



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO: INGENIERÍA AMBIENTAL



**PROPUESTA DE OBRAS PARA MITIGAR EL IMPACTO HIDRÁULICO
EN EL RÍO RETOBO DEBIDO AL PASO DEL FERROCARRIL
EZEQUIEL ZAMORA**

Autores:

Colina, Osmar

Luzardo, Jesús

Bárbula, Junio de 2011.



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO: INGENIERÍA AMBIENTAL



**PROPUESTA DE OBRAS PARA MITIGAR EL IMPACTO HIDRÁULICO
EN EL RÍO RETOBO DEBIDO AL PASO DEL FERROCARRIL
EZEQUIEL ZAMORA**

Trabajo Especial de Grado presentado ante la ilustre Universidad de
Carabobo para optar al título de Ingeniero Civil.

Autores:

Osmar Colina

Jesús Luzardo

Tutor:

Alexander Cabrera

Bárbula, Junio de 2011.



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
TRABAJO ESPECIAL DE GRADO
DEPARTAMENTO: INGENIERÍA AMBIENTAL



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado designado para estudiar el Trabajo Especial de Grado titulado: **PROPUESTA DE OBRAS PARA MITIGAR EL IMPACTO HIDRÁULICO EN EL RÍO RETOBO DEBIDO AL PASO DEL FERROCARRIL EZEQUIEL ZAMORA**; realizado por los bachilleres: Colina Osmar y Luzardo Jesús, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

Presidente del Jurado
Alexander Cabrera.

Miembro del Jurado
Norma Licon

Miembro del Jurado
Daniel Carrión

DEDICATORIA

A nuestro Señor, quien nos dio la fe, la fortaleza, la salud y la esperanza para terminar este trabajo.

A nuestros padres, quienes nos brindaron amor, cariño, estímulo y apoyo constante en el transcurso de la carrera y especialmente en la elaboración de este trabajo. Son evidencia de perseverancia y esfuerzo, nos enseñaron a luchar para alcanzar nuestras metas.

A nuestros hermanos y a los que nunca dudaron que lograríamos este triunfo: abuelos, tíos, padrinos, primos, compañeros de estudio y amigos por estar presentes en cada una de las fases de la elaboración de nuestro trabajo especial de grado.

AGRADECIMIENTOS

A nuestro tutor, el ingeniero Alexander Cabrera quien desde el principio nos brindó las recomendaciones atinadas. Gracias, por su tiempo, apoyo y valiosa colaboración para que pudiésemos terminar este estudio.

A las ingenieras Mariela Aular y Norma Licon, por su liderazgo y dinamismo, por su constante apoyo profesional y emocional que siempre nos brindaron. Laborar con este magnífico equipo de trabajo constituyó un honor para nosotros. Fue una verdadera satisfacción contar con la ayuda de tan excelentes profesionales.

Agradecemos la colaboración y el apoyo recibido del ingeniero Gian Franco Morassutti por la valiosa información suministrada para la elaboración de esta investigación.

Especial reconocimiento a mis compañeros de la Universidad de Carabobo, quienes nos apoyaron en todo momento.

Finalmente, y no menos importante, agradecemos a Dios y a nuestros padres, por todos los sacrificios, el apoyo, el estímulo y la paciencia que tuvieron durante el desarrollo de nuestra etapa estudiantil. Sin ustedes no hubiésemos podido lograrlo.

INDICE

INDICE DE FIGURAS.....	VIII
INDICE DE TABLAS	X
RESUMEN.....	XI
INTRODUCCIÓN	12
CAPITULO I.....	16
EL PROBLEMA.....	16
Planteamiento y Formulación.....	16
Formulación del Problema	19
Objetivos de la Investigación	19
Objetivo General	19
Objetivos Específicos.....	19
Justificación	20
Delimitación	22
CAPITULO II.....	24
MARCO TEORICO	24
Antecedentes de la Investigación	24
Bases Teóricas	26
Características de una cuenca hidrográfica	27
Clasificación de las protecciones	42
Características del río que influyen en la selección de una protección	44
Obras para la prevención de los fenómenos de remoción en masa	50
Obras para el control de la erosión	55
Obras para la prevención y control de las inundaciones.....	60
Obras para el control de las avenidas torrenciales	63
CAPITULO III.....	65
MARCO METODOLÓGICO	65
Tipo de Investigación	65
Diseño de la Investigación	65

Descripción de la Metodología.....	67
Fase I. Diagnóstico	67
Fase II. Análisis.....	67
Fase III. Propuesta.....	69
Población	69
Muestra	70
Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	71
CAPITULO IV.....	73
PROPUESTA.....	73
Contexto general del área en estudio	73
Diagnóstico	73
Características hidrológicas de la cuenca.....	73
Características geomorfológicas de la cuenca.....	75
Análisis.....	86
Factores Geomorfológicos.....	90
Factores Hidráulicos e Hidrológicos.....	90
PROPUESTA.....	98
CONCLUSIONES	105
RECOMENDACIONES.....	108
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109
ANEXO A-1	112
ANEXO A-2.....	113
ANEXO A-3.....	114
ANEXO A-4.....	115
ANEXO A-5.....	116
ANEXO A-6.....	117
ANEXO A-7.....	118
ANEXO A-8.....	119

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Delimitación del área en estudio. Cuenca del río Retobo..	22
Figura 2. Tramo en estudio del río Retobo.....	70
Figura 3. Ubicación de la perforación exploratoria P-7..	77
Figura 4. Ensayo de laboratorio efectuado sobre la muestra de suelo recuperada de la perforación N 7.....	78
Figura 5. Vista aguas arriba del cajón hidráulico existente.	80
Figura 6. Vista aguas abajo del cajón hidráulico existente.	80
Figura 7. Vista de la planicie de la inundación sobre la margen Este del río aguas arriba del cajón hidráulico existente.	81
Figura 8. Vista aguas abajo del cajón hidráulico existente.....	81
Figura 9. Vista hacia aguas abajo del río.....	82
Figura 10. Vista del río al ingresar al cajón hidráulico.....	82
Figura 11. Vista aguas abajo del cajón hidráulico existente.....	83
Figura 12. Vista aguas abajo del cajón hidráulico existente.....	83
Figura 13. Vista aguas arriba del cajón hidráulico existente.	84
Figura 14. Vista aguas arriba del cajón hidráulico existente.	84
Figura 15. Ubicación de Figuras.	85
Figura 16. Cajón triple celda propuesto en el río Retobo para dar paso a la línea férrea.....	87
Figura 17. Resultados arrojados por HEC-RAS, Secciones 106 . 70.	93
Figura 18. Resultados arrojados por HEC-RAS, Secciones 69 . 33.	94
Figura 19. Resultados arrojados por HEC-RAS, Secciones 36 - 1	95
Figura 20. Geometría del cauce cargada en HEC-RAS.....	96
Figura 21. Planicie de inundación arrojada por HEC-RAS.....	96
Figura 22. Perfil tridimensional arrojado por HEC-RAS.	97
Figura 23. Perfil Longitudinal arrojado por HEC-RAS.	97
Figura 24. Ubicación en planta del muro de gaviones.	99
Figura 25. Detalle del muro de gaviones.....	100

Figura 26. Sección transversal típica de los gaviones y relación de entramado.....	101
Figura 27. Ubicación en planta de las protecciones antes mencionadas...	101
Figura 28. Planicie de inundación del río Retobo donde se prevé la construcción del patio de mantenimiento de la línea férrea.. ..	102
Figura 29. Ubicación en planta del muro de contención y la propuesta de rectificación.. ..	103
Figura 30. Propuesta de Obras.....	105

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Algunas causas y efectos de la erosión.....	36
Tabla 2. Métodos de conformación topográfica del talud.....	51
Tabla 3. Operacionalización de variables.	72
Tabla 4. Períodos de retorno en drenaje vial.	75



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
TRABAJO ESPECIAL DE GRADO
DEPARTAMENTO: INGENIERÍA AMBIENTAL



PROPUESTA DE OBRAS PARA MITIGAR EL IMPACTO HIDRÁULICO EN EL RÍO RETOBO DEBIDO AL PASO DEL FERROCARRIL EZEQUIEL ZAMORA

Autores: Osmar Colina
Jesús Luzardo
Tutor: Alexander Cabrera
Fecha: Junio 2011

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación, consiste en proponer obras para mitigar el impacto hidráulico en el río Retobo debido al paso del Ferrocarril Ezequiel Zamora, donde se plantea la ubicación de un cajón triple celda que provoca la contracción del flujo al pasar bajo este, produciendo alteraciones en el comportamiento natural del cauce que podrían ocasionar deterioros estructurales, fallas en las márgenes del río, entre otros daños. El estudio corresponde a un planteamiento de ingeniería básica, donde se definen los aspectos esenciales de las obras, no se estudiará el impacto ambiental y socio-cultural generado en la zona por el paso del ferrocarril. Este trabajo se enmarca dentro de una investigación descriptiva, y el diseño que sustenta esta propuesta parte de un estudio de campo fundamentado en una investigación documental bajo la modalidad de un proyecto factible. La población está constituida por la cuenca del río Retobo y la muestra a evaluar corresponde a un tramo del mismo, delimitado aproximadamente por 500 m tanto aguas arriba como aguas abajo a partir del cajón que da paso a la Autopista Valencia Puerto Cabello. En cuanto a las técnicas para obtener la información, se procedió a efectuar el análisis de contenido documental y la técnica de la observación. Las obras propuestas corresponden a la protección del fondo y laderas del cauce con concreto que contribuyen a la estabilidad de las márgenes y evitan la socavación en la base del cajón, se plantean también muros de concreto y muros de gaviones con la cara recubierta a fin de minimizar las pérdidas de finos. Finalmente, se proponen técnicas de revegetalización, las cuales además de solventar problemas de erosión e inestabilidad en taludes, representan un impacto positivo para el medio ambiente.

Descriptor: Mitigación, Impacto Hidráulico, Cajón Triple Celda.

INTRODUCCIÓN

La evolución de las vías de comunicación terrestres ha llevado a la construcción de diversas estructuras hidráulicas para solventar problemas de drenaje en: carreteras, calles, avenidas, líneas férreas y aeropuertos entre otros. Estas obras tienen por objeto manejar el agua y evitar daños que estas puedan causar. Su estudio mantiene una estrecha relación con la geología, topografía, hidrología e hidráulica presentes en el lugar, por lo cual es muy importante conocer las características de los suelos, en lo referente a erosión, permeabilidad, y cobertura vegetal.

Al construir una vía, se modifica la topografía original y en consecuencia se altera o interfiere con el drenaje natural, modificando o condicionando el ciclo hidrológico, por lo tanto, desde el momento en que se define el trazado de una vía, debe determinarse la ubicación de puentes y alcantarillas para su estudio, debido a que su colocación promueve cambios y modificaciones en el escurrimiento y comportamiento natural de los cauces.

Por tal motivo, en la medida en que se ejecuten los tramos de vía y sea necesaria la colocación de una estructura hidráulica, se deberá tener el control de los escurrimientos con el fin de prevenir posibles inundaciones que impidan el paso regular del cauce, ocasionando daños a las poblaciones aledañas.

Un sistema de drenaje vial facilita el paso del agua y evita su retención tanto en el cuerpo de la vía como en terrenos aledaños, por lo que debe ser estrictamente planificado en beneficio de los usuarios y de la colectividad en general. En todo momento debe procurarse el mejoramiento del medio ambiente, mediante la protección de cauces y conservación de cuencas, entre otras medidas.

Una de las causas más comunes que origina la falla de las estructuras hidráulicas es la ocurrencia de crecientes que producen socavación excesiva alrededor de pilas y estribos, debido a que provoca un aumento en la intensidad del flujo lo suficientemente fuerte para remover el material del lecho ocasionado por la obstrucción producida por los elementos estructurales.

Actualmente, en Venezuela se está desarrollando el Plan Nacional Ferroviario, en el Tramo Puerto Cabello - La Encrucijada se están construyendo diferentes estructuras de relevancia, muchas de ellas paralelas a la Autopista Regional del Centro. Entre estas obras se tienen: viaductos, terraplenes, túneles, puentes, cajones hidráulicos, accesos viales, alcantarillas, entre otras.

En función de la implantación de esta línea férrea, el desarrollo de esta investigación consistió en la propuesta de obras que atenúen el impacto hidráulico en el río Retobo, motivado a la proposición de construcción de un cajón triple celda sobre el cauce de dicho río para dar paso al Ferrocarril Ezequiel Zamora. Las alternativas planteadas buscan el desarrollo de propuestas viables para evitar colapso posterior al paso de la línea del ferrocarril, por medio del diagnóstico de las condiciones hidráulicas actuales del río y de la evaluación del impacto generado por el cajón. El río Retobo pertenece a una de las principales corrientes fluviales de Naguanagua, acompañado de los ríos: Cabriales, Agua Caliente, y Guataparó.

Es importante destacar que el impacto de esta obra no solo afecta a la línea del ferrocarril, puesto que existe en las zonas adyacentes, desarrollos habitacionales, educativos y comercial, entre ellos se encuentra la Urb. Mangos Paradise, la facultad de ingeniería de la Universidad de Carabobo, la Autopista Regional del Centro y además se proyecta la construcción en

ese mismo punto de la estación del ferrocarril, razones que despertaron el interés de los autores en llevar a cabo este estudio con el cual se busca aportar alternativas de solución al desarrollo de la línea ferrocarril y medidas de prevención y control para el escurrimiento de las aguas.

En cuanto a los aspectos metodológicos, el presente trabajo se enmarca dentro de una investigación descriptiva, el diseño es de campo fundamentado en una investigación documental, basado en un proyecto factible. La población está constituida por la cuenca del río Retobo y la muestra a evaluar corresponde a un tramo del río delimitado aproximadamente por 500 m tanto aguas arriba como aguas abajo, a partir del cajón existente que da paso a la Autopista Valencia . Puerto Cabello. Como técnicas para obtener la información, se procedió a efectuar el análisis de contenido documental y la observación, para este estudio se plantea la necesidad de trabajar con un enfoque mixto, utilizando de manera complementaria lo cuantitativo con lo cualitativo.

La organización de la investigación se estructuró en cuatro capítulos desarrollados de la siguiente manera:

Capítulo I: Planteamiento del Problema. En el cual se muestra la manera en que la idea se desarrolla y se transforma en el planteamiento del problema de la investigación, destacando la importancia de este trabajo, y el por qué se hace necesario el estudio y la propuesta de obras de mitigación del impacto hidráulico en el río Retobo. Así mismo se definen los siguientes elementos: objetivos de investigación, formulación del problema, justificación, y delimitación.

Capítulo II: Marco Teórico. Tiene como propósito establecer un sistema coordinando y coherente de conceptos y proposiciones, que permitan

abordar el problema, en el cual se citan como antecedentes trabajos realizados por distintos autores tanto nacionales como internacionales, los cuales aportan datos importantes al desarrollo de esta investigación.

Capítulo III: Marco Metodológico. Recoge fundamentalmente los pasos a seguir desde que se inicia el estudio hasta su culminación, donde se exponen los criterios y métodos utilizados para la consecución de los objetivos de la investigación; especificando el tipo, diseño de la investigación y técnicas e instrumentos de recolección de datos.

Capítulo IV: Propuesta. La elaboración de la propuesta es el producto final del procesamiento de los datos y la información obtenida a través del diagnóstico y análisis de las necesidades del estudio, mediante la aplicación de programas, métodos o procesos que representen la solución a la problemática previamente planteada, de esta forma se desarrollan una serie de elementos que permiten establecer el diagnóstico de las condiciones hidráulicas actuales del río Retobo, el análisis del impacto hidráulico que genera el cajón triple celda propuesto para dar paso a la línea del ferrocarril y por último la propuesta de las obras de hidráulicas que permiten disminuir el impacto hidráulico sobre el río.

CAPITULO I

EL PROBLEMA

Planteamiento y Formulación

El hombre ha ido evolucionando a través de la historia desarrollando día a día nuevos conocimientos y tecnologías que le han permitido poder desplazarse de un lugar a otro, inventando cualquier medio posible que se lo permita, ya sea por tierra, mar o aire.

Las ansias de comunicarse y de expandir los mercados permitieron fortalecer la economía de la gran mayoría de los países del mundo, llevándose a cabo la creación de grandes obras de ingeniería como los ferrocarriles, medios de transporte capaces de trasladar grandes cargas y un buen número de personas de un lugar a otro. Según Roldan (2002), Su construcción se inició en Europa por el ingeniero inglés Richard Trevithick, quien el 24 de febrero de 1804 logró adaptar la máquina de vapor para que tirara de una locomotora, posteriormente se extendió al resto de los continentes.

Por tal motivo, fue necesaria la construcción de obras viales como carreteras y vías férreas, las cuales por medio de viaductos, puentes, o de cualquier otra estructura hidráulica, tienden a cruzar grandes depresiones o cuerpos de agua. En el caso de los ríos, se hace necesario conocer el

impacto hidráulico que genera la construcción de estas estructuras sobre los mismos, demandando un análisis de los factores que de una otra forma producirá modificación del drenaje natural de ríos y afluentes, y que pudiera ocasionar pérdida de capa vegetal, deslaves, hundimientos, deslizamientos, erosión y arrastre de sedimentos.

Los deslizamientos producen cambios en la morfología del terreno, diversos daños ambientales, deterioros en las obras de infraestructura, destrucción de viviendas, puentes, bloqueo de ríos, entre otros, sin embargo, un gran porcentaje de las pérdidas por deslizamientos son evitables si el problema se identifica con anterioridad y se implementan las medidas de prevención o control.

Camacho (2005) indica que se deben tener en cuenta los cambios rápidos e inesperados que pueden ocurrir en los ríos como respuesta a actividades desarrolladas por el hombre, variando el escurrimiento, la cantidad de sedimentos y la forma de los cauces. Es por ello que en todo proyecto donde se anticipe la construcción de una estructura hidráulica se deberán evaluar los efectos ocasionados en el comportamiento natural del cauce de los ríos.

El diseño, la ubicación y orientación de la estructura origina el confinamiento y estrechamiento de las aguas debajo de la misma, causando una sobre elevación del nivel superficial e inundación de las áreas ubicadas aguas arriba de la obras hidráulicas, a su vez se produce una disminución en el flujo que generalmente provoca socavación.

Actualmente, en Venezuela se está desarrollando el Plan Nacional Ferroviario, Franklin Pérez Colina, presidente del Instituto de Ferrocarriles del Estado en una entrevista realizada por YVKE mundial Radio el lunes 27 de

Julio de 2009, indicó que están planificadas unas quince líneas en total y se espera que esté terminado para el 2030 permitiendo movilizar a más de 210 millones de pasajeros al año, así como 190 millones de toneladas de cargas anuales.

En el Tramo Puerto Cabello - La Encrucijada que se encuentra actualmente en ejecución se observan diferentes estructuras de relevancia, entre ellas viaductos, terraplenes, túneles, accesos viales, alcantarillas, entre otras, apreciándose varias de éstas paralelas a la Autopista Regional del Centro. Estas obras interceptan inevitablemente vías existentes y cauces de ríos, y sin las medidas de control necesarias se verán afectadas por el escurrimiento del agua, pudiendo causar deterioros a la estructura tanto vial como hidráulica.

Una de esas intersecciones se presenta en el paso por el río Retobo, caso particular del Tramo Puerto Cabello - La Encrucijada, para el cual ya se tiene definido el alineamiento plano altimétrico del ferrocarril, y se pretende ubicar un cajón hidráulico de tres celdas que permitirá el paso de la línea férrea.

Es importante destacar que el impacto de esta obra no solo afecta a la línea del ferrocarril, puesto que existen en las zonas adyacentes desarrollos residenciales, comerciales y educativos, entre ellos: la facultad de ingeniería de la Universidad de Carabobo, la Autopista Regional del Centro y aunado a ello se proyecta la construcción de la estación del ferrocarril en donde terminan los andenes a pocos metros del cajón hidráulico, razones más que suficientes para adoptar medidas de prevención y control para el escurrimiento de las aguas.

En atención a lo expuesto anteriormente, la presente investigación tiene como objetivo la propuesta de obras para mitigar el impacto hidráulico en el río Retobo debido al paso del ferrocarril Ezequiel Zamora, ubicado en el sector Norte del Municipio Naguanagua con motivo del desarrollo del proyecto correspondiente al Plan Ferrocarrilero Nacional.

Formulación del Problema

¿Qué disminuirá los efectos generados por la construcción de una estructura hidráulica en el río Retobo debido al paso del Ferrocarril Ezequiel Zamora?, ¿Cómo conocer el comportamiento del río Retobo?, ¿Qué medidas permitirán disminuir el impacto hidráulico sobre el río Retobo?

Objetivos de la Investigación

Objetivo General

Proponer obras de mitigación del impacto hidráulico en el río Retobo debido al paso del Ferrocarril Ezequiel Zamora.

Objetivos Específicos

1. Diagnosticar las condiciones hidráulicas actuales del río Retobo.
2. Analizar el impacto hidráulico de un cajón triple celda propuesto en el río Retobo debido al diseño de la línea ferroviaria.
3. Proponer el diseño de obras para minimizar el impacto hidráulico sobre el río Retobo.

Justificación

El gobierno pretende llevar a cabo el Plan Nacional Ferroviario por medio del Instituto de Ferrocarriles del Estado (IFE), donde se tienen planificadas quince líneas en total, uno de esos tramos es el que une a Puerto Cabello con La Encrucijada, y a la fecha se encuentra en ejecución. En este Tramo se observan diferentes estructuras de relevancia, entre ellas el cajón hidráulico de tres celdas que se plantea construir en la intersección con el río Retobo.

Es importante destacar que estas obras interceptan inevitablemente vías existentes y cauces de ríos, y muchas de ellas sin las medidas de control necesarias que permitan controlar el comportamiento hidráulico de los mismos. La ubicación de la estructura hidráulica propuesta para permitir el paso sobre el río Retobo origina el confinamiento y estrechamiento de las aguas debajo del mismo, y podría causar una sobre elevación del nivel superficial e inundación de las áreas ubicadas aguas arriba de la obras hidráulicas, tales situaciones deben ser controladas.

Ante la necesidad de un obligado cruce con este curso de agua, se debe evitar en lo posible perturbar su comportamiento hidráulico, y de esta manera se logra impedir erosión, inundaciones, humedad o arrastre. El agua debe quedar siempre fuera de la estructura vial, esta evacuación, canalización, recolección, o solución de interferencia con el agua se hace mediante estructuras longitudinales o transversales al eje de la vía.

Por tal motivo, es necesario realizar un estudio donde se diagnostique la situación actual y futura del impacto hidráulico que puede generar la construcción de un cajón triple celda en el paso del río Retobo, para luego proponer el diseño de las obras hidráulicas que mitiguen el impacto

hidráulico en el río tanto aguas arriba como aguas abajo del cajón, garantizando la seguridad de la futura línea del ferrocarril, así como también evitando causar daños a las obras y desarrollos aledaños.

Esta investigación busca plantear alternativas que permitan reducir la ocurrencia de los problemas antes mencionados, por medio del diagnóstico de las condiciones hidráulicas actuales del río y del análisis del impacto generado por el cajón. De la misma forma, presenta un compendio de algunas metodologías de autores expertos en el área, permitiendo esto motivar a otros estudiantes a realizar proyectos de investigación que profundicen el diseño de obras de protección en ríos, a su vez.

También se logra adquirir un importante beneficio técnico mediante la aplicación de la ingeniería hidráulica y vial, las cuales permiten obtener información valiosa acerca de cierta complejidad hidrológica e hidráulica que presenta el río Retobo.

Delimitación

El río Retobo pertenece a una de las principales corrientes fluviales del Municipio Naguanagua, acompañado de los ríos: Cabriales, Agua Caliente, y Guataparo. La investigación contempla el diagnóstico de las condiciones hidráulicas actuales del río Retobo, el análisis del impacto hidráulico que genera el cajón triple celda propuesto para dar paso a la línea del ferrocarril y la propuesta de obras de hidráulicas que permiten disminuir el impacto hidráulico sobre el río.

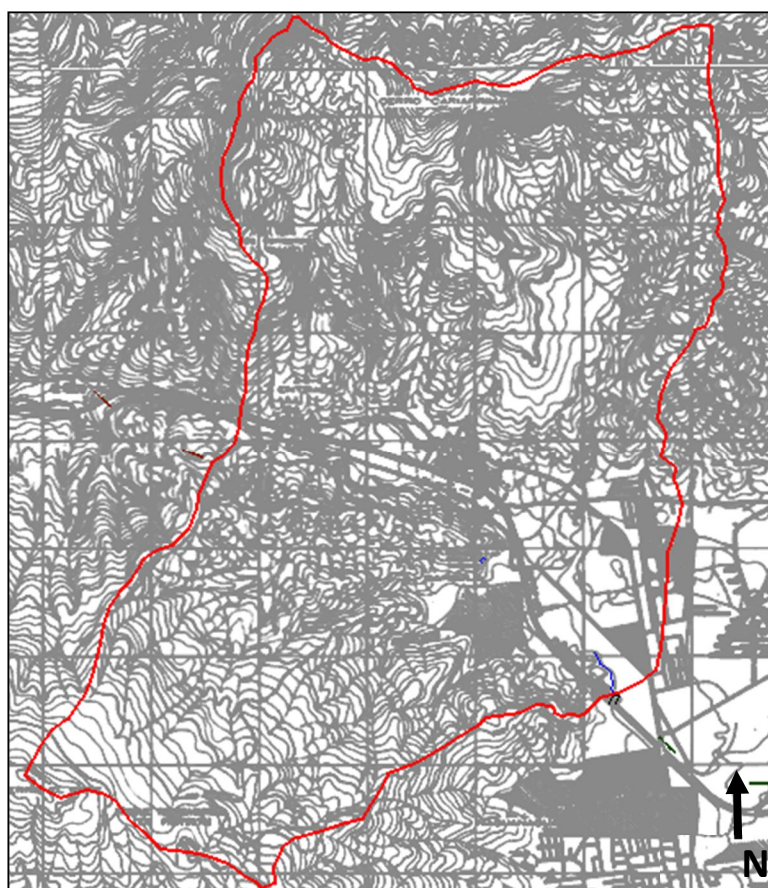


Figura 1. Delimitación del área en estudio. Cuenca del río Retobo. Nota. Cartografía suministrada por el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente.

Este trabajo de grado pretende plantear obras de ingeniería básica, donde se definen los aspectos esenciales, los criterios de diseño a aplicar y las especificaciones básicas. Para desarrollar el planteamiento anteriormente citado, esta investigación profundiza el análisis realizado en la ingeniería conceptual, cuyos resultados son los datos de entrada para esta etapa del diseño, lo que permite preparar la documentación necesaria para la ingeniería de detalle y para la contratación de su ejecución, por tal motivo se excluye de este trabajo el diseño estructural de las obras hidráulicas propuestas.

No se estudiará el impacto ambiental y socio-cultural generado en la zona por la construcción del Ferrocarril Ezequiel Zamora, ni de la futura estación ubicada en las adyacencias del río Retobo, así como tampoco de los otros proyectos previstos a desarrollarse como el Terminal de Pasajeros y la Estación del Metro.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

Antecedentes de la Investigación

Dentro de los planes de desarrollo económico, social y cultural de una ciudad, se originan circunstancias que en cierto aspecto modifican el equilibrio de la naturaleza, como es el caso de las vías de comunicación terrestres, que en su búsqueda de interconectar cada vez a un mayor número de regiones deben enfrentarse con obstáculos de carácter natural, tales como montañas, depresiones, ríos, entre otros.

La colocación de una estructura en un cuerpo de agua presentará cambios en su comportamiento, desde el punto de vista hidráulico y geomorfológico, tanto aguas arriba como aguas abajo, por tal motivo, se deben definir las medidas de protección necesarias que regulen estas variaciones.

Para poder introducir el tema al que alude este trabajo, es necesario definir los conceptos y teorías básicas sobre las cuales se fundamenta, así como recabar información de investigaciones previas relacionadas a esta, lo que permite sustentar la importancia de la propuesta de obras de mitigación del impacto hidráulico en el río Retobo debido al paso del Ferrocarril Ezequiel Zamora.

Los antecedentes de una investigación, son aquellos estudios previos que tienen relación con el trabajo que se está realizando y sirven como sustento y guía para la elaboración del mismo. La información que proporcionan las siguientes referencias, compila diferentes soluciones a problemáticas generadas desde el punto de vista de comportamiento hidráulico de ríos, control de crecidas y medidas de protección a los cauces naturales.

Farías, H. (2006, Agosto). **“Diseño de Protecciones de Márgenes de Ríos con Rip - Rap y Cubiertas Flexibles: Teorías y Aplicaciones”**. Ponencia presentada en el III Congreso Iberoamericano sobre Control de la Erosión y los Sedimentos, Buenos Aires. En ésta publicación se establecen teorías de cálculo para los espesores de una cubierta contra la erosión inducida por las corrientes fluviales, donde se indica que el espesor normalizado depende fundamentalmente del número Froude. Como aporte se presentan una serie de alternativas de diseño de obras de protección, como las cubiertas de enrocado o las cubiertas flexibles, que tienen por objeto disminuir los daños ocasionados por pérdida de suelo, el cual se ve incrementado en aquellas zonas donde se modifique el comportamiento natural de un río y se deje el suelo desprotegido de cubierta vegetal.

Gómez, S. (2006), **“Obras de Protección y Control de Cauces”**. Trabajo de Grado presentado en el Instituto Politécnico Nacional México Investigación que consistió en el estudio hidráulico de los ríos, con el objetivo de poder llevar a cabo la planeación, construcción, supervisión y mantenimiento de las obras de protección y control de cauces. A partir de este estudio se tiene una perspectiva general del diseño de obras protección, lo cual permite identificar las principales causas de falla de las estructuras que confinan el escurrimiento del río y así tomar las acciones preventivas y correctivas necesarias para proteger la planicie de inundación contra

desbordamientos. Por otra parte, da soporte en el tema de las presas utilizadas en la protección contra crecientes, conocimientos que facilitan la selección de las obras de mitigación que serán propuestas en el río Retobo.

Morassutti, G. (2006, Agosto). **“Evaluación de las Obras de Control de Torrentes Construidas por CORPOVARGAS a raíz del evento de Febrero de 2.005”**. Ponencia presentada en el III Congreso Iberoamericano sobre Control de la Erosión y los Sedimentos, Buenos Aires. Investigación basada en el análisis de los criterios de diseño para sistematizar el control de torrentes en las cuencas del estado Vargas, que tiene como finalidad dar a conocer el comportamiento de las estructuras construidas entre los años 2002 y 2003. Esta evaluación permite ampliar la perspectiva acerca de la vulnerabilidad que presentan las cuencas como consecuencia del efecto erosivo de las aguas, permitiendo optar por el uso canalizaciones, así como evaluar y seleccionar sistemas de retención de sedimentos, contribuyendo así con la prevención y el control de crecientes.

Bases Teóricas

Para Arias F. (2.006) las bases teóricas comprenden un conjunto de conceptos y proposiciones que constituyen un punto de vista o enfoque determinado, dirigido a explicar el fenómeno o problema planteado+(p. 39).

La investigación, es un proceso que va más allá de la indagación sobre algún tema o tópico planteado. Es necesario una recopilación de datos propios que apoye lo expuesto, por lo que las bases teóricas se consideran como el epicentro de la indagación, formando de esta manera la plataforma que le da vida y sustento al proceso investigativo.

Para el estudio hidráulico e hidrológico de una cuenca es necesaria la comprensión de diversas teorías que regirán la propuesta de las diferentes obras de protección. A partir de los estudios hidrológicos se obtendrá el caudal de diseño de la estructura, el cual estará en correspondencia con el tamaño y característica de la cuenca, su cobertura vegetal, y el periodo de retorno de la tormenta de diseño. Existen diversos métodos para la obtención del caudal de diseño, basados en estimaciones indirectas del comportamiento de la cuenca.

Para Rodríguez (2010), una cuenca u hoya hidrográfica está representada por un área de topografía y geología definida y variable, con determinada cobertura vegetal, que recibe y distribuye tanto las aguas de lluvia como las fluviales. La lluvia es factor fundamental en el volumen de escorrentía; sin embargo, las características topográficas, físicas y geológicas de la cuenca también regulan el caudal.

Características de una cuenca hidrográfica

Tamaño y forma de la cuenca. Está determinado por la proyección horizontal del espacio entre sus divisorias, las cuencas pequeñas se miden en hectáreas (ha), mientras que las de mayor tamaño en kilómetros cuadrados (Km²). En la elaboración de los estudios hidrológicos para la determinación de los caudales máximos (picos) de los cursos de agua se utilizan diferentes métodos de cálculo en función de las áreas de cada cuenca. En los proyectos de drenaje es usual clasificar las cuencas con relación a sus áreas de la manera siguiente:

- Cuencas pequeñas: Áreas inferiores a 2 Km² (200 ha).
- Cuencas intermedias: Áreas comprendidas entre 2 Km² y 20 Km².

- Cuencas mayores: Áreas mayores a 20 Km².

Los métodos de cálculo comúnmente utilizados son cada vez más complejos a medida que aumentan las áreas de las cuencas. En nuestro medio es bastante usual el empleo del Método Racional en cuencas pequeñas (inferiores a 200 ha), debido principalmente a lo simple que resulta su utilización, lo que permite determinar rápidamente los caudales de diseño. Suárez (2002) hace referencia al inconveniente que presenta el método al sobreestimar a veces de manera exagerada los caudales, por lo que se ha considerado que su aplicación está justificada solamente para las pequeñas obras de drenaje (cunetas, sumideros, etc.), cuyas cuencas suelen ser tan solo de unas pocas hectáreas.

En las cuencas con áreas superiores a 20 Km², resulta práctica la utilización de programas de cálculo hidráulico que simulan el comportamiento del flujo durante los períodos de retorno que sean sometidos al análisis. Tal es el caso del modelo HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center . Hydrologic Modeling System), desarrollado por el USACE en 2.001 (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de América).

Pendiente de una cuenca. La inclinación del terreno es factor determinante en la velocidad de escorrentía; por lo tanto afecta la duración del escurrimiento superficial y el tiempo que tarda el agua para concentrarse en los lechos de la red de drenaje de cada hoyo. La pendiente del cauce es uno de los factores importantes que inciden en la capacidad que tiene el flujo para transportar sedimentos, por cuanto está relacionada directamente con la velocidad del agua.

Permeabilidad del suelo. La permeabilidad corresponde a la menor o mayor velocidad de infiltración de un flujo a través de un medio que lo

permita. Las características propias del suelo (tamaño y distribución de los granos) representa el factor más influyente en la infiltración; sin embargo, la permeabilidad se ve también afectada por la cobertura vegetal, compactación del suelo, grietas, temperatura, etc.

El flujo en una cuenca, según Camacho (2005), tiene escorrentía variable según lo siguiente:

- Efímero o intermitente, con escurrimiento solo durante las precipitaciones.
- Perenne pero variable, con cambios instantáneos en caudal y tirante, como respuesta inmediata a las precipitaciones.
- Perenne, mantiene el flujo durante todo el año, el cual puede ser estable o inestable, dependiendo del material de fondo y de las márgenes.

Los cauces naturales están constituidos por diversos materiales y poseen diferentes alineamientos, pendientes, geometrías y formas. Su configuración es el resultado de la iteración de múltiples variables dependientes, como son: el flujo de la corriente, la geología del área, la vegetación, el clima y las actividades del hombre; entre estas últimas, es de especial interés el desarrollo urbano.

Anticipar cambios morfológicos como resultado de desarrollos urbanos, estudiar la morfología fluvial que los afecta, así como adoptar medidas de control de inundaciones para áreas urbanas o rurales, son acciones que dependen del conocimiento de las distintas formas que adquieren los ríos y las razones por las cuales adoptan cada forma en particular, el comportamiento de las aguas en cauces naturales es complicado de

determinar, debido a las variaciones del gasto a lo largo de la trayectoria del canal, el cambio de su sección, rugosidad, pendiente y velocidad.

Camacho (2005) plantea que, en la estabilidad del cauce, la cobertura vegetal, el uso de la tierra y el tirante de flujo sobre la planicie juegan un papel muy importante. El tirante de flujo crece a medida que aumenta el tamaño del cauce y la profundidad de socavación es proporcional a este tirante. Bolinaga (1999) define dos clases de cauce: los denominados trezados constituidos por numerosos canales entrelazados, y los ríos meandrosos que fluyen libremente en un lecho sin controles geológicos, presentan curvas alternadas, recovecos, y en general un recorrido tortuoso.

Los factores que afectan la estabilidad de los ríos y por lo tanto, la de las estructuras que se construyan sobre ellos, se pueden dividir en factores geomorfológicos y factores hidráulicos, adicionalmente se pueden considerar los factores locales y de diseño. El comportamiento de un río debido al cruce de una vía de comunicación, no solo depende de la estabilidad del cauce en el sitio de ponteadero, sino del sistema fluvial al cual pertenece. La alteración de la cobertura vegetal de las cuencas, hace que estas sean más impermeables, variando el escurrimiento, la cantidad de sedimentos y la forma de los cauces.

De igual forma, perturbaciones naturales como inundaciones, terremotos, deslizamientos de tierras e incendios forestales pueden dar como resultado grandes cambios en la producción y acarreo de sedimentos, y por lo tanto, cambios en los cauces. Las inundaciones se producen cuando las lluvias caen sobre extensas planicies sin poder escurrir fácilmente hacia los cauces naturales y las aguas crecidas de los ríos se desbordan ocupando las zonas planas adyacentes, lo que representa un riesgo para el desarrollo de actividades de cualquier índole.

Las aguas desbordadas pueden tener origen fluvial o pluvial y el control de las mismas es uno de los mejores ejemplos de uso de protección contra los efectos dañinos de las inundaciones. La principal medida para prevenirlas consiste en el manejo, recuperación y ordenamiento ambiental de las cuencas hidrográficas, lo cual no solo contribuye a la conservación de los recursos naturales y del agua en sí misma, sino que además reduce la probabilidad de ocurrencia de inundaciones, avalanchas y avenidas torrenciales.

Las crecidas de un río son fenómenos naturales que se presentan por la conjunción de una serie de factores meteorológicos, climáticos, topográficos y geomorfológicos favorecedores del escurrimiento de las aguas, las cuales al concentrarse en un cauce incrementan sus niveles y aumentan sus velocidades, con acarreo de material de fondo y en suspensión. Estos flujos extraordinarios se conocen también como avenidas torrenciales, que ocurren a causa de lluvias intensas, su comportamiento es muy variado y con frecuencia recorre grandes distancias para finalmente sedimentarse.

Los suelos que presentan un carácter predominantemente granular y que se encuentran bajo nivel freático, durante un sismo pueden experimentar el fenómeno de la licuefacción, a consecuencia del cual el terreno pierde temporal y parcialmente su capacidad de soportar adecuadamente las cargas que le sean transmitidas a través de las fundaciones de las estructuras presentes en superficie. Por lo tanto, el diseño de las fundaciones apoyadas o embebidas en tales suelos potencialmente licuables debe tomar en cuenta tal fenómeno y debe prever un dimensionado que les permita no colapsar durante el sismo de diseño, aunque se acepten para tales circunstancias extremas y temporales factores de seguridad bastante reducidos.

Además de los parámetros del sismo de diseño, el potencial de licuefacción depende principalmente las características granulométricas del suelo y de su densidad: cuanto menos finos están contenidos en el suelo y cuanto más estos finos sean no plásticos, tanto más elevado es el potencial de licuefacción del terreno. Al mismo tiempo, mientras menos denso sea el suelo, mayor es su potencial de licuación.

Los factores hidráulicos e hidrológicos que pueden afectar el comportamiento de los cauces son numerosos e incluyen a las formas del fondo, la resistencia al flujo, las velocidades, los tirantes líquidos, las características de las inundaciones y al régimen de flujo, que se clasifica en función del número de Froude (NF), el cual es una relación adimensional entre fuerzas de inercia y de gravedad. Existen tres tipos de regímenes de flujo: supercrítico, subcrítico y crítico.

- En el régimen supercrítico ($NF > 1$) el flujo es de alta velocidad, propio de cauces de gran pendiente o ríos de montaña. Presenta a lo largo de su trayectoria fenómenos de socavación y agradación. Tienen una alta capacidad de transporte de sedimentos, el cual es alimentado por los procesos erosivos que se presentan en el fondo y contra los taludes.
- El flujo subcrítico ($NF < 1$) corresponde a un régimen de llanura con baja velocidad. Se caracterizan porque la pendiente es pequeña, lo que incide en una baja capacidad de transporte de sedimentos y en una tendencia de inundar áreas adyacentes. El fenómeno principal que se presenta es la agradación.

- El flujo crítico ($NF=1$) es un estado teórico en corrientes naturales y representa el punto de transición entre los regímenes subcrítico y supercrítico.

Para evaluar las condiciones de un cauce en el sitio de ponedero, se debe establecer una relación entre el caudal pico y su período de ocurrencia, en el cual se utiliza un rango de eventos y se elige aquel que produzca la relación costo-beneficio más conveniente, las exigencias estarán de acuerdo al uso de la planicie de inundación y a la importancia de la vía.

La estabilidad de una vía de comunicación se ve afectada por un sistema inadecuado de drenaje, por lo cual, se define al drenaje vial como el conjunto de obras destinadas a evitar daños causados por las aguas pluviales. La construcción de estas obras modifica la topografía original, lo que trae como consecuencia la alteración del drenaje natural. Por lo general, los problemas de drenaje establecen limitaciones físicas para la localización de vías marginales y para el paso de cursos de agua de cierta importancia; una buena selección de ruta debe tener en cuenta los problemas de erosión extensiva sobre las riberas y bancos de ríos al igual que por erosión regresiva localizada en cursos de agua importantes o en terrenos inestables.

El drenaje y la topografía están íntimamente ligados, ambos aspectos deben considerarse al inicio de cualquier obra de vialidad. Desde el momento de la definición del trazado, debe determinarse los emplazamientos de puentes y alcantarillas de gran magnitud, estructuras de drenaje transversal las cuales tienen como principal objetivo dar continuidad a las corrientes de agua que se ven interferidas por el terraplén de la carretera, caminos o vías de ferrocarril.

Las obras hidráulicas requieren de un estudio complejo que solamente puede ser aproximado mediante metodologías semi-empíricas fundamentadas en el cálculo del remanso producido en régimen permanente en presencia de la estructura, siendo necesario determinar la posible socavación con el objeto de fijar la cota mínima de las fundaciones y proyectar las obras para su protección.

En síntesis, la ubicación de toda estructura hidráulica, la posición de la vía con respecto al cauce y la elevación de su rasante con relación a las aguas desbordadas de una crecida con período de retorno apropiado, dependen fundamentalmente de la extensión de la planicie de inundación. El hecho de construir una estructura sobre un río provoca la contracción del flujo al pasar bajo ella, produciendo alteraciones en el comportamiento natural del cauce que podrían ocasionar deterioros estructurales, fallas en las márgenes del río, entre otros.

Por otra parte, Suárez (1998) establece que la superficie terrestre se ve afectada por la acción de fuerzas naturales que producen o facilitan el desplazamiento de partículas individuales o de la masa de suelo, generalmente por acción del agua, lo que modifica el relieve y los esfuerzos que pueden producir la activación de un deslizamiento, siendo este proceso conocido como erosión. A continuación se indican algunos tipos de erosión:

- Erosión laminar en surcos y en cárcavas: es la erosión por las gotas de lluvia y por las corrientes de agua de escorrentía (repartida o concentrada) y la erosión por acción de los cuerpos de agua.
- Erosión interna: si el gradiente hidráulico interno es alto, se puede producir transporte interno de partículas, produciéndose pequeños

conductos que al ampliarse desestabilizan el talud. El movimiento del agua subterránea socava la arena fina, los limos y las partículas sueltas de las cavidades subterráneas del talud, debilitando así su estabilidad.

- Erosión y deslizamiento en las orillas de las corrientes: representan un modo de falla muy común de las riberas de los ríos y corrientes.
- Erosión por exfiltración: cuando el agua subterránea aflora a la superficie del terreno puede producir el desprendimiento de las partículas de suelo generando cárcavas y actúan como activadores de movimientos del talud.

Tabla 1.

Algunas causas y efectos de la erosión.

Proceso Erosivo	Causas Principales	Efectos socio-económicos
Deslaves y derrumbes	Deforestación. Cambios de uso del suelo. Sobreexplotación del suelo. Pendiente elevada. Composición del suelo.	Pérdida de vidas humanas. Daños en viviendas e infraestructuras. Pérdida de suelos agrícolas. Alteración del paisajes
Pérdida de suelos	Deforestación. Cambios de uso del suelo. Sobreexplotación del suelo. Erosión hídrica. Erosión eólica.	Pérdida de productividad de la tierra. Mayor presión sobre recursos naturales. Emigraciones.
Desbordamiento de ríos	Deforestación de cuencas. Ampliación de la frontera agrícola. Vías de comunicación mal ubicadas. Deterioro de los drenajes naturales. Urbanización de las llanuras aluviales.	Pérdida de vidas humanas. Destrucción de infraestructuras. Inundaciones. Pérdidas de cultivos. Contaminación de las aguas. Enfermedades.

Nota. Tomado de Evaluación y prevención de riesgos Ambientales en Centroamérica. (p. 3) por J. Alcañiz (2008). Girona.

Camacho (2005) plantea que una de las causas más comunes que origina la falla de los puentes es la ocurrencia de crecientes que producen socavación excesiva alrededor de pilas y estribos, debido a que provoca un aumento en la intensidad del flujo lo suficientemente fuerte para remover el material del lecho ocasionado por la obstrucción producida por los elementos estructurales.

La velocidad de socavación depende del tipo de material que constituye los contornos, el material granular suelto es fácilmente socavado por el agua en movimiento, mientras que los materiales cohesivos son más resistentes a la socavación; sin embargo la condición de socavación final en suelos cohesivos puede ser tan profunda como la que se produce en lechos arenosos.

Existen dos tipos de socavación en puentes:

- Socavación en agua clara: sucede cuando no hay transporte de sedimentos desde aguas arriba del sitio de observación, o el sedimento disponible es menor al que puede transportar el flujo. Generalmente se origina en ríos con pendientes y caudales bajos, cauces o planicies de inundación con vegetación resistente, flujo en ríos con material granular de fondo.
- Socavación de lecho activo: se origina cuando hay transporte de sedimentos provenientes de aguas arriba, a través del sitio de ponteadero.

Para cualquiera de los casos, la socavación total en las cercanías de los sitios de cruce o ponteadero suele tener tres componentes: agradación o degradación a largo plazo del lecho del cauce, socavación general en el sitio de ponteadero y socavación local en pilas y estribos.

- Agradación o degradación a largo plazo del lecho del cauce: cambia la elevación del lecho y es consecuencia de fenómenos naturales o inducidos por el hombre, modificando las condiciones de la cuenca del río.

La degradación puede causar el colapso de las pilas de un puente cuando están colocadas sobre el cauce principal y contribuye al colapso de pilas y estribos cuando están ubicadas en las márgenes socavadas. En cambio, la agradación causa la disminución de la abertura del puente; cuando el cauce aumenta su anchura el flujo sobre las márgenes y estribos puede afectar la base de los mismos.

- Socavación general en el sitio de ponteadero: resulta de la contracción del flujo, el cual al aumentar su velocidad arrastra el sedimento de fondo; o también del flujo en las curvas, donde la velocidad es mayor en la parte exterior de las mismas. Dentro de esta componente se encuentran:
- Socavación por contracción: ocurre cuando el área de la sección transversal del flujo se reduce, en forma natural o inducida por la presencia de un puente; también sucede cuando los estribos interfieren el flujo y este es obligado a reingresar y pasar por debajo de la abertura del puente.

Por continuidad, resulta un aumento de la velocidad y por ende del esfuerzo de corte a través de la contracción, trayendo como consecuencia el descenso general del fondo del cauce. A medida que el lecho desciende, el área de flujo aumenta y por lo tanto, la velocidad y el esfuerzo de corte disminuyen hasta alcanzar un nuevo estado de equilibrio relativo, lo que significa que el material que transporta el flujo se iguala al removido del lecho bajo el puente, de tal manera que no es capaz de remover más material.

El confinamiento y estrechamiento de las aguas, puede producir una sobre-elevación del nivel superficial e inundación de las áreas ubicadas aguas arriba del ponteadero, el paso de las mismas sobre los estribos y terraplenes de acceso podría originar una excesiva socavación por contracción y local, que en casos extremos provocarían el colapso de la estructura, debido al diseño con luces libres muy estrechas.

- Otros tipos de socavación pueden resultar de la erosión proveniente de las formas en planta del río, controles variables ubicados aguas abajo del cauce, flujos a lo largo de las curvas, otros cambios que provoquen el decrecimiento del lecho, o en puentes ubicados aguas arriba o debajo de confluencias.
- Socavación local en pilas y estribos: el mecanismo básico que causa la socavación local en la base de pilas y estribos, es la separación del flujo de los contornos, la cual induce la formación de vórtices horizontales en herradura que aumentan la capacidad local de transporte de sedimentos y el desarrollo de un agujero de socavación. A medida que crece el agujero, los vórtices en herradura y el transporte decrecen, estableciéndose un nuevo estado de equilibrio entre el material entrante y saliente.

Adicional a los vórtices en herradura formados al pie de la pila, se forman los vórtices de eje vertical denominados de estela, los cuales contribuyen a la extracción de material de la base de la pila, sin embargo la intensidad de estos vórtices disminuye rápidamente hacia aguas abajo, ocasionando la deposición de

material en esa zona. Los factores que afectan la magnitud de la socavación local son:

1. La velocidad del flujo de aproximación, a mayor velocidad mayor profundidad del agujero de socavación.
2. El tirante frente a la pila, un incremento en él puede provocar un agujero con el doble de la profundidad.
3. El ancho, forma y orientación de las pilas.
4. Las características del material del lecho: las arenas tienen poca influencia, las partículas del orden de tamaño de la grava gruesa (cantos rodados), tienden a acorazar el fondo del agujero evitando la profundización del mismo. En cuanto a la cohesión, su efecto es el de retardar la máxima profundización del agujero de socavación.

Además de la socavación total en pilas y estribos, deben considerarse los factores que influyen sobre la migración lateral del cauce y la estabilidad del puente que son: la geomorfología del cauce, la localización del cruce, las características del flujo, las características del material de fondo y márgenes, y la carga suspendida.

Continuamente se produce deslizamiento de los bordes de las márgenes del río en las zonas de concentración de flujo, un meandro se mueve tanto lateralmente como aguas abajo y puede erosionar los taludes causando socavación por contracción y local. Un cauce ramificado tiene numerosos canales en continuo cambio, y la máxima socavación ocurre cuando dos canales se juntan o cuando el flujo incide sobre una barra o isla ubicada aguas abajo.

Con el fin de monitorear, controlar, inhibir, cambiar, o minimizar los problemas que puedan causar las aguas sobre el cauce o cualquiera de los

elementos estructurales del puente, durante o después del paso de una creciente, se incorporan medidas al sistema conformado por la vía y las estructuras que se realicen en el sitio de ponedero, tanto aguas arriba como aguas abajo del mismo, las cuales reciben el nombre de protección.

Estas medidas pueden ser incluidas durante o después de la construcción de la vía; en algunos casos es más conveniente su colocación posterior a la construcción de la misma, pues la magnitud, localización e inestabilidad potencial se ponen de manifiesto después de muchos años de servicio de las estructuras. La selección de una medida de protección depende del mecanismo de socavación presente, características del río, requerimientos de construcción, mantenimiento, vandalismo y costos.

La prevención de amenazas o métodos de mitigación pueden reducir de forma significativa la ocurrencia de deslizamientos y permite el manejo de las áreas relativamente grandes, teniendo en cuenta que los procesos naturales pueden ocurrir en diversos sectores dentro de un área de susceptibilidad similar, de forma repetitiva o múltiple.

El objetivo principal de los métodos de mitigación para la estabilidad de taludes o laderas, consiste en diseñar medidas de prevención, control, remediación y/o estabilización para reducir los niveles de amenaza y riesgo. Sin embargo, no es posible la eliminación total de los problemas mediante métodos preventivos y se requiere establecer medidas de control o de remediación de los taludes susceptibles a deslizamiento o en los deslizamientos activos. (Ver ANEXO A-1)

Las técnicas de remediación comprenden las siguientes alternativas:

- Prevención para evitar que ocurra la amenaza o el riesgo.

- Control de los movimientos para disminuir la vulnerabilidad.
- Estabilización para disminuir la probabilidad de ocurrencia de la amenaza aumentando el factor de seguridad.

Se han desarrollado gran cantidad de técnicas dirigidas a reducir las fuerzas actuantes y a incrementar las fuerzas resistentes o una combinación de los dos efectos para el manejo de taludes inestables. Generalmente, los beneficios más significativos desde el punto de vista de reducción de amenazas y riesgos, se obtienen con las medidas de prevención, Suarez (1998).

Clasificación de las protecciones, según Camacho (2005)

1. Protecciones Hidráulicas:

1.1. Con la finalidad de modificar el flujo: son aquellas que se proyectan principalmente para guiar o provocar la modificación del flujo. Entre ellas se tienen:

1.1.1. Transversales: se proyectan dentro del campo de flujo en dirección perpendicular o bajo cierto ángulo.

1.1.2. Longitudinales: son aquellas orientadas paralelamente al flujo o a lo largo de una margen.

1.1.3. Superficiales: son aquellas que no pueden catalogarse como transversales o longitudinales cuando actúan como un sistema. También incluye las que tienen una característica local, como las canalizaciones y detención de sedimentos.

- 1.2. Para acorazar el cauce: son aquellas que se utilizan para resistir los efectos erosivos del flujo. Necesariamente no alteran las condiciones hidráulicas del cauce, pero sirven para proteger capas inferiores propensas a la erosión.
 - 1.2.1. Revestimiento del lecho: se utilizan para proteger el lecho y márgenes de un cauce contra las fuerzas erosivas; generalmente consisten en capas protectoras. Entre los que se encuentran:
 - 1.2.1.1. Revestimientos rígidos: son generalmente impermeables y no tienen la capacidad de adaptarse a los cambios que se puedan producir sobre las capas a proteger. Generalmente fallan por la remoción del material ubicado sobre su parte inferior.
 - 1.2.1.2. Revestimientos flexibles: tienen la capacidad de amoldarse o ajustarse a los cambios sufridos por las capas inferiores a proteger. Pueden fallar por remoción o desplazamiento del material ubicado en su parte inferior.
 - 1.2.2. Revestimientos locales: se utilizan para proteger estructuras individuales. Generalmente realizados con materiales similares a los utilizados en el revestimiento del cauce, pero estas estructuras se colocan para resistir las fuerzas provenientes de los vórtices creados por obstrucciones al flujo.
2. Protecciones Estructurales: Comprenden modificaciones a las estructuras del puente.

- 2.1. Sobre las fundaciones: incluye modificaciones adicionales al proyecto original, con la finalidad de incrementar la estabilidad contra socavaciones que se han producido durante la vida útil de la obra.
- 2.2. Sobre las pilas: modificaciones para minimizar o transferir la socavación local a otros lugares.
3. Protecciones de monitoreo: son utilizadas para prevenir o identificar potenciales problemas de socavación.
 - 3.1. Instrumentos fijos: son colocados en alguna parte fija de la estructura para detectar o registrar los movimientos de material provocados por la socavación.
 - 3.2. Instrumentos transportables: pueden ser utilizados en forma manual y transportados de un sitio a otro del mismo puente, o de un puente a otro, estos instrumentos no proveen una información continua.
 - 3.3. Monitoreo visual: prácticas llevadas a cabo como rutina de observación visual de las obras. Inspecciones bajo agua, inspección del rip-rap, etc.

Características del río que influyen en la selección de una protección, Camacho (2005)

- Ancho del cauce: influye en la selección de algún tipo de dique o espigón, en pequeños ríos con cauces menores de 75 m, la

contracción provocada por la presencia de espigón trae como consecuencia la erosión sobre el margen opuesto.

- Altura de los márgenes: los márgenes con altura menor de 3 m, pueden ser protegidos con cualquier tipo de estructura. En márgenes cuya altura este entre 3 y 6 m, deben utilizarse revestimientos, estructuras de retardo, diques y estructuras longitudinales. Cuando su altura es mayor a 6 m, generalmente se requieren solo revestimientos o acompañados de otras medidas.
- Configuración del cauce: el uso de espigones y campos de jacks, son convenientes para mantener fijas las márgenes en el caso de cauces meándricos o ramificados; también se pueden utilizar revestimientos de enrocados para evitar la migración de los meandros.
- Material del cauce: en cauces compuestos de cualquier material se pueden utilizar diques, enrocados, campos de jacks, siempre que sean diseñados en forma correcta. Los campos de jacks proporcionan mejor funcionamiento donde se tenga gran cantidad de arrastre de sedimentos y escombros, pues su finalidad es la de causar sedimentación del material.
- Vegetación sobre las márgenes: actúa como una protección natural, reduciendo en este caso el nivel de protección requerido.
- Transporte de sedimentos: en ríos con gran arrastre de sedimentos se recomienda el uso de elementos permeables que causen deposición del material; mientras que los sedimentos

impermeables funcionan mejor en cauces con poco arrastre de sedimentos.

- Radio de curvatura: el radio de curvatura afecta el diseño de cualquier protección e incrementa directamente el costo de la misma.
- Velocidad y tirante: la mayoría de los elementos permeables que retardan el flujo, no son estables estructuralmente, causan inestabilidad y socavación, luego deben ser evitados.
- Escombros: los elementos permeables y los de retardo, causan deposición de escombros, luego es necesario tomar en cuenta si estas condiciones traen o no beneficios.
- Planicie de inundación: el flujo que reingresa desde la planicie de inundación hacia la abertura del puente, produce socavación en los estribos, por ello es recomendable el uso de espigones de encauzamiento

La protección de un margen puede necesitar del revestimiento de la misma, de diques transversales o longitudinales, y de estructuras de retardo, las cuales pueden producir cambios en el alineamiento del flujo o constricciones, acciones que deben ser evaluadas. Contra la migración de los meandros la protección más efectiva es ubicar la estructura en un tramo relativamente recto o entre dos meandros consecutivos; dependiendo de la velocidad de migración del meandro la protección debe ser colocada inmediatamente después de la construcción de la obra o años más tarde.

En caso de suelos potencialmente licuables, se debe mejorar el terreno de fundación y/o se deben dimensionar las fundaciones de manera tal de poder soportar las cargas durante un sismo. Esta última posibilidad es de más fácil implementación en caso de fundaciones profundas cuando el terreno potencialmente licuable limita su presencia a solamente algunos de los niveles del subsuelo dentro del cual se extienden los pilotes. De acuerdo con lo anterior, el diseño de las fundaciones en condiciones de potencial licuefacción, debe iniciar con el cálculo de la capacidad de las fundaciones en presencia del fenómeno para verificar que las mismas puedan ser adecuadamente dimensionadas y construidas.

Por otra parte, cuando existe una sobreproducción de sedimentos, causando deposición y agradación se originan los cauces ramificados. Al producirse la agradación, la pendiente del canal aumenta, la velocidad crece y se forman múltiples canales interconectados. Las protecciones utilizadas tienen como finalidad confinar los múltiples canales en uno solo; esto tiende a incrementar la capacidad de transporte de sedimentos en el cauce principal y la deposición en los canales secundarios, generalmente consisten en diques construidos a partir de las márgenes de las zonas ramificadas hasta el sitio de ponteadero, se utilizan también diques guías con revestimientos en los estribos de los puentes.

Las protecciones más indicadas para evitar la degradación de un cauce son los revestimientos y las estructuras de caída, siendo estas últimas constituidas por represas de poca altura o vertederos, con la finalidad de prever la socavación aguas abajo. Los revestimientos pueden ser de concreto o rip-rap, en algunos casos deben estar protegidos aguas abajo con estructuras de caída o dentellones para evitar la socavación. Para la colocación de estas medidas de protección es necesario tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Para cauces pequeños o medianos se pueden utilizar estructuras de caída.
- La combinación de elementos sueltos de concreto con revestimientos, ha resultado satisfactoria para proteger ríos de mucha pendiente.
- La fundación de pilas y pilotes a gran profundidad es satisfactorio.
- Campos de jacks con encamisamiento de acero, son excelentes cuando la socavación afecta solo el tope de la fundación original.
- La solución más económica para las nuevas instalaciones en cauces pequeños o medianos, es proveer fundaciones más profundas.
- Los gaviones solo se recomiendan para la protección lateral de ríos cuyo ancho no pase de 30 m, y cuya degradación vertical sea muy pequeña.
- La protección de diques longitudinales de rip-rap colocados al pie de las márgenes son muy efectivos.

Contra la agradación se utilizan canalizaciones, embalses para contener los escombros, modificaciones de los puentes, y mantenimiento continuo, o combinación de alguno de ellos, en general se trata de incrementar la capacidad de transporte de sedimentos y escombros. El acortamiento del cauce debe ser estudiado detenidamente, pues causa degradación aguas arriba y agradación aguas abajo. Para evitar el fenómeno de agradación se recomienda lo siguiente:

- Las canalizaciones solo deben ser consideradas, si los análisis muestran que sean altamente satisfactorias.
- Los programas de mantenimiento son altamente costosos, pero son útiles si el problema de agradación es temporal y de pequeña magnitud, como es el caso de cauces pequeños.

- Para el caso de agradación para cauces anchos y poco profundos, el uso de diques o espigones flexibles que permita el confinamiento del flujo en profundos y angostos canales, ha resultado satisfactorio.
- Las represas de retención de escombros y sedimentos con control de extracción, pueden ser la mejor solución, cuando se trata de abanicos aluviales y cruces con severos problemas de agradación.

Para resolver el problema de la socavación por contracción las alternativas incluyen diseñar puentes más largos, puentes adicionales sobre la planicie de inundación, superestructuras colocadas a una altura que no puedan ser alcanzadas por eventos de flujos extraordinarios, colocar las vías de acceso de tal forma que no sean sobrepasadas por el flujo, es decir, reducir la contracción para evitar la socavación. Frecuentemente se utiliza como protección el revestimiento de las márgenes en coincidencia con los estribos, sin embargo, los espigones de encauzamiento utilizados para los estribos además de alinear el flujo contribuyen a minimizar este efecto.

Cabe destacar que la estabilización del fondo del cauce, trae como consecuencia la socavación lateral en el mismo, mientras que la estabilización sobre todo el perímetro, puede traer como resultado socavación o falla de alguna porción de la estructura de protección utilizada para el fondo de las márgenes.

En cuanto a los problemas debido a la socavación local, las estructuras más idóneas son los espigones de encauzamiento, los cuales permiten mejorar la orientación del flujo sobre la parte final del puente alejando la zona de socavación del estribo. Los revestimientos rígidos son los más efectivos cuando los estribos están colocados sobre la planicie de inundación, la

utilización de revestimientos tales como rip-rap, es también una medida de protección.

Existen tres métodos para evitar los daños por socavación en pilas:

- Colocar las fundaciones a tal profundidad que su estabilidad no esté en peligro cuando se produzca la máxima socavación.
- Para puentes existentes proveer protección sobre o debajo del lecho para inhibir el desarrollo del agujero de socavación.
- Prevenir la formación de vórtices o reducir su magnitud e intensidad.

A continuación se describen de forma muy breve de acuerdo a lo publicado por Millán (2005), algunos tipos de medidas estructurales para tratamientos de fenómenos de remoción en masa (deslizamientos), erosión, inundaciones y avenidas torrenciales.

Obras para la prevención de los fenómenos de remoción en masa

Los fenómenos de remoción en masa se refieren al desprendimiento de piedras, tierra o detritos en una pendiente a causa de la gravedad y comúnmente se conocen o nombran como deslizamientos. Pueden ser detonados por lluvias, inundaciones, terremotos u otras causas naturales y acelerados por actividades humanas como corte o rellenos de terrenos y excesivos o inapropiados desarrollos urbanos.

Tabla 2.

Métodos de conformación topográfica del talud.

Método	Ventajas	Desventajas
Remoción de materiales de la cabeza del talud	Muy efectivo en la estabilización de los deslizamientos rotacionales.	En movimientos muy grandes, las masas que se van a remover tendrían una gran magnitud.
Abatimiento de la pendiente	Efectivo, especialmente en los suelos friccionantes.	No es viable económicamente, en los taludes de gran altura.
Terraceo de la superficie	Además de darle estabilidad al deslizamiento, permite construir obras para controlar la erosión.	Cada terraza debe ser estable independientemente.
Colocación de bermas o contrapesos	Contrarrestan el momento de las fuerzas actuantes y además, actúan como estructura de contención.	Se requiere una cimentación con suficiente capacidad de soporte.

Nota. Tomado de Deslizamientos: Técnicas de Remediación (p. 15) por J. Suarez (s.f). Bucaramanga.

- Estructura de contención para suelos.

Las estructuras de contención se diseñan para soportar empujes de tierra y prevenir fallas de taludes en aquellos casos en donde la estabilidad no puede ser garantizada por las condiciones topográficas. Estas obras deben acompañarse de medidas para el control del drenaje.

Pueden ser utilizadas como método preventivo o correctivo, sin embargo, su eficiencia es mayor cuando se usa como prevención de deslizamientos. (Ver ANEXO A-2)

Las estructuras de contención en suelo son apropiadas para:

- Corregir movimientos de pequeña magnitud.
- Controlar movimientos en taludes empinados en la base.
- Disminuir la extensión de la falla de grandes masas.
- Soportar lateralmente los rellenos para bermas.
- Controlar deslizamientos superficiales.
- Limitar zonas de relleno o préstamo.

Dependiendo de la forma y características mecánicas del suelo, existen diferentes tipos de estructuras:

- Muros de contención.
- Tierra reforzada.
- Muros en gaviones.
- Muros anclados
- Pilotes y caisson.

Los gaviones son jaulas rellenas con piedra o rocas del sitio con el fin de formar estructuras monolíticas, permeables y flexibles, utilizadas en la ingeniería hidráulica para canalizaciones, control de erosión, diques de retención de sedimentos, protecciones y apoyos de puentes, entre otros usos.

Los muros en gaviones son una solución muy utilizada por su relativa flexibilidad ante movimientos del suelo de fundación, por permitir un drenaje fácil y ser construidas con materiales del área haciéndolos especialmente útiles en los taludes adyacentes a ríos y corrientes.

- Estructura de contención para rocas.

Se utilizan para estabilizar masas rocosas fracturadas y evitar el colapso del talud, la caída de bloques o cuñas. Su uso es de carácter preventivo. Los anclajes se pueden emplear solos o con estructuras de contención aumentando las fuerzas resistentes. Dentro de este tipo de obras encontramos:

- Anclajes en roca.
 - Revestimiento flexible con malla.
 - Concreto lanzado.
- Protección de la superficie del talud con vegetación.

La erosión producida por la lluvia se puede controlar algunas veces, con el mantenimiento de buenas coberturas vegetales. Para ello es posible emplear la siembra de arvenses o coberturas nobles, especies arbustivas y/o arbóreas de poca altura, que cubran y protejan el suelo del impacto directo de las gotas de lluvia. La vegetación como cobertura de la superficie del talud cumple las funciones de: disminuir la velocidad de agua, disipar su energía, y actuar como filtro superficial.

Las técnicas de revegetalización combinadas con las estructuras inertes de ingeniería como gaviones y muros, se integran y complementan mejorando la respuesta de las obras a la estabilización de un área. En general, la revegetalización representa un impacto positivo para el medio ambiente de la zona a intervenir.

Dentro de los métodos de manejo y establecimiento de la vegetación en los taludes se incluyen:

- Conformación del sustrato.
 - Siembra de semillas.
 - Siembra por estacas, estolones y ramas.
 - Siembra de sepedón.
 - Sistemas de anclaje.
-
- Protección de la superficie del talud con revestimiento.

El revestimiento es utilizado para la prevención y protección de erosión en los taludes protegiendo sus zonas críticas. Cumple las funciones de: disminución de la infiltración y mantenimiento del suelo en condiciones estables de humedad.

Los revestimientos de las superficies de los taludes se utilizan cuando las pendientes de los mismos son mayores al 100% (45°), así como es posible utilizarlos en la parte baja de las estructuras de contención y requieren ser complementadas con obras de control de drenaje superficial.

Los tipos de revestimiento pueden ser:

- Concreto lanzado.
- Suelo cemento.
- Gaviones.
- Enrocados.
- Mampostería o piedra pegada.

Obras para el control de la erosión

La erosión es un fenómeno natural y antrópico que detona o contribuye a los fenómenos de remoción en masa y las avenidas torrenciales, razón por la cual se consideran prioritarias todas las acciones encaminadas a controlar o prevenir este tipo de procesos. Al actuar sobre la erosión se previenen los fenómenos de remoción en masa.

Las acciones del hombre como quemas, talas incontroladas de bosques, vertimientos inadecuados de agua, movimientos de tierra, uso agrícola del suelo no adecuado al trópico, entre otras, aceleran los procesos erosivos degradando los suelos y aumentando los aportes de sedimentos a los ríos y quebradas que modifican su dinámica fluvial. Las obras para el control de la erosión buscan la adecuada evacuación de las aguas de escorrentía, un mejoramiento de la infiltración, la disminución de la velocidad de escurrimiento, la protección de los suelos al impacto de la lluvia y el restablecimiento de coberturas vegetales.

- Control de drenaje e infiltración

Es un método utilizado en la prevención y corrección en áreas inestables y hace parte de la solución integral en la estabilización del talud. Estas obras permiten controlar o disminuir la presión que ejerce el agua dentro del suelo o la roca, facilitando su circulación

y evacuación rápida a través del talud, evitando excesos de presiones y erosión interna, pueden ser implementadas tanto para el manejo de aguas superficiales como en el de aguas sub-superficiales.

Algunas obras de drenaje para aguas superficiales son:

- Cunetas.
- Divisorios de agua.
- Explanación del talud para eliminar apozamientos.
- Revestimientos.
- Revegetalización.

Para aguas sub-superficiales se utilizan las siguientes obras:

- Filtros en trincheras.
 - Drenes horizontales.
 - Lechos drenantes.
 - Pozos verticales.
-
- Tratamiento de regulación de la escorrentía superficial.

Estos tratamientos consisten en la construcción de canales que interceptan y conducen la escorrentía hacia la red de drenaje natural. Cumplen la función de regular el gran volumen de flujo directo o escorrentía superficial en zonas con baja cobertura vegetal y se utilizan en casos donde las laderas presentan procesos de erosión crecientes. Los canales en su conjunto conforman una red de drenaje y pueden ser:

- De desviación.
 - Trasversales.
 - Longitudinales.
- Incremento de infiltración.

Se logra mediante la conformación de sistemas de infiltración que reducen la velocidad, el poder erosivo del agua de escorrentía superficial y retienen los sedimentos transportados; en algunos casos, permiten acumular aguas de lluvias para el riego. Este tipo de intervención se recomienda en zonas donde la escorrentía predomina sobre la infiltración, algunas de las medidas utilizadas son:

- Las zanjas de infiltración.
 - Las micro-terrazas forestales, utilizadas en laderas con pendientes moderadas.
- Tratamientos lineales.

Consiste en la elaboración de barreras que ayudan a encauzar el agua de escorrentía a los canales de evacuación, localizados de manera transversal a la pendiente. Se utilizan en laderas o taludes con pendientes medias o altas. Estas medidas buscan:

- Disminuir la erosión superficial del talud.
- Disipar la escorrentía sobre el talud.
- Reducir la velocidad de flujo.

- Acumular sedimentos.

Los tipos de tratamientos lineales se clasifican según el tipo de material utilizado y pueden ser:

- De revestimiento con neumáticos.
 - Con madera o ramas (fajinas).
 - Con sacos rellenos de tierra.
 - Con postes de madera.
 - Con especies vegetales de bajo porte y alta densidad (gramíneas).
- Cubiertas superficiales.

Este tratamiento tiene por objetivo proteger el suelo mediante coberturas vivas o muertas, utilizando para ello coberturas vegetales como arvenses, gramíneas o residuos de cosechas. Son complementarias a los tratamientos lineales y resultan adecuadas para cubrir áreas degradadas con pendientes moderadas. Cumplen las siguientes funciones:

- Evitar el impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo.
- Disminuir el flujo superficial del agua de escorrentía.
- Evitar el secamiento superficial del suelo.
- Evitar el arrastre de material.

- Tratamientos de regulación de flujo hídrico en cauces.

A través de la construcción de diques transversales en los cauces se controla la erosión fluvial, generando sedimentación local y regulando el flujo de las corrientes. Estos tratamientos trabajan de la siguiente manera:

- Detienen y controlan la socavación de cárcavas y lechos.
- Estabilizan la pendiente longitudinal del cauce.
- Crean condiciones que promueven los procesos de sucesión vegetal.

Los diques pueden ser construidos en:

- Postes de madera.
 - Gaviones.
 - Sacos rellenos.
- Reforestación.

Consiste en la siembra de especies arbustivas y arbóreas de forma estratificada y dirigida hacia la conformación de barreras vivas que actúan como:

- Cortinas rompe vientos.
- Retención de agua.
- Aumento de infiltración.
- Refuerzo del suelo.

Con el fin de garantizar el éxito de esta acción, es aconsejable seleccionar especies nativas de crecimiento rápido cuyas raíces alcancen profundidades de al menos 50 cm.

Obras para la prevención y control de las inundaciones

Las inundaciones son eventos que se presentan por desbordamiento en los tramos bajos de las corrientes naturales donde la pendiente del cauce es pequeña y la capacidad de transporte de sedimentos es reducida, en la mayoría de los casos las inundaciones que son producidas por crecientes extraordinarias no pueden evitarse lo que hace necesario pensar en formas de reducir sus efectos, que en algunos casos es posible mediante métodos de control de inundaciones.

La prevención de la inundación consiste en la implementación de medidas tendientes a mantener el flujo del agua dentro del cauce del río. En algunos casos, esto se logra mediante dragados de los cauces para profundizar y ampliar el canal de descarga y en otros, con la construcción de barreras artificiales que estabilicen el cauce.

- Ampliación de cauces.

Este tipo de acción permite mejorar las condiciones hidráulicas del cauce, bien sea por el retiro de los sedimentos mediante dragado o por la rectificación de sus márgenes. Se utiliza en áreas de desembocadura, de alta sedimentación o donde la acción del hombre ha alterado la sección del cauce con rellenos u obras de infraestructura.

- Diques

Estas obras ayudan a controlar y contener las crecientes incrementando la capacidad hidráulica del cauce, mediante la ampliación de la sección del margen con una barrera de tierra, cumplen la función de contención de la creciente a la vez que disminuyen el efecto erosivo de las corrientes de agua. Los diques se clasifican en:

- Longitudinales: llamados también jarillones, son estructuras lineales construidas con rellenos de materiales del sitio; el realce de las vías constituye una forma particular de diques. Este tipo de obra debe acompañarse de obras de control de drenaje e infiltración.
- Transversales: son estructuras construidas de manera perpendicular al cauce. Pueden ser de madera, concreto o gaviones y protegen las márgenes de un cauce de la erosión y las inundaciones.

- Muros de retención.

Los muros de retención se construyen en sitios donde el espacio disponible es pequeño haciendo inviable la construcción de un dique. Cumplen la función de contener localmente la creciente y proteger la infraestructura urbana o vial. Pueden ser construidos en gaviones o concreto.

- Canalizaciones.

Las canalizaciones se utilizan especialmente en las zonas urbanas como control de la dinámica de las corrientes o como sistemas de desviación del curso principal, para la evacuación eficiente en caso de caudales extremos. Cumplen la función de proveer condiciones hidráulicas fijas para el tránsito de las corrientes.

Estas obras de protección pueden ser desarrolladas en diversos materiales como:

- Concreto armado.
 - Concreto ciclópeo.
 - Gaviones.
 - entre otros.
- Embalses de regulación o reservorios.

Corresponden a presas de tierra o concreto construidas en la parte media o alta de la cuenca. Cumplen la función de captar, regular y contener el caudal evitando la ocurrencia de inundaciones en la parte baja de la cuenca debido a las crecientes. Pueden ser utilizadas para la generación de energía o suministro de agua potable. Son obras de gran magnitud y de alto costo, que causan modificaciones en los patrones de drenaje de la cuenca, en el micro clima local y en el hábitat.

- Red pluvial o sistemas de desagües en cascos urbanos.

Las redes pluviales son obras diseñadas en áreas urbanas para encauzar las aguas lluvias hacia la red de drenaje natural.

Algunas obras de encauzamiento utilizadas son:

- Zanjas en tierra o revestidas.
- Canales en concreto.
- Tuberías.

Obras para el control de las avenidas torrenciales

Las avenidas torrenciales corresponden a flujos extraordinarios de agua con material de arrastre, detritos o lodos, que ocurren en los cauces de los ríos a causa de lluvias intensas. Las obras destinadas a la corrección y estabilización de cauces, están dirigidas a la regulación y control, total o parcial, de los efectos de la dinámica de los caudales sobre los lechos y márgenes como erosión, transporte de material y sedimentación, evitando la incorporación de caudales sólidos a la corriente.

Obras Transversales. Son diques construidos de forma transversal en cauces marcadamente torrenciales, donde es común el cambio del fondo del cauce y presenta transporte masivo de materiales. Pueden ser fabricados en madera, gaviones o concreto dependiendo de su tamaño. Los diques cumplen la función de:

- Retención de sedimentos.
- Disminución de los procesos de erosión e inestabilidad de las márgenes.

Sus efectos son:

- Control del descenso del fondo del cauce.
- Presenta un efecto de presa reduciendo la velocidad de llegada de los sedimentos y disminuyendo su carga.
- Aguas arriba se forman terrazas que elevan el fondo del cauce hasta una pendiente de equilibrio.
- Las terrazas proveen soporte lateral a las márgenes, estabilizándolas.

Obras Longitudinales. Es una medida complementaria a los diques transversales que, de manera local, elimina o controla el aporte de materiales al cauce. Se utiliza principalmente para controlar los daños que originan las avenidas torrenciales. Se considera como obra de defensa y salvaguarda pasiva frente al evento torrencial.

- Reforestación y protección de la cuenca.

Esta acción está orientada al control de producción de sedimentos en la cuenca, cumpliendo una función de protección y recuperación de la cobertura vegetal. Puede realizarse sobre toda la cuenca o las márgenes de los drenajes, las técnicas explicadas en control de erosión aplican en este contexto. De igual manera, se hace necesario recordar que para el diseño y la implantación de los programas de reforestación es aconsejable contar con profesionales del área forestal que orienten y acompañen los programas.

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

Tipo de Investigación

El presente estudio pretende caracterizar los factores que influyen en el impacto generado por la colocación de una estructura hidráulica en el río Retobo, que en consecuencia conllevan al diagnóstico de la necesidad y tipos de obras hidráulicas que mitiguen dicho impacto.

En este sentido y según lo que señalan Hernández, Fernández y Baptista (2008), el estudio donde: *“El propósito del investigador es describir situaciones y eventos, es decir cómo es y se manifiesta determinado fenómeno+ (p.102), se califica como una investigación de Tipo Descriptiva, la cual busca especificar las propiedades importantes de personas, grupos, comunidades o cualquier otro fenómeno que sea sometido a análisis.*

Diseño de la Investigación

El diseño que sustenta este trabajo parte de un estudio de campo fundamentado en una investigación documental, ya que los datos para su realización se obtienen directamente del lugar donde se desarrolla la investigación y otros de material teórico ya existente, los cuales permiten sustentar el estudio y la propuesta.

A través de éste diseño de investigación y en relación a los objetivos planteados y con la finalidad de cumplir con las metas establecidas, el presente estudio se encuentra enmarcado dentro de la metodología de investigación de campo fundamentado en una investigación documental, bajo la modalidad de proyecto factible, el cual corresponde al desarrollo de una propuesta viable, destinada atender necesidades específicas a partir de un diagnóstico. El Manual de Tesis de Grado y Especialización y Maestría y Tesis Doctorales de la Universidad Pedagógica Libertador, (2010), plantea:

El proyecto factible consiste en la investigación, elaboración y desarrollo de una propuesta de un modelo operativo viable para solucionar problemas, requerimientos o necesidades de organizaciones o grupos sociales; puede referirse a la formulación de políticas, programas, tecnologías, métodos o procesos. El Proyecto debe tener apoyo en una investigación de tipo documental, de campo o un diseño que incluya ambas modalidades. (p.21)

Debe señalarse, que el estudio se enmarca en la modalidad de proyecto factible, debido a que está orientado a proporcionar solución o respuesta a problemas planteados en una determinada realidad. Específicamente, su intención consiste en proponer obras hidráulicas que permitan mitigar el impacto hidráulico en el río Retobo por la propuesta de construcción de un cajón de tres celdas, por el paso de la futura línea del ferrocarril Ezequiel Zamora, y así contribuir en garantizar la estabilidad y el buen funcionamiento de estructura hidráulica, sin ocasionar daños a personas y propiedades adyacentes al río, en periodos de lluvia críticos.

Descripción de la Metodología

La investigación se desarrolla en función de la modalidad de proyecto factible, por lo que se realizara en tres fases:

Fase I. Diagnóstico

En esta fase se pretende conocer las condiciones hidráulicas actuales del río Retobo, los factores que pueden afectar el comportamiento del cauce y su estabilidad, mediante la recopilación de información hidrológica, hidráulica y geomorfológica de la cuenca.

El primer paso a seguir es identificar las características del río de acuerdo con los factores geomorfológicos. La revisión de campo en esta fase es crucial, ya que permite establecer la situación actual y las condiciones existentes, donde se obtiene información de interés, derivándose criterios útiles para la toma de decisiones, para alcanzar eficientemente las metas planteadas, controlar, evaluar y mejorar las condiciones del río Retobo por la construcción de una estructura hidráulica que permitirá el paso de la línea del Ferrocarril Ezequiel Zamora.

Fase II. Análisis

La solución del problema envuelve primeramente la aplicación de conceptos geomorfológicos que nos ayudan a identificar los potenciales problemas y las correspondientes soluciones alternativas. Seguidamente se deben establecer análisis cuantitativos basados en conceptos hidrológicos e hidráulicos, tales análisis deben incluir la evaluación de crecidas históricas, condiciones hidráulicas de los cauces, sedimentos en las cuencas, y

movimiento incipiente. Esto se logra mediante el uso de un software de aplicación específica del Hydrologic Engineering Center - U.S. Army Corps of Engineers, HEC-RAS (Hidraulic Engineering Center - River Analisis System) versión 4.1 de marzo del 2008.

Los análisis preliminares de estabilidad de un cauce incluyen planos fotográficos, fotografías aéreas, fotografías terrestres, perfiles históricos del cauce, información sobre las actividades realizadas por el hombre y cambios hidrológicos e hidráulicos registrados a través del tiempo. Para analizar la estabilidad relativa y el alineamiento de los cauces es necesario la recopilación de información sobre el área de pondeadero y aledañas, comportamiento de tributarios ubicados tanto aguas arriba como aguas abajo del sitio del puente, que permita la clasificación del tipo de río, localización de barras y canales trenzados, además de los planos cartográficos.

La información requerida en este nivel, depende del tipo de análisis que se quiera desarrollar. Con respecto a la información hidrológica, es necesario contar con la magnitud de la descarga dominante, curvas de duración y frecuencia, pero la información necesaria precisa depende del método hidrológico que se vaya a utilizar para la determinación de los caudales. (Ver ANEXO A-3 y ANEXO A-4)

Relacionado con la información hidráulica, se deben tener las secciones transversales, alineamiento, estimación de los coeficientes de rugosidad del cauce y márgenes y cualquier otra información necesaria para evaluar su capacidad y la obtención del perfil superficial del mismo.

Finalmente, se aplicaran los siguientes criterios en la utilización del software de cálculo:

1. Seleccionar la creciente de diseño que pueda provocar las máximas socavaciones; se podría elegir entre las crecientes de cien o doscientos años de periodo de retorno, o aquella que pudiera producir el paso del agua sobre el cuerpo de la vía.
2. Trazar los perfiles de flujo para las crecientes analizadas en el paso anterior; para ello se hará uso del programa de computación HEC-RAS.
3. Analizar y caracterizar los factores geomorfológicos e hidráulicos que afecten la estabilidad del río, de acuerdo con los valores arrojados por HEC-RAS.

Fase III. Propuesta

De acuerdo a los resultados obtenidos, en las fases anteriores se plantean las obras hidráulicas que permitan reducir el impacto hidráulico sobre el río Retobo, una vez que los datos sean procesados será preciso analizar la información, proceder a sistematizarla, sintetizarla, y arribar a conclusiones globales para la ubicación de las estructuras que mejor se adapten a la problemática planteada en el tramo en estudio.

Población

Para Balestrini (2002) se entiende por población % cualquier conjunto de elementos de los que se quiere conocer o investigar, alguna o algunas de sus características.+(p.122).

En el caso objeto de estudio, la población está constituida por la cuenca del río Retobo.

Muestra

Según Hernández (2008) corresponde al $\%c$ tipo de muestra cuya selección no depende de que todos tengan la misma probabilidad de ser elegidos, sino de la decisión de un investigador o grupo de encuestadores.+ (p.226).

La muestra a evaluar corresponde a un tramo del río Retobo delimitado aproximadamente por 500 m tanto aguas arriba como abajo a partir del cajón hidráulico existente que da paso a la Autopista Valencia . Puerto Cabello.



Figura 2. Tramo en estudio del río Retobo. Nota. Cartografía suministrada por TECNIC Consulting Engineers S.p.A.

Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Bernal (2002) establece que uno de los aspectos más importantes en el proceso de una investigación es el que tiene relación con la obtención de la información, pues de ello depende la confiabilidad y validez del estudio.+(p. 171).

En cuanto a las técnicas para obtener la información, se procedió a efectuar el análisis de contenido documental, el cual consiste en una revisión exhaustiva y crítica de las fuentes bibliográficas vinculadas con el tema tratado, así como también se empleó la técnica de la observación. Para este estudio se plantea la necesidad de trabajar con un enfoque mixto, utilizando de manera complementaria lo cuantitativo con lo cualitativo.

La observación es una técnica que se debe emplear para relacionar el sujeto de estudio con el objeto, dotando al investigador de una teoría y un método adecuado para que la investigación tenga una orientación correcta, y el trabajo de campo arroje datos exactos y confiables. Los datos que se obtienen están en bruto y necesitan, por lo tanto, de un trabajo de clasificación y ordenación que habrá de hacerse teniendo en cuenta las proposiciones sobre las que se asienta la investigación, el procesamiento de los datos cierra la fase del proceso metodológico.

Tabla 3.

Operacionalización de variables.

Objetivo General: Proponer obras de mitigación del impacto hidráulico en el río Retobo debido al paso del ferrocarril Ezequiel Zamora.

Objetivos Específicos	Variable	Definición Operativa	Dimensiones	Indicadores
Diagnosticar las condiciones hidráulicas actuales del río Retobo.	Condición hidráulicas	Identificar las características del río de acuerdo con los factores geomorfológicos, mediante la recopilación de información hidrológica y el uso del software HEC - RAS.	Observación Procedimientos Software	Técnicas Actividades Materiales Instrumentos
Analizar el impacto hidráulico de un cajón triple celda propuesto en el río Retobo debido al diseño de la línea ferroviaria.	Impacto hidráulico	Evaluación de crecidas históricas, condiciones hidráulicas de los cauces, sedimentos en las cuencas, y socavación.	Análisis Procesos Valorar Estimar	Métodos Principios Recursos
Proponer las obras de mitigación necesarias para minimizar el impacto hidráulico sobre el río Retobo.	Diseño de obras	Medidas de prevención, control, remediación y/o estabilización para reducir los niveles de amenaza y riesgo.	Selección Trazado Calculo Evaluación	Resultados Conclusiones Recomendaciones

Nota. Elaboración de los autores.

CAPITULO IV

PROPUESTA

Contexto general del área en estudio

El alineamiento del ferrocarril intercepta con un ángulo en esviaje el curso del río Retobo, específicamente en el Km 31+370, teniéndose previsto canalizarlo dentro de una estructura tipo cajón de tres celdas. El río Retobo pertenece a una de las principales corrientes fluviales del Municipio Naguanagua, acompañado de los ríos: Cabriales, Agua Caliente, y Guataparo.

En este capítulo se desarrollan una serie de elementos que permiten establecer el diagnóstico de las condiciones hidráulicas actuales del río Retobo, el análisis del impacto hidráulico que genera el cajón triple celda propuesto para dar paso a la línea del ferrocarril y por último el planteamiento de las obras de hidráulicas que permiten disminuir el impacto hidráulico sobre el río.

Diagnóstico

Características hidrológicas de la cuenca

El río Retobo nace en el cerro Retobo, presenta un alineamiento sinuoso con presencia de meandros que tienden a desplazarse lateralmente en la

planicie sedimentaria existente, a lo largo de su cauce son varios los riachuelos que descargan en él, incluyendo el río Agua Linda.

Para identificar la cuenca contribuyente se realizó una inspección visual del comportamiento de las curvas de nivel en los planos a escala 1:25.000, donde se identificaron los puntos altos y bajos para poder así delimitar el área contribuyente, obteniéndose un valor de 30,7 Km², confirmando la información presentada por Suárez (2002). El material cartográfico utilizado fue suministrado por el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente, y consistió en planos de Cartografía Nacional a escala 1:25.000, elaborados en la década de los años 70. Este material fue facilitado en físico para posteriormente ser digitalizado y montado en AUTOCAD.

De acuerdo a la bibliografía suministrada por IFE, Suárez (2002) y su equipo de trabajo elaboraron los estudios hidrológicos para la determinación de los caudales máximos y los caudales de diseño de las estructuras hidráulicas en el tramo La Encrucijada . Puerto Cabello, entre ellos los caudales del río Retobo, para los períodos de retorno 100 y 200 años, obteniendo como valores 212 m³/s y 244 m³/s respectivamente.

En las cuencas con áreas superiores a 20 Km² se utilizó para la determinación de los caudales el modelo HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center . Hydrologic Modeling System), desarrollado por el USACE en 2.001 (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de América).

Para la determinación de los caudales de diseño del drenaje transversal de las vías férreas se utilizan comúnmente los períodos de retorno que se indican en la siguiente tabla:

Tabla 4.

Períodos de retorno en drenaje vial.

TIPO DE OBRA	FUNCIÓN	PERÍODO DE RETORNO (años)
Viaductos y puentes (más de 10 m de luz total)	Básica	100
Pontones (10 m o menos de luz total)	Básica	50
Alcantarillas y cajones	Básica	50

Nota. Cuadro elaborado con datos tomados de Proyectos de Ingeniería Hidráulica Vol. 2 (p. 810) por J. Bolinaga (1999). Caracas.

Dada la importancia del proyecto ferroviario, el creciente desarrollo comercial - urbano de la zona, los cambios climáticos que están teniendo lugar en el ámbito mundial y el costo que implicaría la interrupción del servicio a causa de algún incidente producido por un evento hidrológico importante, se consideró necesario utilizar el caudal para un período de retorno de 200 años.

Características geomorfológicas de la cuenca

Área. La cuenca del río Retobo presenta un área de 30.7 Km².

Tamaño y forma. Se considera que la cuenca es de gran tamaño, debido a que presenta un área mayor a 20 Km². Según Rodríguez (2010), en las grandes cuencas el efecto de almacenamiento es muy concentrado y el escurrimiento máximo está representado por el flujo en canal.

Pendiente. La pendiente aproximada para el tramo en estudio es de 5.6 ‰, lo que incide en una baja capacidad de transporte de sedimentos, por cuanto está relacionado directamente con la velocidad del agua.

Permeabilidad. El área en estudio presenta diversas características, suelos de tipo granular, densa vegetación en las márgenes del río, desarrollos urbanos en las adyacencias de la planicie de inundación, los cuales influyen de diversas maneras en la velocidad de infiltración del flujo en la cuenca. (Ver ANEXO A-5)

Tipo de escorrentía. El flujo presenta una escorrentía perenne pero variable, con cambios instantáneos en caudal y tirante, como respuesta inmediata a las precipitaciones. Tal descripción se adapta completamente al comportamiento hidráulico que presenta el río en los estudios hidrológicos consultados para la elaboración del presente estudio.

Estudio geotécnico. A través del el estudio geotécnico realizado por Marcano (2011), se reportan las características del subsuelo, el cual se caracteriza por ser un depósito de origen aluvial de carácter granular, constituido por la intercalación de estratos de arena limosa (SM), arena limpia mal gradada (SP), arena poco limosa a limpia mal gradada (SM-SP) y arena arcillosa (SC), con ocasionales estratos de arcilla arenosa de baja plasticidad (CL) y estratos constituidos por peñones duros de esquisto cuarzo micáceo y/o cuarzo, que evidencian eventos de alta energía fluvial y paleo-cauces del río Retobo. (Ver ANEXO A-6)

El subsuelo se tipifica en base a la norma para Edificaciones Sismo Resistentes COVENIN - MINDUR 1756 - 2001, con una forma espectral S2 y un factor de corrección para el coeficiente de aceleración horizontal (ϕ) igual a 0.90. La exploración del subsuelo se realizó mediante la ejecución de seis

(6) perforaciones (P-1, P-2, P-3, P-4, P-5 y P-7), correspondiendo P-7 a la perforación dentro del cauce del río Retobo en el área donde se estima emplazara el cajón hidráulico triple celda propuesto. (Ver ANEXO A-7)

El procedimiento que utilizaron en las perforaciones fue el de lavado y percusión, con obtención de muestras y prueba de penetración normal S.P.T a cada metro de profundidad. La perforación de interés P-7 es se reportan en la progresiva km 32+757, con una profundidad de perforación de 30 metros.

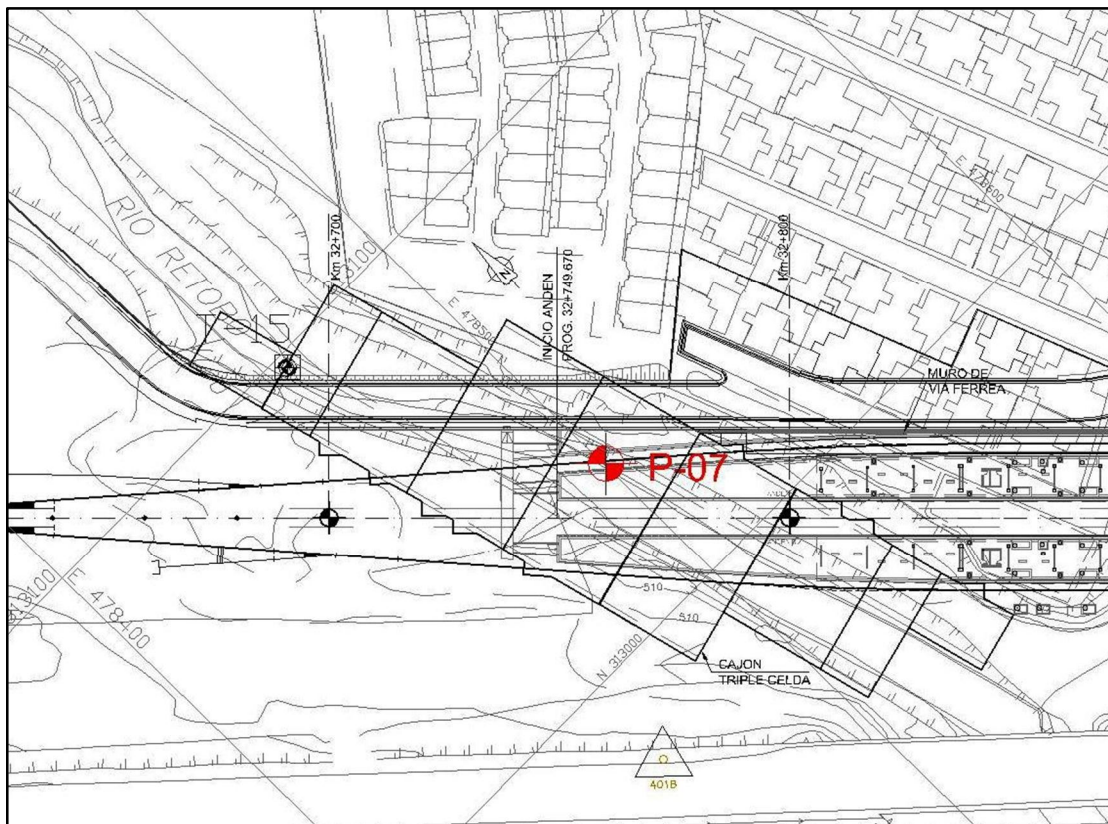


Figura 3. Ubicación de la perforación exploratoria P-7. Nota. Tomado de Marcano, H. (2011). Estudio geotécnico: Exploración del subsuelo y condiciones de fundación. Valencia: Consorcio Grupo CONTUY.

GRANULOMETRIA POR TAMIZADO						
PERF.	P-7	P-7	P-7			
PROF.(m.)	23,00	25,00	29,00			
% PTE. ACC.						
P.T.1 1/2"	100,0	100,0	100,0			
P.T.3/4"	100,0	100,0	100,0			
P.T.3/8"	100,0	77,4	79,0			
P.T.No4	93,8	62,7	60,8			
P.T.No10	83,6	42,2	35,6			
P.T.No20	77,8	24,7	22,0			
P.T.No40	74,3	16,4	16,4			
P.T.No100	64,0	8,5	8,7			
P.T.No200	54,2	5,0	5,7			
PEÑONES:						
GRAVA:						
Gruesa	0,0	0,0	0,0			
Fina	6,2	37,3	39,2			
ARENA:						
Gruesa	10,2	20,5	25,3			
Media	9,3	25,8	19,1			
Fina	20,0	11,4	10,7			
TOTAL DE:						
Grava	6,2	37,3	39,2			
Arena	39,6	57,7	55,1			
P.T.200	54,2	5,0	5,7			
HUM %	23,9	7,5	7,8			
LIMITES DE CONSISTENCIA						
PERF.		P-7				
PROF.		23,00				
LIMITE LIQ.		27,6				
LIMITE PLAST.		15,9				
INDICE PLAST.		11,7				
PESOS UNITARIOS						
PERF.						
PROF.(m.)						
Yw (Kg/m3)						
Yd (Kg/m3)						
HUMEDAD %						
Gs						
SATURACION %						
HUMEDADES						
PERF.	P-7	P-7	P-7	P-7	P-7	
PROF.(m.)	21,0	22,0	24,0	26,0	30,0	
HUMEDAD %	24,7	20,2	16,3	7,2	18,8	

Figura 4. Ensayo de laboratorio efectuado sobre la muestra de suelo recuperada de la perforación N 7. Nota. Tomado de Marcano, H. (2011). Estudio geotécnico: Exploración del subsuelo y condiciones de fundación. Valencia: Consorcio Grupo CONTUY.

El nivel freático se registró para la perforación P-7 a 1 m de profundidad y existen niveles sub-superficiales de suelos potencialmente licuables, por encontrarse debajo del nivel freático, por ser de carácter granular (CF < 20%) y finalmente, por ser relativamente poco densos (SPT < 25).

La tabla que sigue resume en detalle la situación del registro de la perforación P-7.

Cuadro 5.
Registro de perforaciones.

Perforación	P-7
Prof. Nivel Freático	1m
Suelo debajo del N.F.	Arena Limosa
Susceptibles a Licuefacción por Granulometría y Límites	SI
SPT debajo del N.F.	13-10 18-R-27
Espesor en metros de Potencial Licuefacción por Densidad (SPT)	4 m

Nota. Tomado de Marcano, H. (2011). Estudio geotécnico: Exploración del subsuelo y condiciones de fundación. Valencia: Consorcio Grupo CONTUY.

Las figuras que se muestran a continuación son fotografías actuales del tramo en estudio, que evidencian las características geomorfológicas e hidrológicas del río Retobo:



Figura 5. Vista aguas arriba del cajón hidráulico existente.

Se observa una densa vegetación en las márgenes del río, la caída de esta y su posterior arrastre aguas abajo tiende a disminuir el área libre del cajón, $n=0.045$.



Figura 6. Vista aguas abajo del cajón hidráulico existente.

Se aprecia el comportamiento meandroso del cauce, el cual se acentúa hacia aguas abajo, igualmente se nota como varía el gasto a lo largo de su trayectoria. El río presenta un curso en planicie, limpio, curvado, algunos pozos, bancos, pastos y piedras, $n=0.045$.



Figura 7. Vista de la planicie de la inundación sobre la margen Este del río aguas arriba del cajón hidráulico existente.

Al fondo de la imagen se observa una zona residencial, la cual podría verse seriamente afectada durante un desbordamiento o una inundación. Se aprecian pocos arbustos y gran cantidad de pastos, $n=0.050$.



Figura 8. Vista aguas abajo del cajón hidráulico existente.

Existe un estancamiento del cauce y una espesa vegetación sobre la planicie de inundación aguas abajo del cajón, la cual interfiere con el proceso natural de expansión del flujo, $n=0.050$.



Figura 9. Vista hacia aguas abajo del río.

Se nota en esta imagen el paso del río por una de las aberturas del cajón, donde se aprecia la magnitud de una de las celdas y la presencia de sedimentos acumulados por falta de mantenimiento, los cuales ocasionan una contracción del flujo al pasar por este punto, $n=0.017$.



Figura 10. Vista del río al ingresar al cajón hidráulico.

En esta imagen se aprecia socavación en la losa de concreto del cajón existente, al igual que la presencia de sedimentos y desechos sólidos de diversos tamaños, $n=0.017$.



Figura 11. Vista aguas abajo del cajón hidráulico existente.

Se observa la interrupción del flujo debido a la presencia de escombros de gran tamaño, y el incremento de la velocidad del flujo que genera un constante proceso de socavación. Igualmente se nota un estancamiento del agua y la densa vegetación que rodea las márgenes del río.



Figura 12. Vista aguas abajo del cajón hidráulico existente.

Como consecuencia del desnivel entre la base del cajón y el lecho del río se genera un constante proceso de socavación. Igualmente se nota la densa vegetación que rodea las márgenes del río.



Figura 13. Vista aguas arriba del cajón hidráulico existente.



Figura 14. Vista aguas arriba del cajón hidráulico existente.

En las Figuras 13 y 14, se observan las celdas laterales del cajón existente, se aprecia la falta de mantenimiento de la estructura hidráulica, lo que originaría obstrucción al flujo durante un evento hidrológico importante, modificando así el comportamiento del cauce.

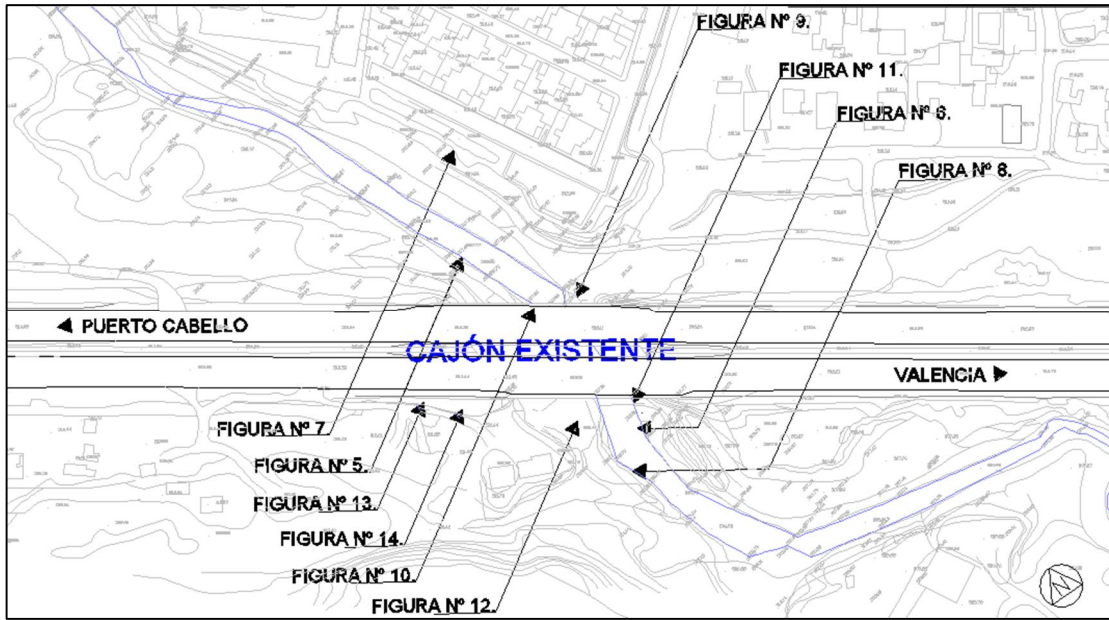


Figura 15. Ubicación de Figuras. Nota. Elaboración de los autores.

Análisis

Una vez definido el cauce del río se procedió a realizar el levantamiento de las secciones transversales a cada 10 m. a lo largo del eje, para un tramo de 1 Km. aproximadamente, donde se contempla como punto medio el cajón hidráulico existente que da paso a la Autopista Regional del Centro. El ancho de estas secciones fue de 120 m. siendo el punto medio el eje del río.

Para el estudio del tramo seleccionado se requiere saber hasta dónde llegaría el agua si el caudal alcanzara el valor correspondiente a un período de retorno de 200 años, con el fin de determinar si será suficiente el cauce principal, la altura a la cual llegaría el agua y las áreas que serán inundadas, en función de la forma del cauce, de la pendiente y de su naturaleza. Mediante la fórmula de Manning se puede evaluar la sección correspondiente a un cierto caudal y a partir de esta obtener la altura del agua para hacer una estimación de las áreas que serán inundadas.

El procedimiento anterior resulta ser poco práctico cuando se trata de evaluar varias secciones, hoy día se encuentran disponibles una serie de software de cálculo para obras hidráulicas, que agilizan el trabajo del proyectista, tal es el caso del programa de aplicación gratuita HEC-RAS, ampliamente utilizado por varios autores de la bibliografía especializada, motivo por el cual fue seleccionado para esta investigación.

Se deben aportar dos tipos de datos para el funcionamiento del HEC-RAS: geométricos y de caudales. Los datos geométricos corresponden a las secciones transversales a lo largo del cauce, que se introducen mediante las coordenadas de cada uno de sus puntos; de este modo, mediante la construcción de dos secciones contiguas separadas por una distancia

conocida, el modelo calcula la pendiente de ese tramo. El caudal corresponde a 244 m³/s, para un período de retorno de 200 años.

Para el cálculo hidráulico del cajón triple celda se ha de suministrar al programa las características estructurales de la obra, que fueron facilitadas por TECNIC Consulting Engineers S.p.A., siendo estas las siguientes:

- Ancho de las celdas laterales igual a 11,0 m.
- Ancho de la celda central igual a 16,0 m.
- Altura libre de la celda central igual a 5,20 m.
- Altura libre de las celdas laterales igual a 5,60 m.

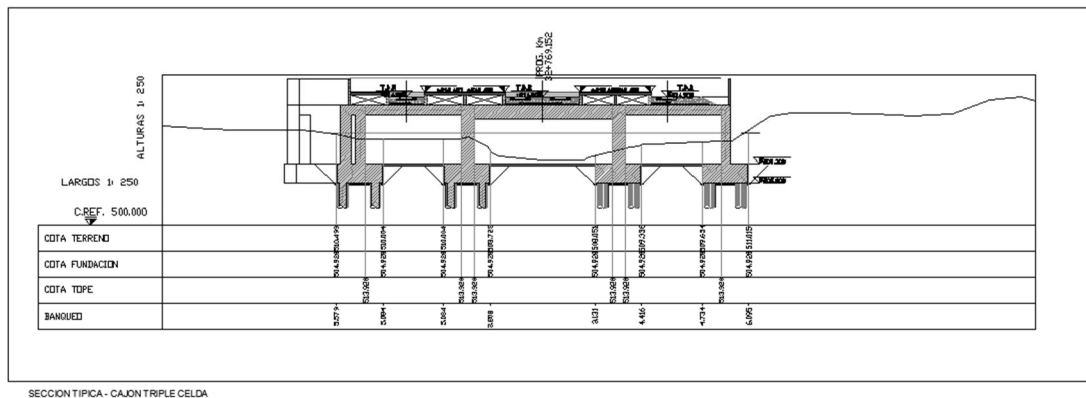


Figura 16. Cajón triple celda propuesto en el río Retobo para dar paso a la línea férrea. Nota. Suministrado por TECNIC Consulting Engineers S.p.A.

En el tramo de río estudiado, se cargaron 106 secciones transversales enumeradas desde aguas abajo hacia aguas arriba separadas a cada 10 m. Se colocó la estructura en la zona correspondiente donde se tiene previsto el cruce de la línea del ferrocarril, luego se procedió a simular diferentes condiciones de régimen de flujo, en las cuales se incluyen los regímenes subcrítico, supercrítico y mixto para el caso de un evento pluviométrico con período de retorno igual a 200 años.

La selección del número de Manning es fundamental para la precisión del cálculo de la mancha de inundación. Este valor es altamente variable y depende de diversos factores que incluyen: la rugosidad de la superficie, vegetación, material suspendido, obstrucciones, irregularidades, forma, tamaño y alineamiento del cauce.

En vista de que la información cartográfica utilizada es de la década de los años 70, se consideró conveniente tomar en cuenta condiciones de escurrimiento superficial más desfavorables que las que se obtienen de los planos. Hoy día, se evidencia en las zonas inferiores de la cuenca un constante crecimiento residencial y comercial que no aparecen representados en los planos cartográficos lo que trae como resultado un incremento importante de los coeficientes de escorrentía y como consecuencia de los caudales.

Dadas las características de la zona se seleccionaron los valores correspondientes a:

- Cursos naturales menores (ancho superior al nivel de la crecida menor a 100 ft.), cursos en planicie, limpio, curvado, algunos pozos, bancos, pastos y piedras, $n=0.045$.
- Cursos naturales, planicie crecida, arbustos escasos, muchos pastos, $n=0.050$.

En las secciones transversales ubicadas en el cajón hidráulico que da paso a la Autopista Valencia . Puerto Cabello el coeficiente de Manning utilizado fue $n=0.017$ por tratarse de un revestimiento de concreto.

Posterior a la selección del número de Manning, se deben asignar los coeficientes de contracción y expansión, los cuales sirven para determinar la

pérdida de energía entre dos secciones contiguas. Se utilizaron los coeficientes de 0.1 y 0.3 para contracción y expansión respectivamente, valores aconsejados por los autores de la bibliografía especializada para una transición gradual. Sin embargo, este coeficiente varió a 0.3 y 0.5 en las secciones transversales cercanas al cajón hidráulico existente.

HEC-RAS también necesita información de las condiciones de contorno en cada tramo, para establecer el nivel del agua inicial en ambos extremos del río, entre las posibilidades que existen se seleccionó la opción de profundidad crítica, en la que el programa calcula la profundidad crítica y la utiliza como condición de contorno.

Una vez suministrada toda la información requerida por el programa se procede a ejecutar el análisis, obteniéndose como resultado las áreas que serán inundadas, el tirante y la velocidad del flujo, el número de Froude, entre otros parámetros. De esta manera se conoce la variación de los escurrimientos y del comportamiento del cauce en general, una vez construido el cajón triple celda propuesto para dar paso a línea del ferrocarril Ezequiel Zamora, referenciándolos al diagnóstico previamente realizado.

Cabe destacar que al evaluar la condición de caudal, la altura del agua no sobrepasa a la altura crítica admitida por la estructura, corroborando de esta manera su funcionabilidad para tales eventos. La utilización de este programa para el análisis del impacto hidráulico del cajón presenta la ventaja de que una vez hecho el trabajo inicial de recopilación e introducción de los datos requeridos permite analizar distintas hipótesis.

El programa calcula las características del flujo en el cajón, la elevación del flujo en la entrada, y permite determinar la capacidad de descarga de distintos tipos de conductos, facilitando así los análisis de diferentes

soluciones. Como norma general se fijó que en ningún caso la cota del agua en la entrada del conducto debe superar una altura de 80 cm por debajo del tope de riel (TDR). También se verificó que la relación H/D (altura del flujo en la entrada / altura de la alcantarilla o cajón) sea menor a 1,20 metros, tal como se recomienda en diferentes bibliografías.

A través del análisis de los resultados arrojados por el programa y de la información obtenida de los estudios realizados en la cuenca del río Retobo, por motivo del paso del Ferrocarril Ezequiel Zamora, se procede a identificar los siguientes factores que afectan la estabilidad del cauce.

Factores Geomorfológicos

Alineación del cauce. En general el río presenta un alineamiento sinuoso, con presencia de meandros, característica que se acentúa aguas abajo del cajón existente.

Geometría y forma. Al evaluar los caudales de diseño, el ancho de inundación varía en promedio hasta los 80 m aproximadamente. Según Camacho (2005) se ha apreciado que para cauces de unos 300 m de ancho, el desplazamiento lateral es del orden de 8 m, mientras que para un ancho de cauce de alrededor de 8 m, el desplazamiento es de unos 3 m. Lo que indica que el desplazamiento lateral del río se encuentra entre los 3 m y los 8 m.

Factores Hidráulicos e Hidrológicos

Formas del fondo. De acuerdo con el estudio geotécnico suministrado por Marcano (2011), el material predominante en el lecho del río es de carácter granular por tratarse de un cauce aluvial conocido como de fondo

arenoso, lo que hace más inestable su cauce. Presenta en su fondo forma de rizos y dunas.

Resistencia al flujo. Dadas las características del fondo por tratarse de un lecho de arena la resistencia al flujo puede variar considerablemente al cambiar el régimen de inferior a superior y viceversa, siendo en el régimen inferior la resistencia del flujo grande y el transporte de sedimentos bajo y en régimen superior la resistencia del flujo es pequeña y el transporte de sedimentos es alto.

Velocidades. Por ser un régimen de llanura con bajas pendientes longitudinales, la velocidad promedio del flujo resulta ser baja, lo cual incide directamente en la baja capacidad que tiene el río para transportar sedimentos, la velocidad promedio en el tramo estudiado para un caudal de $244 \text{ m}^3/\text{s}$ es de 2.39 m/s , siendo las velocidades más altas en las secciones donde se reduce el ancho del cauce.

Tirantes líquidos. Según Camacho (2005), el tirante de flujo crece a medida que aumenta el tamaño del cauce y la profundidad de socavación es proporcional a este tirante. En este caso, la altura del agua en el tramo estudiado varía entre 2 y 6 m con respecto al punto más bajo de cada sección transversal, lo que evidencia el riesgo de desbordamiento e inundación que existe en las adyacencias al cauce del río Retobo, así como la ocurrencia de socavación excesiva producida por una tormenta de 200 años de período de retorno.

Características de las inundaciones. De acuerdo con los estudios hidrológicos suministrados por Suárez (2002), la duración de la tormenta de diseño es de 5 min, con la cual se alcanzan los valores de caudales pico para cada uno de los períodos de retorno establecidos anteriormente.

Régimen de flujo. El tramo en estudio presenta un flujo subcrítico ($NF < 1$), correspondiente a un régimen de llanura, con baja velocidad, baja capacidad de transporte de sedimentos y una marcada tendencia de inundar zonas adyacentes. Es importante resaltar que las secciones transversales cercanas al cajón existente tienden a elevar el número de Froude, como consecuencia del cambio de sección, coeficiente de escorrentía y número de Manning, lo que ocasiona un incremento en la velocidad del flujo. Es usual la presencia del fenómeno de agradación en este tipo de régimen.

Las siguientes figuras muestran el análisis realizado por el programa y evidencian los parámetros anteriormente descritos para el tramo en estudio, el cual consta de 106 secciones transversales en una longitud de 1048.35 m, enumeradas desde aguas abajo hacia aguas arriba para un periodo de retorno de 200 años.

Profile Output Table - Standard Table 1

File Options Std. Tables Locations Help

HEC-RAS Plan: plan01 River: Retobo Reach: Tramo en estudio Profile: 200 anos Reload Data

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Tramo en estudio	106	200 anos	244.00	509.03	513.09		513.26	0.003052	2.12	139.60	76.17	0.44
Tramo en estudio	105	200 anos	244.00	509.25	512.84		513.20	0.008308	3.13	100.73	74.00	0.69
Tramo en estudio	104	200 anos	244.00	509.20	512.86		513.11	0.004942	2.62	118.48	73.60	0.54
Tramo en estudio	103	200 anos	244.00	508.73	512.79		513.05	0.005466	2.68	115.15	73.01	0.56
Tramo en estudio	102	200 anos	244.00	508.57	512.53		512.97	0.008266	3.55	95.83	72.72	0.70
Tramo en estudio	101	200 anos	244.00	508.58	512.58		512.86	0.004839	2.86	117.54	73.66	0.53
Tramo en estudio	100	200 anos	244.00	508.49	512.58		512.79	0.003523	2.36	132.08	75.49	0.46
Tramo en estudio	99	200 anos	244.00	508.71	512.52		512.73	0.004519	2.38	124.34	74.06	0.52
Tramo en estudio	98	200 anos	244.00	508.59	512.51		512.69	0.002336	2.38	148.37	75.68	0.41
Tramo en estudio	97	200 anos	244.00	508.70	512.52		512.66	0.001956	1.99	158.72	79.79	0.37
Tramo en estudio	96	200 anos	244.00	508.51	512.52		512.63	0.001534	1.94	179.12	89.07	0.33
Tramo en estudio	95	200 anos	244.00	508.63	512.53		512.61	0.001128	1.54	208.40	100.73	0.28
Tramo en estudio	94	200 anos	244.00	508.34	512.54		512.59	0.000692	1.28	262.56	118.58	0.22
Tramo en estudio	93	200 anos	244.00	508.37	512.54		512.58	0.000561	1.15	281.92	120.00	0.20
Tramo en estudio	92	200 anos	244.00	508.38	512.52		512.58	0.000750	1.35	243.42	106.49	0.23
Tramo en estudio	91	200 anos	244.00	508.68	512.52		512.57	0.000609	1.27	259.37	104.18	0.21
Tramo en estudio	90	200 anos	244.00	508.58	512.50		512.56	0.000680	1.34	246.13	109.89	0.23
Tramo en estudio	89	200 anos	244.00	508.44	512.50		512.56	0.000686	1.40	245.93	119.47	0.23
Tramo en estudio	88	200 anos	244.00	508.43	512.49		512.55	0.000763	1.27	240.40	115.19	0.23
Tramo en estudio	87	200 anos	244.00	508.11	512.42		512.54	0.001524	1.75	178.56	100.46	0.32
Tramo en estudio	86	200 anos	244.00	508.37	512.42		512.53	0.001454	1.68	181.65	90.85	0.31
Tramo en estudio	85	200 anos	244.00	508.22	512.41		512.51	0.001311	1.65	185.49	83.11	0.30
Tramo en estudio	84	200 anos	244.00	508.26	512.30		512.48	0.002074	2.22	154.64	83.24	0.38
Tramo en estudio	83	200 anos	244.00	508.26	512.25		512.45	0.002175	2.12	140.72	85.67	0.39
Tramo en estudio	82	200 anos	244.00	508.37	512.32		512.40	0.000859	1.50	204.46	85.07	0.25
Tramo en estudio	81	200 anos	244.00	508.12	512.31		512.39	0.000920	1.41	205.24	82.69	0.25
Tramo en estudio	80	200 anos	244.00	507.99	512.31		512.38	0.000710	1.32	227.33	90.41	0.23
Tramo en estudio	79	200 anos	244.00	508.05	512.30		512.36	0.000646	1.35	233.96	84.55	0.22
Tramo en estudio	78	200 anos	244.00	508.05	512.19		512.34	0.001792	1.98	162.38	83.85	0.36
Tramo en estudio	77	200 anos	244.00	507.82	512.19		512.32	0.001483	1.98	173.49	82.05	0.33
Tramo en estudio	76	200 anos	244.00	508.03	512.15		512.30	0.001841	2.13	162.96	83.21	0.36
Tramo en estudio	75	200 anos	244.00	507.78	512.11		512.29	0.002065	2.28	151.48	82.30	0.38
Tramo en estudio	74	200 anos	244.00	507.97	512.10		512.27	0.002177	2.28	151.08	82.42	0.39
Tramo en estudio	73	200 anos	244.00	507.73	512.10		512.25	0.001584	2.09	162.25	73.58	0.34
Tramo en estudio	72	200 anos	244.00	507.64	512.07		512.23	0.001554	2.11	164.25	82.44	0.34
Tramo en estudio	71	200 anos	244.00	507.51	512.06		512.21	0.001449	2.03	164.11	75.93	0.33
Tramo en estudio	70	200 anos	244.00	508.10	512.05		512.19	0.001654	1.99	161.49	74.35	0.35

Calculated water surface from energy equation.

Figura 17. Resultados arrojados por HEC-RAS, Secciones 106 – 70.

Profile Output Table - Standard Table 1

File Options Std. Tables Locations Help

HEC-RAS Plan: plan01 River: Retobo Reach: Tramo en estudio Profile: 200 anos Reload Data

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Tramo en estudio	69	200 anos	244.00	507.76	512.03		512.18	0.001528	1.99	160.10	68.34	0.33
Tramo en estudio	68	200 anos	244.00	507.98	511.97		512.16	0.001981	2.21	140.96	60.57	0.38
Tramo en estudio	67	200 anos	244.00	507.66	511.94		512.14	0.000894	1.56	143.75	54.87	0.26
Tramo en estudio	66	200 anos	244.00	507.66	511.92		512.13	0.000992	1.68	140.57	49.39	0.27
Tramo en estudio	65	200 anos	244.00	507.63	511.91		512.12	0.001087	1.77	134.62	49.69	0.29
Tramo en estudio	64	200 anos	244.00	507.90	511.85		512.11	0.001309	1.85	126.18	48.21	0.31
Tramo en estudio	63	200 anos	244.00	507.91	511.88		512.07	0.001426	1.88	136.85	52.89	0.33
Tramo en estudio	62	200 anos	244.00	507.62	511.90		512.06	0.000228	2.20	217.30	84.91	0.35
Tramo en estudio	61	200 anos	244.00	507.77	511.53	511.22	512.02	0.001241	3.40	110.15	71.40	0.73
Tramo en estudio	60	200 anos	244.00	507.80	511.22	511.22	511.98	0.001418	4.07	70.86	49.79	0.80
Tramo en estudio	59	200 anos	244.00	507.80	510.98	510.98	511.92	0.001999	4.93	85.98	47.15	0.97
Tramo en estudio	58	200 anos	244.00	507.79	510.32	510.32	511.27	0.002215	4.76	76.04	40.75	1.00
Tramo en estudio	57	200 anos	244.00	506.52	510.47		510.76	0.002597	2.53	107.91	39.01	0.44
Tramo en estudio	56	200 anos	244.00	506.17	510.57		510.70	0.000970	1.73	180.65	84.22	0.27
Tramo en estudio	55	200 anos	244.00	506.03	510.50		510.68	0.001531	2.09	152.82	70.89	0.34
Tramo en estudio	54	200 anos	244.00	506.03	510.44		510.66	0.001876	2.31	136.12	59.54	0.38
Tramo en estudio	53	200 anos	244.00	505.99	510.48		510.62	0.001278	1.96	164.49	66.46	0.31
Tramo en estudio	52	200 anos	244.00	505.87	510.44		510.60	0.001376	2.13	160.82	73.18	0.33
Tramo en estudio	51	200 anos	244.00	505.76	510.43		510.59	0.001097	1.96	161.99	65.96	0.30
Tramo en estudio	50	200 anos	244.00	505.73	510.43		510.57	0.001165	1.89	167.00	67.87	0.29
Tramo en estudio	49	200 anos	244.00	505.70	510.43		510.56	0.001044	1.76	170.89	74.24	0.28
Tramo en estudio	48	200 anos	244.00	505.63	510.42		510.55	0.001216	1.82	180.83	90.42	0.29
Tramo en estudio	47	200 anos	244.00	505.60	510.28		510.52	0.002384	2.45	137.87	92.29	0.41
Tramo en estudio	46	200 anos	244.00	505.48	510.20		510.49	0.002571	2.65	121.02	81.59	0.43
Tramo en estudio	45	200 anos	244.00	505.30	510.24		510.44	0.001762	2.30	151.00	90.47	0.36
Tramo en estudio	44	200 anos	244.00	505.14	510.26		510.41	0.001243	2.03	173.84	95.63	0.31
Tramo en estudio	43	200 anos	244.00	505.08	510.21		510.40	0.001644	2.15	151.19	92.70	0.35
Tramo en estudio	42	200 anos	244.00	505.03	510.22		510.37	0.001226	2.02	169.93	91.89	0.31
Tramo en estudio	41	200 anos	244.00	505.02	510.21		510.37	0.001197	2.03	168.94	90.50	0.31
Tramo en estudio	40	200 anos	244.00	504.92	510.17		510.35	0.001355	2.21	160.59	80.76	0.33
Tramo en estudio	39	200 anos	244.00	505.00	510.20		510.33	0.001077	1.91	182.75	80.83	0.29
Tramo en estudio	38	200 anos	244.00	505.07	510.20		510.32	0.001038	1.88	186.11	80.75	0.28
Tramo en estudio	37	200 anos	244.00	504.97	510.08		510.30	0.002060	2.55	142.36	71.62	0.39
Tramo en estudio	36	200 anos	244.00	504.75	510.20		510.23	0.000233	0.87	308.35	70.85	0.13
Tramo en estudio	35	200 anos	244.00	504.73	509.99		510.20	0.002142	2.42	140.44	63.50	0.37
Tramo en estudio	34	200 anos	244.00	504.77	510.02		510.15	0.001370	1.95	167.74	65.32	0.30
Tramo en estudio	33	200 anos	244.00	504.73	510.01		510.14	0.001037	1.70	166.47	65.61	0.27

Calculated water surface from energy equation.

Figura 18. Resultados arrojados por HEC-RAS, Secciones 69 – 33.

Profile Output Table - Standard Table 1

File Options Std. Tables Locations Help

HEC-RAS Plan: plan01 River: Retobio Reach: Tramo en estudio Profile: 200 anos Reload Data

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Tramo en estudio	36	200 anos	244.00	504.75	510.20		510.23	0.000233	0.87	308.35	70.85	0.13
Tramo en estudio	35	200 anos	244.00	504.73	509.99		510.20	0.002142	2.42	140.44	63.50	0.37
Tramo en estudio	34	200 anos	244.00	504.77	510.02		510.15	0.001370	1.95	167.74	65.32	0.30
Tramo en estudio	33	200 anos	244.00	504.73	510.01		510.14	0.001037	1.70	166.47	65.61	0.27
Tramo en estudio	32	200 anos	244.00	504.47	510.01		510.10	0.000648	1.57	222.67	111.93	0.23
Tramo en estudio	31	200 anos	244.00	504.44	509.92		510.08	0.001134	1.98	157.31	75.00	0.30
Tramo en estudio	30	200 anos	244.00	504.32	509.76		510.05	0.003117	2.61	111.40	51.75	0.45
Tramo en estudio	29	200 anos	244.00	504.29	509.75		510.02	0.002315	2.55	119.09	48.55	0.40
Tramo en estudio	28	200 anos	244.00	504.27	509.65		509.99	0.003232	2.78	106.88	47.64	0.46
Tramo en estudio	27	200 anos	244.00	504.29	509.65		509.95	0.002682	2.59	115.77	68.90	0.43
Tramo en estudio	26	200 anos	244.00	504.44	509.60		509.92	0.003056	2.66	115.69	80.06	0.45
Tramo en estudio	25	200 anos	244.00	504.30	509.42	508.87	509.86	0.004393	3.23	102.30	83.34	0.52
Tramo en estudio	24	200 anos	244.00	504.42	508.59	508.39	509.73	0.013071	4.75	53.68	30.45	0.86
Tramo en estudio	23	200 anos	244.00	504.41	508.55	508.22	509.57	0.011947	4.49	55.64	30.33	0.85
Tramo en estudio	22	200 anos	244.00	504.44	508.81	507.85	509.34	0.005436	3.33	89.95	76.92	0.59
Tramo en estudio	21	200 anos	244.00	504.41	508.73	507.82	509.29	0.005856	3.39	86.32	75.45	0.61
Tramo en estudio	20	200 anos	244.00	504.35	508.82		509.18	0.003983	2.75	106.15	75.28	0.51
Tramo en estudio	19	200 anos	244.00	504.12	508.40	507.80	509.09	0.008328	3.73	72.93	64.44	0.72
Tramo en estudio	18	200 anos	244.00	504.12	508.42	508.17	508.96	0.008764	3.31	82.30	77.12	0.73
Tramo en estudio	17	200 anos	244.00	504.35	508.45		508.86	0.005084	2.91	96.64	80.05	0.57
Tramo en estudio	16	200 anos	244.00	503.98	508.41		508.81	0.004578	2.87	99.85	80.24	0.55
Tramo en estudio	15	200 anos	244.00	504.10	508.41	507.38	508.74	0.003782	2.68	111.32	79.95	0.50
Tramo en estudio	14	200 anos	244.00	504.02	507.90	507.44	508.65	0.007533	4.04	73.80	66.50	0.70
Tramo en estudio	13	200 anos	244.00	503.98	508.10		508.48	0.004463	2.79	100.94	79.04	0.54
Tramo en estudio	12	200 anos	244.00	503.88	507.79	507.29	508.40	0.006875	3.70	82.42	68.89	0.66
Tramo en estudio	11	200 anos	244.00	503.68	507.93		508.27	0.003253	2.65	105.77	79.20	0.48
Tramo en estudio	10	200 anos	244.00	503.27	507.71		508.22	0.004592	3.35	95.00	71.67	0.56
Tramo en estudio	9	200 anos	244.00	503.04	507.73		508.15	0.004262	3.00	102.04	79.66	0.53
Tramo en estudio	8	200 anos	244.00	503.64	507.73		508.09	0.003607	2.81	110.43	81.92	0.49
Tramo en estudio	7	200 anos	244.00	503.63	507.58	507.12	508.04	0.005785	3.25	98.36	88.53	0.61
Tramo en estudio	6	200 anos	244.00	503.55	507.65		507.94	0.003600	2.69	124.05	90.01	0.48
Tramo en estudio	5	200 anos	244.00	503.27	507.62		507.91	0.003423	2.66	124.68	89.79	0.46
Tramo en estudio	4	200 anos	244.00	503.23	507.59		507.87	0.003488	2.63	124.86	90.78	0.47
Tramo en estudio	3	200 anos	244.00	503.23	507.55		507.84	0.002981	2.72	130.63	93.19	0.46
Tramo en estudio	2	200 anos	244.00	503.47	507.48	506.88	507.80	0.004428	2.83	119.22	93.42	0.53
Tramo en estudio	1	200 anos	244.00	503.62	507.16	507.16	507.72	0.008563	3.66	90.62	88.37	0.71

Average velocity of flow in main channel.

Figura 19. Resultados arrojados por HEC-RAS, Secciones 36 - 1

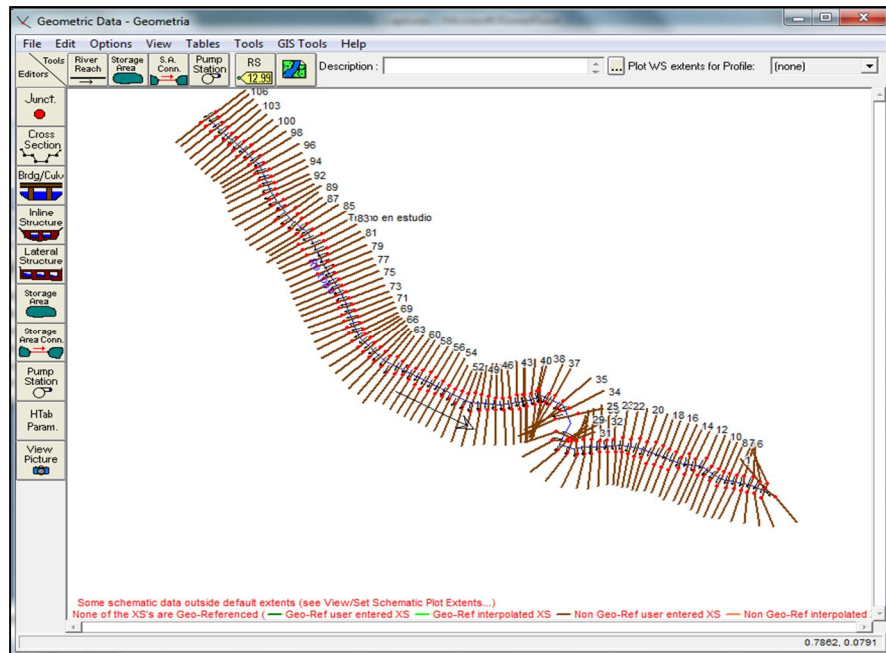


Figura 20. Geometría del cauce cargada en HEC-RAS.

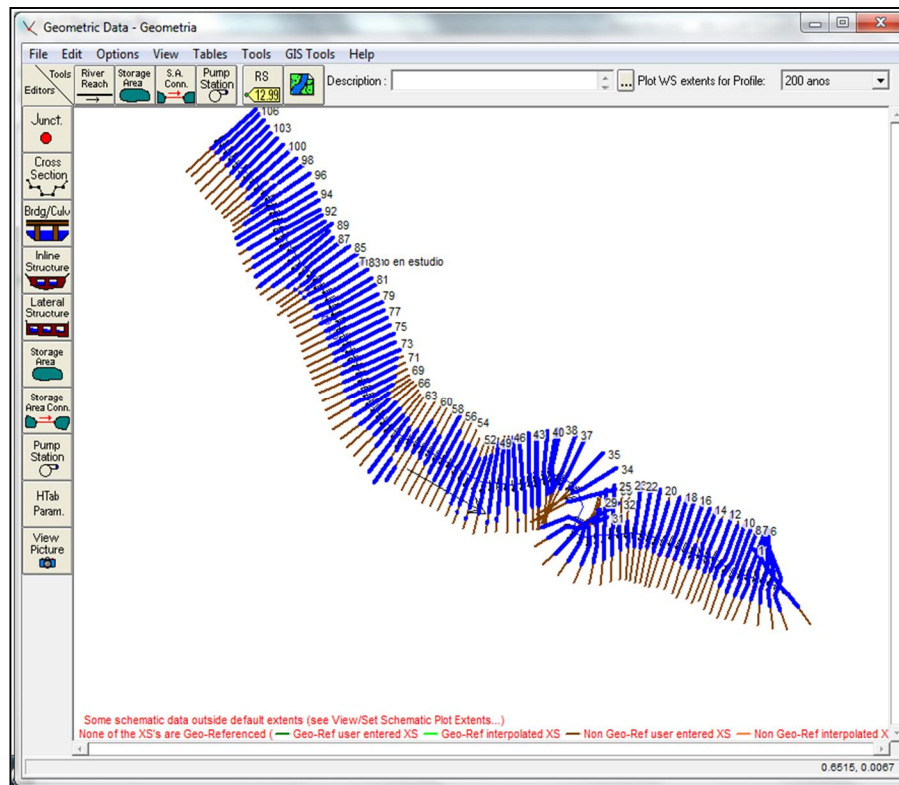


Figura 21. Planicie de inundación arrojada por HEC-RAS.

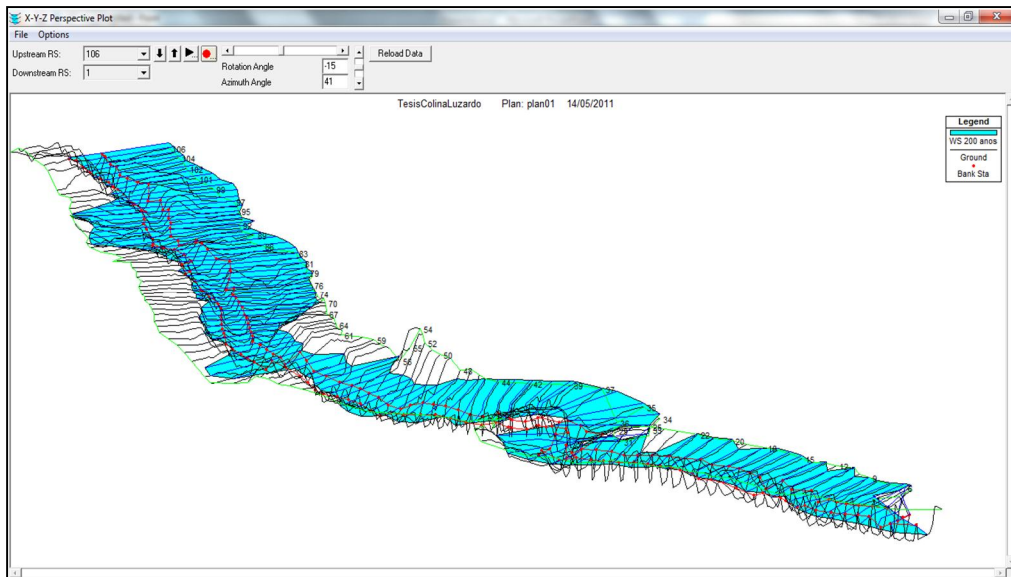


Figura 22. Perfil tridimensional arrojado por HEC-RAS.

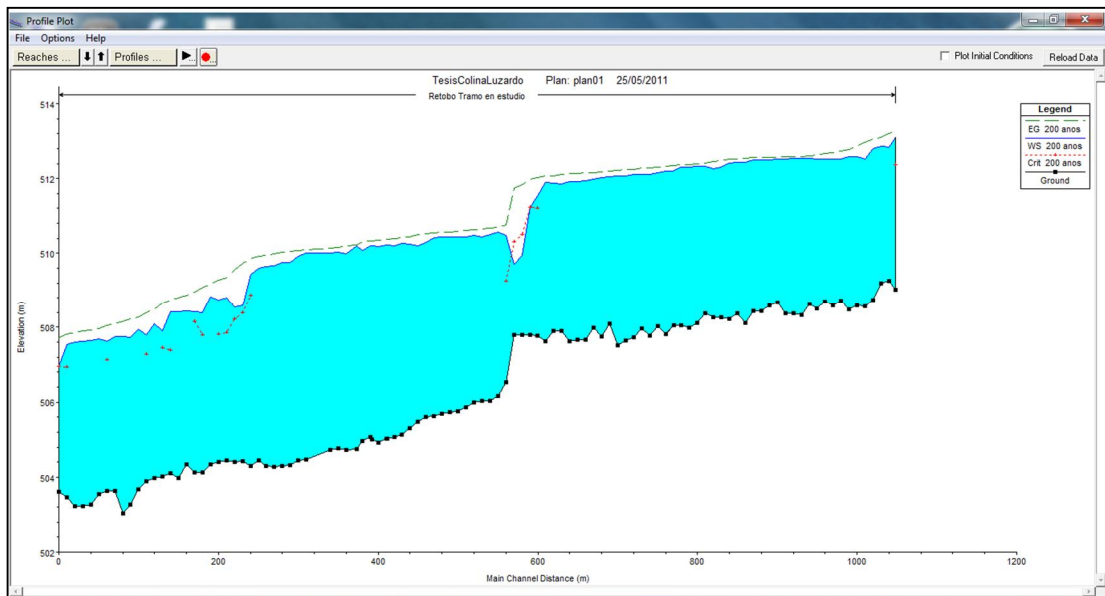


Figura 23. Perfil Longitudinal arrojado por HEC-RAS.

Propuesta

Una vez desarrolladas las fases de diagnóstico y análisis que contempla este estudio, finalmente se llega a la propuesta de obras hidráulicas para minimizar el impacto hidráulico sobre el río Retobo, cabe resaltar que son muchas las obras que se mencionan en la revisión bibliográfica recopilada para la elaboración de este trabajo, pero solo serán propuestas las que mejor se adapten a la problemática previamente planteada.

Cada una de las obras propuestas serán ubicadas en las progresivas de los tramos que presenten mayor problema de erosión y socavación, y donde la mancha de inundación afecte las estructuras y perjudique poblaciones adyacentes al río, en función del análisis arrojado por el HEC . RAS. Esta fase corresponde a una ingeniería básica, donde se especificaran solo las características de las estructuras a colocar.

Dada la magnitud del proyecto a desarrollar en la zona, donde se plantea la construcción de un cajón triple celda para dar paso a la línea del Ferrocarril Ezequiel Zamora y de la futura Estación Naguanagua entre otros proyectos previstos a desarrollarse en las adyacencias del área en estudio, como el Terminal de Pasajeros y la Estación del Metro se genera una situación que obliga a la estabilización de los bordes del río Retobo, con lo cual se hace factible la canalización del caudal, estableciendo controles de velocidad aguas arriba del cajón que permitirán mejorar su funcionamiento.

Es de esperar que en el futuro; a lo largo de la vida útil del ferrocarril, se incremente aún más la tendencia a la intervención antrópica en la cuenca estimulada por el desarrollo que inducirá el propio ferrocarril, por lo que es muy probable que la mayor parte de las zonas adyacentes a la cuenca que actualmente se encuentran parcialmente ocupadas por urbanismos y zonas

verdes terminen siendo en su totalidad zonas urbanas e industriales, con la consiguiente impermeabilización superficial que esto significa, lo que traerá como resultado el incremento de los caudales aportados al cauce del río.

El fondo del cauce se deberá proteger en concreto desde la progresiva 0+560 hasta la progresiva 0+640, a fin de controlar cualquier efecto por arrastre, socavación o resalto lo más alejado posible del sector de los cajones, sin embargo, esta protección va ligada a un estudio particular de socavación en el tramo y en consecuencia la definición de las dimensiones requeridas para tales efectos, el ancho del fondo de cauce a proteger debe ser de al menos 15 m.

Para prevenir el deslizamiento del talud en ambos márgenes, entre las progresivas 0+450 y 0+550 se propone el uso de muros de gaviones de 5 cuerpos que tendrán como mínimo una base con un ancho de cuatro (4) cuerpos de gavión.

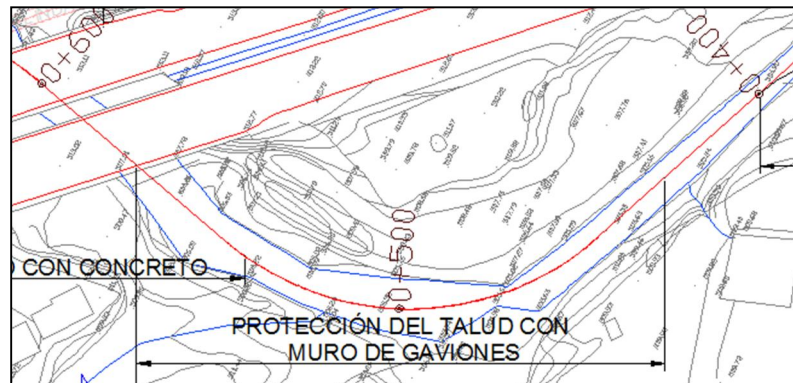


Figura 24. Ubicación en planta del muro de gaviones. Nota. Elaboración de los autores.

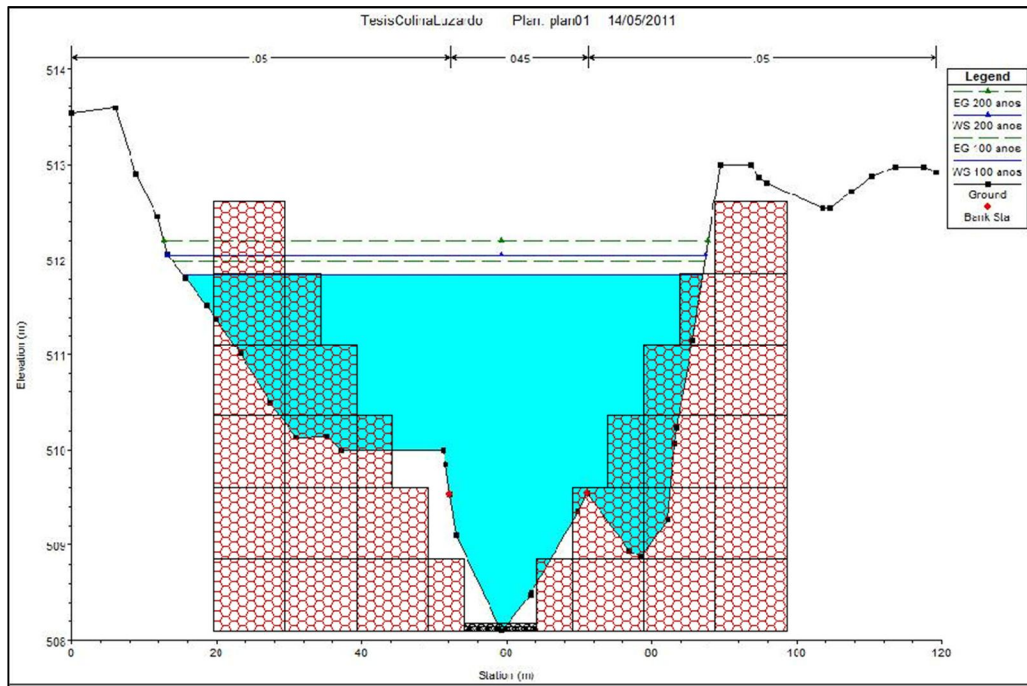


Figura 25. Detalle del muro de gaviones. Nota. Elaboración de los autores.

Se plantea que la cara interior de los gaviones propuestos sea recubierta de concreto proyectado, a fin de minimizar las pérdidas de finos y los efectos del arrastre y de la socavación por las crecidas del río, otra opción pudiera ser el empleo de geotextiles en la cara interior de los gaviones, pero la alternativa definitiva se seleccionará solo después del respectivo análisis económico.

Las bases de los gaviones deberán ser mínimo la misma altura de los mismos, la sección transversal será la típica (1.0 m por 1.0 m de sección transversal), entramados en sentido horizontal, de tal manera que la relación de pendiente en la cara de la protección debería ser de por lo menos 0.5:1 (H: V).

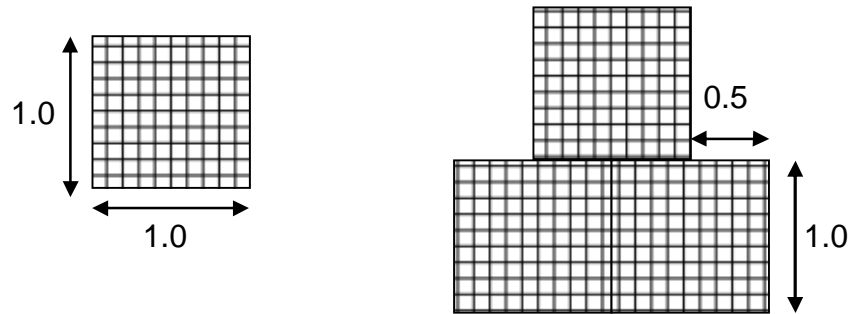


Figura 26. Sección transversal típica de los gaviones y relación de entramado.

Nota. Elaboración de los autores.

Los muros en gaviones son una solución muy utilizada por su relativa flexibilidad ante movimientos del suelo de fundación, por permitir un drenaje fácil y ser construidos con materiales del área haciéndolos especialmente útiles en los taludes adyacentes a ríos.

De forma similar se deberá proteger el fondo del cauce desde la progresiva 0+750 hasta la progresiva 0+850, se debe analizar la posible socavación entre el lecho natural y la losa de concreto propuesta. De la progresiva 0+750 hasta la progresiva 1+048.35 se plantea la rectificación del cauce, de esta manera se aumenta la sección y se logra estabilizar las márgenes del río.

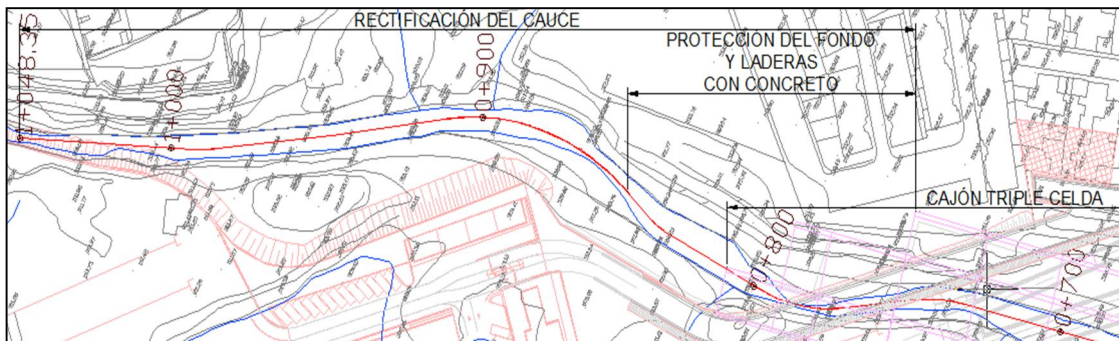


Figura 27. Ubicación en planta de las protecciones antes mencionadas. Nota.

Elaboración de los autores.

Como el río Retobo presenta un régimen de llanura, existe una alta tendencia a inundar las áreas adyacentes, se propone conservar desde la progresiva 0+840 a la progresiva 1+048,35 la planicie de inundación del río, aprovechando la vegetación presente que actúa como protección natural, reduciendo el uso de estructuras hidráulicas.

Sin embargo, se tiene proyectado para la zona Oeste del cauce uno de los puestos de mantenimiento de la línea férrea, por lo cual, conviene analizar una propuesta de subdrenaje que se adapte a las condiciones de inundación del área, respetando los límites que establece la Ley Forestal de Suelos y de Aguas en su Artículo 17, que declara como Zonas Protectoras una zona mínima de 25 metros de ancho a ambas márgenes para los cursos no navegables.

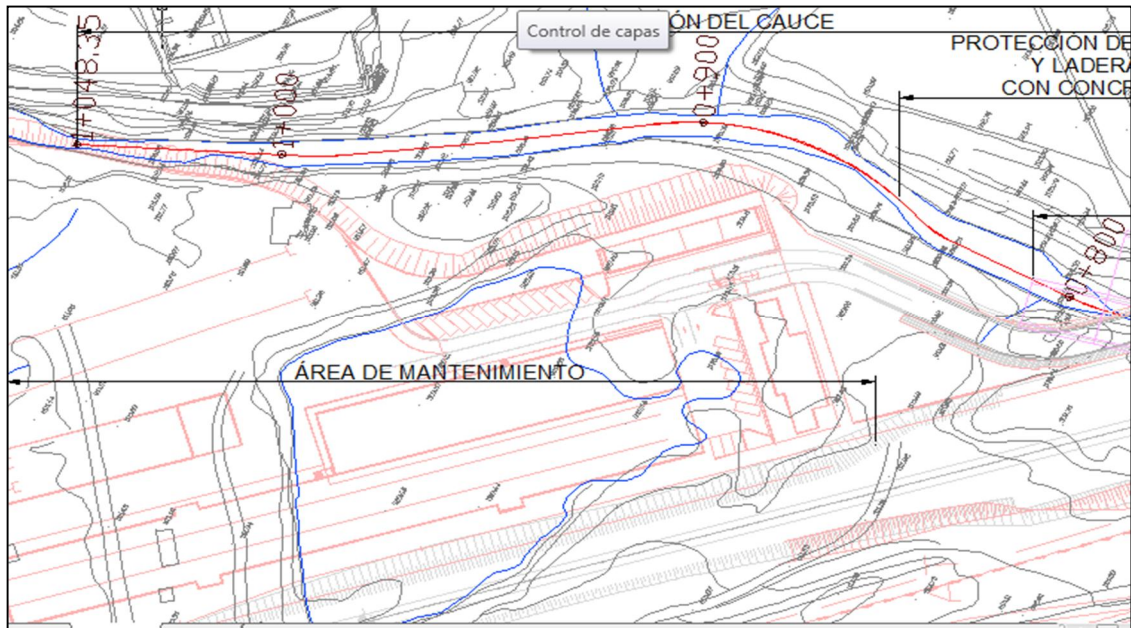


Figura 28. Planicie de inundación del río Retobo donde se prevé la construcción del patio de mantenimiento de la línea férrea. Nota. Elaboración de los autores.

La sección de las protecciones laterales de las riberas del cauce deben ser convergentes hacia los cajones, se aumentará la sección hidráulica del cauce progresivamente hasta que se iguale con la sección de los cajones de concreto que darán paso a la línea del ferrocarril. Igualmente se proponen muros de contención en ambos extremos, entre la salida de los cajones y el ingreso bajo la estructura del Puente de la Autopista Valencia - Puerto Cabello, para dar continuidad a las estructuras, y confinar al flujo mientras pasa por ellas.

Debido a lo cerca que se encuentra la autopista del alineamiento del cauce y a la sinuosidad que presenta el río Retobo aguas abajo del cajón hidráulico propuesto, cabe considerar la construcción de un muro que proteja el talud de la vía desde la progresiva 0+320 hasta la progresiva 0+380, así como la rectificación del cauce entre las progresivas 0+300 y 0+400.

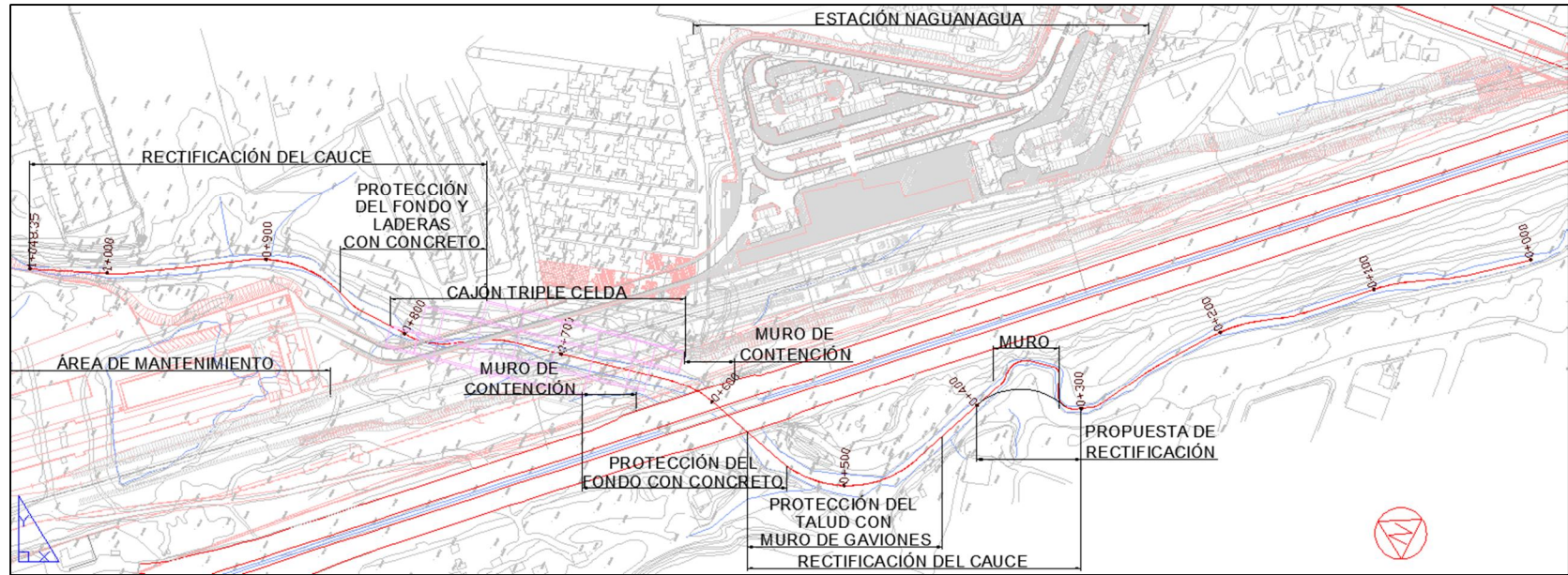


Figura 29. Ubicación en planta del muro de contención y la propuesta de rectificación. Nota. Elaboración de los autores.

Fuera del tramo en estudio aguas abajo del cajón hidráulico, se observa que parte del río Retobo está canalizado en concreto con una sección trapecial, tal como se muestra en el ANEXO A-8. Por lo cual, es posible que se continúe con canalización aguas arriba hasta la salida del cajón triple celda propuesta, dada la magnitud del proyecto y el creciente desarrollo urbano de la zona, solución que mitiga el fenómeno de agradación del río por

presentar un flujo subcrítico, incrementa la capacidad de transporte de sedimentos y la evacuación eficiente en caso de caudales extremos.

Para controlar la erosión producida por la lluvia y por la escorrentía del cauce en la superficie del talud, se puede emplear la siembra de coberturas vegetales como especies arbustivas de poca altura, que cubran y protejan al suelo, contribuyendo a disminuir la velocidad del agua, disipar su energía, y a su vez actúan como filtro superficial, reduciendo el transporte de sedimentos. Hoy día, se aplican técnicas de revegetalización combinadas con estructuras inertes como gaviones y muros, lo que representa un impacto positivo para el medio ambiente de la zona a intervenir.



OBRA	PROGRESIVAS		OBRA	PROGRESIVAS	
	DESDE	HASTA		DESDE	HASTA
REVEGETALIZACIÓN	0+000	1+048	LOSA DE CONCRETO	0+560	0+640
PROPUESTA DE RECTIFICACIÓN	0+300	0+400	MURO DE CONTENCIÓN	0+610	0+630
RECTIFICACIÓN	0+300	0+550	MURO DE CONTENCIÓN	0+620	0+640
MURO	0+320	0+380	LOSA DE CONCRETO	0+750	0+850
MURO DE GAVIONES	0+450	0+550	RECTIFICACIÓN	0+750	1+048

Figura 30. Propuesta de Obras. Nota. Elaboración de los autores.

CONCLUSIONES

Las características y condiciones hidráulicas de la cuenca y el río Retobo que presenta actuales son:

La cuenca tiene un área de 30,7 Km², valor que la define como una cuenca de gran tamaño. Los estudios hidrológicos muestran los valores de caudal de 212 m³/s y 244 m³/s para unos períodos de retorno de 100 y 200 años respectivamente.

El suelo característico es de tipo granular, densa vegetación en las márgenes del río, desarrollos urbanos en las adyacencias de la planicie de inundación, los cuales influyen de diversas maneras en la velocidad de infiltración. El río presenta un alineamiento sinuoso con presencia de meandros, su escorrentía es perenne pero variable, con cambios instantáneos en caudal y tirante, la pendiente aproximada en el tramo en estudio es de 5,6‰ y la velocidad promedio del flujo es de 2.39 m/s, lo cual incide directamente en la baja capacidad que tiene el río para transportar sedimentos.

Mediante la aplicación del software de cálculo HEC-RAS se determinó la suficiencia del cauce principal, la altura a la cual llegaría el agua y las áreas que serán inundadas, en función de la forma del cauce, de la pendiente y de su naturaleza.

La utilización de este programa para el análisis de obras hidráulicas presenta la ventaja de que una vez hecho el trabajo inicial de recopilación e introducción de los datos requeridos, permite analizar distintas hipótesis. El programa calcula las características del flujo en el cajón, la elevación del flujo

en la entrada, y permite determinar la capacidad de descarga de distintos tipos de conductos, facilitando así los análisis de diferentes soluciones.

Una vez desarrollada cada una de las fases que contempla este estudio, se genera una situación que obliga a la estabilización y rectificación de los bordes del río Retobo, con lo cual se hace factible la canalización del caudal, estableciendo controles de velocidad aguas arriba del cajón que permitirán mejorar su funcionamiento.

Las obras propuestas corresponden al uso de canalizaciones en concreto tanto aguas arriba como aguas del cajón triple celda, que mejoran las condiciones hidráulicas del río, permitiendo evacuar de forma eficiente caudales extremos, contribuyendo a la estabilidad de las márgenes del río evitando fenómenos de socavación y erosión.

Se plantean muros de gaviones, en varias zonas del tramo en estudio por ser una solución muy utilizada en Venezuela gracias a su relativa flexibilidad y por el hecho de ser construidas con materiales del área, haciéndolos especialmente útiles en los taludes adyacentes a ríos y corrientes. Las técnicas de revegetalización combinadas con las estructuras inertes de ingeniería como gaviones y muros, son una buena propuesta para solventar problemas de erosión e inestabilidad en taludes y representa un impacto positivo para el medio ambiente de la zona a intervenir.

RECOMENDACIONES.

Hacer una inspección del lugar para corroborar los datos que se tienen, y poder hacer una mejor estimación de los cambios que irán ocurriendo en la zona con el pasar de los años, de esta manera se obtiene una buena solución para minimizar los riesgos y evitar el colapso de las obras.

De no contar con toda la información necesaria se recomienda aplicar técnicas de recolección de datos adecuadas, como la observación y la entrevista, de esta manera se tiene una idea del comportamiento de la naturaleza del lugar para así estimar los coeficientes de seguridad a ser adoptados en el diseño.

En suelos potencialmente licuables, se debe mejorar el terreno de fundación y/o se deben dimensionar las fundaciones de manera tal de poder soportar las cargas durante un sismo.

Debe ser constante el mantenimiento de las estructuras, de lo contrario se origina una obstrucción al flujo por acumulación de sedimentos y se modifica el comportamiento del cauce.

Calcular la socavación tanto para el diseño como para la conservación de las obras hidráulicas, en especial de los puentes, ya que su colapso muchas veces cobra vidas humanas y conlleva a grandes pérdidas económicas.

Estudiar el impacto ambiental y socio-cultural generado en la zona por el paso del Ferrocarril Ezequiel Zamora.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcaldía de Naguanagua. (s.f.). [Página Web en línea]. Disponible: <http://www.alcaldianaguanagua.gov.ve/Caracteristicas.html> [Consulta: 2011, Enero 15].
- Alcañiz, J. M. (2008). Erosión: evaluación del riesgo erosivo y prácticas de protección del suelo. En Rodríguez, R. (Comp.), Evaluación y prevención de riesgos ambientales en Centroamérica (pp. 125-146). Girona, España: Documenta Universitaria.
- Arias, F. (2006). El proyecto de investigación: Introducción a la metodología científica. (5a ed.). Caracas: Episteme.
- Balestrini, M. (2002). Como se elabora el proyecto de investigación. (2ª.ed.) Caracas: BL consultores y asociados.
- Bolinaga, J. J. (1999). Proyectos de Ingeniería hidráulica: Volumen 2. Caracas: Fundación Polar.
- Camacho, F. (2005). Diseño de obras de drenaje: Volumen I: Actualización de criterios hidráulicos para el diseño hidráulico-fluvial de puentes. Caracas: Fundación Juan José Aguerreverde.
- Farías, H. D. (2006, Agosto). Diseño de protecciones de márgenes de ríos con rip-rap y cubiertas flexibles: teorías y aplicaciones. Ponencia presentada en el III Congreso Iberoamericano sobre Control de la Erosión y los Sedimentos, Buenos Aires.
- French, R. H., (1998). Hidráulica de canales abiertos. México: Mc Graw Hill.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., Baptista Lucio, P. (2008). Metodología de la Investigación. México: Mc Graw Hill.

Instituto de Ferrocarriles del Estado. (2011). [Página Web en línea]. Disponible: <http://www.ife.gob.ve/> [Consulta: 2011, Enero 20]

Ley Forestal de Suelos y de Aguas (1966, Enero 26). Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela, 1.004 (Extraordinario), Enero 26, 1966.

Marcano, H. (2011, Marzo). Estudio geotécnico: Exploración del subsuelo y condiciones de fundación. Valencia: Consorcio Grupo CONTUY.

Millán López, J. A. (2005, Agosto). Guía ambiental para evitar, corregir y compensar los impactos de las acciones de reducción y prevención de riesgos en el nivel municipal. [Boletín del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia].

Morassutti Fabris, G. F. (2006, Agosto). Evaluación de las obras de control de torrentes construidas por CORPOVARGAS a raíz del evento de febrero de 2.005. Ponencia presentada en el III Congreso Iberoamericano sobre Control de la Erosión y los Sedimentos, Buenos Aires.

Olguín Gómez, S. (2006). Hidráulica de ríos: Obras de protección y control de cauces. Trabajo de grado no publicado, Instituto Politécnico Nacional, México: Zacatenco.

Pilán, M. T., Trejo Chazarreta, J., Pece Azar, F. J., Mattar, M. T., Olmos, L. A. (2005, Noviembre). Análisis de metodologías para predecir la socavación

local en pilas complejas. Ponencia presentada en el Segundo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Neuquén, Argentina.

Radio Mundial. (s.f.). [Página Web en línea]. Disponible: <http://www.radiomundial.com.ve/yvke/noticia.php?29465> [Consulta: 2010, Junio 11].

Rodríguez Llamozas, J. (2010). Carreteras: Drenaje: Trabajo de ascenso no publicado, Universidad de Carabobo, Valencia.

Roldán, L. M. (2002). La evolución del ferrocarril [Documento en línea]. Universidad de Costa Rica, Costa Rica. Disponible: <http://www.cientec.or.cr/ciencias/innovacion/ferrocarril.html> [Consulta: 2010, Junio 10].

Sabino, C. (1992). El proceso de investigación. Caracas: Ed. Panapo.

Suárez Villar, L. M. (2002). Ferrocarril La Encrucijada . Puerto Cabello: Estudio hidrológico para la determinación de los caudales de diseño del drenaje transversal de la vía. Valencia: Consorcio Grupo CONTUY.

Suarez, J. (1998). Deslizamientos: análisis geotécnico. Bucaramanga, Colombia: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.

Suarez, J. (1998). Deslizamientos: técnicas de remediación. Bucaramanga, Colombia: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.

Universidad Pedagógica Experimental Libertador, Vicerrectorado de Investigación y Postgrado. (2006). Manual de trabajos de grado de especialización y maestría y tesis doctorales. Caracas: FEDUPEL.

ANEXO A-1

LISTADO DE ALGUNOS MÉTODOS DE REMEDIACIÓN DE LAS AMENAZAS POR DESLIZAMIENTO.

Sistema de Remediación.	Opciones de algunos Métodos Específicos.
Prevención de la Amenaza o el Riesgo	Concientización de la comunidad. Aviso o alarma. Normas y códigos técnicos.
Elusión del problema	Relocalización de la obra. Remoción de los materiales inestables. Instalación de un puente o un túnel. Construir variantes.
Reducción de las fuerzas actuantes	Cambio del alineamiento para disminuir alturas. Conformación de la superficie del terreno. Drenaje de la superficie. Drenaje internamente. Reducción del peso del material.
Incremento de las fuerzas resistentes	Colocación de un contrapeso. Construcción de estructuras de contención. Colocación de llaves de cortante en la superficie de falla.
Aumento de la resistencia del suelo	Subdrenaje Refuerzo Biotecnología Tratamiento químico (inyecciones) Tratamiento térmico Compactación profunda Columnas de piedra

Nota. Tomado de Deslizamientos: Técnicas de Remediación (p. 5) por J. Suarez (s.f). Bucaramanga.

ANEXO A-2

MÉTODOS DE PREVENCIÓN PARA LA AMENAZA O EL RIESGO A LOS DESLIZAMIENTOS.

Método	Ventajas	Desventajas
Disuasión o medidas de restricción	Generalmente son económicas y rápidas de construir.	Se requiere un espacio grande en la mitad del talud.
Planeación del uso de la tierra	Sirve al mismo tiempo, para controlar las aguas lluvias.	Los cantos pasan por encima fácilmente.
Códigos técnicos	Controlan los bloques que pueden generar riesgo.	No resisten el impacto de los grandes bloques.
Construcción de obras de prevención	Tratan de impedir la caída de los bloques.	Con frecuencia no son suficientemente fuertes para impedir los caídos.
Aviso y alarma	Los muros alcanzá+ retienen las masas en movimiento.	Se pueden necesitar estructuras algo costosas.

Nota. Tomado de Deslizamientos: Técnicas de Remediación (p. 7) por J. Suarez (s.f). Bucaramanga

ANEXO A-3

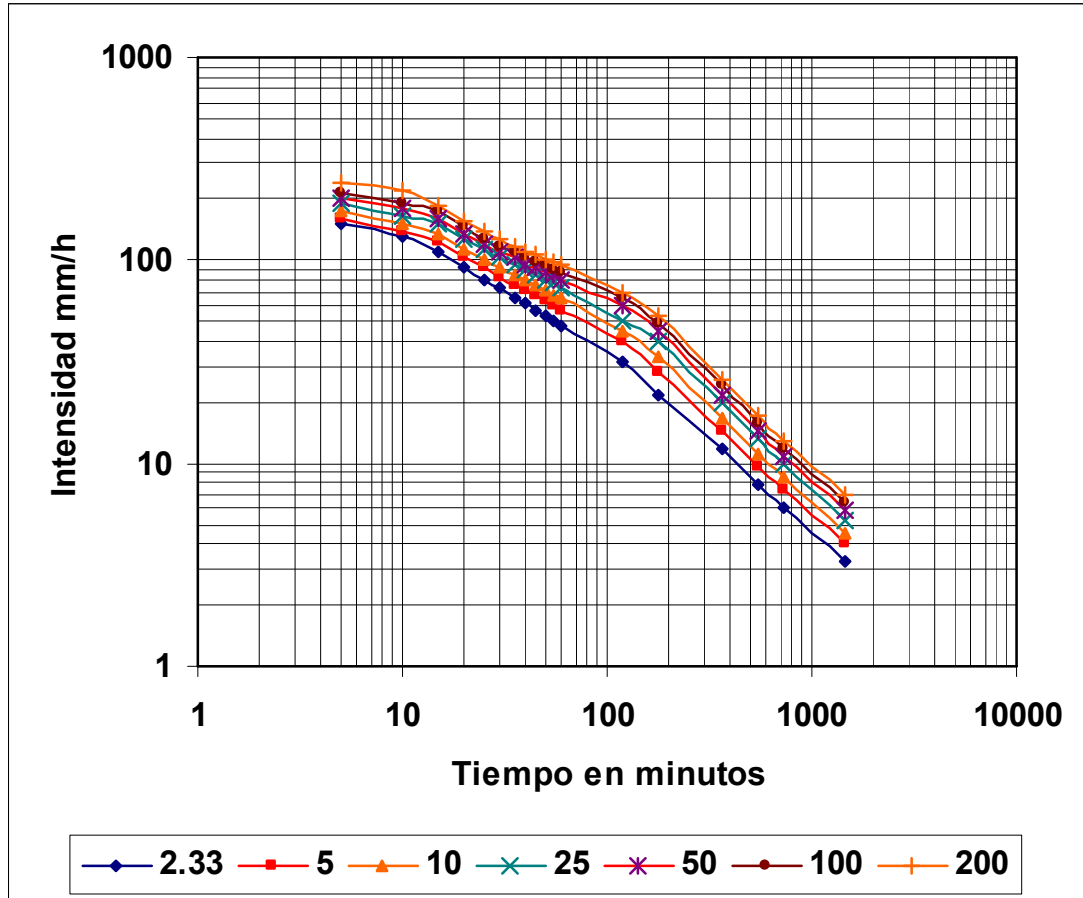
ESTACIÓN LA ENTRADA. INTENSIDAD EN MM/H

Duración Minutos	Período de Retorno en años						
	2.33	5	10	25	50	100	200
5	150.0	160.0	177.0	192.0	202.0	212.0	244.0
10	130.0	140.0	152.0	167.0	178.0	190.0	220.0
15	109.9	124.3	135.6	150.3	161.7	173.0	183.4
20	92.6	104.7	114.8	127.4	136.5	145.5	155.0
25	81.0	92.0	101.4	112.9	121.1	129.1	138.0
30	72.6	83.1	92.0	102.8	110.5	118.1	126.5
35	66.2	76.3	84.8	95.2	102.7	110.0	118.0
40	61.1	70.9	79.1	89.2	96.5	103.7	111.4
45	57.0	66.6	74.5	84.4	91.6	98.7	106.1
50	53.5	62.9	70.7	80.4	87.5	94.6	101.7
55	50.5	59.8	67.4	76.9	84.0	91.1	98.1
60	47.9	57.2	64.6	74.0	81.0	88.1	94.9
120	31.8	40.0	45.0	50.0	60.0	65.0	70.0
180	22.0	28.2	33.2	39.5	44.3	48.9	53.6
360	11.7	14.5	16.8	19.7	21.9	24.0	26.2
540	7.9	9.8	11.3	13.2	14.6	16.0	17.4
720	6.1	7.4	8.4	9.8	10.8	11.8	12.8
1440	3.3	4.0	4.6	5.3	5.8	6.4	6.9

Nota. Tomado de Ferrocarril La Encrucijada . Puerto Cabello: Estudio hidrológico para la determinación de los caudales de diseño del drenaje transversal de la vía (p. 8) por L. M, Suárez Villar, 2002, Valencia: Consorcio Grupo CONTUY.

ANEXO A-4

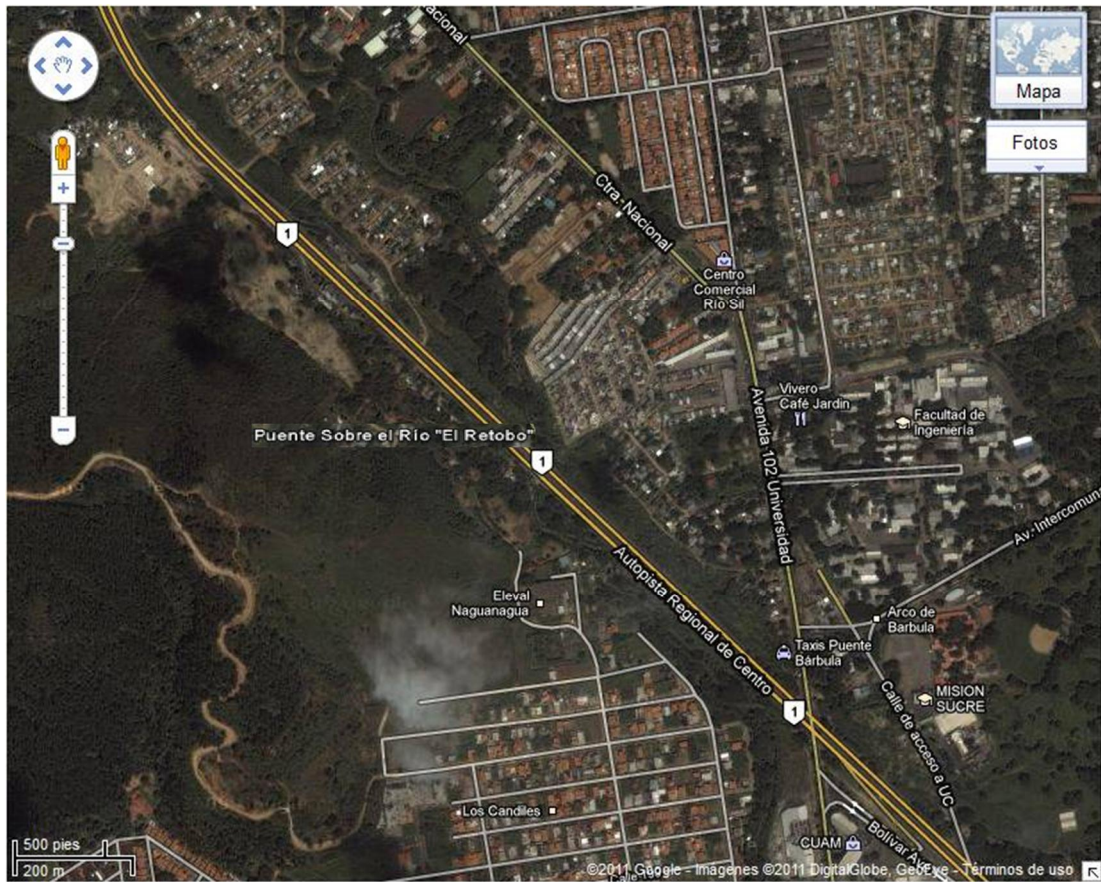
CURVAS DE INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA. ESTACIÓN LA ENTRADA



Nota. Tomado de Ferrocarril La Encrucijada . Puerto Cabello: Estudio hidrológico para la determinación de los caudales de diseño del drenaje transversal de la vía (p. 9) por L. M, Suárez Villar, 2002, Valencia: Consorcio Grupo CONTUY.

ANEXO A-5

FOTO SATELITAL DE LA ZONA EN ESTUDIO.

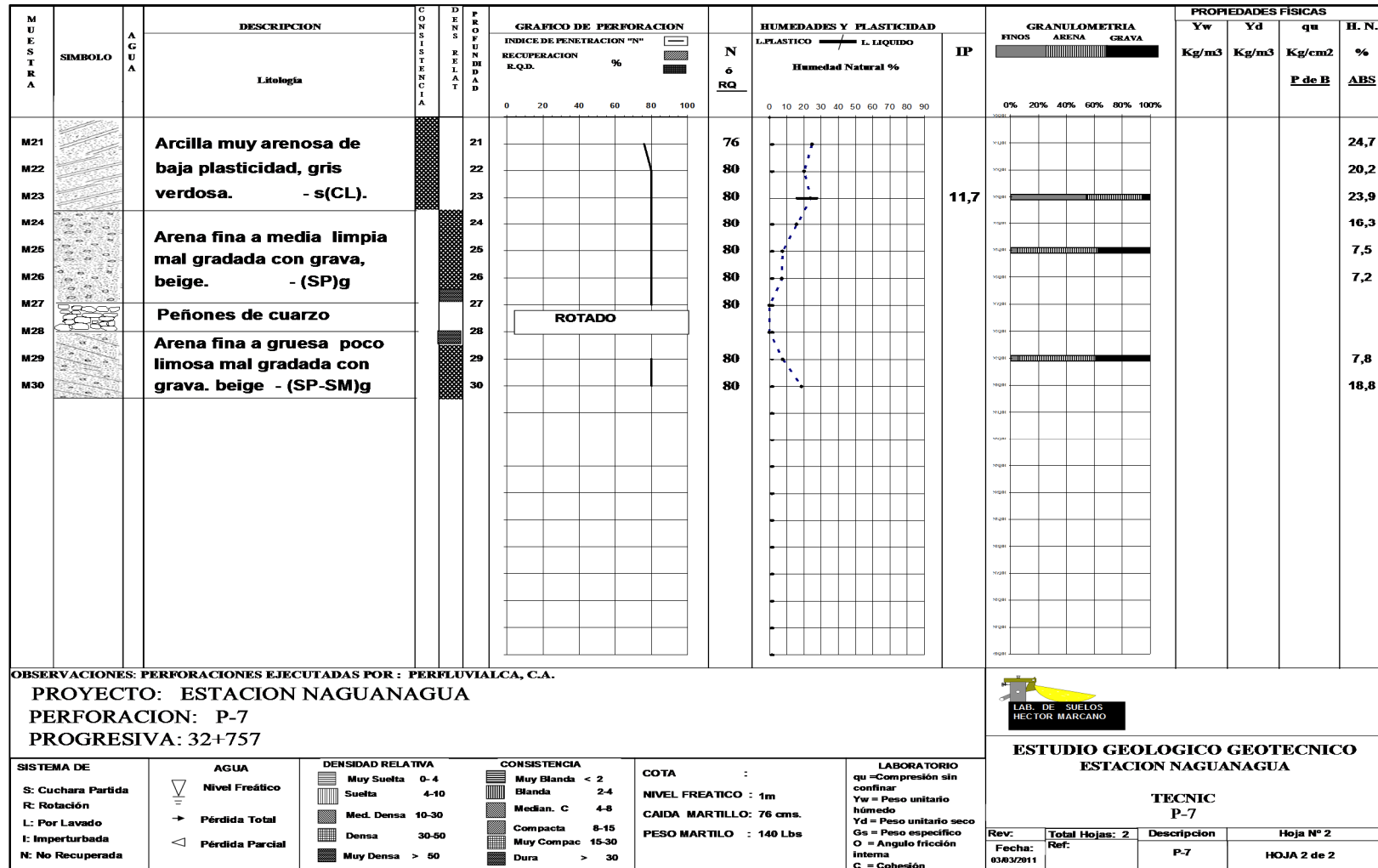


Nota. Tomado de Google Earth.

En la imagen se aprecian las vialidades y el desarrollo urbanístico presente en los alrededores del río, al igual que la densa vegetación que rodea los márgenes del cauce.

ANEXO A-6

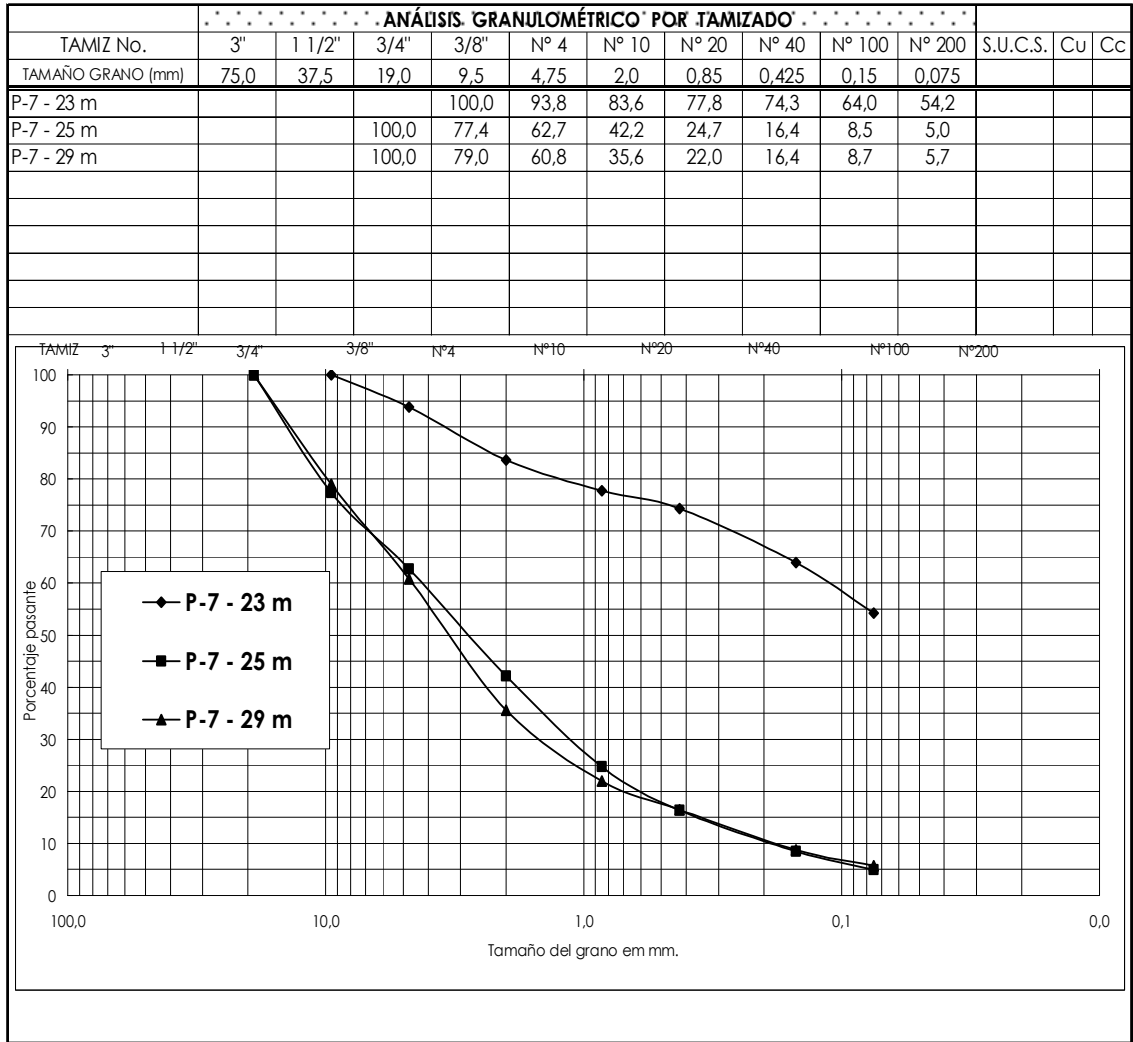
ESTUDIO GEOLOGICO - GEOTECNICO. PERFORACIÓN N 7



Nota. Tomado de Marcano, H. (2011). Estudio geotécnico: Exploración del subsuelo y condiciones de fundación. Valencia: Consorcio Grupo CONTUY.

ANEXO A-7

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO, PERFORACIÓN N 7



Nota. Tomado de Marcano, H. (2011). Estudio geotécnico: Exploración del subsuelo y condiciones de fundación. Valencia: Consorcio Grupo CONTUY.

ANEXO A-8



Canalización del río Retobo, aguas abajo del tramo en estudio.