

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA**

**“Simulación hidráulica en IBER de la obra de drenaje km 20+322.40 tipo
bóveda en la carretera “Real del Monte–Entronque Huasca”**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN INGENIERÍA CIVIL

PRESENTA
CARLOS YAHIR GRACIA GARCÍA

DIRECTOR DE TESIS:
DR. OMAR SALVADOR AREU RANGEL

CO-DIRECTORA:
MTRA. VALERIA VOLPI LEÓN

MINERAL DE LA REFORMA, HIDALGO

MAYO 2026





Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

School of Engineering and Basic Sciences

Dirección

Office of the Director

Mineral de la Reforma, Hgo., a 5 de mayo de 2026

Número de control: ICBI-D/900/2026

Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado al egresado de la Licenciatura en Ingeniería Civil **Carlos Yahir Gracia García**, quien presenta el trabajo de titulación **"Simulación hidráulica en IBER de la obra de drenaje km 20+322.40 tipo bóveda en la carretera "Real del Monte-Entronque Huasca"**, ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dra. Liliana Guadalupe Lizárraga Mendiola

Secretario: Mtra. Valeria Volpi León

Vocal: Omar Salvador Areu Rangel

Suplente: Dr. Fernando Salas Martínez

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Dr. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI

GVR/MMM

"Amor, Orden y Progreso"



Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo
Km. 4.5 Colonia Carboñeras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,
México. C.P 42184
Teléfono: 52 (771) 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

uaeh.edu.mx

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN	2
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	4
OBJETIVO GENERAL	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
JUSTIFICACIÓN	5
ANTECEDENTES.....	6
CAPITULO 1. MARCO TEÓRICO (OBRAS DE DRENAJE)	9
1.1. OBRAS DE DRENAJE SUPERFICIAL EN VÍAS TERRESTRES	10
1.1.1. OBRAS DE DRENAJE LONGITUDINAL.....	10
1.1.2. OBRAS DE DRENAJE TRANSVERSAL	13
1.2. OBRAS DE DRENAJE SUBTERRÁNEO	15
1.2.1. CAPA PERMEABLE	17
1.2.2. DRENES LONGITUDINALES.....	18
1.2.3. DRENES TRANSVERSALES	19
1.3. DISEÑO DE OBRAS DE DRENAJE TRANSVERSAL.....	20
1.3.1. ESTUDIO HIDROLÓGICO	21
1.3.2. DISEÑO GEOMÉTRICO Y DEL EJE DE LA ESTRUCTURA	31
1.3.3. PROCESOS CONSTRUCTIVOS	34
CAPÍTULO 2. MODELO NUMÉRICO IBER.....	39
2.1. ECUACIONES DE NAVIER-STOKES	41
2.2. ESQUEMA NUMÉRICO DE IBER.....	42
CAPITULO 3. METODOLOGÍA DE LA BÓVEDA EN LA CARRETERA REAL DEL MONTE – HUASCA	45
3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL.....	45
3.2. LOCALIZACIÓN	46
3.3. DATOS DEL LUGAR.....	46
3.4. DATOS CLIMATOLÓGICOS	48
3.5. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA	50
CAPÍTULO 4. MODELO HIDRÁULICO EN EL SOFTWARE IBER.....	59
4.1. CÁLCULO DEL GASTO HIDROLÓGICO	60
4.2. SIMULACIÓN HIDRÁULICA DEL MODELO EN 2D	66

4.2.1.	DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA	69
4.2.2.	MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (DEM) Y SU CALIDAD.....	71
4.2.3.	CONDICIONES INICIALES	73
4.2.4.	CONDICIONES DE FRONTERA.....	73
4.2.5.	MALLADO	74
4.3.	PROCESO DE MODELADO	75
4.3.1.	SUPUESTOS DEL MODELO	75
4.3.2.	PARÁMETROS DE TIEMPO	75
4.3.3.	PARÁMETROS DE CÁLCULO	76
4.4.	POSPROCESO	76
4.4.1.	GEOMETRÍA EN IBER	77
4.4.2.	CONDICIONES DE CONTORNO.....	77
4.4.3.	CALIBRACIÓN DEL MODELO	78
4.4.4.	VALIDACIÓN DEL MODELO.....	80
4.4.5.	LIMITACIONES DEL MODELO	81
4.5.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	82
4.6.	DISCUSIÓN DEL MODELO	96
5.	CONCLUSIONES	98
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación de los distintos sistemas de recogida de aguas pluviales.	12
Figura 2 Ejemplos de obras de drenaje transversal.	14
Figura 3 Construcción de la bóveda Real del monte – Huasca.	15
Figura 4 Drenaje subterráneo.	16
Figura 5 Drenes Longitudinales.	18
Figura 6 Drenes transversales.	20
Figura 7 Ejemplo de cauce del rio sobre eje de carretera.	22
Figura 8 Sección de una bóveda.	35
Figura 9 Alero de una estructura tipo bóveda.	36
Figura 10 Armado de muros.	37
Figura 11 Armado de la caja deflectora 1 de la bóveda.	37
Figura 12 Armado de la losa de la bóveda.	38
Figura 13 Malla de cálculo formada por una Red irregular.	44
Figura 14 Tramo Real del Monte – Huasca.	45
Figura 15 Municipio de Omitlán de Juárez.	46
Figura 16 Cuenca del río Moctezuma.	47
Figura 17 Croquis de localización.	47
Figura 18 Esquema del trazo del encauzamiento y ubicación de cajas deflectoras.	50
Figura 19 Partes de la bóveda.	51
Figura 20 Vista a la entrada de la bóveda.	51
Figura 21 Detalle de alero del primer tramo.	52
Figura 22 Muro de contención tramo 2.	53
Figura 23 Sección transversal propuesta para las cajas de deflexión.	54
Figura 24 Sección de caja deflectora.	55
Figura 25 Detalles de losas de cajas deflectoras de la bóveda.	55
Figura 26 Secciones constructivas de diferentes cadenamientos.	57
Figura 27 Eje auxiliar de la zona de la bóveda.	57
Figura 28 Vista aérea de la construcción de la bóveda I.	58
Figura 29 Vista aérea de la Construcción de la boveda I.	58
Figura 30 Colocación del arco seccional de la bóveda.	58

Figura 31 Cuenca Hidrográfica donde se ubica la bóveda.	59
Figura 32 Uso de suelo y vegetación 1.	61
Figura 33 Uso de suelo y vegetación 2.	61
Figura 34 Isoyeta para un periodo de retorno de 5 años.	63
Figura 35 Isoyeta para un periodo de retorno de 10 años..	64
Figura 36 Isoyeta para un periodo de retorno de 50 años..	64
Figura 37 Isoyeta para un periodo de retorno de 100 años.	65
Figura 38 Isoyeta para un periodo de retorno de 500 años..	65
Figura 39 Relación gasto de diseño-periodo de retorno.	66
Figura 40 Planta de la bóveda.	67
Figura 41 Secciones constructivas.	68
Figura 42 Dibujo de la poligonal en AutoCAD.....	69
Figura 43 Coordenadas de los vértices.....	70
Figura 44 Geometría de la bóveda en software IBER.....	70
Figura 45 Nube de puntos Entronque Huasca.	71
Figura 46 Ortofoto del Entronque Huasca. Nota.....	72
Figura 47 Curvas de nivel generadas a partir de la ortofoto.	72
Figura 48 Curvas de nivel del Entronque Huasca.	73
Figura 49 Condiciones frontera del modelo.	78
Figura 50 Velocidad del modelo a 5 años.....	83
Figura 51 Velocidad del modelo a 10 años.....	84
Figura 52 Velocidad del modelo a 50 años.....	85
Figura 53 Velocidad del modelo a 100 años.....	86
Figura 54 Velocidad del modelo a 500 años.....	87
Figura 55 Gráfica de velocidad en la sección de la bóveda.	88
Figura 56 Tirante del modelo a 5 años.	90
Figura 57 Tirante del modelo a 10 años.	91
Figura 58 Tirante del modelo a 50 años..	92
Figura 59 Tirante del modelo a 100 años.	93
Figura 60 Tirante del modelo a 500 años.	94
Figura 61 Grafica de tirantes en la sección de la bóveda.	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Periodos de retorno en función del tipo y de la localización de la carretera.	24
Tabla 2 Formas estándar de cuencas en base al índice de Gravelius.....	28
Tabla 3 Valores máximos recomendados de riesgo admisible de obras de drenaje.....	29
Tabla 4 Valores para el coeficiente de escorrentía.....	30
Tabla 5 Carreteras tipo ET y A.....	33
Tabla 6 Carreteras tipo B.....	33
Tabla 7 Carreteras tipo C.....	33
Tabla 8 Carreteras tipo D	33
Tabla 9 Datos de altura de precipitación máxima 24 horas estación Omitlán.	48
Tabla 10 Datos de altura de precipitación máxima 24 horas estación Real del monte.	49
Tabla 11 Materiales bóveda tramo I	52
Tabla 12 Materiales bóveda tramo II.	54
Tabla 13 Materiales bóveda tramo III.	56
Tabla 14 Índices del cauce principal	60
Tabla 15 Tipo de suelo y vegetación del proyecto	62
Tabla 16 Coeficientes de escurrimiento C.....	62
Tabla 17 Datos del gasto calculados.....	66

RESUMEN

El presente trabajo evalúa la capacidad hidráulica de la obra de drenaje transversal tipo bóveda que protege el cauce del río Amajac, ubicada en el entronque a desnivel Huasca, km 20+322.40, entre las gasas 10, 20 y 30. Para ello, se realizaron simulaciones hidrodinámicas numéricas mediante el software IBER, considerando cinco escenarios correspondientes a distintos periodos de retorno.

El modelo numérico fue desarrollado a partir del proyecto geométrico definitivo con el que se construyó la obra, mediante la reconstrucción digital basada en plantas arquitectónicas, detalles constructivos, secciones transversales y un modelo digital de elevación.

Los resultados obtenidos permitieron identificar puntos críticos caracterizados por altos tirantes y elevadas velocidades de flujo, asociados a zonas con potencial de erosión y presencia de altas presiones hidrodinámicas. Lo anterior permite establecer programas de monitoreo orientados a evaluar periódicamente la estabilidad estructural y el adecuado funcionamiento hidráulico de la obra.

Asimismo, el trabajo demuestra la aplicabilidad de IBER en la simulación hidrodinámica de estructuras hidráulicas, particularmente en obras de drenaje transversal para vías terrestres, permitiendo analizar la funcionalidad de los diseños geométricos e identificar zonas sometidas a mayores esfuerzos hidrodinámicos.

INTRODUCCIÓN

Las obras de drenaje constituyen elementos fundamentales de la infraestructura carretera, ya que permiten la continuidad de los cauces naturales que interceptan los caminos, evitando afectaciones estructurales y reduciendo los riesgos de inundación o erosión. En el diseño y la evaluación de este tipo de estructuras, se requiere considerar aspectos geométricos y el comportamiento hidrodinámico del flujo que circula a través de estas.

En México, la interacción entre la infraestructura de transporte y los cauces fluviales representa un reto constante, particularmente en regiones donde los ríos presentan variaciones significativas de gasto durante periodos de lluvia. Un ejemplo de esta problemática es el caso del río Amajac, el cual no estaba contemplado inicialmente en el proyecto de la carretera Real del Monte–Huasca; dicho río está ubicado en el km 20+322.40, donde fue necesaria la incorporación de una obra de drenaje transversal tipo bóveda, con la finalidad de proteger la estructura frente a las condiciones naturales y garantizar su perdurabilidad a lo largo del tiempo.

Para estos casos, la modelación numérica se consolida como una herramienta eficaz para el análisis hidráulico de obras de drenaje, ya que permite representar de manera aproximada y detallada fenómenos hidrodinámicos complejos de flujo con alto nivel de detalle. En este sentido, el software IBER resulta especialmente adecuado, debido a que se basa en la resolución bidimensional de las ecuaciones de aguas someras mediante el método de volúmenes finitos, lo que posibilita una simulación más realista del comportamiento del flujo en cauces naturales y estructuras hidráulicas. Asimismo, IBER permite incorporar condiciones y variables que facilitan la evaluación de la capacidad hidráulica de las estructuras asociadas a diferentes periodos de retorno, lo que facilita la evaluación de su capacidad hidráulica, la identificación de condiciones críticas de operación y la detección de zonas susceptibles a procesos de erosión, desbordamiento y presiones hidráulicas.

Bajo esta perspectiva, este trabajo de investigación tiene como objetivo evaluar la capacidad hidráulica de la bóveda que conduce el río Amajac en el entronque Huasca km 20+322.40, mediante la aplicación de simulaciones hidrodinámicas con el software IBER considerando cinco escenarios de gasto asociados con diferentes periodos de retorno. A partir

del proyecto definitivo, que incluye plantas, secciones transversales y modelo digital de elevación, se analizan los resultados obtenidos para evaluar el funcionamiento hidráulico de la estructura y establecer lineamientos para su monitoreo periódico; lo anterior contribuye a la conservación de la infraestructura y a la prevención de daños derivados de fenómenos hidrodinámicos. Finalmente, este trabajo pretende evidenciar la utilidad de las herramientas de modelación numérica para el análisis y validación de diseños geométricos en obras de drenaje transversal, contribuyendo así a algunas ramas de la ingeniería civil.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el tramo carretero comprendido entre los km 10+600 y 20+400 de la carretera Real del Monte-Huasca, en el estado de Hidalgo, se localiza una obra de drenaje transversal tipo bóveda asociada al entronque Huasca, en una zona caracterizada por topografía montañosa y la presencia de suelos arcillosos de alta plasticidad, arcillas orgánicas y formaciones rocosas. Estas condiciones geotécnicas e hidrológicas influyen de manera directa en el comportamiento hidráulico de las obras de drenaje que intersectan el cauce del río Amajac.

Durante el desarrollo del proyecto original del entronque Huasca, no se contemplaron de manera integral las obras de protección del cauce del río Amajac en el cruce ubicado en el km 20+322.40, particularmente en la zona comprendida entre las gasas 10, 20 y 30. Esta situación motivó la ejecución de una obra adicional de drenaje tipo bóveda, cuyo diseño hidráulico fue realizado bajo condiciones de tiempo limitado y sin una evaluación hidrodinámica detallada del comportamiento del flujo al interior de la estructura.

La ausencia de un análisis hidráulico avanzado implica una mayor incertidumbre en la fiabilidad del análisis de la capacidad real de la bóveda para conducir de manera segura los gastos de diseño, especialmente ante eventos hidrológicos extremos. En particular, existe la necesidad de evaluar la distribución espacial de velocidades y tirantes hidráulicos, así como la influencia de la geometría de la bóveda y de las cajas deflectoras en el comportamiento del flujo, aspectos que no pueden representarse de forma completa y detallada mediante métodos hidráulicos tradicionales unidimensionales.

Derivado de lo anterior, el presente estudio se orienta a evaluar, mediante la simulación hidráulica en el modelo IBER, si la obra de drenaje tipo bóveda ubicada en el km 20+322.40 de la carretera Real del Monte–Huasca cuenta con la capacidad hidráulica necesaria para soportar los gastos de diseño y garantizar un funcionamiento seguro bajo las condiciones hidrológicas del sitio.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Permite la simulación en el modelo IBER verificar si la obra de drenaje tipo bóveda (km 20+322.40) de la carretera Real del Monte – Huasca es capaz de conducir los gastos de diseño y operar de manera segura bajo las condiciones hidrológicas del sitio?

OBJETIVO GENERAL

Analizar el comportamiento hidráulico de la obra de drenaje transversal tipo bóveda ubicada en el km 20+322.40 de la carretera Real del Monte – Huasca, mediante la aplicación de un modelo hidrodinámico desarrollado en el software IBER, con el propósito de verificar su capacidad hidráulica y su correspondencia con las condiciones de diseño y construcción del proyecto.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Desarrollar un modelo hidrodinámico de la obra de drenaje transversal tipo bóveda ubicada en el km 20+322.40 de la carretera Real del Monte – Huasca, empleando el software IBER y la geometría del proyecto ejecutivo original.
2. Evaluar el comportamiento hidráulico de la obra de drenaje mediante la determinación de los tirantes máximos generados para los diferentes gastos de diseño considerados para distintos escenarios hidrológicos.
3. Analizar el desempeño hidráulico de la obra a partir de la estimación de las velocidades máximas del flujo y la identificación de las zonas críticas donde estas se presentan.

4. Comparar los resultados obtenidos del modelo hidrodinámico con los parámetros establecidos en el diseño original de la obra, con el fin de verificar su congruencia con lo proyectado y construido.
5. Validar el periodo de retorno máximo para el cual la obra de drenaje mantiene un funcionamiento hidráulico adecuado, con base en los resultados de la simulación hidrodinámica.

JUSTIFICACIÓN

Este tipo de obras de drenaje son ampliamente utilizadas en México debido a la gran cantidad de cuencas hidrográficas presentes a lo largo del territorio nacional, por lo que, en la construcción de caminos y carreteras, resulta indispensable librar estos cuerpos de agua para garantizar la continuidad y correcto funcionamiento de la infraestructura vial. Una adecuada evaluación hidráulica de estas estructuras permite asegurar la continuidad de los cauces naturales y, al mismo tiempo, prevenir afectaciones de tipo ambiental, estructural y económico en los proyectos.

En este contexto, el análisis de la obra de drenaje tipo bóveda ubicada en el tramo carretero Real del Monte – Huasca representa un beneficio directo para los pobladores y usuarios de la vialidad, ya que contribuye a evaluar su comportamiento hidráulico bajo distintos escenarios hidrológicos. El uso de modelos hidrodinámicos bidimensionales, como los desarrollados en el software IBER, permite conocer de manera anticipada las condiciones de operación de la estructura, identificar posibles zonas críticas y establecer medidas preventivas para su conservación y adecuado funcionamiento a lo largo del tiempo.

De esta manera, el presente estudio aporta información técnica relevante que favorece una mayor vida útil de la obra de drenaje, reduce el riesgo de fallas hidráulicas ante eventos extremos y contribuye a una planeación más eficiente de la infraestructura, considerando los efectos de los fenómenos hidrológicos que impactan de manera recurrente este tipo de estructuras.

ANTECEDENTES

En el desarrollo de la infraestructura vial, las carreteras constituyen uno de los elementos más relevantes para el crecimiento económico y la integración territorial de un país, al permitir la movilidad de personas y mercancías de manera eficiente y segura. En este contexto, la planeación, diseño y conservación de la infraestructura carretera resulta fundamental para garantizar su correcto funcionamiento y su aportación al desarrollo regional y nacional.

De acuerdo con Quiteño (2019), una infraestructura vial adecuada es fundamental para el desarrollo socioeconómico del país, siendo las carreteras una pieza importante para la integración e interconexión del territorio. Asimismo, según datos del Instituto Mexicano del Transporte, la contribución del sector transporte tiene una participación en el PIB de alrededor del 6.0%, lo cual refleja un gran dinamismo e importancia de este sector dentro de la economía nacional. (Rico, 2023), por esta razón, entre otras, resulta fundamental que el sistema nacional de carreteras se mantenga en adecuadas condiciones de transitabilidad, con el fin de que el transporte se realice de manera eficiente y segura para los usuarios.

Las carreteras presentan características técnicas y funcionales que dependen de requerimientos establecidos por diseñadores, contratistas, organismos reguladores y propietarios de proyectos involucrados. No obstante, en diversos casos, las obras se ejecutan bajo esquemas orientados principalmente al cumplimiento de costos y plazos de entrega. Como consecuencia, algunas empresas de construcción tienden a minimizar los criterios de calidad con el objetivo de reducir los costos y el tiempo de ejecución, sin considerar que esta práctica puede derivar fallas significativas y permanentes en la infraestructura. Los costos asociados a estas deficiencias pueden representar el 5% y el 25% del costo total del proyecto. Las fallas constructivas en las obras carreteras pueden presentarse en distintas etapas del proceso constructivo y están asociadas principalmente a la selección inadecuada de materiales seleccionados, deficiencia en los procesos constructivos y falta de supervisión técnica. Estas fallas pueden manifestarse de diversas formas, afectando la estabilidad, funcionalidad y durabilidad de la infraestructura vial. De manera general, las principales fallas constructivas en carreteras pueden clasificarse de la siguiente forma (Oviedo 2023):

1. **Fallas en conformación de terraplenes:** Se derivan de múltiples factores, entre los que destacan la geometría del terraplén, condiciones del terreno de fundación, el tipo de material empleado y el procedimiento para llevar a cabo su materialización; son agentes que intervienen y pueden comprometer la estabilidad del terraplén.
2. **Fallas en el proceso constructivo de perforación y volcadura:** Este tipo de fallas se asocia a una disposición incorrecta de los barrenos, cargas inadecuadas de explosivos, secuencias deficientes, fragmentación no controlada, lo que puede generar desplazamientos indeseados del macizo rocoso.
3. **Fallas en proceso constructivo en la conformación de taludes:** Se producen por un deslizamiento de la masa de suelo, la cual actúa como un sólido de cuerpo rígido que se desplaza a lo largo de una superficie de falla, afectando la estabilidad del talud. Estas fallas pueden clasificarse de la siguiente manera:
 - 3.1. Falla local: Deslizamiento en laderas naturales sobre superficies de falla preexistentes, es decir, formadas por depósitos de talud sobre materiales más firmes y estratificados.
 - 3.2. Falla de la base o cimentación del talud: Colapso por rotación a lo largo de una superficie de falla curva, en la cual ocurre el movimiento del talud.
 - 3.3. Fallas por traslación: Deslizamientos que se presentan a lo largo de superficies débiles que suelen ser horizontales o con pendientes suaves.
4. **Fallas en el proceso constructivo de conformación de la subrasante o la subbase, es decir, la base y la carpeta asfáltica:** los factores que originan este tipo de fallas son diversos y pueden presentarse a lo largo de la estructura del pavimento. Entre las causas más comunes se encuentran la mala calidad del terreno de fundación, baja compactación, contaminación de material, defectos constructivos, defecto de la base impregnada por explosión excesiva al tránsito y a los efectos del clima.
5. **Fallas en el proceso constructivo en la conformación del pavimento:** Durante esta etapa se pueden presentar las siguientes fallas.
 - 5.1. **Proceso constructivo de la carpeta de riego:** ocasionado por la mala calidad de los materiales pétreos o por una granulometría inadecuadas.

5.2. En proceso constructivo de la carpeta de mezcla asfáltica en el lugar:

Provocado por la mala calidad de los materiales pétreos o defectuosos en su granulometría, exceso de asfalto en la mezcla, exceso o escasez de asfalto en la mezcla, falta de uniformidad y presencia de agua o de solventes en la mezcla.

5.3. En proceso constructivo en la carpeta de mezcla asfáltica en caliente:

Se origina por la mala calidad de los materiales pétreos, exceso o escasez de asfalto en la mezcla, temperatura baja del asfalto y una baja compactación de la mezcla.

- 6. Falla del pavimento:** Este tipo de fallas comprende manifestaciones como el agrietamiento, las distorsiones y la degradación superficial, las cuales afectan directamente la funcionalidad y seguridad de la vía.

Dentro del conjunto de elementos que conforman la infraestructura carretera, las obras de drenaje transversal desempeñan un papel fundamental, ya que su correcto funcionamiento influye directamente en la estabilidad estructural de la vía y en la seguridad de los usuarios. Una deficiente conducción de los escurrimientos superficiales o subterráneos puede provocar deterioros prematuros en la carpeta de rodamiento, afectaciones a terraplenes y taludes, así como interrupciones en la continuidad del tránsito.

En este sentido, las obras de drenaje son importantes para la funcionalidad y durabilidad de los propios tramos carreteros y para la seguridad y comodidad de los usuarios (The Arco International Corporation, 1958, p.337). Estas obras permiten el paso hidráulico, evitando que el flujo del agua, tanto de forma superficial como subterránea, cause daños en la estructura de las vialidades. El diseño de estas estructuras se apoya en datos climatológicos, geotécnicos y morfológicos del sitio para funcionar de forma eficiente y segura.

CAPITULO 1. MARCO TEÓRICO (OBRAS DE DRENAJE)

El Manual de drenaje para carreteras (2009) establece que las estructuras de drenaje son esenciales en la construcción de carreteras para controlar el flujo de agua y evitar su acumulación sobre la superficie vial. El exceso de agua, junto con el tránsito pesado, deteriora el pavimento y reduce su durabilidad. Las obras de drenaje minimizan el volumen de agua que llega a la infraestructura, previniendo deslizamientos, inundaciones, mala visibilidad, erosión, inestabilidad de taludes, fatiga de capas estructurales, hinchamiento y agrietamiento.

Su importancia se refleja en todas las fases de la vida útil de una carretera: preinversión, inversión y operación, por lo que el diseño debe incluir captación, conducción y descarga del agua. Un sistema de drenaje eficiente previene daños graves y limita los efectos ambientales negativos por alteración de la escorrentía.

Las obras de drenaje transversal garantizan la estabilidad estructural y seguridad vial, ya que un mal manejo de aguas superficiales o subterráneas causa deterioro prematuro y afecta terraplenes y taludes. El diseño de estas infraestructuras se basa en datos climatológicos, geotécnicos y morfológicos para asegurar su funcionamiento eficiente.

Lo recomendable para la implementación de caminos es que sean trazados sobre suelos que sean estables y naturalmente drenados; sin embargo, no siempre se puede elegir la ruta ideal, por lo que el camino tiene que atravesar por diferentes tipos de suelos con características permeables y otros no. Esto obliga a construir diferentes obras de drenaje que se adapten a las particularidades del terreno.

Estas condiciones deben analizarse desde la etapa de preinversión, considerando la presencia de los cauces naturales, paso de ríos, zonas inundables, niveles freáticos elevados y manantiales, con el fin de garantizar un adecuado manejo del agua y la funcionalidad de la infraestructura vial. En este contexto, resulta fundamental la correcta planeación y diseño de los distintos tipos de obras de drenaje, entre las que destacan las obras de drenaje superficial, cuya función principal es captar y conducir los escurrimientos que se presentan sobre la superficie del terreno y la plataforma de la carretera.

1.1. OBRAS DE DRENAJE SUPERFICIAL EN VÍAS TERRESTRES

Como parte de las soluciones para resolver las problemáticas asociadas a la presencia de agua en los caminos, se emplea el drenaje superficial, cuya función principal es reducir la cantidad de agua que escurre sobre la superficie de la vía. Este tipo de drenaje actúa mediante la captación, conducción y evaluación rápida del agua. Estas comprenden la recolección de las aguas pluviales procedentes de la corona y sus márgenes, mediante cunetas, alcantarillas y sumideros. La evacuación del agua captada se realiza mediante cajas y colectores longitudinales, los cuales conducen el flujo hacia cauces naturales, sistemas de alcantarillado o a la capa freática, ya sea de forma directa o a través de obras de drenaje transversal o canalizaciones a cielo abierto o enterradas.

Para el diseño adecuado de las obras de drenaje superficial, es necesario considerar una serie de condiciones técnicas que permitan garantizar su correcto funcionamiento hidráulico y vida útil de la carretera (Marín & Pérez, 2014):

- 1. Velocidad de corriente:** Se considera la velocidad del agua para no causar daños por erosión ni por sedimentación.
- 2. Nivel del agua:** Se considera el nivel máximo de la lámina de agua con respecto a la superficie de la calzada y a las zonas adyacentes.
- 3. Sobreelevación de la corriente:** Se refiere a daños materiales a terceros producibles por la inundación de zonas aledañas.
- 4. Periodo de retorno:** Debe proyectarse el elemento con la frecuencia de aparición: cuanto mayor sea este, mayor será el gasto.

1.1.1. OBRAS DE DRENAJE LONGITUDINAL

Las obras de drenaje longitudinal son las encargadas de canalizar las aguas sobre la plataforma y taludes de la explanación de forma paralela a la calzada, restituyéndolas a sus cauces naturales. Para ello se emplean elementos como las cunetas, caces, colectores, sumideros, arquetas y bajantes (Marín & Pérez, 2014). El drenaje longitudinal deberá proyectarse como una red o conjunto de redes que recojan el agua de escorrentía superficial procedente de la plataforma de la carretera y de los márgenes que viertan hacia ella y la

conduzcan hasta un punto de desagüe, restituyéndola a su cauce natural. En este sentido, el drenaje longitudinal actúa como bypass, ofreciendo al agua un camino alternativo para evitar su interacción directa con la estructura de la carretera.

Elementos de canalización

De acuerdo con Marín y Pérez (2014), los sistemas de drenaje longitudinal están conformados por distintos dispositivos funcionales, entre los que destacan los elementos de canalización, cuya función principal es captar, conducir y evacuar adecuadamente los flujos de agua superficial.

Cunetas: Son zanjas longitudinales revestidas o sin revestir abiertas en el terreno, ubicadas en ambos lados o a un solo lado de la carretera con el objeto de captar, conducir y evacuar adecuadamente los flujos del agua superficial. Las cunetas pueden construirse de diferentes materiales en función de la velocidad de circulación del agua (Marín & Pérez, 2014).

1. **Cuneta de coronación de desmonte:** Esta se coloca en la parte más alta del desmonte para evitar la erosión y arrastre de material que conforma el talud, así para aliviar parte del gasto que debería recoger la cuneta principal (Figura 1).
2. **Cuneta de coronación del terraplén:** Su función es evitar que el agua recogida por la calzada penetre en el talud del terraplén, lo que podría ocasionar arrastres e incluso el desmoronamiento parcial de la estructura. (Figura 1).
3. **Cuneta de pie del terraplén:** Tiene como misión principal recoger las aguas que escurren sobre el talud del terraplén y sobre el terreno circundante, especialmente cuando su pendiente vierte hacia el propio relleno, contribuyendo a preservar la estabilidad del terraplén (Figura 1).

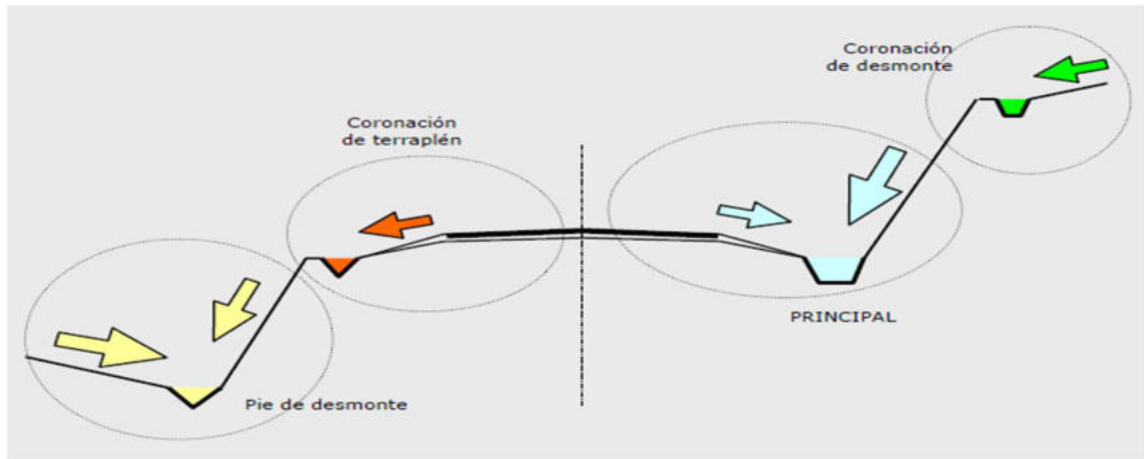


Figura 1 Ubicación de los distintos sistemas de recogida de aguas pluviales. Nota. Tomado de Blázquez & Bañón (2000, p.35).

Zampeado: Es una protección a la superficie de rodamiento o cunetas contra la erosión donde se presentan fuertes pendientes. Se realiza con piedra, concreto ciclópeo o concreto simple.

Lavaderos: Son pequeños encauzamientos a través de cubiertas de concreto, lámina, piedra con mortero, piedra acomodada, se colocan en las salidas de las alcantarillas o terrenos erosionantes, eliminando los daños que originaría la velocidad del agua.

Bombeo: Es la inclinación que se da a ambos lados del camino, para drenar la superficie del mismo, evitando que el agua se encharque, provocando reblandecimientos o que corra por el centro del camino causando daños debido a la erosión.

Vados: Son estructuras muy pegadas al terreno natural, generalmente losas a piso; tienen ventajas en cauces amplios con tirantes pequeños y régimen torrencial por corto tiempo. La construcción de vados es económica y accesible a los cambios rurales por el aprovechamiento de los recursos del lugar.

Alcantarillas: Una alcantarilla es un conducto relativamente corto a través del cual se cruza el agua bajo la vía de un costado a otro. Incluye, por lo tanto, conductos con cualquier sección geométrica, principalmente conductos circulares y alcantarillas de cajón.

1.1.2. OBRAS DE DRENAJE TRANSVERSAL

Según Marín & Pérez (2014), las obras de drenaje transversal se definen como aquellas que permiten el paso del agua a través de los cauces naturales bloqueados por la infraestructura vial, de forma que no se produzcan destrozos en esta última. Comprende pequeñas y grandes obras de paso, como puentes y viaductos. Estas tienen como objetivo evacuar adecuadamente el agua superficial que intercepta su infraestructura, la cual discurre por cauces naturales o artificiales, en forma permanente o transitoria, a fin de garantizar su estabilidad y permanencia. Para este tipo de obras se debe determinar la sección hidráulica más adecuada que permita el paso libre del flujo líquido y flujo sólido que eventualmente transportan los cursos naturales y conducirlos adecuadamente, sin causar daño a la carretera y a la propiedad adyacente. Algunos elementos importantes son:

1. **Puente:** Obra de paso que soporta cualquier tipo de vía de las definidas en la Ley de Carreteras, con la finalidad de librar un obstáculo físico como un río o un valle (Figura 2).
2. **Viaducto:** Es una obra elevada capaz de librar un valle, carretera, río u otro obstáculo. Estos se utilizan a menudo en áreas donde no es posible o práctico construir un túnel (Figura 2).
3. **Alcantarillas:** Son conductos cerrados de forma variada, cuya luz es menor. Estas estructuras se instalan o construyen transversal a la vía y por debajo del nivel de la subrasante de una carretera, para conducir el agua de lluvia proveniente de pequeñas cuencas hidrográficas, arroyos, canales de riego, cunetas o de escurrimiento superficial de la carretera hacia cauces naturales (Figura 2).
Las secciones más comunes y usuales son circulares, rectangulares y cuadradas. En ocasiones especiales que así lo ameriten, puede usarse alcantarillas de secciones parabólicas y abovedadas.
4. **Tipo bóveda:** Dentro de esta clasificación hay un tipo fundamental, la bóveda, esta se refiere a aquella obra de drenaje transversal formada por muros unidos por uno o varios arcos y que soportan las cargas de tránsito de vehículos a través de un relleno (Figura 2). Una bóveda en un medio por el cual se conduce agua a través de un terraplén. La parte superior de una bóveda no forma parte del pavimento de la

carretera, mientras que un puente está enlazado a la carretera. Aunque en el análisis y diseño estructural, en ambas estructuras se estima como carga muerta de servicio. El agua de escorrentía superficial debe correr libremente tan pronto como sea posible para evitar la saturación del suelo, lo cual provocaría hundimientos o asentamientos, deslizamientos e inestabilidad a las estructuras que se construyan sobre ella. (Hernández 2014, p.08).

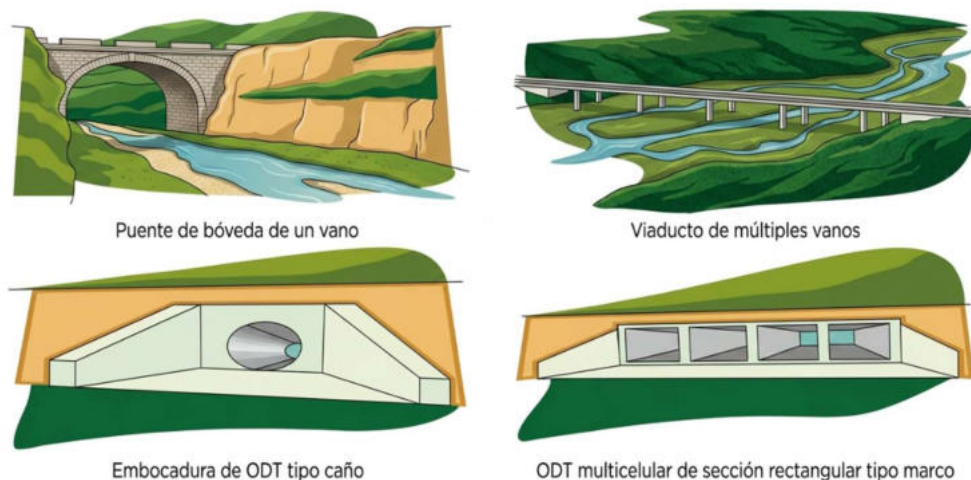


Figura 2 Ejemplos de obras de drenaje transversal. Nota. Tomado del Boletín oficial del estado (2016, p.02).

En muchos casos, los puentes y las bóvedas son los componentes más vulnerables de una carretera, ya que estos influyen en que la continuidad del servicio de transporte se efectúe de forma permanente y segura, favoreciendo en general un apropiado funcionamiento del sistema nacional de carreteras del país. La importancia de las bóvedas radica en que se utilizan para el desalojo controlado de escurrimientos de quebradas y ríos, así como para solventar accidentes naturales del terreno (Figura 3). Su uso se aconseja cuando no se pueden colocar tubos, cuando la pendiente transversal es muy fuerte o cuando la profundidad de la quebrada es muy grande. El arco puede ser en forma parabólica, de sección uniforme, y estará conformado además por los muros, los cuales a la vez sirven como muros de retención, cuya función principal es contener las fuerzas que ejercen los suelos de los rellenos de la obra.



Figura 3 Construcción de la bóveda Real del monte – Huasca. Nota. Tomado de Fletes (2023).

1.2. OBRAS DE DRENAJE SUBTERRÁNEO

Las técnicas de drenaje subterráneo o subdrenaje son uno de los métodos más efectivos para la estabilización de los deslizamientos. El drenaje subterráneo tiene por objeto disminuir las presiones de poros o impedir que aumenten, ya que a menor presión de poros la resistencia del suelo es mayor. El diseño de los sistemas de drenaje subterráneo es complejo debido a que la mayoría de los taludes no son homogéneos desde el punto de vista del drenaje subterráneo, y es muy difícil aplicar principios sencillos en el diseño de obras de subdrenaje. El movimiento de las aguas en los taludes, por lo general, es irregular y complejo. (Suárez, 2021, Cap. 2 p. 61).

Otra parte importante dentro de las obras de drenaje es el monitoreo. Para ello se deben instalar piezómetros y medir los gastos en los subdrenes, lo cual es una herramienta muy importante para evaluar, complementar o actualizar los sistemas de drenaje construidos. El nivel del agua subterránea generalmente es paralelo a la superficie del terreno. El subdrenaje es de suma importancia, pues el exceso de agua o humedad es altamente perjudicial, ya que ocasiona baches, grietas y deslaves, así como la inestabilidad en material de los taludes (Figura 4).

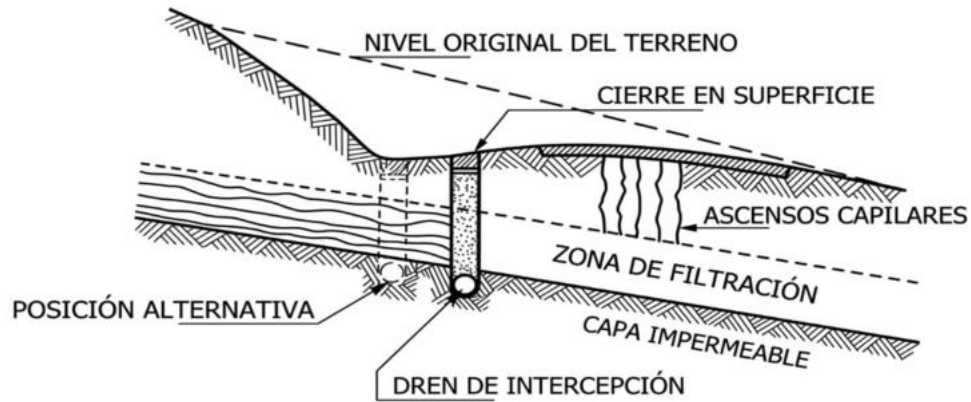


Figura 4 Drenaje subterráneo. Nota. Tomado de Manual para el diseño de carreteras pavimentadas (2008, p.78).

Los principales elementos que deben considerarse en el análisis y diseño de los sistemas de subdrenaje son:

1. **Falta de continuidad de los mantos o sectores permeables:** Se refiere a la discontinuidad de mantos permeables o la insuficiencia de material permeable, lo cual puede limitar significativamente la efectividad del sistema de subdrenaje y reducir su capacidad para evacuar el agua subterránea de manera adecuada.
2. **Efecto limitado del subdrenaje en el factor de seguridad:** En muchos casos, especialmente en suelos arcillosos, se necesitan abatimientos significativos del nivel freático para lograr incrementos del nivel de seguridad. Debido a la baja permeabilidad de este tipo de suelos, resulta difícil reducir de manera sustancial los niveles freáticos mediante sistemas de subdrenaje convencionales.
3. **Eficacia reducida del subdrenaje cuando el nivel freático se encuentra muy cercano a la superficie de falla:** Cuando el nivel freático se localiza muy próximo a la superficie potencial de falla, el uso de subdrenes de zanja presenta una efectividad limitada, por lo que resulta prácticamente imposible mejorar los factores de seguridad. En estos casos, suele recomendarse el subdren sin un análisis detallado, a pesar de que su impacto real puede ser mínimo.
4. **Asentamientos en las áreas circunvecinas como efecto del subdrenaje:** La ejecución de abatimientos significativos en los niveles de agua subterránea puede

provocar asentamientos en las zonas aledañas, lo que representa un riesgo adicional para estructuras vecinas y debe ser considerado dentro del análisis del proyecto.

- 5. Cálculo de permeabilidad del suelo o la roca que se va a drenar:** La permeabilidad del material del filtro debe ser, al menos, cien veces mayor que la del suelo circundante. Una vez calculado el gasto, se debe calcular la sección de los subdrenes, los cuales deben diseñarse considerando factores de seguridad para gastos iguales o superiores a diez veces el gasto calculado.

Con base en los criterios previamente descritos para el análisis de los sistemas de subdrenaje, resulta evidente que la correcta evacuación del agua subterránea y del agua infiltrada desde la superficie depende no solo de la disposición de los subdrenes, sino también de la adecuada selección y diseño de los elementos que conforman el sistema de drenaje. Dentro de estos elementos, la capa permeable desempeña un papel fundamental, ya que permite captar, conducir y evacuar el agua infiltrada, contribuyendo a la reducción de presiones y a la mejora del comportamiento hidráulico y estructural del pavimento.

1.2.1. CAPA PERMEABLE

La capa permeable se coloca bajo la superficie pavimentada, y está constituida por un material filtrante de manera que, con ayuda de una pendiente transversal adecuada y su correcta instalación de salida, permite drenar el agua que infiltra desde la superficie. Esta capa puede ser granular o tratada con ligantes hidrocarbonatados o con cemento.

La capa permeable se emplea para drenar el agua proveniente de la superficie y se aplica preferentemente en la construcción de pavimento rígido o una capa adicional sobre la subrasante, sin función estructural o como parte de la subbase, para el control del agua ascendiente por subpresión. Si se desea que en este caso la capa ayude a drenar el agua que se infiltre desde la superficie, la permeabilidad de las capas superiores debe ser mayor que la tasa de infiltración para que el agua pueda fluir (Manual de drenaje de carreteras, 2009).

La presencia de una capa permeable dentro de la estructura del pavimento resulta ineficiente si el agua captada no cuenta con un medio adecuado para su conducción y descarga controladas. Por ello, el sistema de subdrenaje debe complementarse con elementos que permitan la evacuación eficiente del agua infiltrada y del flujo subterráneo a lo largo de

la vía. En este contexto, los drenes longitudinales constituyen un componente esencial, ya que funcionan como colectores que conducen el agua drenada de manera paralela al eje de la carretera, evitando su acumulación dentro de la estructura del pavimento y contribuyendo a la estabilidad hidráulica del sistema.

1.2.2. DRENES LONGITUDINALES

Los drenajes longitudinales son zanjas dispuestas de forma paralela al eje de la vía, generalmente ubicadas a lo largo de la plataforma de la carretera, en las cuales se colocan materiales permeables como agregados pétreos, geotextiles, geodrenes. Estos drenes deben proyectarse cumpliendo condiciones generales establecidas para los drenes enterrados, el fondo del tubo debe quedar, por lo menos, 15 cm por debajo del plano superior de la capa impermeable que sirve de lecho a la corriente subterránea. En el caso de que esta sea de roca, deben extremarse las precauciones para evitar que parte de la filtración cruce por debajo de la tubería (Figura 5). Los subdrenes deben tener la capacidad hidráulica suficiente para conducir el total del gasto que reciben, además de estar unidos con una base permeable. El material de relleno debe ser el mismo que el de la base para asegurar su correcto funcionamiento. Estos pueden ser de concreto, metal, fibra bituminosa o plástico, dependiendo de las condiciones del proyecto y los requerimientos hidráulicos (Manual de drenaje de carreteras, 2009).

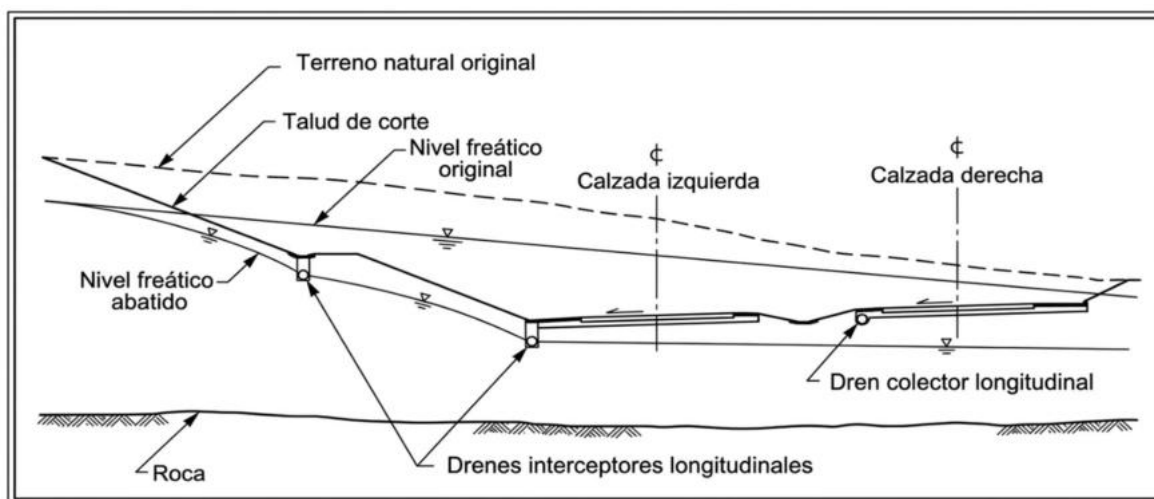


Figura 5 Drenes Longitudinales. Nota. Tomado de Manual de drenaje para carreteras (2009, p.299).

Si bien los drenes longitudinales constituyen el principal elemento para la captación y conducción del agua subterránea a lo largo de la vía, existen condiciones topográficas, geológicas e hidráulicas en las que su funcionamiento resulta ineficiente para interceptar la totalidad del flujo de filtración. En tramos con pendientes pronunciadas, con flujos subterráneos concentrados o con direcciones preferenciales del escurrimiento, es necesario incorporar elementos complementarios al sistema de subdrenaje. En este contexto, los drenajes transversales permiten interceptar y desviar el flujo subterráneo de manera perpendicular al eje de la carretera, evitando la acumulación de agua dentro de la estructura de pavimento y mejorando el desempeño hidráulico del sistema de drenaje.

1.2.3. DRENES TRANSVERSALES

Los drenes transversales son ocupados en carreteras, con pendientes, donde los drenes longitudinales pueden ser insuficientes para interceptar toda el agua de filtración. En estos casos deberán instalarse drenes interceptores transversales normales al eje de la carretera o un drenaje tipo “espina de pez”.

La distancia entre drenes interceptores transversales suele variar, en promedio, entre 20 a 25 m. El drenaje en espina de pez se proyectará de acuerdo con consideraciones tales como el ángulo de los drenes de aproximadamente 60° , estarán constituidas por una zanja situada bajo el nivel del plano superior y se rellenará con material filtrante adecuado.

Los drenes transversales se pueden usar en las juntas de los pavimentos para drenar la infiltración y el agua subterránea en bases y subbases (Figura 6). Esto es particularmente deseable en aquellos lugares de la carretera donde la relación entre las pendientes longitudinal y transversal sea tal que el flujo tienda a ocurrir más en dirección longitudinal que transversal (Manual de drenaje de carreteras, 2009).

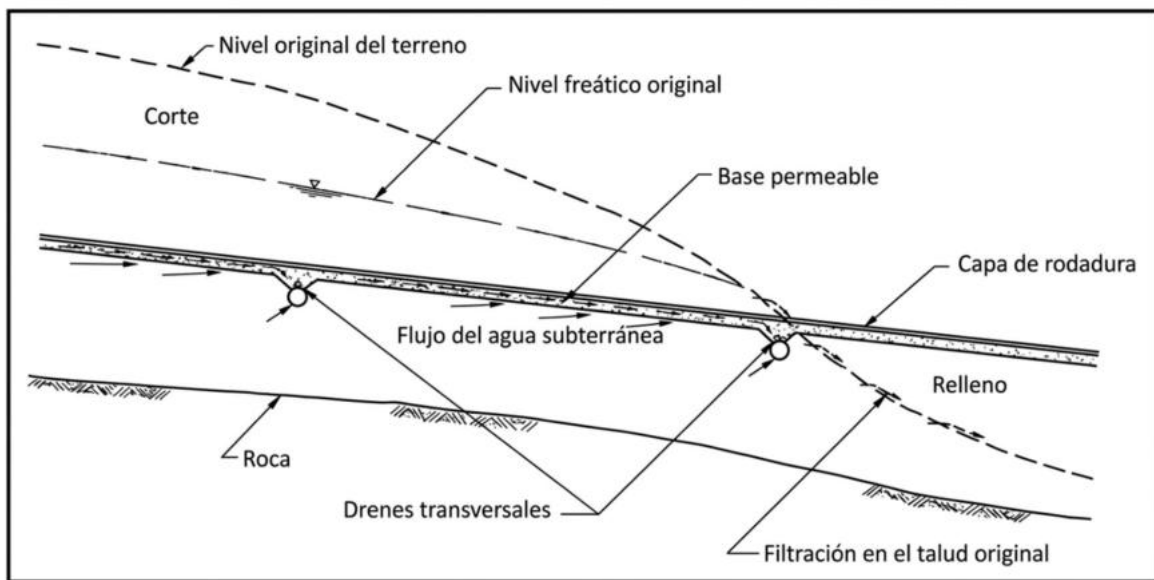


Figura 6 Drenes transversales. Nota. Tomado de Manual de drenaje para carreteras (2009, p.300).

1.3. DISEÑO DE OBRAS DE DRENAJE TRANSVERSAL

Los análisis y procedimientos para el diseño de un sistema de drenaje transversal dependen en gran medida de la calidad, completitud y precisión de los datos en los que se basan. Sin embargo, la naturaleza de los fenómenos asociados a la filtración, así como la variabilidad de los materiales, es imprecisa, lo que implica un esfuerzo para obtener datos tan reales. En el diseño de los proyectos del drenaje transversal se deben considerar diversos criterios básicos de proyecto tales como se enlistan a continuación:

1. Definición de la cuenca principal, del cauce natural y del punto de cruce.
2. Cálculo del gasto de proyecto (Q_p), en función de las características hidrológicas de la cuenca y del periodo de retorno seleccionado
3. Geometría del dominio de flujo: El diseño geométrico de una carretera incide directamente en el diseño del drenaje, por lo que disponer de planos detallados es importante.
4. Comprobación hidráulica del puente u ODT.
5. Cálculo de las variables hidráulicas necesarias para la determinación de acciones en el cálculo estructural.

6. Proyecto completo del puente u ODT. La representación en los planos debe incluir la lámina de agua correspondiente al gasto de proyecto, las profundidades de erosión o socavación y en los anexos a la memoria, se deben incluir las curvas características de las ODT.
7. Propiedades de los materiales existentes: Estas permiten identificar y clasificar los materiales térreos que indican el posible comportamiento y fenómenos de infiltración.
8. Datos climatológicos: Permiten obtener datos relevantes para el análisis y diseño, el más importante es el referente a las precipitaciones, generalmente este está relacionado con el nivel freático.

Normas vigentes sobre ambiente y salud pública; Factores económicos asociados con el diseño y la construcción del sistema.

1.3.1. ESTUDIO HIDROLÓGICO

El estudio hidrológico es aquel que se realiza para obtener el gasto de diseño que se requiere para captar, conducir y desalojar una obra hidráulica. Para realizarlo, se pueden utilizar métodos empíricos, semioníricos o probabilísticos conforme a normativas como la M-PRY-CAR-4-01-002/16 de la SICT (Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes). Cuando un proyecto de una carretera cruza por ríos, arroyos, canales o escurrimientos es necesario saber las dimensiones de la obra para dar paso a dicha corriente, esto para determinar el gasto, así como el área hidráulica mínima necesaria para cada obra (Figura 7). La ubicación de estas obras con respecto al eje de la carretera puede ser perpendicular, sin embargo, cuando presentan un ángulo de sesgo o esviaje, debe procurarse no forzar los cruces de corrientes y conservar la dirección del drenaje natural (Fonseca, 2024, p. 13).

Los factores principales que considera un estudio hidrológico para obtener el gasto son:

1. El área de la cuenca que contribuye al escurrimiento que será manejado por la obra.
2. Las características orográficas y topográficas de la cuenca.
3. El tipo y uso de suelo de la cuenca.
4. El tipo, densidad y dimensionamiento de la vegetación existente en la cuenca.
5. La intensidad de lluvia, su duración, su distribución en el espacio y en el tiempo.

6. Los escurrimientos generados por las diversas tormentas que hayan ocurrido históricamente serán obtenidos de aforos o investigaciones entre los lugareños en el sitio de estudio.
7. Los almacenamientos naturales o artificiales que puedan existir en la cuenca, sus dimensiones y otras características.

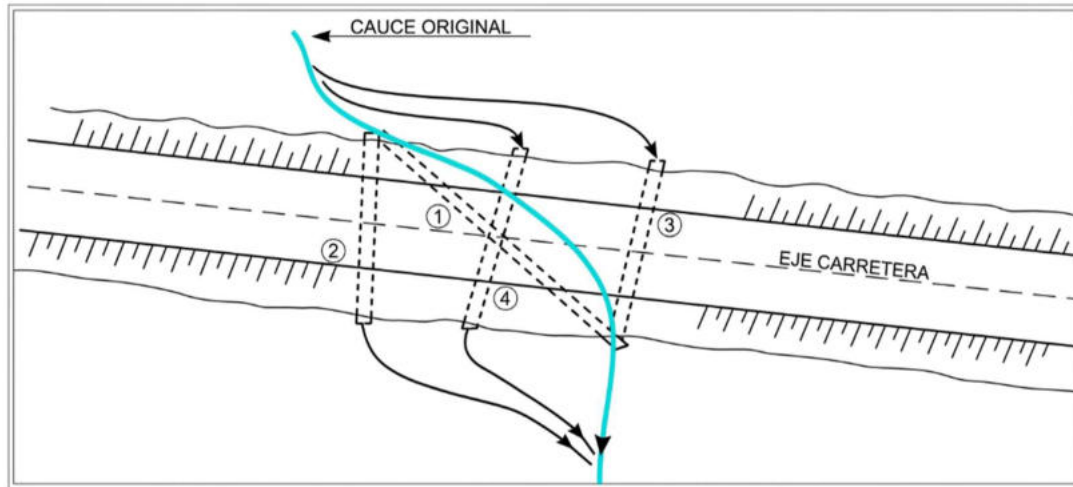


Figura 7 Ejemplo de cauce del rio sobre eje de carretera. Nota. Tomado de Gómez (2024, p.16).

El estudio hidrológico constituye una etapa fundamental en el diseño de obras de drenaje transversal, ya que permite estimar los gastos de diseño a partir del análisis del comportamiento del escurrimiento superficial. La base de dicho análisis es la cuenta de aportación, que define el área que contribuye con escurrimientos hacia el punto de cruce de la infraestructura y condiciona directamente la magnitud y la respuesta hidrológica del sistema en un área de control delimitada por la topografía de la zona denominada cuenca. Una cuenca es un área cuyas aguas fluyen a un mismo punto, denominado punto de concentración, y el comportamiento hidrológico de una cuenca se define por características fisiográficas como:

1. Topográficas (Pendientes)
2. Geológicas (Permeabilidad)
3. Fitográficas (Cobertura vegetal)
4. Climáticas de la región

1.3.1.1. MÉTODOS PARA EVALUAR LOS GASTOS DE DISEÑO

La determinación de los gastos de diseño constituye uno de los aspectos más importantes dentro del estudio hidrológico para el diseño de obras que permiten conducir un gasto, controlando variables hidráulicas como tirante y velocidad para su buen funcionamiento. De la estimación de gastos dependen directamente la capacidad hidráulica y el desempeño de la estructura. La selección del método para su estimación está condicionada por la disponibilidad y calidad de la información hidrometeorológica, las características fisiográficas de la cuenca y el nivel de precisión requerido en el proyecto. Por ello, a lo largo del tiempo se han desarrollado diversos métodos para la evaluación de los gastos de diseño, los cuales pueden agruparse en empíricos, semi empíricos, estadísticos y modelos matemáticos, cada uno con alcances y limitaciones particulares.

- 1. Empíricos:** Son usados cuando no se tiene suficiente información, permiten tener una idea aproximada del gasto de diseño. Se basan en las características fisiográficas generales de la cuenca, lo que facilita su aplicación. Los métodos más comunes son Creager y Lowry.
- 2. Semi empíricos:** En estos métodos se usa como parámetro principal la intensidad de lluvia, además de requerir un conocimiento preciso y aplicado del ciclo hidrológico. Los métodos más usados son el racional y el de Ven Te Chow.
- 3. Estadísticos:** Son los métodos más comunes en sectores en donde se dispone de unos datos históricos referentes a los gastos máximos anuales. Los métodos más comunes son Gumbel, Normal, Log-Pearson.
- 4. Modelos matemáticos:** Representados por el paquete informático HEC-HMS, estos requieren las características de la cuenca, tiempos de concentración, escorrentía, periodos de retorno.

Una vez identificados los distintos métodos disponibles para la estimación de los causales de diseño, es necesario seleccionar y aplicar aquellos que resulten más adecuados. En el presente estudio, el análisis hidrológico se enfoca en corrientes provenientes de cuencas relativamente pequeñas, para las cuales es posible emplear modelos simplificados que permiten estimar de manera confiable el gasto de diseño asociado a distintos periodos de retorno.

1.3.1.2. ANÁLISIS HIDROLÓGICO

Para la obtención del gasto de diseño mediante el análisis hidrológico correspondiente, y considerando los periodos de retorno establecidos, se asume que las corrientes drenadas que provienen de cuencas relativamente pequeñas, en general menores de 5 km², son las cuales se podrán aplicar los modelos:

1. Fórmula Racional
2. Método de Ven Te Chow
3. Método de Horton

Los periodos de retorno que se emplearán para obtener el gasto de diseño de las obras de drenaje son (Tabla 1):

Tabla 1 Periodos de retorno en función del tipo y de la localización de la carretera.

Tipo de carretera	Periodo de retorno años	Observaciones
ET, A y B	50	Carreteras localizadas en zonas no costeras de la República Mexicana
ET, A y B	100	Carreteras localizadas en zonas costeras de la República Mexicana
C y D	25	Carreteras localizadas en zonas no costeras de la República Mexicana
C y D	50	Carreteras localizadas en zonas costeras de la República Mexicana

Fuente: Normativa IMT (2016, S/P).

Mediante el análisis hidrológico es posibles estimar los gastos asociados a distintos periodos de retorno, lo que permite determinar gasto de diseño (Q_{Trc}) correspondiente a un periodo de retorno Trc . Dicho Periodo se define con base en el gasto máximo histórico obtenido en campo, Q_{MOC} , el cual sirve como referencia para la selección del escenario hidrológico de diseño. Los gastos obtenidos a partir del análisis hidrológico constituyeren la información de entrada para el análisis hidráulico posterior, en el cual se evalúa el comportamiento del flujo dentro del cauce natural y de la obra de drenaje, mediante la estimación de variables como tirantes y velocidades, a partir de ecuaciones hidráulicas y parámetros de rugosidad apropiados.

Para que estos análisis representen de forma adecuada las condiciones reales del sitio de estudio, es indispensable realizar:

1. Reconocimiento de campo: Tiene el propósito de recabar las características fisiográficas e hidrológicas de la cuenca, conocer el comportamiento histórico de la corriente a drenar y programar los trabajos topográficos necesarios, así mismo, determinar las características y funcionamiento de obras construidas dentro de la cuenca. También puede ser útil para el diseño de la obra en estudio determinar el tipo y dimensiones de los materiales arrastrados por la corriente, tales como rocas, cantos rodados, grava, arena, entre otros. En este reconocimiento se programan los trabajos del levantamiento topográfico, incluyendo las dimensiones del área por levantar, la longitud del perfil para determinar las dimensiones del área por levantar, la longitud del perfil para determinar la pendiente geométrica o hidráulica, que en general podrá ser del orden de 200 m, ya sea aguas arriba o aguas abajo del sitio de cruce con el eje de proyecto de la carretera, y la ubicación de una o más secciones hidráulicas, a criterio del proyectista, las cuales se levantarán de preferencia en tramos rectos del cauce en estudio.

2. Levantamiento topográfico: En este se replanteará y nivelará el eje de proyecto de la carretera en el área por estudiar.

2.1 Replanteo del eje de proyecto: Se utilizan las referencias topográficas del proyecto geométrico para replantear el eje de proyecto y se indican las estaciones cerradas cada 20 m, además de en los puntos singulares, como los de inflexión (PI), principio de curva (PC), término de curva (PT) y los puntos sobre tangente (PST).

2.2 Nivelación del eje de proyecto: Tomando como referencia los bancos de nivel considerados en el proyecto geométrico, se nivelará el eje de proyecto mediante la obtención de las elevaciones de todos los quiebres del terreno natural. Se elaborará una planta topográfica cubriendo el ancho del cauce hasta 5 m más allá de las trazas con el terreno natural del nivel alcanzado del eje de la carretera en estudio hasta el derecho de vía.

En caso de existir obras menores de drenaje construidas sobre el cauce en estudio, se investigará su antigüedad y su comportamiento hidráulico. Cada una de las

obras menores cercanas sobre la misma corriente será analizada, definiendo sus diferencias y coincidencias respecto a la obra menor que se proyectará. Finalmente, se contará con un gasto máximo histórico obtenido en campo a través del análisis hidráulico (Q_{MOC}), asociado a un periodo de retorno investigado en campo (Trc).

3. **Precipitación:** Se refiere a la caída de partículas líquidas o sólidas de agua, es decir, cualquier tipo de agua que cae sobre la superficie de la tierra. Esta se puede presentar en forma de lloviznas, lluvia, nieve, granizo, agua, nieve o lluvia congelada. La intensidad de precipitación hace referencia a la cantidad de agua registrada en una unidad de tiempo. Normalmente, la intensidad es medida con la unidad mm/h, basado en la intensidad percibida se puede clasificar a la lluvia en débil, media o fuerte. En este análisis estadístico se realiza una serie histórica de datos e información de las precipitaciones máximas en 24 horas de una o varias estaciones, pasan por un riguroso estudio y se proyecta dichas precipitaciones en diferentes periodos de retorno, generalmente dichos valores son de 5, 10, 25, 50 y 100 años. Posteriormente, se encuentra el gasto de diseño y esta deriva en el posterior diseño hidráulico de la sección. Los métodos que se pueden usar son la distribución normal o la distribución de Pearson, lo normal de I y II parámetros y Gumbel, comúnmente usadas en estudios hidrológicos (Chereque, W. 1989).
4. **Análisis de precipitación:** Si no se cuenta con la información suficiente a las precipitaciones históricas, se realiza una transposición de intensidades de estaciones obtenidas de bandas pluviográficas, es decir, a la estación más cercana al proyecto en estudio.
5. **Escorrentía:** Es un coeficiente que establece la relación que existe entre la cantidad total de lluvia que se precipita y la que escurre superficialmente; su valor dependerá de varios factores permeabilidad del suelo, morfología de la cuenca, pendientes longitudinales y cobertura vegetal.
6. **Parámetros geomorfológicos:**
 - 6.1 **Área de la cuenca:** Representa la superficie de la cuenca en proyección horizontal limitada por parte de agua (Divisoria). Su trazado se realiza empleando la topografía y la cartografía disponible para la zona del proyecto,

debiendo identificar la red de drenaje o las corrientes superficiales para proceder a un esbozo de delimitación.

6.2 Pendiente del curso principal: Este parámetro establece el comportamiento del recurso hídrico con diversos fines, tales como ubicación de obras de toma, evaluación y optimización del potencial hidroenergético, etc. La pendiente del cauce principal varía a lo largo de toda su longitud, siendo necesario usar un método adecuado para estimar una pendiente representativa. Se representa mediante la siguiente expresión:

$$S = \left[\frac{\sum_{i=1}^n Li}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Li^2}{Si} \right)^{\frac{1}{2}}} \right]^2 \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

- S : *Pendiente (%)*
- Li : *Longitud de cada tramo de pendiente Si (m).*
- n : *Número de tramo en que se ha dividido el perfil del cauce*

6.3 Tiempo de concentración (t_c): Es el tiempo que toma a la partícula hidráulicamente más lejana en viajar hasta el punto emisor. Se supone que ocurre una lluvia uniforme sobre toda la cuenca durante un tiempo, por lo menos, igual al tiempo de concentración. Dada por la siguiente fórmula:

$$t_c = 0.3 \left(\frac{L}{S^{\frac{1}{4}}} \right)^{0.76} \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

- t_c = *Tiempo de concentración (horas)*
- L = *longitud del cauce principal (m)*
- S = *Pendiente media del cauce principal (m/m)*

7. Parámetros de diseño: Son un elemento de diseño que relaciona la intensidad de la lluvia, la duración de la misma y la frecuencia con la que se puede presentar. (Ven Te Chow, 1994).

7.1 Transferencia de intensidades: Es el elemento que sirve para verificar la condición de semejanza hidráulica de los sistemas hidrológicos, con la hidráulica de modelos físicos a escala. (Ortiz, 2015) lo define como: “dos o más sistemas hidrológicos son semejantes si cumplen simultáneamente las condiciones de semejanza geométrica, cinemática y dinámica”.

7.2 Semejanza geométrica: Dado por un parámetro adimensional que se obtiene relacionando el perímetro de una cuenca y el perímetro que tendría un círculo imaginario de la misma área que la cuenca (Tabla 2). Por analogía: “Dos o más sistemas hidrológicos son geoméricamente semejantes si tienen igual índice de Gravelius”.

$$K_c = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \dots \dots \dots (3)$$

Donde:

- P = Perímetro de la cuenca (m)
- A = Área de la cuenca (m)

Tabla 2 Formas estándar de cuencas en base al índice de Gravelius.

Formas de sistemas hidrológicos con base en el coeficiente de gravelius		
Clase de geometría	Rango de clase	Forma de cuenca
K_{C1}	$1 < K_C \leq 1.25$	oval redonda
K_{C2}	$1.25 < K_C \leq 1.50$	oval oblonga
K_{C3}	$1.5 < K_C \leq 1.75$	oval alargada

Fuente: Henaos (1988, p. 28).

7.3 Semejanza dinámica: También conocida como el Coeficiente Orográfico (CO). Parámetro asociado a las fuerzas gravitacionales de los flujos superficiales y, por ende, a los potenciales de erosión hídrica y de generación de energía hidráulica.

$$C_0 = \frac{H^2}{A} \dots \dots \dots (4)$$

Donde:

7.3.1 H = Altitud media (m.s.n.m.)

7.3.2 A = Área de la cuenca (m)

Por lo que se puede inferir, se concluye que dos o más sistemas hidrológicos son semejantes, dinámicamente, si tienen igual coeficiente orográfico.

7.4 Semejanza cinemática: Este parámetro describe la configuración espacial o geométrica de la red de drenaje y expresa el grado de ramificación de la red, lo que ayuda a categorizar dicha red de drenaje superficial.

7.5 Riesgo de falla (J): Representa el peligro a la probabilidad de que el gasto de diseño sea superado por otro evento de magnitudes mayores (Ven Te Chow, 1994).

Tabla 3 Valores máximos recomendados de riesgo admisible de obras de drenaje.

Tipo de obra	Riesgo admisible (**) %
Puentes (*)	25
Alcantarillas de paso de quebradas importantes y badenes	30
Alcantarillas de paso quebradas menores y descarga de agua de cunetas	35
Drenaje de plataforma (a nivel longitudinal)	40
Subdrenes	40
Defensas ribereñas	25

Fuente: *Manual de hidrología, hidráulica y drenaje* (2011, p. 31).

Nota: () La vida útil es considerada en (n).**

1. Puentes y defensas Ribereñas n=40 años
2. Alcantarillas de quebradas importantes n=25 años
3. Alcantarillas de quebradas menores n=15 años
4. Drenaje de plataformas y subdrenes n=15 años

7.6 Tiempo o periodo de retorno (Tr): Es el tiempo transcurrido para que un evento de magnitud dada se repita en promedio, es de los parámetros más significativos a ser tomado en cuenta en el momento de dimensionar una obra hidráulica destinada a soportar avenidas (Bañón & Beviá, 2000). Este parámetro ayuda a proyectar las precipitaciones máximas en periodos de retorno dichos valores son de 5, 10, 25, 50 y 100 años, para proceder a un gasto de diseño.

$$T_r = \frac{1}{1 - P} \dots \dots \dots (5)$$

7.7 Vida útil (N): Se define como el tiempo ideal durante el cual las estructuras e instalaciones funcionan al 100%.

7.8 Coeficiente de escorrentía (C): Este parámetro es relación entre el agua que corre por la superficie del terreno y la total precipitada. El terreno por lo general no presenta las mismas características ni propiedades, es decir la escorrentía no será uniforme en toda el área por lo que se usan una serie de coeficientes (Tabla 4).

Tabla 4 Valores para el coeficiente de escorrentía.

Cobertura vegetal	Tipo de suelo	Pendiente del terreno				
		Pronunciada	Alta	Media	Suave	Despreciable
		>50%	>20%	>5%	>1%	<1%
Sin Vegetación	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
	Impermeable	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45
	Semipermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35

Pastos, Vegetación Ligera	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 Vegetación	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

Fuente: *Manual de hidrología, hidráulica y drenaje* (2011, p. 33).

7.9 Descarga de diseño (Q): Es el valor máximo del gasto instantáneo que se espera ocurrir con determinado periodo de frecuencia, durante los años de vida de un proyecto.

1.3.2. DISEÑO GEOMÉTRICO Y DEL EJE DE LA ESTRUCTURA

El proyecto geométrico de la carretera se compone de la ordenación y dimensionamiento de los elementos visibles. La ordenación corresponde a la relación de estos elementos entre sí y con respecto al terreno natural. El dimensionamiento corresponde a la cuantificación de los parámetros que definen a cada elemento. Estas dos características se expresan en planta, perfil y secciones, que corresponden a los llamados alineamientos horizontal, alineamiento vertical y sección transversal (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2018).

1.3.2.1. COMPONENTES DEL DISEÑO GEOMÉTRICO

El diseño geométrico de la carretera se desarrolla mediante el análisis detallado de cada uno de sus alineamientos, los cuales permiten materializar la relación entre la vía y el terreno natural. En este contexto, el alineamiento horizontal constituye uno de los componentes principales del proyecto geométrico, ya que define el trazo de la carretera en planta y

establece la disposición del eje vial mediante la combinación de tramos rectos y curvos, asegurando condiciones adecuadas de operación, seguridad y comodidad para los usuarios.

Alineamiento horizontal

Corresponde a la planta del eje de la carretera, es decir, la proyección sobre un plano horizontal del eje de la sub corona del camino.

1. **Tangentes:** La tangente horizontal es la recta que une dos curvas horizontales consecutivas; principia al final de la curva y termina al empezar la siguiente curva. Se caracteriza por su dirección y longitud.
2. **Curvas:** Son elementos que unen tangentes consecutivas del alineamiento horizontal. Sirven para que los vehículos cambien de dirección.

2.1 Curvas circulares simples: son las que unen dos tangentes con un arco de círculo de radio constante. Se definen por su radio y por la deflexión entre las tangentes que las unen, el parámetro de control para el dimensionamiento de la curva está dado por el radio.

2.2 Curvas circulares compuestas: Formadas por varios arcos de círculo de radio decreciente, primero, y creciente después. Cuando son del mismo sentido se llaman compuestas directas y cuando son del sentido contrario, compuestas inversas.

2.3 Curvas circulares con espirales de transición: Una espiral de transición es utilizada cuando se pasade una recta y se tiene que pasar a una curva circular, aprovechando que el ancho de carril es mayor que el vehículo. Esto con la finalidad de facilitar la conducción y que se proporcione el espacio longitudinal y desarrollar la sobre elevación y ampliación requerida.

Alineamiento vertical

Corresponde al perfil de la carretera o proyección sobre un plano vertical del desarrollo del eje de la sub corona o línea subrasante. De la misma manera que el horizontal, el alineamiento vertical está formado por tangentes y curvas.

1. **Tangentes:** Las tangentes del alineamiento vertical, también denominadas rampas, son rectas que unen las curvas verticales y se caracterizan por su longitud y su

inclinación o pendiente, medida por la relación entre el desnivel y la distancia entre dos puntos.

2. **Pendiente mínima:** Es la pendiente mínima que permite el buen drenaje de la precipitación pluvial.
3. **Pendiente máxima:** Es la pendiente máxima que se permite en el proyecto de la carretera. En general, se recomienda con la jerarquía de la carretera (Tablas 5 – 8).
4. **Pendiente gobernadora:** Es la pendiente uniforme con que se pueden unir dos puntos obligados de la carretera, es decir, aquel punto seleccionado por el proyectista para fines de control. La pendiente gobernadora y máxima de una carretera debe ser la menor posible, siempre que sea compatible con las condiciones orográficas, pero no debe superar ciertos valores:

Tabla 5 Carreteras tipo ET y A.

Tipo de terreno	Pendiente Gobernadora	Pendiente Máxima			
		80 km/h	90 km/h	100 km/h	110 km/h
Plano	2 %			5%	4%
Lomerío	3%		5%	5%	
Montañoso	4%	6%	5%		

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2018, p. 50).

Tabla 6 Carreteras tipo B.

Tipo de terreno	Pendiente Gobernadora	Pendiente Máxima			
		70 km/h	80 km/h	90 km/h	100 km/h
Plano	3 %			6%	5%
Lomerío	4%		6%	6%	
Montañoso	5%	7%	6%		

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2018, p. 50).

Tabla 7 Carreteras tipo C.

Tipo de terreno	Pendiente Gobernadora	Pendiente Máxima				
		50 km/h	60 km/h	70 km/h	80 km/h	90 km/h
Plano	4 %				6%	6%
Lomerío	5%		7%	7%	6%	
Montañoso	6%	8%	7%			

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2018, p. 50).

Tabla 8 Carreteras tipo D.

Tipo de terreno	Pendiente Gobernadora	Pendiente Máxima			
		70 km/h	80 km/h	90 km/h	100 km/h
Plano	6 %			8%	7%
Lomerío	7%		8%	8%	
Montañoso	8%	9%	8%		

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2018, p. 50).

- 5. Curvas verticales:** Tienen como propósito enlazar dos tangentes del alineamiento vertical, de manera que la componente de aceleración centrífuga sea uniforme; lo que determina que su forma sea parabólica, proporcionando condiciones adecuadas de comodidad, visibilidad y seguridad para los usuarios. Las curvas pueden ser en creta si son convexas o en columpio si son cóncavas, y su diseño está definido principalmente por la diferencia de pendientes entre tangentes, la longitud de la curva y los criterios de visibilidad y drenaje.

Otros elementos a considerar en el diseño geométrico, además de elementos de los alineamientos horizontales y verticales, son un conjunto de elementos complementarios que influyen directamente en su funcionalidad, seguridad y durabilidad. Entre los principales aspectos a considerar se encuentran:

1. Número de calzadas y de carriles
2. Alineamientos horizontal y vertical
3. Secciones transversales
4. Anchos de calzada, bermas y medianas
5. Anchos y espesores de las capas de pavimento
6. Profundidades de cortes y espesores de rellenos
7. Materiales de cortes y rellenos
8. Materiales para la construcción del pavimento
9. Profundidades de cortes y espesores de rellenos
10. Materiales de cortes y rellenos
11. Materiales para la construcción del pavimento
12. Pendientes de los taludes de cortes y rellenos
13. Detalles de cunetas, canales, alcantarillas y otras instalaciones de drenaje superficial.

1.3.3. PROCESOS CONSTRUCTIVOS

Las alcantarillas tipo bóveda son estructuras formadas con una sección rectangular en la parte inferior y un arco en la parte superior, las cuales se utilizan en gastos con áreas de aportaciones grandes o como pasos superiores. Las partes que componen las bóvedas son las que se muestran en la figura 8 que se muestra a continuación:

Las partes que componen las bóvedas son las que se muestran en la Figura 8 que se muestra a continuación:

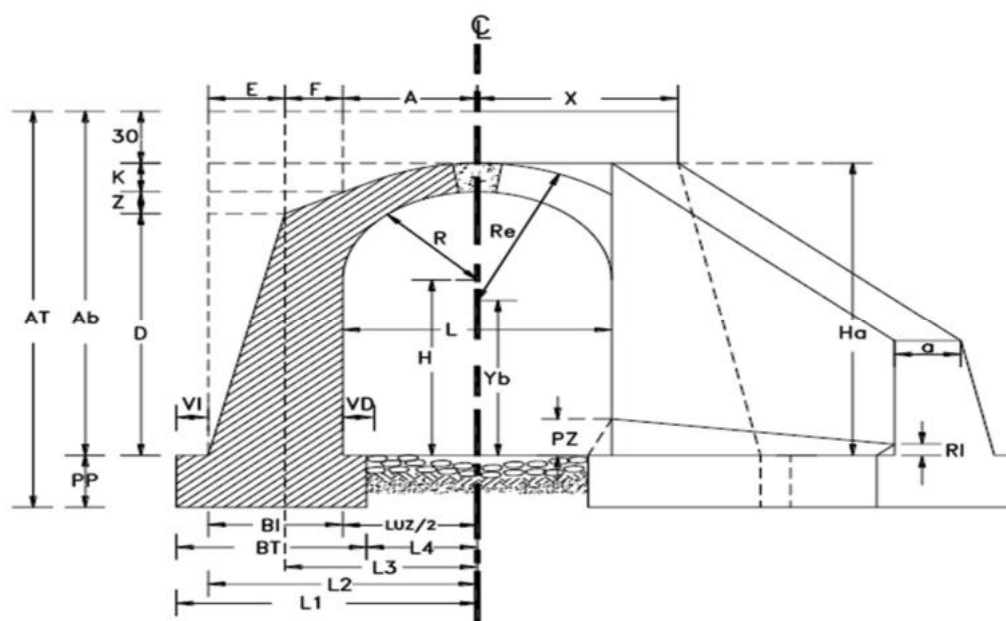


Figura 8 Sección de una bóveda. Nota. Tomado de Gómez (2024, p.30).

Símbolo	Descripción
e	Espesor de la clave
Ha	Altura promedio en el arranque de los aleros
L	Luz o claro de la obra
R	Radio
a	Coronamiento del alero
Re	Radio de extradós
BT	Ancho total del cimiento
BI	Base intermedia
VI y VD	Volado izquierdo y volado derecho
PP	Peralte del cimiento
PZ	Altura del escarpio

1.3.3.1. EJE DE LA VÍA

El eje de la vía para las bóvedas debe presentar de preferencia un ángulo de sesgo o esviaje, cuando se trata de cruces de corrientes en los que se conserva la dirección del drenaje natural o de la corriente. En los casos en que resulte largo, es necesario proyectar la alcantarilla normal al eje de la vía o con un menor sesgo para que se reduzca la longitud y se construyan obras adicionales.

1.3.3.2. ESTRUCTURAS DE ENTRADA Y SALIDA

Las estructuras de entrada y salida forman parte fundamental de las obras de drenaje transversal, ya que permiten una transición adecuada entre el cauce natural y el conducto hidráulico, asegurando un funcionamiento eficiente del sistema y reduciendo los efectos negativos asociados a la erosión, la socavación y las pérdidas de energía del flujo. Un diseño adecuado de estas estructuras contribuye a mejorar las condiciones hidráulicas de ingreso y descarga, así como a proteger el terraplén y los elementos estructurales de la obra.

Aleros: Son los encargados de retener el material del terraplén, protegiéndolo de la erosión y acortando la longitud de la alcantarilla, entre sus funciones guían el flujo hacia la alcantarilla, mejorando el desempeño hidráulico. Su orientación y longitud se proyecta para asegurar la entrada del flujo al conducto con un ángulo de 45° , modificándose para cada caso en específico (Figura 9).

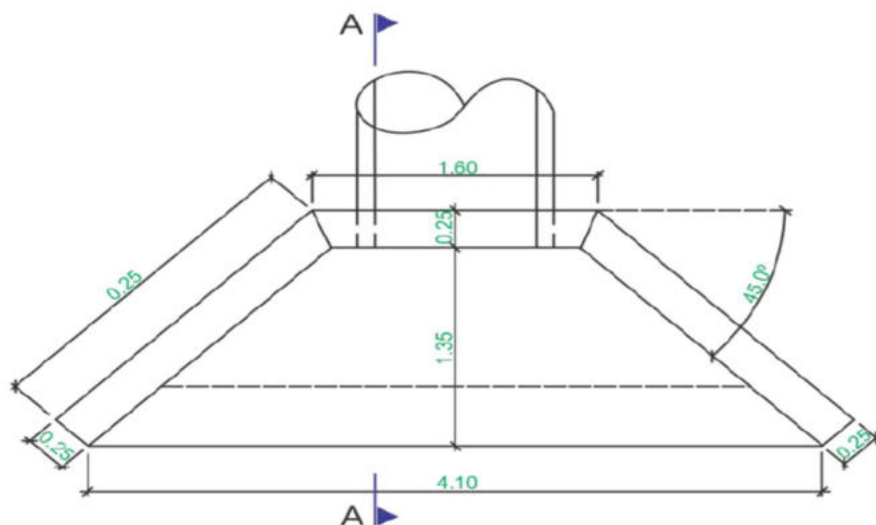


Figura 9 Alero de una estructura tipo bóveda. Nota. Tomado de Gómez (2024, p.32).

Muros: En obras con grandes longitudes se desarrollan secciones tipo cajón debido a los grandes cortes y obras para atravesar el canal a través del terreno adyacente con la finalidad de sostener los pesos del terreno natural (Figura 10).



Figura 10 Armado de muros. Nota. Tomado de Fletes (2023).

Cajas deflectoras: La función de las cajas deflectoras es dar dirección al inicio y al final del cauce del agua hacia la siguiente etapa de la obra, además de disipar la energía a lo largo del canal y al final del mismo (Figura 11).



Figura 11 Armado de la caja deflectora 1 de la bóveda. Nota. Tomado de Fletes (2023).

Losas: En las alcantarillas, las losas se deben obtener dependiendo de espesores y resistencias que, por lo general para las losas son de mínimo $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$ (Figura 12).

Acero de refuerzo: Para las alcantarillas tipo bóveda, las losas en los proyectos tipo se encuentran tabuladas conforme al diámetro, espaciamiento, longitud y número.

Armado esviado: En este tipo de armados, las losas tienen un esviaje menor a 20° , el armado superior se coloca paralelo al eje de la carretera.

Armado normal: En losas con esviaje mayor a 20° , y losas normales, se colocan perpendiculares al eje de la obra.



Figura 12 Armado de la losa de la bóveda. Nota. Tomado de Fletes (2023).

CAPÍTULO 2. MODELO NUMÉRICO IBER

Se deben desarrollar de manera oportuna modelos que evalúen los recursos hídricos y el grado de protección del ambiente para conocer el comportamiento de los escurrimientos para evitar sucesos hidrológicos catastróficos (Mankin et al., 1999).

En los últimos años, la modelación numérica de flujos superficiales libres ha experimentado un rápido desarrollo, mediante la utilización de varios modelos para la simulación, como el caso de FLO-2D, DSS-WISE, TELEMAC, INFO Works, LISFLOOD-FP y Flood Modeller Pro y otros que destacan por su accesibilidad y funcionamiento bajo el software de acceso libre, como es el caso de HEC-RAS 2D e IBER 2D.

IBER se describe como un modelo matemático bidimensional para simulación del flujo en ríos y estuarios, en el cual se utiliza el método de volúmenes finitos para solucionar las ecuaciones 2D de Saint Venant (Bladé, 2014). Para resolverlo, se requiere una geometría con rugosidad de fondo, condiciones iniciales y de contorno (IBER 2014). El modelo numérico de IBER es una herramienta de simulación de flujo turbulento en lámina libre, en régimen no permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. Tiene un intervalo de aplicación que incluye la hidrodinámica fluvial, la simulación de roturas de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de marea en estuarios (Bladé, 2014).

El modelo IBER permite definir la geometría de estructuras y tramos de canales de forma relativamente sencilla para ejemplificar, de manera directa, situaciones de flujo unidimensionales y bidimensionales con la ventaja de apoyarse en métodos numéricos, lo que permite iniciar el uso de herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) de una manera agradable y muy intuitiva.

La información requerida para la modelación incluye la determinación del coeficiente de Manning, que representa la resistencia al flujo de agua en cauces sobre llanuras de inundación; el valor es más alto cuando la rugosidad de la superficie de contacto con el flujo es mayor, por lo que el presente estudio evalúa, identifica y cuantifica las zonas con alta peligrosidad de inundación e indica algunas propuestas que prevengan y reduzcan su impacto. El rango de aplicación de IBER abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de

rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de marea en estuarios. El módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad, también conocidas como 2D Shallow Water Equations (2D-SWE) o ecuaciones de St. Venant bidimensionales. Dichas ecuaciones asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad. La hipótesis de presión hidrostática se cumple razonablemente en el flujo en ríos, así como en las corrientes generadas por la marea en estuarios. Asimismo, la hipótesis de distribución uniforme de velocidad en profundidad se cumple habitualmente en ríos y estuarios, aunque pueden existir zonas en las que dicha hipótesis no se cumpla debido a flujos locales tridimensionales a cuñas salidas.

Ecuación de la continuidad:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = M_s \dots \dots \dots (6)$$

Ecuación de momento en dirección “x”

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho} + \frac{\tau_{bx}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + 2\Omega \sin \lambda U_y + \frac{\partial h \tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial y} + M_x \quad (7)$$

Ecuación de momento en dirección “y”

$$\frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho} - \frac{\tau_{by}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + 2\Omega \sin \lambda U_x + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}^e}{\partial y} + M_y \quad (8)$$

Donde:

Símbolo	Descripción
h	Tirante
U_x	Velocidades horizontales promediadas en profundidad
g	Aceleración de la gravedad
Z_s	Elevación de la lámina libre

τ_s	Fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento
τ_b	Fricción debido al rozamiento del fondo
ρ	Densidad del agua
Ω	Velocidad angular de rotación de la tierra
Λ	Latitud del punto considerado
$\tau_{xx}^e, \tau_{xy}^e, \tau_{yy}^e$	Tensiones tangenciales efectivas horizontales
M_s, M_x, M_y	Respectivamente los términos fuentes/sumideros masa y de momento, mediante los cuales se realiza la modernización de precipitación, infiltración y sumideros

Algunos campos de aplicación de IBER son:

1. Simulación del flujo en lámina libre en cauces naturales.
2. Evaluación de zonas inundables. Cálculo de las zonas de flujo preferente.
3. Calculo hidráulico de encauzamiento.
4. Calculo hidráulico de redes de canales en lámina libre.
5. Cálculo de corrientes de marea en estuarios.
6. Estabilidad de los sedimentos del lecho.
7. Procesos de erosión y sedimentación por transporte de material granular.

2.1. ECUACIONES DE NAVIER-STOKES

Las ecuaciones de Navier-Stokes buscan determinar el movimiento futuro de un fluido a partir de su estado inicial, a pesar de notables esfuerzos por más de un siglo, no se ha conseguido demostrar matemáticamente este determinismo, ni tampoco desmentirlo (Mora X. 2017).

El comportamiento de un fluido en movimiento está gobernado por un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales resultan de aplicar los principios de conservación de la masa y conservación de la cantidad de movimiento a un fluido continuo. Bajo el supuesto de que el fluido es incompresible y viscoso.

- **Ecuación de cantidad de movimiento:**

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \nu \Delta \mathbf{u} - (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla p \dots \dots \dots (9)$$

Símbolo	Descripción
$\mathbf{u}$	Velocidad del fluido
ν	Viscosidad cinemática
p	Presión
Δ	Operador de Laplace
$(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}$	Termino de advección no lineal

- **Ecuación de continuidad (incompresibilidad)**

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \dots \dots \dots (10)$$

- **Condición frontera (pared solida)**

$$\mathbf{u} \big|_{\partial \Omega} = 0 \dots \dots \dots (11)$$

- **Condición inicial**

$$\mathbf{u} \big|_{t=0} = \mathbf{u}_0 \dots \dots \dots (12)$$

En términos generales, esta ecuación permite determinar la evaluación temporal y espacial de variables fundamentales como la velocidad y presión dentro de un fluido. Esta ha sido aplicada en programas como IBER para determinar las aguas poco profundas que representan de forma adecuada el flujo en cauces naturales, ríos y obras de drenaje, permitiendo analizar fenómenos como la interacción del flujo con las estructuras hidráulicas y la distribución de las velocidades.

2.2. ESQUEMA NUMÉRICO DE IBER

Para la solución aproximada de las ecuaciones de Navier-Stokes se han introducido varias simplificaciones que conducen a modelos que pueden ser aplicados a problemas prácticos en la ingeniería. La versión unidimensional de las ecuaciones de Saint-Venant se obtiene

integrando las ecuaciones de continuidad y de Navier-Stokes en la sección transversal del flujo, asumiendo presión hidrostática en la dirección normal al fondo del cauce. Sin embargo, la suposición de un flujo unidimensional puede no ser válida en varias aplicaciones de flujo a superficie libre, es decir, en estos casos es posible simplificar las ecuaciones de Navier-Stokes a un esquema bidimensional cuando en el análisis considerado se obtengan resultados con una razonable precisión. La versión bidimensional de estas ecuaciones es obtenida promediando con respecto a la profundidad las ecuaciones de continuidad y de Navier-Stokes, tal que las ecuaciones resultantes describan el movimiento del fluido en un plano paralelo al fondo (Ochoa, G., Teresa, R., & Marcelo, G., 2014).

La base de un desarrollo adecuado del proceso de cálculo, sustentado en las condiciones físicas de un modelo experimental, es la selección de un esquema numérico que, mediante aproximaciones sucesivas, pueda solucionar las ecuaciones que reproducen el fenómeno que se quiere representar (García M. 2017).

Debido a que las ecuaciones de Saint-Venant 2D no son resolubles analíticamente en un problema real, es necesario recurrir a métodos numéricos para su resolución.

Algunos de los métodos son, por ejemplo, volúmenes finitos, elementos finitos y diferencias finitas. En cuanto a los dos primeros, tienen beneficios en tener una gran flexibilidad geométrica para definir el problema, mediante los beneficios computacionales. Sin embargo, el método de volúmenes finitos es el más utilizado para su resolución.

Para resolver la hidrodinámica, IBER resuelve ecuaciones que se deducen a partir de dos leyes físicas de conservación elementales: Conservación de la masa y conservación de la cantidad de movimiento. Estas leyes se traducen en expresiones matemáticas, las ecuaciones de Navier-Stokes, que gobiernan el movimiento de un fluido en tres dimensiones del espacio. A partir de estas expresiones se deducen las ecuaciones de aguas someras, Shallow Water Equations (SWE), también conocidas como ecuaciones de Saint-Venant en dos dimensiones, que constituyen las ecuaciones básicas que resuelven el módulo hidrodinámico de IBER.

Las ecuaciones de Saint-Venant 2D se obtienen a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes

1. Un promedio temporal para filtrar las fluctuaciones turbulentas, lo que permite obtener las ecuaciones de Reynolds.

2. Un promedio en la profundidad para pasar de las ecuaciones tridimensionales a las bidimensionales.

Los esquemas numéricos utilizados en IBER son especialmente apropiados para la modelización de cambio de régimen y de frentes seco-mojado. La discretización del dominio espacial se realiza con volúmenes finitos, admitiéndose estas mixtas formadas por elementos triangulares y cuadrangulares. El flujo convectivo se discretiza mediante esquemas descentrados de tipo Godunov (Figura 13).

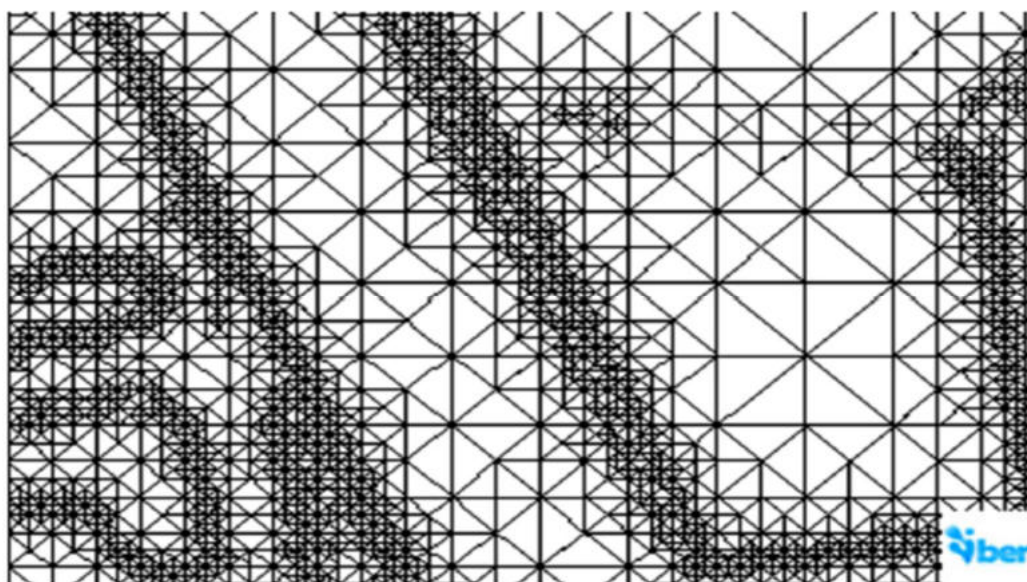


Figura 13 Malla de cálculo formada por una Red irregular. Nota. Tomado de Blade (2012, p. 4).

CAPITULO 3. METODOLOGÍA DE LA BÓVEDA EN LA CARRETERA REAL DEL MONTE –HUASCA

3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

El proyecto se llevó a cabo en el tramo de la carretera Hidalgo: Real del monte - Huasca con una longitud de 9.8 km a 4 carriles (5.8 km troncal y 4 km en desarrollo de estructuras que incluyen 3 túneles, 6 viaductos, 2 entronques y una rampa de emergencia). La estructura ubicada en el entronque Huasca el cual consta de 5 gasas:

1. Gasa 10: km 10+000 al km 10+932.02 longitud total= 932.02 m.
2. Gasa 20: km 20+000 al km 21+003.13 longitud total=1,003.13 m.
3. Gasa 21: km 21+300 al km 22+105.42 longitud total=805.42 m.
4. Gasa 30: km 30+020 al km 30+399.10 longitud total=379.10 m.
5. Gasa 40: km 40+000 al km 40+333.88 longitud total=333.88 m.

La longitud total de las gasas que componen el entronque es de 3.45 kilómetros, con un ancho de calzada es 10.50 m. Contando con obras complementarias como PSV, PIV y la bóveda del kilómetro 20+322.40, ubicado en el municipio de Omitlán de Juárez, Hidalgo (Figura 14).

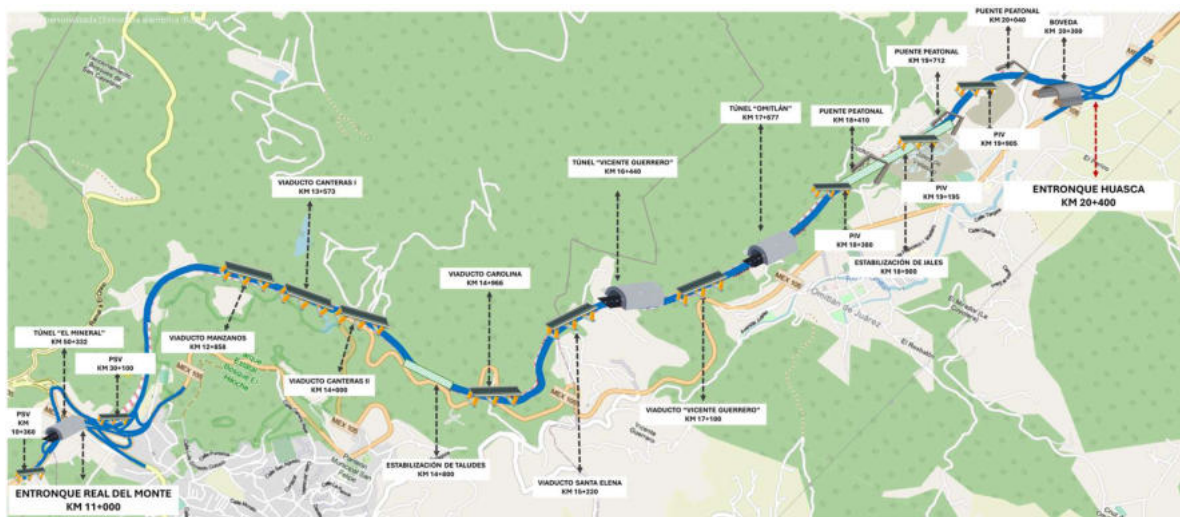


Figura 14 Tramo Real del Monte – Huasca. Nota. Tomado de Residencia General de Carreteras SICT Hidalgo (2023).

3.2. LOCALIZACIÓN

Esta localidad se localiza a 16 kilómetros de la capital del estado, cuyas coordenadas geográficas son 20° 10' 11" de latitud norte y 98° 38' y 52" de longitud Oeste del meridiano de Greenwich. Este municipio colinda al norte con los municipios de Atotonilco el Grande, al este con Huasca de Ocampo, al sur con Singuilucan y Epazoyucan y al oeste con Mineral del monte y Mineral del chico. Su superficie es de 79.67 km² lo que representa un 0.38% de la superficie total del estado de Hidalgo (Figura 15).



Figura 15 Municipio de Omitlán de Juárez. Nota. Tomado de Enciclopedia de los municipios (2010, p. 5).

3.3. DATOS DEL LUGAR

POBLACIÓN

De acuerdo con los resultados que presentó el censo de población y vivienda 2020, en el municipio habitan un total de 9,295 personas (Figura 17).

OROGRAFÍA

El municipio de Omitlán de Juárez se encuentra ubicado en el eje Neovolcánico formado por sierra en un 80 por ciento y en menor grado por llanuras.

HIDROGRAFÍA

En lo que respecta a la hidrografía del municipio, atraviesa el río Pánuco, forma parte de la cuenca del río Moctezuma. Posee los ríos: Amajac y Bandola, este último desemboca en la presa de los Ángeles. Cuenta con dos cuerpos de agua. Además, existen algunos pozos en las comunidades más alejadas de la cabecera municipal (Figura 16).



Figura 16 Cuenca del río Moctezuma. Nota. Tomado de Estudio Hidrológico e hidráulico del río (2022).

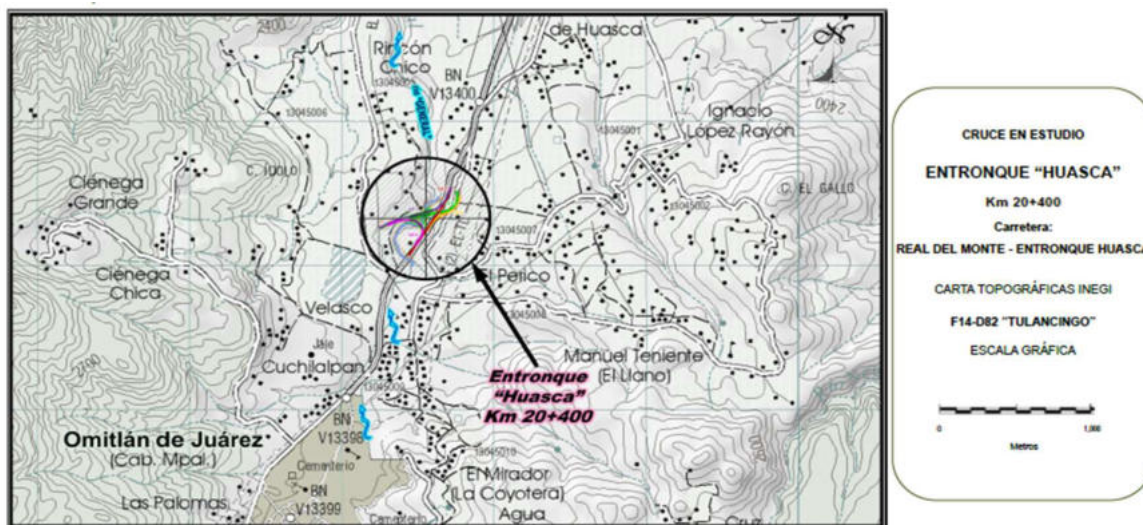


Figura 17 Croquis de localización. Nota. Tomado de Estudio Hidrológico e hidráulico del río (2022, p. 11).

3.4.DATOS CLIMATOLÓGICOS

La cuenca del río General cuenta con dos estaciones climatológicas (Tablas 9 y 10). Para el análisis se utilizaron datos de precipitación máxima en 24 horas provenientes de las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN-CONAGUA), complementando con la información de los planos de isoyetas de intensidad de lluvia para el Estado de Hidalgo elaborados por la secretaría de Comunicaciones y Transportes (Triada, 2022).

Tabla 9 Datos de altura de precipitación máxima 24 horas estación Omitlán.

No	Año	mm	No	Año	mm
1	1974	25	24	1998	63
2	1975	87	25	1999	142
3	1976	61	26	2000	49
4	1977	41	27	2001	55.5
5	1978	43	28	2002	84.5
6	1979	42	29	2003	58.5
7	1980	36	30	2004	63
8	1981	55	31	2005	97.5
9	1982	39.5	32	2006	52.5
10	1983	42.5	33	2007	270.9
11	1984	36.5	34	2008	83
12	1985	64.5	35	2009	55
13	1986	40	36	2010	65
14	1987	40	37	2011	91
15	1988	88.5	38	2012	116
16	1989	70.5	39	2013	4.2
17	1990	94.5	40	2014	76.5
18	1991	66	41	2015	44
19	1992	35	42	2016	5
20	1993	51.5	43	2017	7.6
21	1994	64	44	2018	25
22	1996	40.5	45	2019	5.7
23	1997	51			

Fuente: Estudio Hidrológico e hidráulico del río (2022, p. 21).

Tabla 10 Datos de altura de precipitación máxima de 24 horas estación Real del monte.

No	Año	mm	No	Año	mm
1	1940	40	33	1986	66
2	1941	50.8	34	1987	60
3	1942	39.9	35	1988	40
4	1943	36.7	36	1989	30
5	1944	105.9	37	1990	20
6	1945	61.5	38	1991	106
7	1946	40.4	39	1992	76
8	1947	104	40	1993	50
9	1948	36.8	41	1994	60.6
10	1949	43.9	42	1996	51.6
11	1950	48	43	1997	37
12	1951	51.4	44	1998	64
13	1952	60	45	1999	49
14	1953	40.9	46	2000	31
15	1954	107.2	47	2001	32
16	1955	116	48	2002	26
17	1956	52.5	49	2005	76
18	1957	35	50	2006	45
19	1958	46.6	51	2007	136
20	1959	55	52	2008	48
21	1960	96	53	2009	38
22	1969	18.2	54	2010	56
23	1970	141.3	55	2011	106
24	1971	172.5	56	2012	60
25	1972	149	57	2013	90
26	1973	140.3	58	2014	72
27	1980	62	59	2015	80.7
28	1981	35.8	60	2016	64
29	1982	20	61	2017	90
30	1983	41.5	62	2018	45
31	1984	44.5	63	2019	62
32	1985	76.7			

Fuente: Estudio hidrológico e hidráulico del río (2022, p. 21).

3.5. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

Se cuenta con una obra de protección del cauce del río Amajac, la cual consiste en una bóveda de 110.40 m de longitud en tres secciones, con losa de cimentación y muros de concreto de resistencia $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$, con acero corrugado tipo arco seccional de luz de 7.93 m, flecha 4.02 m, calibre 5/16 de doble perforación acabado galvanizado, sujetado mediante pernos a los muros de la bóveda, conforme lo indicó el proyecto (Figura 19). Se realizó el aproche de la estructura mediante material de calidad subrasante, compactado al 90%, para posteriormente recibir las respectivas capas de terracerías y pavimentos (Figura 18).

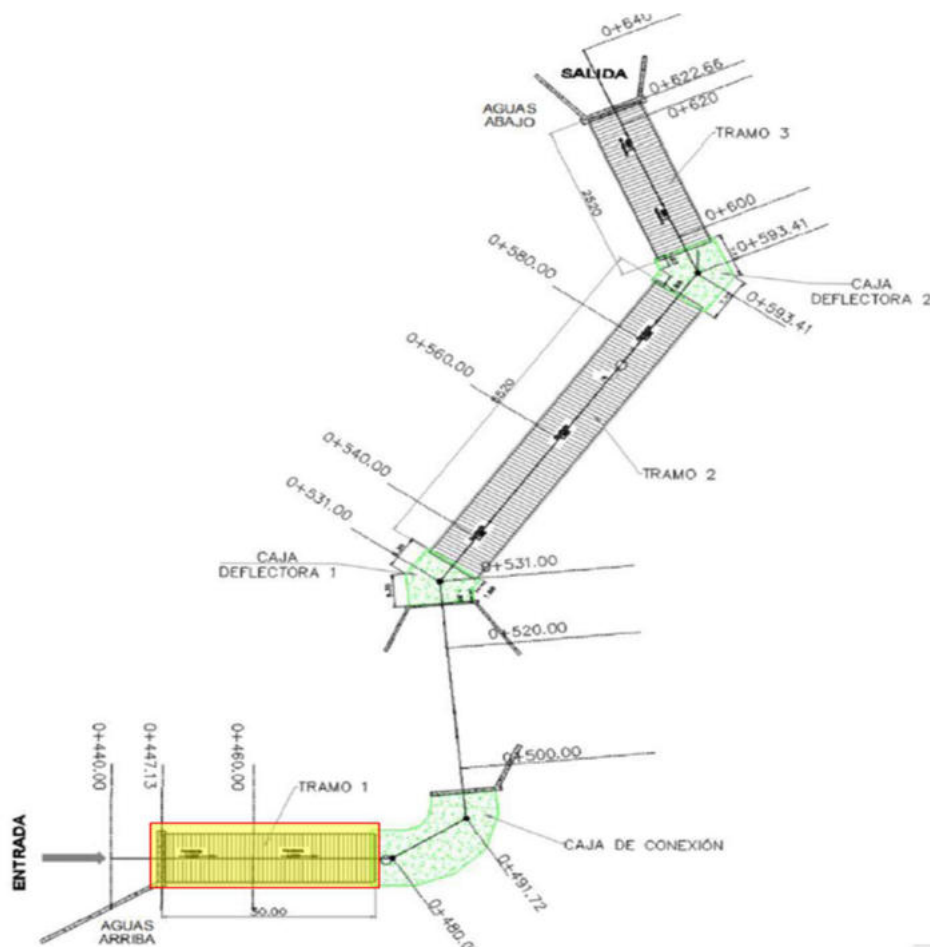


Figura 18 Esquema del trazo del encauzamiento y ubicación de cajas deflectoras. Nota. Tomado de Residencia General de Carreteras SICT Hidalgo (2023, S/P).



Figura 19 Partes de la bóveda. Nota. Tomado de Fletes (2023).

La alcantarilla está dividida en tres tramos que tienen las siguientes características.

1. **Tramo 1:** En la entrada cuenta con un alero de concreto reforzado que se conecta al desarrollo de la bóveda. La bóveda cuenta con una longitud de 30.00 m; está conformada por un arco de acero corrugado calibre 5/16", dicho arco descansa sobre un muro de concreto reforzado de 50 cm de espesor con una altura de 3.00 m. Los muros de concreto se desplantan sobre una cimentación a base de muros de mampostería de piedra de sección trapezoidal con 1.00 m de ancho en la corona, 3.00 m de ancho en la base y con altura de 3.00 m. Este tramo termina en una caja deflectora a base de losas y muros de concreto armado (Figura 20).

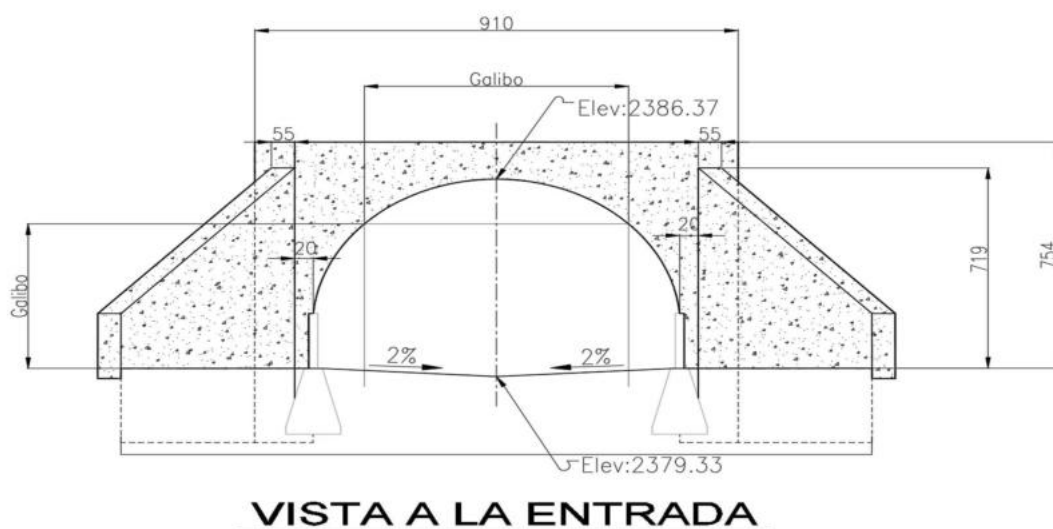


Figura 20 Vista a la entrada de la bóveda. Nota. Elaboración propia.

En cuanto a los materiales utilizados para el alero del primer tramo, se consideró concreto de $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ para el muro y la zapata, teniendo un total de 41.89 m^3 y concreto de $f'c = 100 \text{ kg/cm}^2$ para la plantilla de 10 cm de espesor, con un total de 2.99 m^3 . Además de contener 9,555.39 kg de acero de refuerzo de L.E. $> 4,200 \text{ kg/cm}^2$ (Figura 21).

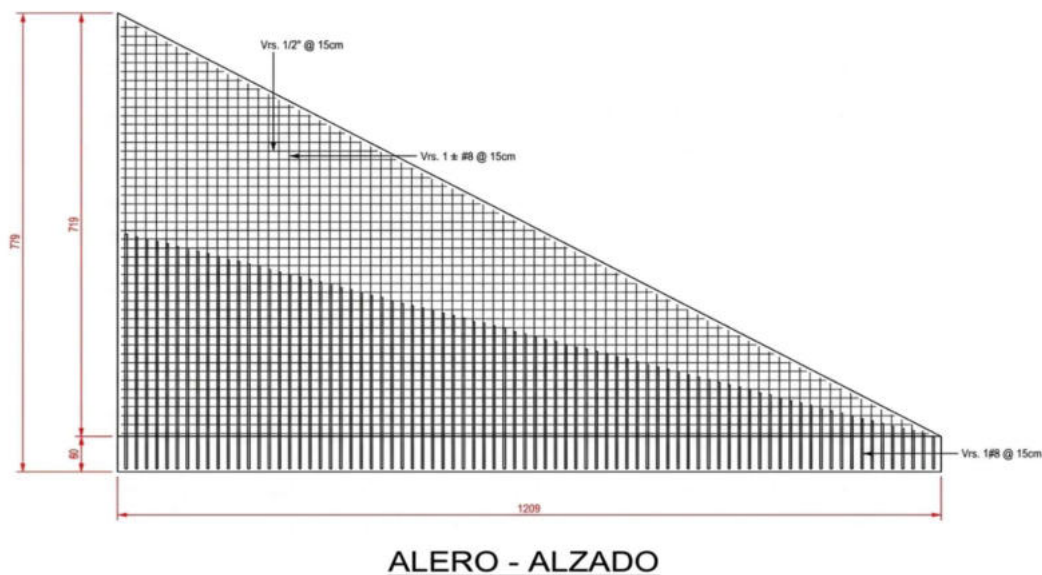


Figura 21 Detalle de alero del primer tramo. Nota. Elaboración propia.

Tabla 11 Materiales bóveda tramo I.

Materiales bóveda - tramo I		
Concepto	Cantidad	Unidad
Arco seccional de luz: 7.93m flecha: 4.02m cal. 5/16. doble perforación galvanizado	30.00	m
Concreto hidráulico ($f'c = 100 \text{ kg/cm}^2$) plantilla	22.86	m^3
Concreto hidráulico ($f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$)	981.40	m^3
Acero de refuerzo ($f'c = 4200 \text{ kg/cm}^2$)	161.54	t
Concreto ciclópeo ($f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$)	306.00	m^3
Nota: las cantidades incluyen los elementos que componen a la bóveda tramo I, dos muros frontera y la caja deflectora I		

Fuente: Elaboración propia.

2. **Tramo 2:** En la entrada cuenta con 2 aleros de concreto reforzado que se conecta a una caja deflectora conformada por losas y muros de concreto armado, esta caja deflectora se conectan a la bóveda. La bóveda cuenta con una longitud de 55.20 m; está conformada por un arco de acero corrugado calibre 5/16", asimismo, dicho arco descansa sobre un muro de concreto reforzado de 50 cm de espesor con una altura de 3.00 m. Los muros de concreto se desplantan sobre una cimentación a base de muros de mampostería de piedra de sección trapezoidal con 1.00 m de ancho en la corona, 3.00 m de ancho en la base y con altura de 4.50 m. Este tramo termina en una caja deflectora conformada por losas y muros de concreto armado.

En el proyecto surge la necesidad de realizar el diseño estructural de los muros que darán soporte a los arcos seccionales de lámina acanalada, los cuales serán contruidos a base de concreto reforzado. Estos fueron cinco tipos diferentes que dependían de la ubicación y las condiciones mecánicas del suelo (Figura 22).

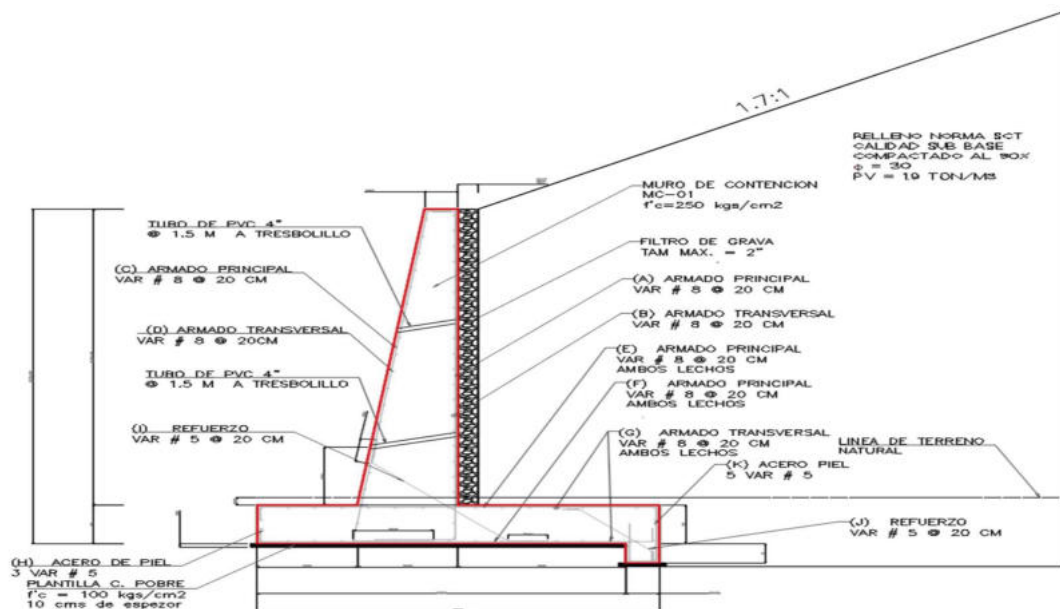


Figura 22 Muro de contención tramo 2. Nota. Elaboración propia.

Además del encauzamiento con arcos de acero corrugado, se propone que las deflexiones se realicen con marcos de concreto desplantados sobre zapatas de mampostearía de piedra (Figura 23).

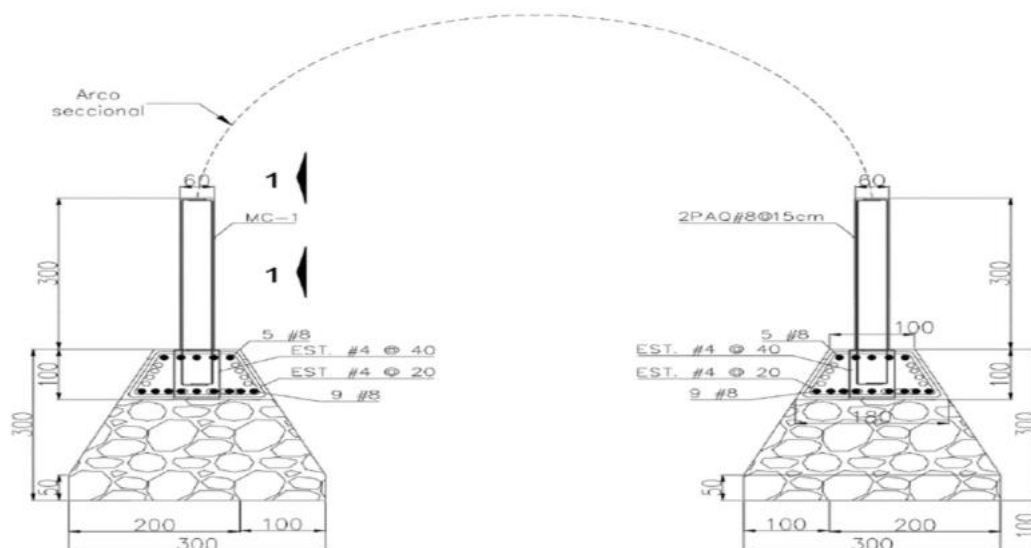


Figura 23 Sección transversal propuesta para las cajas de deflexión. Nota. Elaboración propia.

Tabla 12 Materiales bóveda tramo II.

Materiales bóveda - tramo II		
Concepto	Cantidad	Unidad
Arco seccional de luz: 7.93m flecha: 4.02m cal. 5/16. doble perforación galvanizado	55.20	m
Concreto hidráulico ($f'c = 100 \text{ kg/cm}^2$) plantilla	60.27	m^3
Concreto hidráulico ($f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$)	1,121.24	m^3
Acero de refuerzo ($f'c = 4200 \text{ kg/cm}^2$)	176.66	t
Nota: las cantidades incluyen los elementos que componen a la bóveda tramo II, dos muros frontera y la caja deflectora II.		

Fuente: Elaboración propia.

- 3. Tramo 3:** Este tramo está conectado al tramo 3 mediante una caja deflectora conformada por losas y muros de concreto armado, dicha caja conecta con la bóveda del tramo 3, que está constituida por un arco de acero corrugado calibre 5/16". Dicho arco descansa sobre un muro de concreto reforzado de 50 cm de espesor con una altura de 3.00 m. Los muros de concreto se desplantan sobre una cimentación a base de

muros de mampostería de piedra de sección trapezoidal con 1.00 m de ancho en la corona, 3.00 m de ancho en la base y con altura de 3.00 m. Este tramo termina con unos aleros de salida de concreto reforzado (Figura 25).

Las cajas deflectoras, debido a su geometría se busca que trabajen como un cajón (Figura 24).

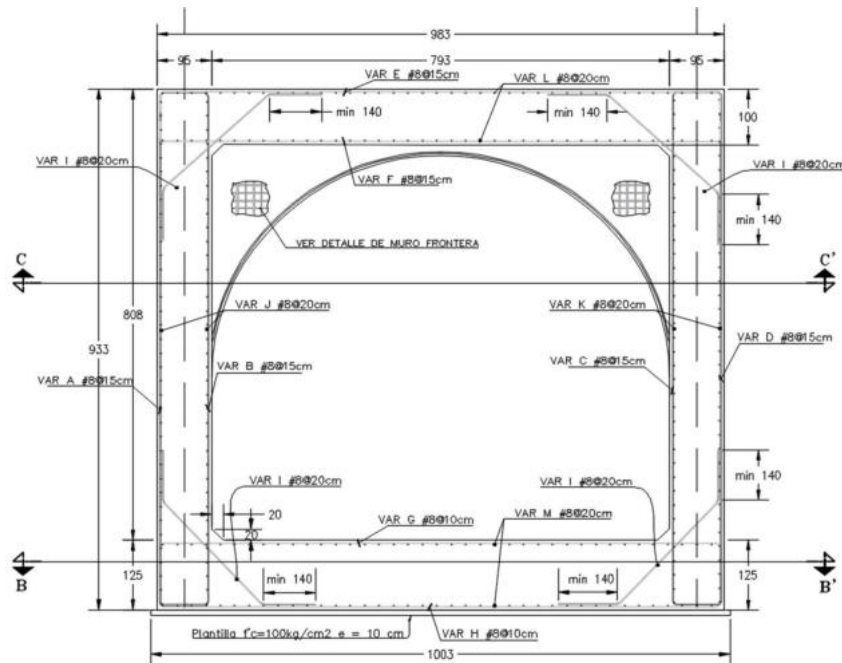


Figura 24 Sección de caja deflectora. Nota. Elaboración propia.

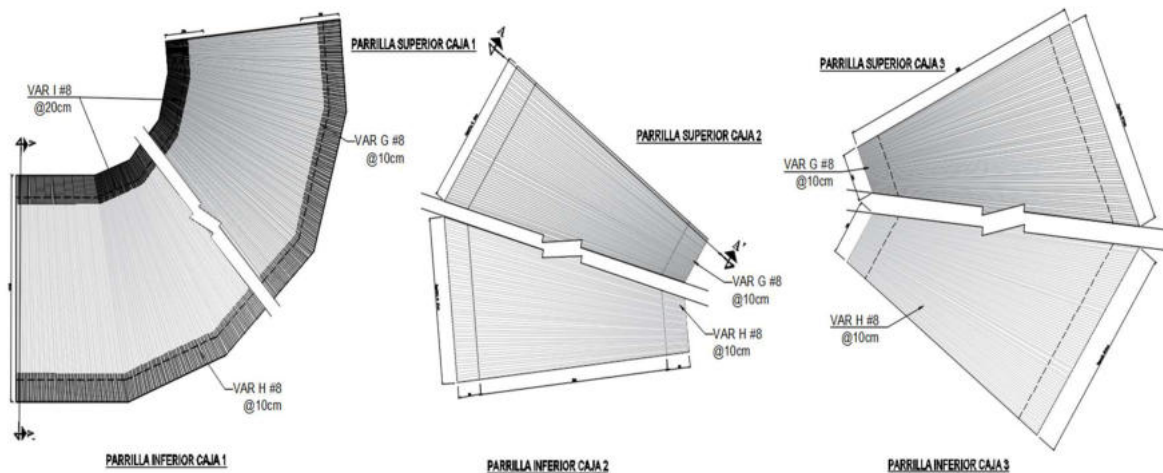


Figura 25 Detalles de losas de cajas deflectoras de la bóveda. Nota. Elaboración propia.

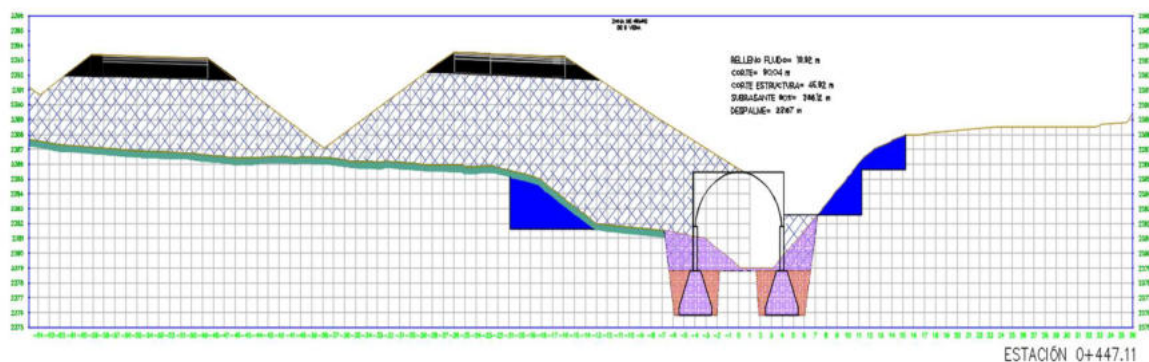
Tabla 13 Materiales bóveda tramo III.

Materiales bóveda - tramo III		
Concepto	Cantidad	Unidad
Arco seccional de luz: 7.93m flecha: 4.02m cal. 5/16. doble perforación galvanizado	25.20	m
Concreto hidráulico ($f_c = 100 \text{ kg/cm}^2$) plantilla	35.99	m^3
Concreto hidráulico ($f_c = 250 \text{ kg/cm}^2$)	793.68	m^3
Acero de refuerzo ($f_c = 4200 \text{ kg/cm}^2$) losa, muros, aleros, dentellones, cimentación y muros de apoyo	124.20	t
Nota: las cantidades incluyen los elementos que componen a la bóveda tramo III, dos muros frontera y la caja deflectora III.		

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al aproche de la estructura, se hizo mediante material de calidad de subrasante compactado al 90 para poder desplantar las capas de terracería y pavimentos, obteniendo una cantidad de $74,170.50 \text{ m}^3$ obtenidos al hacer la supresión entre la gasa 10, 20 y 30 en los cadenamientos (Figura 27):

1. Eje 10: km 10+540 al km 10+640 (Figura 26).
2. Eje 20: km 20+260 al km 20+360 (Figura 26).
3. Eje 30: km 30+180 al km 30+280 (Figura 26).



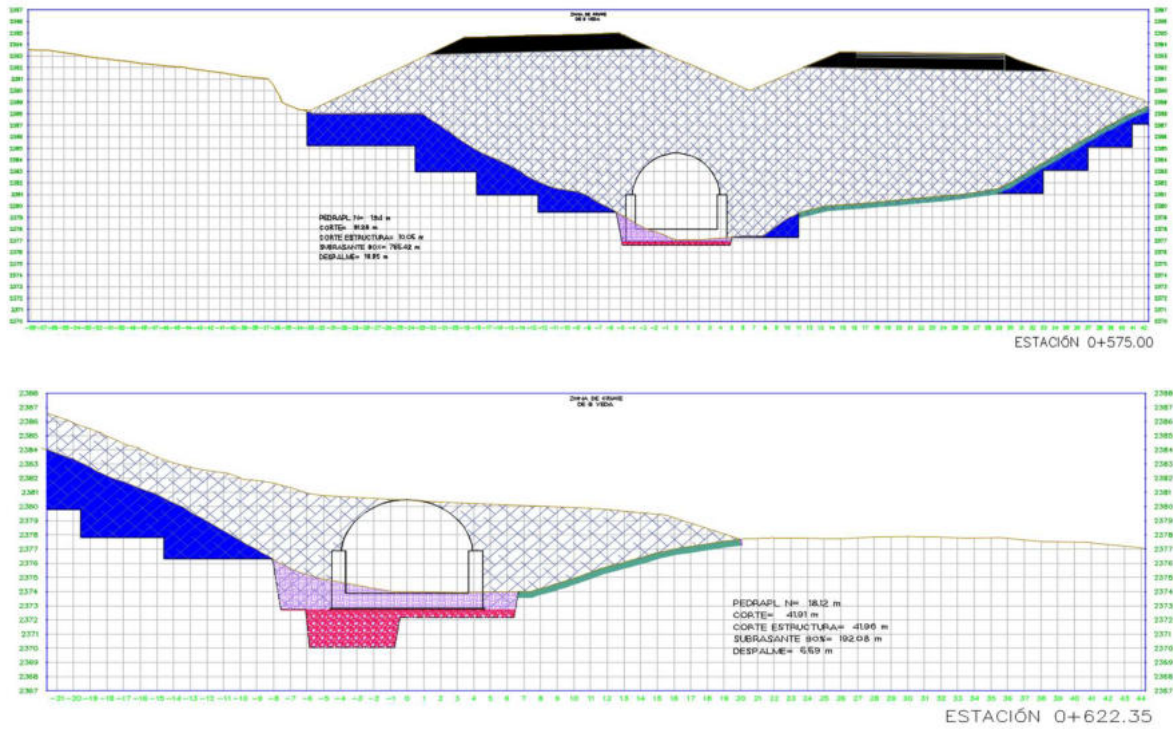


Figura 26 Secciones constructivas de diferentes cadenamientos. Nota. Elaboración propia.

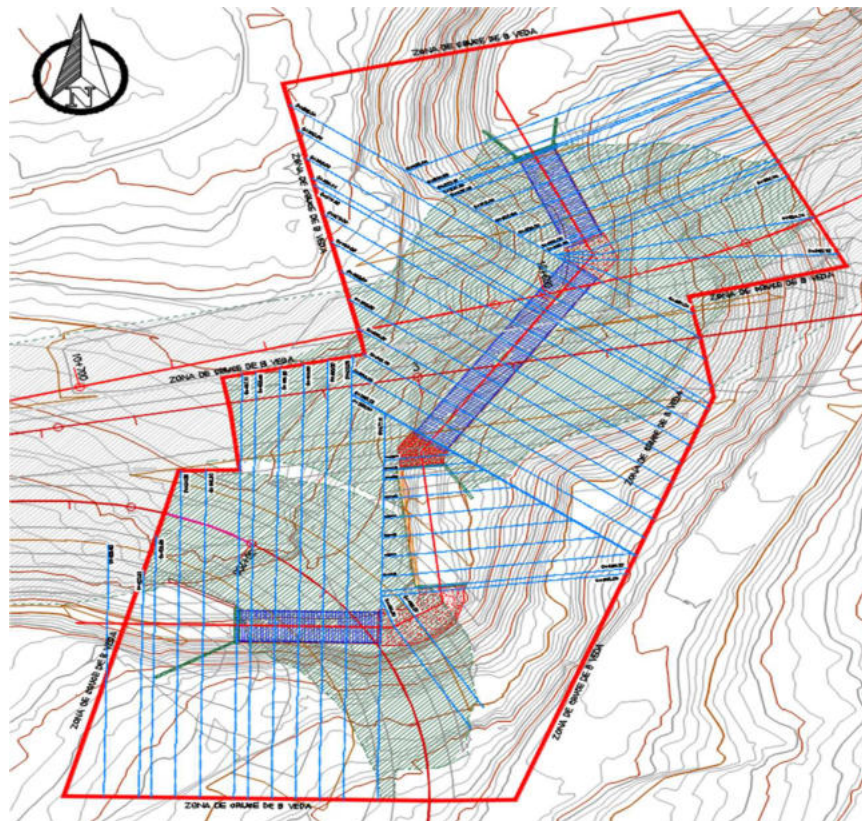


Figura 27 Eje auxiliar de la zona de la bóveda. Nota. Elaboración propia.



Figura 28 Vista aérea de la construcción de la bóveda I. Nota. Tomado de Fletes (2023).



Figura 29 Vista aérea de la Construcción de la bóveda I. Nota. Tomado de Fletes (2023).



Figura 30 Colocación del arco seccional de la bóveda. Nota. Tomado de Fletes (2023).

CAPÍTULO 4. MODELO HIDRÁULICO EN EL SOFTWARE IBER

El modelo numérico se desarrolla a partir del proyecto definitivo de la bóveda construida en el Entronque Huasca, con la finalidad de identificar los puntos críticos, es decir, los tirantes más críticos y la velocidad de flujo a lo largo de la estructura. El modelo sirve como un control y monitoreo periódico de la estructura, permitiendo evaluar la estabilidad y funcionamiento hidráulico.

La aplicación de IBER de modelado hidráulico muestra la aplicabilidad de las estructuras hidráulicas y establece el comportamiento en periodos de retorno establecidos por el diseñador, bajo condiciones que dependen del lugar de la estructura.

En cuanto a la recolección de datos para el modelado, se partió con la búsqueda de la cuenca hidrográfica en el sistema SIATL (Simulador de Flujos de Aguas de Cuencas Hidrográficas) (Figura 31).

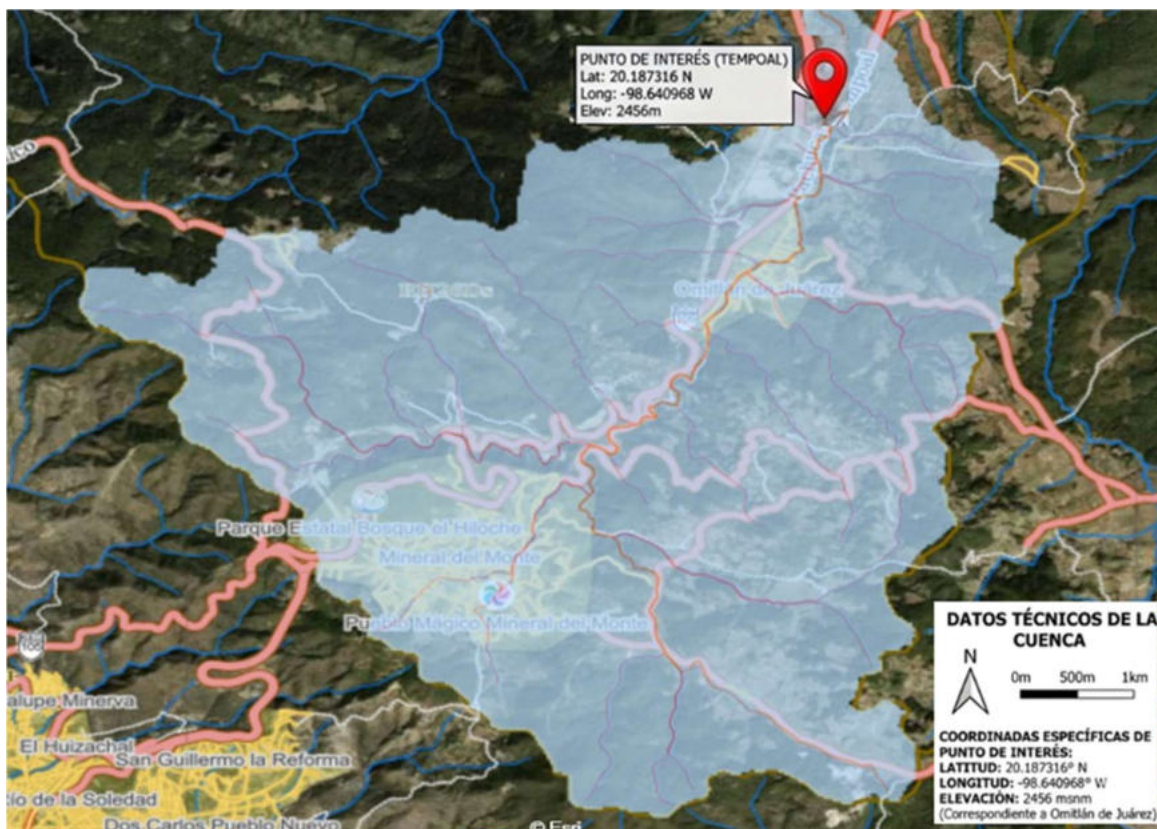


Figura 31 Cuenca Hidrográfica donde se ubica la bóveda. Nota. Tomado de SIATL (2025).

Para lo cual se obtuvieron los siguientes datos (Tabla 14):

Tabla 14 Índices del cauce principal

Propiedad	Valor
Elevación máxima	2927 m
Elevación media	2553 m
Elevación mínima	2180 m
Longitud	15861 m
Pendiente media	4.71%
Tiempo de concentración	103.79 (min)
Área drenada	47.20 km ²

Fuente: Elaboración propia.

4.1.CÁLCULO DEL GASTO HIDROLÓGICO

Para el cálculo del gasto se aplicó el método racional asociado a periodos de retorno de $Tr=5$, $Tr=10$, $Tr=50$, $Tr=100$ y $Tr=500$.

Método Racional: En este método, los factores que afectan el escurrimiento considerado que se dividen en dos grupos. Uno que afecta directamente a la cantidad de lluvia que escurre, el cual comprende el uso de suelo, la condición de la superficie, el tipo de suelo, la cantidad y duración de la lluvia y el tamaño de la cuenca, obteniendo la siguiente expresión:

$$Q_{Tr} = 0.278CIA = \frac{CIA}{3.6} \dots \dots \dots (13)$$

Donde:

Símbolo	Descripción
Q_{Tr}	Gasto máximo para el periodo de retorno (Tr) establecido, en m ³ /s
0.278	Factor de homogeneidad de unidades
C	Coefficiente de escurrimiento de la cuenca, adimensional
I	Intensidad de lluvia para una duración de tormenta igual al tiempo de concentración t_c , para Tr establecido, en mm/h
A	Área de la cuenca, en km ²

Coeficiente de escurrimiento de la cuenca

Para el coeficiente de escurrimiento de la cuenca se utilizaron los siguientes usos de suelo y vegetación (Figuras 32 y 33):

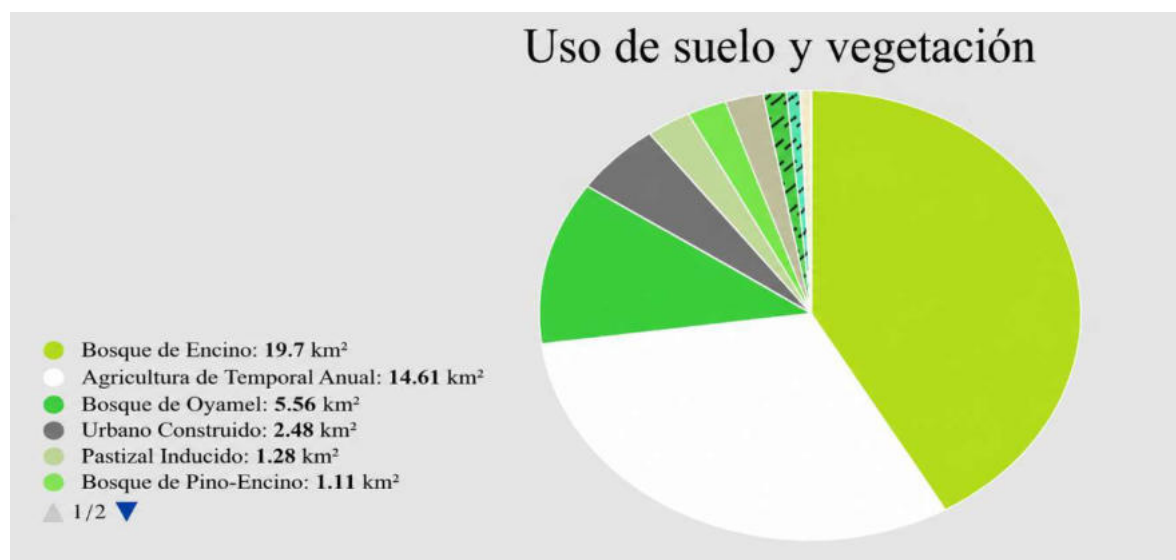


Figura 32 Uso de suelo y vegetación 1. Nota. Elaboración propia.

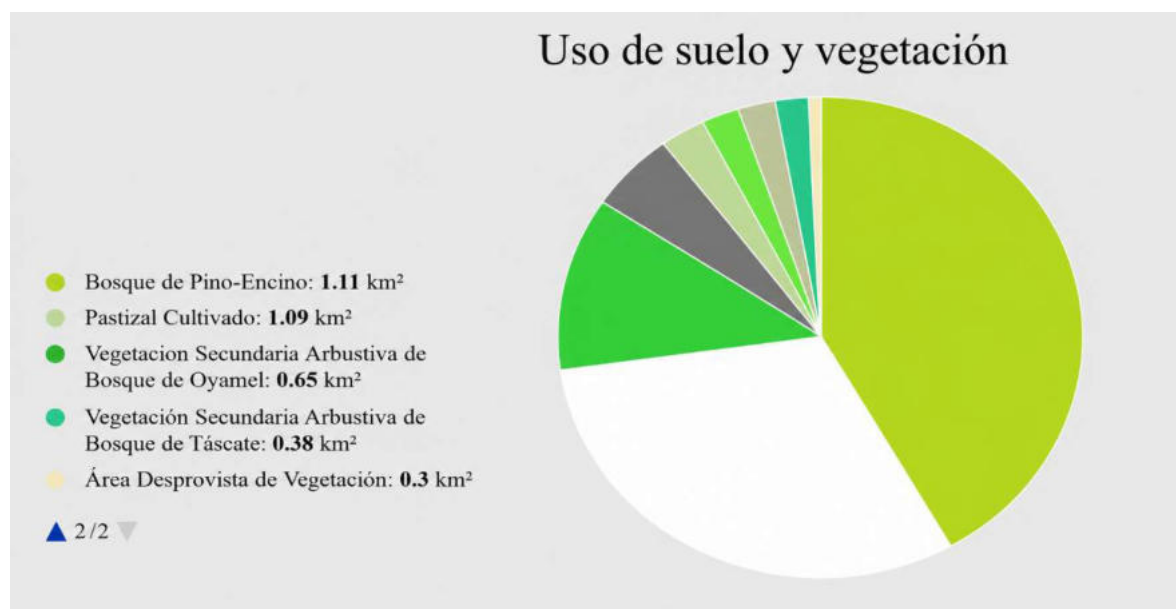


Figura 33 Uso de suelo y vegetación 2. Nota. Elaboración propia.

Tabla 15 Tipo de suelo y vegetación del proyecto.

Tipo de suelo y vegetación		
Bosque	27.4	km ²
Agricultura	14.61	km ²
Urbano	2.48	km ²
Pastizal	2.37	km ²
Suelo desnudo	0.3	km ²
Total	47.16	km²

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16 Coeficientes de escurrimiento C.

Tipo de Superficie por drenar	Pendiente %	Coeficiente de Esc. "C"		A	CA
		Mínimo	Máximo		
A) PRADERA					
1. Suelo arenoso plano	< 2	0.05	0.1		0
2. Suelo arenoso medio	2 A 7	0.1	0.15		0
3. Suelo arenoso empinado	> 7	0.15	0.2		0
4. Suelo Arcilloso plano	< 2	0.13	0.17		0
5. Suelo Arcilloso medio	2 A 7	0.18	0.22	27.4	5.48
6. Suelo Arcilloso empinado	> 7	0.25	0.35		0
B) ZONAS PAVIMENTADAS					
1. Pavimento Asfáltico	-	0.7	0.95		0
2. Pavimento de concreto hidráulico	-	0.8	0.95		0
3. Pavimento adoquinado	-	0.7	0.85		0
4. Estacionamientos	-	0.75	0.85		0
5. Patios de ferrocarril	-	0.2	0.4		0
C) ZONAS RESIDENCIALES					
1. Unifamiliares	-	0.3	0.5		0
2. Multifamiliares, espaciados	-	0.4	0.6	0.3	0.15
3. Multifamiliares juntos	-	0.6	0.75	2.48	1.674
4. Suburbanas	-	0.25	0.4		0
5. Casas habitación	-	0.5	0.7		0
D) ZONAS COMERCIALES					
1. Zona comercial (áreas céntricas)	-	0.7	0.95		0
2. Áreas vecinas	-	0.5	0.7		0
3. Suelo rocoso, aguas negras, canalizado suburbano	-	0.6	0.6		0
E) ZONAS INDUSTRIALES					
1. Construcciones espaciadas	-	0.5	0.8		0
2. Construcciones juntas	-	0.6	0.9		0
F) CAMPOS CULTIVADOS	-	0.2	0.4	14.61	4.383
G) ZONAS FORESTADAS	-	0.1	0.3	2.37	0.474
H) PARQUES Y CEMENTERIOS	-	0.1	0.25		0
I) AREAS DE RECREO Y CAMPOS DE JUEGO	-	0.2	0.35		0
J) AZOTEAS Y TECHADOS	-	0.75	0.95		0
				47.16	12.161

Fórmula para obtener el coeficiente de escurrimiento:

$$C = \frac{CA}{A} \dots \dots \dots (14)$$

Se analizó la intensidad de lluvia mediante las isoyetas de intensidad-duración-periodo de retorno para la República Mexicana, registrada en pluviógrafos, así como de alturas máximas de lluvia, cubriendo aquellas regiones donde la información es muy escasa, con la finalidad de que los estudios hidrológicos tengan mayor precisión y se proyecten y construyan obras hidráulicas más seguras (Figuras 34 -38).

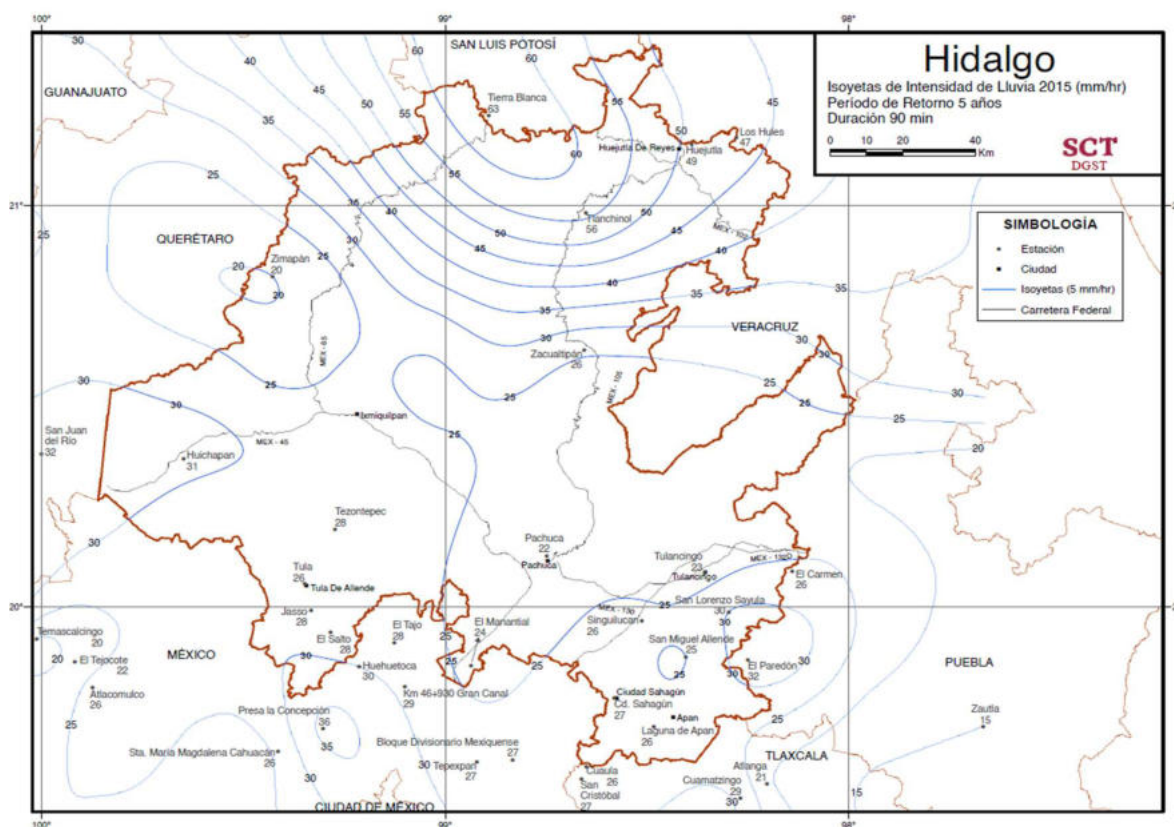


Figura 34 Isoyeta para un periodo de retorno de 5 años. Nota. Tomado de Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2015).

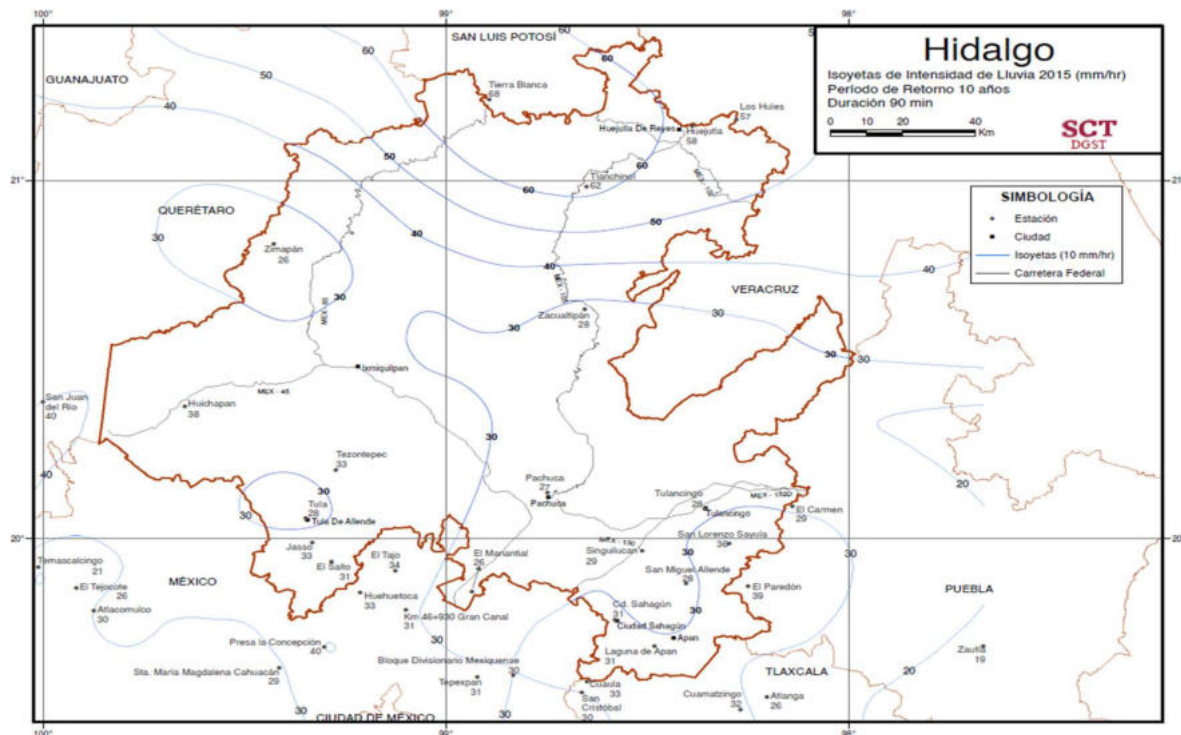


Figura 35 Isoyeta para un periodo de retorno de 10 años. Nota. Tomado de Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2015).

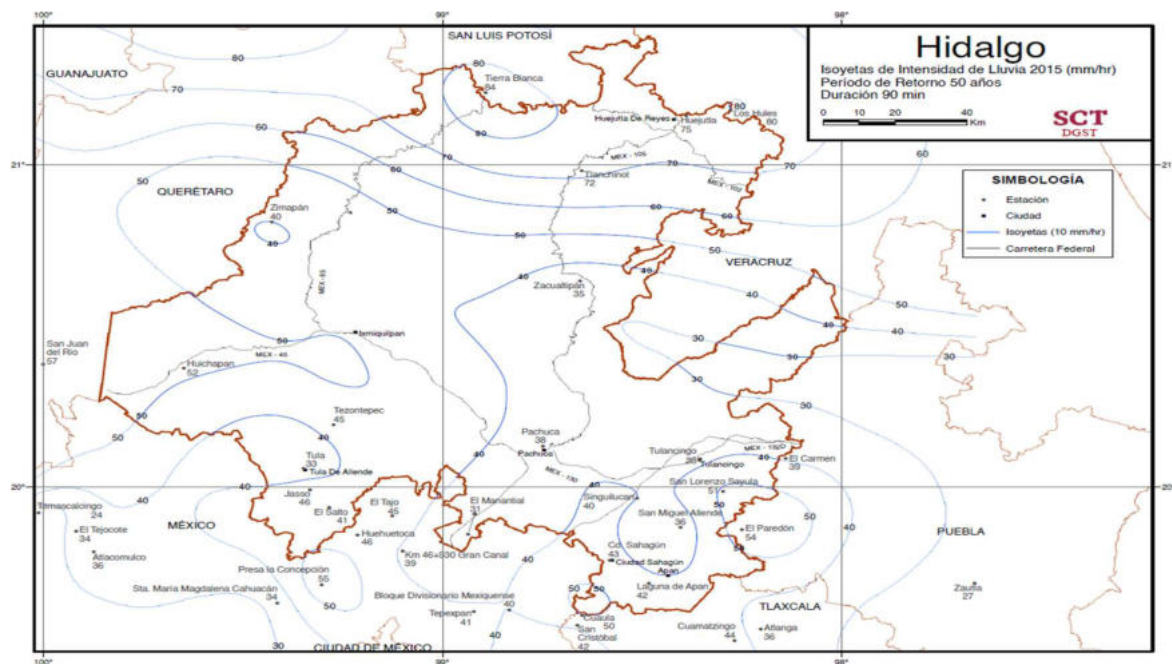


Figura 36 Isoyeta para un periodo de retorno de 50 años. Nota. Tomado de Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2015).

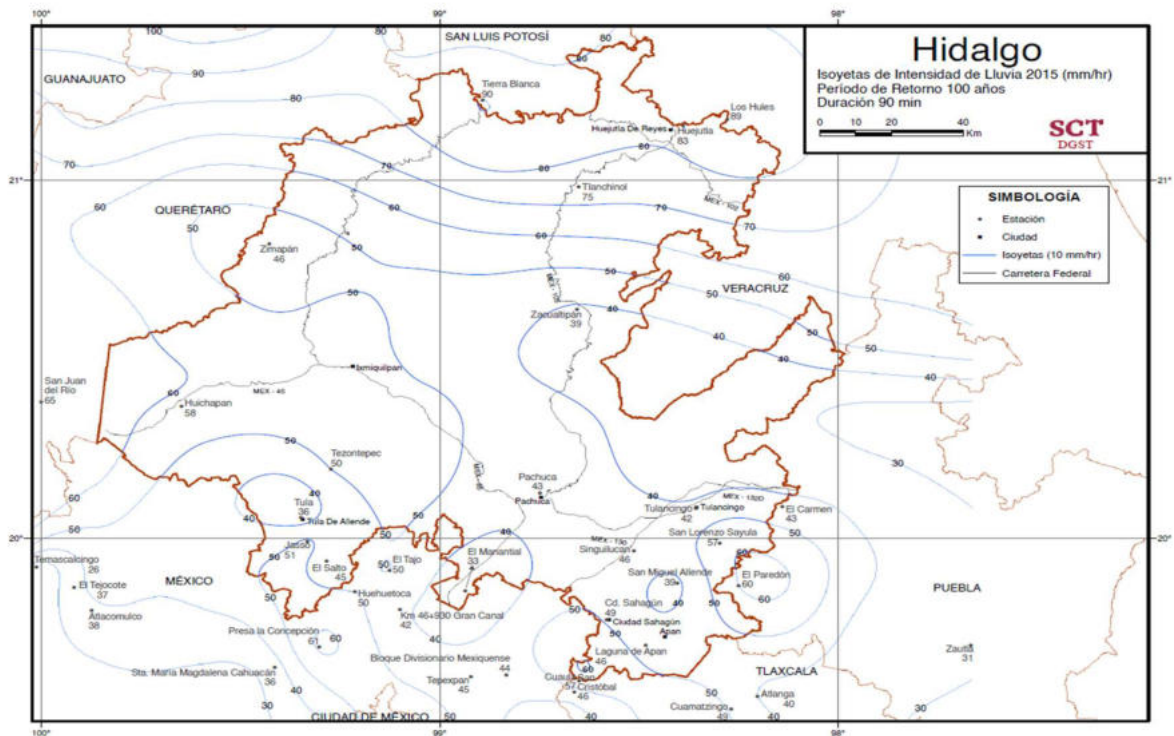


Figura 37 Isoyeta para un periodo de retorno de 100 años. Nota. Tomado de Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2015).

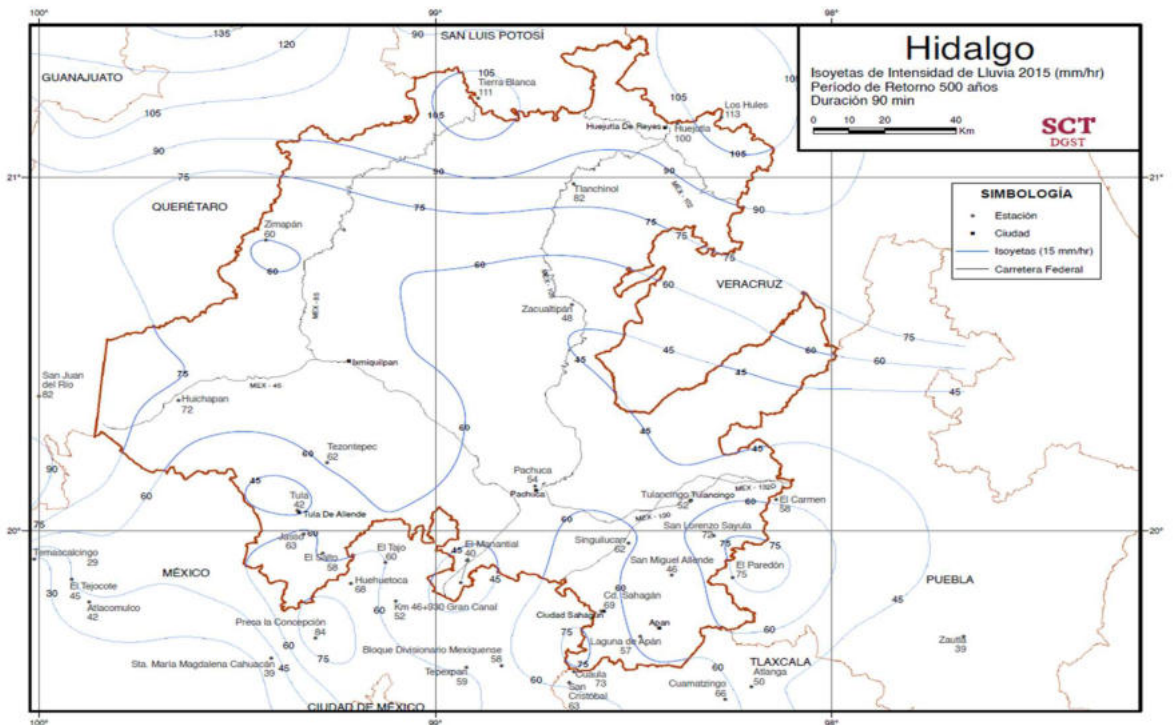


Figura 38 Isoyeta para un periodo de retorno de 500 años. Nota. Tomado de Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2015).

Tabla 17 Datos del gasto calculados.

Cálculo de gasto				
Tr	C	I	A	Q
5	0.24	23	45.2	69.3
10	0.24	28	45.2	84.4
50	0.24	35	45.2	105.5
100	0.24	40	45.2	120.5
500	0.24	50	45.2	150.7

Fuente: Elaboración propia.

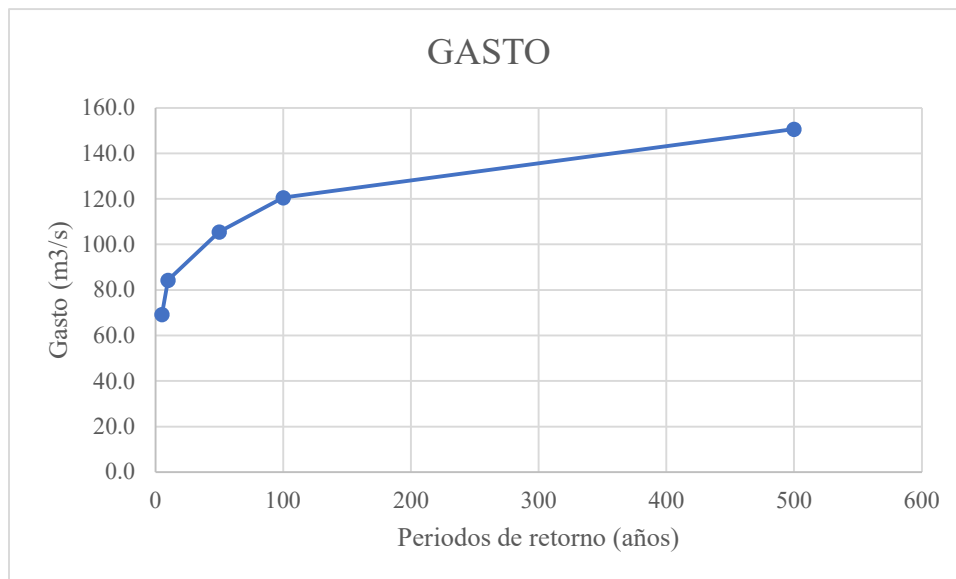


Figura 39 Relación gasto de diseño-periodo de retorno. Nota. Elaboración propia.

El cálculo del gasto se ingresó al modelo de IBER para medir los tirantes críticos y la estabilidad de la estructura.

4.2. SIMULACIÓN HIDRÁULICA DEL MODELO EN 2D

Para el modelo en 2D fue necesario el eje de trazo y los anchos que ocupaba la estructura para hacer una poligonal las elevaciones de cada uno de los vértices de la estructura, así como el derrame en la zona libre de la bóveda (Figura 40).

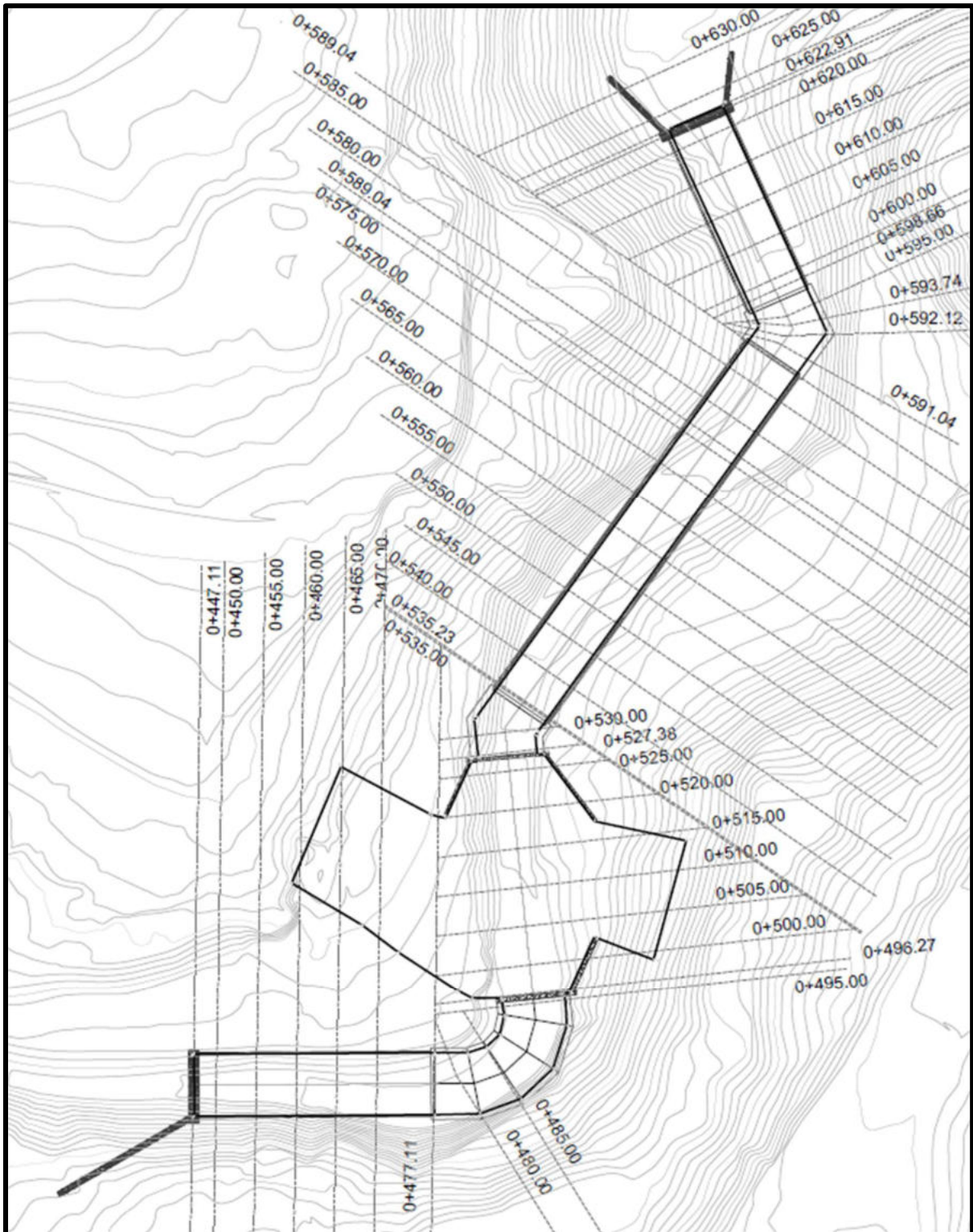


Figura 40 Planta de la bóveda. Nota. Elaboración propia.

4.2.1. DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA

Para IBER la geometría es una representación idealizada del problema que se desea estudiar, es el modelo geométrico a partir de puntos, líneas y superficies. Por lo que la creación mediante softwares es como AutoCAD (Figura 42).

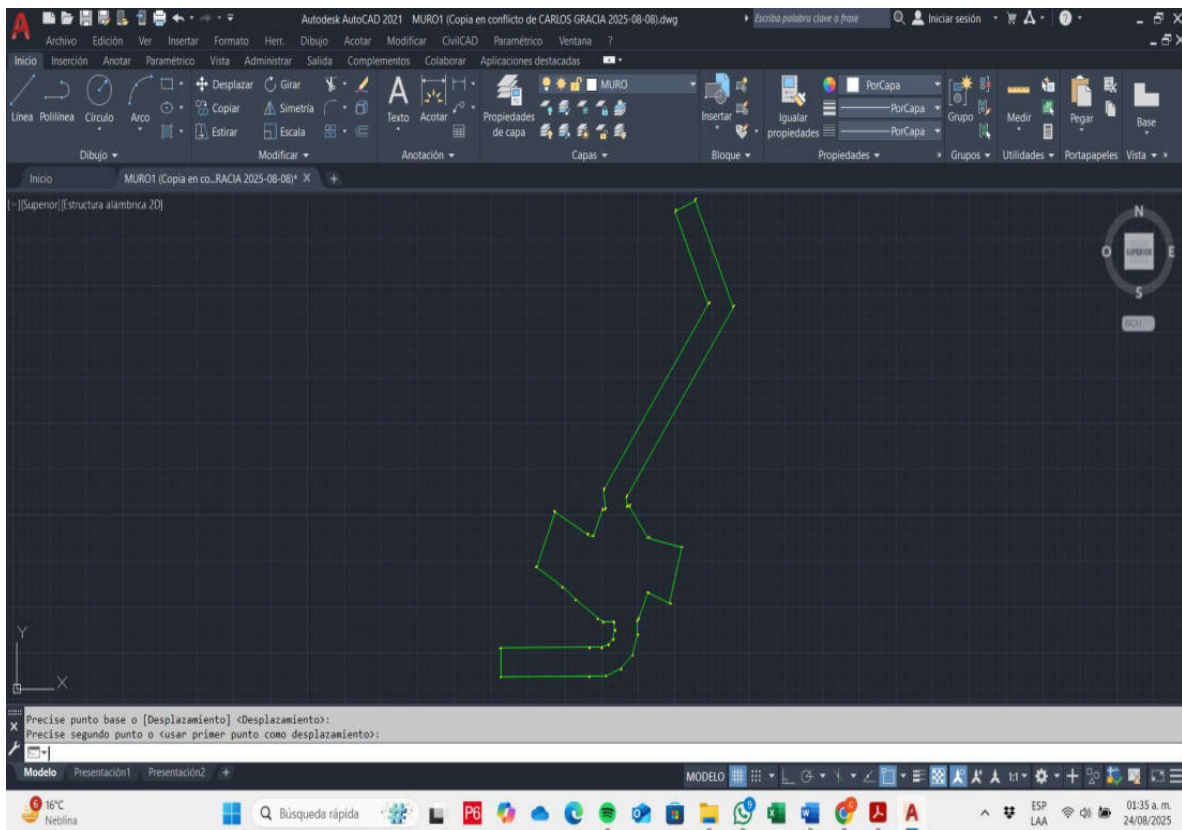


Figura 42 Dibujo de la poligonal en AutoCAD. Nota. Elaboración propia.

Una vez obtenida la poligonal se procedió a obtener un cuadro de construcción para obtener las coordenadas que se ingresaron el software IBER (Figuras 43 y 44).

CUADRO DE CONSTRUCCION						
LADO		RUMBO	DISTANCIA	V	C O O R D E N A D A S	
EST	PV				Y	X
				1	2,232,268.4527	537,490.8379
1	2	N 89°38'32.88" E	30.000	2	2,232,268.6399	537,520.8374
2	3	N 88°26'16.45" E	5.647	3	2,232,268.7939	537,526.4826
3	4	N 69°22'42.26" E	5.437	4	2,232,270.7086	537,531.5709
4	5	N 45°55'44.53" E	5.517	5	2,232,274.5461	537,535.5349
5	6	N 17°23'01.50" E	5.815	6	2,232,280.0955	537,537.2722
6	7	N 03°14'52.55" W	3.752	7	2,232,283.8409	537,537.0597
7	8	N 40°32'14.79" E	0.806	8	2,232,284.4535	537,537.5835
8	9	N 23°47'59.16" E	7.700	9	2,232,291.4984	537,540.6907
9	10	S 68°20'02.91" E	7.954	10	2,232,288.5620	537,548.0825
10	11	N 14°57'25.70" E	15.815	11	2,232,303.8408	537,552.1642
11	12	N 77°43'27.74" W	11.715	12	2,232,306.3316	537,540.7174
12	13	N 36°11'13.73" W	10.553	13	2,232,314.8492	537,534.4863
13	14	S 84°09'57.28" W	0.867	14	2,232,314.7610	537,533.6235
14	15	N 05°49'11.88" W	2.608	15	2,232,317.3554	537,533.3590
15	16	N 35°02'41.53" E	63.285	16	2,232,369.1672	537,569.6985
16	?	N 24°05'07.03" W	31.810	?	2,232,398.2080	537,556.7169
?	18	S 65°54'52.97" W	7.360	18	2,232,395.2044	537,549.9977
18	19	S 24°05'07.03" E	27.635	19	2,232,369.9753	537,561.2755
19	20	S 35°02'41.53" W	61.852	20	2,232,319.3368	537,525.7589
20	21	S 05°49'11.88" E	5.352	21	2,232,314.0129	537,526.3016
21	22	S 84°09'57.28" W	0.964	22	2,232,313.9149	537,525.3425
22	23	S 23°47'08.42" W	7.848	23	2,232,306.7338	537,522.1774
23	24	N 76°43'47.81" W	1.815	24	2,232,307.1505	537,520.4108
24	25	N 61°15'22.16" W	12.849	25	2,232,313.3294	537,509.1450
25	26	S 22°25'14.96" W	16.135	26	2,232,298.4140	537,502.9910
26	27	S 58°19'58.49" E	10.395	27	2,232,292.9570	537,511.8380
27	28	S 52°17'05.21" E	5.599	28	2,232,289.5320	537,516.2670
28	29	S 55°58'30.11" E	8.873	29	2,232,284.5670	537,523.6210
29	30	S 61°26'33.74" E	2.123	30	2,232,283.5523	537,525.4855
30	31	N 89°28'56.21" E	3.601	31	2,232,283.5848	537,529.0861
31	32	S 09°48'32.71" E	2.208	32	2,232,281.4091	537,529.4623
32	33	S 12°09'44.34" W	2.562	33	2,232,278.9050	537,528.9226
33	34	S 46°52'25.96" W	2.256	34	2,232,277.3631	537,527.2763
34	35	S 71°04'00.52" W	2.466	35	2,232,276.5629	537,524.9436
35	36	N 89°29'26.57" W	4.131	36	2,232,276.5996	537,520.8124
36	37	S 89°35'08.78" W	30.025	37	2,232,276.3826	537,490.7885
37	1	S 00°21'27.12" E	7.930	1	2,232,268.4527	537,490.8379
SUPERFICIE = 2,079.750 m2						

Figura 43 Coordenadas de los vértices. Nota. Elaboración propia.

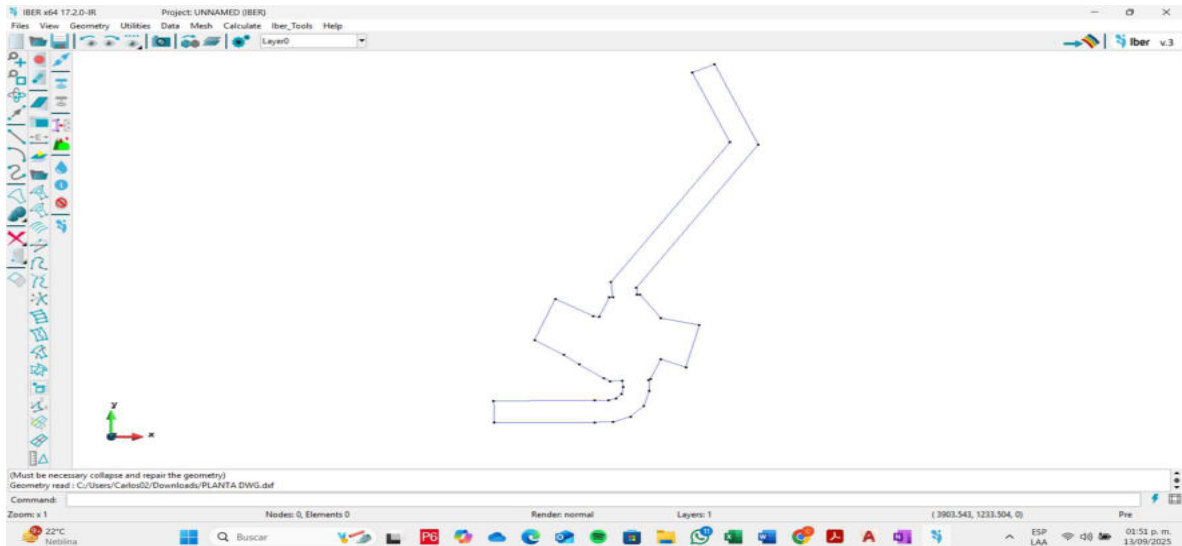


Figura 44 Geometría de la bóveda en software IBER. Nota. Elaboración propia.

4.2.2. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (DEM) Y SU CALIDAD

El Modelo Digital de Elevación (DEM) fue generado con la información topográfica obtenida mediante levantamientos LIDAR realizados con vehículos aéreos no tripulados (Drone) en el tramo Real del Monte – Huasca. Los vuelos LIDAR se efectuaron utilizando un dron DJI Matrice 300 equipado con sensor LIDAR Zenmuse L1 con una precisión de 10 a 50 cm en horizontal y de 5 a 50 cm en vertical, capaz de admitir hasta 3 retornos. El sensor cuenta con un sistema estabilizado en los 3 ejes (inclinación, rotación y paneo) y una estación base GNSS D-RTK2 con una precisión de al menos 1 cm + 1 ppm (horizontal) y 1.5 cm + 1 ppm (vertical), lo que permitió obtener una alta precisión horizontal y vertical del terreno (Figura 45).



Figura 45 Nube de puntos Entronque Huasca. Nota. Tomado de Amelo (2023).

A partir de la nube de puntos obtenida, procesada y clasificada mediante el software DJI Terra, se generó el DEM utilizado como base para la construcción de la malla computacional en el software IBER. La calidad del DEM, caracterizada por su alta resolución y adecuada precisión altimétrica, permite una representación confiable de la topografía, del cauce y del terraplén carretero, siendo adecuada para la simulación hidráulica bidimensional desarrollada en este estudio (Figuras 46 y 47).



Figura 46 Ortofoto del Entronque Huasca. Nota. Tomado de Amelo (2023).

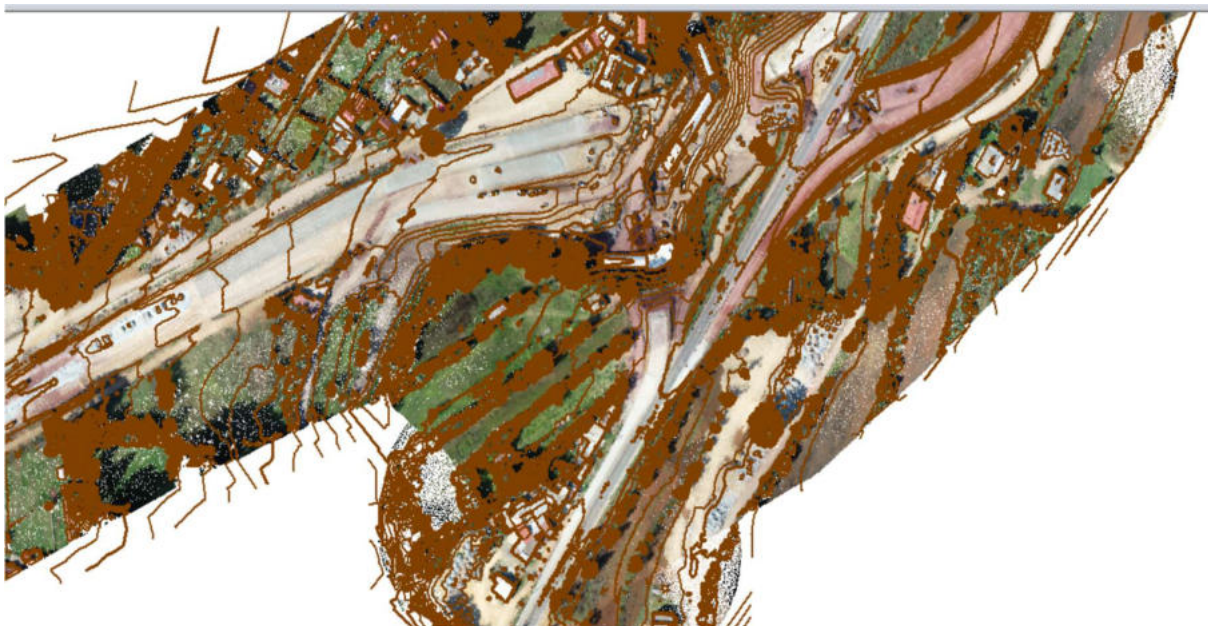


Figura 47 Curvas de nivel generadas a partir de la ortofoto. Nota. Tomado de Amelo (2023).

Finalmente se obtienen las curvas de nivel correspondiente al tramo correspondiente y que un DEM de alta calidad y precisión.

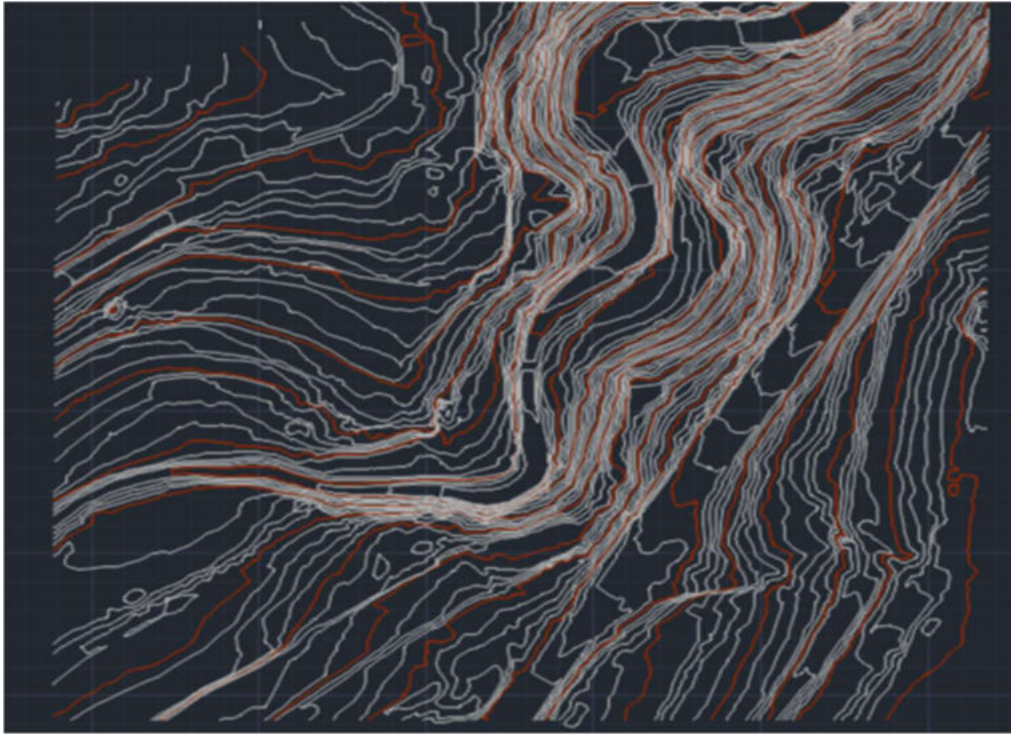


Figura 48 Curvas de nivel del Entronque Huasca. Nota. Tomado de Fletes (2023).

4.2.3. CONDICIONES INICIALES

El modelo se desarrolló bajo un régimen de flujo permanente, asumiendo que las variaciones hidráulicas no presentan variación en el tiempo durante la simulación. El dominio de cálculo se consideró inicialmente seco, permitiendo que el flujo se estableciera progresivamente a partir de las condiciones de frontera definidas. Aunque el cauce corresponde a un río, el dominio de cálculo se consideró inicialmente seco con el propósito de simular una condición crítica de avenida asociada al gasto de diseño, permitiendo que el flujo se estableciera progresivamente hasta alcanzar el régimen permanente.

4.2.4. CONDICIONES DE FRONTERA

Las condiciones de frontera o de contorno son fundamentales para definir y acotar el problema numérico, siendo el punto de partida para las soluciones de las ecuaciones. Las mallas computacionales presentan una serie de caras que coinciden con los límites del dominio físico bajo consideración, llamados contorno.

Diferenciar las condiciones iniciales de las de frontera es fundamental para identificar los problemas transitorios (fenómenos no estacionarios). Las condiciones de contorno físicas para flujos incompresibles más comunes son:

1. **Entrada:** Se establece el campo de velocidades y el gradiente de presión se define como cero.
2. **Salida:** Esta condición se debe especificar contemplando que el balance global de masas para el dominio computacional se cumpla. Una posibilidad es establecer el gradiente de velocidad y de presión en cero.
3. **Pared:** Considerando una pared sólida (impermeable y antideslizante), la velocidad será igual a la de la pared; es decir, se prescribe las condiciones de contorno de valor fijo igual a cero.
4. **Plano de simetría:** Son las componentes paralelas al plano, son proyectadas a la cara de frontera desde el interior del dominio, implicando que el gradiente normal a la superficie de simetría sea fijado en cero.

4.2.5. MALLADO

La resolución de las ecuaciones de aguas someras o aguas poco profundas se realiza mediante la utilización de métodos numéricos, razón por la cual, para resolver numéricamente las ecuaciones de flujo, es necesario discretizarlas en una malla bidimensional. Independientemente del esquema numérico utilizado, estas se pueden clasificar de forma general en mallas estructuradas y mallas no estructuradas.

Las mallas estructuradas bidimensionales están formadas por elementos cuadrangulares ordenados en filas y columnas. La principal ventaja de las mallas estructuradas es su eficiencia desde el punto de vista numérico, tanto en lo que se refiere a la programación de algoritmos como al orden de precisión. Sin embargo, estas tienen el inconveniente de ser difícilmente adaptables a geometrías muy irregulares, como es el caso de los cauces fluviales. Las mallas no estructuradas están formadas por elementos de cualquier forma. En mallas bidimensionales, lo más habitual es utilizar elementos triangulares, cuadrangulares en zonas con una geometría más regular. Su principal ventaja es la facilidad con la que se adapta a cualquier geometría, ya que no es necesario que la malla tenga ningún tipo de organización

o estructura interna. Esta característica las hace especialmente indicadas para su utilización en hidráulica.

4.3.PROCESO DE MODELADO

Para el cálculo, el software en IBER empieza a resolver las ecuaciones de Saint-Venant en cada uno de los nodos de la malla creada, partiendo de parámetros establecidos como las condiciones iniciales, de frontera y rugosidad asignadas. El software posee varias opciones para realizar la simulación, las cuales dirigirán y limitarán los cálculos del ordenador.

4.3.1. SUPUESTOS DEL MODELO

El modelo desarrollado en el software IBER se basó en los siguientes supuestos;

1. El flujo se considera bidimensional en planta y de régimen permanente, además, es gradualmente variado, por lo que no se asume flujo uniforme, ya que IBER resuelve las ecuaciones de Saint-Venant en dos dimensiones.
2. El agua se modela como fluido incompresible y con régimen turbulento.
3. No se considera transporte de sedimentos, asumiendo un fondo rígido y márgenes estables, debido a que el cauce se encuentra revestido con una losa de concreto y muros de contención, por lo que no se presentan procesos de erosión ni deposición.
4. La geometría del dominio se presenta mediante un modelo digital de elevaciones obtenido a partir de levantamientos LIDAR.
5. La rugosidad hidráulica se representa mediante coeficientes de Manning constantes por zonas homogéneas.

4.3.2. PARÁMETROS DE TIEMPO

1. Incremento de tiempo máximo: En este, el programa ajusta automáticamente el incremento de cálculo para satisfacer la condición de Courant, colocando una condición de incremento de tiempo de cálculo máximo.
2. Instante inicial: Valor del instante de tiempo de inicio del cálculo.
3. Tiempo máximo de simulación: Valor del instante de tiempo final del cálculo.

4. Intervalos de resultados: Fija el incremento de tiempo entre instantes de escritura de resultados.

4.3.3. PARÁMETROS DE CÁLCULO

1. Número de procesadores: IBER puede ejecutar un cálculo en paralelo con el número de procesadores que se desee. Si se indica un número de procesadores mayor al existente el programa utilizará el máximo posible.
2. Función limitadora de flujo: Permite escoger entre un esquema numérico de primer orden, o uno de segundo orden con diferentes limitadores de flujo: Minmod, Superbee o Van Leer.
3. CFL: Valor del número de Courant-Friedrichs-Levy para obtener un esquema numérico estable.
4. Límite seco mojado: Se considera el umbral para considerar que un elemento está seco y no se realice ningún cálculo hidrodinámico en él.
5. Método de secado: En este caso se pueden considerar tres casos: normal, estricto e hidrológico
6. Fricción en las paredes: Permite decidir si se considera o no la rugosidad en las paredes verticales del contorno, así como el valor de dicha rugosidad.

4.4. POSPROCESO

El postproceso ayuda para visualizar y analizar los resultados mediante las diferentes opciones que ofrece IBER:

1. Visualización de resultados: El software permite visualizar y analizar los resultados, personalizar los colores, las leyendas y mostrar etiquetas, que se pueden visualizar en cada instante de tiempo, como áreas coloreadas, áreas más suavizadas o vectores.
2. Creación de gráficos: Los gráficos pueden visualizarse dentro de la interfaz del programa o exportarse a formatos de Excel.
3. Exportar resultados en formato ráster: Permite exportar la mayoría de los resultados en formato ASCII grid de Arc Info a través de los menús superiores.

4.4.1. GEOMETRÍA EN IBER

Desde el archivo de AutoCAD se exportó el archivo a .dxf para recopilar todas las características geométricas (líneas, puntos, etc.). Este siempre deberá ser un contorno cerrado, sin superficies duplicadas, para que en esta se trace el mallado, teniendo en cuenta que deberá ser lo más entendible la estructura para el software.

La malla está formada por elementos (polígonos), obtenidos por discretizar la geometría (de tal manera que las ecuaciones hidráulicas se resuelvan en cada elemento de la malla). Por lo que, entre más fina la malla, los cálculos serán más precisos.

En cuanto a las mallas estructuradas, son aquellas en las que cada elemento se puede identificar mediante un par de índices en forma de matriz, razón por la cual la zona densa geoméricamente está conformada por triángulos y cuadriláteros. A diferencia de estas, las mallas no estructuradas son aquellas en las que los elementos no están ordenados entre sí, lo que permite adaptar mejor a geometrías irregulares y ajustar espacialmente de forma sencilla. La versatilidad del programa IBER radica en poder combinar las mallas estructuradas y no estructuradas formadas por elementos de 3 o 4 lados en distintas zonas.

La generación de la malla forma una parte fundamental debido a la transición entre elementos y el aumento en la densidad de estos, ya que analizará fenómenos de gran importancia cuyo correcto funcionamiento requiere de un valor muy pequeño. Una vez terminada la malla, se presenta un resumen del número de elementos triangulares y cuadriláteros que componen el modelo.

4.4.2. CONDICIONES DE CONTORNO

Estas permiten definir de una manera específica la geometría de la malla a la cual se le asigna un valor determinado. En la mecánica de fluidos, estas permiten definir el ingreso y salida de fluido dentro de la estructura a analizar. IBER permite trabajar con flujo permanente, flujo no permanente (Figura 49).

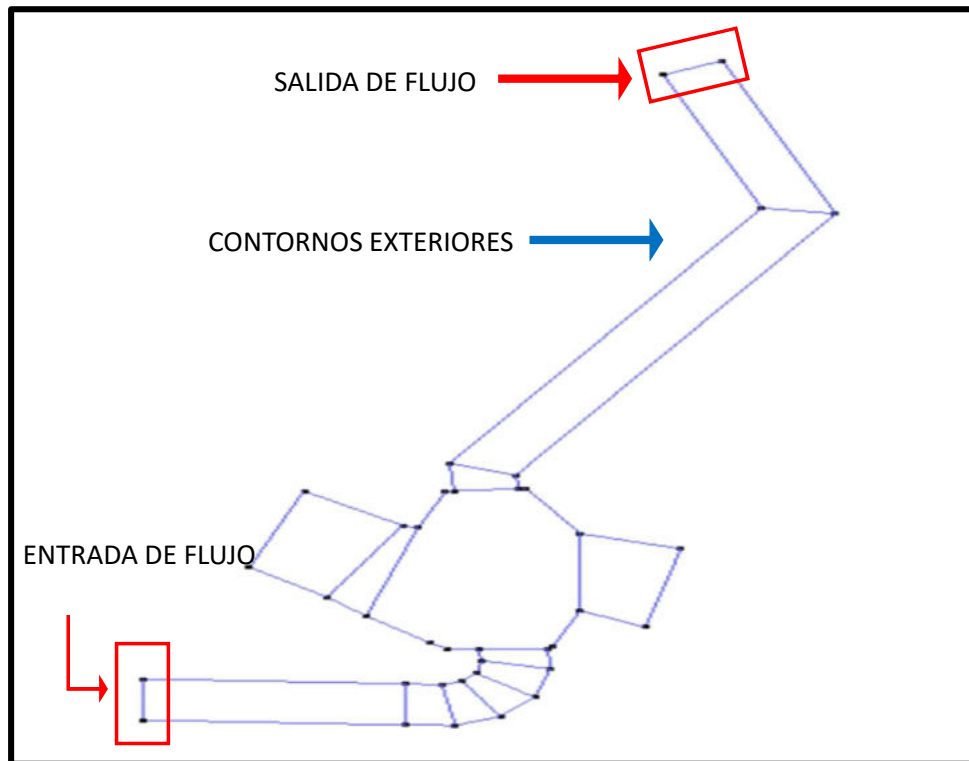


Figura 49 Condiciones frontera del modelo. Nota. Elaboración propia.

Las condiciones de entrada de flujo al modelo se pueden incorporar de tres formas: Gasto total, específico y cota de agua.

4.4.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO

La calibración del modelo hidrodinámico desarrollado tuvo como objetivo principal reproducir de manera coherente el comportamiento del flujo que ingresa, se transporta y es evacuado a través de la obra. Dicho proceso se llevó a cabo con la finalidad de garantizar que los resultados obtenidos mediante la simulación numérica representan de forma adecuada el funcionamiento hidráulico de la estructura bajo los distintos escenarios de gasto analizados.

A diferencia de estudios experimentales en los que la calibración del modelo numérico se realiza mediante la comparación directa con mediciones obtenidas en modelos físicos o en campo, en el presente trabajo la calibración del modelo hidrodinámico se llevó a cabo de manera indirecta, ajustando los parámetros hidráulicos hasta obtener un comportamiento del

flujo consistente con la geometría de la obra, los gastos de diseño y experiencia de trabajos previos.

En este sentido, la calibración se enfocó principalmente en ajustar parámetros mediante un proceso iterativo, en el cual se realizan diversas corridas del modelo, modificándolo gradualmente hasta obtener resultados hidráulicamente coherentes. Como criterio de aceptación de la calibración, se consideró que los tirantes obtenidos no rebasaran la altura de la bóveda, que las velocidades del flujo se mantuvieran dentro de rangos compatibles con la naturaleza del revestimiento y que el régimen del flujo resultante fuera consistente con la pendiente y la geometría de la obra.

Adicionalmente, durante el proceso de calibración, se verificó que el comportamiento del flujo simulado no presentara anomalías hidráulicas, como son las sobreelevaciones de lámina sin justificación geométrica, zonas de recirculación no previstas o variaciones abruptas de velocidad. La relación entre gasto, tirante y velocidad fue revisada para confirmar que el modelo respondiera de manera físicamente consistente ante incrementos progresivos del gasto.

Una vez alcanzado un comportamiento hidráulico estable y coherente, se realizaron simulaciones adicionales para distintos periodos de retorno, observando que los resultados obtenidos mantuvieran tendencias similares y consistentes. Esta repetitividad en el comportamiento del modelo permitió considerar que los parámetros adoptados durante la calibración eran adecuados para representar el funcionamiento hidráulico de la obra de drenaje en condiciones de diseño.

Finalmente, se verificó que el tiempo de simulación fuera suficiente para que el modelo alcanzara un estado estable, en el cual las variables hidráulicas analizadas no presentaran variaciones significativas en un mismo punto de control a lo largo del tiempo. De esta manera, se consideró que el modelo hidrodinámico se encontraba calibrado y en condiciones de ser utilizado para el análisis y evaluación del desempeño hidráulico.

4.4.4. VALIDACIÓN DEL MODELO

La validación del modelo hidrodinámico desarrollado en el software IBER se orientó a evaluar la capacidad del modelo para reproducir de manera coherente el comportamiento hidráulico esperado en la obra de drenaje transversal tipo bóveda, considerando las limitaciones propias de la disponibilidad de datos medidos en campo.

Derivado de la ausencia de registros de niveles de agua y gastos medidos en el sitio de estudio, la validación no se basó en una comparación directa con observaciones experimentales, como sucede en estudios que disponen de modelos físicos o campañas de medición en campo, por lo que en este trabajo se realizó en función de criterios hidráulicos y del propio comportamiento numérico del modelo, teniendo en consideración:

1. Comparación con criterios de diseño e hidráulicos: Se evaluó que los resultados obtenidos en las simulaciones cumplieran con las condiciones geométricas y de capacidad hidráulica definidas en el proyecto ejecutivo y normativa aplicable, al igual que los tirantes y velocidades simulados fueron analizados para verificar que sus valores se mantuvieran dentro de los rangos compatibles con la geometría de la bóveda, como una validación indirecta para modelos desarrollados en HEC-RAS 2D (Brunner, 2016).
2. Consistencia física de los resultados: Se examinó que la relación entre gasto, tirante y velocidad respondiera de forma física y lógica ante incrementos progresivos de gasto, sin generar comportamientos anómalos como tirantes excesivos no justificados o cambios de régimen del flujo no coherentes con la pendiente y configuración de la obra. Este enfoque es congruente con recomendaciones metodológicas de evaluación de modelos bidimensionales, en los que la coherencia de la respuesta física se utiliza como criterio de validación cuando no existe observación directa. No obstante, la validación de modelo no se limita únicamente a la etapa de planificación ni a la ejecución numérica de las simulaciones. Aun cuando una obra de drenaje se diseña con base en información hidrodinámica confiable y se ejecuta conforme a lo proyectado, es importante considerar que cuerpos de agua con características geométricas e hidrológicas aparentemente similares pueden presentar comportamientos hidráulicos distintos a lo largo del tiempo.

3. Comparación con resultados de otros estudios: En este trabajo no se utilizó un modelo numérico de referencia para comparación directa, pero es importante mencionar que no siempre es posible como es el caso de este, en el que se evaluó el desempeño general como evidencia.
4. Verificación de estabilidad temporal de las soluciones: Se aseguró que las variables hidráulicas relevantes alcanzaran un estado estable durante las simulaciones, de modo que no existieran fluctuaciones significativas en puntos de control al prolongar la simulación en el tiempo. La estabilidad de las soluciones numéricas es un criterio importante de validación en modelación hidráulica bidimensional y garantiza que la solución no dependa de condiciones transitorias no representativas.

Tomando como referencia criterios técnicos, se considera que el modelo hidrodinámico desarrollado para la obra de drenaje transversal estudiada está validado para ser utilizado en el análisis de su desempeño hidráulico bajo los escenarios de gato analizados.

4.4.5. LIMITACIONES DEL MODELO

A pesar de que los modelos hidrodinámicos desarrollados en el software IBER permiten representar de manera adecuada el comportamiento del flujo en las obras de drenaje, los resultados obtenidos se encuentran sujetos a ciertas limitaciones inherentes tanto del modelo numérico como a la información de entrada utilizada.

Una de las principales limitaciones corresponde a la calidad y resolución de los datos topográficos empleados para la generación del modelo digital del terreno. Cualquier imprecisión en la geometría del cauce, taludes o estructura hidráulica puede influir directamente en la estimación de niveles de agua, velocidad y zonas de inundación simuladas.

Asimismo, el modelo asume condiciones ideales de flujo, considerando parámetros hidráulicos constantes, como el coeficiente de rugosidad de Manning, el cual se asigna de manera homogénea en zonas con características similares. Sin embargo, en condiciones reales, la rugosidad puede variar debido a cambios en el material del lecho, presencia de sedimentos, vegetación o residuos, lo cual no siempre puede ser representado con precisión en el modelo.

Otra limitación relevante es que la simulación se realiza bajo escenarios hidrológicos específicos, generalmente asociados a gastos de diseño estimados mediante métodos indirectos como el presente trabajo. Esto implica que eventos externos no considerados o variaciones en patrones de precipitación podrían generar condiciones hidráulicas distintas a las evaluadas.

Adicionalmente, el modelo no contempla de manera explícita procesos como la sedimentación, erosión progresiva o el arrastre de material sólido, los cuales pueden modificar la sección hidráulica efectiva de la obra de drenaje con el paso del tiempo y afectar su desempeño hidráulico.

Tomando en consideración que el modelo fue validado mediante criterios de consistencia física y comparación con el comportamiento esperado del flujo, los resultados deben interpretarse como una aproximación técnica al comportamiento real, y no como una representación exacta del fenómeno hidráulico, por lo que su aplicación debe realizarse con criterio.

4.5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Resultados de velocidad

En este apartado se presentan los resultados para los distintos periodos de retorno analizados, con el objetivo de evaluar el comportamiento hidráulico de la obra de drenaje. A través de las gráficas correspondientes, se analizan las variaciones de velocidad a lo largo de la bóveda, lo que permite identificar las zonas con mayor aceleración del flujo y su relación con la geometría de la estructura.

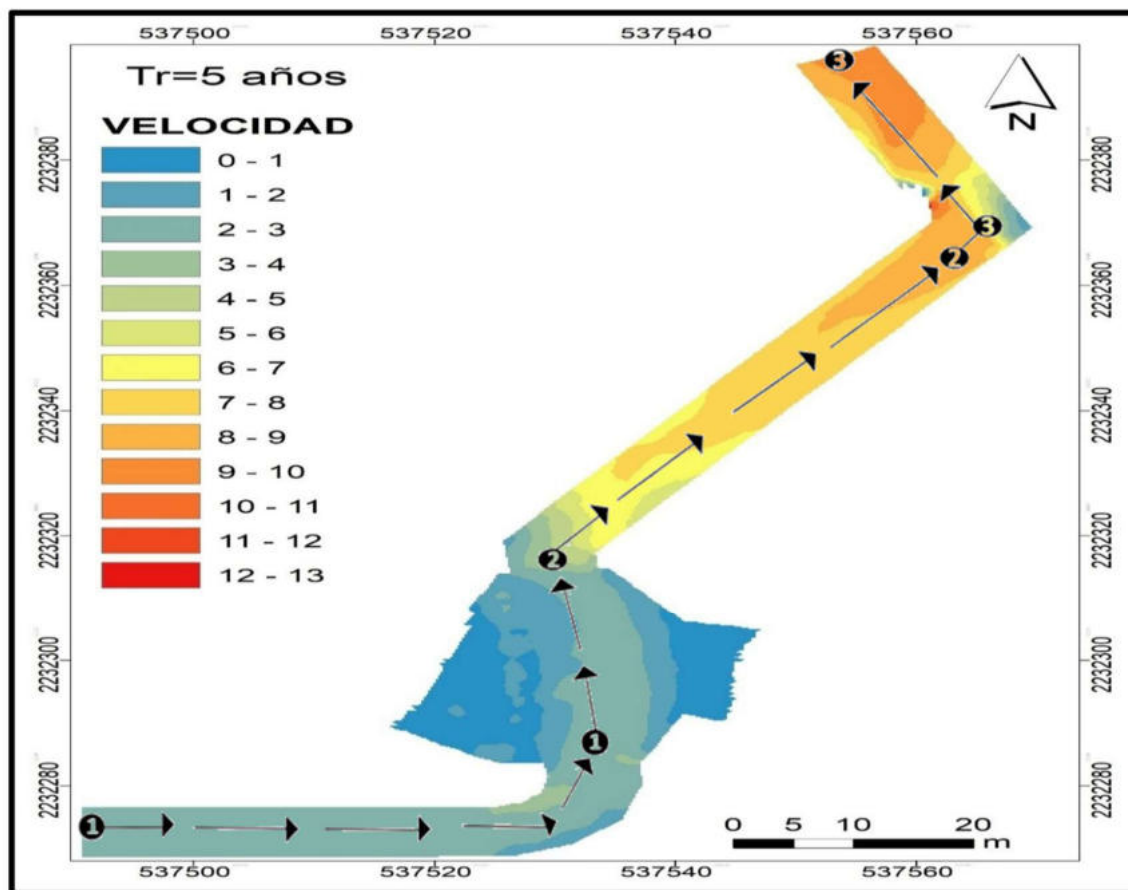


Figura 50 Velocidad del modelo a $Tr=5$ años. Nota. Elaboración propia.

Tr (5 años)

Para un periodo de retorno de 5 años, se observan velocidades de entrada a la bóveda del orden de 2 a 3 m/s hasta la primera caja deflectora. En la entrada a la segunda caja deflectora, las velocidades aumentan gradualmente, alcanzando valores entre 3 hasta 6 m/s, lo cual es consistente con la aceleración del flujo inducida por la geometría de la estructura.

Posteriormente, a la salida de la tercera caja deflectora y en la descarga de la bóveda, se registran velocidades máximas del orden de 9 a 10 m/s. No obstante, dichas velocidades se desarrollan sobre una estructura construida de concreto hidráulico, por lo que no representa un riesgo de erosión de la estructura. Asimismo, no se identifican condiciones que favorezcan procesos de socavación, dado que el flujo permanece confinado y no interactúa directamente con materiales no consolidados. En este contexto, las velocidades simuladas no comprometen la estabilidad de la obra y confirman que la capacidad hidráulica se cumple para este periodo de retorno (Figura 50).

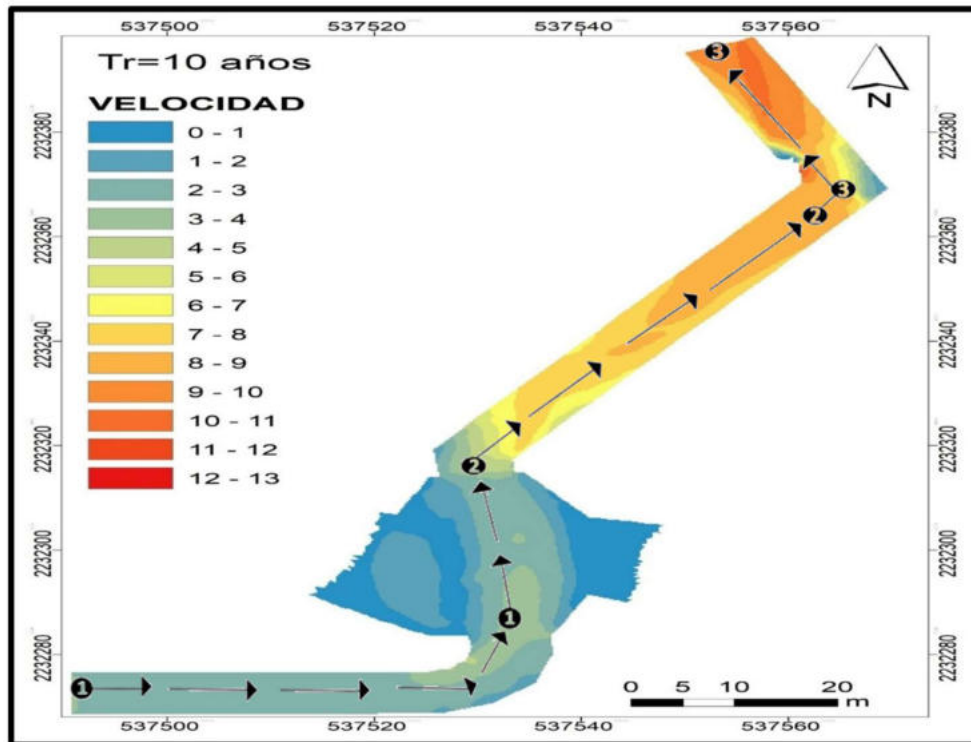


Figura 51 Velocidad del modelo a $Tr=10$ años. Nota. Elaboración propia.

Tr (10 años)

Para un periodo de retorno de 10 años, se observan velocidades de entrada a la bóveda de orden de 2 a 3 m/s hasta la primera caja deflectora. En la entrada a la segunda caja deflectora, las velocidades incrementan gradualmente, alcanzando valores entre 3 hasta 7 m/s, lo cual es aceptable con la aceleración del flujo asociada a la geometría y al confinamiento hidráulico de la estructura.

Posteriormente, a la salida de la tercera caja deflectora y en la descarga de la bóveda, se registran velocidades máximas del orden de 9 hasta 10 m/s aproximadamente. Sin embargo, al igual que el periodo de retorno anterior, dichas velocidades se desarrollan sobre una estructura construida en concreto hidráulico, lo que significa que no representan un riesgo de erosión estructural ni de socavación. Asimismo, no se identifican condiciones que favorezcan la acumulación de sedimentos, dado que el flujo permanece confinado y con suficiente energía para evitar depósitos. En este contexto, el modelo simulado no compromete la estabilidad de la obra y confirma que la capacidad hidráulica se cumple para este periodo de retorno (Figura 51).

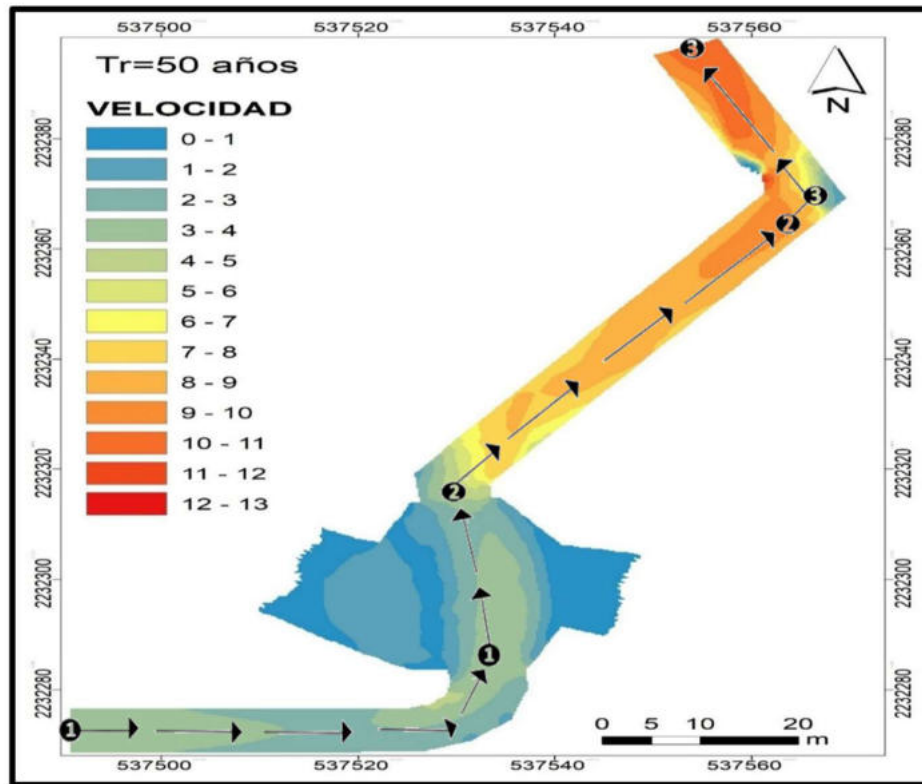


Figura 52 Velocidad del modelo a $Tr=50$ años. Nota. Elaboración propia.

Tr (50 años)

Para un periodo de retorno de 50 años, se observan velocidades de entrada a la bóveda del orden de 3 a 4 m/s hasta la primera caja deflectora. En la entrada a la segunda caja deflectora, las velocidades incrementan de manera progresiva, alcanzando valores entre 5 hasta 8 m/s, lo cual es consistente con el aumento del gasto y con el confinamiento del flujo impuesto por la geometría de la estructura.

Posteriormente, a la salida de la tercera caja deflectora y en la descarga de la bóveda, se registran velocidades máximas del orden de 10 hasta 11 m/s aproximadamente. Las velocidades obtenidas descartan la posibilidad de procesos de erosión o socavación en la estructura. De igual manera, el análisis del régimen de flujo indica que no se generan condiciones propicias para la acumulación de sedimentos, debido a que la energía hidráulica es suficiente para mantenerlos en suspensión. Por lo anterior, los resultados confirman que la obra conserva su estabilidad y que la capacidad es la adecuada para el periodo de retorno analizado (Figura 52).

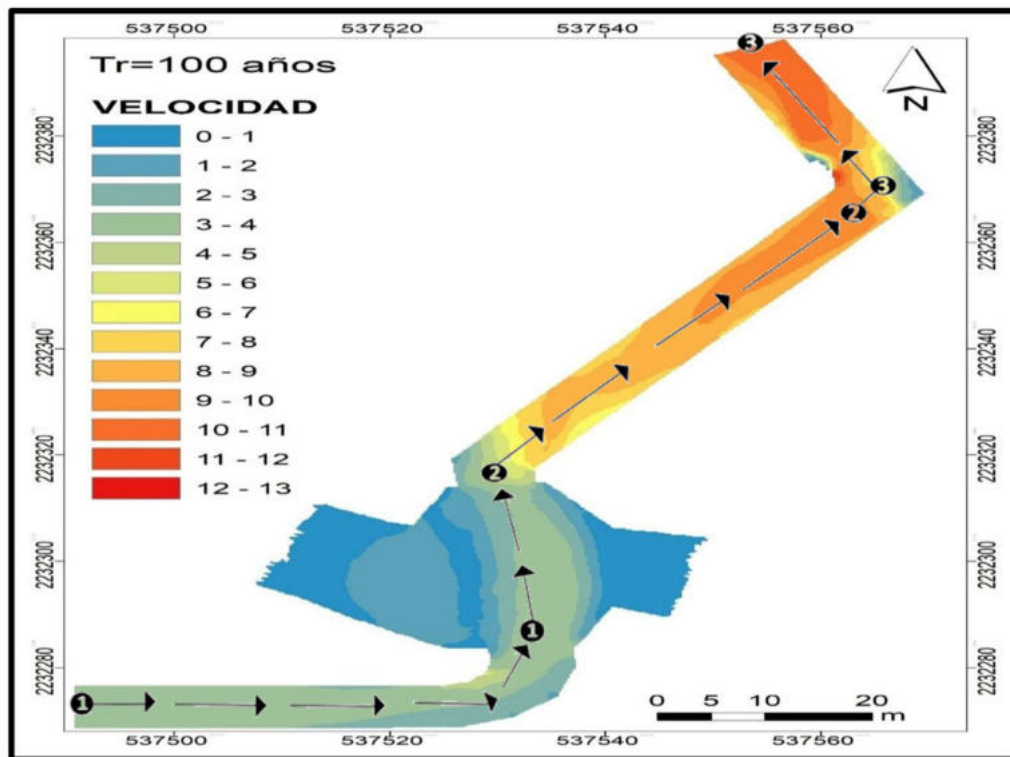


Figura 53 Velocidad del modelo a $Tr=100$ años. Nota. Elaboración propia.

Tr (100 años)

Para un periodo de retorno de 100 años, se observa que las velocidades de entrada a la bóveda son de orden de 3 a 4 m/s hasta la primera caja deflectora. En la entrada a la segunda caja deflectora, las velocidades se incrementan progresivamente, alcanzando valores entre 5 hasta 8 m/s, lo cual es consistente con el aumento del gasto asociado a este periodo de retorno y con el confinamiento hidráulico de la estructura.

Posteriormente, a la salida de la tercera caja deflectora y en la descarga de la bóveda, se registran velocidades máximas del orden de 10 hasta 11 m/s aproximadamente. A pesar de las magnitudes de velocidad registradas, al presentarse en una estructura de concreto hidráulico, no se prevén efectos adversos asociados a erosión, socavación ni deposición de sedimentos, derivado de que la energía disponible es suficiente para el transporte. En consecuencia, los resultados obtenidos indican que la estabilidad de la obra no se ve comprometida y es adecuada al periodo considerado (Figura 53).

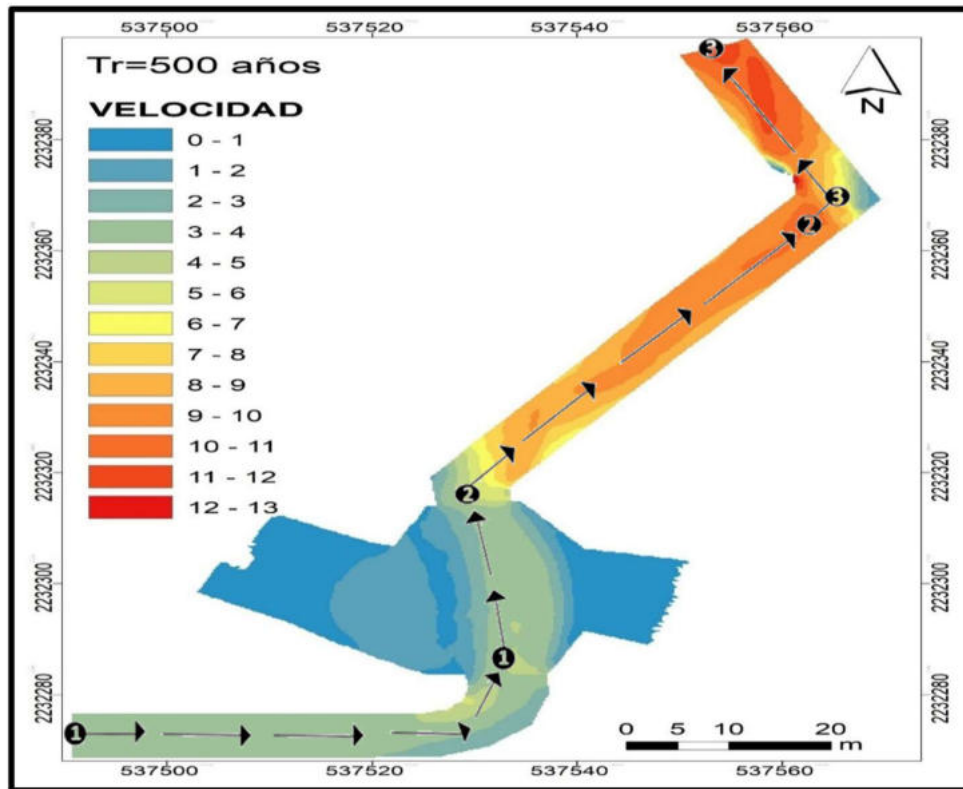


Figura 54 Velocidad del modelo a $Tr=500$ años. Nota. Elaboración propia.

Tr (500 años)

Para un periodo de retorno de 500 años, se observan velocidades de entrada a la bóveda de orden 3 a 4 m/s hasta la primera caja deflectora. En la entrada a la segunda caja deflectora, las velocidades se incrementan gradualmente, alcanzando valores entre 5 hasta 8 m/s, lo cual es consistente con el elevado gasto asociado a este periodo de retorno y con el confinamiento hidráulico impuesto por la geometría de la estructura.

Posteriormente, a la salida de la tercera caja deflectora y en la descarga de la bóveda, se registran velocidades máximas del orden de 10 a 12 m/s. Aun cuando se presentan valores elevados de velocidad, estos ocurren sobre una estructura que elimina la posibilidad de daños por erosión o socavación al ser de concreto. De igual manera, el análisis del flujo modelado indica que no se generan condiciones para la deposición de sedimentos, ya que la energía hidráulica es suficiente para garantizar su transporte. Por lo tanto, las condiciones hidráulicas simuladas no afectan la estabilidad de la obra y demuestran que su capacidad hidráulica es adecuada incluso para el periodo de retorno analizado (Figura 54).

GRÁFICAS COMPARATIVAS

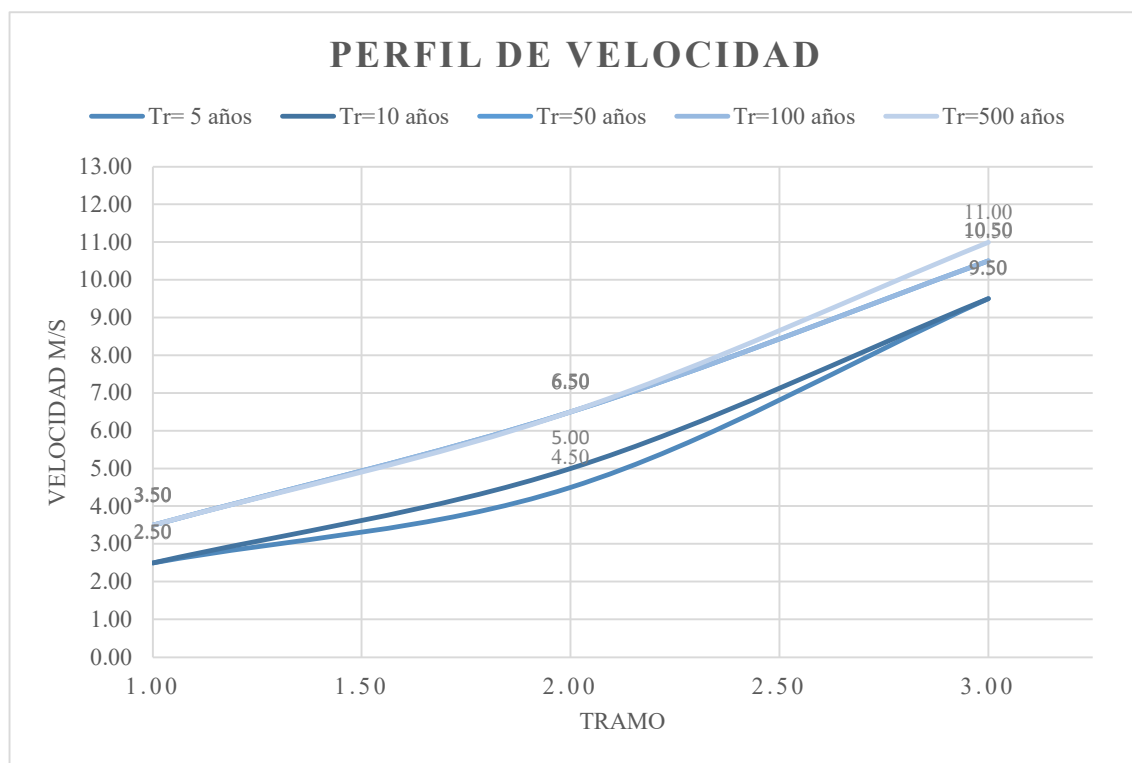


Figura 55 Gráfica de velocidad en la sección de la bóveda. Nota. Elaboración propia.

Con el propósito de realizar una comparación adecuada de las velocidades a lo largo de la estructura, la sección de la bóveda se dividió en tres tramos, definidos en función de la ubicación de las cajas deflectoras:

Tramo 1: Comprendido desde la entrada de la bóveda hasta la primera caja deflectora.

Tramo 2: Comprendido desde la entrada a la segunda caja deflectora hasta las inmediaciones de la tercera caja deflectora.

Tramo 3: Comprendido desde la tercera caja deflectora hasta la salida a la bóveda.

A partir de esta división, es posible analizar el comportamiento hidráulico a lo largo de toda la sección de la bóveda. Los resultados muestran que las mayores velocidades se presentan de manera consistente en el tercer tramo, correspondiente a la zona de descarga de la estructura, incrementándose progresivamente conforme aumenta el periodo de retorno, alcanzando su valor máximo para un periodo de retorno de 500 años.

Asimismo, se observa que, al finalizar el primer tramo, en la zona correspondiente a la primera caja deflectora, se presenta una reducción de velocidad del flujo debido a la expansión de la sección hidráulica. Sin embargo, al ingresar al segundo tramo, las velocidades vuelven a incrementarse, aumentando de manera más significativa en el tercer tramo, donde el flujo se acelera hasta alcanzar una velocidad máxima del orden de 11 m/s para un periodo de retorno de 500 años. Este comportamiento se asocia al incremento del gasto conforme aumentan los periodos de retorno, así como al confinamiento hidráulico impuesto por la geometría de la bóveda, lo cual limita la expansión del flujo y favorece su aceleración hacia la salida de la estructura (Figura 55).

Resultados de tirante:

Con el propósito de complementar el análisis hidronómico de la estructura y evaluar su comportamiento hidráulico bajo distintos escenarios, se realizó el análisis de los tirantes hidráulicos para los diferentes periodos de retorno considerados. Este análisis permite identificar la variación de la profundidad del flujo a lo largo de la bóveda y verificar la capacidad de la sección hidráulica ante eventos de creciente, así como el desempeño de las cajas deflectoras en el control del flujo.

A partir de los resultados obtenidos en el modelo numérico, se presentan las gráficas correspondientes, las cuales permiten comparar el comportamiento de los tirantes a lo largo de la estructura para cada periodo de retorno analizado tomando en consideración la altura de la estructura definida en el proyecto, que es de 6.89 m incluyendo el arco seccional.

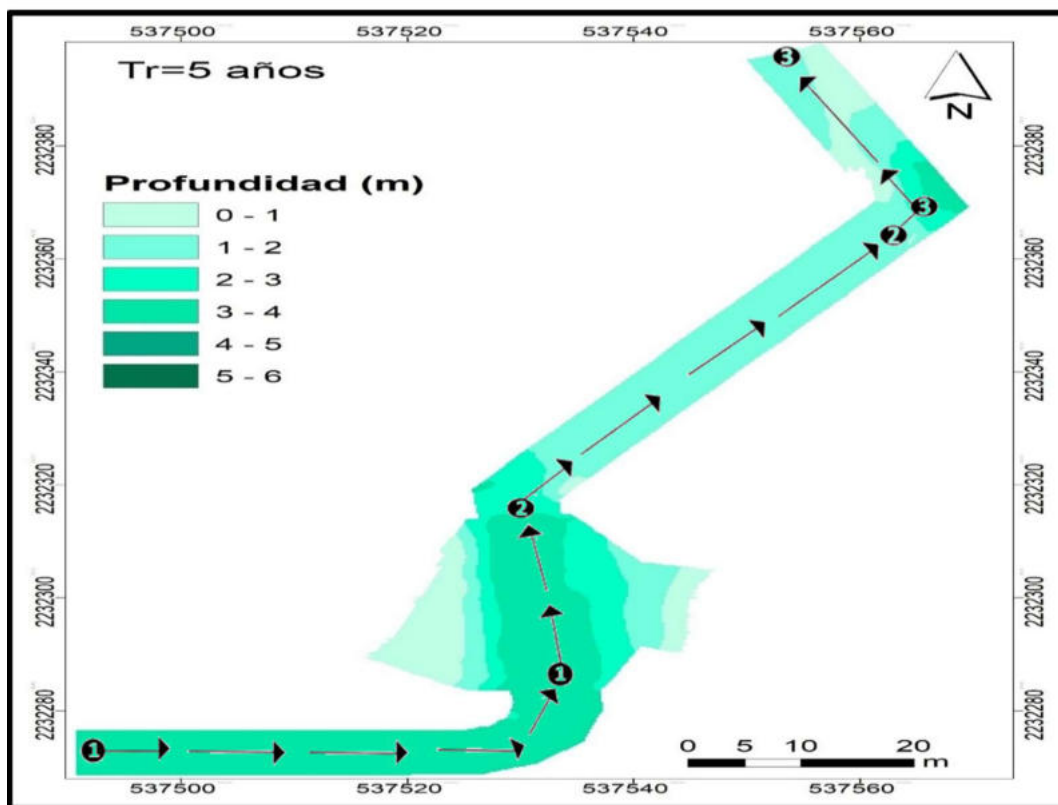


Figura 56 Tirante del modelo a $Tr=5$ años. Nota. Elaboración propia.

Tr (5 años)

Para un periodo de retorno de 5 años, los tirantes hidráulicos a la entrada de la bóveda se encuentran entre 3 y 4 m hasta la primera caja deflectora. En la entrada a la segunda caja deflectora, los tirantes disminuyen gradualmente, registrándose valores del orden de 2 a 3 m, mientras que la salida de la tercera caja deflectora y la descarga de la estructura presentan tirantes entre 1 a 2 m aproximadamente.

Este comportamiento es consistente con la aceleración progresiva del flujo a lo largo de la bóveda y con la geometría de la estructura, la cual cuenta con una altura de 6.89 m incluyendo el arco seccional. En los tres tramos, los tirantes obtenidos se mantienen dentro de la sección hidráulica disponible cubriendo 50.80% de la altura de la estructura aproximadamente en el caso más desfavorable que se presenta en el tramo uno, sin embargo, no generan desbordamientos ni condiciones que comprometan la seguridad de la infraestructura vial. En consecuencia, la obra de drenaje cumple con su capacidad hidráulica para este periodo de retorno (Figura 56).

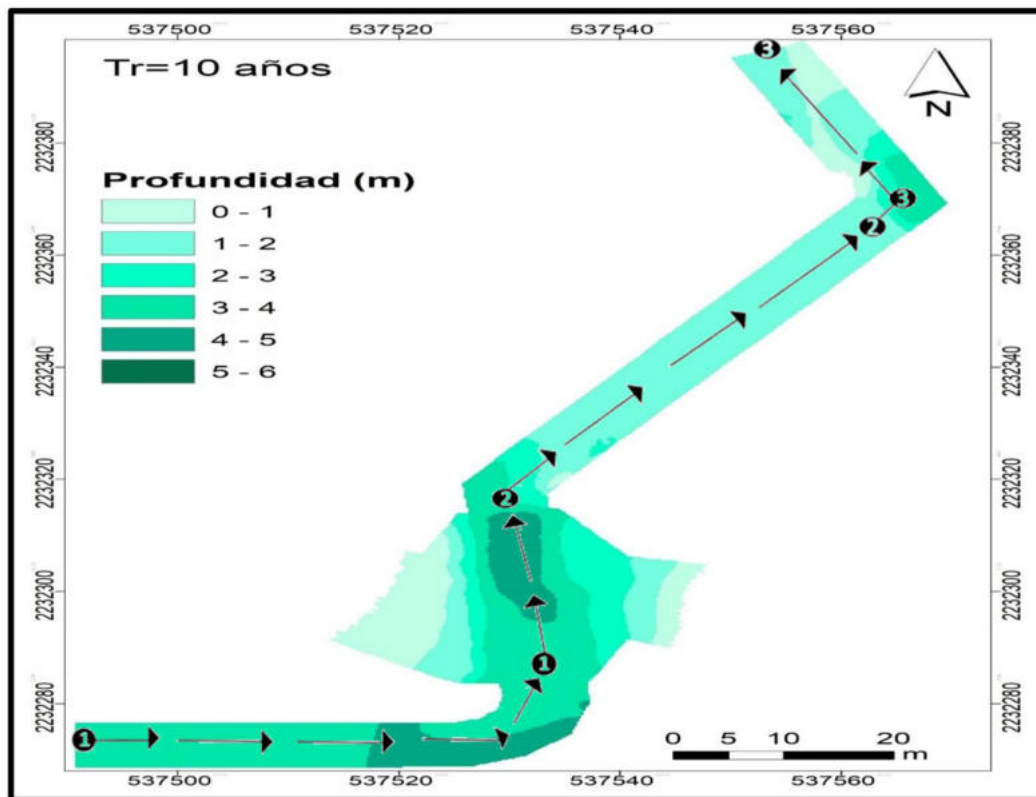


Figura 57 Tirante del modelo a $Tr=10$ años. Nota. Elaboración propia.

Tr (10 años)

Para un periodo de retorno de 10 años, los tirantes hidráulicos a la entrada de la bóveda se encuentran entre 3 y 4 m hasta la primera caja deflectora. En la entrada a la segunda caja deflectora, los tirantes presentan valores del orden de 2 a 4 m, mientras que a la salida de la tercera caja deflectora y en la descarga de la estructura se registran tirantes entre 1 y 2 m aproximadamente.

El comportamiento del flujo es coherente con el proceso de aceleración a lo largo de la bóveda y con la geometría de la estructura, la cual presenta una altura total de 6.89 m, considerando el arco seccional. En los tres tramos evaluados, los tirantes hidráulicos permanecen dentro de la sección disponible, alcanzando aproximadamente el 55.88% de la altura total en el escenario más desfavorable, correspondiente al tramo uno. No obstante, estas condiciones no generan desbordamiento ni representan un riesgo para la seguridad de la infraestructura vial, evidenciando un funcionamiento hidráulico adecuado de la obra (Figura 57).

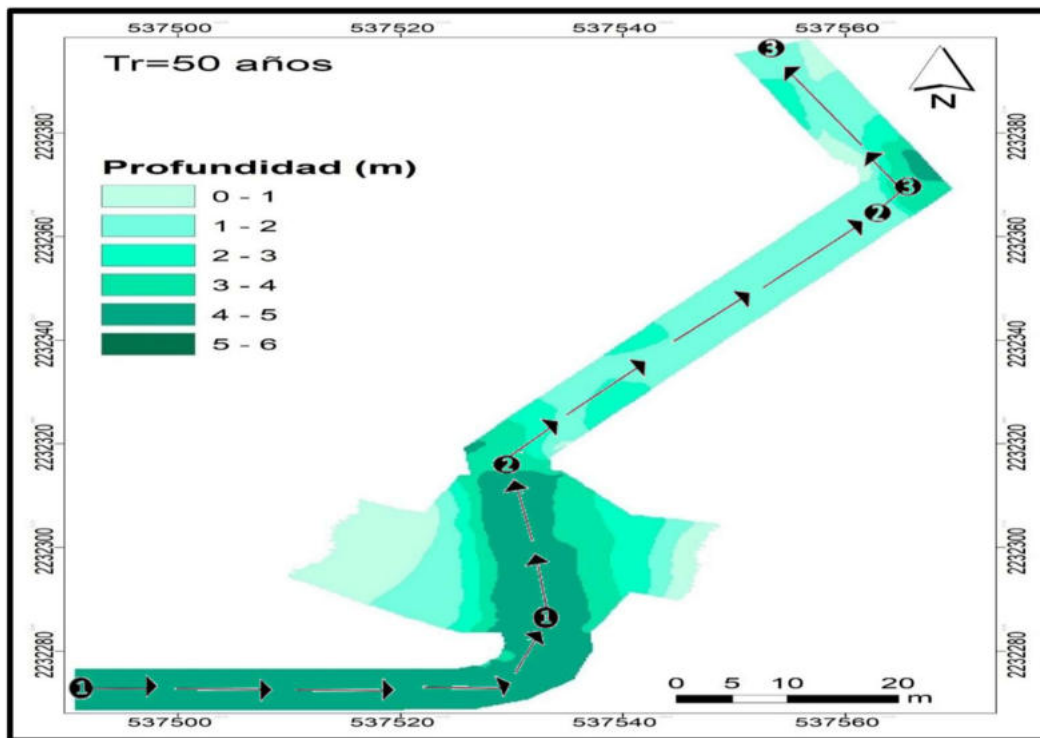


Figura 58 Tirante del modelo a $Tr=50$ años. Nota. Elaboración propia.

Tr (50 años)

Para un periodo de retorno de 50 años, los tirantes hidráulicos a la entrada de la bóveda se encuentran entre 4 y 5 m hasta la primera caja deflectora. En la entrada a la segunda caja deflectora, los tirantes disminuyen gradualmente, registrándose valores del orden de 3 a 4 m, mientras que a la salida de la tercera caja deflectora y en la descarga de la estructura se mantienen entre 1 a 2 m aproximadamente.

Bajo las condiciones definidas, el flujo presenta un comportamiento acorde con el aumento del gasto y su tránsito a lo largo de la bóveda. La obra de drenaje dispone de una altura total de 6.89m, considerando el arco seccional, lo que permite que, en los tres tramos evaluados, los niveles alcanzados por el flujo permanezcan contenidos dentro de la sección. El escenario más desfavorable se registra en el tramo uno, donde el tirante ocupa aproximadamente el 65.31% de la altura de la estructura, sin que se presenten desbordamientos ni situaciones que pongan en riesgo la seguridad y garantizando que la estructura se libere de cualquier daño catastrófico. (Figura 58).

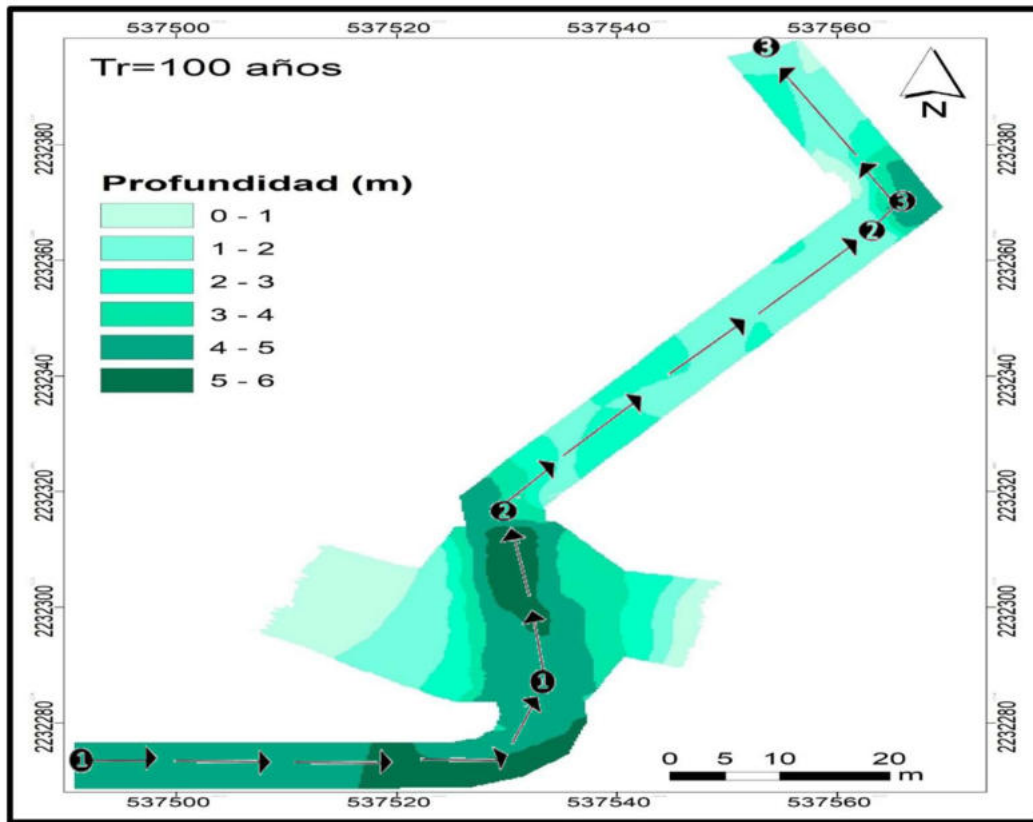


Figura 59 Tirante del modelo a $Tr=100$ años. Nota. Elaboración propia.

Tr (100 años)

Para un periodo de retorno de 100 años, los tirantes hidráulicos a la entrada a la bóveda se encuentran entre 4 y 5 m hasta la primera caja deflectora. En la entrada a la segunda caja deflectora, los tirantes presentan valores del orden de 3 a 4 m, mientras que a la salida de la tercera caja deflectora y en la descarga de la estructura se mantienen entre 1 y 2 m aproximadamente.

El análisis hidráulico evidencia que, ante el incremento del gasto correspondiente a este escenario, el flujo se desarrolla de manera continua a lo largo de la bóveda. La estructura presenta una altura total de 6.89 m, incluyendo el arco seccional, lo que permite que, en los tres tramos considerados, los tirantes se mantengan contenidos dentro de la sección. La condición más crítica se observa en el tramo uno, donde el nivel del flujo alcanza aproximadamente el 71.12% de la altura de la estructura sin que presente situaciones que comprometan la estructura y función de la misma (Figura 59).

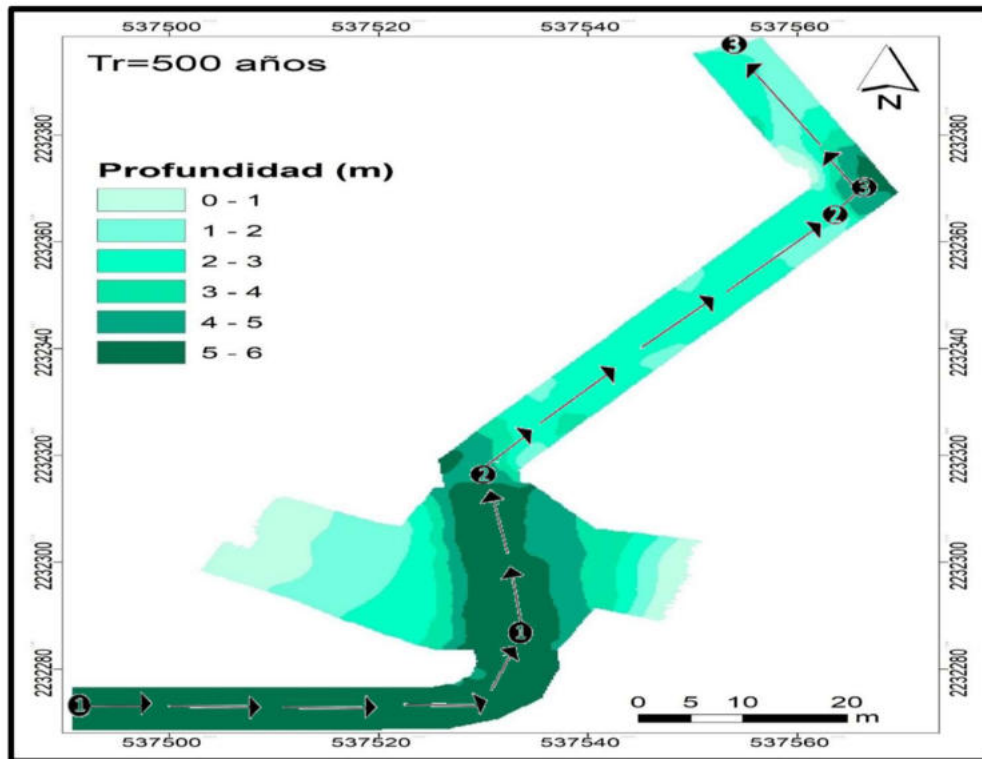


Figura 60 Tirante del modelo a $Tr=500$ años. Nota. Elaboración propia.

Tr (500 años)

Para un periodo de retorno de 500 años, los tirantes hidráulicos a la entrada de la bóveda se encuentran entre 5 y 6 m hasta la primera caja deflectora. En la entrada a la segunda caja deflectora, los tirantes presentan valores del orden de 4 a 5 m, mientras que a la salida de la tercera caja deflectora y en la descarga de la estructura se registran tirantes entre 2 y 3 m aproximadamente.

El análisis hidráulico realizado indica que la geometría de la bóveda permite un comportamiento estable del flujo incluso bajo el escenario más crítico considerado en el trabajo. La estructura, con una altura total de 6.86 m incluyendo el arco seccional, proporciona un margen suficiente para contener los niveles alcanzados por el flujo en los tres tramos evaluados. El mayor tirante se presenta en el tramo uno, donde el nivel del agua ocupa aproximadamente el 83.45% de la altura de la sección, sin que se registren desbordamientos ni afectaciones a la seguridad de la infraestructura vial, lo que demuestra un desempeño hidráulico confiable aun ante el periodo de retorno más exigente analizado (Figura 60).

GRÁFICAS COMPARATIVAS

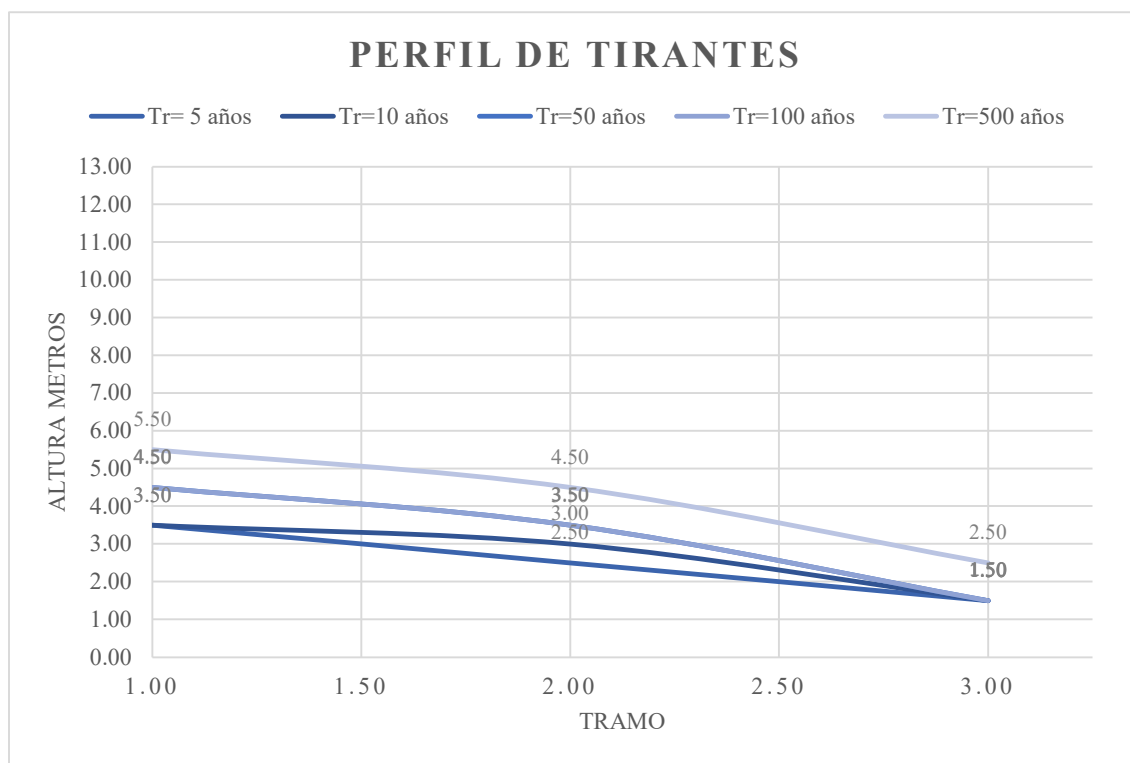


Figura 61 Grafica de tirantes en la sección de la bóveda. Nota. Elaboración propia.

Al igual que en el análisis de velocidades, la sección de la bóveda se dividió en tres tramos con el fin de realizar una comparación de los tirantes hidráulicos a lo largo de la estructura.

Tramo 1: Comprendido desde la entrada de la bóveda hasta la primera caja deflectora.

Tramo 2: Comprendido desde la entrada a la segunda caja deflectora hasta las inmediaciones de la tercera caja deflectora.

Tramo 3: Comprendido desde la tercera caja deflectora hasta la salida de la bóveda.

A partir de esta división, se observa que los mayores tirantes se presentan de manera consistente en el tramo de entrada de la estructura, disminuyendo progresivamente en los tramos posteriores. En el segundo tramo, la reducción del tirante se asocia a la presencia de una mayor sección hidráulica disponible, mientras que en el tercer tramo la profundidad disminuye de forma más significativa debido a la aceleración del flujo hacia la salida de la bóveda.

Este comportamiento se presenta de manera similar para los distintos periodos de retorno analizados. Para el caso más desfavorable, correspondiente a un periodo de retorno de 500 años, se registran tirantes máximos del orden de 5.75 m en el tramo de entrada, lo cual representa 83.45% de la altura total de la estructura.

Cabe señalar que, para efectos del análisis hidráulico, la altura de control de la bóveda se considera hasta el arranque del arco, correspondiente a la altura del muro vertical de aproximadamente 3.00 m, ya que esta sección define la capacidad hidráulica efectiva bajo condiciones de flujo a superficie libre. La altura total de la estructura que incluye el arco seccional hasta la clave de la bóveda es de 6.89 m aproximadamente, se considera únicamente para evaluar condiciones externas y posibles escenarios de flujo presurizado. Bajo este criterio, los tirantes máximos obtenidos superan la altura del muro, pero permanecen dentro de la geometría total de la bóveda, sin generar desbordamientos ni comprometer la capacidad hidráulica de la obra (Figura 61).

4.6. DISCUSIÓN DEL MODELO

El uso de modelos numéricos hidrodinámicos representa una herramienta fundamental en el análisis y diseño de obras de drenaje en proyectos de ingeniería civil, ya que permite simular el comportamiento del flujo bajo distintas condiciones hidrológicas y geométricas, proporcionando información detallada sobre variables como velocidades, tirantes y distribución del flujo.

En el presente estudio, la implementación del software IBER permitió evaluar el funcionamiento hidráulico de una obra de drenaje tipo bóveda de manera integral, superando las limitaciones de los métodos tradicionales basados únicamente en ecuaciones unidimensionales o criterios empíricos. La modelación bidimensional facilitó la identificación de zonas con mayores concentraciones de velocidad, así como la verificación de la capacidad hidráulica de la estructura ante el gasto de diseño, aportando un mayor nivel de confiabilidad en la evaluación del desempeño de la obra.

Entre las principales ventajas del uso de modelos numéricos como IBER se encuentra la posibilidad de representar geometrías complejas, analizar el flujo en régimen definido y visualizar espacialmente los resultados mediante mapas de velocidades y tirantes, lo que contribuye a una mejor interpretación del comportamiento hidráulico y a una toma de decisiones más informada en etapas de diseño y evaluación.

No obstante, el empleo de este tipo de modelos también presenta limitaciones que deben ser consideradas en la interpretación de los resultados. La precisión de las simulaciones depende en gran medida de la calidad del modelo digital del terreno, del tamaño y calidad del mallado, así como de la correcta definición de las condiciones de frontera y los parámetros hidráulicos, como el coeficiente de rugosidad. Por ello, los resultados obtenidos deben entenderse como una aproximación al comportamiento real del sistema y no como una representación exacta de este.

Adicionalmente, a partir de los resultados obtenidos y de la inspección visual del sitio, no se identificó la presencia significativa de sedimentos ni evidencias de procesos erosivos en la zona de la obra de drenaje. La estructura se encuentra construida en concreto hidráulico y presenta un cauce definido, lo que reduce la sustentabilidad a fenómenos de erosión asociados a las velocidades simuladas. En este contexto, las condiciones hidráulicas obtenidas mediante el modelo numérico no representan un riesgo de erosión estructural ni de acumulación de sedimentos que comprometa el funcionamiento de la bóveda.

En este sentido, la combinación de modelos numéricos con criterios de ingeniería, conocimiento del sitio y validaciones de campo resulta esencial para garantizar análisis hidráulicos confiables. El uso de IBER, aplicado de manera adecuada y crítica, constituye una herramienta de alto valor para la evaluación del desempeño de obras de drenaje, contribuyendo a mejorar la seguridad hidráulica y la eficiencia de las infraestructuras viales.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos mediante el modelo hidrodinámico bidimensional desarrollado en el software IBER permitieron determinar la capacidad hidráulica de la obra de drenaje tipo bóveda ubicada en el km 20+322.40 de la carretera Real del Monte - Entronque Huasca y concluir si es adecuada para conducir los escurrimientos asociados a distintos periodos de retorno. A partir de la evaluación hidráulica realizada, se concluye que el diseño geométrico existente de la bóveda es funcional para los escenarios analizados, ya que el flujo se mantiene contenido dentro de la sección hidráulica de la estructura y se desarrolla bajo condiciones de flujo a superficie libre, incluso para periodos de retorno elevados. Por lo tanto, la estructura cumple con su objetivo hidráulico al permitir el tránsito seguro del flujo sin evidencia de desbordamientos ni pérdida del control hidráulico.

El análisis hidrodinámico permitió analizar la interacción entre el gasto, la geometría de la estructura y el comportamiento del flujo para distintos periodos de retorno (5, 10, 50, 100 y 500 años), evidenciando cómo el diseño geométrico influye directamente en la aceleración del flujo y en la variación de los tirantes hidráulicos. Se observó que la geometría de la bóveda y la disposición de las cajas deflectoras generan una redistribución del flujo que provoca un incremento progresivo de las velocidades hacia la salida de la estructura, donde se alcanzan los valores máximos del modelo. Estas velocidades elevadas se asocian principalmente al incremento del gasto para periodos de retorno mayores, al confinamiento hidráulico de la bóveda y a la reducción progresiva del tirante conforme el flujo se acelera hacia la salida de la estructura. Este comportamiento responde al principio de conservación de la energía, donde la disminución de la carga hidráulica se traduce en un aumento de la velocidad, representando una condición normal dentro del modelo.

En cuanto a los tirantes hidráulicos, el modelo numérico permitió identificar que las mayores profundidades del flujo se concentran en el tramo de entrada de la bóveda, disminuyendo conforme el flujo avanza y se acelera. Para los periodos de retorno más altos, el flujo se aproxima a condiciones cercanas al flujo a presión, aunque se mantiene dentro de la sección hidráulica de la estructura y dentro de la clave de la bóveda. Cabe destacar que la interpretación de estos tirantes se realizó considerando como altura hidráulica de control 6.89

m, que incluye el arco de la obra. Este criterio permitió evaluar de manera adecuada la capacidad hidráulica efectiva de la estructura bajo condiciones de flujo a superficie libre, así como su comportamiento ante escenarios hidráulicos extremos.

El empleo del modelo hidrodinámico bidimensional desarrollado en el software IBER representó una herramienta eficaz y novedosa para la evaluación integral del comportamiento hidráulico de la obra de drenaje tipo bóveda. A diferencia de los métodos tradicionales de análisis hidráulico, el enfoque numérico permitió integrar de manera explícita la geometría real de la estructura, el diseño de las cajas deflectoras y las condiciones hidráulicas del flujo, posibilitando una evaluación detallada de la distribución espacial de velocidades y tirantes a lo largo de la bóveda. De esta forma, el uso de modelación hidrodinámica permitió comprender de manera precisa la interacción entre el flujo y la geometría de la estructura, lo que permite comprender el comportamiento hidráulico de la obra frente a distintos escenarios de avenidas.

A pesar de las ventajas del modelo numérico empleado, el presente trabajo presenta limitaciones de acuerdo con el enfoque adoptado. El modelo desarrollado en IBER no incorpora de manera directa procesos de transporte de sedimentos, erosión ni socavación, por lo que los posibles efectos asociados a las altas velocidades simuladas no pueden cuantificarse de forma completa. Sin embargo, la naturaleza de la obra de drenaje constituida por concreto hidráulico hace irrelevantes los procesos de erosión y las velocidades relativamente altas disminuyen la probabilidad de sedimentación o azolve de la obra de drenaje. Además, el análisis se realizó bajo un enfoque hidráulico, sin considerar el comportamiento estructural de la obra ni el posible deterioro de los materiales con el tiempo. Este modelo asumió condiciones geométricas y de material ideales, por lo que variaciones constructivas, irregularidades locales o cambios en las condiciones reales de operación pueden influir en el comportamiento hidráulico de la estructura y no se encuentran representados dentro del modelo.

Con base en los resultados obtenidos y en relación con el enfoque hidráulico y geométrico del estudio, se recomienda el uso de modelos numéricos bidimensionales como IBER desde las etapas tempranas de planeación y diseño de obras de drenaje, ya que permiten evaluar de

forma puntual la interacción entre el flujo y la geometría de la estructura, optimizando el diseño hidráulico antes de su construcción. Se sugiere complementar este tipo de análisis con estudios específicos de erosión, socavación y disipación de energía, particularmente en la zona de salida de la bóveda, donde se presentan las mayores velocidades del flujo. Futuros trabajos podrían incorporar módulos de transporte de sedimentos o análisis tridimensionales que permitan obtener una evaluación más integral del desempeño hidráulico y de la seguridad a largo plazo de este tipo de estructuras.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Amelo, A. (2023). *Levantamiento topográfico mediante LIDAR en la zona del proyecto Carretera Pachuca -Huejutla, tramo Real del Monte – Entronque Huasca* [Informe técnico]. Amelo Infraestructura.
- Arreguin Cortes, F.I. (2021). *Obras Hidráulicas*. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Bañón Blázquez, L. & Bebía García, M (2000). *Manual de carreteras* (Vol. 2). Universidad de Alicante.
- Biología Integral en Impacto ambiental. (2021). *Carretera Pachuca – Huejutla subtramo Real del Monte – Entronque Huasca, en el estado de Hidalgo: Datos del proyecto, del promovente y del responsable del estudio de impacto ambiental* [Informe técnico]. Secretaria de infraestructura, Comunicaciones y Transportes.
- Blade, E., Cea, L., Corestein, G., Escolnao, E., Puertas, J., Vazquez-Cendon, E., Dolz J., & Coll, A. (2014). *Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos*. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería.
- Boletín Oficial del Estado. (2016). *Introducción de Carreteras: Norma 5.2.-IC: Drenaje superficial* (Capítulo 4, Drenaje Transversal).
- Castillo, J. (2017). *Evaluación hidrológica de los drenajes transversales en la carretera Cocahuayco – Cocachimba – Bongará Amazonas* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Cajamarca].
- Chávez, A. (2008). *Revisión de obras de drenaje del tramo 0+100 al 2+000 de la carretera Ziracuaretiro- La Ciénega* [Tesis de licenciatura, Universidad Don Vasco A.C.].
- Consorcio ALFA. (2009). *Manual de drenaje para carreteras*. Instituto Nacional de Vías.
- Echeverry, J. (2004). *Manual de drenaje de carreteras*. Universidad de los Andes.

- García, M. (2017). *Comparación de los resultados de la simulación de flujo de un modelo físico a escala con el modelo numérico utilizado por el software IBER 2D* [Tesis de licenciatura, Escuela Colombiana de Ingeniería].
- Gómez, F. (2024). *Proyecto de drenaje menor en vías terrestres* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].
- Gómez, L. (2019). *Iber applications basic guide*. University of A Coruña Press.
- Gutiérrez, G., Rubiños, P. & Fernández, R. (2022). *Modelación hidráulica en IBER para prevención de inundaciones en la cuenca Tesechiacan.*, Revista Mexicana de Ciencias Forestales Vol. 13 (71).
- Hernández, L. (2014). *Análisis de costos de bóveda circular de concreto armado utilizando barras de acero grado 40 vs electromalla grado 70* [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala].
- Marín, E., & Pérez, I. (2014). *Drenaje y subdrenaje en carreteras*. Instituto Politécnico Nacional.
- Ministerio de Fomento. (2019). *NORMA 5.22-IC: Drenaje superficial de la instrucción de carreteras*. Dirección General de Carreteras.
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2008). *Manual para el diseño de carreteras pavimentadas de bajo volumen de tránsito*
- Mora, X. (2017). *Las ecuaciones de Navier-Stokes: ¿Impredecibilidad incluso sin mariposas?*, Universidad de Valencia.
- Ochoa, G., Teresa, R., & Marcelo, G. (2014). *Evaluación de modelos hidrodinámicos para representar flujos en cauces naturales*. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas, y Naturales. Universidad de Córdoba.

- Oviedo, S. (2023). *Análisis de los factores determinantes de la calidad y la mejora de la gestión de industria de la construcción de carreteras a nivel de carpeta asfáltica, macro región sur Perú* [Tesis doctoral, Universidad privada de Tacna].
- Pinos, J. & Timbe, L. (2019). *Performance assessment of two-dimensional hydraulic models for generation of flood inundation maps in mountain river basins*. Journal of Flood Risk Management.
- Pulencio, D. (2015). *Tipología obras de drenaje y subdrenaje en vías* [Tesis de licenciatura, Universidad Cooperativa de Colombia].
- Quiteño, A. (2019). *Estado de las bóvedas de las carreteras que conduce de Santa Ana a Ahuachapán* [Tesis de licenciatura, Universidad Católica de El Salvador].
- Rico, G. (2023). *Contribución del transporte al P.I.B* [Notas técnicas]. Instituto Mexicano de Transporte.
- Rodríguez, M., & Calle, C. (2013). *Diseño integral del sistema de drenaje vial para obras de arte menor (drenaje longitudinal y transversal) para la carretera pachon mina zharo de 7.2 km ubicada en el canton suscal en la provincia de cañar*. Universidad de Cuenca.
- Secretaria de Comunicaciones y transportes (1984). *Normas de servicios técnicos*. Proyecto geométrico de carreteras.
- Secretaria de Comunicaciones y Transportes (2018). *Manual de proyecto geométrico de carreteras*. Dirección General de Servicios Técnicos.
- Secretaria de Comunicaciones y Transportes (2022). *Estudio hidrológico carretera: Real del Monte – Entronque Huasca*.
- Secretaria de Comunicaciones y Transportes. (2016). M-PRY-CER-4-01-002/16: *Proyecto de drenaje y subdrenaje*. Diseño hidráulico de obras menores de drenaje.

- Secretaria de Planeación, Desarrollo Regional y Metropolitano. (2010). *Omitlán de Juárez. En Enciclopedia de los municipios de Hidalgo.*
- Soler J. & Sorolla A. (2002). *La validación de las obras en espacios fluviales.* Naruralea.
- Suarez, J. (2021). *Obras de Drenaje y Subdrenaje* [Tesis de licenciatura, Instituto Politécnico Nacional].
- Triada Consultores. (2022). *Estudios y proyectos para la construcción de los entronques a desnivel: Mineral del Monte y Huasca* [Informe técnico]. Secretaria de infraestructura, Comunicaciones y Transportes.
- Vázquez, L. (2004). *La ecuación de Navier-Stokes. Un reto físico-matemático para el siglo XXI.* Universidad Autónoma de Madrid.
- Vise S.A de C.V. (2023a). *Diseño estructural de muros de contención en voladizo, Entronque Huasca.* [Informe técnico]. Secretaria de infraestructura, Comunicaciones y Transportes.
- Vise S.A de C.V. (2023b). *Diseño estructural de muros de soporte del arco seccional de lámina de la bóveda 1* [Informe técnico]. Secretaria de infraestructura, Comunicaciones y Transportes.