

Revisión Del Sistema De Drenaje De Una Obra Vial Con Ayuda De La Aplicación Informática HY-8

Review Of The Drainage System Of A Road Work With The Help Of The HY-8 Computer Application

Autores

Caridad Lourdes Hernández Valenzuela¹, Gerardo Jiménez Sáenz²

¹ Ingeniera Civil. Máster, Profesora Asistente, Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), Calle 114 #11901 entre Ciclo vía y Rotonda, Marianaoe-mail: lourdeshv@civil.cujae.edu.cu.

² Ingeniero Civil. Doctor en Ciencias, Profesor Titular, Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), Calle 114 #11901 entre Ciclo vía y Rotonda, Marianaoe-mail: gjimenez@civil.cujae.edu.cu

RESUMEN

La vida útil de una vía está ligada al funcionamiento del sistema de drenaje, encargado de recolectar, encauzar y disponer las aguas pluviales, evitando daños a la vía y al entorno. El grado de protección que debe brindar el sistema de drenaje depende de la importancia económica y social de la vía, por lo que existe una relación entre la categoría de la vía y la probabilidad de ocurrencia de las avenidas que puedan poner en riesgo la circulación vehicular. La rehabilitación del tramo Underdawn-Naranjito de la vía férrea Habana-Guanajay, concibe el paso de la vía de categoría II a categoría I, lo que supone un aumento en los caudales a evaluar. Actualmente es apreciable el deterioro causado por las aguas superficiales lo que hace necesario evaluar el desempeño del sistema de drenaje para las condiciones actuales y futuras. La modelación del comportamiento hidráulico de las alcantarillas es un proceso complejo donde intervienen múltiples variables, la aplicación informática HY-8 permitió conocer el desempeño de las obras de fábrica para diferentes condiciones de trabajo.

Palabras claves: Alcantarilla, drenaje, comportamiento hidráulico de las alcantarillas.

ABSTRACT

The useful life of a road is bound to the operation of the drainage system, in charge of gathering, to channel and to prepare the pluvial waters, avoiding damages to the road and the environment. The protection grade that should offer the drainage system depends on the economic and social importance of the road, for what a relationship exists among the category of the road and the probability of occurrence of the avenues that can put in risk the vehicular circulation. The rehabilitation of the tract Underdawn-Naranjito of the railroad Havana-Guanajay, conceives the step of the road of category II to category I, what supposes an increase in the flows to analyse. At the moment it is appreciable the deterioration caused by the superficial waters that makes necessary to evaluate the acting of the drainage system for the current and future conditions. The hydraulic performance of culverts is a complex process where multiple variables intervene, the computer application HY-8 allowed to know the acting of the culverts works for different conditions.

Keywords: Culvert, drainage, hydraulic performance of culverts

Nota Editorial: Recibido: Febrero 2023 Aceptado: Mayo 2023

1. INTRODUCCIÓN

El transporte ferroviario es un elemento vital para el desarrollo económico del país, su correcto funcionamiento depende en gran medida del estado técnico de las vías que integran la red nacional. Atendiendo a su importancia económico-social, las vías férreas se clasifican en 4 categorías, que van desde la categoría I para vías principales de importancia nacional hasta la categoría IV para vías secundarias de importancia local.

La línea Habana-Guanajay enlaza el nudo Habana con el puerto del Mariel, era considerada de importancia regional, clasificando como categoría II. El crecimiento de la Zona Especial de Desarrollo del Mariel (ZEDM), ha motivado el incremento del tráfico de cargas y pasajeros, confiriéndole importancia nacional, lo que implica el cambio a categoría I [1].

Como obra vial de categoría I debe cumplir con los requerimientos asociados al incremento de las cargas, de la velocidad de circulación y de la intensidad de tráfico, también el sistema de drenaje debe evacuar caudales mayores sin que se produzcan afectaciones a la vía, al entorno o se interrumpa la circulación.

De acuerdo a la normativa vigente en Cuba, las vías férreas categoría II se deben diseñar para una probabilidad de protección contra inundaciones del 2 % y se comprueban para el 1 %, mientras las vías categoría I se diseñan para una probabilidad del 1% y se comprueban para el 0.5 % [2].

Para realizar las transformaciones requeridas, en el año 2009 la Empresa de Proyectos de Obras de Transporte (EPOT) a solicitud de la Unión de Ferrocarriles de Cuba (UFC), realizó el Proyecto Ejecutivo para la reparación capital de la línea Habana-Guanajay, con alcance al tramo comprendido entre las estaciones Martí y Naranjito, en La Habana [3].

A partir del estudio de la documentación técnica y de la inspección visual a la vía, se pudo caracterizar su estado actual, el deterioro de sus elementos y en particular los daños ocasionados por las aguas superficiales. Lo anterior condujo al análisis del sistema de drenaje y a la determinación de los caudales hidrológicos a evacuar como paso previo para alcanzar el objetivo principal de este trabajo, que es conocer el comportamiento hidráulico de las obras de fábrica existentes en la vía y evaluar su capacidad para evacuar los caudales hidrológicos previstos para categoría I y II.

2. DESARROLLO

2. 1. Características De Las Cuencas Y Su Relación Con El Trazado De La Vía.

La vía atraviesa dos cuencas: la del río Luyanó que vierte sus aguas a la bahía de La Habana y la del río Orengo que es un afluente del río Almendares. La divisoria de las aguas que delimita ambas cuencas coincide con el trazado de la calzada de 10 de octubre. La Figura 1 muestra ambos ríos y sus cuencas, obtenidas con la aplicación informática Surfer 16.3.408.

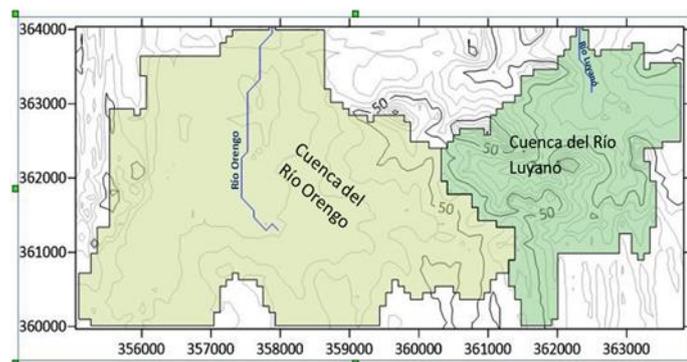
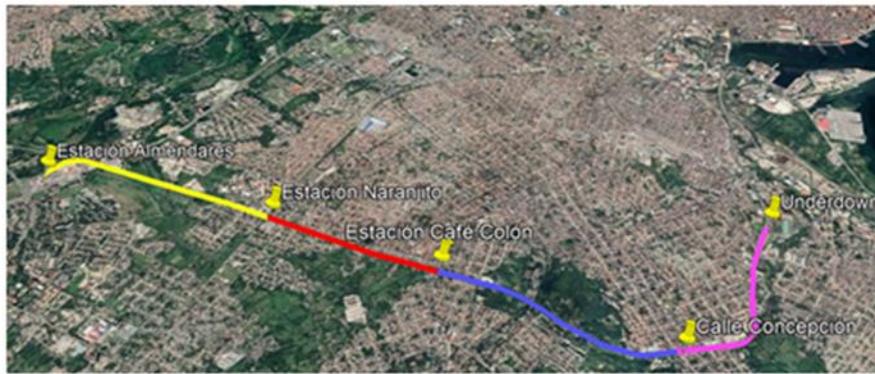


Figura 1: Cuencas de los ríos Orengo y Luyanó.

Las investigaciones hidráulicas y geotécnicas, realizadas por la Dirección de Investigaciones Aplicadas de la EPOT en junio del 2009, concluyeron que las condiciones geológicas de la explanación se caracterizan por ser homogéneas e integradas por la formación Capdevila. Litológicamente está constituida por areniscas, limonitas, arcillas, gravelitas, calcarenitas, margas, calizas, grauvacas y conglomerados. Sus depósitos están bien estratificados sobre la formación Apolo, formada por secuencia rítmica de estratos finos a laminares. La litología existente tiene dificultad con el drenaje de las aguas superficiales, que se agrava en las zonas bajas o en corte [3].

Para facilitar el estudio se establecieron tres subtramos, comprendidos desde Underdown (km 2,1) hasta la estación Naranjito (km 6,8) y se adicionó un cuarto tramo no incluido en el proyecto. La Figura 2 muestra la imagen satelital de la vía, destacándose los cuatro subtramos en que fue dividida para su análisis.



Subtramos

- Underdown-Concepción.
- Concepción-Café Colón.
- Café Colón-Naranjito.
- Naranjito-Almendares.

Figura 2: Representación del tramo de vía comprendido entre Underdown y la estación Almendares. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

La intersección de la vía férrea con Calzada de 10 de octubre, conocida como estación Café Colón, es el punto más alto del perfil con una cota de 48,72 m, a partir de aquí la rasante de la vía desciende hacia ambos extremos: de manera suave hacia Naranjito, con un desnivel de 8,05 m en 1,42 km y abruptamente hacia Underdown con un desnivel de 36,74 m en una longitud de 2,58 km. Por lo que los dos primeros subtramos drenan hacia el río Luyanó y los dos últimos al Almendares.

Primer subtramo: Underdown – Concepción

La vía férrea presenta una sección transversal a media ladera, encontrándose la banda izquierda aguas arriba, por lo que el drenaje pluvial se evacua a través de la cuneta izquierda hacia un cauce natural.

La vía atraviesa una zona urbana con manzanas regulares bien distribuidas, intersectando las calles Pocitos, Tejar, Dolores y Concepción, lo que origina 3 cruceos y un paso peatonal. Estas calles están pavimentadas, sus pendientes longitudinales son pronunciadas y actúan como cauces que vierten al drenaje longitudinal de la vía. La Figura 3 muestra de forma esquemática la planta y el perfil de la vía férrea.

En las calles Pocitos, Tejar y Dolores existen alcantarillas de una hilera de tubos de hormigón de 0,46 m de diámetro para permitir el paso del agua que fluye por la cuneta izquierda de la vía férrea. No posee drenaje transversal.

Las obras de fábrica se enumeraron en el sentido creciente del estacionado, aunque el agua corre en sentido contrario. Las obras de fábrica y sus caudales hidrológicos se muestran en la Tabla 1.

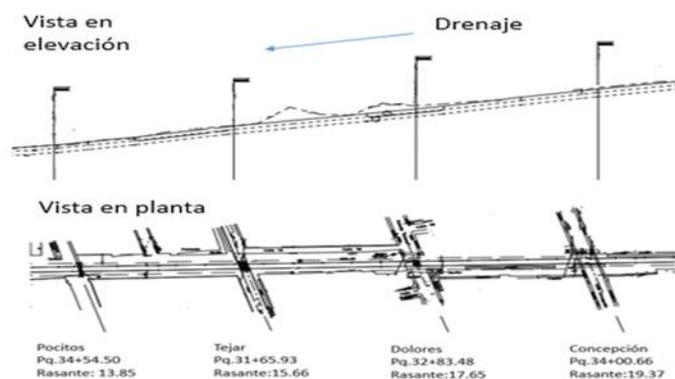


Figura 3: Detalle de la planta y el perfil del primer subtramo. Tomado de [3].

Segundo subtramo: Concepción-Café Colón.

El tramo se caracteriza por ser una zona mayormente rural, con pendientes variables desde suaves a muy fuertes. La vía bordea una elevación conocida como "Loma del 5to Distrito", atraviesa Avenida Porvenir con un paso elevado y termina en el cruceo de la Estación Café Colón. En este trayecto se encuentran secciones transversales a media ladera, en terraplén y en corte, en ese orden siguiendo el estacionado. En los últimos 300 m aproximadamente están urbanizadas las áreas a ambos lados de la vía, pero las calles no vierten a la línea. (Figura 4).

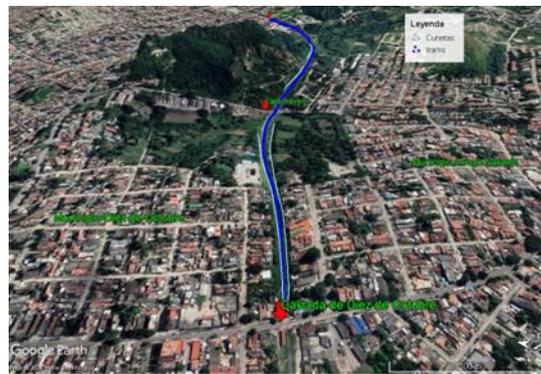


Figura 4: Representación del segundo subtramo, imagen obtenida con Google Earth Pro.

Existen 4 alcantarillas para el drenaje transversal de la vía, estas y sus caudales hidrológicos se muestran en la Tabla 1.

Tercer subtramo: Café Colón-Naranjito.

La vía en esta zona se caracteriza por circundar zonas residenciales, la sección transversal se encuentra en terraplén, las pendientes son variables de suaves a medias y predomina la alineación horizontal recta. Cuenta con dos obras de fábricas transversales. (Figura 5).



Figura 5: Representación del tercer subtramo. Imagen obtenida con Google Earth Pro.

Cuarto subtramo: Naranjito-Almendares.

Este tramo fue rehabilitado desde Almendares hasta el cruce de Vento, quedando pendiente un segmento entre Vento y Naranjito, en el que la alineación horizontal es recta y la pendiente es moderada en dirección a Almendares, no posee obras de drenaje transversal.

2. 2. Determinación De Los Caudales Hidrológicos

Para determinar el caudal de diseño es preciso establecer la frecuencia con que se presenta el evento de diseño. Esta se puede evaluar utilizando dos parámetros dependientes entre sí: el período de retorno (T_r) y la probabilidad de ocurrencia(p).

El período de retorno de una avenida (T_r) es el intervalo de tiempo dentro del cual un evento considerado como avenida o crecida máxima puede ser igualado o excedido, por lo menos una vez, en el período. La probabilidad es el inverso del período de retorno expresada en % [4].

$$p = \frac{1}{T_r} \cdot 100 \tag{1}$$

Considerando lo anterior, la vía categoría II se diseña para 50 años y se comprueba para 100 años, al cambiar a categoría I se debe diseñar para 100 años y comprobarse para 200 años.

Los caudales hidrológicos se calcularon aplicando el método racional, una vez caracterizadas las cuencas aportantes en cada uno de los tramos de estudio. La intensidad de la lluvia se determinó con el empleo del Mapa de las curvas isoyetas para la República de Cuba para láminas de lluvias del 1% de probabilidad. Utilizando los valores de coeficiente de paso (K_p) obtenidos para Cuba, se determinaron los caudales para las probabilidades de 0.5 % y 2%, haciendo uso de las expresiones siguientes:

$$Q_{0.5\%} = Q_{1\%} K_p \quad \text{siendo } K_p=1.16 \quad (2)$$

$$Q_{2\%} = Q_{1\%} K_p \quad \text{siendo } K_p=0.85 \quad (3)$$

Los datos principales empleados en el análisis aparecen en la Tabla 1. Esta incluye la ubicación en el trazado, la forma y dimensiones de la sección transversal de la alcantarilla, así como los caudales hidrológicos para probabilidades del 1%, 2% y 0.5%. Todas las alcantarillas son de hormigón y de un solo conducto, excepto la No. 9 que tiene dos.

Tabla 1: Características de las obras de fábrica del tramo en estudio.

Subtramo	O.F.	Ubicación Pq.	Forma O.F.	Tamaño O.F.	$Q_{1\%}$ (m ³ /s)	$Q_{2\%}$ (m ³ /s)	$Q_{0.5\%}$ (m ³ /s)
1	1	30+54,50	Circular	0,46 m	15,41	13,10	17,88
	2	31+65,93	Circular	0,46 m	12,51	10,63	14,51
	3	32+83,48	Circular	0,46 m	9,39	7,98	10,89
2	4	36+54,80	Cuadrada	3m x 3m	3,39	2,88	3,93
	5	38+80,00	Cuadrada	1m x 1m	1,06	0,90	1,23
	6	40+26,80	Rectangular	1m x 0,7m	7,92	6,73	9,19
	7	46+65,80	Cuadrada	2m x 2m	3,88	3,30	4,50
3	8	58+96,10	Cuadrada	2m x 2m	16,67	14,17	19,34
	9	61+92,06	Circular	2(0,60m)	6,84	5,81	7,42

2.3. Análisis Del Comportamiento Hidráulico De Las Alcantarillas.

Cuando se realiza el diseño de las obras de drenaje transversal son datos del problema: el caudal de diseño, la altura del agua permisible a la entrada (HW) y a la salida (TW), la pendiente con que se colocará el conducto (S_0), su longitud(L), el tipo de entrada y la velocidad permisible del flujo (V). También son conocidas las características geométricas de la sección transversal de la vía y las características del cauce. Con estos datos se define la forma y dimensiones del conducto, así como el tipo de material o tecnología a emplear en su construcción, de forma que se cumplan las restricciones impuestas por el proyecto [5].

En el caso de la revisión, partiendo de las obras existentes se determinan los niveles que alcanza el agua y las velocidades del flujo en el conducto y en el canal de salida para los caudales hidrológicos correspondientes a la categoría de la vía. En ambos casos se requiere comprender el comportamiento del flujo y su interacción con la alcantarilla.

La Figura 6 muestra el corte longitudinal de una alcantarilla, en la que se puede apreciar las variables que intervienen en su funcionamiento.

- TW: Profundidad medida desde la invertida de la salida de la alcantarilla a la superficie del agua(m).
- HW: Profundidad medida desde la invertida de la entrada de la alcantarilla a la superficie del agua(m).
- S_0 : Pendiente longitudinal del fondo (%).
- D: Abertura del conducto(m).
- L: Longitud del conducto(m).

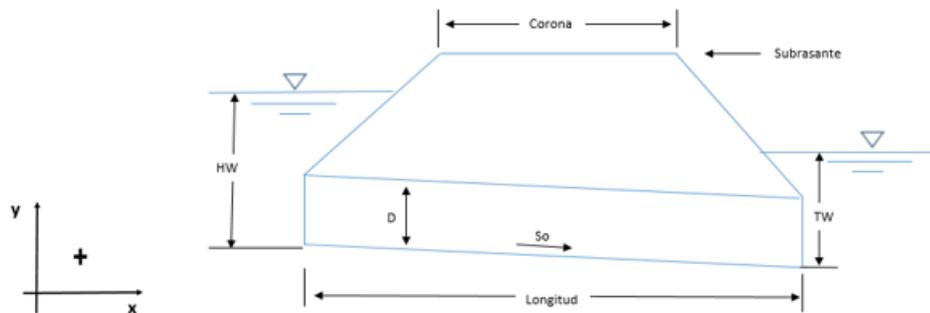


Figura 6: Corte longitudinal de una alcantarilla.

Para considerar satisfactorio el comportamiento hidráulico de las alcantarillas estudiadas se debe cumplir que la capacidad de descarga de la obra de fábrica supere el caudal de diseño.

La altura del agua a la entrada de la alcantarilla (HW), no debe rebasar cierto límite impuesto por razones de seguridad. En el caso del ferrocarril se fija el nivel de aguas máximas (NAM), 50 cm por debajo de la subrasante, con lo que se protege la superestructura de la vía de la acción erosiva del agua. Se recomienda que las obras de fábrica no trabajen a presión, por lo que la relación HW/D debe estar entre 0,75 y 0,80 [6].

La velocidad del flujo tanto dentro del conducto como en el canal de salida debe mantenerse en un rango tal que no produzca erosión ni sedimentación [4].

Para conocer los valores de profundidad y velocidad que se alcanzarán para los caudales analizados es preciso conocer el comportamiento del flujo en el interior de la alcantarilla.

Tipos de flujo.

Si se analiza un eje de coordenadas como el representado en la Figura 6, de forma que el eje de las x coincida con el fondo de la alcantarilla creciendo en la dirección del flujo, el eje de las abscisas mostrará los valores de profundidad del flujo (y). Si a cada valor de x se asocia un valor de y para el caudal analizado, es posible obtener el perfil del flujo para ese caudal.

Si y no varía a lo largo de la longitud analizada ($dy/dx = 0$) el régimen se considera uniforme, si existe variación el régimen es variado. También se analiza la variación de y en el tiempo, en este caso sí la profundidad se mantiene constante en el tiempo ($dy/dt = 0$) el flujo es permanente y si existe variación es impermanente [7].

Cuando ocurre el régimen permanente y uniforme (RPU) la superficie del agua describe una línea paralela al fondo de la conducción, esta pendiente se conoce como pendiente normal (S_n) y a la profundidad del flujo se le llama tirante normal (y_n). Figura 7a

El régimen permanente variado (RPV) se subdivide en gradualmente variado (RPGV), cuando la variación de las características hidráulicas se produce suavemente a lo largo de una gran longitud (Figura 7b) y en rápidamente variado (RPRV), cuando dicha variación se produce en una longitud pequeña y se le llama salto hidráulico.

En el RPGV la superficie del agua no es paralela al fondo, como sucede en el RPU, su forma, más o menos inclinada respecto al fondo del canal, define una curva en perfil y una superficie en el espacio, que se denomina: perfil del flujo o curva superficial [7].

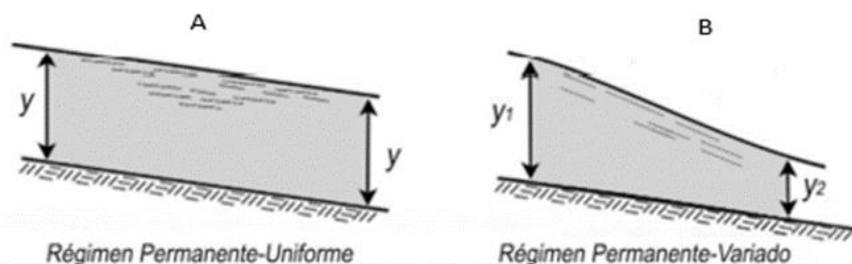


Figura 7: Régimen permanente uniforme (A) y Régimen permanente variado (B). Tomado de [7].

El efecto de la gravedad, evaluado mediante el Número de Froude (N_F), representa la relación entre las fuerzas inerciales (FI) y las gravitacionales (FG) [4].

Este criterio establece 3 tipos de régimen:

	Régimen	
$N_F = 1$	Crítico	$FI=FG$
$N_F < 1$	Subcrítico	$FI < FG$
$N_F > 1$	Supercrítico	$FI > FG$

Al régimen crítico corresponde un valor de pendiente (Sc) y de tirante (yc). Este régimen es inestable, por lo que es poco probable que ocurra en un tramo de canal, lo que es probable es que exista una sección donde el tirante alcance el valor yc . A esta sección se le conoce como sección de control, en ella existe una relación conocida entre el caudal y el tirante [7].

En el régimen subcrítico predominan las fuerzas gravitacionales, la pendiente es inferior a la pendiente crítica y se asocia a velocidades bajas y tirantes elevados. En el régimen supercrítico hay predominio de las fuerzas inerciales, la pendiente es superior a la crítica y se caracteriza por velocidades altas y bajas profundidades.

La sección de control constituye la frontera entre los regímenes subcrítico y supercrítico.

En las alcantarillas, cuando se produce el RPGV, la sección de control puede encontrarse en las proximidades de la entrada o cercana a la salida, por lo que su ubicación define el tipo de control.

En el flujo con control a la entrada, el conducto de la alcantarilla trabaja en régimen supercrítico y el canal de entrada en régimen subcrítico. La capacidad de descarga es determinada por las características de la entrada, en este caso el conducto tiene mayor capacidad de evacuación que la entrada.

Si el control es a la salida entonces el conducto trabaja en régimen subcrítico y el canal de salida en régimen supercrítico. En la capacidad de descarga influyen las características de la entrada, las del conducto y las del canal de salida.

La definición del tipo de flujo permite reconocer la forma de trabajo de la alcantarilla para un caudal determinado y poder seleccionar el procedimiento de cálculo a emplear. En ocasiones el control del flujo cambia al variar el caudal pasando de control a la entrada a control a la salida o viceversa, por ello se realizan los cálculos para ambas variantes seleccionando la que produzca la mayor elevación del agua a la entrada de la alcantarilla (HW), que sería la condición más adversa [5].

Aplicación informática HY-8

Para la determinación del comportamiento hidráulico de las alcantarillas se empleó el programa HY-8 versión 7.7, desarrollado por el Departamento de Transporte de la Administración Federal de Carreteras de Estados Unidos (Federal Highway Administration), FHWA por sus siglas en inglés. Se apoya en la publicación de Diseño Hidráulico de Alcantarillas para Autopistas, tercera edición en el cual se describen todos los métodos empleados en el programa. La información que aporta HY-8 incluye el tipo de flujo, según la definición del servicio Geológico de los Estados Unidos (U.S. Geological Survey), USGS por sus siglas en inglés.

El software utiliza un sistema de codificación que incluye, en este orden: el tipo de flujo identificado con un número del 1 al 7, el perfil del flujo o curva de superficie descrito por una letra mayúscula seguida de un número del 1 al 3 y un indicador de la profundidad del agua a la salida de la obra de fábrica, representado por una letra minúscula. Este código de forma resumida indica cómo se calculan los parámetros hidráulicos de la alcantarilla para cada caudal analizado [8].

A continuación, se expone el significado de cada uno de estos elementos.

Tipo de flujo

En función del tipo de control y de la sumergencia de la entrada y la salida, se consideran 7 tipos de flujo.

La Figura 8 muestra los flujos con control a la entrada, estos son dos: el flujo tipo 1 con entrada no sumergida y el tipo 5 con entrada sumergida. En estos casos aguas arriba de la sección de control el régimen es subcrítico y en el conducto el régimen es supercrítico. En ambos casos puede producirse el salto hidráulico que origina otro cambio de régimen de supercrítico a subcrítico

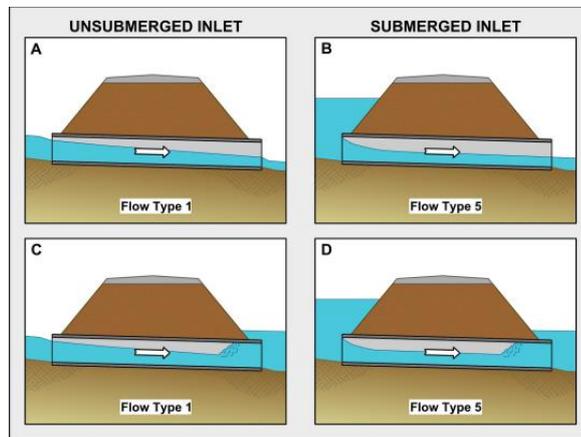


Figura 8: Flujos con control a la entrada. Tomado de [8].

La Figura 9 muestra los flujos con control a la salida, los flujos tipo 2 y 3 con entrada no sumergida y los flujos tipo 4, 6 y 7 con entrada sumergida. En estos casos el conducto trabaja en régimen subcrítico y el canal de salida en régimen supercrítico.

En particular en el flujo tipo 4, la entrada y la salida están sumergidas y el conducto trabaja a sección llena en toda su longitud.

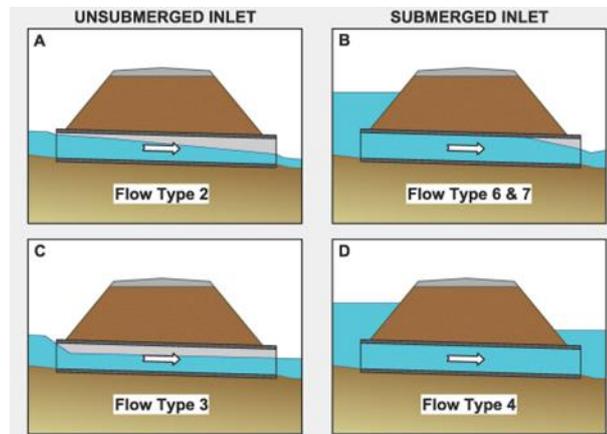


Figura 9: Flujos con control a la salida. Tomado de [8].

Perfil del flujo.

Conocida la ubicación de la sección de control se puede definir cuál es el perfil del flujo presente en el caso que se analiza. Cada perfil de flujo se identifica por una letra y un número. La letra definirá el tipo de pendiente del fondo del canal donde se está produciendo el régimen permanente gradualmente variado (RPGV) y aparece con su denominación en idioma inglés, por lo que a las pendientes suaves se las identifica con la letra M de mild (suave) y a las pendientes fuertes con la letra S de steep (empinado) [9].

- M Pendiente del canal inferior a la pendiente crítica. Flujo subcrítico
- S Pendiente del canal superior a la pendiente crítica. Flujo supercrítico
- C Pendiente del canal igual a la pendiente crítica. Flujo inestable.
- A Pendiente positiva en la dirección del flujo.
- H Canal horizontal

Si el conducto trabaja lleno en toda su longitud aparece, junto al número que indica el tipo de perfil, las siglas FF del inglés "full flow", esto sucede en los flujos tipo 4 y 6. Si se produce un salto hidráulico aparece junto a la letra que identifica la pendiente del perfil una J de "jump", esto sucede en los perfiles 1 y 5 [7].

El número que acompañará a una de estas letras, de la M a la H, estará definido por la posición relativa de las profundidades del régimen variado (y) respecto a las profundidades normal (y_n) y crítica (y_c) correspondientes a ese canal, para el caudal que se analiza. Esto hace que verticalmente se distingan 3 zonas las que se describen en la Tabla 2 [7].

Tabla 2: Zonas y tipo de flujo en función de la relación entre los tirantes normal, crítico y del RPGV

Zona			
1	El tirante del régimen variado(y) es superior al tirante crítico(y_c) y mayor al tirante normal(y_n).	$y > y_c$ $y > y_n$	Flujo subcrítico
2	El tirante del régimen variado(y) está comprendido entre el tirante crítico(y_c) y el tirante normal(y_n).	$y_c < y < y_n$	Flujo subcrítico
		$y_n < y < y_c$	Flujo supercrítico
3	El tirante del régimen variado es menor que el tirante crítico y menor que el tirante normal.	$y < y_c$ $y < y_n$	Flujo supercrítico

La ubicación espacial de las curvas superficiales se puede comprender analizando el esquema que aparece en la Figura 9. En este caso la curva S corresponde a la M y la curva F a la S, esto es debido a que se nombran por las iniciales de suave y fuerte en español.

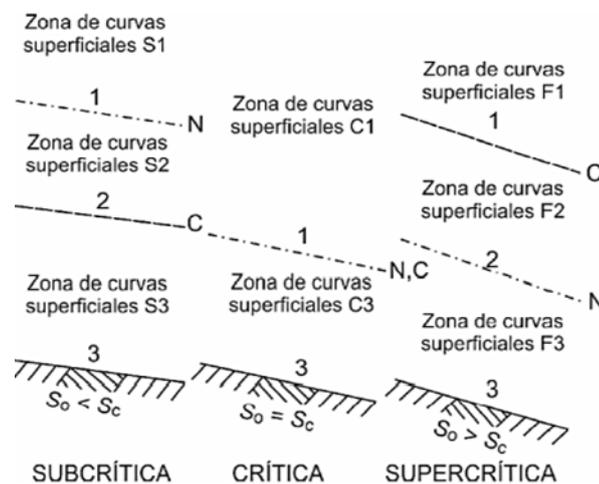


Figura 9. Nomenclatura y distribución espacial de las curvas de superficie. Tomado de [7].

Para describir la profundidad del agua a la salida de la alcantarilla (TW) se emplean cuatro indicadores, representados con letras minúsculas. Estos son: n, c, f y t, para señalar que el tirante a la salida es normal, crítico, a sección llena o un valor superior al tirante crítico.

2. 4. Resultados

Los resultados se muestran en forma de tablas y gráficos, donde aparecen los parámetros que caracterizan el comportamiento hidráulico de las alcantarillas para cada valor de caudal analizado.

Se realizó el análisis para períodos de retorno de 50 y 100 años y se comprobó para 200 años.

Análisis realizado para período de retorno de 50 años.

Primer subtramo

Los resultados obtenidos para las tres obras de fábrica analizadas aparecen en la Tabla 2. Estos indican que el caudal que pasa a través de la alcantarilla (Q_H) es inferior al caudal de diseño para una probabilidad del 2 % ($Q_{2\%}$).

La elevación del agua a la entrada de la alcantarilla (HW), supera el nivel de aguas máximas admisible (NAM) y a la rasante de la vía, ocurriendo el desbordamiento para caudales inferiores a los de diseño. La altura del agua por encima de la rasante alcanza los valores mostrados en la columna Desbordamiento de la Tabla 3.

La velocidad del flujo dentro del conducto se encuentra dentro del rango admisible para el hormigón en los tres casos. La velocidad a la salida de la alcantarilla número 1 alcanza un valor de 2,13 m/s superior a 1,8 m/s que es el valor máximo admisible para el suelo existente, en el resto la velocidad se encuentra en el rango admisible.

Las tres obras de fábrica presentan tipo de flujo 4-FFf por lo que trabajan con control a la salida, la altura del agua tanto a la entrada (HW), como a la salida de la alcantarilla (TW) supera al diámetro de la tubería (D), lo que implica entrada y salida sumergidas y el conducto trabaja a sección llena en toda su longitud, como se ilustra en la Figura 10.

Tabla 3: Resultados del primer subtramo

O.F.	Caudal evaluado $Q_{2\%}$	Capacidad descarga Q_H	V salida alcantarilla	V canal de salida	NAM	Altura del agua a la entrada (HW)	Profundidad en el canal de salida (TW)	Desbordamiento	Tipo de Flujo
	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m/s)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	
1	13,10	0,14	0,87	2,13	13,80	14,69	1,56	0,89	4-FFf
2	10,63	0,21	1,27	2,02	15,70	16,62	1,43	0,92	4-FFf
3	7,98	0,18	1,08	1,88	17,65	18,21	1,27	0,56	4-FFf

Estos resultados son coherentes con lo observado en el lugar donde con frecuencia ocurren inundaciones y el agua fluye sobre la vía férrea provocando severos daños a la infraestructura y a la superestructura.

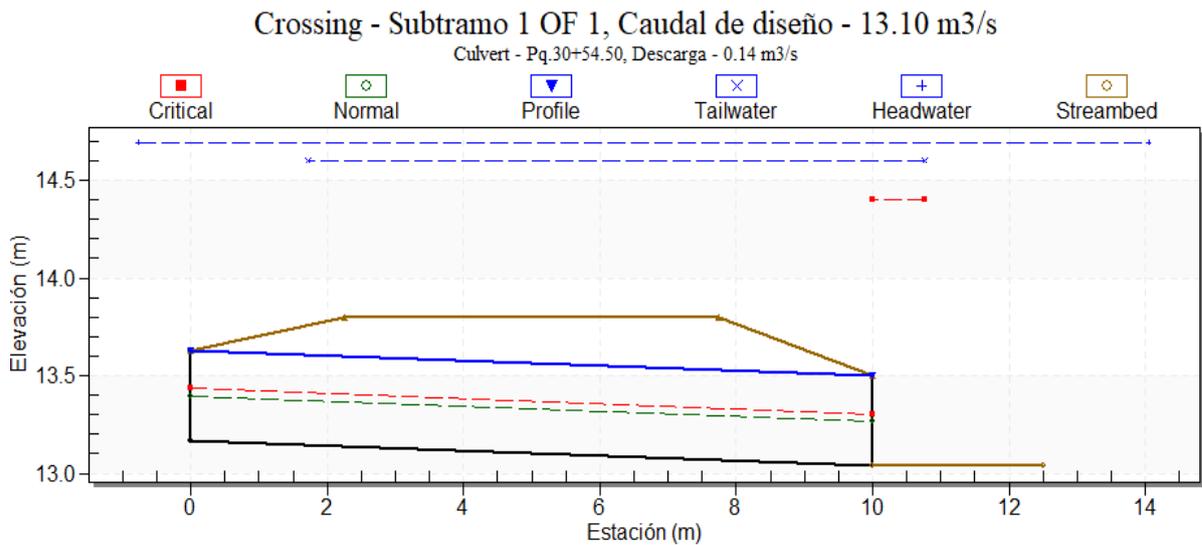


Figura 10: Vista longitudinal de la O.F. 1 trabajando con flujo tipo 4-FFf para $Q_{2\%}$

Segundo subtramo.

La Tabla 4 resume los resultados del segundo subtramo para $Q_{2\%}$. Estos muestran que, de las 4 alcantarillas en análisis, la 6 presenta el peor desempeño.

En las obras de fábrica número 4, 5 y 7 el caudal hidráulico supera al caudal de diseño. La velocidad en el conducto y en el canal de salida se encuentra en el rango admisible. La altura del agua a la entrada de la alcantarilla para el caudal de diseño no supera la cota admisible para la protección del terraplén (NAM), por lo que cumplen las tres condiciones. Ver Tabla 4

En los tres casos el flujo clasifica como 1-S2n y el control es a la entrada. La altura del agua a la entrada y a la salida de la alcantarilla es inferior a la altura del conducto por lo que trabajan como un canal. La curva superficial corresponde a una pendiente del fondo superior a la pendiente crítica, el tirante en el conducto es inferior al tirante crítico y superior al tirante normal, a la salida de la alcantarilla alcanza el valor normal. La Figura 11 muestra la salida gráfica para la O.F. 5 trabajando en estas condiciones.

Tabla 4: Resultados del segundo subtramo

O.F.	Caudal evaluado $Q_{2\%}$	Capacidad descarga Q_H	V salida alcantarilla	V canal de salida	NAM	Altura del agua a la entrada	Profundidad en el canal de salida	Desbordamiento	Tipo de Flujo
	(m^3/s)	(m^3/s)	(m/s)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	
4	2,88	2,88	3,19	1,4	22,4	17,54	16,83	0	1-S2n
5	0,9	0,9	2,36	1,04	26,26	26,15	25,69	0	1-S2n
6	6,73	1,92	2,74	2,36	28,62	29,54	28,68	0,42	4-FFf
7	3,3	3,3	3,14	1,29	38,55	34,73	33,92	0	1-S2n

La obra de fábrica 6 debe evacuar un caudal de 6,73 m^3/s , el máximo caudal que puede evacuar la alcantarilla sin que se sobrepase la subrasante de la vía es de 1,46 m^3/s . La velocidad del flujo a la salida (2,36 m/s) es superior a la admisible (1,8 m/s) y la elevación del agua a la entrada de la alcantarilla (29,54 m) supera la cota admisible para la protección del terraplén (28,62 m), por lo que no cumple ninguna de las tres condiciones.

El flujo es tipo 4-FFf por lo que coincide con las obras de fábrica 1, 2 y 3. (Figura 10).

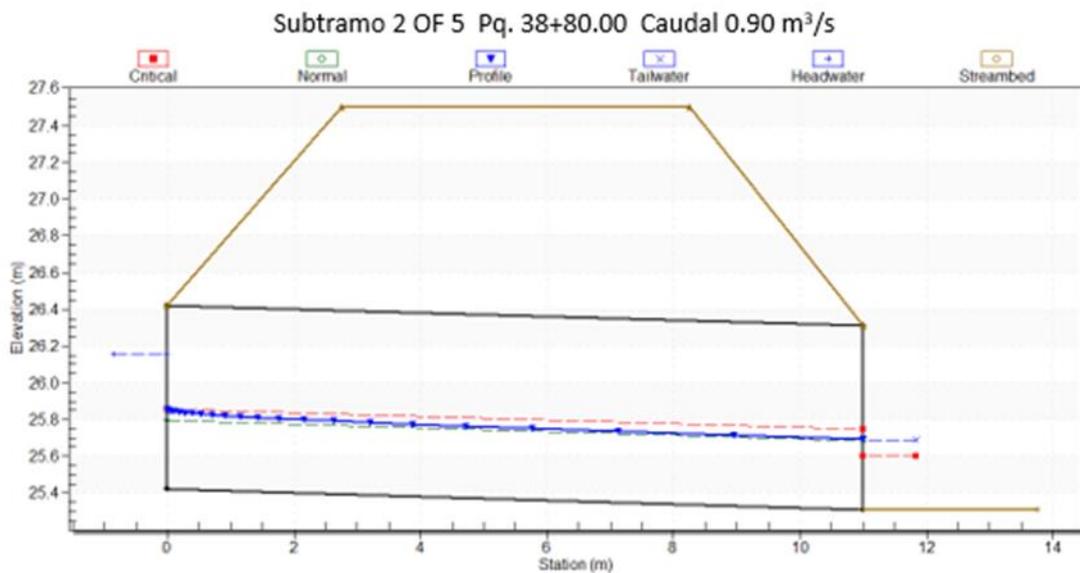


Figura 11: Vista lateral de la O.F.5 trabajando con flujo tipo 1-S2n, para $Q_{2\%}$

Tercer subtramo.

En este subtramo existen dos obras de fábrica transversales, cuyos resultados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Resultados del tercer subtramo

O.F.	Caudal evaluado $Q_{2\%}$	Capacidad d descarga Q_H	V salida alcantarilla	V canal de salida	NAM	Altura del agua a la entrada	Profundidad en el canal de salida	Desbordamiento	Tipo de Flujo
	(m^3/s)	(m^3/s)	(m/s)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	
8	14,17	8,75	5,57	3,99	44,5	45,35	0,58	1,62	5-S2n
9	5,81	1,51	3,16	2,54	43,23	44,11	0,67	0	5-JS1f

En ambos casos la capacidad de evacuación de la alcantarilla es inferior al caudal de diseño. La velocidad en el canal de salida es superior a la admisible (1,8 m/s) y la altura del agua a la entrada de la alcantarilla, supera la cota establecida para la protección del terraplén, por lo que no cumplen ninguna de las tres condiciones. Las dos presentan tipo de flujo 5 con control a la entrada.

La alcantarilla 9 presenta tipo de flujo 5-JS1f, por lo que el control es a la entrada, el tirante aguas arriba y aguas abajo supera la altura del conducto, produciéndose un salto hidráulico en su interior, en este caso se presentan los dos tipos de RPV.

Próximo a la entrada el régimen es PGV, el perfil del flujo es S1, aguas arriba de la sección de control el régimen es subcrítico y aguas abajo en el conducto el régimen es supercrítico. En el interior del conducto se produce un nuevo cambio de régimen, pasando el flujo a PRV, se produce un salto hidráulico, habrá otra sección de control, cambiando el flujo de supercrítico aguas arriba a subcrítico aguas abajo. La Figura 12 muestra la salida gráfica de esta alcantarilla.

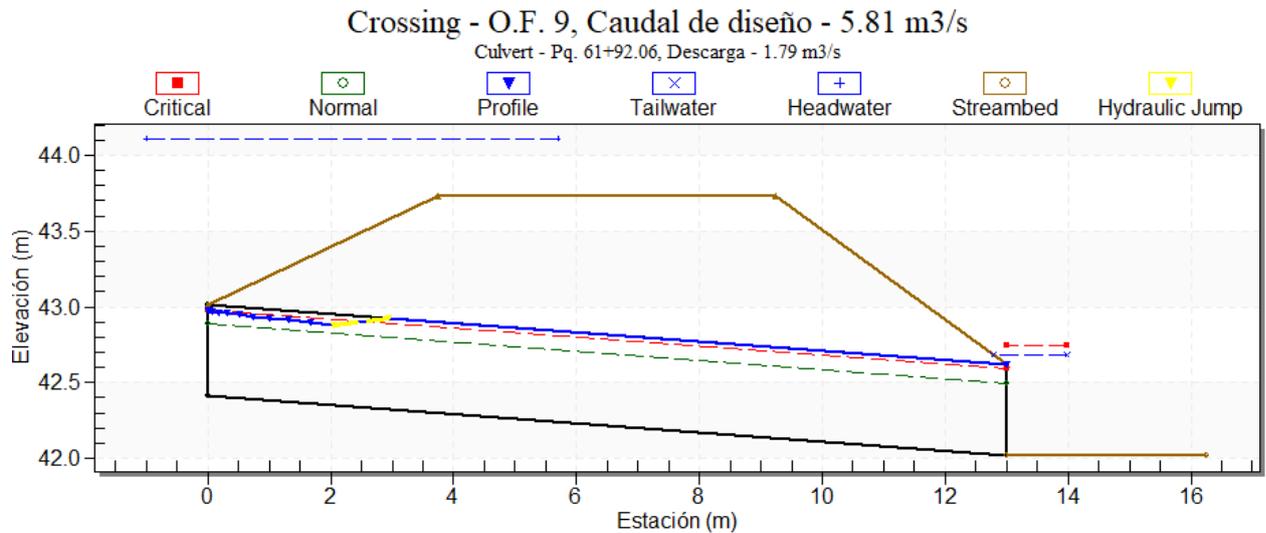


Figura 12: Vista lateral de la O.F.9 trabajando con flujo tipo 5-JS1f, para $Q_{2\%}$

La evaluación realizada a las alcantarillas partiendo del caudal de diseño correspondiente a un período de retorno de 50 años, demostró que sólo 3 obras de fábrica (4, 5 y 7) pueden evacuar el gasto de diseño sin sufrir daños ni afectar al terraplén, por lo que no se cumple con lo normado para las vías categoría II.

Corresponde verificar el comportamiento hidráulico de estas tres obras de fábrica para el caudal de diseño correspondiente a las vías de categoría I, o sea, para 1% de probabilidad. Los resultados obtenidos aparecen en la Tabla 6.

En los tres casos la capacidad de descarga supera al caudal esperado para la probabilidad del 1%, las velocidades en la alcantarilla y en el canal están en el rango admisible y la superficie del agua a la entrada de la obra de fábrica no supera la altura permisible, trabajan con flujo tipo 1 y control a la entrada.

Comprobando para probabilidad de 0.5 % se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 7.

Tabla 6: Resultados para probabilidad de 1 %

O.F.	Caudal evaluado	Capacidad ad descarga Q_H	V salida alcantarilla	V canal de salida	NAM	Altura del agua a la entrada	Profundidad en el canal de salida	Desbordamiento	Tipo de Flujo
	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m/s)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	
4	3,39	52,51	3,33	1,49	22,4	17,62	0,30	0	1-S2n
5	1,06	2,08	2,46	1,09	26,90	26,24	0,42	0	1-S2n
7	3,88	23,66	3,29	1,36	38,55	34,85	0,48	0	1-S2n

Tabla 7: Resultados para probabilidad de 0.5 %

O.F.	Caudal evaluado	Capacidad ad descarga Q_H	V salida alcantarilla	V canal de salida	NAM	Altura del agua a la entrada	Profundidad en el canal de salida	Desbordamiento	Tipo de Flujo
	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m/s)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	
4	3.93	3.93	3.46	1.57	22,40	17.70	0.38	0	1-S2n
5	1.23	1.23	2.56	1.14	26,90	26.32	0.45	0	1-S2n
7	4.50	4.50	3.42	1.43	38,55	34.97	0.52	0	1-S2n

La capacidad de descarga de las tres alcantarillas supera el caudal hidrológico para 0.5 % de probabilidad, pero en particular la 4 y la 7 presentan un desempeño muy superior al requerido, por lo que debe evaluarse la existencia de flujo base y profundizar en su estudio.

Para ilustrar lo anterior se utilizaron las curvas de desempeño hidráulico de estas alcantarillas, la Figura 13 muestra el análisis realizado a la obra de fábrica 4, en ella aparecen señaladas la subrasante de la vía, el nivel de aguas máximas (NAM), la altura de la cara interior superior del conducto y de la invertida de la alcantarilla. En rojo se representó la altura del agua en el conducto cuando esta alcanza 0,8 veces la altura del conducto (D), valor aceptado como ideal para el aprovechamiento de la capacidad de evacuación de la alcantarilla trabajando sin presión.

El agua alcanza la altura de 0,8D a la entrada de la alcantarilla para un caudal aproximado de 15 m³/s, superior al caudal para 1% de probabilidad de 3,39 m³/s y 3.93 m³/s que es el caudal para 0.5 % de probabilidad.

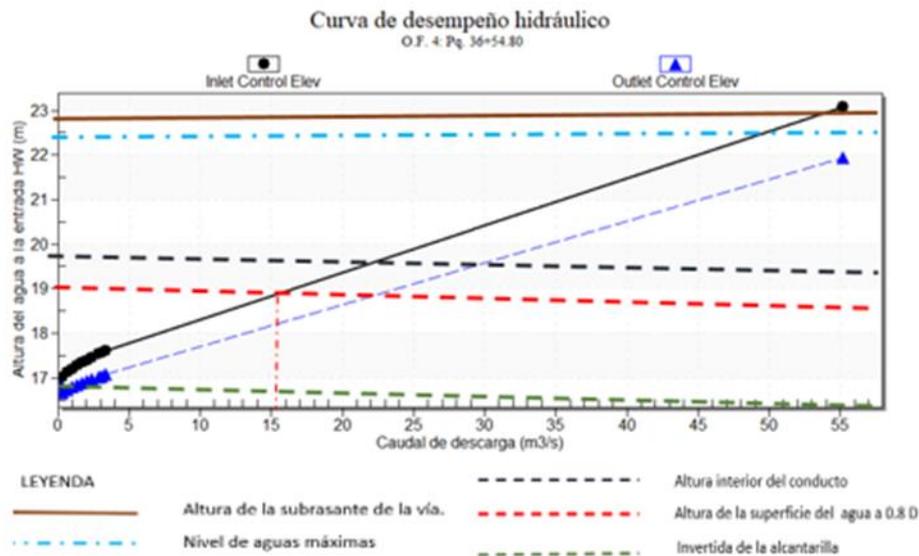


Figura 13: Representación de las alturas notables en la curva de desempeño hidráulico de la O.F.4

2. CONCLUSIONES

Los resultados revelan que sólo tres obras de fábrica de las 9 analizadas son capaces de evacuar los caudales de diseño, para períodos de retorno de 50 y 100 años, establecidos por la norma cubana para vías de categoría II y I, respectivamente.

El primer subtramo analizado, ubicado en una zona urbana densamente poblada, es impactado por la ineficacia de la red de drenaje urbano. La rehabilitación del drenaje longitudinal de la vía férrea, requiere integrar el análisis de ambos sistemas, para generar la solución más racional a un problema que afecta al ferrocarril y a la comunidad.

En el segundo y tercer subtramo se recomienda, a partir de los resultados obtenidos, evaluar las acciones necesarias para elevar la capacidad de descarga de las obras existentes cuando sea posible y de no serlo rediseñarlas.

Determinar el comportamiento hidráulico de los sistemas de drenaje es un proceso complejo, en el que intervienen múltiples variables, su correcta evaluación en las vías en explotación permitiría ahorrar recursos en la rehabilitación de la red ferroviaria.

La aplicación HY-8 concebida para el diseño de alcantarillas en carreteras permite un acercamiento a la solución de este problema, siempre que se tengan en cuenta las características propias de las obras ferroviarias, contribuyendo a optimizar la respuesta a los problemas existentes.

1. NC- 249, "Transporte ferroviario. Vías férreas. Clasificación de vías férreas Anexo 1". Oficina Nacional de Normalización, La Habana. Cuba. 2003
2. [NC 48-31:1984 Probabilidad de diseño y comprobación para protección contra inundaciones de avenidas de las obras. Oficina Nacional de Normalización, La Habana. Cuba. 2003
3. Colectivo de autores. " Proyecto Técnico Ejecutivo: Reparación Capital de la Línea Guanajay, Subtramo de Doble vía, Km.2.1 –Km.3.6, Nudo Habana". Empresa de Proyectos de Obras de Transporte. La Habana. Cuba. 2009
4. González Fernández, Hilda y Suárez Reytor, Alfonso Enrique. Hidráulica para ingenieros civiles. Edit. Félix Varela, La Habana. 2012
5. Carciente, Jacob. Carreteras, estudio y proyecto. Ediciones Vega s.r.l pp.321-474 Disponible en: <https://udocz.com>
6. Flores Alfonso, Mario. Curso de diseño de vías férreas. Empresa de Proyectos de Obras de Transporte La Habana. Cuba. 2018
7. León Méndez, Alcides J.F. y Martínez González, Yoel. Hidráulica de las conducciones libres. Editorial Félix Varela, La Habana. 2013
8. D. Schall, James; Thompson, Philip L; M. Zerges, et al., " Hydraulic design of highway culverts Third Edition", Report No. FHWA-HIF-12-026 HDS 5, 2012
9. Rocha Felices, Arturo. Hidráulica de tuberías y canales Disponible en: <https://www.academia.edu>

