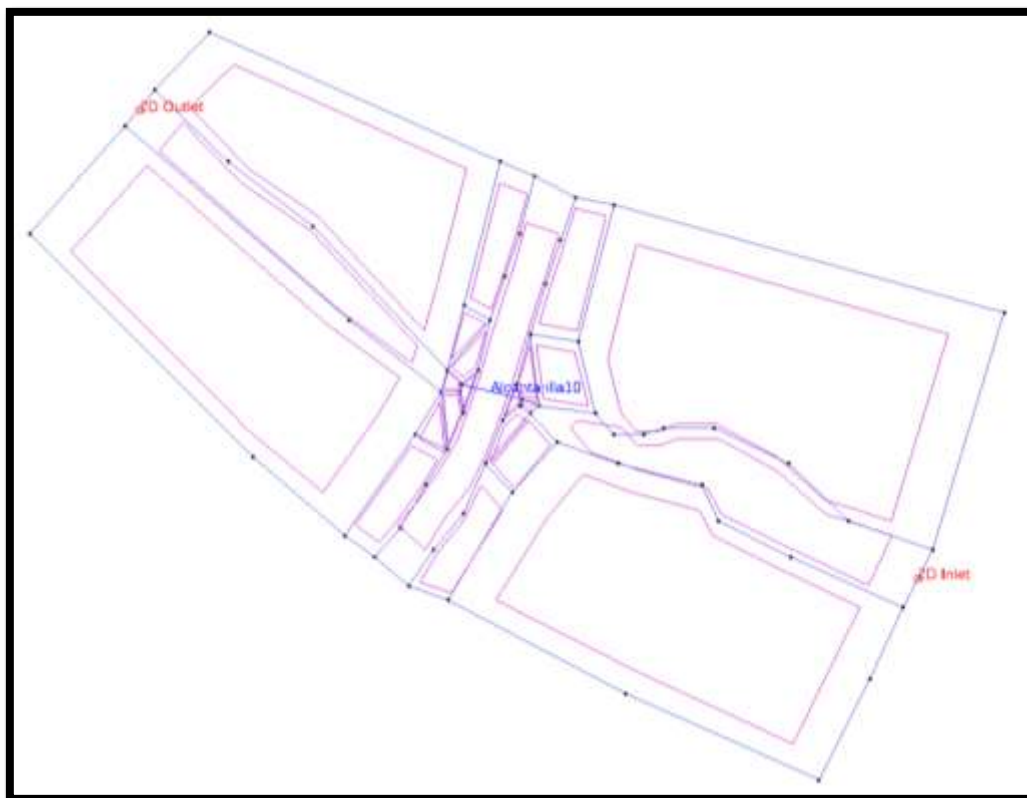
Una vez delimitadas estas zonas, se procede a la asignación manual de los coeficientes de rugosidad de Manning (predeterminados por el software) a cada una de ellas.

Dentro del interfaz de IBER, el proceso se realiza en la pestaña "Datos" -> "Rugosidad", en la opción "Asignar rugosidad" o "Rugosidad por usos del suelo". Como es un método de asignación manual, se introduce el valor de ' n ' de Manning y se selecciona el elemento superficie al cual se le va asignar el valor correspondiente.

Ingreso de Caudal: El caudal de diseño se incorpora en el modelo de IBER mediante la definición de una condición de contorno de entrada. Esta especificación es crucial, ya que determina la forma en que el flujo de agua ingresa al dominio de simulación. Específicamente, su ingreso se define de la siguiente manera:

1. **Define la línea de entrada:** Primero, se define una línea o un segmento de la geometría que represente la sección por donde el agua ingresa al modelo. Esta línea es parte del contorno del dominio de cálculo.
2. **Condiciones de contorno:** En la pestaña "Datos" -> "Condiciones de Contorno". Se hace clic en el botón para añadir una nueva condición de contorno.
3. **Selecciona "Entrada 2D":** En el menú desplegable, se elige el tipo de condición de contorno "Entrada 2D".
4. **Tipo de dato de entrada:** Aquí se puede elegir cómo se va a definir el caudal. En este caso se escoge la opción de "Caudal Total", que es la opción más común ya que permite introducir el valor numérico del caudal en m^3/s que entra por la sección.
5. **Segmento de entrada:** Se debe pulsar el botón "Asignar" y luego seleccionar la línea de la geometría que corresponden a la entrada del caudal. Es importante que la dirección del flujo sea perpendicular a estas líneas.
6. **Confirmación:** Finalmente, se debe pulsar la tecla "Esc" o el botón "Terminar" para finalizar la asignación.
7. **Condiciones de contorno de salida:** También se debe definir una condición de contorno de salida. Por lo mismo, se escoge la opción "Salida 2D" y se asigna un segmento de la geometría por donde va a salir el flujo del agua.

Figura 15. Ubicación de los segmentos de ingreso y salida del caudal



3.3.5.3. Generación de Mallado

El mallado es la discretización del dominio de estudio en elementos finitos (triángulos o cuadriláteros), lo que permite a IBER resolver numéricamente las ecuaciones de flujo. Su importancia radica en que define la precisión y estabilidad de la simulación. Una malla adecuada, con elementos más pequeños en zonas de interés (como el cauce principal o estructuras) y de mayor tamaño en áreas menos críticas, asegura una representación fiel de la topografía y los fenómenos hidráulicos. En esencia, una malla bien elaborada es fundamental para obtener resultados fiables y eficientes. (Cea Gómez et al., 2019)

Con la geometría (superficies) definida en IBER, el siguiente paso es generar la malla. IBER ofrece varias herramientas para ello, permitiendo diferentes tipos de mallas y opciones de refinamiento. Para este caso los pasos a seguir son los siguientes:

1. **Acceder al módulo de mallado:** Generalmente, se encuentra en la pestaña "Geometría" -> "Malla" o directamente en una opción de "Generar Malla".
2. **Elegir el tipo de malla:** IBER trabaja principalmente con:
 - **Mallas No Estructuradas:** Son las más comunes en estudios hidráulicos 2D. Están compuestas por triángulos y/o cuadriláteros y se adaptan muy bien a

geometrías complejas. Permiten variar el tamaño del elemento en diferentes zonas, por lo que este tipo se utiliza para las partes de Área, Estructuras y Terraplén.

- **Mallas Estructuradas:** Estas están compuestas por elementos cuadrados uniformes, más fáciles de generar, pero menos flexibles para adaptarse a contornos irregulares. No se usan tan frecuentemente para geometrías complejas de ríos, por lo que este tipo de malla se pretende usar en la parte del modelaje de la vía.

3. **Definir el tamaño de los elementos:** Este es el parámetro más crítico y se puede especificar entre:

- **Tamaño Global de Elemento:** Un tamaño promedio para todos los elementos de la malla.
- **Tamaños de Malla por Zona (Refinamiento Local):** Este aspecto es crucial. Pues se puede definir polígonos o líneas dentro de tu dominio donde deseas que la malla sea más fina (elementos más pequeños) para capturar mayor detalle.

Por ejemplo, para la presente simulación se toma en cuenta:

- i. Un tamaño de elemento pequeño (0.8) en el cauce principal.
- ii. Un tamaño intermedio en las llanuras de inundación cercanas al cauce, valor de 10 en este caso.

4. **Asignación de Cotas:** Para atribuir las elevaciones a los nodos del modelo en IBER, el proceso se centra en la importación de un Modelo Digital de Terreno (MDT). En este caso, el MDT es el mismo que se utiliza en la parte del diseño hidrológico. Posteriormente, este archivo se importa directamente en IBER, generalmente a través de las herramientas específicas para MDT. Una vez cargado, IBER interpola automáticamente las elevaciones del MDT a cada nodo de la malla generada a partir de la geometría del proyecto, asegurando así una representación precisa del relieve del área de estudio, ver Figura 33.

3.3.5.4. Ejecución del Software

Una vez que todos los datos de entrada esenciales, como la geometría, la malla de discretización, los coeficientes de rugosidad y las condiciones de contorno, han sido correctamente definidos e ingresados en el software IBER, se procede a la ejecución del cálculo numérico. Este proceso resuelve las ecuaciones hidráulicas para simular el comportamiento del flujo de agua dentro del dominio de estudio. El desarrollo de la simulación se estructura a continuación.

Configuración del Cálculo: Previo al inicio de la ejecución, se debe definir los siguientes parámetros cruciales en la sección de "Datos del Problema":

- **Tiempo de Simulación:** En este punto se define la duración total que abarcará la simulación, siendo de 2500 segundo en este caso.
- **Intervalo de Guardado de Resultados:** Aquí se establece la frecuencia con la que los resultados de la simulación serán almacenados para su posterior visualización y análisis. De igual manera el intervalo de tiempo escogido ha sido de 10 segundos.
- **Paralelización:** Si el hardware lo permite, se configura el uso de múltiples núcleos de CPU o la GPU para optimizar el tiempo de cálculo.

Inicio y Proceso de Cálculo Interno: Con la configuración establecida, la simulación se inicia mediante la función "Calcular". Esto implica que internamente, IBER realiza lo siguiente:

- Utilizando la malla discretizada y los parámetros de entrada, el software resuelve iterativamente las ecuaciones de Saint-Venant 2D en cada elemento de la malla y para cada paso de tiempo.
- Se calculan variables hidráulicas clave como el calado, las componentes de la velocidad (V_x, V_y) y el número de Froude en los nodos o centroides de los elementos de la malla.
- Las condiciones de contorno (ej. caudal de entrada, nivel en la salida) y las propiedades del terreno (elevaciones, rugosidad) se aplican y actualizan en cada paso de tiempo.
- IBER gestiona dinámicamente los frentes de humedecimiento y secado, activando o desactivando los elementos de la malla que se inundan o se secan a medida que el agua avanza o retrocede.

Monitoreo y Finalización de la Simulación: Durante la ejecución, IBER proporciona una ventana de progreso que informa sobre el tiempo de simulación transcurrido, el paso de tiempo actual, el porcentaje completado y posibles mensajes de advertencia o error, permitiendo supervisar el avance del cálculo.

Una vez que la simulación alcanza el tiempo final especificado, el proceso finaliza. IBER guarda automáticamente los resultados de la simulación en la carpeta del proyecto. Estos resultados incluyen series temporales de variables como calados, velocidades y caudales en puntos o líneas de interés definidos, así como las distribuciones espaciales de estas variables en diferentes instantes de la simulación.

Finalmente, se procede con la fase de post-proceso donde IBER ofrece herramientas para la visualización gráfica de los resultados (ej. mapas de inundación, animaciones de flujo, perfiles) y permite su exportación para análisis adicionales, Figura 34.

4. RESULTADOS.

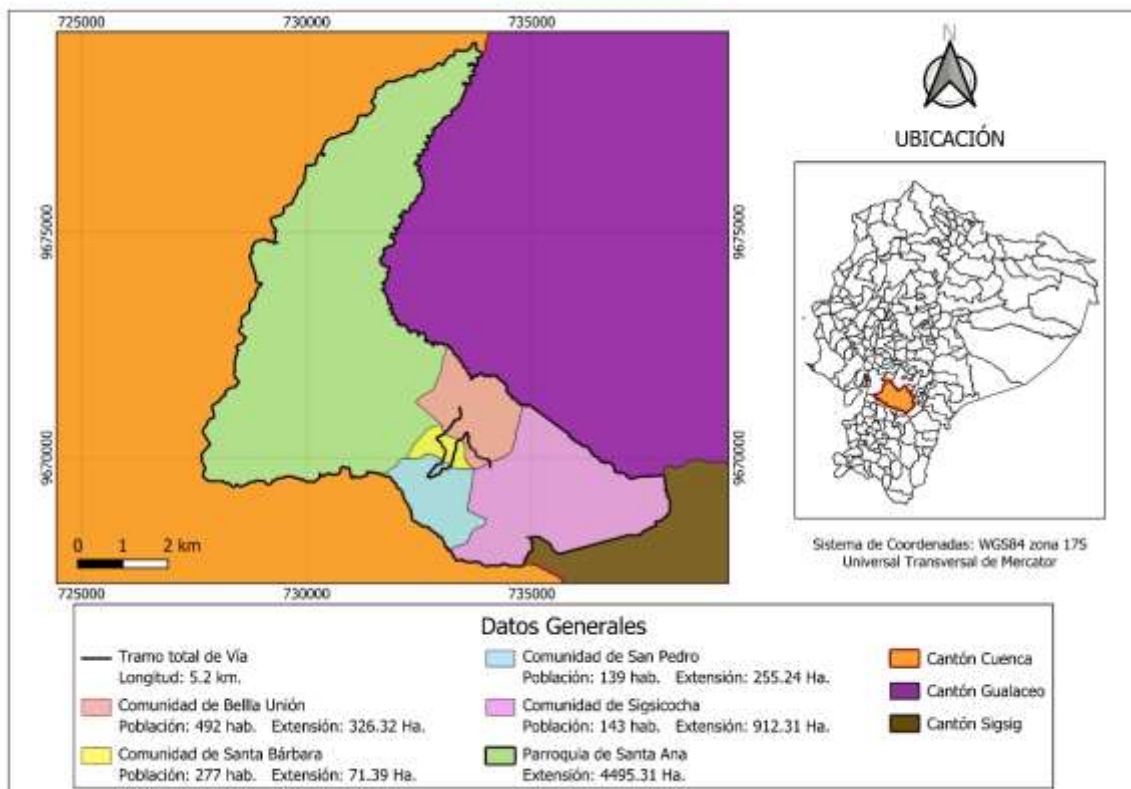
En este capítulo se detallan los resultados del estudio anteriormente detallado, en base a la metodología definida en el Capítulo 3. Cada subsección presenta de manera sistemática los productos resultantes ligados al cumplimiento de los objetivos específicos del presente trabajo de titulación. Cabe destacar que, la exposición de la información se realizará a través de tablas, gráficos y descripción narrativa, facilitando la comprensión de la información obtenida que sustenta las conclusiones de este estudio.

4.1. Caudal de Áreas de Aporte

Para la determinación del caudal generado por el escurrimiento del agua en microcuencas y taludes, se aplica el Método Racional. La implementación de esta fórmula requiere la previa obtención y cálculo de sus parámetros clave: el coeficiente de escorrentía (C), la intensidad de lluvia (I) y el área de aporte (A), que corresponde a la superficie de la cuenca que contribuye al punto de interés. La precisa determinación de cada uno de estos componentes es fundamental para el cálculo final del caudal.

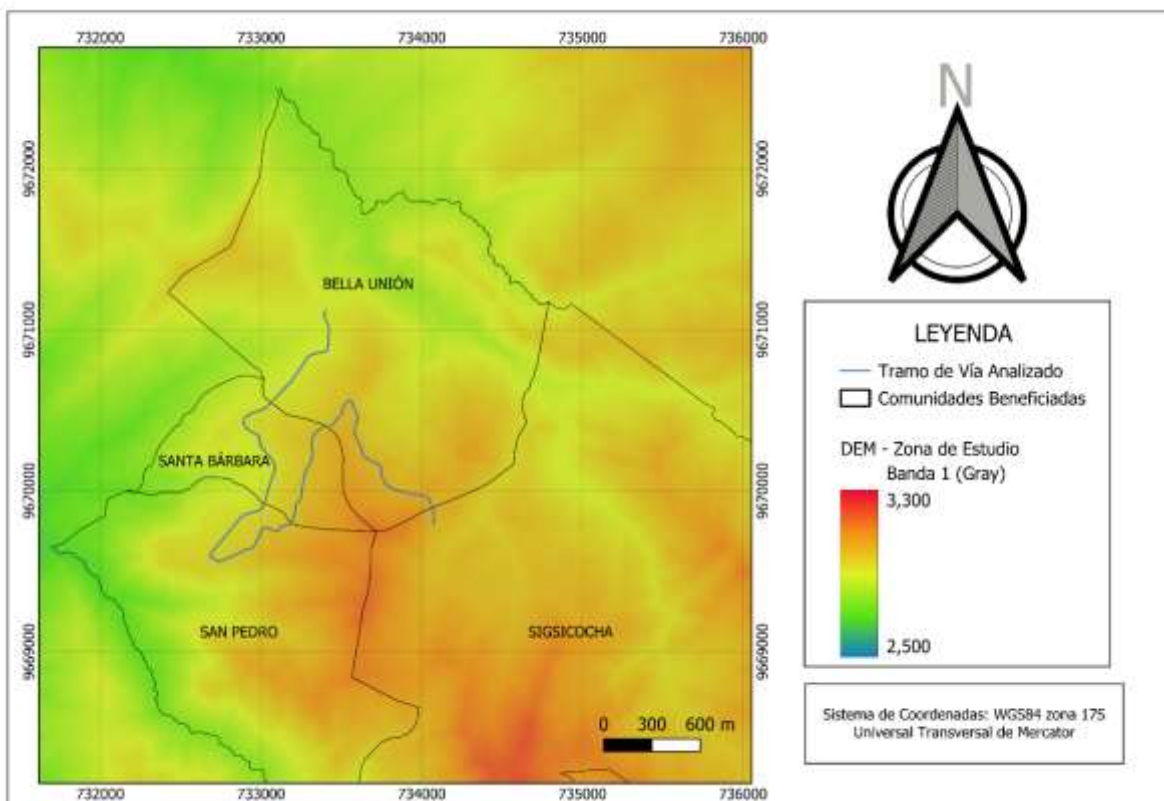
En busca de una mejor comprensión espacial del área de estudio, y como complemento a la descripción detallada en la sección 'Delimitación de Zona de Estudio', se presenta a continuación el mapa que describe este aspecto, Figura 16. Esta imagen muestra la ubicación geográfica precisa del área donde se lleva a cabo el estudio, resaltando sus límites y elementos geográficos relevantes que facilitan la contextualización de los datos y resultados presentados en este documento.

Figura 16. Mapa de Delimitación de la Zona de Estudio (Fuente: Propia)



Ahora bien, para obtener una representación visual del relieve y la altimetría de la zona de estudio, elemento fundamental para los análisis espaciales del presente análisis, se incluye la Figura 17. Esta imagen es un mapa cuyo objetivo es ilustrar de forma clara los datos de elevación obtenidos y procesados tal como se detalló en la sección ‘Obtención de un Modelo de Elevación Digital’, constituyendo el insumo cartográfico principal para la derivación de variables geomorfológicas y la realización de los cálculos pertinentes.

Figura 17. Mapa del Modelo de Elevación Digital utilizado en el análisis (Fuente: Propia)

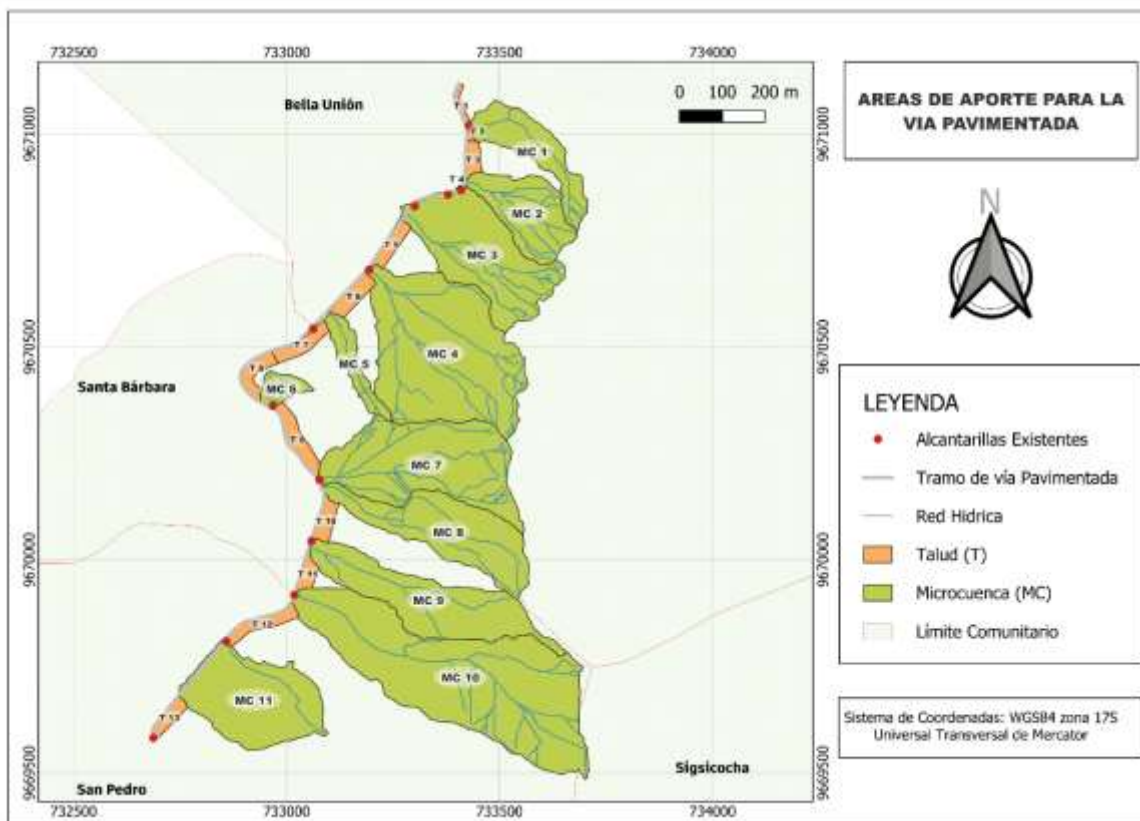


4.1.1. Áreas de Aporte

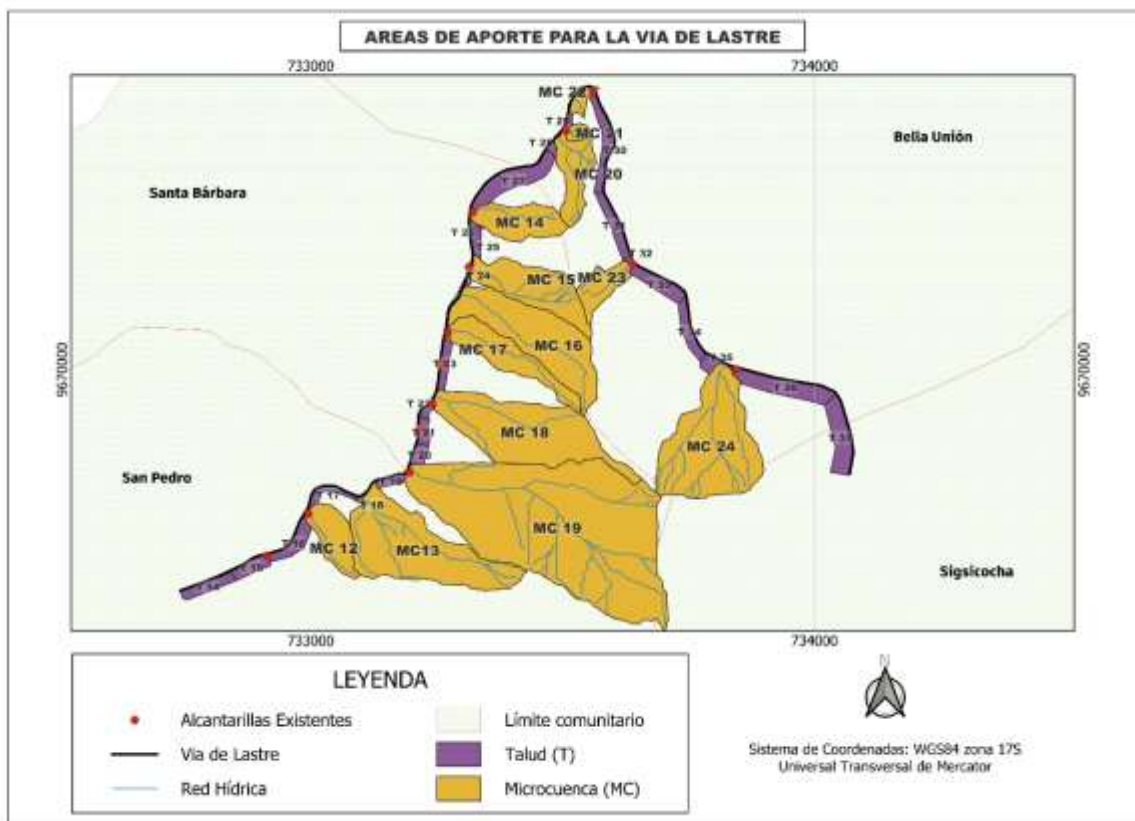
Dentro del procesamiento topográfico del Modelo de Elevación Digital (DEM), siguiendo la metodología detallada para la delimitación de microcuencas y taludes en la sección Áreas de Aporte, se presenta a continuación la Figura 18. Estos mapas ofrecen una visualización espacial esencial para comprender la dinámica hidrológica y geomorfológica del área, representando las unidades de escorrentía naturales y las superficies de vertiente que dirigen el flujo superficial hacia los elementos de drenaje (cunetas y alcantarillas). Estos son elementos cruciales para continuar con el análisis y diseño hidrológico correspondiente.

Figura 18. Mapa de Áreas que Aportan Caudal hacia los elementos de drenaje (Fuente: Propia)

a). Tramo de Vía Pavimentada



b). Tramo de Vía de Lastre



4.1.2. Intensidad de Diseño

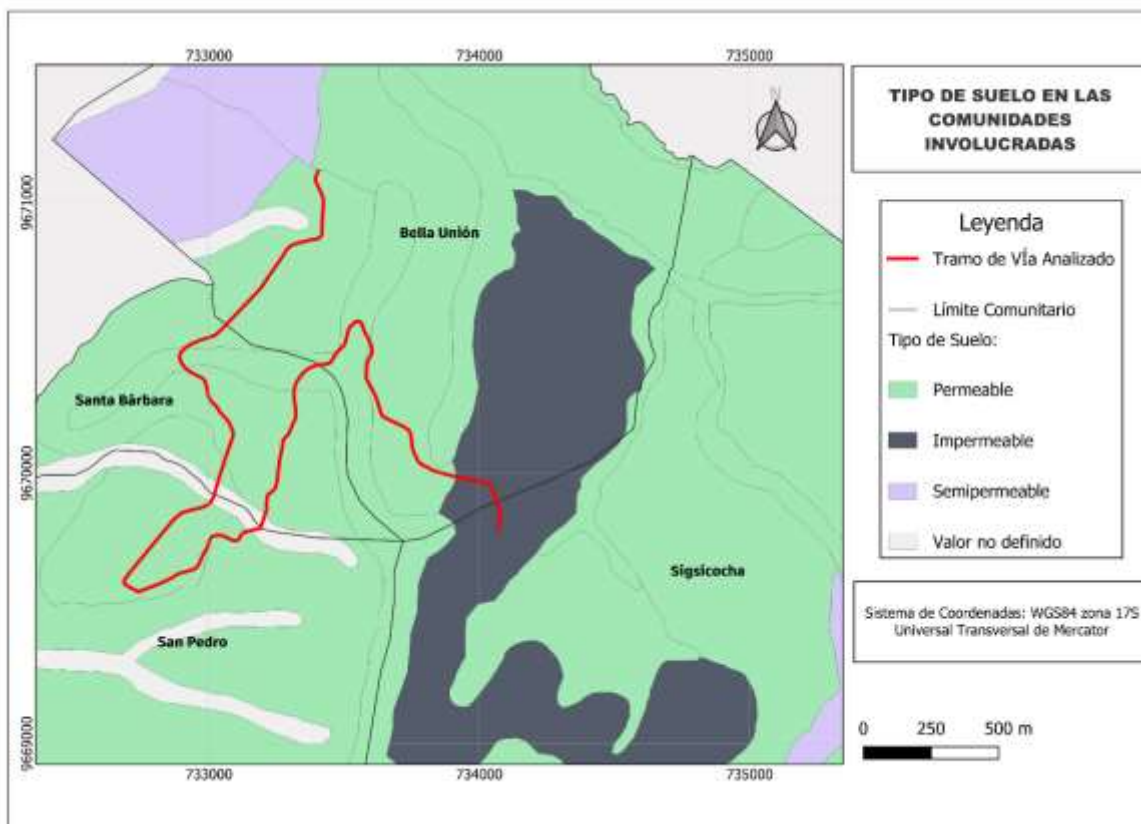
Para la estimación de la intensidad de diseño, se sigue la metodología detallada en la sección ‘Análisis de Precipitación’, esto es un proceso que involucra la determinación del período de retorno, el tiempo de concentración, y la intensidad máxima en 24 horas. Dichos valores, esenciales para definir las características de la precipitación esperada en la zona de estudio, se consolidan y presentan a continuación en los anexos.

4.1.3. Coeficiente de Escorrentía (C)

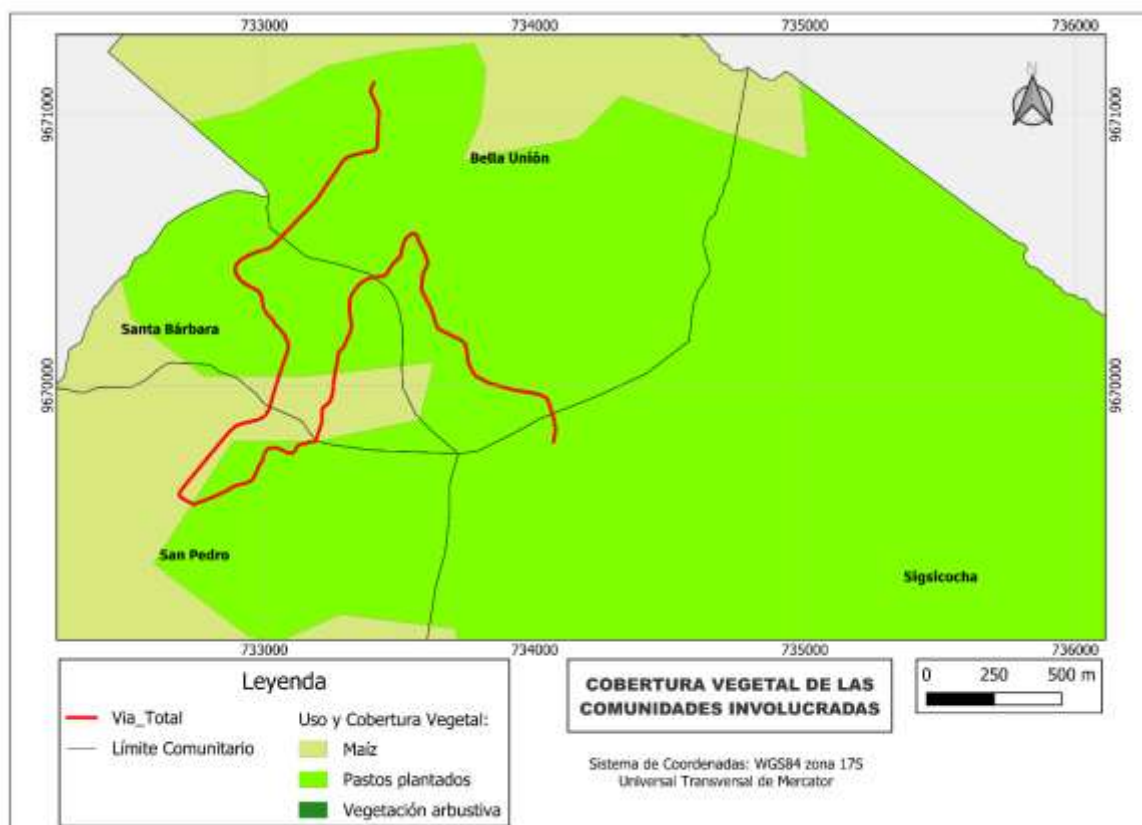
Dentro del análisis hidrológico, un componente fundamental es la representación del tipo, el uso y cobertura del suelo. Por ello, y en consistencia con la metodología de extracción explicada en la sección ‘Obtención del Mapa de Uso de Suelo’, se presenta a continuación la Figura 19.b. Estos mapas ilustran la distribución de las diferentes categorías del tipo y uso del suelo dentro del área delimitada, proporcionando un insumo vital para la determinación del coeficiente de escorrentía, elemento esencial en el diseño hidrológico.

Figura 19. Mapa de Características Biofísicas del Suelo en la Zona de Estudio. (Fuente: Propia)

a). Mapa de Tipo de Suelo de la Zona de Estudio

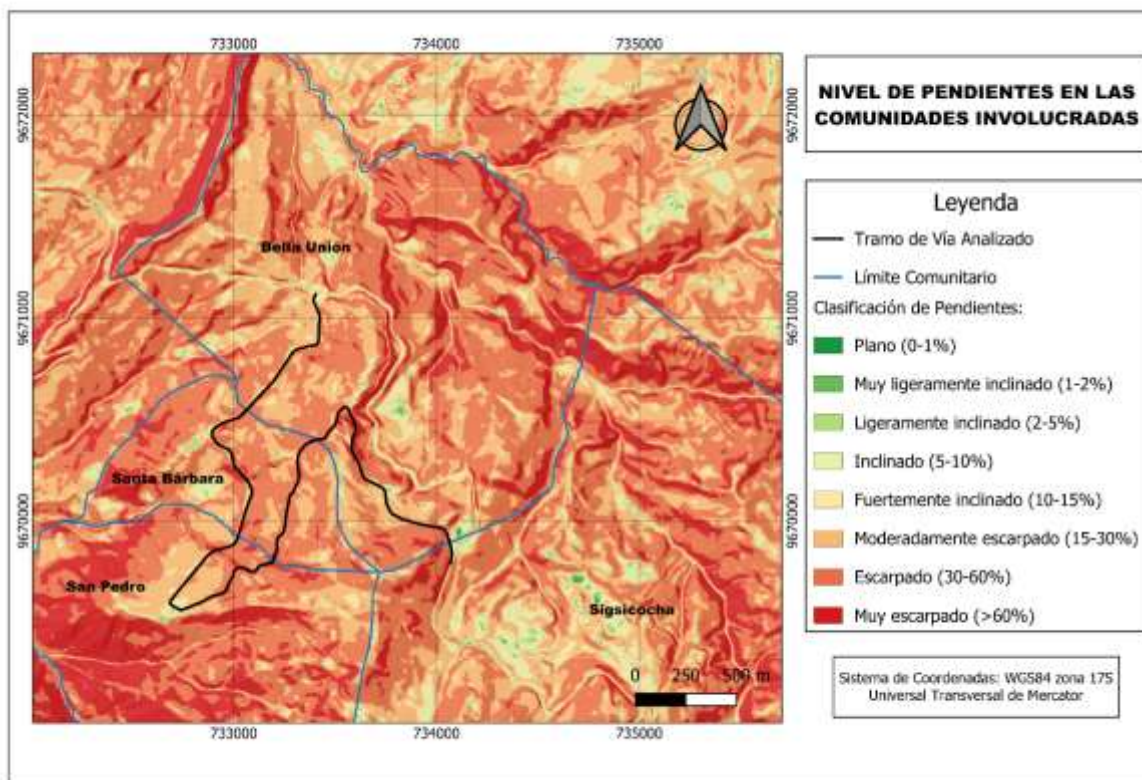


b). Mapa de Uso de Suelo de la Zona de Estudio



En este orden y como resultado adicional del procesamiento del Modelo de Elevación Digital (DEM) se presenta a continuación la Figura 20. Este mapa es producto de seguir la metodología explicada en la sección 'Obtención de Mapa de Pendientes' y es una representación visual de la inclinación del terreno en el área de estudio, un factor geomorfológico clave para la comprensión de procesos hidrológicos. Debido a que, la inclinación del terreno afecta directamente la velocidad de escorrentía y la infiltración del agua. En pendientes pronunciadas, el agua fluye más rápido, reduciendo la infiltración y aumentando el coeficiente de escorrentía "C", mientras que, en pendientes suaves, la mayor infiltración lo disminuye. Así, el mapa permite visualizar y valorar la topografía, siendo un factor modificador clave que, junto con el tipo de suelo y la cobertura vegetal, garantiza una asignación más precisa del coeficiente de escorrentía, reflejando de forma realista la respuesta hidrológica del área.

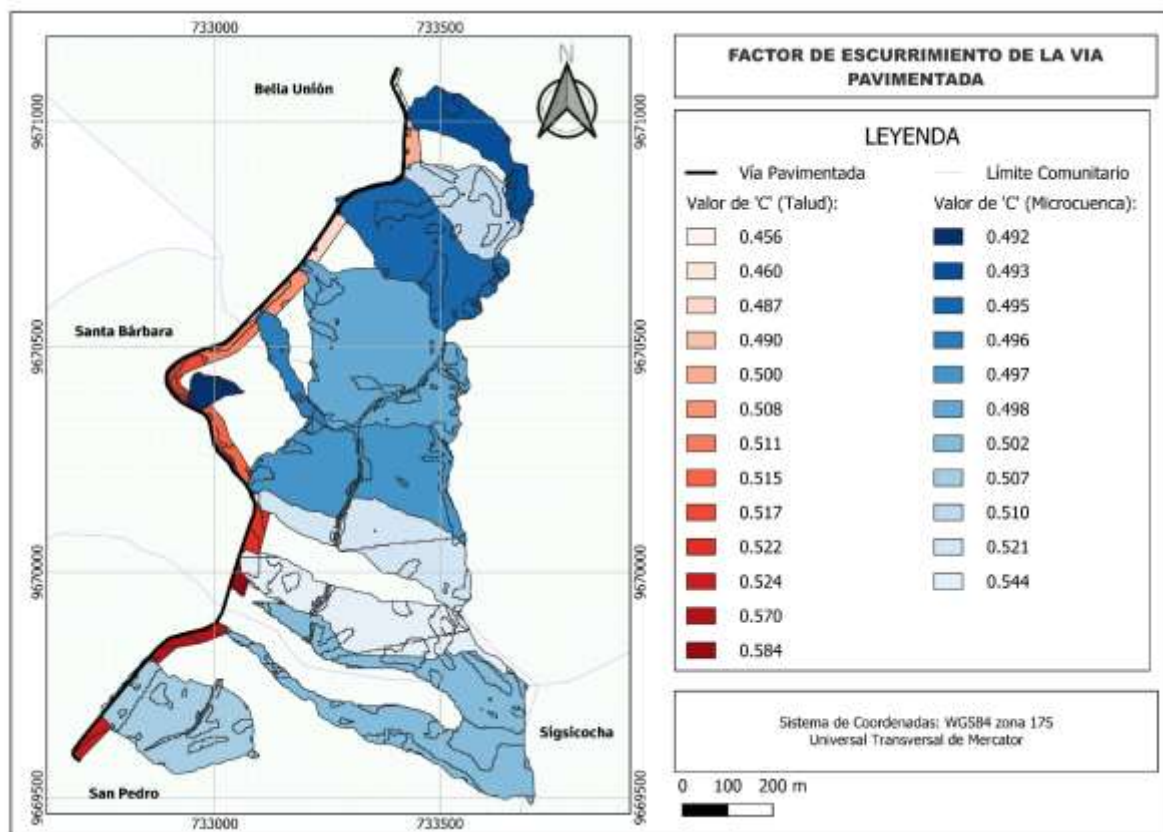
Figura 20. Mapa de Pendientes de la Zona de Estudio. (Fuente: Propia)



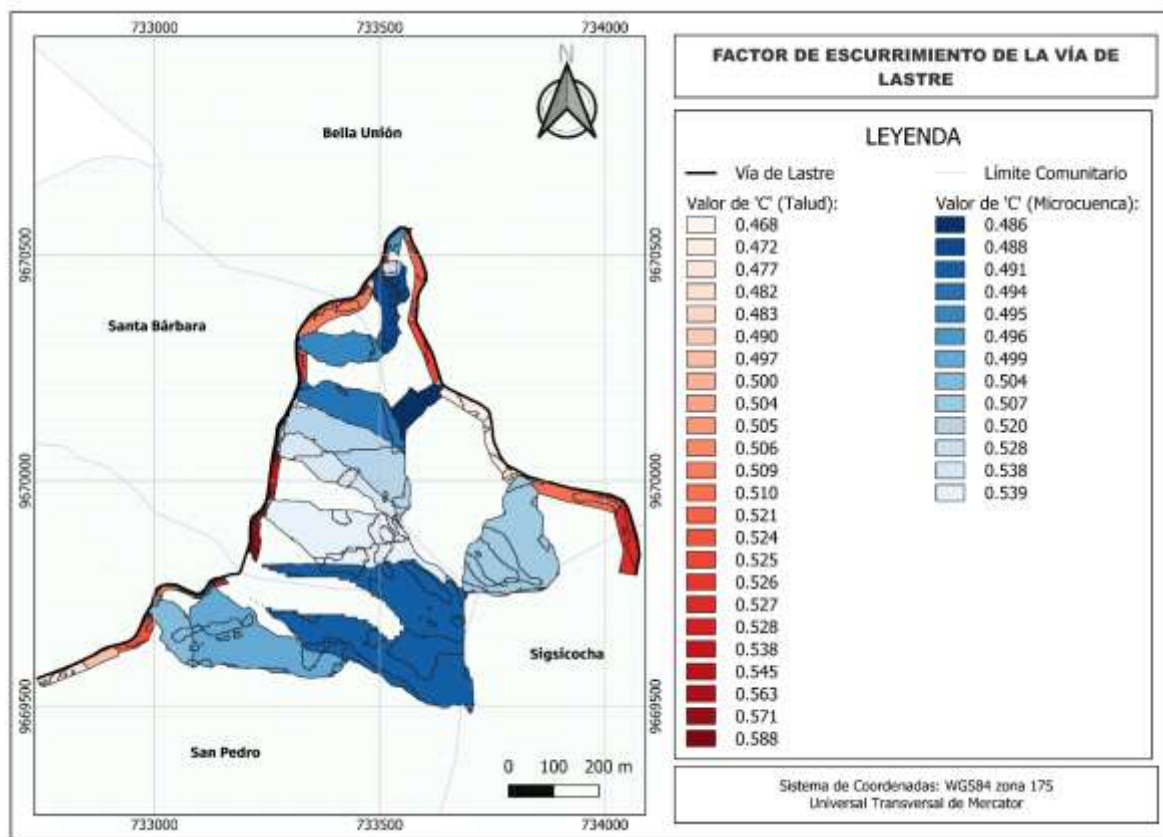
Finalmente, para visualizar la variabilidad de la respuesta hidrológica de la superficie en la zona de estudio, y complementando la metodología de obtención del coeficiente de escorrentía explicada en la sección ‘Estimación del Coeficiente de Escorrentía’, se presenta la Figura 21. Este mapa no solo muestra la distribución espacial de este parámetro, sino que también refleja la integración de los coeficientes de escorrentía finales calculados para cada tipo de superficie de aporte a lo largo del tramo de vía analizado, incluyendo áreas de pavimento y lastre. La información contenida en este mapa es fundamental para la cuantificación precisa de los caudales de escorrentía, siendo un insumo vital para el cálculo de los caudales de diseño.

Figura 21. Mapa del Coeficiente de Escorrentía (Cp) para cada Área de Aporte. (Fuente: Propia)

a). Tramo de Vía Pavimentada



b). Tramo de Vía de Lastre



En este punto, es importante mencionar que los resultados analíticos de la extensión de cada unidad de área y su respectivo coeficiente de escorrentía se muestra en los anexos. Ahora bien, ya que se cuenta con los parámetros clave (coeficiente de escorrentía, intensidad de diseño y área de aporte), se procede a la aplicación del Método Racional para estimar el caudal generado en cada una de las áreas de aporte identificadas.

4.2. Caudal de la Calzada

Una vez explicada la metodología y la formulación matemática empleada para la estimación del caudal de aporte de la calzada hacia las cunetas, se presentan a continuación los resultados de estos cálculos. La Tabla 13, 14 y 15 detalla los valores de caudal para cada tramo analizado, tanto para la vía pavimentada como para la vía de lastre.

4.3. Caudales máximos probables en cunetas

Para el diseño de las cunetas, el caudal máximo probable se determina como la suma directa de dos componentes principales: el caudal de aporte de la calzada y el caudal de aporte proveniente de los taludes adyacentes.

Para el tramo de vía pavimentada, el caudal de diseño de la cuneta del lado derecho se calcula considerando únicamente el aporte de la calzada. Esto se debe a que, tras un análisis detallado del terreno y las visitas de campo, se determina que este lado específico no cuenta con taludes adyacentes que contribuyan con escorrentía superficial. Los valores de caudal obtenidos se muestran en la Tabla 13.

Tramo de análisis				Longitud	Q calzada	Q talud	Q total
Absc. Inicio		Absc. Final		m	l/s	l/s	l/s
0 +	0.00	0 +	98.30	98.3	9.72	0.00	9.72
0 +	98.30	0 +	120.00	21.7	2.15	0.00	2.15
0 +	120.00	0 +	250.70	130.7	12.93	0.00	12.93
0 +	250.70	0 +	279.90	29.2	2.89	0.00	2.89
0 +	279.90	0 +	369.08	89.2	8.82	0.00	8.82
0 +	369.08	0 +	551.45	182.4	18.04	0.00	18.04
0 +	551.45	0 +	743.32	191.9	18.98	0.00	18.98
0 +	743.32	0 +	937.39	194.1	19.20	0.00	19.20
0 +	937.39	1 +	61.29	123.9	12.26	0.00	12.26
1 +	61.29	1 +	266.59	205.3	20.31	0.00	20.31
1 +	266.59	1 +	414.26	147.7	14.61	0.00	14.61
1 +	414.26	1 +	546.86	132.6	13.12	0.00	13.12
1 +	546.86	1 +	746.34	199.5	19.73	0.00	19.73
1 +	746.34	2 +	33.60	287.3	28.42	0.00	28.42

Tabla 13. Caudal total de diseño para cunetas en la vía pavimentada del lado derecho

En contraste, para el tramo de vía pavimentada, el caudal de diseño de la cuneta del lado izquierdo considera la suma del caudal de aporte de la calzada y el caudal proveniente de los taludes adyacentes. La presencia de estos taludes en este lado de la vía implica una mayor área de contribución de escorrentía, lo que exige una mayor capacidad hidráulica en el diseño de la cuneta para manejar eficazmente el volumen total de agua. Los resultados de esta metodología se evidencian en la Tabla 14.

Tramo de análisis				Longitud	Q calzada	Q talud	Q total	Aporta a
Absc. Inicio		Absc. Final		m	l/s	l/s	l/s	alcantarilla
0 +	0.00	0 +	98.30	98.30	9.72	19.55	29.27	1
0 +	98.30	0 +	120.00	21.70	2.15	5.42	7.57	1
0 +	120.00	0 +	250.70	130.70	12.93	47.40	60.33	2
0 +	250.70	0 +	279.90	29.20	2.89	2.24	5.12	2
0 +	279.90	0 +	369.08	89.18	8.82	5.64	14.47	3
0 +	369.08	0 +	551.45	182.37	18.04	64.50	82.55	4
0 +	551.45	0 +	743.32	191.87	18.98	70.53	89.51	5
0 +	743.32	0 +	937.39	194.07	19.20	78.35	97.55	6
0 +	937.39	1 +	61.29	123.90	12.26	72.46	84.72	7

1 +	61.29	1 +	266.59	205.30	20.31	106.04	126.35	7
1 +	266.59	1 +	414.26	147.67	14.61	66.38	80.99	8
1 +	414.26	1 +	546.86	132.60	13.12	51.63	64.75	9
1 +	546.86	1 +	746.34	199.48	19.73	99.71	119.44	10
1 +	746.34	2 +	33.60	287.26	28.42	53.84	82.26	11

Tabla 14. Caudal total de diseño para cunetas en la vía pavimentada del lado izquierdo

Finalmente, para el tramo de vía de lastre, el caudal de diseño de las cunetas se determina considerando los aportes específicos tanto del total de la calzada como del talud derecho, ya que en el lado izquierdo no existen taludes y esta sección no genera contribución adicional de escorrentía (véase la Tabla 15).

Tramo de análisis				Longitud	Q calzada	Q talud	Q total	Aporta a alcantarilla
Absc. Inicio	Absc. Final		m	l/s	l/s	l/s		
2 + 33.60	2 + 140.00		106.40	17.78	35.43	53.21	12	
2 + 140.00	2 + 277.40		137.40	22.97	30.86	53.82	12.A	
2 + 277.40	2 + 398.70		121.30	20.28	45.00	65.28	13	
2 + 398.70	2 + 569.90		171.20	28.62	23.19	51.81	14	
2 + 569.90	2 + 609.40		39.50	6.60	2.19	8.79	14.A	
2 + 609.40	2 + 637.10		27.70	4.63	0.00	4.63	14.B	
2 + 637.10	2 + 648.40		11.30	1.89	17.71	19.60	Puente	
2 + 648.40	2 + 666.80		18.40	3.08	21.58	24.65	Puente	
2 + 666.80	2 + 736.20		69.40	11.60	91.10	102.70	15	
2 + 736.20	2 + 757.70		21.50	3.59	91.10	94.70	15	
2 + 757.70	2 + 797.40		39.70	6.64	11.57	18.20	16	
2 + 797.40	2 + 818.90		21.50	3.59	0.00	3.59	16	
2 + 818.90	2 + 877.20		58.30	9.74	15.93	25.67	17	
2 + 877.20	2 + 939.20		62.00	10.36	15.93	26.29	17	
2 + 939.20	3 + 79.50		140.30	23.45	6.21	29.66	18	
3 + 79.50	3 + 182.70		103.20	17.25	19.18	36.43	19	
3 + 182.70	3 + 210.60		27.90	4.66	4.48	9.14	20	
3 + 210.60	3 + 398.40		187.80	31.39	103.03	134.42	20	
3 + 398.40	3 + 452.10		53.70	8.98	5.77	14.75	21	
3 + 452.10	3 + 578.80		126.70	21.18	5.24	26.42	22	
3 + 578.80	3 + 680.00		101.20	16.92	61.95	78.86	22	
3 + 680.00	3 + 870.70		190.70	31.88	48.30	80.17	22.A	
3 + 870.70	3 + 901.20		30.50	5.10	2.82	7.91	23	
3 + 901.20	4 + 60.00		158.80	26.54	46.54	73.08	23	
4 + 60.00	4 + 217.60		157.60	26.34	35.87	62.21	23.A	
4 + 217.60	4 + 253.50		35.90	6.00	15.29	21.29	24	
4 + 253.50	4 + 442.30		188.80	31.56	106.58	138.14	24	
4 + 442.30	4 + 622.00		179.70	30.04	96.80	126.84	N/A	

Tabla 15. Caudal total de diseño para cunetas en la vía lastrada.

4.4. Caudales máximos probables en alcantarillas

Para el diseño de las alcantarillas, el caudal máximo probable se determina como la suma del caudal de diseño de las cunetas que confluyen hacia el punto de la alcantarilla y el caudal de aporte generado por la microcuenca asociada a esa misma sección. Esta integración de ambos caudales es fundamental, ya que representa el volumen total de escorrentía superficial que la alcantarilla debe ser capaz de conducir eficientemente, garantizando así su capacidad hidráulica y el correcto funcionamiento del sistema de drenaje vial.

Para las alcantarillas existentes, del tramo de vía pavimentado, el caudal de diseño se muestra en la Tabla 16. De esta tabla se puede observar que las alcantarillas 5, 8 y 10 son las que se proyecta que recibirán el mayor caudal, lo cual concuerda con las observaciones en campo. Durante las visitas, se constató que estas alcantarillas poseen una estructura de entrada tipo ala, lo que les permite captar no solo el agua de las cunetas, sino también directamente de los cauces naturales. Esta coincidencia entre los datos obtenidos y la información recopilada en campo refuerza la validez de los resultados.

Abscisa			Alcantarilla	Q mic.cuenca l/s	Q cuneta l/s	Q total l/s	Q total m3/s
0	+	0.00	Inicio del proyecto				
0	+	98.30	1	543.77	36.84	580.61	0.58
0	+	250.70	2	663.95	65.45	729.40	0.73
0	+	279.90	3	0.00	14.47	14.47	0.01
0	+	369.10	4	1285.41	82.55	1367.95	1.37
0	+	551.50	5	2208.42	89.51	2297.93	2.30
0	+	743.32	6	221.14	97.55	318.70	0.32
1	+	61.30	7	128.01	211.07	339.08	0.34
1	+	266.60	8	2786.72	80.99	2867.71	2.87
1	+	414.30	9	1273.65	64.75	1338.40	1.34
1	+	546.90	10	2611.86	119.44	2731.31	2.73
1	+	746.30	11	1177.81	82.26	1260.07	1.26

Tabla 16. Caudal total de diseño para alcantarillas en la vía pavimentada.

Mientras que, para las alcantarillas de la vía de lastre, el caudal de diseño se presenta en la Tabla 17. Aquí se observa que las alcantarillas existentes en la vía de lastre presentan caudales bajos. Esto es consistente con el hecho de que los tubos no son de gran tamaño, lo que limita su capacidad para transportar un flujo considerable de agua. Es probable que esta situación se deba a la falta de un análisis adecuado durante la colocación inicial de las alcantarillas, dado que la vía carece de un trazado geométrico formal.

Abscisa			Alcantarilla	Q mic.cuenca	Q cuneta	Q total	Q total	
				l/s	l/s	l/s	m3/s	
2	+	33.60	12	0.00	53.21	53.21	0.05	
2	+	140.00	12.1	0.00	53.82	53.82	0.05	
2	+	277.40	13	0.00	65.28	65.28	0.07	
2	+	398.70	14	184.66	51.81	236.47	0.24	
2	+	609.40	14.1	733.37	13.42	746.78	0.75	
2	+	736.20	15	0.00	197.40	197.40	0.20	
2	+	797.40	16	772.09	21.79	793.88	0.79	
2	+	877.20	17	0.00	51.96	51.96	0.05	
2	+	939.20	18	293.20	29.66	322.86	0.32	
3	+	79.50	19	345.46	36.43	381.90	0.38	
3	+	210.60	20	219.60	143.56	363.17	0.36	
3	+	452.10	21	216.04	14.75	230.79	0.23	
3	+	578.80	22	36.90	105.28	142.18	0.14	
3	+	680.00	22.1	0.00	80.17	80.17	0.08	
3	+	901.20	23	124.15	81.00	205.14	0.21	
4	+	60.00	23.1	0.00	62.21	62.21	0.06	
4	+	253.50	24	762.30	159.43	921.73	0.92	
4	+	622.00	Fin del proyecto					

Tabla 17. Caudal total de diseño para alcantarillas en la vía lastrada.

Por esta razón, se ha propuesto la instalación de nuevas alcantarillas. Esta medida busca solucionar varios problemas: primero, algunas alcantarillas existentes estaban recibiendo caudales excesivamente grandes, lo que provocaba su obstrucción y, en consecuencia, el debilitamiento del suelo de la vía. Segundo, la propuesta también aborda la presencia de tramos demasiado largos entre alcantarillas, una condición que no cumple con la normativa vigente.

4.5. Caudal de diseño en subdrenes.

Tramo de análisis				Q inf.	Q n.fr.	Q diseño	Q diseño
Absc. Inicio	Absc. Final			l/s	l/s	l/s	m3/s
1 + 385	1 + 414.85			0.119	0.070	0.189	0.000189
1 + 414.85	1 + 450			0.140	0.083	0.223	0.000223

Tabla 18. Caudales de diseño para subdrenes.

Como se observa en la Tabla 18, inicialmente se obtienen dos caudales para cada tramo: el caudal de infiltración y el caudal de abatimiento del nivel freático. El caudal de diseño

corresponde a la suma de ambos caudales, expresada posteriormente en m³/s para el diseño de los subdrenes.

4.6. Diseño de subdrén.

Tramo de análisis				Diam mm	Rugosidad (n)	pendiente %	Q diseño m3/s	y m	Vel. m/s	Radio Hidráulico
Absc. Inicio	Absc. Final									
1 +	385.00	1 +	414.85	160	0.009	0.02	0.000189	0.0082	0.482	0.0054
1 +	414.85	1 +	450.00	160	0.009	0.02	0.000223	0.0089	0.506	0.0058

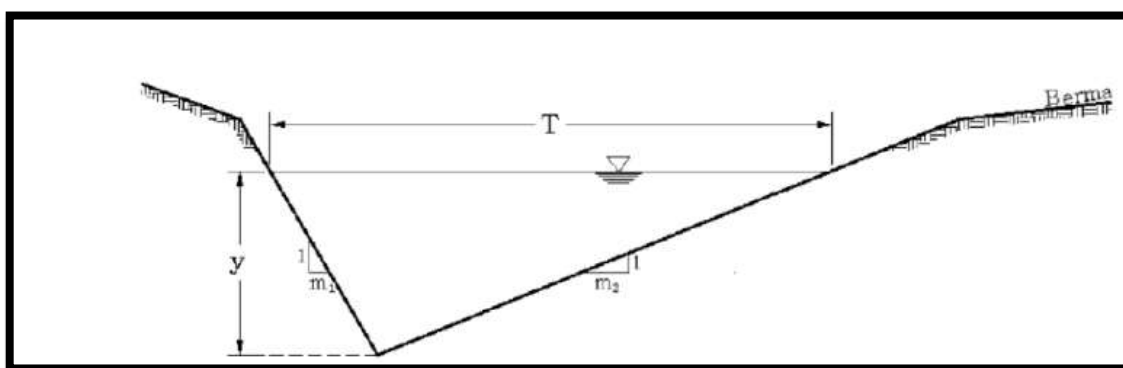
Tabla 19. Diseño y verificación de subdrenes.

En este caso, se optó por utilizar un diámetro de 160 mm y una pendiente del 2% para ambos tramos. Empleando la ecuación de Manning, se comprobó que la tubería propuesta tiene una capacidad suficiente para satisfacer la demanda del caudal de diseño.

4.7. Diseño de cunetas.

Para el diseño de las cunetas, se siguieron los lineamientos metodológicos de la sección [3.3.1]. A partir de los cálculos, se determinaron los parámetros esenciales como el caudal y la pendiente, los cuales sirvieron de base para proponer una geometría específica para cada tipo de cuneta en estudio. Las dimensiones detalladas están relacionadas al modelo tipo de la Figura 22, tanto las ubicadas en el lado derecho e izquierdo del tramo pavimentado como las de la vía de lastre, presentadas en la Tabla 20 y se visualizan en los planos correspondientes en la parte de anexos.

Figura 22. Sección Transversal de cuneta triangular asimétrica. (Fuente: Cárdenas Quintero & Marbello, 2011)



Ubicación de la estructura	Dimensiones Propuestas			
	T (m)	Y (m)	m1	m2
Lado izquierdo de la Vía Pavimentada	0.60	0.25	0.2	2.2
Lado derecho de la Vía Pavimentada	0.60	0.15	0	4

Lado derecho de la Vía de Lastre	0.90	0.30	0.5	2.5
----------------------------------	------	------	-----	-----

Tabla 20. Diseño de cunetas del lado derecho para la vía pavimentada

Tramo de análisis				Q diseño	So	Q max	V max (m/s)	Qmax>Qdis	Vmax<4.5m/s
Absc. Inicio		Absc. Final		l/s	%	l/s	m/s	Cumple	Cumple
0 +	0.00	0 +	98.30	9.72	4.78%	105.99	0.22	Sí	Sí
0 +	98.30	0 +	120.00	2.15	0.92%	46.53	0.05	Sí	Sí
0 +	120.00	0 +	250.70	12.93	1.53%	59.96	0.29	Sí	Sí
0 +	250.70	0 +	279.90	2.89	0.68%	40.11	0.06	Sí	Sí
0 +	279.90	0 +	369.08	8.82	2.47%	76.13	0.20	Sí	Sí
0 +	369.08	0 +	551.45	18.04	1.86%	66.18	0.40	Sí	Sí
0 +	551.45	0 +	743.32	18.98	3.18%	86.42	0.42	Sí	Sí
0 +	743.32	0 +	937.39	19.20	4.53%	103.21	0.43	Sí	Sí
0 +	937.39	1 +	61.29	12.26	4.44%	102.12	0.27	Sí	Sí
1 +	61.29	1 +	266.59	20.31	1.70%	63.29	0.45	Sí	Sí
1 +	266.59	1 +	414.26	14.61	2.03%	69.09	0.32	Sí	Sí
1 +	414.26	1 +	546.86	13.12	2.64%	78.75	0.29	Sí	Sí
1 +	546.86	1 +	746.34	19.73	6.72%	125.63	0.44	Sí	Sí
1 +	746.34	2 +	33.60	28.42	5.22%	110.76	0.63	Sí	Sí

Tabla 21. Diseño de cunetas del lado derecho para la vía pavimentada.

Tramo de análisis				Q diseño	So	Q max	V max (m/s)	Qmax>Qdis	Vmax<4.5m/s
Absc. Inicio		Absc. Final		l/s	%	l/s	m/s	Cumple	Cumple
0 +	0.00	0 +	98.30	29.27	4.78%	230.52	3.07	Sí	Sí
0 +	98.30	0 +	120.00	7.57	0.92%	101.21	1.35	Sí	Sí
0 +	120.00	0 +	250.70	60.33	1.53%	130.41	1.74	Sí	Sí
0 +	250.70	0 +	279.90	5.12	0.68%	87.25	1.16	Sí	Sí
0 +	279.90	0 +	369.08	14.47	2.47%	165.59	2.21	Sí	Sí
0 +	369.08	0 +	551.45	82.55	1.86%	143.95	1.92	Sí	Sí
0 +	551.45	0 +	743.32	89.51	3.18%	187.98	2.51	Sí	Sí
0 +	743.32	0 +	937.39	97.55	4.53%	224.49	2.99	Sí	Sí
0 +	937.39	1 +	61.29	84.72	4.44%	222.12	2.96	Sí	Sí
1 +	61.29	1 +	266.59	126.35	1.70%	137.65	1.84	Sí	Sí
1 +	266.59	1 +	414.26	80.99	2.03%	150.27	2.00	Sí	Sí
1 +	414.26	1 +	546.86	64.75	2.64%	171.28	2.28	Sí	Sí
1 +	546.86	1 +	746.34	119.44	6.72%	273.24	3.64	Sí	Sí
1 +	746.34	2 +	33.60	82.26	5.22%	240.91	3.21	Sí	Sí

Tabla 22. Diseño de cunetas del lado izquierdo para la vía pavimentada.

Tramo de análisis				Q diseño	So	Q max	V max (m/s)	Qmax>Qdis	Vmax<1.25m/s
Absc. Inicio		Absc. Final		l/s	%	l/s	m/s	Cumple	Cumple
2 +	33.60	2 +	140.00	53.21	8.93%	485.48	0.39	Sí	Sí
2 +	140.00	2 +	277.40	53.82	13.03%	586.43	0.40	Sí	Sí

2 +	277.40	2 +	398.70	65.28	4.62%	349.10	0.48	Sí	Sí
2 +	398.70	2 +	569.90	51.81	6.78%	422.92	0.38	Sí	Sí
2 +	569.90	2 +	609.40	8.79	1.77%	216.29	0.07	Sí	Sí
2 +	609.40	2 +	637.10	4.63	1.44%	195.24	0.03	Sí	Sí
2 +	637.10	2 +	648.40	19.60	0.88%	152.84	0.15	Sí	Sí
2 +	648.40	2 +	666.80	24.65	2.72%	267.83	0.18	Sí	Sí
2 +	666.80	2 +	736.20	102.70	2.02%	230.76	0.76	Sí	Sí
2 +	736.20	2 +	757.70	94.70	0.50%	114.89	0.70	Sí	Sí
2 +	757.70	2 +	797.40	18.20	2.52%	257.86	0.13	Sí	Sí
2 +	797.40	2 +	818.90	3.59	0.50%	114.89	0.03	Sí	Sí
2 +	818.90	2 +	877.20	25.67	2.92%	277.44	0.19	Sí	Sí
2 +	877.20	2 +	939.20	26.29	0.50%	114.89	0.19	Sí	Sí
2 +	939.20	3 +	79.50	29.66	2.35%	249.18	0.22	Sí	Sí
3 +	79.50	3 +	182.70	36.43	4.26%	335.48	0.27	Sí	Sí
3 +	182.70	3 +	210.60	9.14	2.51%	257.35	0.07	Sí	Sí
3 +	210.60	3 +	398.40	134.42	6.92%	427.47	1.00	Sí	Sí
3 +	398.40	3 +	452.10	14.75	5.21%	371.00	0.11	Sí	Sí
3 +	452.10	3 +	578.80	26.42	7.26%	437.81	0.20	Sí	Sí
3 +	578.80	3 +	680.00	78.86	9.39%	497.80	0.58	Sí	Sí
3 +	680.00	3 +	870.70	80.17	6.71%	420.93	0.59	Sí	Sí
3 +	870.70	3 +	901.20	7.91	1.64%	208.03	0.06	Sí	Sí
3 +	901.20	4 +	60.00	73.08	3.53%	305.11	0.54	Sí	Sí
4 +	60.00	4 +	217.60	62.21	5.14%	368.34	0.46	Sí	Sí
4 +	217.60	4 +	253.50	21.29	1.67%	210.04	0.16	Sí	Sí
4 +	253.50	4 +	442.30	138.14	4.13%	330.24	1.02	Sí	Sí
4 +	442.30	4 +	622.00	126.84	7.12%	433.62	0.94	Sí	Sí

Tabla 23. Diseño de cunetas para la vía lastrada.

En las tablas 21, 22 y 23 se indica que las cunetas, con las dimensiones propuestas en la tabla 20, cumplen con las verificaciones de caudal y velocidad máxima para cada tramo. Esto confirma su capacidad para manejar eficazmente la escorrentía superficial y garantizar un adecuado desempeño hidráulico.

4.8. Diseño y Evaluación de alcantarillas.

Primeramente, se exponen las tablas 24 y 25, las cuales muestran las alcantarillas existentes junto con sus características observadas en campo antes de la validación y diseño.

Abscisa	No.	Q. diseño	n	Longitud	Pendiente	D
		m ³ /s	Manning	m	%	Mm
0 + 98.30	1	0.58	0.024	13.31	8.10%	1200
0 + 250.70	2	0.73	0.024	9.09	1.30%	1200
0 + 279.90	3	0.01	0.014	7.95	7.48%	400
0 + 369.10	4	1.37	0.014	25.73	3.03%	600

0 +	551.50	5	2.30	0.024	8.67	3.34%	1200
0 +	743.32	6	0.32	0.024	21.31	2.86%	1200
1 +	61.30	7	0.34	0.024	9.09	4.51%	1200
1 +	266.60	8	2.87	0.024	9.00	4.56%	1200
1 +	414.30	9	1.34	0.024	11.03	2.90%	1200
1 +	546.90	10	2.73	0.024	8.37	4.42%	1200
1 +	746.30	11	1.26	0.024	8.20	2.44%	1200

Tabla 24. Características de las alcantarillas existentes en la vía pavimentada

Abscisa	No.	Q. diseño	n	Longitud	Pendiente	D	
		m3/s	Manning	m	%	M	
2 +	33.60	12	0.05	0.014	13.57	2.90%	400
2 +	277.40	13	0.07	0.014	7.99	7.50%	600
2 +	398.70	14	0.24	0.014	7.76	3.20%	400
2 +	736.20	15	0.20	0.014	8.03	6.20%	600
2 +	797.40	16	0.79	0.014	8.48	5.31%	400
2 +	877.20	17	0.05	0.014	6.50	8.50%	400
2 +	939.20	18	0.32	0.014	6.89	8.60%	400
3 +	79.50	19	0.38	0.014	7.68	2.99%	400
3 +	192.33	20	0.36	0.014	8.32	7.69%	600
3 +	452.10	21	0.23	0.014	6.95	4.32%	400
3 +	565.39	22	0.14	0.014	11.26	5.24%	600
3 +	936.42	23	0.21	0.014	7.27	5.36%	400
4 +	253.50	24	0.92	0.014	6.62	6.19%	400

Tabla 25. Características de las alcantarillas existentes en la vía lastrada.

Ahora, una vez realizada la evaluación y el diseño de las alcantarillas, se encontró que, para la vía pavimentada, se deben agregar dos alcantarillas debido a que las distancias entre las existentes exceden los 200 metros. Sin embargo, se evita hacer esta propuesta, ya que los costos serían muy elevados y, además, la vía está recién pavimentada.

Abscisa	No.	Q. diseño	n	Longitud	Pendiente	D	Enrocado	
		m3/s	Manning	m	%	mm		
0 +	98.30	1	0.58	0.024	13.31	8.10%	1200	NO
0 +	250.70	2	0.73	0.024	9.09	1.30%	1200	NO
0 +	279.90	3	0.01	0.014	7.95	7.48%	400	NO
0 +	369.10	4	1.37	0.014	25.73	1.17%	1000	NO
0 +	551.50	5	2.30	0.024	8.67	2.02%	1200	NO
0 +	743.32	6	0.32	0.024	21.31	2.86%	1200	NO
1 +	61.30	7	0.34	0.024	9.09	4.51%	1200	NO
1 +	266.60	8	2.87	0.024	9.00	2.84%	1200	NO
1 +	414.30	9	1.34	0.024	11.03	2.90%	1200	NO
1 +	546.90	10	2.73	0.024	8.37	2.69%	1200	NO
1 +	746.30	11	1.26	0.024	8.20	2.44%	1200	NO

Tabla 26. *Tabla 26. Validación y diseño de alcantarillas para la vía pavimentada.*

Como se observa en la tabla 26, los cambios están identificados con las celdas resaltadas en azul. Por lo que, se propone modificar el diámetro de la alcantarilla 4, aumentando de 600 mm a 1000 mm, así como ajustar las pendientes de las alcantarillas 5, 8 y 10 para disminuir las velocidades de flujo y así evitar erosión en el material.

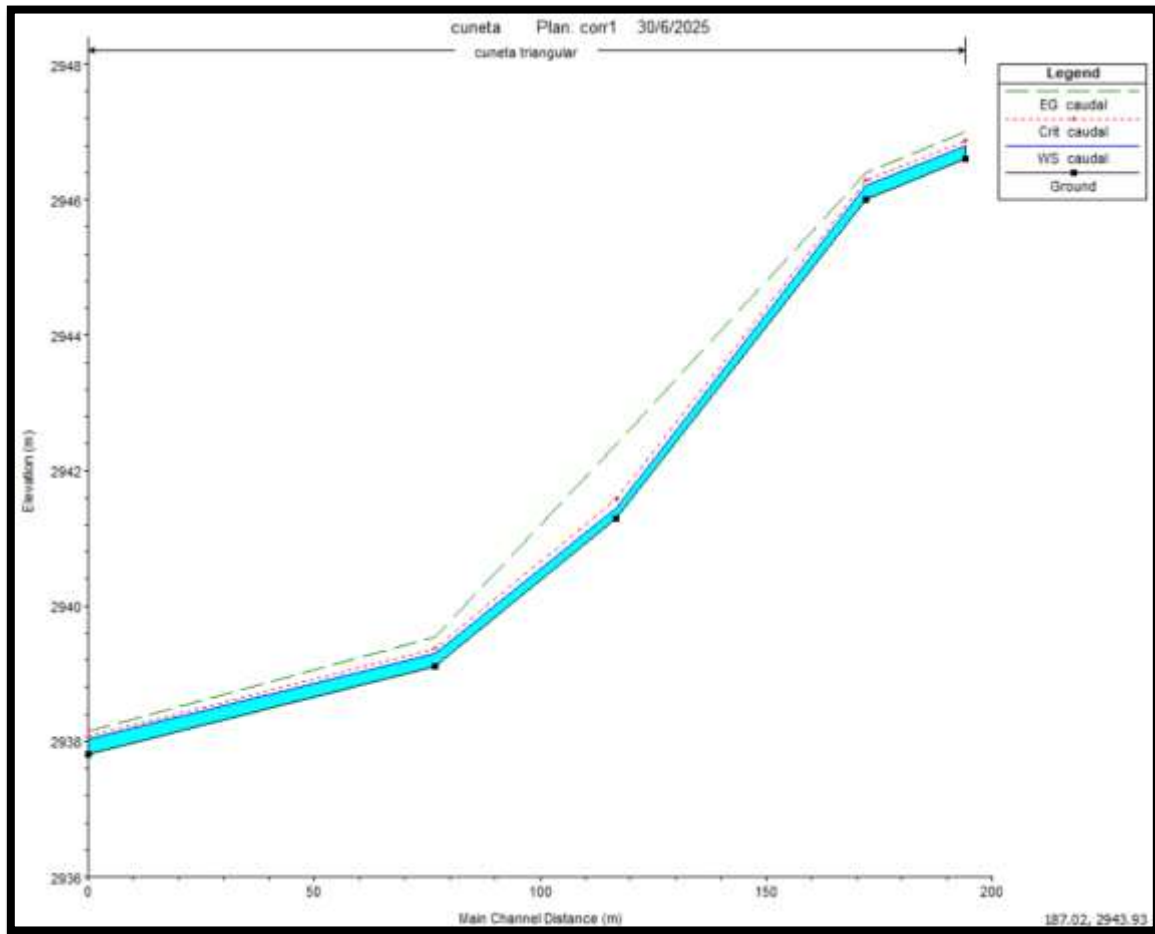
Abscisa			No.	Q. diseño m3/s	n Manning	Longitud m	Pendiente %	D m	Enrocado
2	+	33.60	12	0.05	0.014	13.57	2.90%	400	NO
2	+	140.00	12.1	0.05	0.014	8.50	4.00%	600	NO
2	+	277.40	13	0.07	0.014	7.99	7.50%	600	NO
2	+	398.70	14	0.24	0.014	7.76	3.20%	400	NO
2	+	609.40	14.1	0.75	0.014	8.25	1.82%	600	NO
2	+	736.20	15	0.20	0.014	8.03	6.20%	600	NO
2	+	797.40	16	0.79	0.014	8.48	2.00%	800	NO
2	+	877.20	17	0.05	0.014	6.50	8.50%	400	NO
2	+	939.20	18	0.32	0.014	6.89	3.63%	600	NO
3	+	79.50	19	0.38	0.014	7.68	2.99%	600	NO
3	+	210.60	20	0.36	0.014	8.32	3.12%	600	NO
3	+	452.10	21	0.23	0.014	6.95	4.32%	400	NO
3	+	578.80	22	0.14	0.014	11.26	5.24%	600	NO
3	+	680.00	22.1	0.08	0.014	8.30	3.80%	600	NO
3	+	901.20	23	0.21	0.014	7.27	5.36%	400	NO
4	+	60.00	23.1	0.06	0.014	8.40	3.40%	600	NO
4	+	253.50	24	0.92	0.014	6.62	1.51%	800	NO

Tabla 27. *Validación y diseño de alcantarillas para la vía lastrada.*

Finalmente, en la Tabla 27, al igual que en la anterior, los cambios están identificados con las celdas resaltadas en azul, mientras que las filas resaltadas en color plomo corresponden a las nuevas alcantarillas propuestas. Esta tabla indica que se deben agregar 4 alcantarillas (12.1, 14.1, 22.1 y 23.1), reubicar 3 alcantarillas (20, 22 y 23), ajustar la pendiente de 4 alcantarillas (16, 18, 20 y 24) y aumentar el diámetro de 4 alcantarillas (16, 18, 19 y 24).

4.9. Modelación de Cuneta

Figura 23. Perfiles de flujo generados en HEC-RAS del tramo de análisis de la cuneta



En la Figura 23 se presentan los perfiles de flujo generados en conjunto con su línea de energía, calado crítico, calado del flujo y superficie del canal. Como se observa, para cada sección del tramo modelado, existe un perfil de flujo diferente dependiendo de la pendiente.

Figura 24. Sección transversal en la abscisa 0+937.40 del modelamiento del flujo en la cuneta

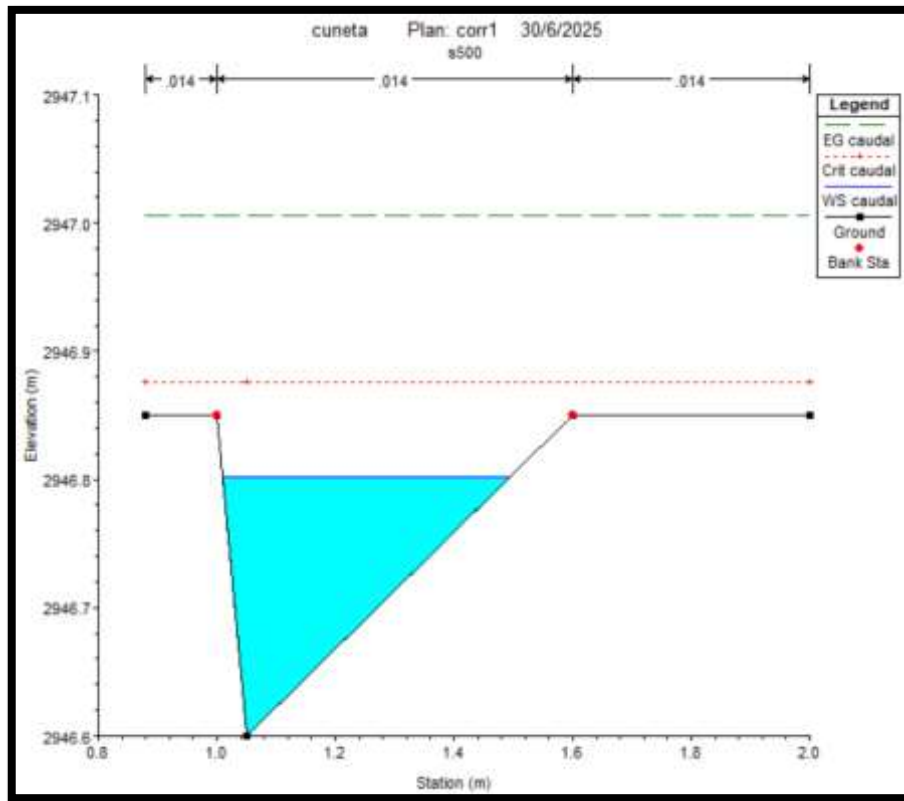


Figura 25. Sección transversal en la abscisa 0+915.30 del modelamiento del flujo en la cuneta

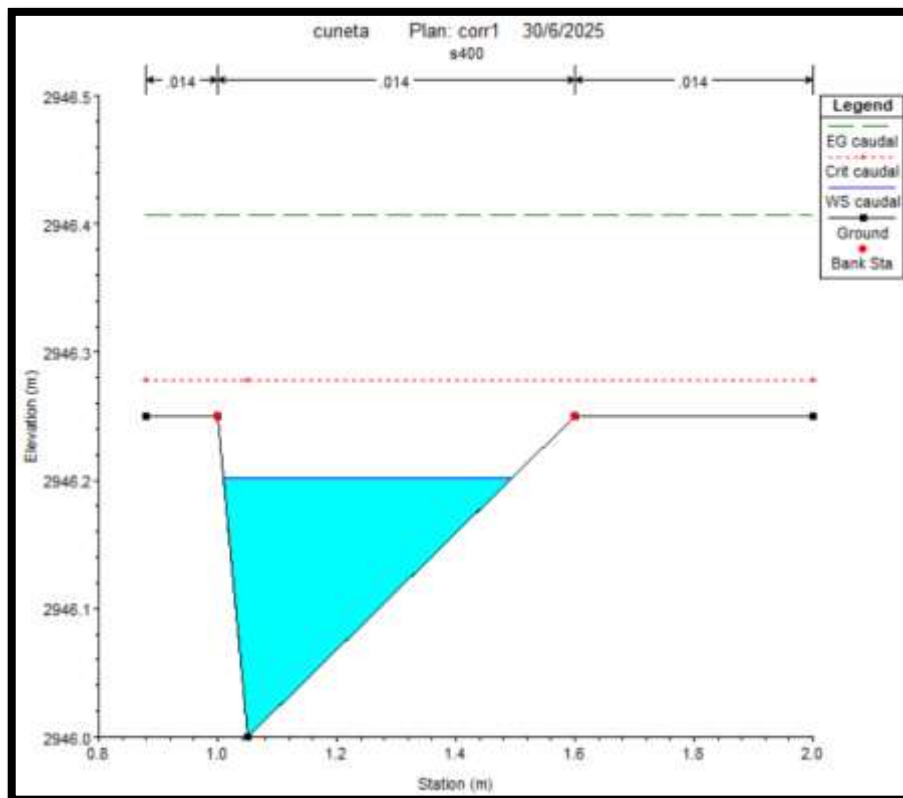


Figura 26. Sección transversal en la abscisa 0+860.00 del modelamiento del flujo en la cuneta

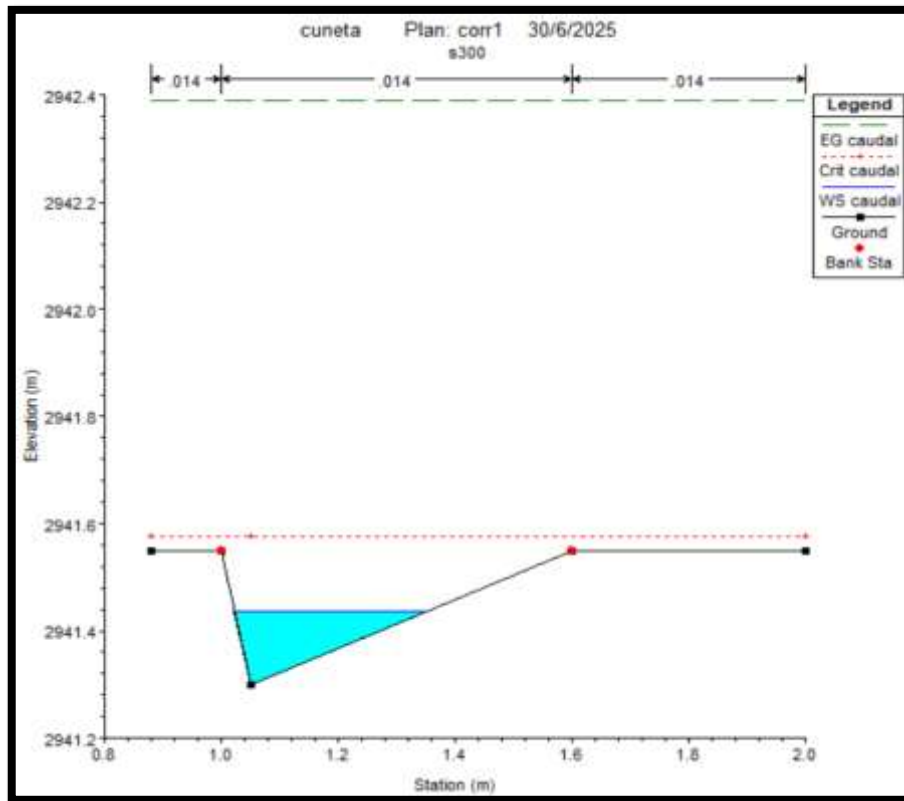


Figura 27. Sección transversal en la abscisa 0+820.00 del modelamiento del flujo en la cuneta

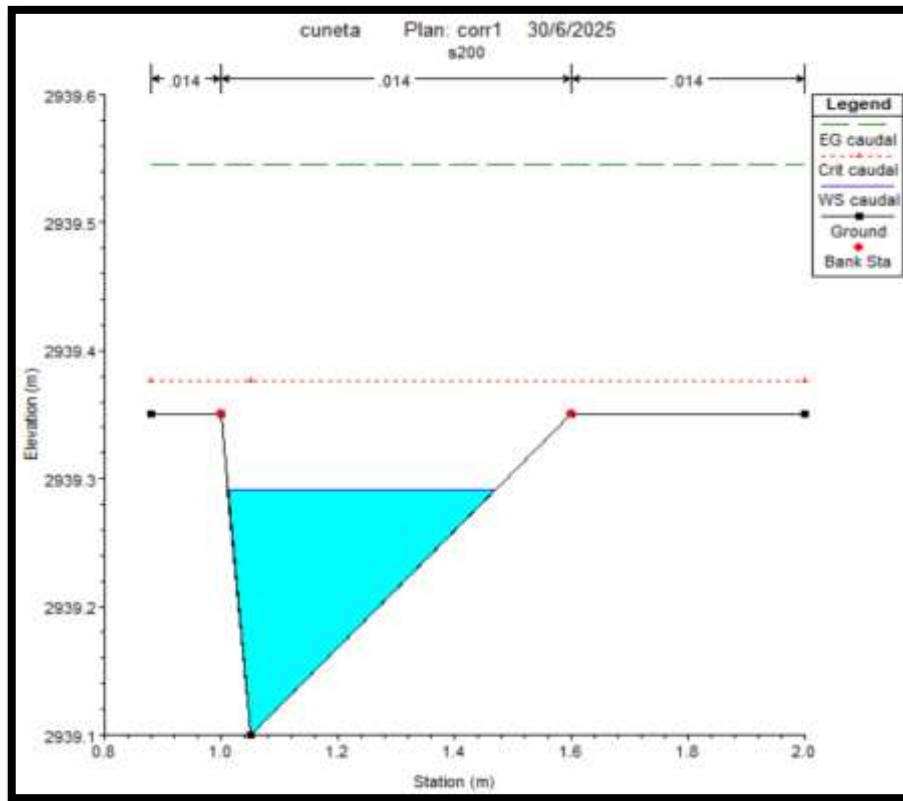
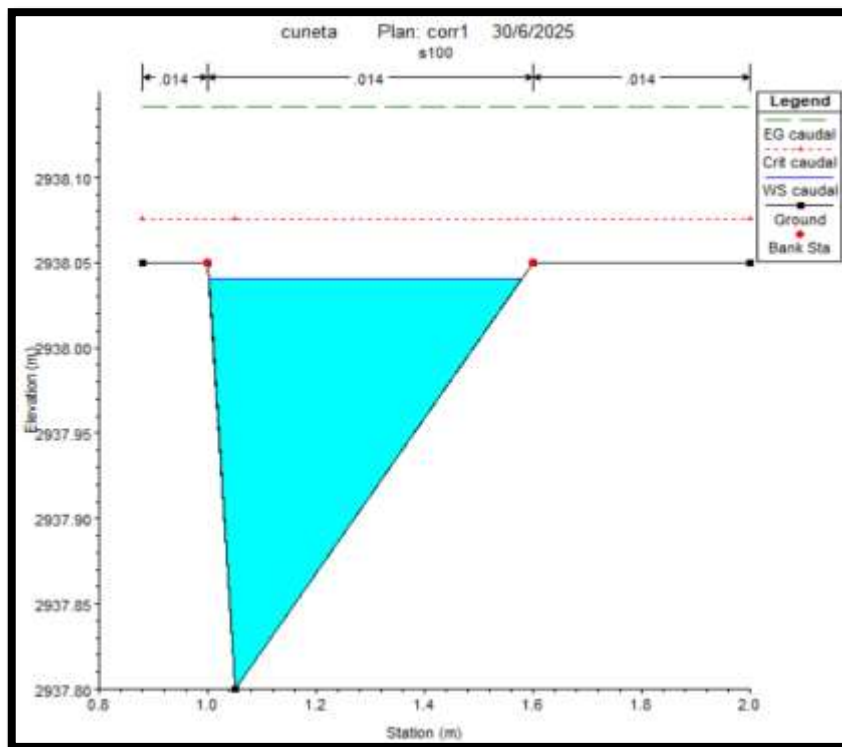


Figura 28. Sección transversal en la abscisa 0+743.30 del modelamiento del flujo en la cuneta



En las Figuras 24, 25, 26, 27 y 28 se presentan las secciones transversales para cada sección en el tramo de análisis indicando su línea de energía, calado crítico, calado del flujo, superficie del canal y las estaciones de banca de la cuneta.

Figura 29. Detalle de los resultados del modelamiento generados por HEC-RAS

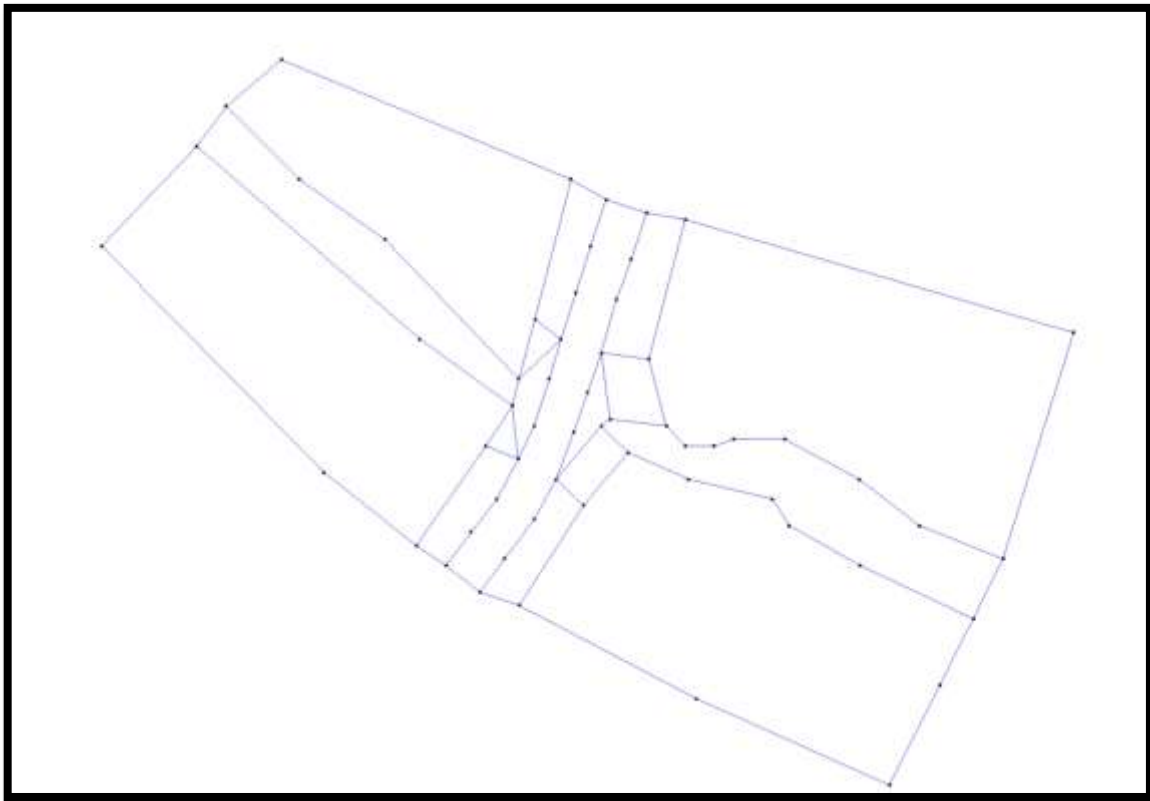
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Max Chl Dpth (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
triangular	500	caudal	0.0976	0.2015	0.0271	2.0026	0.0487	0.4834	2.0147
triangular	400	caudal	0.0976	0.2015	0.0271	2.0050	0.0487	0.4829	2.0171
triangular	300	caudal	0.0976	0.1372	0.2101	4.3190	0.0226	0.3292	5.2653
triangular	200	caudal	0.0976	0.1908	0.0362	2.2339	0.0437	0.4577	2.3096
triangular	100	caudal	0.0976	0.2408	0.0105	1.4024	0.0696	0.5777	1.2906

Finalmente, en la Figura 29 se presentan con mayor detalle los resultados más relevantes del modelamiento de la cuneta, para facilitar una mejor comprensión del comportamiento del flujo en cada sección.

4.10. Modelación de Alcantarillas

Para la realización de la modelación hidráulica, la geometría del elemento es el punto de partida fundamental. En el contexto de este estudio, se procedió a la inserción de la alcantarilla en el software IBER, definiendo su configuración espacial y sus características dimensionales precisas. La Figura 30 muestra esta geometría insertada, otorgando una representación digital de la estructura tal como fue preparada para los cálculos de flujo, lo cual es esencial para comprender los resultados de la simulación.

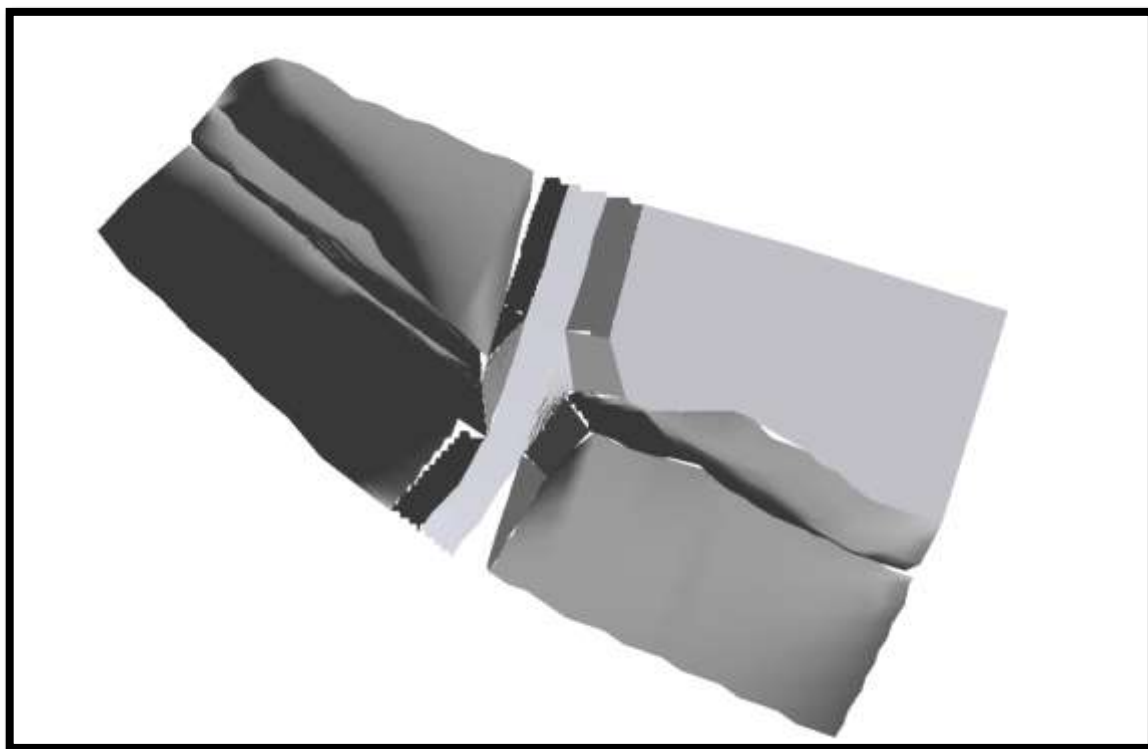
Figura 30. Geometría utilizada en IBER para la simulación de la Alcantarilla 10



Tras la inserción de la geometría correspondiente, el siguiente paso de la preparación del modelo en IBER es la creación de las superficies correspondientes. Estas superficies son esenciales para definir los límites del dominio de cálculo y para la correcta interacción del flujo con la estructura.

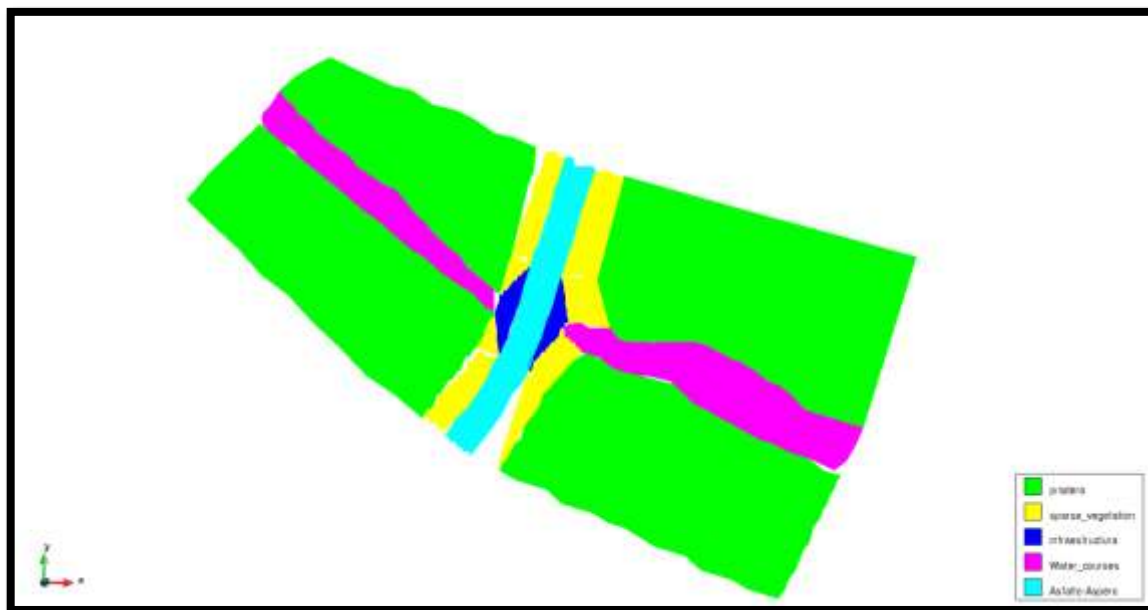
La Figura 31 ilustra estas superficies generadas, mostrando cómo se delimitan las áreas que el software utilizará para discretizar el espacio y aplicar las condiciones hidráulicas.

Figura 31. Superficies generadas en IBER, para la simulación



De la misma manera, con las superficies del modelo ya definidas, el siguiente paso fue la asignación de los valores del coeficiente de Manning (n) a cada una de ellas. Esta parametrización es indispensable para representar la rugosidad hidráulica del terreno y de la estructura, influyendo directamente en la resistencia al flujo. La Figura 32 presenta las zonas delimitadas con sus respectivos coeficientes de Manning asignados, mostrando la distribución espacial de la rugosidad utilizada en la simulación.

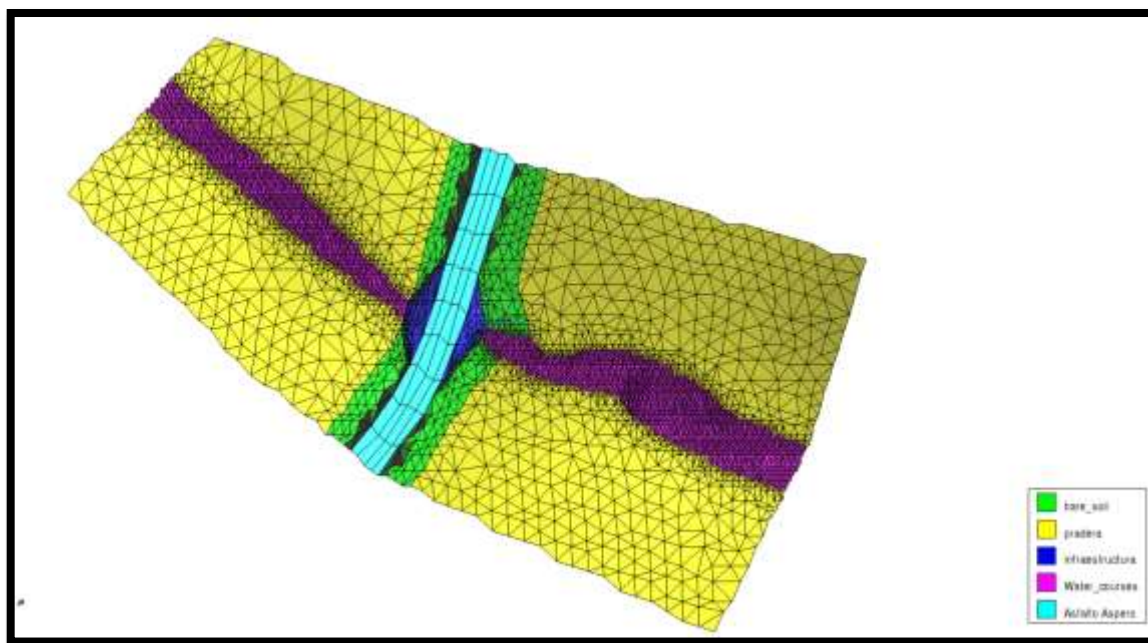
Figura 32. Asignación del Coeficiente de Manning para la zona de análisis



Una vez asignados los coeficientes de Manning a las superficies, el paso fundamental para la simulación numérica es la generación de la malla. Esta discretización del dominio es esencial para la resolución de las ecuaciones de flujo en IBER. La Figura 33 exhibe la malla final generada, mostrando la distribución y el tamaño de los elementos que serán empleados en los cálculos, garantizando la precisión necesaria en las zonas de interés y la eficiencia computacional del modelo.

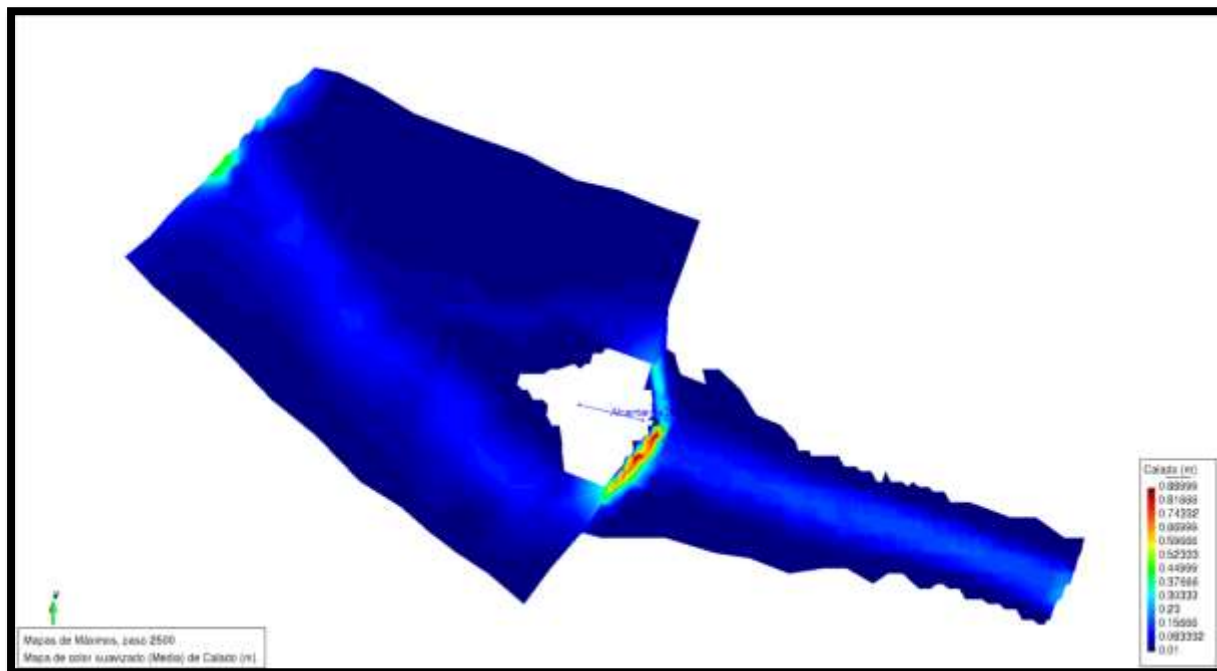
Figura 33. Malla generada en IBER, para la simulación del comportamiento hidráulico de la Alcantarilla

10



Con el mallado finalizado, se procedió a la ejecución del programa, de la cual se obtiene la simulación del comportamiento hidráulico de la zona de estudio bajo las condiciones definidas. La Figura 34 muestra el flujo del caudal a través del área modelada, presentando visualmente cómo el agua se distribuye y avanza sobre la topografía y la estructura de la alcantarilla, reflejando los resultados de calados obtenidos en la simulación.

Figura 34. Simulación del calado Máximo producido en la entrada de la Alcantarilla 10



El análisis comparativo entre los resultados de la simulación y los cálculos hidráulicos para la alcantarilla 10, revela una concordancia significativa en el comportamiento del flujo en la alcantarilla. La simulación en IBER predice un calado crítico máximo de 0.889 m en el ingreso de la estructura. Este valor es muy cercano al calado máximo de 0.911 m obtenido mediante los cálculos teóricos, específicamente para un perfil de flujo tipo S2. Dada la proximidad de ambos resultados, y considerando el diámetro de la alcantarilla de 1.2 m, se confirma que ambos métodos indican un flujo subcrítico en la entrada, pero con calados próximos a la capacidad máxima de la alcantarilla. Esta validación cruzada entre la modelación numérica y las ecuaciones fundamentales fortalece la confiabilidad de los resultados obtenidos para el diseño y la evaluación del sistema.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El diseño integral del sistema de drenaje para la vía que conecta las comunidades de Bella Unión, Santa Bárbara, San Pedro y Sigsicocha en la parroquia Santa Ana es fundamental para garantizar la protección y funcionalidad de la infraestructura vial. Un sistema de drenaje adecuado previene encharcamientos, deslizamientos y el deterioro de la vía, asegurando la transitabilidad y la seguridad de los usuarios.

La aplicación de principios fundamentales de hidráulica e hidrología permitió dimensionar correctamente los elementos del sistema de drenaje, tales como cunetas, alcantarillas y subdrenes. El análisis hidrológico permitió identificar las cuencas de drenaje y estimar los caudales máximos esperados, mientras que el levantamiento topográfico aportó información esencial para el diseño técnico.

Se propusieron dimensiones adecuadas para las cunetas en las vías pavimentada y lastrada y se analizó la necesidad de redimensionar, reubicar y añadir alcantarillas para asegurar la capacidad hidráulica en todo el tramo de estudio.

Se recomienda la implementación de subdrenes en los sectores identificados como críticos para el manejo eficiente de los caudales superficiales y subterráneos. Esto contribuirá a la preservación de la estructura vial y a la prolongación de la vida útil de la carretera.

El modelamiento hidráulico realizado con HEC-RAS fue fundamental para comprender los perfiles de flujo que se generan cuando la cuneta cambia de pendiente. Además, permitió verificar la capacidad de las cunetas, confirmando que el diseño tradicional es adecuado.

El estudio resalta la importancia de un diseño de drenaje adecuado no solo para la protección de la infraestructura, sino también para la seguridad vial, la conservación ambiental y el desarrollo sostenible de las comunidades involucradas. Un sistema de drenaje correctamente dimensionado y ejecutado es esencial para el funcionamiento y la durabilidad de las vías rurales

5.2. Recomendaciones

Se recomienda que las autoridades locales y los organismos responsables de la infraestructura vial prioricen la implementación del sistema de drenaje propuesto, dando especial énfasis al mantenimiento periódico de cunetas y alcantarillas, realizando inspecciones regulares para identificar posibles obstrucciones o daños, especialmente en épocas de lluvias intensas, con el fin de garantizar la funcionalidad y durabilidad de la vía. Finalmente, se sugiere socializar con las comunidades beneficiadas la importancia del cuidado y la protección de las obras de drenaje, promoviendo una gestión participativa que contribuya al desarrollo sostenible y a la seguridad vial en la parroquia Santa Ana.

Referencias

- ALLPE. s. f. «ESTUDIOS HIDROLÓGICOS - EMPRESA ALLPE». Accedido 5 de abril de 2025. <https://www.allpe.com/medioambiente/hidrologia/estudios-hidrologicos/>.
- ARGOS. 2020. «Cunetas en concreto». https://colombia.argos.co/fichas_tecnicas/Cartilla-Cunetas-soluciones-viales.pdf.
- Bejarano Trujillo, Patricio Israel. 2022. «Manual técnico para el análisis hidrológico e hidráulico del sistema de drenajes pluviales urbanos mediante aplicativos ofimático». bachelorThesis. <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/20.500.11962/29906>
- Bladé, E., L. Cea, G. Corestein, E. Escolano, J. Puertas, E. Vázquez-Cendón, J. Dolz, y A. Coll. 2014. «Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos». Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería 30 (1): 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Buchaca, Maite Pujal. 2012. «Influència de l'algoritme de mullat-assecat en la propagació d'una inundació sobre terreny inicialment sec». En. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:190051469>.
- Caminos y Puentes Federales. 2024. «Sistema de drenaje en autopistas». gob.mx. 23 de abril de 2024. <http://www.gob.mx/capufe/articulos/sistema-de-drenaje-en-autopistas>
- Cea Gómez, Luis, Ernest Bladé I Castellet, Marcos Sanz Ramos, María Bermúdez Pita, y Ángel Mateos Alonso. 2019. Iber Applications Basic Guide. Two-Dimensional Modelling of Free Surface Shallow Water Flows. Universidade da Coruña. Servizo de Publicacións. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497176>
- Changjiang Institute Of Survey, Planning, Design And Research (CISPDR). 2016. «Plan hidráulico regional de la demarcación hidrográfica Santiago». <https://suia.ambiente.gob.ec/files/MEMORIA%20DH%20SANTIAGO.pdf>
- Darcy, Henry. 1856. Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau (Vol. 1). Victor dalmont. https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=yXKx1zPVQMUC&oi=fnd&pg=PA4&dq=Les+fontaines+publiques+de+la+ville+de+Dijon&ots=UdUf2mJi7b&sig=A4qcOXqTd4mTY41vdIEgD8ywONg&redir_esc=y#v=onepage&q=Les%20fontaines%20publiques%20de%20la%20ville%20de%20Dijon&f=false.

- Dingman, S. L. 2015. Physical hydrology. Waveland press.
https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=rUUaBqAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&dq=physical+hydrology+dingman&ots=7pLLqhfiaJ&sig=UWQmM6S_hyfcQVkyYYI97i2K71xU&redir_esc=y#v=onepage&q=physical%20hydrology%20dingman&f=false.
- Emesa. 2023. «Importancia del Drenaje de Carreteras». Emesa M-30. 20 de junio de 2023.
<https://www.emesa-m30.es/obras-de-drenaje-de-carreteras/>.
- Garcés, Lenín Moreno. s. f. «Ley Orgánica del Sistema Nacional de Infraestructura Vial del Transporte Terrestre.»
- «HEC-RAS». s. f. Accedido 29 de junio de 2025.
<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>.
- INAMHI. 2015. «Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación».
- INVIAS. 2009. Manual de Diseño Geométrico de Carreteras. Bogotá, Colombia.
- Lázaro, Jesús, José Angel Sánchez Navarro, Vanesa Edo Romero, y Jorge Castillo Mateo. 2017. «Aplicación de los criterios del reglamento de dominio público hidráulico en la creación de nuevas infraestructuras en España». En.
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:134727586>.
- León, Aixa Catherine Martínez, y Jenny K. Rodríguez. 2019. «Valoración económica de los impactos ambientales generados por la sedimentación aguas abajo del embalse de la central hidroeléctrica Ituango, ubicada en el departamento de Antioquia.» En.
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:194368712>.
- Mata, Francisco J Solano, y Denis M Salas González. 2011. «ESTUDIO HIDROGEOMORFOLÓGICO Y ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO DE LA SECCIÓN ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO ARANJUEZ». Revista Geográfica de América Central.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). 2003. Normas de Diseño Geométrico de Carreteras. Quito, Ecuador.
- NEVI-12-MTOP. 2013. «Normas para estudios y diseño vial».

- Polo, Rebeca Benayas. 2014. «¿Qué es HEC – RAS y para qué sirve?» Cursos GIS | TYC GIS Formación (blog). 11 de noviembre de 2014. <https://www.cursosgis.com/que-es-hec-ras-y-para-que-sirve/>.
- Quichimbo, Lcdo Sergio. s. f. «CONSEJO DE PLANIFICACIÓN PARROQUIAL- REPRESENTANTES CIUDADANOS».
- Ramos, Jiménez, y Alexandra Marisol. 2018. «Evaluación de la evolución de cargas contaminantes aportadas por vertimientos de aguas residuales en un humedal natural, mediante la implementación de un modelo computacional hidráulico y de calidad de agua.» En. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:165952358>.
- Recupero, Antonino, Marcello Arici, Hugo Corres Peiretti, Michele Fabio Granata, y Gabriele Freni Freni. 2017. «Puentes de hormigón con sección cajón: interacción en las almas entre el esfuerzo cortante y los momentos de flexión transversal». En. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:198569422>.
- Rueda, H. Alfonso, Mintegui Aguirre, y R. Escudero Sánchez. 2015. «Caracterización de una red hídrica fuertemente alterada: el caso del arroyo de El Partido». En. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:161251859>.
- Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT). 2023. N-PRY-CAR-4-03-001/23, Proyecto de Sistemas de Subdrenaje.
- Servicios Públicos Yalí. 2023. «Los sumideros y su importancia en el alcantarillado». 11 de octubre de 2023. <https://serviciospublicosyali.com.co/2023/10/11/los-sumideros-y-su-importancia-en-el-alcantarillado/>.
- Te Chow, Ven. 1994. Hidráulica de canales abiertos. McGraw-Hill. <https://books.google.com.ec/books?id=XnvUAAAACAAJ>
- Tomé, Jorge Sanfulgencio. 2022. «¿Qué es el estudio topográfico? ¿Es obligatorio?» arrevol Arquitectos. 28 de marzo de 2022. <https://arrevol.com/blog/que-es-el-estudio-topografico-es-necesario-para-poder-construir/>.
- Víctor M. Ponce. s. f. «Drenaje de carreteras - A, Manual de drenaje de carreteras». Accedido 26 de diciembre de 2024.
- WT Diseño Sustentable S.C., México, Manuel M. Cabrera Delgadillo, Guadalupe Sánchez Campos, WT Diseño Sustentable S.C., México, Juan Carlos Mejía Suárez, WT Diseño Sustentable S.C., México, Carmen Hernández Pastor, y WT Diseño Sustentable S.C.,

México. 2019. «Metodología para el diseño de sistemas de drenaje sanitario y pluvial». Aqua-LAC 11 (2): 84-96. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2019-v11-2-08>

Zainal, Norsaliha Najwa, y Siti Hidayah Abu Talib. 2024. «Review paper on applications of the HEC-RAS model for flooding, agriculture, and water quality simulation». Water Practice and Technology 19 (7): 2883-2900. <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.173>

Anexos

Abscisa			Alcantarilla	L	Cot_inicio	Cot_fin	H	t	IdTR
				m	msnm	msnm	m	min	mm/h
0	+	98.3	1	445.92	3011.00	2908.00	103.00	5.00	2.55
0	+	250.7	2	320.66	3016.00	2907.00	109.00	5.00	2.55
0	+	279.9	3	-	-	-	-	-	-
0	+	369.1	4	490.63	3016.00	2914.00	102.00	5.00	2.55
0	+	551.5	5	616.04	3060.00	2912.00	148.00	5.00	2.55
0	+	743.3	6	293.40	3000.00	2918.00	82.00	5.00	2.55
1	+	61.3	7	93.48	2943.00	2922.00	21.00	5.00	2.55
1	+	266.6	8	550.75	3066.00	2924.00	142.00	5.00	2.55
1	+	414.3	9	549.40	3106.00	2928.00	178.00	5.00	2.55
1	+	546.9	10	927.62	3156.00	2933.00	223.00	6.51	2.55
1	+	746.3	11	364.72	3051.00	2944.00	107.00	5.00	2.55

ITR	C	A	Q diseño
mm/h	-	ha	l/s
152.0147	0.492	2.616	543.77
152.0147	0.510	3.083	663.95
-	-	-	0.00
152.0147	0.498	6.114	1285.41
152.0147	0.496	10.555	2208.42
152.0147	0.492	1.064	221.14
152.0147	0.497	0.610	128.01
152.0147	0.521	12.667	2786.72
152.0147	0.544	5.544	1273.65
134.9681	0.502	13.889	2611.86
152.0147	0.507	5.504	1177.81

Tabla 28. Tabla de Cálculo del Caudal de diseño para las alcantarillas existentes en la vía pavimentada

Abscisa			Alcantarilla	L	Cot_inicio	Cot_fin	H	T	IdTR
				m	msnm	msnm	m	min	mm/h
2	+	33.6	12	-	-	-	-	-	-
2	+	140.0	12.1	-	-	-	-	-	-
2	+	277.4	13	-	-	-	-	-	-
2	+	398.7	14	181.42	3050	2992	58.00	5	2.55
2	+	609.4	14.1	392.85	3116	3002.5	113.50	5	2.55
2	+	736.2	15	-	-	-	-	-	-
2	+	797.4	16	320.65	3106	3002	104.00	5	2.55
2	+	877.2	17	-	-	-	-	-	-

2	+	939.2	18	348.09	3107	3001	106.00	5	2.55
3	+	79.5	19	262.46	3068	3003	65.00	5	2.55
3	+	210.6	20	192.34	3059	3007	52.00	5	2.55
3	+	452.1	21	59.36	3042	3018	24.00	5	2.55
3	+	578.8	22	94.556	3008	3032	24.00	5	2.55
3	+	680.0	22.1	-	-	-	-	-	-
3	+	901.2	23	139.46	3068	3034	34.00	5	2.55
4	+	60.0	23.1	-	-	-	-	-	-
4	+	253.5	24	331.16	3152	3046	106.00	5	2.55

ITR	C	A	Q diseño
mm/h	-	ha	l/s
-	-	-	0.00
-	-	-	0.00
-	-	-	0.00
152.0147	0.504	0.867	184.66
152.0147	0.499	3.48	733.37
-	-	-	0.00
152.0147	0.538	3.40	772.09
-	-	-	0.00
152.0147	0.526	1.32	293.20
152.0147	0.494	1.66	345.46
152.0147	0.495	1.05	219.60
152.0147	0.493	1.04	216.04
152.0147	0.496	0.18	36.90
-	-	-	0.00
152.0147	0.486	0.605	124.15
-	-	-	0.00
152.0147	0.507	3.56	762.30

Tabla 29. *Calculo completo del Caudal de diseño para las alcantarillas de la Vía de Lastre*

Tramo de análisis				L_tramo	L	Pendiente	Tiempo	IdTR	I	Vo		
Absc. Incio		Absc. Final		m	m	%	s	mm/h	mm/h	-		
0	+	0.00	0	+	98.30	98.30	2.90	2%	300	2.06	122.80	0.0000341
0	+	98.30	0	+	120.00	21.70	2.90	2%	300	2.06	122.80	0.0000341
0	+	120.00	0	+	250.70	130.70	2.90	2%	300	2.06	122.80	0.0000341
0	+	250.70	0	+	279.90	29.20	2.90	2%	300	2.06	122.80	0.0000341
0	+	279.90	0	+	369.08	89.18	2.90	2%	300	2.06	122.80	0.0000341
0	+	369.08	0	+	551.45	182.37	2.90	2%	300	2.06	122.80	0.0000341
0	+	551.45	0	+	743.32	191.87	2.90	2%	300	2.06	122.80	0.0000341
0	+	743.32	0	+	937.39	194.07	2.90	2%	300	2.06	122.80	0.0000341
0	+	937.39	1	+	61.29	123.90	2.90	2%	300	2.06	122.80	0.0000341
1	+	61.29	1	+	266.59	205.30	2.90	2%	300	2.06	122.80	0.0000341
1	+	266.59	1	+	414.26	147.67	2.90	2%	300	2.06	122.80	0.0000341

1	+	414.26	1	+	546.86	132.60	2.90	2%	300	2.06	122.80	0.0000341
1	+	546.86	1	+	746.34	199.48	2.90	2%	300	2.06	122.80	0.0000341
1	+	746.34	2	+	33.60	287.26	2.90	2%	300	2.06	122.80	0.0000341

a	te	qmax	Qmax	Q	Aporte a la Alcantarilla
-	s	m3/s/m	l/s/m	l/s	
9.43	30.17	0.00010	0.0989	9.72	1
9.43	30.17	0.00010	0.0989	2.15	1
9.43	30.17	0.00010	0.0989	12.93	2
9.43	30.17	0.00010	0.0989	2.89	2
9.43	30.17	0.00010	0.0989	8.82	3
9.43	30.17	0.00010	0.0989	18.04	4
9.43	30.17	0.00010	0.0989	18.98	5
9.43	30.17	0.00010	0.0989	19.20	6
9.43	30.17	0.00010	0.0989	12.26	7
9.43	30.17	0.00010	0.0989	20.31	7
9.43	30.17	0.00010	0.0989	14.61	8
9.43	30.17	0.00010	0.0989	13.12	9
9.43	30.17	0.00010	0.0989	19.73	10
9.43	30.17	0.00010	0.0989	28.42	11

Tabla 30. *Calculo completo del caudal de aporte por bombeo de la calzada, en cada subtramo de la vía de pavimento*

Tramo de análisis					L_tramo	L	S	t	IdTR	I	Vo	
Absc. Incio	Absc. Final	m	m	%	s	mm/h	mm/h	-				
2	+	33.60	2	+	140.00	106.40	4.90	4.89%	300	2.06	122.80	0.0000341
2	+	140.00	2	+	277.40	137.40	4.90	0.51%	300	2.06	122.80	0.0000341
2	+	277.40	2	+	398.70	121.30	4.90	6.52%	300	2.06	122.80	0.0000341
2	+	398.70	2	+	569.90	171.20	4.90	3.94%	300	2.06	122.80	0.0000341
2	+	569.90	2	+	609.40	39.50	4.90	3.23%	300	2.06	122.80	0.0000341
2	+	609.40	2	+	637.10	27.70	4.90	1.18%	300	2.06	122.80	0.0000341
2	+	637.10	2	+	648.40	11.30	4.90	0.90%	300	2.06	122.80	0.0000341
2	+	648.40	2	+	666.80	18.40	4.90	0.51%	300	2.06	122.80	0.0000341
2	+	666.80	2	+	736.20	69.40	4.90	2.86%	300	2.06	122.80	0.0000341
2	+	736.20	2	+	757.70	21.50	4.90	3.36%	300	2.06	122.80	0.0000341
2	+	757.70	2	+	797.40	39.70	4.90	3.10%	300	2.06	122.80	0.0000341
2	+	797.40	2	+	818.90	21.50	4.90	1.06%	300	2.06	122.80	0.0000341
2	+	818.90	2	+	877.20	58.30	4.90	1.91%	300	2.06	122.80	0.0000341
2	+	877.20	2	+	939.20	62.00	4.90	1.68%	300	2.06	122.80	0.0000341
2	+	939.20	3	+	79.50	140.30	4.90	3.67%	300	2.06	122.80	0.0000341
3	+	79.50	3	+	182.70	103.20	4.90	0.77%	300	2.06	122.80	0.0000341
3	+	182.70	3	+	210.60	27.90	4.90	4.30%	300	2.06	122.80	0.0000341
3	+	210.60	3	+	398.40	187.80	4.90	2.07%	300	2.06	122.80	0.0000341

3	+	398.40	3	+	452.10	53.70	4.90	1.09%	300	2.06	122.80	0.0000341
3	+	452.10	3	+	578.80	126.70	4.90	3.34%	300	2.06	122.80	0.0000341
3	+	578.80	3	+	680.00	101.20	4.90	1.47%	300	2.06	122.80	0.0000341
3	+	680.00	3	+	870.70	190.70	4.90	6.48%	300	2.06	122.80	0.0000341
3	+	870.70	3	+	901.20	30.50	4.90	1.95%	300	2.06	122.80	0.0000341
3	+	901.20	4	+	60.00	158.80	4.90	3.61%	300	2.06	122.80	0.0000341
4	+	60.00	4	+	217.60	157.60	4.90	2.07%	300	2.06	122.80	0.0000341
4	+	217.60	4	+	253.50	35.90	4.90	1.44%	300	2.06	122.80	0.0000341
4	+	253.50	4	+	442.30	188.80	4.90	4.41%	300	2.06	122.80	0.0000341
4	+	442.30	4	+	622.00	179.70	4.90	3.95%	300	2.06	122.80	0.0000341

a	te	q max	qmax	Q	Aporte a la Alcantarilla
-	s	m3/s/m	l/s/m	l/s	
11.06	37.56	0.00017	0.1671	17.785	12
3.56	74.10	0.00017	0.1671	22.966	12.1
12.76	34.47	0.00017	0.1671	20.275	13
9.92	40.08	0.00017	0.1671	28.616	14
8.99	42.54	0.00017	0.1671	6.602	14.1
5.43	57.55	0.00017	0.1671	4.630	14.1
4.74	62.42	0.00017	0.1671	1.889	-
3.55	74.21	0.00017	0.1671	3.076	-
8.45	44.13	0.00017	0.1671	11.600	15
9.16	42.06	0.00017	0.1671	3.594	15
8.80	43.08	0.00017	0.1671	6.636	16
5.15	59.40	0.00017	0.1671	3.594	16
6.92	49.77	0.00017	0.1671	9.745	17
6.47	51.79	0.00017	0.1671	10.363	17
9.58	40.94	0.00017	0.1671	23.451	18
4.39	65.38	0.00017	0.1671	17.250	19
10.37	39.03	0.00017	0.1671	4.663	20
7.20	48.60	0.00017	0.1671	31.391	20
5.22	58.90	0.00017	0.1671	8.976	21
9.14	42.12	0.00017	0.1671	21.178	22
6.07	53.84	0.00017	0.1671	16.916	22
12.73	34.53	0.00017	0.1671	31.876	22.1
6.99	49.47	0.00017	0.1671	5.098	23
9.51	41.13	0.00017	0.1671	26.543	23
7.19	48.63	0.00017	0.1671	26.343	23.1
6.00	54.21	0.00017	0.1671	6.001	24
10.50	38.75	0.00017	0.1671	31.558	24
9.94	40.04	0.00017	0.1671	30.037	N/A

Tabla 31. *Calculo completo del caudal de aporte por bombeo de la calzada, en cada subtramo de la vía de lastre*

Tramo de análisis				L	Cot_inicio	Cot_fin	H	t	IdTR
Absc. Inicio		Absc. Final		m	Msnm	msnm	m	min	mm/h
0 +	0.00	0 +	98.30	87.19	2910.00	2931.00	21.00	5.00	2.06
0 +	98.30	0 +	120.00	22.73	2906.00	2915.00	9.00	5.00	2.06
0 +	120.00	0 +	250.70	251.79	2907.00	2996.00	89.00	5.00	2.06
0 +	250.70	0 +	279.90	10.88	2907.50	2910.00	2.50	5.00	2.06
0 +	279.90	0 +	369.08	125.38	2907.00	2954.00	47.00	5.00	2.06
0 +	369.08	0 +	551.45	148.52	2912.00	2956.50	44.50	5.00	2.06
0 +	551.45	0 +	743.32	319.81	2920.00	3000.00	80.00	5.00	2.06
0 +	743.32	0 +	937.39	285.37	2925.00	2995.00	70.00	5.00	2.06
0 +	937.39	1 +	61.29	62.92	2924.00	2944.00	20.00	5.00	2.06
1 +	61.29	1 +	266.59	207.49	2922.00	2996.00	74.00	5.00	2.06
1 +	266.59	1 +	414.26	195.86	2929.00	3001.50	72.50	5.00	2.06
1 +	414.26	1 +	546.86	113.52	2930.00	2983.00	53.00	5.00	2.06
1 +	546.86	1 +	746.34	207.73	2940.00	3003.00	63.00	5.00	2.06
1 +	746.34	2 +	33.60	103.41	2954.00	2974.00	20.00	5.00	2.06

ITR	C	A	Caudal lateral	Aporte a la Alcantarilla
mm/h	-	ha	(l/s)	
122.80	0.46	0.125	19.55	1
122.80	0.49	0.032	5.42	1
122.80	0.50	0.278	47.40	2
122.80	0.46	0.014	2.24	2
122.80	0.51	0.032	5.64	3
122.80	0.49	0.389	64.50	4
122.80	0.48	0.431	70.53	5
122.80	0.51	0.452	78.35	6
122.80	0.51	0.417	72.46	7
122.80	0.51	0.610	106.04	7
122.80	0.52	0.374	66.38	8
122.80	0.58	0.261	51.63	9
122.80	0.57	0.513	99.71	10
122.80	0.52	0.304	53.84	11

Tabla 32. *Calculo completo del caudal de aporte del talud, en cada subtramo de la vía de pavimento*

Tramo de análisis				L	Cot_inicio	Cot_fin	H	t	IdTR
Absc. Inicio		Absc. Final		m	msnm	msnm	m	min	mm/h
2 +	33.60	2 +	140.00	67.71	2972.00	2984.00	12.00	5.00	2.06
2 +	140.00	2 +	277.40	105.03	2981.00	3008.00	27.00	5.00	2.06
2 +	277.40	2 +	398.70	70.33	2990.00	3026.00	36.00	5.00	2.06

2	+	398.70	2	+	569.90	108.78	2996.00	3024.00	28.00	5.00	2.06
2	+	569.90	2	+	609.40	34.64	3003.00	3016.00	13.00	5.00	2.06
2	+	637.10	2	+	648.40	240.97	3003.00	3096.00	93.00	5.00	2.06
2	+	648.40	2	+	666.80	30.42	3002.50	3022.50	20.00	5.00	2.06
2	+	666.80	2	+	736.20	171.33	3002.00	3067.00	65.00	5.00	2.06
2	+	736.20	2	+	757.70	171.33	3002.00	3067.00	65.00	5.00	2.06
2	+	757.70	2	+	797.40	17.70	3003.00	3011.00	8.00	5.00	2.06
2	+	818.90	2	+	877.20	265.34	3002.00	3101.00	99.00	5.00	2.06
2	+	877.20	2	+	939.20	265.34	3002.00	3101.00	99.00	5.00	2.06
2	+	939.20	3	+	79.50	439.74	3003.00	3107.00	104.00	5.00	2.06
3	+	79.50	3	+	182.70	284.13	3005.00	3067.00	62.00	5.00	2.06
3	+	182.70	3	+	210.60	52.25	3008.00	3025.00	17.00	5.00	2.06
3	+	210.60	3	+	398.40	127.39	3020.00	3058.00	38.00	5.00	2.06
3	+	398.40	3	+	452.10	217.65	3017.00	3059.00	42.00	5.00	2.06
3	+	452.10	3	+	578.80	48.62	3018.00	3044.00	26.00	5.00	2.06
3	+	578.80	3	+	680.00	78.67	3022.00	3030.00	8.00	5.00	2.06
3	+	680.00	3	+	870.70	143.92	3032.00	3067.00	35.00	5.00	2.06
3	+	870.70	3	+	901.20	61.69	3032.50	3054.00	21.50	5.00	2.06
3	+	901.20	4	+	60.00	60.69	3035.00	3048.00	13.00	5.00	2.06
4	+	60.00	4	+	217.60	260.57	3044.00	3120.00	76.00	5.00	2.06
4	+	217.60	4	+	253.50	230.14	3046.00	3135.00	89.00	5.00	2.06
4	+	253.50	4	+	442.30	132.29	3047.00	3115.00	68.00	5.00	2.06
4	+	442.30	4	+	622.00	267.34	3045.00	3140.00	95.00	5.00	2.06

ITR	C	A	Caudal lateral	Aporte a la
mm/h	-	ha	l/s	Alcantarilla
122.80	0.48	0.217	35.43	12
122.80	0.50	0.182	30.86	12.1
122.80	0.52	0.252	45.00	13
122.80	0.51	0.134	23.19	14
122.80	0.50	0.013	2.19	14.1
122.80	0.53	0.099	17.71	15
122.80	0.59	0.108	21.58	15
122.80	0.57	0.056	91.10	16
122.80	0.57	0.056	91.10	16
122.80	0.56	0.060	11.57	17
122.80	0.55	0.086	15.93	18
122.80	0.55	0.086	15.93	18
122.80	0.58	0.031	6.21	19
122.80	0.53	0.107	19.18	20
122.80	0.50	0.026	4.48	21
122.80	0.51	0.593	103.03	21
122.80	0.49	0.035	5.77	22
122.80	0.54	0.029	5.24	23

122.80	0.52	0.349	61.95	23
122.80	0.52	0.270	48.30	23.1
122.80	0.50	0.017	2.82	24
122.80	0.47	0.289	46.54	24
122.80	0.47	0.225	35.87	24.1
122.80	0.48	0.093	15.29	25
122.80	0.51	0.613	106.58	25
122.80	0.53	0.539	96.80	N/A

Tabla 33. Cálculo completo del caudal de aporte del talud, en cada subtramo de la vía de lastre

Tramo de análisis				Q calzada	Q talud	Q total
Absc. Inicio		Absc. Final		l/s	l/s	l/s
0 +	0.00	0 +	98.30	9.72	0.00	9.72
0 +	98.30	0 +	120.00	2.15	0.00	2.15
0 +	120.00	0 +	250.70	12.93	0.00	12.93
0 +	250.70	0 +	279.90	2.89	0.00	2.89
0 +	279.90	0 +	369.08	8.82	0.00	8.82
0 +	369.08	0 +	551.45	18.04	0.00	18.04
0 +	551.45	0 +	743.32	18.98	0.00	18.98
0 +	743.32	0 +	937.39	19.20	0.00	19.20
0 +	937.39	1 +	61.29	12.26	0.00	12.26
1 +	61.29	1 +	266.59	20.31	0.00	20.31
1 +	266.59	1 +	414.26	14.61	0.00	14.61
1 +	414.26	1 +	546.86	13.12	0.00	13.12
1 +	546.86	1 +	746.34	19.73	0.00	19.73
1 +	746.34	2 +	33.60	28.42	0.00	28.42

Tabla 34. Caudal de diseño para cada tramo de cuneta del lado derecho de la vía de pavimento

Tramo de análisis				Q calzada	Q talud	Q total	Aporta a alcantarilla
Absc. Inicio		Absc. Final		l/s	l/s	l/s	
0 +	0.00	0 +	98.30	9.72	19.55	29.27	1
0 +	98.30	0 +	120.00	2.15	5.42	7.57	1
0 +	120.00	0 +	250.70	12.93	47.40	60.33	2
0 +	250.70	0 +	279.90	2.89	2.24	5.12	2
0 +	279.90	0 +	369.08	8.82	5.64	14.47	3
0 +	369.08	0 +	551.45	18.04	64.50	82.55	4
0 +	551.45	0 +	743.32	18.98	70.53	89.51	5
0 +	743.32	0 +	937.39	19.20	78.35	97.55	6
0 +	937.39	1 +	61.29	12.26	72.46	84.72	7
1 +	61.29	1 +	266.59	20.31	106.04	126.35	7
1 +	266.59	1 +	414.26	14.61	66.38	80.99	8
1 +	414.26	1 +	546.86	13.12	51.63	64.75	9
1 +	546.86	1 +	746.34	19.73	99.71	119.44	10
1 +	746.34	2 +	33.60	28.42	53.84	82.26	11

Tabla 35. Caudal de diseño para cada tramo de cuneta del lado izquierdo de la vía de pavimento

Tramo de análisis				Q calzada	Q talud	Q total	Aporta a alcantarilla
Absc. Inicio		Absc. Final		l/s	l/s	l/s	
2 + 33.60	2 + 140.00	17.78	35.43	53.21	12		
2 + 140.00	2 + 277.40	22.97	30.86	53.82	12.1		
2 + 277.40	2 + 398.70	20.28	45.00	65.28	13		
2 + 398.70	2 + 569.90	28.62	23.19	51.81	14		
2 + 569.90	2 + 609.40	6.60	2.19	8.79	14.1		
2 + 609.40	2 + 637.10	4.63	0.00	4.63	14.1		
2 + 637.10	2 + 648.40	1.89	17.71	19.60	-		
2 + 648.40	2 + 666.80	3.08	21.58	24.65	-		
2 + 666.80	2 + 736.20	11.60	91.10	102.70	15		
2 + 736.20	2 + 757.70	3.59	91.10	94.70	15		
2 + 757.70	2 + 797.40	6.64	11.57	18.20	16		
2 + 797.40	2 + 818.90	3.59	0.00	3.59	16		
2 + 818.90	2 + 877.20	9.74	15.93	25.67	17		
2 + 877.20	2 + 939.20	10.36	15.93	26.29	17		
2 + 939.20	3 + 79.50	23.45	6.21	29.66	18		
3 + 79.50	3 + 182.70	17.25	19.18	36.43	19		
3 + 182.70	3 + 210.60	4.66	4.48	9.14	20		
3 + 210.60	3 + 398.40	31.39	103.03	134.42	20		
3 + 398.40	3 + 452.10	8.98	5.77	14.75	21		
3 + 452.10	3 + 578.80	21.18	5.24	26.42	22		
3 + 578.80	3 + 680.00	16.92	61.95	78.86	22		
3 + 680.00	3 + 870.70	31.88	48.30	80.17	22.1		
3 + 870.70	3 + 901.20	5.10	2.82	7.91	23		
3 + 901.20	4 + 60.00	26.54	46.54	73.08	23		
4 + 60.00	4 + 217.60	26.34	35.87	62.21	23.1		
4 + 217.60	4 + 253.50	6.00	15.29	21.29	24		
4 + 253.50	4 + 442.30	31.56	106.58	138.14	24		
4 + 442.30	4 + 622.00	30.04	96.80	126.84	N/A		

Tabla 36. Caudal de diseño para cada tramo de cuneta del lado derecho de la vía de lastre

Tramo de análisis				L_tramo	Cota. Inicio	Cota. Final	Desnivel	S
Absc. Inicio		Absc. Final		m	msnm	msnm	m	%
0 + 0.00	0 + 98.30	98.30	2932.40	2927.70	4.70	4.78%		
0 + 98.30	0 + 120.00	21.70	2927.70	2927.90	0.20	0.92%		
0 + 120.00	0 + 250.70	130.70	2927.90	2925.90	2.00	1.53%		
0 + 250.70	0 + 279.90	29.20	2925.90	2926.10	0.20	0.68%		
0 + 279.90	0 + 369.08	89.18	2926.10	2928.30	2.20	2.47%		
0 + 369.08	0 + 551.45	182.37	2928.30	2931.70	3.40	1.86%		
0 + 551.45	0 + 743.32	191.87	2931.70	2937.80	6.10	3.18%		
0 + 743.32	0 + 937.39	194.07	2937.80	2946.60	8.80	4.53%		

0 +	937.39	1 +	61.29	123.90	2946.60	2941.10	5.50	4.44%
1 +	61.29	1 +	266.59	205.30	2941.10	2944.60	3.50	1.70%
1 +	266.59	1 +	414.26	147.67	2944.60	2947.60	3.00	2.03%
1 +	414.26	1 +	546.86	132.60	2947.60	2951.10	3.50	2.64%
1 +	546.86	1 +	746.34	199.48	2951.10	2964.50	13.40	6.72%
1 +	746.34	2 +	33.60	287.26	2964.50	2979.50	15.00	5.22%

Tabla 37. Cálculo de pendientes longitudinales para cada subtramo de la vía pavimentada

Tramo de análisis		L_tramo	Cota. Inicio	Cota. Final	Desnivel	S		
Absc. Inicio	Absc. Final	m	msnm	msnm	m	%		
2 +	33.60	2 +	140.00	106.40	2979.50	2989.00	9.50	8.93%
2 +	140.00	2 +	277.40	137.40	2989.00	3006.90	17.90	13.03%
2 +	277.40	2 +	398.70	121.30	3006.90	3012.50	5.60	4.62%
2 +	398.70	2 +	569.90	171.20	3012.50	3024.10	11.60	6.78%
2 +	569.90	2 +	609.40	39.50	3024.10	3023.40	0.70	1.77%
2 +	609.40	2 +	637.10	27.70	3023.40	3023.80	0.40	1.44%
2 +	637.10	2 +	648.40	11.30	3023.80	3023.70	0.10	0.88%
2 +	648.40	2 +	666.80	18.40	3023.70	3024.20	0.50	2.72%
2 +	666.80	2 +	736.20	69.40	3024.20	3022.80	1.40	2.02%
2 +	736.20	2 +	757.70	21.50	3022.80	3022.90	0.10	0.50%
2 +	757.70	2 +	797.40	39.70	3022.90	3021.90	1.00	2.52%
2 +	797.40	2 +	818.90	21.50	3021.90	3022.00	0.10	0.50%
2 +	818.90	2 +	877.20	58.30	3022.00	3020.30	1.70	2.92%
2 +	877.20	2 +	939.20	62.00	3020.30	3020.60	0.30	0.50%
2 +	939.20	3 +	79.50	140.30	3020.60	3023.90	3.30	2.35%
3 +	79.50	3 +	182.70	103.20	3023.90	3028.30	4.40	4.26%
3 +	182.70	3 +	210.60	27.90	3028.30	3027.60	0.70	2.51%
3 +	210.60	3 +	398.40	187.80	3027.60	3040.60	13.00	6.92%
3 +	398.40	3 +	452.10	53.70	3040.60	3037.80	2.80	5.21%
3 +	452.10	3 +	578.80	126.70	3037.80	3028.60	9.20	7.26%
3 +	578.80	3 +	680.00	101.20	3028.60	3038.10	9.50	9.39%
3 +	680.00	3 +	870.70	190.70	3038.10	3050.90	12.80	6.71%
3 +	870.70	3 +	901.20	30.50	3050.90	3050.40	0.50	1.64%
3 +	901.20	4 +	60.00	158.80	3050.40	3056.00	5.60	3.53%
4 +	60.00	4 +	217.60	157.60	3056.00	3064.10	8.10	5.14%
4 +	217.60	4 +	253.50	35.90	3064.10	3063.50	0.60	1.67%
4 +	253.50	4 +	442.30	188.80	3063.50	3071.30	7.80	4.13%
4 +	442.30	4 +	622.00	179.70	3071.30	3058.50	12.80	7.12%

Tabla 38. Cálculo de pendientes longitudinales para cada subtramo de la vía de lastre

Tramo de análisis		L_tramo	Q diseño	S	Qmax	Vmax (m/s)	Qmax>Qdis	Vmax<4.5 m/s		
Absc. Inicio	Absc. Final	m	l/s	%	l/s	m/s				
0 +	0.0	0 +	98.3	98.3	9.72	4.78%	105.99	0.216	Sí	Sí
0 +	98.3	0 +	120.0	21.7	2.15	0.92%	46.53	0.048	Sí	Sí

0 +	120.0	0 +	250.7	130.7	12.93	1.53%	59.96	0.287	Sí	Sí
0 +	250.7	0 +	279.9	29.2	2.89	0.68%	40.11	0.064	Sí	Sí
0 +	279.9	0 +	369.1	89.2	8.82	2.47%	76.13	0.196	Sí	Sí
0 +	369.1	0 +	551.5	182.4	18.04	1.86%	66.18	0.401	Sí	Sí
0 +	551.5	0 +	743.3	191.9	18.98	3.18%	86.42	0.422	Sí	Sí
0 +	743.3	0 +	937.4	194.1	19.20	4.53%	103.21	0.427	Sí	Sí
0 +	937.4	1 +	61.3	123.9	12.26	4.44%	102.12	0.272	Sí	Sí
1 +	61.3	1 +	266.6	205.3	20.31	1.70%	63.29	0.451	Sí	Sí
1 +	266.6	1 +	414.3	147.7	14.61	2.03%	69.09	0.325	Sí	Sí
1 +	414.3	1 +	546.9	132.6	13.12	2.64%	78.75	0.292	Sí	Sí
1 +	546.9	1 +	746.3	199.5	19.73	6.72%	125.63	0.439	Sí	Sí
1 +	746.3	2 +	33.6	287.3	28.42	5.22%	110.76	0.631	Sí	Sí

Tabla 39. Cálculos para el dimensionamiento de alcantarillas de la vía pavimentada

Tramo de análisis		L_tramo	Q diseño	S	Qmax	Vmax (m/s)	Qmax>Qdis	Vmax<1.25m/s		
Absc. Incio	Absc. Final	m	l/s	%	l/s	m/s				
2 +	33.6	2 +	140	106.4	53.21	8.93%	485.48	0.394	Sí	Sí
2 +	140.0	2 +	277.4	137.4	53.82	13.03%	586.43	0.399	Sí	Sí
2 +	277.4	2 +	398.7	121.3	65.28	4.62%	349.10	0.484	Sí	Sí
2 +	398.7	2 +	569.9	171.2	51.81	6.78%	422.92	0.384	Sí	Sí
2 +	569.9	2 +	609.4	39.5	8.79	1.77%	216.29	0.065	Sí	Sí
2 +	609.4	2 +	637.1	27.7	4.63	1.44%	195.24	0.034	Sí	Sí
2 +	637.1	2 +	648.4	11.3	19.60	0.88%	152.84	0.145	Sí	Sí
2 +	648.4	2 +	666.8	18.4	24.65	2.72%	267.83	0.183	Sí	Sí
2 +	666.8	2 +	736.2	69.4	102.70	2.02%	230.76	0.761	Sí	Sí
2 +	736.2	2 +	757.7	21.5	94.70	0.50%	114.89	0.701	Sí	Sí
2 +	757.7	2 +	797.4	39.7	18.20	2.52%	257.86	0.135	Sí	Sí
2 +	797.4	2 +	818.9	21.5	3.59	0.50%	114.89	0.027	Sí	Sí
2 +	818.9	2 +	877.2	58.3	25.67	2.92%	277.44	0.190	Sí	Sí
2 +	877.2	2 +	939.2	62.0	26.29	0.50%	114.89	0.195	Sí	Sí
2 +	939.2	3 +	79.5	140.3	29.66	2.35%	249.18	0.220	Sí	Sí
3 +	79.5	3 +	182.7	103.2	36.43	4.26%	335.48	0.270	Sí	Sí
3 +	182.7	3 +	210.6	27.9	9.14	2.51%	257.35	0.068	Sí	Sí
3 +	210.6	3 +	398.4	187.8	134.42	6.92%	427.47	0.996	Sí	Sí
3 +	398.4	3 +	452.1	53.7	14.75	5.21%	371.00	0.109	Sí	Sí
3 +	452.1	3 +	578.8	126.7	26.42	7.26%	437.81	0.196	Sí	Sí
3 +	578.8	3 +	680	101.2	78.86	9.39%	497.80	0.584	Sí	Sí
3 +	680.0	3 +	870.7	190.7	80.17	6.71%	420.93	0.594	Sí	Sí
3 +	870.7	3 +	901.2	30.5	7.91	1.64%	208.03	0.059	Sí	Sí
3 +	901.2	4 +	60	158.8	73.08	3.53%	305.11	0.541	Sí	Sí
4 +	60.0	4 +	217.6	157.6	62.21	5.14%	368.34	0.461	Sí	Sí
4 +	217.6	4 +	253.5	35.9	21.29	1.67%	210.04	0.158	Sí	Sí
4 +	253.5	4 +	442.3	188.8	138.14	4.13%	330.24	1.023	Sí	Sí
4 +	442.3	4 +	622	179.7	126.84	7.12%	433.62	0.940	Sí	Sí

Tabla 40. Cálculos para el dimensionamiento de alcantarillas de la vía de lastre

Abscisa			Alcantarilla	Qmicroc	Qcuneta	Qttotal	Qttotal
				l/s	l/s	l/s	m3/s
0	+	98.30	1	543.77	36.84	580.61	0.58
0	+	250.70	2	663.95	65.45	729.40	0.73
0	+	279.90	3	0.00	14.47	14.47	0.01
0	+	369.10	4	1285.41	82.55	1367.95	1.37
0	+	551.50	5	2208.42	89.51	2297.93	2.30
0	+	743.32	6	221.14	97.55	318.70	0.32
1	+	61.30	7	128.01	211.07	339.08	0.34
1	+	266.60	8	2786.72	80.99	2867.71	2.87
1	+	414.30	9	1273.65	64.75	1338.40	1.34
1	+	546.90	10	2611.86	119.44	2731.31	2.73
1	+	746.30	11	1177.81	82.26	1260.07	1.26

Tabla 41. Caudal Total para las alcantarillas de la vía de pavimento

Abscisa			Alcantarilla	Qmicroc	Qcuneta	Qttotal	Qttotal
				l/s	l/s	l/s	m3/s
2	+	33.60	12	0.00	53.21	53.21	0.05
2	+	140.00	12.1	0.00	53.82	53.82	0.05
2	+	277.40	13	0.00	65.28	65.28	0.07
2	+	398.70	14	184.66	51.81	236.47	0.24
2	+	609.40	14.1	733.37	13.42	746.78	0.75
2	+	736.20	15	0.00	197.40	197.40	0.20
2	+	797.40	16	772.09	21.79	793.88	0.79
2	+	877.20	17	0.00	51.96	51.96	0.05
2	+	939.20	18	293.20	29.66	322.86	0.32
3	+	79.50	19	345.46	36.43	381.90	0.38
3	+	210.60	20	219.60	143.56	363.17	0.36
3	+	452.10	21	216.04	14.75	230.79	0.23
3	+	578.80	22	36.90	105.28	142.18	0.14
3	+	680.00	22.1	0.00	80.17	80.17	0.08
3	+	901.20	23	124.15	81.00	205.14	0.21
4	+	60.00	23.1	0.00	62.21	62.21	0.06
4	+	253.50	24	762.30	159.43	921.73	0.92

Tabla 42. Caudal Total para las alcantarillas de la vía de pavimento

Abscisa			No.	Q	Material tubería	n	D	esv	Sentido de flujo		Cot_entrada
				m3/s		Manning	mm	Grados (°)			msnm
0	+	98.30	1	0.58	Metal	0.024	1200	27	lzq.	Der.	2925.43
0	+	250.70	2	0.73	Metal	0.024	1200	3	lzq.	Der.	2922.77
0	+	279.90	3	0.01	Hormigón	0.014	400	9	lzq.	Der.	2924.44

0	+	369.10	4	1.37	Hormigón	0.014	1000	2	lza.	Der.	2926.50
0	+	551.50	5	2.30	Metal	0.024	1200	5	lza.	Der.	2929.12
0	+	743.32	6	0.32	Metal	0.024	1200	6	lza.	Der.	2935.49
1	+	61.30	7	0.34	Metal	0.024	1200	7	lza.	Der.	2938.79
1	+	266.60	8	2.87	Metal	0.024	1200	10	lza.	Der.	2942.11
1	+	414.30	9	1.34	Metal	0.024	1200	7	lza.	Der.	2944.90
1	+	546.90	10	2.73	Metal	0.024	1200	1	lza.	Der.	2948.47
1	+	746.30	11	1.26	Metal	0.024	1200	0	lza.	Der.	2961.89

Cot_salida	Relleno	Longitud	So	Yn	Kc	yc/D	yc	θ_c	Ac	Vc
msnm	m	m	%	m	-	chow	m	Radianes	m ²	m/s
2924.35	1.68	13.31	8.10%	0.252	0.118	0.337	0.404	2.477	0.335	1.733
2922.65	1.96	9.09	1.30%	0.453	0.148	0.385	0.462	2.677	0.401	1.817
2923.85	1.49	7.95	7.48%	0.039	0.046	0.210	0.084	1.904	0.019	0.754
2926.20	0.95	25.73	1.17%	0.541	0.437	0.676	0.676	3.861	0.565	2.421
2928.95	1.42	8.67	2.02%	0.788	0.466	0.698	0.838	3.956	0.843	2.728
2934.89	1.42	21.31	2.86%	0.243	0.065	0.249	0.299	2.090	0.220	1.450
2938.39	1.35	9.09	4.51%	0.220	0.069	0.257	0.308	2.127	0.230	1.475
2941.85	1.43	9.00	2.84%	0.801	0.581	0.777	0.932	4.316	0.943	3.041
2944.58	1.68	11.03	2.90%	0.507	0.271	0.526	0.631	3.246	0.603	2.220
2948.25	1.55	8.37	2.69%	0.801	0.553	0.759	0.911	4.231	0.921	2.966
2961.69	1.54	8.20	2.44%	0.514	0.255	0.509	0.611	3.178	0.578	2.178

Sc	K4	y/D	K1	y	A	V	V_adm	Perfil	Qmax	Q_adm
%	Chow	Chow	Chow	m	m ²	m/s	V<4.5m/s		m ³ /s	Q<Qmax
1.26%	0.030	0.212	0.121	0.255	0.174	3.330	SI	S 2	5.88	SI
1.21%	0.094	0.377	0.271	0.452	0.390	1.872	SI	S 3	2.35	SI
0.60%	0.009	0.114	0.049	0.046	0.008	1.852	SI	S 2	0.52	SI
0.59%	0.177	0.540	0.433	0.540	0.433	3.161	SI	S 3	2.35	SI
1.70%	0.239	0.657	0.546	0.788	0.787	2.923	SI	S 2	2.93	SI
1.23%	0.028	0.204	0.114	0.245	0.165	1.935	SI	S 2	3.49	SI
1.23%	0.024	0.188	0.101	0.226	0.146	2.320	SI	S 2	4.38	SI
2.05%	0.251	0.681	0.569	0.817	0.820	3.498	SI	S 2	3.48	SI
1.36%	0.116	0.422	0.315	0.507	0.453	2.951	SI	S 3	3.52	SI
1.96%	0.246	0.670	0.559	0.804	0.805	3.392	SI	S 2	3.38	SI
1.34%	0.119	0.428	0.321	0.514	0.462	2.725	SI	S 3	3.22	SI

he	hv	hf	HE	H_adm	Verificación	Estructura		Enrocado
m	m	m	m	HE<H		Entrada	Salida	
0.031	0.565	0.620	1.822	SI	Cumple	Cajón	Ala	NO

0.034	0.179	0.117	0.274	SI	Cumple	Cajón	Ala	NO
0.006	0.175	0.287	0.648	SI	Cumple	Cajón	Ala	NO
0.060	0.509	0.259	0.625	SI	Cumple	Cajón	Ala	NO
0.076	0.435	0.170	1.373	SI	Cumple	Ala	Ala	NO
0.021	0.191	0.468	0.967	SI	Cumple	Cajón	Ala	NO
0.022	0.274	0.277	0.919	SI	Cumple	Cajón	Ala	NO
0.094	0.624	0.244	1.743	SI	Cumple	Ala	Ala	NO
0.050	0.444	0.264	0.557	SI	Cumple	Cajón	Ala	NO
0.090	0.587	0.214	1.654	SI	Cumple	Ala	Ala	NO
0.048	0.379	0.172	0.477	SI	Cumple	Ala	Ala	NO

Tabla 43. Diseño de Alcantarillas de la Vía Pavimentada

Abscisa	No.	Q	Material tubería	n	D	esv	Sentido de flujo		Cot_entrada
		m ³ /s		Manning	m	Grados (°)	Der.	Izq.	msnm
2 + 33.60	12	0.05	Hormigón	0.014	400	19	Der.	Izq.	2978.49
2 + 140.00	12.1	0.05	Hormigón	0.014	600	0	Der.	Izq.	2986.87
2 + 277.40	13	0.07	Hormigón	0.014	600	22	Der.	Izq.	3005.41
2 + 398.70	14	0.24	Hormigón	0.014	400	7	Der.	Izq.	3010.91
2 + 609.40	14.1	0.75	Hormigón	0.014	600	0	Der.	Izq.	3021.60
2 + 736.20	15	0.20	Hormigón	0.014	600	13	Der.	Izq.	3021.32
2 + 797.40	16	0.79	Hormigón	0.014	800	1	Der.	Izq.	3020.32
2 + 877.20	17	0.05	Hormigón	0.014	400	11	Der.	Izq.	3018.61
2 + 939.20	18	0.32	Hormigón	0.014	600	1	Der.	Izq.	3019.00
3 + 79.50	19	0.38	Hormigón	0.014	600	10	Der.	Izq.	3022.20
3 + 210.60	20	0.36	Hormigón	0.014	600	0	Der.	Izq.	3026.11
3 + 452.10	21	0.23	Hormigón	0.014	400	8	Der.	Izq.	3036.10
3 + 578.80	22	0.14	Hormigón	0.014	600	0	Der.	Izq.	3026.91
3 + 680.00	22.1	0.08	Hormigón	0.014	600	0	Der.	Izq.	3036.20
3 + 901.20	23	0.21	Hormigón	0.014	400	0	Der.	Izq.	3048.94
4 + 60.00	23.1	0.06	Hormigón	0.014	600	0	Der.	Izq.	3054.30
4 + 253.50	24	0.92	Hormigón	0.014	800	12	Der.	Izq.	3061.70

Cot_salida	Relleno	Longitud	So	Yn	Kc	yc/D	yc	θc	Ac	Vc
msnm	m	m	%	m	-	chow	m	Radianes	m ²	m/s
2978.10	0.82	13.57	2.90%	0.140	0.168	0.410	0.164	2.780	0.049	1.097
2986.53	1.73	8.50	4.00%	0.112	0.062	0.244	0.146	2.067	0.053	1.008
3004.81	1.19	7.99	7.50%	0.112	0.075	0.269	0.161	2.181	0.061	1.065
3010.67	1.27	7.76	3.20%	0.277	0.746	0.867	0.347	4.790	0.116	2.043
3021.45	1.30	8.25	1.82%	0.239	0.855	0.910	0.546	5.064	0.270	2.764
3020.83	1.08	8.03	6.20%	0.201	0.226	0.478	0.287	3.054	0.133	1.479
3020.15	0.92	8.48	2.00%	0.531	0.443	0.680	0.544	3.878	0.364	2.181
3018.06	1.60	6.50	8.50%	0.106	0.164	0.405	0.162	2.759	0.048	1.089
3018.75	1.18	6.89	3.63%	0.307	0.370	0.620	0.372	3.626	0.184	1.753
3021.97	1.22	7.68	2.99%	0.356	0.437	0.676	0.406	3.861	0.203	1.878

3025.85	1.04	8.32	3.12%	0.321	0.416	0.659	0.395	3.789	0.198	1.838
3035.80	1.43	6.95	4.32%	0.321	0.729	0.858	0.343	4.738	0.115	2.011
3026.32	1.37	11.26	5.24%	0.174	0.163	0.404	0.242	2.755	0.107	1.329
3035.88	1.44	8.30	3.80%	0.143	0.092	0.298	0.179	2.310	0.071	1.134
3048.55	1.30	7.27	5.36%	0.272	0.648	0.817	0.327	4.515	0.110	1.866
3054.01	1.28	8.40	3.40%	0.127	0.071	0.262	0.157	2.149	0.059	1.054
3061.60	1.09	6.62	1.51%	0.636	0.514	0.733	0.586	4.111	0.395	2.334

Sc	K4	y/D	K1	y	A	V	V_adm	Perfil		Qmax	Q_adm
0.61%	0.050	0.273	0.175	0.109	0.028	1.897	SI	S	3	0.32	SI
0.52%	0.015	0.149	0.072	0.090	0.026	2.068	SI	S	3	1.11	SI
0.52%	0.013	0.141	0.066	0.084	0.024	2.737	SI	S	3	1.53	SI
1.37%	0.213	0.607	0.498	0.243	0.080	2.965	SI	S	3	0.34	SI
1.50%	0.303	0.795	0.669	0.477	0.241	3.100	SI	S	2	0.75	SI
0.56%	0.043	0.254	0.157	0.152	0.057	3.484	SI	S	3	1.39	SI
0.64%	0.142	0.475	0.367	0.380	0.235	3.378	SI	S	3	1.70	SI
0.61%	0.029	0.208	0.117	0.083	0.019	2.775	SI	S	3	0.55	SI
0.64%	0.093	0.373	0.267	0.224	0.096	3.359	SI	S	3	1.06	SI
0.70%	0.121	0.432	0.324	0.259	0.117	3.271	SI	S	3	0.96	SI
0.68%	0.112	0.415	0.307	0.249	0.111	3.281	SI	S	3	0.99	SI
1.32%	0.179	0.543	0.436	0.217	0.070	3.310	SI	S	3	0.39	SI
0.53%	0.034	0.225	0.132	0.135	0.048	2.992	SI	S	3	1.28	SI
0.53%	0.022	0.184	0.098	0.110	0.035	2.269	SI	S	3	1.09	SI
1.13%	0.143	0.475	0.368	0.190	0.059	3.485	SI	S	3	0.44	SI
0.53%	0.018	0.167	0.085	0.100	0.031	2.032	SI	S	3	1.03	SI
0.72%	0.190	0.564	0.457	0.452	0.292	3.153	SI	M	3	1.48	SI

he	hv	hf	HE	H_adm	Verificación	Estructura		Enrocado
						Entrada	Salida	
0.012	0.183	0.247	0.379	SI	Cumple	Cajón	Ala	NO
0.010	0.218	0.187	0.366	SI	Cumple	Cajón	Ala	NO
0.012	0.382	0.276	0.572	SI	Cumple	Cajón	Ala	NO
0.043	0.448	0.224	0.628	SI	Cumple	Cajón	Ala	NO
0.078	0.490	0.155	1.145	SI	Cumple	Cajón	Ala	NO
0.022	0.619	0.249	0.747	SI	Cumple	Cajón	Ala	NO
0.048	0.582	0.131	0.669	SI	Cumple	Cajón	Ala	NO
0.012	0.392	0.256	0.571	SI	Cumple	Cajón	Ala	NO
0.031	0.575	0.163	0.676	SI	Cumple	Cajón	Ala	NO
0.036	0.545	0.164	0.652	SI	Cumple	Cajón	Ala	NO
0.034	0.549	0.181	0.661	SI	Cumple	Cajón	Ala	NO
0.041	0.558	0.249	0.746	SI	Cumple	Cajón	Ala	NO
0.018	0.456	0.302	0.633	SI	Cumple	Cajón	Ala	NO

0.013	0.262	0.176	0.395	SI	Cumple	Cajón	Ala	NO
0.036	0.619	0.287	0.814	SI	Cumple	Cajón	Ala	NO
0.011	0.210	0.165	0.342	SI	Cumple	Cajón	Ala	NO
0.056	0.507	0.086	0.590	SI	Cumple	Cajón	Ala	NO

Tabla 44. Diseño de Alcantarillas para la Vía de Lastre

t	IdTR	ITR
min	mm/h	mm/h
60	2.06	37.15

Tramo de análisis				Longitud	B	Factor de infiltración	Factor de retención	IR	Q inf		
Absc. Inicio		Absc. Final		m	m			mm/h	l/s		
1	+	385	1	+	414.85	29.85	2.9	0.4	0.33	37.15	0.119
1	+	414.85	1	+	450	35.15	2.9	0.4	0.33	37.15	0.140

Tramo de análisis				Longitud	B	Cnd. Hid	Nf	Nd	A	i	Q n.freat		
Absc. Inicio		Absc. Final		m	m	cm/h	m	m	m ²		l/s		
1	+	385	1	+	414.85	29.85	2.9	1.09	2947.62	2946.12	44.775	0.517	0.070
1	+	414.85	1	+	450	35.15	2.9	1.09	2947.62	2946.12	52.725	0.517	0.083

Tramo de análisis				Diam	Rugosidad	pendiente	Q dis	y	Vel.	A	P	RH		
Absc. Inicio		Absc. Final		mm	(n)	%	m ³ /s	m	m/s	m ²	m			
1	+	385	1	+	414.85	160	0.009	2.00%	0.000189	0.0082	0.0230	0.0004	0.0733	0.0054
1	+	414.85	1	+	450	160	0.009	2.00%	0.000223	0.0089	0.0250	0.0004	0.0762	0.0058

Tabla 45. Cálculos del diseño de subdrenes