



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE CIVIL**

***“Metodología para la estabilización
del cauce de un río de llanura
para la protección de puentes”***

**DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
MASTER EN INGENIERÍA VIAL**

Alumnos: Ing. Joanna Bravo Granda
 Ing. Néstor León Cadena

Director de Tesis : Ing. Gustavo Yáñez
Revisores : Ing. José Salvador
 Ing. Miguel Araque

Quito, 2011



Dedicatoria

El presente trabajo va dedicado a todo el pueblo ecuatoriano, valiente, creativo y trabajador, que a pesar de su realidad nunca deja de pelear para salir adelante y forjarse un futuro mejor. Ojalá la presente investigación coadyuve a alcanzar sus objetivos



Agradecimiento

A la Virgen María, a Dios Padre, a Jesús y al Espíritu Santo que fueron nuestra inspiración y son los guías de nuestras vidas.

A nuestras familias que en una muestra de inmenso amor, generosamente sacrificaron gran parte de su tiempo para que podamos culminar el presente trabajo.

Al señor ingeniero José Salvador, coordinador de la maestría de ingeniería vial, al señor ingeniero Miguel Araque, colaborador incondicional en todo el trabajo y a nuestro director de tesis el señor ingeniero Gustavo Yáñez, un agradecimiento especial por ser caballeros de bien y maestros entregados en alma y corazón a la enseñanza.

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	4
CAPÍTULO 1	
EROSIÓN FLUVIAL	6
1.1. RESISTENCIA AL FLUJO	8
1.1.1. Sin arrastre	9
1.1.2. Con arrastre	10
1.2. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	12
1.2.1. Método de Meyer–Peter y Müller	12
1.2.2. Método de Engelund	13
1.3. DISEÑO DE CAUCES CON ARRASTRE	13
1.3.1. Gasto formativo	13
1.3.2. Cauces estables	14
1.3.2.1. Método de Altunin para material granular	14
1.3.2.2. Método de Maza – Cruickshank para cauces arenosos	16
1.3.2.3. Método de Blench para cauces arenosos o con material cohesivo	18
CAPÍTULO 2	
TEORÍA DEL USO DE ESPIGONES EN LA PROTECCIÓN DE RIBERAS	24
2.1. OBJETIVOS Y FUNCIONES DEL USO DE ESPIGONES	24
2.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE ESPIGONES	25
2.3. FORMAS DE LOS ESPIGONES	26
2.3.1. Espigones permeables	27
2.3.2. Espigones no permeables o impermeables	28
2.4. PARTES CONSTITUYENTES DE LOS ESPIGONES	29
2.5. INFORMACIÓN BÁSICA PARA EL DISEÑO DE ESPIGONES	31
2.5.1. Topografía y batimetría	31
2.5.2. Secciones transversales o riberas a ser protegidas	31
2.5.3. Características hidráulicas de la corriente	31
2.5.4. Granulometrías y peso específico de los materiales de fondo y orillas	32
2.5.5. Tipo de espigón y materiales de construcción	32
CAPÍTULO 3	
ESTABILIDAD Y RECTIFICACIÓN DE CAUCES	34

3.1. DISEÑO DE UN SISTEMA DE DEFENSA CON ESPIGONES	35
3.1.1. Localización en planta	36
3.1.2. Longitud de los espigones	38
3.1.3. Forma de los espigones en planta	39
3.1.4. Separación entre espigones	40
3.1.5. Separación y longitud de los primeros espigones	42
3.1.6. Pendiente longitudinal, elevación y ancho de la cresta de los espigones	42
3.1.7. Orientación de los espigones	44
3.1.8. Permeabilidad de los espigones y materiales de construcción	45
3.1.9. Socavación local al pie de espigones	45
CAPÍTULO 4	
ESTABILIDAD DE UNA ESTRUCTURA DE GAVIONES	49
CAPÍTULO 5	
METODOLOGÍA PARA EL USO DE ESPIGONES SUCESIVOS DE GAVIONES	56
CAPÍTULO 6	
INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DE LAS PILAS INTERMEDIAS, COMO PROTECCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE UN PUENTE	62
6.1. FACTORES EXTERNOS QUE PUEDEN AFECTAR LA ESTABILIDAD DE UN PUENTE	64
6.2. CÁLCULO DE LA PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN	65
6.2. CÁLCULO DE EXTENSIÓN DE LA SOCAVACIÓN	67
CAPÍTULO 7	
ASPECTOS TEÓRICOS EN MODELOS	69
7.1. INTRODUCCIÓN	69
7.2. CONDICIONES DE SIMILITUD	69
7.2.1. Similitud hidráulica	73
7.2.2. Similitud geométrica	73
7.2.3. Similitud cinemática	74
7.2.4. Similitud dinámica	75
7.3. EFECTOS DE ESCALA	76
7.4. TIPOS DE MODELOS HIDRÁULICOS	77
CAPÍTULO 8	
APLICACIÓN PRÁCTICA DEL MÉTODO	79
8.1. ESTUDIO HIDROGÓGICO – HIDRÁULICO	79

8.2.	ESTUDIO FLUVIOMORFOLÓGICO	82	
8.2.1.	Caracterización de la cuenca de drenaje	82	
8.2.2.	Determinación del coeficiente de rugosidad "n"	83	
8.3.	ESTUDIO HIDROLÓGICO	84	
8.3.1.	Generalidades sobre las características climáticas	84	
8.3.1.1.	Clima de la cuenca del río Napo	84	
8.3.2.	Determinación de los niveles de la superficie libre del agua y velocidades medias en el área de estudio	88	
8.4.	ESTUDIO SEDIMENTOLÓGICO	89	
8.4.1.	Evaluación teórica de la capacidad de transporte en el tramo en estudio	90	
8.5.	INFORMACIÓN DE MECÁNICA DE SUELOS	91	
8.6.	CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICO – GEOTÉCNICA DEL SECTOR MARGEN IZQUIERDA	93	
8.7.	RECUPERACIÓN DE UNA PARTE DE LA RIBERA DEL RÍO NAPO, UTILIZANDO LA METODOLOGÍA PROPUESTA	94	
8.7.1.	Trazar el eje del río o de la rectificación	94	
8.7.2.	Longitud de los espigones	97	
8.7.3.	Ángulos de orientación y de expansión de los espigones	97	
8.7.4.	Separación de espigones en curvas	98	
8.7.5.	Pendiente longitudinal de la corona	98	
8.7.6.	Elevación de la corona	98	
8.7.7.	Ancho de la corona o del espigón	98	
8.7.8.	Erosión local en el extremo del espigón	99	
8.8.	RESULTADOS ESPERADOS EN LA ZONA DE INTERVENCIÓN	101	
CAPÍTULO 9			
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES			107
9.1.	CONCLUSIONES	107	
9.2.	RECOMENDACIONES	108	
9.3.	BIBLIOGRAFÍA DE CONSULTA	109	
ANEXOS			111

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1	Formulario para la evaluación del estado natural del río
Anexo 2	Perfiles de socavación
Anexo 3	Registros de perforación y perfiles estratigráficos

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1	Proceso de erosión hídrica y su contribución a la inestabilidad	7
Cuadro 2	Capacidad de sedimentación	7
Cuadro 3	Valores de la "n" de Manning para diferentes acabados	19
Cuadro 4	Coefficientes de viscosidad dinámica y cinemática del agua en función de la temperatura	20
Cuadro 5	Valores de velocidad V_{ϕ} en función del diámetro medio de las partículas cuando en tirante es de 1 m	20
Cuadro 6	Valores de A y m para cauces estables	21
Cuadro 7	Fórmulas para el cálculo de cauces estables formados en terrenos de arena a guijarros, partículas con diámetro mayor de 1 mm	21
Cuadro 8	Fórmula de diseño para cauces estables en grava o boleó	22
Cuadro 9	Ángulo recomendado entre espigón y orilla	44
Cuadro 10	Factor de corrección por forma	66
Cuadro 11	Ángulos de incidencia	66
Cuadro 12	Factor de corrección por condición del lecho	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Tipos de cauce	8
Figura 2	Configuraciones de fondo en cauces arenosos	9
Figura 3	Elementos del espigón	30
Figura 4	Obras de protección marginal	34
Figura 5	Trazo del eje del río y líneas extremas de defensa en una rectificación	36
Figura 6	Eje del río y líneas extremas de defensa para proteger márgenes actuales	36
Figura 7	Eje del río y radios de curvatura	38
Figura 8	Espigón apoyado en la margen en ríos de planicie	39
Figura 9	Forma en planta de los espigones	39
Figura 10	Evaluación del espaciamiento entre espigones	40
Figura 11	Método para obtener el espaciamiento entre espigones	41
Figura 12	Disposición transversal de espigones	42
Figura 13	Construcción de espigones en función de la altura de las márgenes	43
Figura 14	Erosión del fondo durante la construcción	46
Figura 15	Método para evitar erosión durante la construcción	46
Figura 16	Vista lateral y en planta de un espigón de gaviones	49
Figura 17	Espigón con platea	51
Figura 18	Perspectiva de un espigón	52
Figura 19	Patrones de socavación para diferentes formas de pilas	63
Figura 20	Consideración del perímetro mojado	73

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Rugosidad vs diámetro de las partículas	10
Gráfico 2	Velocidad de caída vs relación peso específico partícula – agua	12

INTRODUCCIÓN

En el Ecuador, la principal Entidad rectora de los sistemas viales es el Ministerio de Transporte y Obras Públicas, apoyada por los gobiernos regionales y seccionales, comparten la tarea de brindar un adecuado servicio vial dentro de nuestro territorio.

En tal razón, el MTOP, como rector del Sistema Nacional del Transporte Multimodal, formula, implementa y evalúa políticas, regulaciones, planes, programas y proyectos que garanticen una red de transporte seguro y competitivo, que minimice el impacto ambiental y contribuya al desarrollo social y económico del País.

La variabilidad en las necesidades que originan el movimiento de las personas, hacia los diferentes polos de desarrollo, requiere de un sistema vial que al menos presente características de servicio aceptables, que garanticen un flujo adecuado y constante, razón por la cual, la protección del nacimiento, riberas y cursos de agua y la recuperación del cauce cuando se encuentra degradado, se convierte en un parámetro estratégico dentro de la calidad en la operación de una vía, por lo que establecer medidas correctivas usando vegetación protectora, aislando las áreas afectadas y estableciendo obras físicas en riberas y cauces, coadyuven a evitar la pérdida de suelo, disminución de la calidad del agua, formación de bancos de arena que cambian el curso de las aguas por efecto de la erosión y arrastre de sedimentos, que finalmente se reflejan en potenciales riesgos para la estabilidad de estructuras viales esenciales como son los puentes.

Ante el creciente interés de la colectividad sobre el recurso agua, se ha hecho evidente la necesidad de definir su uso, disponibilidad, funcionalidad, aprovechamiento, es decir mantener un control definitivo. Es por lo tanto crucial definir políticas de su explotación, de tal manera que se garantice su sustentabilidad. A simple vista, este tema no tendría nada que ver con el sector vial, sin embargo, le afecta al momento en que los ríos se vuelven sinuosos descontroladamente, se producen inundaciones esporádicas, avenidas excepcionales, fenómenos que en mucho de los casos son provocados por la excesiva deforestación en las riberas, explotación minera de sus lechos de manera anti técnica y hasta captaciones para riego sin visión del bien común.

Son muchas causas las que coadyuvan a la destrucción de las riberas. Como causas directas podemos mencionar a la agricultura y ganadería, minería, industria, transporte y comunicación y el desarrollo de urbanizaciones; así también, están causas indirectas como presas y embalses, canalizaciones, descoordinada protección de márgenes y hasta la contaminación.

Queda claro entonces, que existen serios motivos para la conservación de las riberas, mas aun si su descontrol incide directamente sobre las obras de vialidad, las cuales como se ha dicho anteriormente, son el eje fundamental de la producción de un país en desarrollo como el nuestro, siendo indispensable establecer un nuevo enfoque en la gestión de ecosistemas fluviales, donde se incluya no solo la vigilancia, control y recuperación de las aguas, sino también su restauración y conservación de las riberas, pero de una manera técnica y responsable tanto con la sociedad y con el medio ambiente, proponiendo soluciones tales como homogeneizar taludes, establecer vegetación protectora, limpieza controlada de cauces y finalmente la construcción de obras que protejan y definan un cauce, es decir el uso de elementos simples, que restrinjan el grado de libertad de un río.

Es en este punto, donde se identifica la poca o inexistente técnica aplicada en nuestros ríos, afectados constantemente por severos inviernos y hasta el fenómeno de El Niño, los que han dejado en evidencia que se ha hecho como práctica común, el uso generalizado de escolleras de piedra suelta y muros de gaviones sin un análisis técnico del problema a solucionar, generando egresos muchas veces desperdiciados y hasta injustificados, lo que finalmente vuelve a desembocar en dejar expuesto al colapso los sistemas viales y específicamente los puentes, cuyo costo muchas veces los hace irremplazables.

APORTES ESPERADOS DE LA TESIS

El tema replanteado por los autores de la presente tesis, persigue buscar una solución de fácil implementación, fundamentada en una base técnica y en las experiencias obtenidas durante el ejercicio profesional en el control y fiscalización de contratos de obra del Estado.

La Tesis tiene el objetivo de aportar con una herramienta simplificada, constituida por una metodología producto del análisis de las mejores prácticas y de uso generalizado en

nuestro medio, que además de ser efectivas en el control de la erosión de riberas son económicas, frente a otras alternativas que para el medio local resultan inejecutables.

FUNDAMENTACIÓN DEL TEMA ELEGIDO

Ante la notoria falta de información sobre el estado y probables riesgos de socavación alrededor de importantes estructuras como las del caso de estudio, los puentes, se evidencia que inicialmente se requiere contar con un sistema centralizado de inventario del estado actual de los puentes que conforman la red vial ecuatoriana. Dicho de otra manera, no se monitorea adecuadamente factores externos que afectan al normal servicio de una vía, los cuales se hacen evidentes únicamente en épocas críticas como es el invierno, siendo muchas veces afectaciones de grandes magnitudes, las cuales, terminan costando importantes sumas de dinero al Estado que difícilmente puede habilitarlas temporalmente y peor aún, de una manera definitiva, sin mencionar el enorme costo social y comercial que implica la interrupción de las vías de comunicación.

Las áreas más vulnerables identificadas en un puente son los estribos, terraplenes de acceso y las pilas intermedias, las que se afectan por ampliaciones del canal ya sea por sedimentación, ampliación o reducción del cauce sea natural o por efecto de la minería, confluencia de flujos de agua, migración divagante del meandro y consecuentemente del thalweg o puntos más bajos que conforman el lecho del río.

Aparecen entonces criterios a considerarse, como socavación general del sector, socavación localizada que afecta a determinados elementos, socavación de largo y corto plazo y la vulnerabilidad a la socavación, definida como el grado para el cual el puente está expuesto al ataque o daño por fuerzas y condiciones que causan dicha socavación.

Estas afectaciones y sus grados de incidencia, son revelados a través de estudios hidrológicos, hidráulicos, de socavación especializada e inspecciones bajo el agua, las cuales permitirán encaminar soluciones económicas de tipo preventivo como:

- Revelación del cauce por medio de excavación y traslado de material del sitio sin importación de materiales y una compactación ligera.
 - Excavación para formar encauzamiento y remoción de materiales
-
-

-
-
- Formación del cauce a su forma apropiada e instalación de protección de erosión con material apto como mampostería, enrocado o concreto (espigones)
 - Renivelación y reconfiguración de la zona afectada. Excavación para los gaviones y espigones.

OBJETIVOS

En el presente trabajo se plantean los siguientes objetivos:

OBJETIVO GENERAL

- Establecer una metodología para la estabilización del cauce de un río de llanura para la protección de puentes, mediante el empleo de espigones sucesivos que controlen de una manera definitiva la erosión sus riberas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Proponer una metodología sencilla y práctica de recopilación de información pero a la vez suficiente que permita conocer en detalle la realidad de la zona escogida para el estudio.
 - Definir los parámetros hidráulicos básicos que se necesitan para aplicar la metodología propuesta.
 - Emplear la experiencia local en el uso de estructuras de gavión en muros de contención para la construcción de espigones sucesivos que redefinan el cauce de un río en la zona de estudio.
-
-

1. EROSIÓN FLUVIAL

El problema fundamental que causa que un cauce sea divagante y ponga en riesgo las estructuras viales, es la erosión fluvial que se presenta en los cursos de agua. La fuerza con la que se movilizan los cuerpos de agua, vence la resistencia de los materiales que conforman los bordes u orillas, produciéndose procesos de socavación lateral y de fondo.

Estos procesos erosivos fundamentalmente movilizan arcillas y limos, pero también otros materiales como arenas, gravas, cantos y bloques, cuyos volúmenes resultan altos, ocasionando que el curso presente cambios, mismos que pueden ser en algunos casos casi instantáneos dependiendo de la fuerza de la corriente.

Son precisamente, los torrentes de agua de régimen ocasional, los que pueden acarrear grandes volúmenes de material, en las épocas de lluvias. Estos procesos dominantes son los que ponen de manifiesto estructuras débiles en los estratos de las riberas o del cauce y que detonan deslizamientos de laderas inestables, poniendo en riesgo las estructuras viales que deben protegerse para garantizar el servicio que presta una vía.

Los torrentes son laboratorios naturales para estudiar la erosión y se dividen en tres partes:

- Cuenca de recepción, donde predomina la excavación
- Canal de desagüe, donde se presenta erosión y acumulación de suelos
- Cono de deyección, donde se forma un “abanico” por acumulación

Los materiales arrastrados por la corriente y que son depositados en los lugares antes mencionados, nos permiten establecer la carga de materiales, tipo, transporte y volumen de sedimentación, facilitando la selección de los mecanismos de trabajo de las corrientes de agua.

Cuadro N° 1

PROCESO DE EROSIÓN HÍDRICA Y SU CONTRIBUCIÓN A LA INESTABILIDAD ⁽¹⁾

Tipo	Acción	Efectos
<i>Erosión interna Por flujo subterráneo</i>	ESCURRIMIENTO SUBSUPERFICIAL	
	<i>Tubificación y cavernas: Debilitamiento interno</i>	<i>Puede originar manantiales, cárcavas y hundimientos</i>
<i>Erosión fluvial</i>	<i>Socavación de fondo</i>	<i>Profundiza el fondo de los cauces naturales</i>
	<i>Socavación lateral</i>	<i>Elimina el soporte de laderas</i>
	<i>Descarga torrencial</i>	<i>Efectos devastadores en las márgenes del cauce</i>

⁽¹⁾ <http://www.galeon.com/geomecanica/cap8.pdf>

El movimiento del agua en canales y su comportamiento erosivos frente a las características de resistencia de los materiales que conforman su sección, el modelo de degradación de un canal desarrollado por Soar y Thorne 2001, ilustra bien este fenómeno; en él se demuestra cómo al colocarse una limitante lateral sea espigón apoyado con muros marginales en las riberas, el agua tiende a profundizar el cauce, y por el contrario, al ser controlado el fondo, el agua tiende a ampliarse lateralmente afectando sus orillas.

A continuación se muestra la capacidad de sedimentación en función de la velocidad del agua y del tipo de material de transporte.

Cuadro N° 2

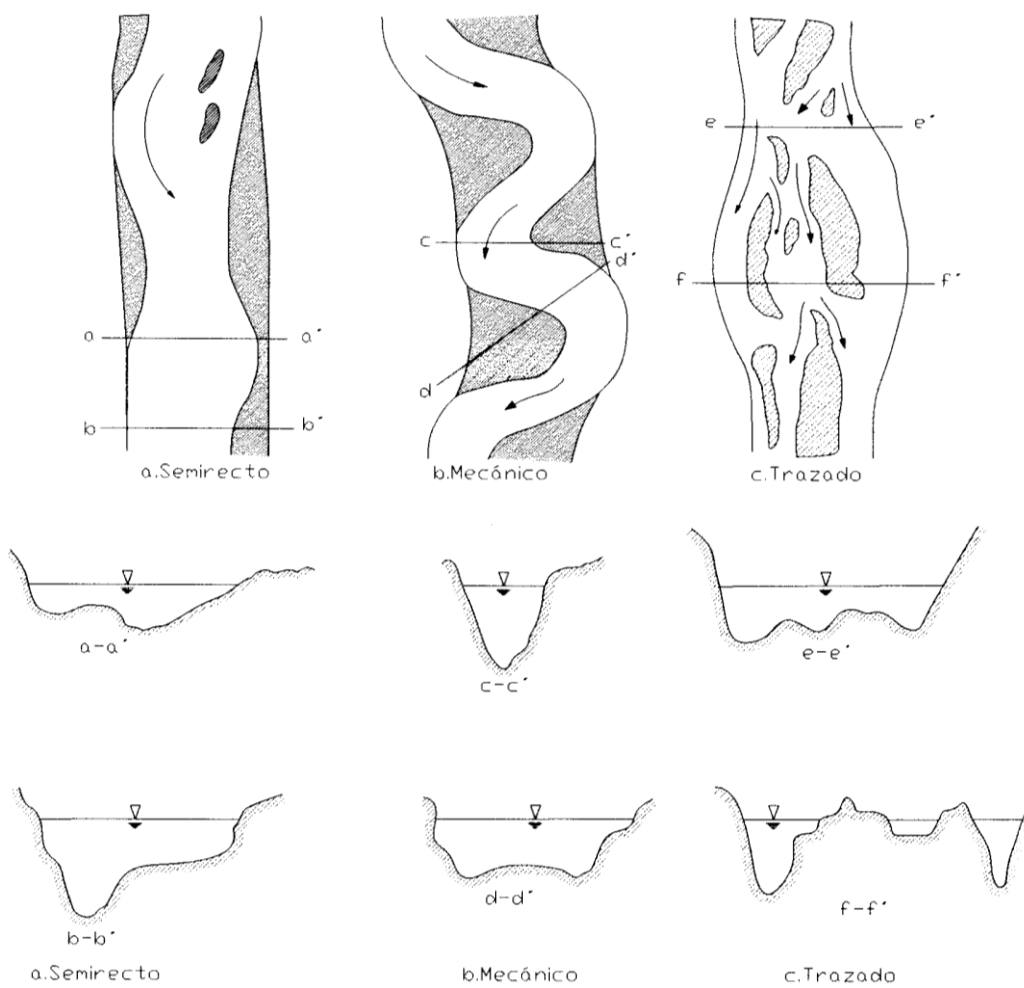
CAPACIDAD DE SEDIMENTACIÓN

Tipo de material	Velocidad agua limpia (m seg⁻¹)	Velocidad agua con sedimentos (m seg⁻¹)
<i>Arena fina</i>	0,45	0,76
<i>Suelo arenoso</i>	0,53	0,76
<i>Limo aluvial</i>	0,60	1,06
<i>Ceniza volcánica</i>	0,76	1,06
<i>Arcilla dura</i>	1,14	1,52
<i>Lutitas</i>	1,82	1,82
<i>Grava fina</i>	0,76	1,52
<i>Grava gruesa</i>	1,22	1,82
<i>Cantos</i>	1,52	1,67

El material producto del arrastre de las corrientes de agua, inicia un proceso de sedimentación y de socavación, lo que provoca cambios en la geometría del río, especialmente en las orillas y en el fondo del cauce, cambiando de manera aleatoria su dirección, aspecto que pone en riesgo las obras de infraestructura vial. Los tipos de cauce más comunes que se forman son los que se indican en la Figura N° 1:

Figura N° 1

TIPOS DE CAUCE ⁽²⁾



⁽²⁾ Fuente : Adaptado de Suárez (1992), www.unalmed.edu.co

1.1. RESISTENCIA AL FLUJO

La resistencia al flujo con la que la corriente se traslada a través de cauces naturales o canales artificiales cuyas paredes y fondo están constituidos por materiales susceptibles

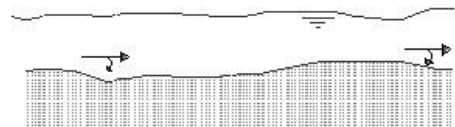
de arrastre, ha sido analizada desde varios puntos de vista, considerando la capacidad de arrastre de sedimentos. Ver Figura N° 2.

Figura N° 2

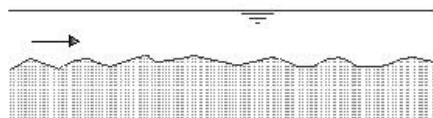
CONFIGURACIONES DE FONDO EN CAUCES ARENOSOS⁽³⁾



1. Fondo plano sin arrastre,
 $Fr \ll 1$



3c. Condición de transición,
se borran las dunas, $Fr < 1$



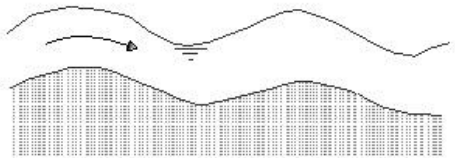
2. Configuración típica con rizos,
 $Fr \ll 1$ y $D_m < 0.5 \text{ mm}$



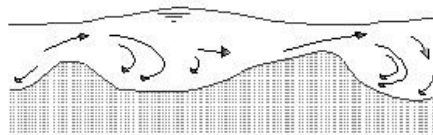
4. Fondo plano con arrastre,
 $Fr < 1$



3c. Dunas con rizos sobre impuestos,
 $Fr \ll 1$ y $d_m < 0.5 \text{ mm}$

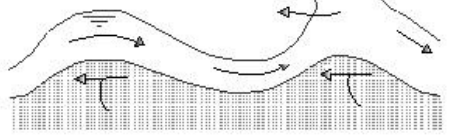


5. Ondas estacionarias, $Fr > 1$



3b. Dunas, $Fr < 1$

Rotura incipiente de la
onda y movimiento
hacia aguas arriba



6. Antidunas, $Fr > 1$

⁽³⁾ Cálculo de perfiles en ríos de fondo arenoso, Berezowsky-Jiménez, <http://eias.usalca.cl>

1.1.1. Sin arrastre

Entre las fórmulas de resistencia al flujo más usuales en la práctica está la de Manning, dada por

$$V = \frac{1}{n} * R_h^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$$

Ecu 1

donde:

V: Velocidad media, en m/s

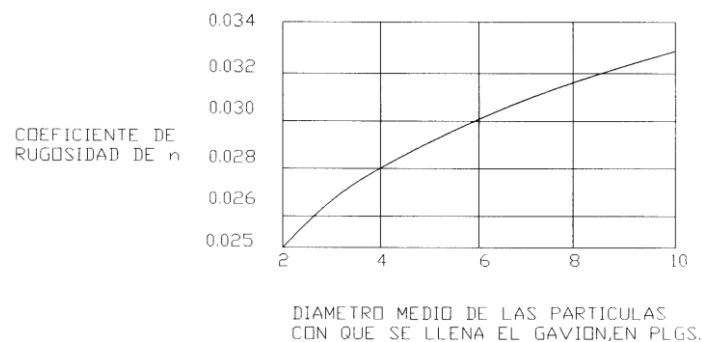
n: Coeficiente de Manning

R_h: Magnitud característica, para flujo en canales se utiliza el radio hidráulico, en m

S: Gradiente o pendiente hidráulica, adimensional

Gráfico N° 1

RUGOSIDAD Vs DIÁMETRO DE LAS PARTÍCULAS



En el caso de que existan gaviones que conformen el cauce, el valor de n también se puede obtener con ayuda del Gráfico N° 1 en función del diámetro medio de las partículas con que se llena el gavión. Sí el radio hidráulico es mayor de 1.5 m se puede usar un valor de n = 0.025 con la restricción de que el diámetro medio de las partículas tenga un tamaño que varíe entre 5 y 25 cms.

1.1.2. Con arrastre

Existe el método propuesto por Cruickshank – Maza, donde se considera la rugosidad relativa de los granos e implícitamente la variación de la forma de la configuración del fondo al variar el flujo. Este método originalmente servía para cauces arenosos, pero posteriormente fue ampliado para cauces con gravas. Su método es semiempírico y presenta la ventaja de ser uno de los pocos que toma en cuenta el transporte de sedimentos y por lo tanto, permite predecir las modificaciones que sufre un cauce cuando el transporte de sólidos es alterado.

El método propone el uso de dos ecuaciones, una para régimen inferior con fondo de rizados y dunas, y otra para régimen superior con ondas estacionarias y antidunas.

Para régimen inferior:

$$V = 7,58 * \omega_{50} * \left(\frac{d}{D_{84}}\right)^{0,634} \left(\frac{S}{\Delta}\right)^{0,456} \quad Ecu 2$$

Que se cumple en el caso de que:

$$\frac{1}{S} \geq 83,5 \left(\frac{d}{\Delta D_{84}}\right)^{0,352} \quad Ecu 3$$

Para régimen superior:

$$V = 6,25 * \omega_{50} * \left(\frac{d}{D_{84}}\right)^{0,644} \left(\frac{S}{\Delta}\right)^{0,352} \quad Ecu 4$$

Que se cumple en el caso de que:

$$\frac{1}{S} \leq 83,5 \left(\frac{d}{\Delta D_{84}}\right)^{0,352} \quad Ecu 5$$

donde:

V: Velocidad media del flujo, en m/s

ω_{50} : Velocidad de caída de partículas con diámetro 50, usar Gráfico N° 2. En m/s

d: Tirante medio, en m

S: Gradiente o pendiente hidráulica, adimensional

D_n : Diámetro de la partícula, donde el subíndice n indica el porcentaje en peso de la muestra, que contiene partículas que son menores o iguales que D_n . Por ejemplo, si $D_{84} = 0.524$ mm, significa que el 84%, en peso, del sedimento está formado por partículas cuyos tamaños son menores o iguales a 0.524 mm

S: Pendiente del cauce, adimensional

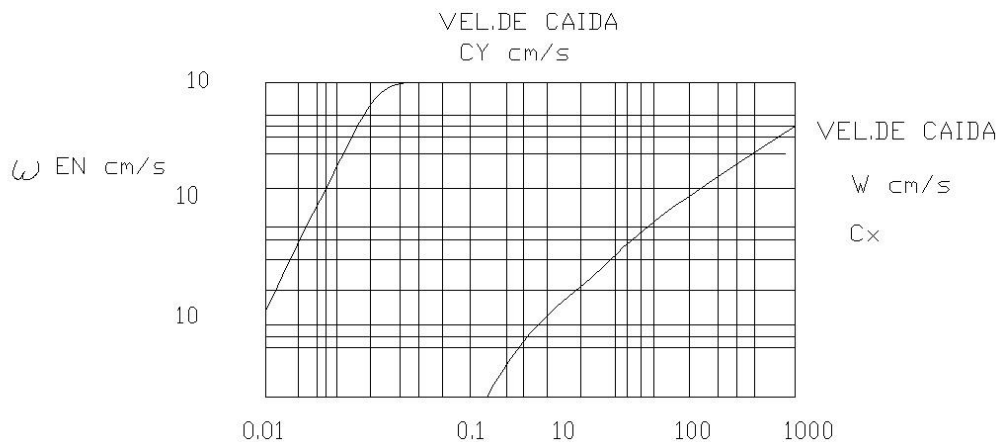
$$\Delta = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \quad Ecu 6$$

γ_s : Peso específico de una partícula, en kgf/m^3

γ : Peso específico del agua, en kgf/m^3

Gráfico Nº 2

VELOCIDAD DE CAÍDA Vs RELACIÓN PESO ESPECÍFICO PARTÍCULA – AGUA



1.2. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Los sedimentos que se transportan, son los que forman el fondo y las orillas del cauce, además de las partículas muy finas procedentes de los terrenos de la cuenca. Para cuantificar el transporte total de fondo, es decir, la totalidad, de partículas que pasan por una sección en suspensión o en la capa de fondo y que proceden del fondo o del lavado de la cuenca, se puede calcular a través de los métodos de Meyer–Peter y Müller y el de Engelund.

1.2.1. Método de Meyer–Peter y Müller

La expresión propuesta establece que:

$$gBT = 8 \gamma_s g^{1/2} \Delta^{1/2} Dm^{3/2} \left[\left(\frac{n'}{n} \right)^2 \tau^* - 0,047 \right]^{3/2} \quad \text{Ecu 7}$$

donde :

gBT: Transporte total de fondo, en kgf/s/m

D_m: Diámetro medio de las partículas, en m

n: Rugosidad total del cauce, se obtiene de la fórmula de Manning

n': Rugosidad debida a las partículas e igual a

$$n' = \frac{(D_{90})^{1/6}}{21} = \frac{(D_{50})^{1/6}}{26} \quad \text{Ecu 8}$$

g: Aceleración de la gravedad, en m/s²

τ^* : Parámetro adimensional de Shields

$$\tau^* = \frac{R_H S}{\Delta D_{50}} \quad \text{Ecu 9}$$

D_{50} , D_{90} están expresados en m; Meyer–Peter y Müller probaron materiales con pesos específicos comprendidos entre 1250 y 4200 kgf/m³ y los diámetros medios de las muestras variaron de 0.4 mm a 30 mm.

1.2.2. Método de Engelund

La fórmula propuesta para cauces arenosos es

$$gBT = \frac{0,04 \gamma_s (R_H S)^{\frac{3}{2}} V^2}{g^{\frac{1}{2}} \Delta^2 D_{35}} \quad \text{Ecu 10}$$

donde:

V: Velocidad media del flujo, en m/s.

La ecuación se aplica siempre y cuando $0,15 < D_{50} < 2$ mm y el número de Reynolds de la partícula asociado a la velocidad al cortante sea igual o mayor que 12, es decir:

$$R_e = \frac{V^* D_{50}}{\nu} \geq 12 \quad \text{Ecu 11}$$

donde:

R_e : Número de Reynolds, adimensional

ν : Viscosidad cinemática, en m²/s, ver tabla 2.2

V^* : Velocidad al cortante, en m/s

$$V^* = (g R_H S)^{1/2} \quad \text{Ecu 12}$$

1.3. DISEÑO DE CAUCES CON ARRASTRE

1.3.1. Gasto formativo

Para estudiar la estabilidad del cauce, se debe fijar un gasto que represente al hidrograma anual. Existen varios criterios para determinar este valor.

- Gasto dominante.— El gasto formativo que recibe este nombre es aquel que de permanecer constante a lo largo del año, transportará la misma cantidad de material del fondo que el hidrograma anual, por tanto, para encontrar el valor del gasto
-
-

dominante se calcula para cada día del año el transporte de fondo en función del gasto medio diario aforado; sumando todos los resultados se obtiene el transporte anual del fondo y se divide entre 365 días del año, logrando el transporte medio diario, con lo cual resulta fácil obtener el gasto líquido diario que tiene esa capacidad de transporte. El gasto líquido, en m^3/s , asociado a ese gasto diario, recibe el nombre de dominante.

- b) Para algunos autores (entre ellos Leopold y Madok) el gasto formativo es el que tiene un periodo de retorno de 1,4 años. Si hay una estación de aforos cercana, se puede obtener analizando los gastos máximos con los criterios de Nash o Gumbel.
- c) Por último, algunos consideran como gasto formativo, principalmente en ríos de planicie, al gasto máximo que es capaz de pasar por el cauce principal sin que desborde hacia la planicie. En la mayoría de los problemas estudiados este criterio ha conducido a resultados más congruentes. Sin embargo, se recomienda utilizar los tres y probar los tres gastos obtenidos. Casi siempre se puede contar con algún dato adicional que permita conocer cuál de ellos conduce a un resultado más acertado.

1.3.2. Cauces estables

Generalmente conocidos el gasto formativo Q , el transporte de sólidos que entre al tramo en estudio g_{BT} y un diámetro representativo D del material del fondo, se puede obtener la pendiente, el ancho B y el tirante d , es decir, se tiene un cauce con tres grados de libertad. Entre los métodos para analizar la estabilidad del cauce están, por ejemplo, los propuestos por Altunin, Maza–Cruickshank y Blench. El primero se desarrolló para cauces formados con material grueso como gravas y boleos; el segundo se aplica a cauces arenosos y el tercero es aplicable a cauces con márgenes formadas de material cohesivo.

1.3.2.1. Método de Altunin para material granular

Para conocer la estabilidad de un cauce, Altunin tomó en cuenta además de las variables ya indicadas, la mayor o menor resistencia de las orillas a la erosión, y la zona del río donde se encuentra el tramo en estudio. Con ello supuso que una sección es de tipo "a", si las orillas son difícilmente erosionables y "b" si son fácilmente erosionadas.

Las tres ecuaciones que propone para obtener los tres grados de libertad son:

La primera permite conocer la velocidad media de la corriente que no produce erosión, tomando en cuenta el diámetro medio del material del fondo y el tirante

$$V = a V_{\phi} d^{\alpha} \quad \text{Ecu 13}$$

La segunda define la velocidad media de la corriente en función de la resistencia al flujo

$$V = K d_z S_x \quad \text{Ecu 14}$$

La tercera resultó de la observación de secciones naturales estables y fue propuesta por Gluschkov

$$B^m = K d \quad \text{Ecu 15}$$

Esta ecuación se puede transformar y es posible utilizarla como:

$$B = A Q^{0,5} / S^{0,2} \quad \text{Ecu 16}$$

donde :

- a: Constante igual a 1 en la planicie y 1,1 en la zona intermedia
- V_{ϕ} : Velocidad media máxima que soportan las partículas del fondo sin que se produzca erosión cuando el tirante es de 1 m. Se obtiene del Cuadro N° 5 en función del diámetro medio de las partículas, en m/s
- d: Tirante medio en la sección, igual al área entre el ancho de la superficie libre, en m
- α : Exponente variable que depende del tirante y que puede tomar los siguientes valores:

$$\alpha = 1 / 3 \text{ sí } d < 1,50 \text{ m} \quad \text{Ecu 17}$$

$$\alpha = 1 / 4 \text{ sí } 1,50 < d < 2.50 \text{ m} \quad \text{Ecu 18}$$

$$\alpha = 1 / 5 \text{ sí } d > 2,50 \text{ m} \quad \text{Ecu 19}$$

- k: Coeficiente de rugosidad que para cauces con gravas o diámetros mayores Altunin lo supone igual a 11
 - z: Exponente que para las condiciones indicadas se recomienda igual a 1/2
 - x: Exponente que para las condiciones indicadas se recomienda igual a 1/3
 - B: Ancho de la superficie libre del agua, en m
 - m: Exponente que es igual a 0,5 para ríos de montaña y 1,0 para cauces
-
-

aluviales cerca de la desembocadura; se acepta 0,7 para cauces arenosos. Este exponente también se puede valorar mediante la siguiente ecuación:

$$m = 0,72 [\Delta D / R_H S]^{0,1} \quad \text{Ecu 20}$$

A: Coeficiente dado por la expresión:

$$A = [n K^{5/3}]^{3/(3+5m)} \quad \text{Ecu 21}$$

Los valores de A y m se pueden obtener con ayuda del Cuadro N° 6.

En la ecuación propuesta para valorar A, n es el coeficiente de rugosidad de Manning, y K un coeficiente que depende de la resistencia de las orillas, ver Ecuación 15, cuyos valores son de 3 a 4 si el material que forma el cauce es muy resistente (tipo a), 16 a 20 para material fácilmente erosionable (tipo b) y para material aluvial entre 8 y 12. En los problemas de ingeniería se acepta usar K = 10.

A partir de las Ecuaciones 13, 14 y 16 se obtienen las ecuaciones generales de diseño mostradas en el Cuadro N° 7, donde se ha considerado que z y x tienen los valores indicados anteriormente. Las ecuaciones se presentan para los tres valores de A mencionados.

Dado que la Información disponible para el diseño puede variar y, con ello, las tres incógnitas que deben despejarse de las tres ecuaciones originales, en el Cuadro N° 8 se indican tres posibles combinaciones de parámetros por obtener. En ella aparecen cinco incógnitas para cada grupo, pero ello se debe a que se han añadido dos ecuaciones adicionales de continuidad.

$$V = q/d \quad \text{Ecu 22}$$

$$Q = V B d \quad \text{Ecu 23}$$

donde :

q: Gasto unitario, en m³/s/m

1.3.2.2. Método de Maza – Cruickshank para cauces arenosos

El método propuesto toma en cuenta tres ecuaciones: una de fricción (la de Cruickshank – Maza para arenas), una de arrastre y otra que relacione anchos y pendientes, esta

última obtenida en forma empírica de observaciones reales (Gluschkov).

Conocidos algunos de los parámetros que intervienen en las ecuaciones de partida, se puede obtener el valor de tres que no sean conocidos. Sí, por ejemplo, se conoce el gasto formativo Q, el transporte de sedimentos que entra al tramo QBT, la granulometría del material del fondo y orillas, y se supone que el exponente m, de la Ecuación 15, es igual a 0,70 (valor promedio para cauces arenosos), se obtienen el ancho, tirante y pendiente del cauce con estabilidad dinámica.

Las ecuaciones que permiten encontrar esas variables son

Para régimen inferior:

$$B = 0,368 D_{84}^{0,247} K^{0,7} Q^{0,63} / \omega_{50}^{0,39} \Delta^{0,238} g^{0,06} D_{35}^{0,118} Q_{BT}^{0,119} \quad \text{Ecu 24}$$

$$d = 0,468 D_{84}^{0,173} Q^{0,44} / \omega_{50}^{0,274} \Delta^{0,166} g^{0,041} K^{0,51} D_{35}^{0,083} Q_{BT}^{0,083} \quad \text{Ecu 25}$$

$$S = 3,215 \Delta^{1,12} g^{0,28} D_{35}^{0,56} D_{84}^{0,223} K^{0,294} Q_{BT}^{0,56} / \omega_{50}^{0,352} Q^{0,768} \quad \text{Ecu 26}$$

Para régimen superior:

$$B = 0,037 D_{84}^{0,261} K^{0,714} Q^{0,596} / \omega_{50}^{0,406} \Delta^{0,19} g^{0,048} D_{35}^{0,095} Q_{BT}^{0,095} \quad \text{Ecu 27}$$

$$d = 0,5 D_{84}^{0,183} Q^{0,417} / \omega_{50}^{0,283} \Delta^{0,133} g^{0,033} K^{0,5} D_{35}^{0,067} Q_{BT}^{0,067} \quad \text{Ecu 28}$$

$$S = 3,5 \Delta^{1,16} g^{0,261} D_{35}^{0,581} D_{84}^{0,235} K^{0,309} Q_{BT}^{0,581} / \omega_{50}^{0,365} Q^{0,797} \quad \text{Ecu 29}$$

Los términos: B, d, D₃₅ y D₈₄ en m;

Q y QBT en m³/s;

g en m/s²;

ω_{50} en m/s; y

Δ no tiene unidades

La ventaja principal de este método consiste en que permite tomar en cuenta el gasto sólido y por lo tanto conocer las variaciones que sufre la sección cuando es incrementado o reducido debido a alteraciones en la cuenca y obras en los cauces.

1.3.2.3. Método de Blench para cauces arenosos o con material cohesivo

Blench propone tres ecuaciones para determinar las características geométricas y la pendiente de un canal:

$$B = 1,81 [Q F_b / F_s]^{1/2} \quad \text{Ecu 30}$$

$$d = 1,02 [Q F_s / F_b^2]^{1/2} \quad \text{Ecu 31}$$

$$S = 0,56 (1 + 0,012 C_s) F_b^{5/6} F_s^{1/12} / [1 + C_s / 2330] K Q^{1/6} \quad \text{Ecu 32}$$

donde :

F_b : Factor de fondo, cuyos valores promedio son 0.8 para material fino y 1.2 para material grueso

F_s : Factor de orilla, cuyos valores son 0.1 para materiales sueltos, 0.2 para materiales ligeramente cohesivos y 0.3 para materiales cohesivos

C_s : Concentración del sedimento arrastrado del fondo, en partes por millón en peso

K : Coeficiente igual a:

$$K = 6,03 g / v^{1/4} \quad \text{Ecu 33}$$

donde :

g : Aceleración de la gravedad, en m/s^2

v : Viscosidad cinemática

El factor de fondo F_b , puede determinarse mediante:

a. Sí el canal arrastra poco sedimento y el fondo es arenoso:

$$F_b = 1,9 \sqrt{D} \quad \text{Ecu 34}$$

donde :

D : Diámetro medio de las partículas, en mm.

b. Sí existe arrastre de sedimentos y el fondo es arenoso:

$$F_b = 1,9 \sqrt{D (1 + 0,012 C_s)} \quad \text{Ecu 35}$$

El método de Blench conviene utilizarlo en el diseño de canales de riego y en tramos de ríos con material fino y con cierta cohesión. Debe tenerse cuidado cuando su aplicación se extrapola a cauces naturales o canales con material grueso.

REFERENCIA DE TABLAS ^{(4) (5)}

Cuadro Nº 3

VALORES DE LA "n" DE MANNING PARA DIFERENTES ACABADOS

1. Concreto, en conductos cerrados, funcionando parcialmente llenos	
a) cimbra de acero, sin acabado	0,0130
b) cimbra de madera, sin acabado	0,0140
2. Concreto, en canales excavados a cielo abierto	
a) acabado con llana metálica	0,0130
b) acabado con llana de madera	0,0150
c) sin acabado	0,0170
3. Fondo de concreto, acabado con llana de madera y taludes	
a) mampostería junteada y aplanada con mortero	0,2000
b) mampostería seca o a volteo	0,0300
4. Fondo y taludes de mampostería	
a) junteada con mortero	0,0250
b) sin juntear	0,0320
5. Canales revestidos con gaviones tipo colchoneta rellenos con material bien seleccionado y puestos en obra con mucho cuidado	0,0222
6. Canales revestidos con gaviones tipo colchoneta rellenos con material bien seleccionado y puestos en obra sin mucho cuidado	0,0250
7. Canales revestidos con gaviones tipo colchoneta rellenos con material de cantera no seleccionado y colocado a volteo	0,0270
8. Canales revestidos con gaviones rellenos con material bien seleccionado y puesto en obra muy cuidadosamente	0,0260
9. Canales revestidos con gaviones rellenos con material no seleccionado y puesto en obra sin mucho cuidado	0,0285
10. Canales en tierra en malas condiciones de mantenimiento: presencia de vegetación en el fondo y en las orillas, o depósitos irregulares de piedras y de grava, o profundas erosiones irregulares. Canales en tierra realizados con excavadoras y sin mantenimiento	0,0303

Cuadro Nº 4

COEFICIENTES DE VISCOSIDAD DINÁMICA Y CINEMÁTICA DEL AGUA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA

Temperatura en °C	Viscosidad dinámica, μ en kgf s/m ²	Viscosidad cinemática, ν en kgf s/m ²	Temperatura en °C	Viscosidad dinámica, μ en kgf s/m ²	Viscosidad cinemática, ν en kgf s/m ²
5	1,548	1,519	16	1,133	1,112
6	1,500	1,472	17	1,104	1,084
7	1,456	1,428	18	1,076	1,057
8	1,413	1,386	19	1,049	1,031
9	1,372	1,346	20	1,025	1,007
10	1,333	1,308	21	1,000	0,983
11	1,296	1,272	22	0,976	0,960
12	1,260	1,237	23	0,954	0,938
13	1,227	1,204	24	0,932	0,917
14	1,194	1,172	25	0,911	0,896
15	1,162	1,141	26	0,890	0,876

Cuadro Nº 5

VALORES DE VELOCIDAD V_{ϕ} EN FUNCIÓN DEL DIÁMETRO MEDIO DE LAS PARTÍCULAS CUANDO EN TIRANTE ES DE 1 m.

Diámetro en mm	V_{ϕ} en m/s	Diámetro en mm	V_{ϕ} en m/s
		46	1,44
		48	1,47
		50	1,50
1	0,60	52	1,54
2,5	0,75	54	1,56
5	0,80	56	1,59
10	0,83	58	1,62
15	0,86	60	1,65
20	0,90	65	1,69
25	0,98	70	1,73
30	1,04	75	1,76
32	1,11	80	1,80
34	1,17	85	1,84
36	1,24	90	1,88
38	1,29	95	1,91
40	1,35	100	1,95
42	1,38	150	2,40
44	1,41	200	2,60

Cuadro Nº 6

VALORES DE A y m PARA CAUCES ESTABLES

Zona del río y condición del cauce	Número de Froude	Parámetro A Tipo de sección		Valores del exponente m, en k = 10 Tipo de sección	
		a	b	a	b
Zona de alta montaña. Cauce rocoso o cubierto de piedra	10	0,50	0,75	—	1,00
Zona de montaña. Cauce formado con cantos rodados, boleó y guijarros. Rápidas y pendiente cercana a la crítica	10 – 0,5	0,75	0,90	1,00	0,80
Zona en las faldas de la montaña. Llegada del río al valle. Cauce formado por guijarros, grava y arena. Corriente tranquila	0,5 – 0,2	0,90	1,00	0,80	0,75
Zonas intermedias. Cauce formado por arena gruesa, media y fina. Corriente tranquila	0,2 – 0,4	1,00	1,10	0,75	0,70
Zona de planicie. Cauce formado de arena fina en casos de:					
Río caudaloso	0,2 – 0,02	1,10	1,30	0,75	0,70
Río poco caudaloso	0,2 – 0,40	1,00	1,10	0,75	0,70

Cuadro Nº 7

FÓRMULAS PARA EL CÁLCULO DE CAUCES ESTABLES FORMADOS EN TERRENOS DE ARENA A GUIJARROS, PARTICULAS CON DIÁMETRO MAYOR DE 1 mm

Elemento de cálculo	$\alpha = 1/5$	$\alpha = 1/4$	$\alpha = 1/3$
Profundidad media, d	$0,732 V\phi^{10/3}$ $(1000 S)^{10/9}$	$0,685 V\phi^4$ $(1000 S)^{4/3}$	$0,565 V\phi^6$ $(1000 S)^2$
Velocidad media, V	$0,939 V\phi^{5/3}$ $(1000 S)^{2/9}$	$0,909 V\phi^3$ $(1000 S)^{1/3}$	$0,835 V\phi^3$ $(1000 S)^{2/9}$
Gasto unitario, q	$0,686 V\phi^5$ $(1000 S)^{4/3}$	$0,623 V\phi^6$ $(1000 S)^{5/3}$	$0,471 V\phi^9$ $(1000 S)^{8/3}$
Gasto de agua en brazo estable, Q	$7,46 A^2 V\phi^{10}$ $(1000 S)^{3,07}$	$6,20 A^2 V\phi^{12}$ $(1000 S)^{3,73}$	$3,50 A V\phi^{18}$ $(1000 S)^{5,73}$
Pendiente del cauce estable, S	$0,00192 A^{0,653} V\phi^{3,26}$ $Q^{0,326}$	$0,00163 A^{0,563} V\phi^{3,21}$ $Q^{0,268}$	$0,00123 A^{0,31} V\phi^{3,15}$ $Q^{0,154}$
Velocidad de forma, $V\phi$	$6,85 Q^{0,10} S^{0,307}$ $A^{0,2}$	$7,40 Q^{0,083} S^{0,312}$ $A^{0,175}$	$8,45 Q^{0,049} S^{0,317}$ $A^{0,10}$

Cuadro N° 8

FÓRMULA DE DISEÑO PARA CAUCES ESTABLES EN GRAVA O BOLEO
(en algunos casos las fórmulas también son aplicables a cauces arenosos. Los valores de $V\phi$ se toman del Cuadro N° 5, ya que en las fórmulas que aparecen en esta tabla se considera también si se utilizan tirantes diferentes a 1 m.)

Variable por calcular	$\alpha = 1/5$	$\alpha = 1/4$	$\alpha = 1/3$
Primer problema Datos : Q, $V\phi$, A			
S	$0,00192 A^{0,653} V\phi^{3,26}$	$0,00163 A^{0,563} V\phi^{3,21}$	$0,00123 A^{0,31} V\phi^{3,15}$
	$Q^{0,326}$	$Q^{0,268}$	$Q^{0,154}$
B	$A Q^{0,5} / S^{0,2}$	$A Q^{0,5} / S^{0,2}$	$A Q^{0,5} / S^{0,2}$
q	Q / B	Q / B	Q / B
d	$(q / V\phi)^{5/6}$	$(q / V\phi)^{4/9}$	$(q / V\phi)^{3/4}$
Segundo problema Datos : S, $V\phi$, A			
d	$0,732 V\phi^{10/3}$	$0,685 V\phi^4$	$0,565 V\phi^6$
	$(1000 S)^{10/9}$	$(1000 S)^{4/3}$	$(1000 S)^2$
q	$V\phi d^{6/5}$	$V\phi d^{5/4}$	$V\phi d^{4/3}$
B	$A^2 q / S^{0,4}$	$A^2 q / S^{0,4}$	$A^2 q / S^{0,4}$
Q	q / B	q / B	q / B
Tercer problema Datos : Q, S, A			
$V\phi$	$0,817 Q^{0,1} (1000 S)^{0,307}$	$0,855 A^{0,083} (1000 S)^{0,312}$	$0,943 A^{0,049} (1000 S)^{0,317}$
	$A^{0,2}$	$A^{0,176}$	$A^{0,10}$
B	$A Q^{0,5} / S^{0,2}$	$A Q^{0,5} / S^{0,2}$	$A Q^{0,5} / S^{0,2}$
q	Q / B	Q / B	Q / B
d	$(q / V\phi)^{5/6}$	$(q / V\phi)^{4/9}$	$(q / V\phi)^{3/4}$

⁽⁴⁾ www.lemac.com.mx

⁽⁵⁾ <http://blog.espol.edu.ec>

2. TEORÍA DEL USO DE ESPIGONES EN LA PROTECCIÓN DE RIBERAS

Las áreas identificadas como más vulnerables en una red vial son las estructuras hidráulicas como canales, alcantarillas y puentes, debido principalmente a la falta de sistemas coordinados y técnicos, que brinden garantía de estabilidad de las riberas de los ríos, acentuados especialmente en épocas de inundaciones que afectan particularmente al Ecuador.

Este hecho se evidencia especialmente en estribos, terraplenes de acceso y las pilas intermedias causadas por ampliación del canal por sedimentación, ampliación o reducción del cauce sea natural o por efecto de la minería, confluencia de flujos de agua, migración divagante del meandro y consecuentemente del thalweg o puntos más bajos que conforman el lecho del río.

Aparecen entonces criterios a considerarse a fin de garantizar la vida futura del río sin que afecte a la red vial, buscando soluciones que reconstruyan rápidamente sus características naturales y aseguremos la estabilidad de su curso evitando la socavación general del sector, socavación localizada que afecta a determinados elementos, socavación de largo y corto plazo. Es conveniente entonces contar con parámetros como la vulnerabilidad a la socavación, definida como el grado para el cual un puente u otra estructura propia de la red vial, está expuesto al ataque o daño por fuerzas y condiciones que causan socavación.

Los espigones, por definición de la Real Academia de la Lengua, son macizos salientes que se construyen a la orilla de un río o en la costa del mar, para defender las márgenes o modificar la corriente, se constituyen en elementos que arrancan de la orilla del río, donde pueden encontrarse empotrados o no, y penetran al interior del cauce, por lo que son vulnerables a la fuerza del agua.

2.1. OBJETIVOS Y FUNCIONES DEL USO DE ESPIGONES

Estos pueden tener variados objetivos y funciones, por lo que deben ser diseñados de acuerdo a la necesidad y materiales disponibles, con la finalidad de ejecutar una estructura sólida, que brinde el beneficio deseado y de bajo costo.

Un sistema de defensas con espigones tiene como objetivos:

- Defensa de las márgenes contra la erosión, se los conoce como espigones retardadores del flujo.
- Formación de cauces más profundos con fines de navegación y se los conoce como espigones deflectores.
- Desviar y orientar la corriente, con fines de proteger estructuras especiales como puentes u otras estructuras, para lo cual se puede establecer la necesidad de que cumplan los dos objetivos. Se les llama espigones retardadores - deflectores.

Las funciones dependen del objetivo que se busque y pueden ser las siguientes:

- Reducir la velocidad de la corriente cerca de la orilla.
- Desviar o alejar la corriente de la orilla
- Prevenir la erosión de las márgenes
- Establecer y mantener un ancho fijo del río
- Estabilizar el cauce fluvial
- Controlar la migración de meandros
- Creación del efecto de curva en una bocatoma
- Recuperar orillas.

2.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE ESPIGONES

Las ventajas generales de un sistema de espigones son:

- Bajo costo
 - Facilidad de construcción
 - Flexibilidad en la forma y tamaño
 - Reducido tiempo y facilidad de reparación
 - Posibilidad de usar diversidad de materiales
 - Capacidad para incluir mejoras
 - Empleo de experiencia y mano de obra locales
 - Construcción por etapas
 - No se requiere mano de obra altamente especializada
-
-

Las desventajas del uso de espigones constituyen en:

- Elementos extraños al cauce del río que provocan nuevas formas de erosión y sedimentación,
- Socavación producida alrededor de las puntas del espigón a consecuencia de vórtices y corrientes secundarias causadas por la presencia del objeto ajeno al cauce
- No es un sistema de defensa definitivo, requiere de atención y mantenimiento
- Reduce el área hidráulica del río, provocando un nuevo comportamiento de la corriente
- Estas desventajas deben ser previstas antes de la ejecución de las obras

Sin embargo, las principales desventajas de los espigones consisten en que disminuyen el área hidráulica, aumentan la rugosidad de las orillas y no pueden ser utilizados en curvas con radio de curvatura muy reducido.

2.3. FORMAS DE LOS ESPIGONES

Existe gran cantidad de formas funcionales de espigones que pueden ser empleados según la necesidad y características hidráulicas del río. Sin embargo entre las principales formas tenemos:

- Espigones rectos, dispuesto preferentemente a un cierto ángulo con la orilla para darle más estabilidad y dinámica al flujo del agua.
- Espigones en forma de L con ala aguas arriba o abajo, actúa como protección contra la socavación.
- Espigones en forma de T, con ala aguas arriba o abajo y que generalmente a 90° con respecto al eje del espigón, el ala actúa como dique por tener su cara paralela a la dirección del flujo.
- Espigón de cabeza redondeada
- Espigón a doble ángulo
- Espigones curvos

De manera general, estas estructuras pueden ser permeables o impermeables, dependiendo del objetivo, función y fundamentalmente de las características hidráulicas como del fondo de su cauce.

2.3.1. Espigones permeables

Este tipo de espigón, resulta muy útil cuando se desea fomentar la formación de playas entre los espigones a través de la sedimentación de materiales de arrastre, lo cual se logra permitiendo que el agua pase a través de ellos, a la vez que reduce la velocidad de circulación del agua. Por lo general, están más espaciados que los espigones no permeables (impermeables).

Fotografía N° 1

DIQUE RECTO PERMEABLE EN EL RÍO KIZU (JAPÓN) (MAYO 2005)



Foto: *Study on Flow and Bed Evolution in Channels with Spur Dykes*, Hao ZHANG, agosto 2005

Se los conoce también como retardadores del flujo, debido a que retardan el flujo y disminuyen la velocidad cerca de las márgenes. Pueden ser de alta y baja permeabilidad, dependiendo de la medida entre la proporción de vacíos que tiene el cuerpo del espigón lograda por los materiales que lo conforman dispuestos acorde a la dirección de la corriente y se puede expresar como porcentaje.

Los espigones permeables tienen varias aplicaciones, las cuales dependen de factores como la cantidad de sedimentos que acarrea el agua, los cuales deben pasar a través de ellos a fin de que el espacio comprendido entre un espigón y otro, se vaya rellenando con el depósito de los sedimentos finos en suspensión. Posteriormente, debe tenerse previsto que estas áreas, así formadas, sean reforzadas con vegetación.

De esta manera, se robustece la orilla fluvial, corrigiendo los cauces y brindando seguridad a las estructuras viales, ya que, acorde a las necesidades, podemos contribuir

a la formación de nuevas orillas, adaptando y modificando estas estructuras.

Este tipo de sistemas dependen básicamente de la capacidad de disminuir la velocidad de la corriente, así como de la cantidad de sedimentación que se pueda alcanzar con el diseño previsto, para lo cual se hace necesario mantener un monitoreo constante, a fin de lograr paulatinamente las metas previstas.

2.3.2. Espigones no permeables o impermeables

Estas estructuras son consideradas como deflectores del flujo y su uso se lo prevé cuando se trata de un río navegable en el cual debemos mantener la sección hidráulica central con un determinado calado a fin de facilitar la navegación.

Por sus cualidades deflectoras, su función es alejar la corriente de la orilla lo que implica un aumento de la velocidad media de la corriente y que sean estructuras más estables y permanentes, lo cual sugiere el uso de sistemas constructivos más complejos debido a la presencia de fenómenos como vórtices, corrientes secundarias, distribución de velocidades, etc.

Fotografía N° 2

DIQUE RECTO IMPERMEABLES EN EL RÍO KATZURA (JAPÓN) (JUNIO 2005)



Foto: Study on Flow and Bed Evolution in Channels with Spur Dykes, Hao ZHANG, agosto 2005

Existen varios estudios alrededor del uso combinado de estos sistemas de espigones, pero no están apoyados con modelos hidráulicos o numéricos definitivos, como el de la Universidad de Kyoto, "Flow and bed deformation around a series of impermeable and permeable spur dikes". Sin embargo de una predicción del flujo tridimensional y la erosión

local alrededor de espigones no sumergidos, se ha podido observar una “razonable concordancia” con la predicción del campo de velocidades y la socavación en las condiciones ideales de laboratorio, en las que se realizaron dichos estudios.

Estos sistemas de defensas ribereñas requieren de mantenimiento continuo ejecutado especialmente después de una avenida, donde puede implementarse mejoras en cuanto a longitud y disposición de los espigones de conformidad a los efectos que se van detectando con cada evento. Para facilidad de las obras, las reparaciones y el mantenimiento de los espigones se hacen durante el estiaje, donde se puede iniciar la siembra en las nuevas playas que se van logrando con estas estructuras.

2.4. PARTES CONSTITUYENTES DE LOS ESPIGONES

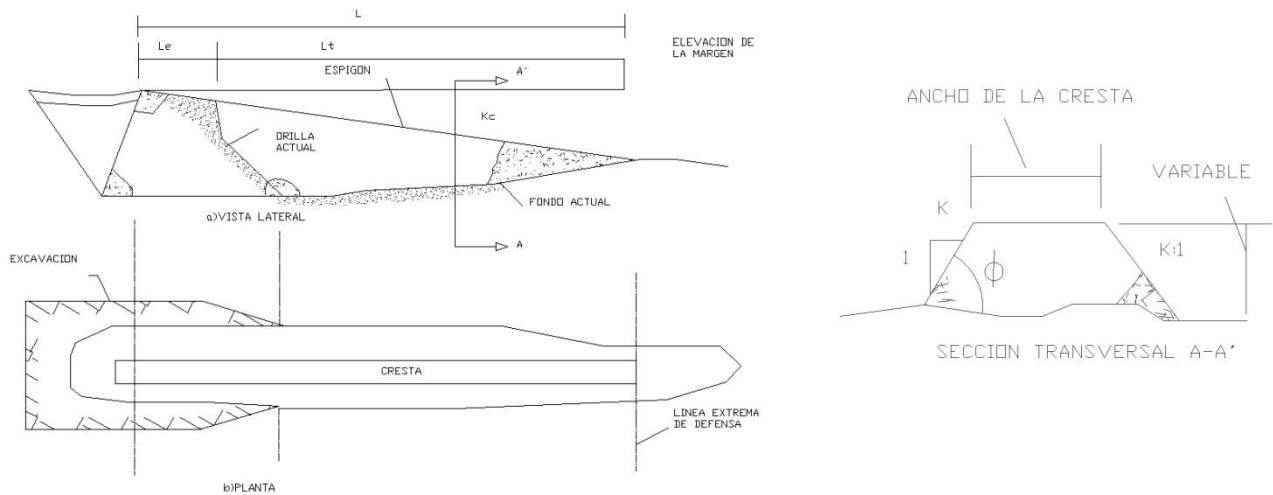
Entre las consideraciones más importantes cuando se piensa implementar el uso de espigones para protección de riberas, se puede mencionar:

- Localización en planta
 - Longitud (LE, LT, cabeza)
 - Forma del espigón en planta
 - Separación entre espigones (sistema)
 - Pendiente longitudinal y elevación de la cresta
 - Angulo de orientación respecto al flujo
 - Permeabilidad
 - Calidad de los materiales de construcción
 - Erosión al pie de la estructura y en la cabeza del espigón
 - Recubrimiento de protección en la etapa de servicio
-
-

Un espigón está integrado por varias partes:

Figura N° 3

ELEMENTOS DEL ESPIGÓN



- Empotramiento o anclaje (LE), está dentro de la ribera y sirve para evitar que se establezcan flujos detrás del espigón lo que permite que la estructura no quede separada de la margen del río tanto en el proceso constructivo como en la etapa de servicio.
 - Longitud efectiva o de trabajo (LT), es la parte que se adentra en el cauce del río y que busca corregir un problema de erosión o de inestabilidad. Con el paso del tiempo puede convertirse en longitud de empotramiento.
 - Cabeza o punta, es el extremo del espigón que va en el interior del cauce, debe ser resistente y tener las debidas protecciones puesto que en sus alrededores se producen efectos de vórtice y socavamiento, se procura que tenga una pequeña elevación con respecto al lecho fluvial
 - Cresta, ubicada longitudinalmente desde la orilla hasta la cabeza o punta. Puede ser descendente hacia el eje del río y determina la altura del espigón.
 - Altura de fundación, es la profundidad medida entre el cuerpo del espigón y el lecho del río. Esta consideración asegura la estabilidad de toda la estructura, especialmente ante avenidas o efectos de socavación.
-

2.5. INFORMACIÓN BÁSICA PARA EL DISEÑO DE ESPIGONES

Una vez comprendida la necesidad en toda su magnitud, debemos recolectar los datos necesarios para el diseño como, topografía y batimetría del río en la zona por proteger, secciones transversales a lo largo de las orillas que serán protegidas, características hidráulicas de la corriente como son, por ejemplo, el gasto dominante y el gasto asociado a un periodo de retorno entre 50 y 100 años, la elevación de la superficie del agua correspondiente a esos gastos, así como las velocidades medias de los escurrimientos y la velocidad del flujo a lo largo de las orillas por proteger; la granulometría y peso específico de los materiales del fondo y orillas del cauce, y finalmente los materiales de construcción disponibles:

2.5.1. Topografía y batimetría

Esta información debe comprender al menos 25 m a cada lado de la orilla más estable conocida y adicionalmente, obtener datos de avenidas recurrentes.

2.5.2. Secciones transversales o riberas a ser protegidas

Perfiles consecutivos tomados entre 50 y 200 m de separación, dependiendo de la estabilidad de las orillas y de la dimensión del cauce.

2.5.3. Características hidráulicas de la corriente

Debido al hecho de que en el país no se cuenta con datos históricos de los caudales que transportan los ríos, se debe al menos obtener información relevante sobre velocidad media de los escurrimientos, velocidad de flujo en la orilla, velocidad máxima, caudales promedios en avenidas y sus niveles.

Para efectos de determinar el estado natural del río y contar con los suficientes elementos de juicio para el diseño de la protección de riberas con espigones sucesivos, se ha adaptado un ficha de campo, (Anexo 1), utilizando como referencia el formulario para Calificación de valles planos y características de canales, del Cuerpo de Ingenieros del Ejército Norteamericano.

2.5.4. Granulometrías y peso específico de los materiales de fondo y orillas

Debe establecerse la capacidad de transporte de sedimentos del río, analizando la granulometría del fondo del cauce en al menos 1 metro de profundidad, así como la calidad y cantidad de los materiales de arrastre del río.

2.5.5. Tipo de espigón y materiales de construcción

Se necesita establecer la ubicación de las fuentes de materiales, para posteriormente proceder al análisis de la calidad y de las cantidades disponibles.

Hay que analizar detenidamente el tipo de espigón que se empleará para la protección del cauce, considerando facilidades constructivas, disponibilidad de la mano de obra calificada y no calificada, recursos económicos, etc.

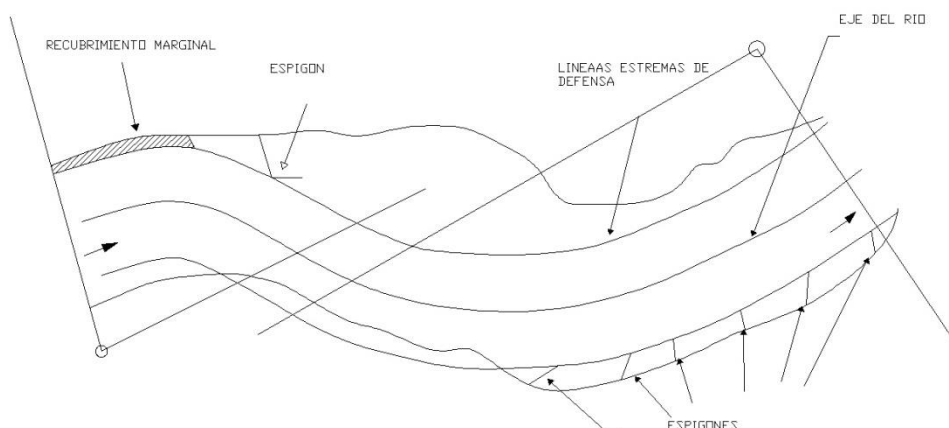
En el Ecuador se encuentra generalizado el uso de gaviones para la construcción de muros de sostenimiento, así como las escolleras de piedra suelta para la protección de riveras.

3. ESTABILIDAD Y RECTIFICACIÓN DE CAUCES

A fin de mantener estable el curso de un río, se puede implementar el uso de espigones y de muros de gavión o recubrimientos marginales. Algunas diferencias entre estos tipos de obra consisten en que los recubrimientos marginales evitan por completo los corrimientos laterales de las márgenes, fijando completamente las márgenes, mientras que los espigones permiten que la orilla entre ellos pueda ser ligeramente erosionada inmediatamente después de su construcción. Además, cuando falla una parte de un muro marginal puede extenderse esa falla y destruirse toda la obra, sobre todo si la avenida tiene varios días de duración. En cambio, los espigones permiten que la obra en su conjunto continúe trabajando aunque uno o dos de los espigones haya fallado.

Figura N° 4

OBRAS DE PROTECCIÓN MARGINAL



El proceso de estabilización del cauce de un río, asegura que las distintas obras de ingeniería construidas en la zona, se encuentren debidamente protegidas especialmente en épocas invernales, cuyos efectos llegan a ser catastróficos, cuyo costo tanto social como económico resulta ser muy alto, frente al de inversión en este tipo de obras.

Al ser, los espigones estructuras interpuestas a la corriente, cuyo extremo está inmerso en una orilla y el otro hacia el centro del cauce, tiene el efecto de alejar las líneas de corriente con alta velocidad de la orilla, evitando que el material pueda ser transportado y se erosione. Facilitan además que los sedimentos se depositen entre ellos, lo que hace que se cree una protección adicional en la orilla, evitando el libre flujo de la corriente a

través de la cuenca.

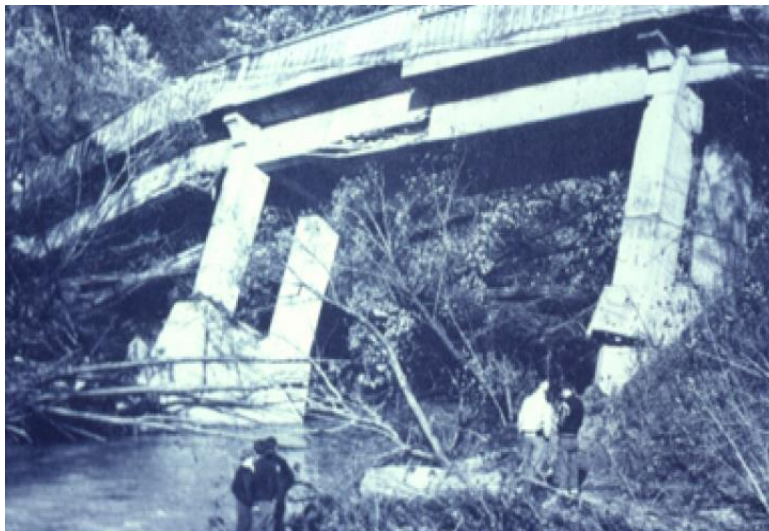
Fotografía N° 3

EDIFICACIÓN EROSIONADA POR AVENIDA



Fotografía N° 4

ESTRUCTURA VIAL EROSIONADA POR AVENIDA



3.1. DISEÑO DE UN SISTEMA DE DEFENSA CON ESPIGONES

Los aspectos más importantes a tomar en cuenta al diseñar una protección se basa fundamentalmente en las cualidades que presenta un cauce, para lo cual se deben

plantear varias hipótesis de diseño y consideraciones.

3.1.1. Localización en planta

La ubicación de una obra de defensa compuesta por un grupo de espigones, sea respecto a la orilla actual, o bien en una nueva margen, requiere de un trazo en planta del eje del río y en las orillas, delinear una frontera que generalmente es paralela a dicho eje, a la cual llegará el extremo del espigón, como se muestra en las Figuras N° 4 y 5. La longitud de cada espigón estará dada por la distancia de la orilla real a esa línea.

Figura N° 5

TRAZO DEL EJE DEL RÍO Y LÍNEAS EXTREMAS DE DEFENSA EN UNA RECTIFICACIÓN

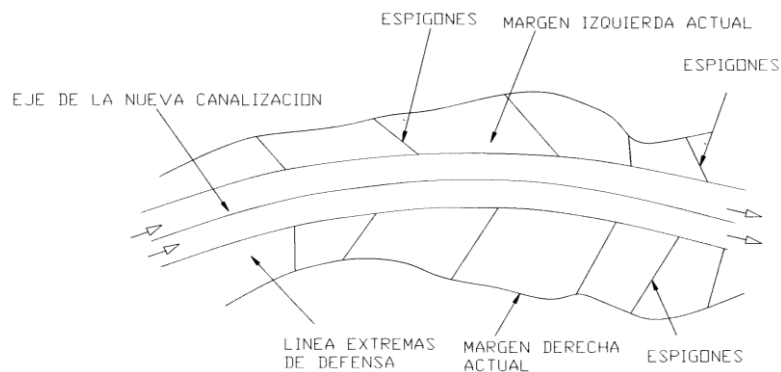
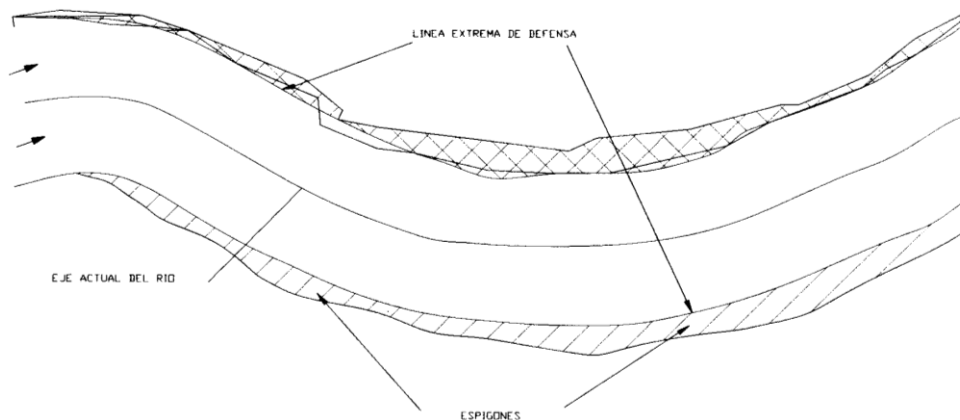


Figura N° 6

EJE DEL RÍO Y LÍNEAS EXTREMAS DE DEFENSA PARA PROTEGER MÁRGENES ACTUALES



La separación entre las nuevas orillas de defensa podrá ser igual al ancho estable del río

teniendo en cuenta el cambio de pendiente, la rectificación del río o sí va a ser navegable. Analíticamente el ancho estable se obtiene en función del gasto dominante, características físicas del material del fondo y orillas, y de la pendiente del río.

Cuando se trata de rectificar un tramo de río o defender sus curvas y si las márgenes son arenosas o ligeramente limosas, los radios de curvaturas, deben estar comprendidos entre los siguientes límites:

$$2 B \leq r \leq 8 B$$

Ecu 36

donde :

- B: Ancho medio de la superficie libre en los tramos rectos, en m.
- r: Radio de curvatura medido al eje del río, en m.

De esta manera, se consigue que las mayores profundidades siempre se encuentren cercanas a la orilla exterior de la curva, y que en ésta no se formen islas o bancos de arena cerca a la orilla cóncava. En ríos grandes con curvas de relación r/B hasta de 20, se ha observado que esta condición se cumple satisfactoriamente.

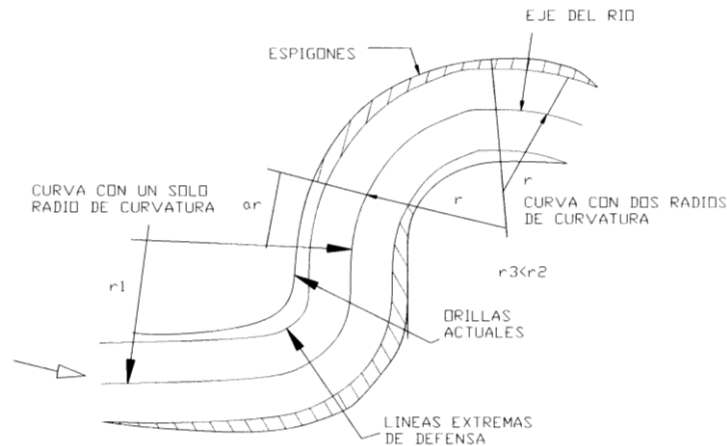
Es conveniente observar detenidamente el río, en aspectos relacionados con el transporte de sedimentos, calidad de las orillas, estabilidad de cauces y de curvas, ya que con, el tiempo el río puede escurrir por otro sitio, abandonando completamente los espigones que fueron colocados. En ríos de planicie que son divagantes o que sufren erosión constantemente en sus curvas, deben protegerse tramos completos de río.

Cuando se tiene radios de curvatura menores a $2B$, resulta más económico hacer protecciones de orilla con gaviones, ya que la separación de entre espigones debe reducirse, pero si el radio es mayor a $8B$, el río tiende a formar cauce con radio menor, consecuentemente, algunos espigones ya no van a ser necesarios o la corriente incidirá en sitios no protegidos, lo que nos lleva a pensar en plan de protección más generalizado, a fin de encausar cuidadosamente un tramo de río y de esta manera proteger estructuras importantes.

Los parámetros indicados se visualizan claramente en la Figura N° 6.

Figura N° 7

EJE DEL RÍO Y RADIOS DE CURVATURA



3.1.2. Longitud de los espigones

La longitud total de un espigón, L , tiene dos componentes, una es la longitud de anclaje o empotramiento en la orilla, L_e , y la otra la longitud de trabajo que es la ubicada al interior del río, L_t .

$$L = L_t + L_e \quad \text{Ecu 37}$$

La longitud de trabajo está dada por la distancia entre el cauce de la margen con la corona del espigón y la línea extrema de defensa que normalmente está comprendida entre los límites siguientes:

$$d \leq L_t \leq B/4 \quad \text{Ecu 38}$$

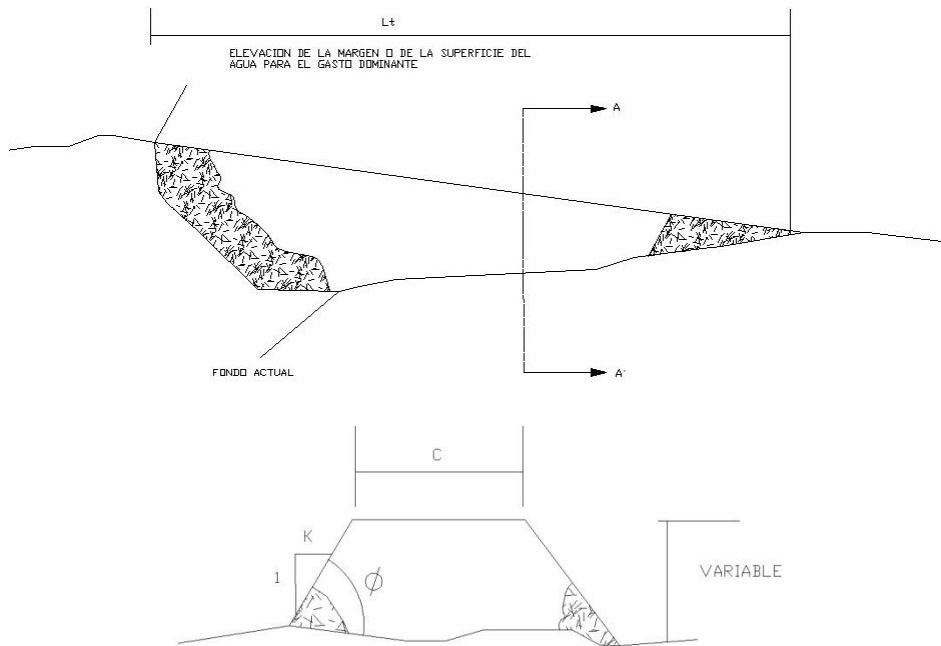
donde:

- d: Tirante del río asociado al gasto formativo en el sitio donde se construye el espigón. En los ríos de planicie ésta, es igual a la distancia vertical entre la elevación de la margen y la elevación del fondo del río.

Los espigones pueden construirse sin tener longitud de anclaje y con una longitud máxima de empotramiento igual a un cuarto de la longitud de trabajo, considerando que esto encarece la obra, lo que se justifica si existe la necesidad de proteger sectores específicos o estratégicos donde no puede fallar el espigón ya que existe el riesgo de que la corriente flanquee al espigón en época de crecientes. Otra manera conveniente, es reducir la separación entre los espigones.

Figura N° 8

ESPIGÓN APOYADO EN LA MARGEN EN RÍOS DE PLANICIE



3.1.3. Forma de los espigones en planta

La forma de los espigones en planta puede ser recta, curvados hacia aguas arriba o aguas abajo, en L con el brazo dirigido hacia aguas arriba o aguas abajo y en T, los más usuales son los rectos por su facilidad constructiva y ser más económicos. Los espigones con forma de L o T son los más costosos, ya que su parte extrema debe construirse en la zona más profunda del río, y en el caso de que su rama extrema sea más larga que la longitud de trabajo, se lo considera como un dique marginal.

Figura N° 9

FORMA EN PLANTA DE LOS ESPIGONES



Cuando el fondo del cauce es gradual o bien se tienen tramos rectos se recomienda usar los espigones rectos y cortos, en cambio los que tienen forma de T son más adecuados para cauces angostos.

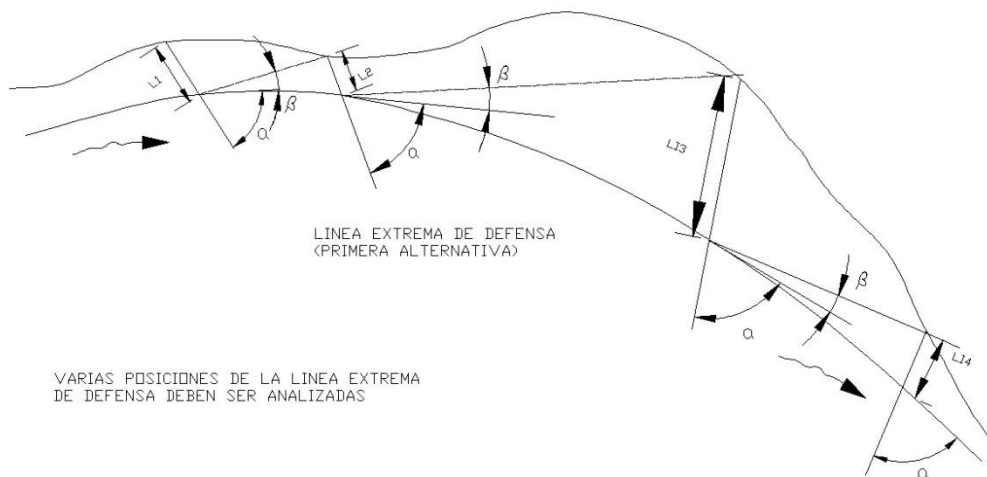
3.1.4. Separación entre espigones

La distancia entre espigones, se mide en la orilla entre los puntos medios de arranque de cada espigón y depende de la longitud del espigón de aguas arriba así como de su orientación y de la configuración de la margen.

Para calcular la separación entre dos espigones, se debe tomar en cuenta la expansión teórica que sufre la corriente al pasar frente al extremo del espigón, ver Figura N° 10. Normalmente se considera que el ángulo de expansión (β), varía entre 9 y 11 grados, pero en la práctica se usa 9 para un diseño económico y 14 para uno más conservador.

Figura N° 10

EVALUACIÓN DEL ESPACIAMIENTO ENTRE ESPIGONES



Las fórmulas que se muestran, son válidas para calcular la separación entre espigones, en casos en que el ángulo de orientación del espigón (α), esta entre 60 y 90 grados y, cuando la línea extrema de defensa es sensiblemente paralela a la margen del río.

$$S_s = L_t \cos \alpha + L_t \frac{\text{sen} \alpha}{\tan \beta} \quad \text{ó igual a:} \quad S_s = L_t \frac{\text{sen}(\alpha + \beta)}{\text{sen} \beta} \quad \text{Ecu 39}$$

donde :

S_s : Separación en tramos rectos si orilla y línea de defensa son paralelas

L_t : Longitud de trabajo

Una vez aplicados los límites experimentales identificados anteriormente obtenemos la siguiente relación:

$$4 L_t \leq S_s \leq 6,3 L_t \quad \text{Ecu 40}$$

Un valor práctico empleado para obtener la separación inicial entre espigones, especialmente cuando requiere protegerse obras de importancia, es de máximo $4 L_t$. De fallar por flaqueo, se puede construir a la mitad, otro espigón de menor longitud que los anteriores.

Para rectificaciones en curva tenemos:

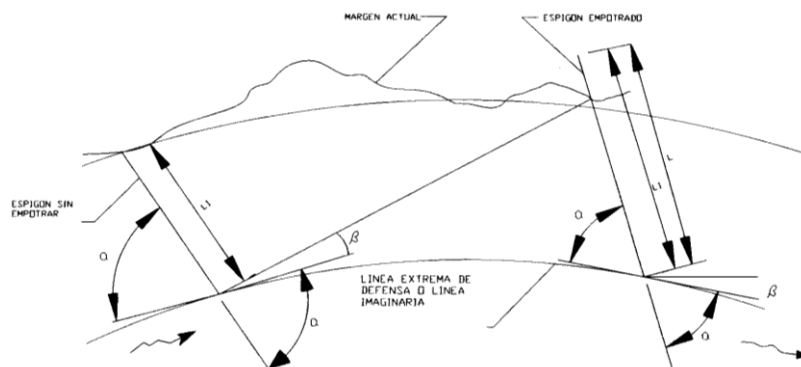
$$2,5 L_t \leq S_c \leq 4 L_t \quad \text{Ecu 41}$$

De llegar a quedar por diseño muy juntos, es preferible sustituirlos por recubrimientos marginales. Si la curvatura es superior a 4 veces el ancho del río es conveniente ubicar espigones a $4 L_t$.

Para rectificar márgenes irregulares no existen fórmulas de cálculo aplicables, pero se procede en forma gráfica, en base al siguiente ejemplo donde se establecen los ángulos β y α de acuerdo a la realidad de la zona.

Figura N° 11

MÉTODO PARA OBTENER EL ESPACIAMIENTO ENTRE ESPIGONES



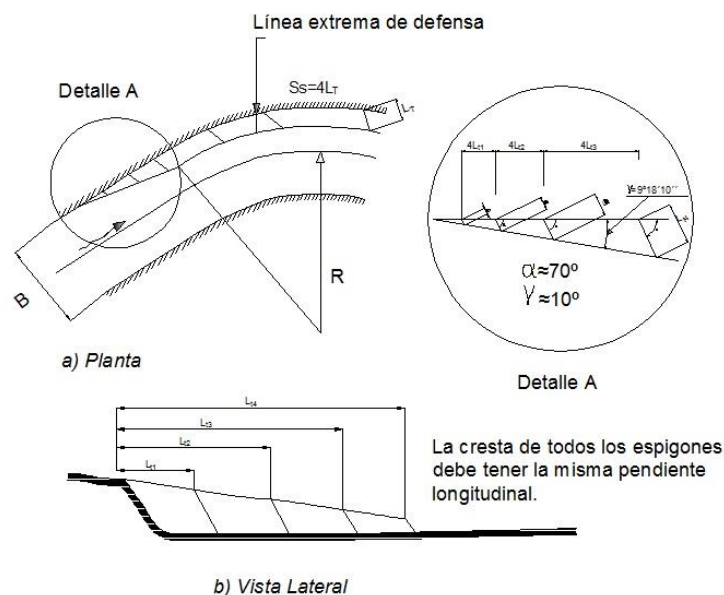
Es conveniente ubicar los primeros espigones en zonas donde se observe que la distancia entre margen y la línea extrema de defensa es menor, lo que explica que en ese sector la orilla es más resistente. Si los espigones están muy cercanos entre sí trabajan menos eficientemente y su costo es mayor.

3.1.5. Separación y longitud de los primeros espigones

Al diseñar la defensa marginal de un tramo de río los primeros espigones de aguas arriba se diseñan como se indica en la Figura N° 12, donde en el tramo recto aguas arriba de la primera curva, la línea extrema de defensa que se une con la margen hacia aguas arriba forma un ángulo, γ , que varía entre 8 y 10 grados. A pesar de la utilidad y buen funcionamiento observado en modelos hidráulicos, se prefiere realizar refuerzos al primer espigón de aguas arriba.

Figura N° 12

DISPOSICIÓN TRANSVERSAL DE ESPIGONES



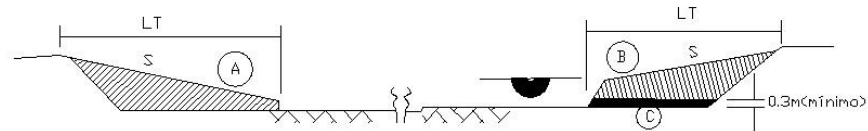
3.1.6. Pendiente longitudinal, elevación y ancho de la cresta de los espigones

Los espigones pueden tener pendiente horizontal o una hacia el centro del río que pueda llegar a 0,25. Los de cresta horizontal sirven cuando se desea reducir artificialmente el

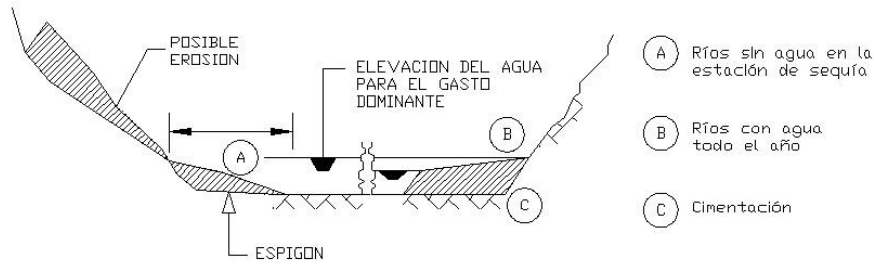
ancho del río, y con pendiente longitudinal para proteger una margen o rectificar un tramo.

Figura N° 13

CONSTRUCCIÓN DE ESPIGONES EN FUNCIÓN DE LA ALTURA DE LAS MÁRGENES



a) Construcción de espigones cuando los márgenes son bajas



a) Construcción de espigones cuando los márgenes son altos

La elevación del punto de arranque de un espigón en ríos de planicie, será igual a la elevación de la margen; para ríos en zonas intermedias o de montaña será igual a la elevación del agua que corresponda al gasto dominante. El extremo dentro del cauce deberá tener alturas de al menos de 50 cm sobre el fondo, que se logra únicamente en épocas de estiaje.

El ancho de la corona de los espigones está en función de los materiales con que se construye el espigón y del procedimiento empleado como sería en un enrocado o con muro de gaviones.

Cuando la cresta de un espigón tiene una pendiente longitudinal igual o mayor que 0,1, se observa que esta condición favorece al depósito de sedimentos entre ellos y, si el cuerpo de la estructura tiene taludes, se observa la formación de depósitos al pié, lo que reduce el riesgo de erosión inclusive en el fondo del cauce.

3.1.7. Orientación de los espigones

Los espigones pueden estar orientados hacia aguas abajo, aguas arriba, estar perpendiculares a la dirección de la corriente. La orientación se mide por el ángulo (α) que forma el eje longitudinal del mismo con respecto a la tangente trazada a la línea extrema de defensa en el punto de unión con el espigón y medido hacia aguas abajo.

Cada orientación tiene diferente influencia sobre la corriente y por tanto un efecto diferente sobre la socavación y depósito de material alrededor de él. Se ha observado que los espigones orientados hacia aguas arriba producen más depósito de sedimento en la orilla aguas abajo que los que están orientados 90 grados con respecto al flujo.

Los espigones colocados normales al flujo solo protegen áreas pequeñas mientras que los que están dirigidos hacia aguas arriba resisten mejor al poder erosivo de la corriente, debiendo considerar que cada caso debe tener su propia evaluación. Varias entidades han utilizado varios ángulos de orientación los cuales han trabajado con mucho éxito, como los que se muestran en el Cuadro N° 9.

Cuadro N° 9

ANGULO RECOMENDADO ENTRE ESPIGÓN Y ORILLA

Angulo recomendado entre el espigón y la orilla [°]*	Referencia
100 - 120	United Nations, 1953
100 - 120	Central Board of Irrigation and Power, 1971
100 - 110	Mamak, 1964
100 - 110 (orilla convexa)	Samide and Beckstead, 1975
100 o menos (orilla cóncava)	Samide and Beckstead, 1975
90	US Army, Corps of Engineers, 1983(en Copeland, 1983)
90	Richardson and Simons, 1973(en Copeland, 1983)
90	US Army, Corps of Engineers, Memphis and Vicksburg Districts(en Copeland, 1983)
90 o aguas abajo	US Corps of Engineers, 1970(en Copeland, 1983)
90 o aguas abajo	Missouri River (Lidner, 1969)
75 ~ 90	Red River, Arkansas River(Lindner, 1969)
70 ~ 90	(30 para curvas cerradas) Álvarez, México (en Copeland, 1983)
75	US Army Corps of Engineers, Los Angeles District, 1980 (en Copeland, 1983)

* Medido entre la línea de orilla aguas abajo y el eje del espigón.

Cabe señalar que, espigones en pendiente longitudinal en su cresta o corona y a contraflujo, experimentalmente se ha observado que no trabajan satisfactoriamente.

En un tramo recto en una curva regular conviene que los espigones formen un ángulo α de 70 grados con la dirección de la corriente, si la curva es irregular y, aún más, si tiene un radio de curvatura menor de 2.5 B, los ángulos de orientación serán menores a 70 grados y pueden ser hasta de 30 grados, con el inconveniente de que se debe reducir la separación entre ellos e incrementar su número.

3.1.8. Permeabilidad de los espigones y materiales de construcción

Los espigones pueden ser de dos tipos, impermeables con la ventaja de que alejan de la orilla las líneas de corriente con alta velocidad y permeables que trabajan reduciendo la velocidad del flujo por debajo de su límite erosivo, favoreciendo al depósito de material.

La facilidad con la que permiten el paso del agua, depende directamente del material con el que se construyen los espigones y puede ser de una gran variedad de materiales, como gaviones, tabla-estacados de madera o concreto, troncos de árboles y ramas, elementos prefabricados de hormigón, acero, madera o alambre. Los impermeables inicialmente permiten el paso del agua y posteriormente se van sellando con el paso de la arena u otros materiales que arrastra la corriente.

3.1.9. Socavación local al pie de espigones

La socavación local en la punta de los espigones es de importancia durante su construcción, cuando se utilizan elementos que están sujetos entre sí (bolsas, piedras, gaviones, etc). Sí la velocidad es mayor de 50 cm/s conviene recubrir el fondo sobre el que descansará el espigón con una capa de piedra de unos 30 cm de espesor, y después construir el espigón de la orilla hacia el centro del cauce.

Figura N° 14

EROSIÓN DEL FONDO DURANTE LA CONSTRUCCIÓN

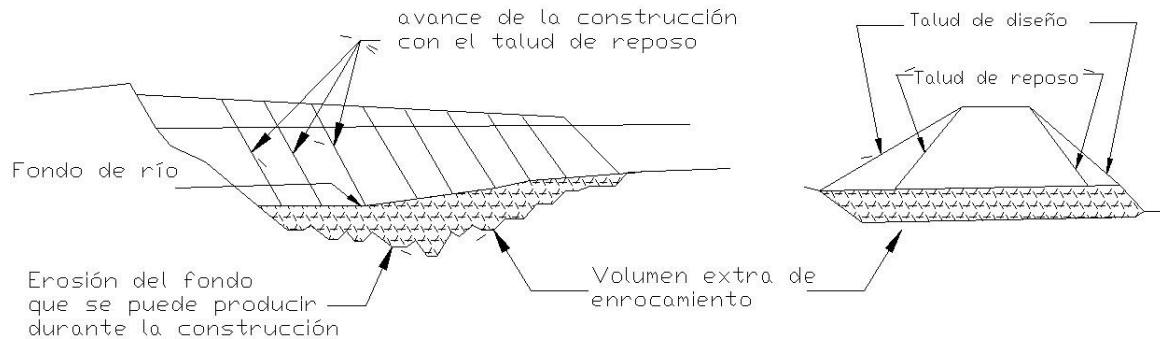
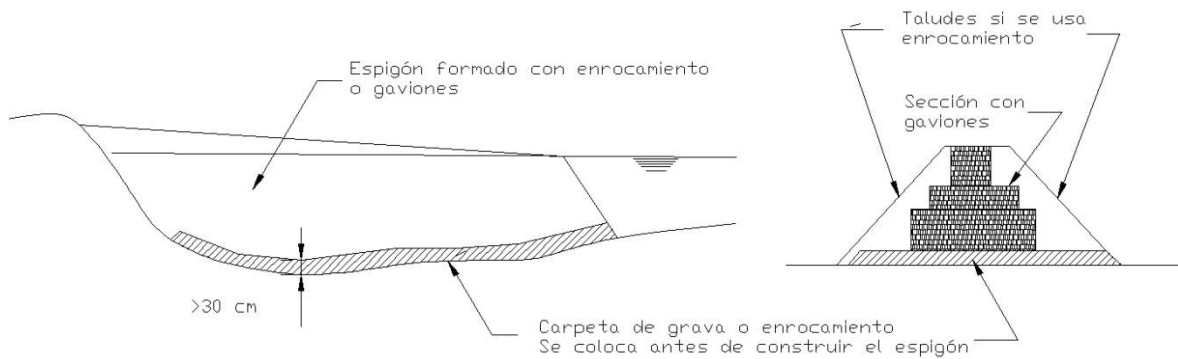


Figura N° 15

MÉTODO PARA EVITAR EROSIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN



Para obtener la socavación al pie del extremo de un espigón, se utiliza la ecuación obtenida por Maza, al utilizar los datos y el criterio de Latuischenkov. Puede usarse con cualquier sistema congruente de unidades.

$$d_e = 0,855 d_o \left[4,17 + L_n \frac{Q1}{Q} \right] e^{(0,0028\alpha - 0,24k)} \quad \text{Ecu 42}$$

donde :

- d_e : Profundidad máxima en la zona erosionada al final del espigón, medida desde la superficie, asociada al gasto Q
- d_o : Profundidad del flujo, en una zona cercana al extremo del espigón no afectada por la erosión, asociada al gasto Q
- α : Angulo entre el eje longitudinal del espigón y la dirección del flujo, medido hacia aguas abajo

-
-
- k : Talud del extremo del espigón. Es igual a $k = \cot\varphi$, en el que φ es el ángulo que forma el talud del extremo del espigón con la horizontal
 - Q_1 : Gasto teórico que podría pasar por la zona ocupada por el espigón se obtiene al calcular el gasto unitario $q = Q/b$ y multiplicarlo por la longitud del espigón proyectada en un plano perpendicular a la dirección del flujo.
 - Q : Gasto total en el río. Para el cálculo de la socavación se utiliza el gasto asociado en un periodo de retorno entre 25 y 50 años y es mayor que el formativo y puede producir desbordamientos.

La flexibilidad de los espigones construidos a partir de gaviones, ayuda a mantener la seguridad de la estructura si la socavación que se presenta es mayor que la calculada, en cambio un espigón de roca dispuesto a manera de un enrocamiento no tiene el mismo margen de seguridad.

Cuando se desea evitar la erosión, es preferible colocar una protección de roca al pie de cada estructura, con un alto aproximado de 0,5 veces el tirante del río, espesor igual o mayor a dos capas de material y cuya longitud cubra la mitad extrema del espigón.

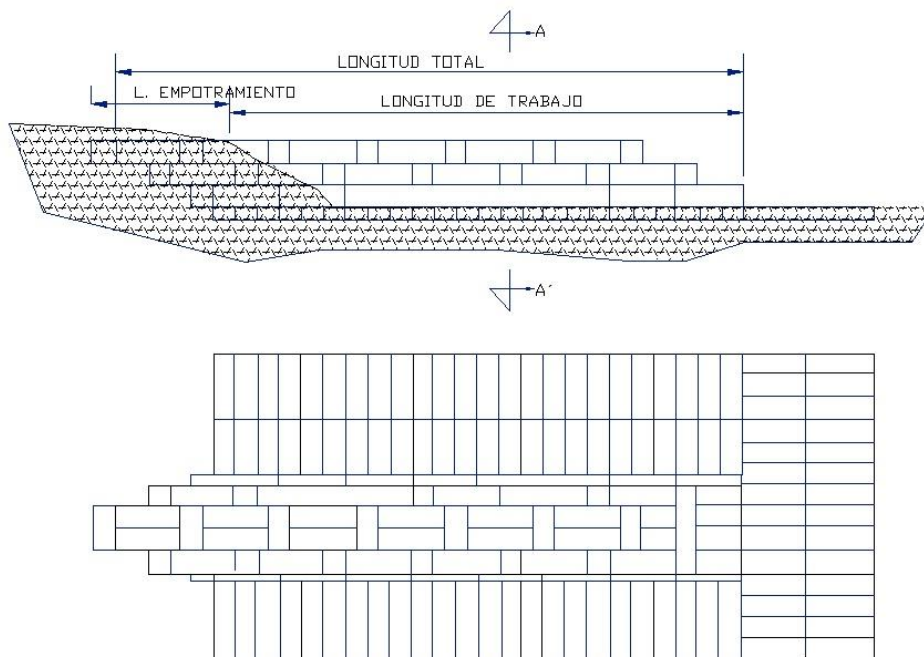
4. ESTABILIDAD DE UNA ESTRUCTURA DE GAVIONES

En nuestro medio es común el encontrar muros de gaviones ya sea como muros de recubrimiento marginal o para sostenimiento de taludes, debido esencialmente a la facilidad de construcción y su bajo costo.

Por esta razón se debe analizar su comportamiento y geometría a fin de que pueda ser utilizado en la construcción de espigones. Las diferentes secciones transversales se proyectarán de acuerdo al empuje del agua que deberá soportar, considerando además que las secciones sumergidas estarán sometidas a un esfuerzo tractivo de la corriente especialmente en casos excepcionales como avenidas. Aquí se muestra la geometría en planta de un espigón.

Figura N° 16

VISTA LATERAL Y EN PLANTA DE UN ESPIGÓN DE GAVIONES



El espigón construido con gaviones tiende a ser más pequeño y elástico que el enrocamiento. Como la finalidad de los espigones es la de desviar la dirección del flujo ello provoca socavación a lo largo de las líneas de corriente bien definidas y como consecuencia de ello se da más profundidad al cauce, esto último es útil cuando se

desea que el río sea navegable.

Los espigones hechos con gaviones son semi impermeables ya que primero desvían a la corriente antes que reducir la velocidad de la misma, además ellos tienen la suficiente capacidad de deformación en su estructura. Al acumularse limo alrededor y dentro del espigón ayuda a que se desarrolle vegetación lo cual provoca que la estructura se consolide dentro de la nueva orilla, lo que coadyuva al control de la erosión.

Si el escurrimiento amenaza con llegar a la orilla donde está empotrado el espigón se debe dar una pequeña protección marginal a ambos lados del espigón, ya que como se dijo anteriormente, en inviernos agresivos, la corriente puede flanquear la estructura, lo que puede provocar su colapso.

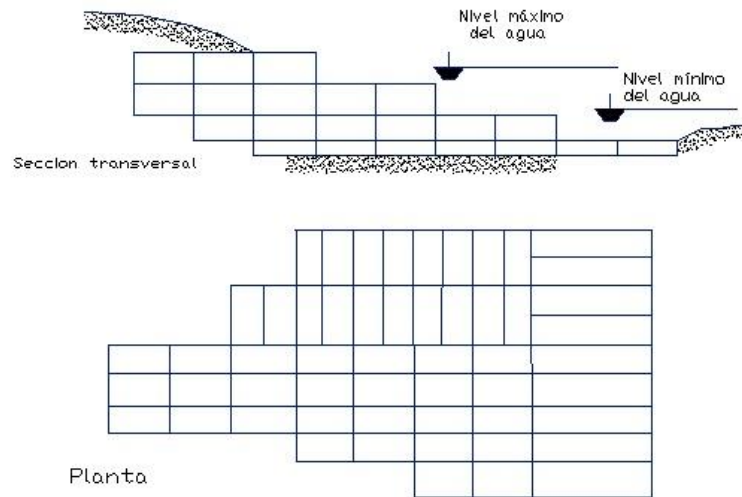
Estas estructuras constituidas por gaviones, no requieren de una excavación previa para ser colocada, sí se espera tener una socavación grande se podrá hacer una pequeña excavación que puede ser útil para minimizar el tamaño del asentamiento diferencial con el uso de suelo mejorado; también este tipo de espigón, puede ser colocado directamente en el fondo del cauce o bien sobre una losa, esta última formada con un gavión tipo colchoneta.

Por otra parte sí el fondo del cauce no está formado por roca o piedras grandes se coloca una platea de protección formada por una colchoneta. Esta platea puede ser eliminada sí el espigón es pequeño (1 o 2 m de altura y hasta 5 m de ancho). Los gaviones que forman la colchoneta son planos y se colocan sobre el lecho del río, están rellenos con material de 10 a 20 cm de diámetro y se alambran unos con otros.

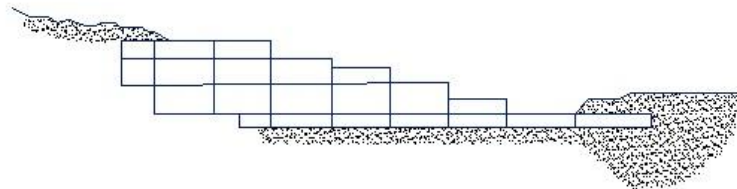
La flexibilidad de la colchoneta asegura que éste siga la forma de la socavación que se presenta en la punta del espigón. La colchoneta puede ser delgada, por ejemplo, de 0.5 m o menos, pero con el peso suficiente para conservarla sobre el fondo, resistir el arrastre producido por la corriente y cualquier tendencia a levantarse. La longitud de la platea es función de la socavación esperada, la experiencia ha mostrado que dicha longitud puede variar entre 1.8 y 6.0 m.

Figura N° 17

ESPIGÓN CON PLATEA



a) Espigón hecho con gaviones y platea con colchón



b) Compartimiento de platea

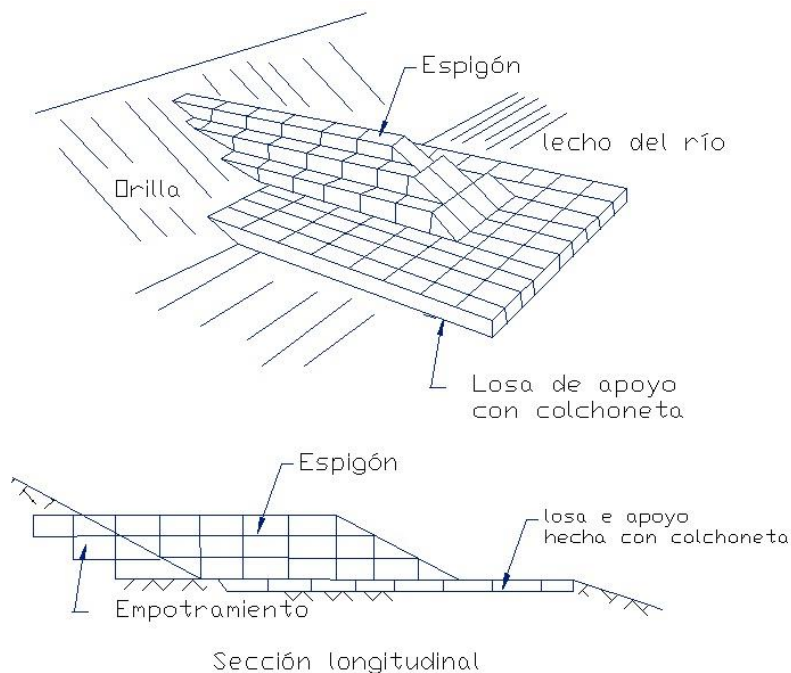
Para que la colchoneta de protección sea adecuada ella debe extenderse hasta que alcance la máxima socavación que se piensa puede presentarse. La colocación de la colchoneta no requiere de una preparación previa solo bastará con alisar un poco la superficie con la ayuda de un tractor, en caso de que el tirante de agua sea apreciable se arman los gaviones y se colocan con ayuda de una grúa.

No es recomendable la construcción de un solo espigón ya que ello ocasiona que se presenten remolinos que lo único que provocan son más problemas, por ello se ha encontrado que el sistema más reducido que puede usarse es el que está formado por tres espigones.

La punta del espigón debe quedar a una altura igual a la del nivel más bajo del agua y de preferencia se bisela y, el otro extremo que va pegado a la orilla debe quedar 30 cm, por encima del nivel más alto del agua y bien anclado a la orilla.

Figura N° 18

PERSPECTIVA DE UN ESPIGÓN



Los sistemas para reconformar el cauce de un río mediante el uso de espigones, se ven exitosamente complementados con los diques y recubrimientos marginales, que son estructuras apoyadas directamente en la margen de un río a fin de evitar que la corriente de agua esté en contacto con el material de las orillas que protegen.

Los recubrimientos marginales pueden ser permeables, semipermeables e impermeables. Permeables cuando permiten el paso libre del agua pero reducen su velocidad para que esta pierda su capacidad erosiva al no poder arrastrar el material de la margen, los elementos que ayudan a lograr esta solución se llaman "Jacks". Los recubrimientos semipermeables son aquellos que cubren las orillas y evitan el contacto directo de la corriente con el material que la forma, aunque no evitan que el agua pueda fluir entre los huecos que forman el recubrimiento. Los recubrimientos impermeables evitan el contacto entre el material de la orilla y el agua (losas de concreto, recubrimientos asfálticos, muros de mampostería, etc).

Las consideraciones para su diseño y construcción son muy similares a la de los espigones. Sin embargo una solución completa con el uso de estos sistemas adicionales, encarecen notoriamente estas obras de defensa, lo cual debe ser evaluado considerando el costo de reposición de obras de infraestructura que queremos proteger de la acción erosiva de un río sin cauce definido.

En nuestro medio el Ministerio de Transportes y Obras Públicas ha normado la construcción de gaviones en las Especificaciones Generales para la construcción de caminos y puentes MOP 001-F-2002, numeral 508-3, que en su parte fundamental señala :

508-3. Gaviones.

508-3.01. Descripción.- Este trabajo consistirá en la construcción de gaviones para muros, estribos, pilastras, defensas de cimentaciones, fijación de taludes o terrenos deslizantes y, en general, para obras de protección de otras estructuras. Los gaviones estarán formados por cajas de tela metálica hecha de alambre de hierro galvanizado, que se rellenarán de piedra o grava.

Los gaviones estarán formados por un tejido metálico de triple torsión, construido con alambre galvanizado de diámetro superior a 2 mm. El tejido será de la forma y dimensión requeridas por el tamaño de la piedra. En todo caso el área máxima de cada abertura de la malla no será mayor de 150 centímetros cuadrados, para alambre de 2,5 mm. y 35 centímetros cuadrados, para alambre de 2 mm. Podrán usarse alambres de diámetro superior utilizando un diseño aprobado por el Fiscalizador.

Las aristas y los bordes del gavión estarán formados por alambres galvanizados cuyo diámetro será como mínimo 1,25 veces mayor que el del tejido. Las costuras de los paramentos que constituyen el gavión, la tapa y las de los gaviones entre sí, se las hará con alambre galvanizado. La piedra a emplearse en el relleno de gaviones será natural o procedente de cantera, de una calidad tal que no se desintegre por la exposición al agua o a la intemperie. El tamaño mínimo de las piedras será el indicado en los planos y disposiciones especiales. Dicho tamaño será, en todo caso, superior a la abertura de la malla del gavión.

La forma y dimensiones de los gaviones serán las indicadas en los planos; en todo caso, una vez montados, tendrán una forma regular, sin alabeos ni deformaciones, tanto si se trata de gaviones paralelepípedos como cilíndricos.

508-3.02. Materiales.- Tanto el tejido metálico como la piedra a emplearse en la construcción de gaviones satisfarán las exigencias previstas en la Sección 819 de las especificaciones generales MOP 2002, referente a la calidad del alambre que conforma la canasta del gavión.

508-3.03. Procedimiento de trabajo.- Antes de la construcción de los muros de gaviones se preparará el terreno base, respetando las cotas anotadas en los planos. Los gaviones se extenderán en el terreno base, antes de rellenarlos, sujetando los vértices de su base con barras de hierro, estacas u otros medios. Se montarán cosiendo sus aristas con alambre galvanizado de al menos 2 mm., de diámetro, y se atarán igualmente con alambre galvanizado a los gaviones ya colocados.

En el relleno, se procurará colocar las piedras de mayor tamaño, en los paramentos del gavión. El relleno se efectuará de modo que quede el menor número posible de huecos, tomando las precauciones señaladas anteriormente y, en general, todas las que sean necesarias para evitar deformaciones.

Una vez efectuado el relleno se cerrará el gavión, cosiendo la tapa con la misma clase de alambre empleado en las ligaduras. Este precio y pago constituirá la compensación total por suministro y transporte de materiales, la preparación del mortero, en caso de mampostería de piedra, y el suministro y transporte de materiales, colocación de la malla y de las piedras, en caso de muros de gaviones; así como por mano de obra, equipo, herramientas, materiales y operaciones conexas en la ejecución de los trabajos descritos.

En un sector con ríos de llanura, similares al caso práctico propuesto en el Capítulo 8 de la presente investigación, a diciembre de 2011 se tiene que el costo por m³ de gavión asciende a 42,60 USD, en tanto que para la escollera de piedra suelta el costo es de 19.60 USD cada m³, con una distancia promedio a la fuente de materiales de 8,70 Km; sin embargo el control de la erosión y la recuperación de la orilla, mediante la sedimentación controlada que se produce con los espigones de gaviones, hace que esta alternativa sea la más adecuada.

5. METODOLOGÍA PARA EL USO DE ESPIGONES SUCESIVOS DE GAVIONES

Con la finalidad de prever la erosión progresiva en las de orillas, recuperar riberas que han sido socavadas por la acción de los flujos de agua del río, encauzar secciones de cauces de ríos utilizando materiales de la zona y aprovechando la capacidad de sedimentación de los materiales de arrastre de la corriente, se sugiere una procedimiento constructivo por medio de espigones sucesivos, dispuestos de tal manera que provoquen convenientemente la sedimentación de flujos sólidos que arrastra la corriente, a fin de que se asienten en lugares predefinidos y de esta manera, se gane secciones de orilla.

Una vez logrado este objetivo, se hace necesario proteger la franja conformada de sedimentos y espigones a través de procesos de revegetación, o muros ubicados en las nuevas líneas últimas de defensa para que aseguren la estabilidad del nuevo cauce. Una nueva etapa de implantación de espigones sucesivos a partir de esa nueva línea de defensa se hace posible, siempre y cuando, el comportamiento del río no provoque una divagación imprevista o inundaciones al otro lado, aspecto que debe ser ampliamente evaluado.

Esta metodología debe emplearse bajo la premisa de recuperar cauces que se han visto afectados por procesos de azolvamientos erráticos que han provocado desplazamientos en el talweg.

1. Trazar el eje del río o de la rectificación

1.1. Radios de curvatura, r

$$2B \leq 5r \leq 8B \text{ (para } r < a \text{ 200 m)}$$

1.2. Cuando una curva se traza con más de un radio de curvatura, estos deben decrecer hacia aguas abajo

1.3. Longitud de los tramos rectos, a_r

$$0 \leq a_r \leq 3B$$

2. Trazar dos líneas extremas de defensa a igual separación del eje. A ellas deberán llegar todos los extremos de la corona de los espigones

2.1. Se deben analizar dos o tres diseños, modificando la ubicación de estas líneas, para seleccionar el más económico.

3. Empotrar los espigones es más costoso que reducir su separación. Para aumentar la seguridad de una protección con espigones, se recomienda reducir su separación.

4. En ríos con márgenes paralelas al eje del río y a las líneas extremas de defensa, se recomienda que la longitud de trabajo de los espigones no sea mayor que $B/4$, ni menor que una vez la profundidad de la corriente d , medida desde el nivel de la planicie o desde el nivel del agua asociado al gasto formativo

$$d \leq L_t \leq B/4$$

5. En ríos con márgenes irregulares, la longitud de los espigones será la que resulte de seguir la metodología sugerida en las Figuras N° 10 y 11 siguiente gráfico:

6. Se recomienda que los espigones sean rectos, pero pueden emplearse también los tipo "L" o "T".

6.1. Cuando la zona más profunda de la curva de un río coincide con la ubicación de la línea extrema de defensa, no se recomiendan los espigones en "L" o "T"

7. Angulo de orientación de los espigones, α

Los espigones debes estar orientados aguas abajo. El ángulo de orientación varía entre límites, así:

$$60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ, \text{ pero se recomienda, } \alpha = 70^\circ$$

8. Angulo de expansión β . Este ángulo teórico varía entre

$$11^\circ \leq \beta \leq 14^\circ;$$

Para diseños:

- conservadores: $\beta = 11^\circ$
- económicos: $\beta = 14^\circ$

9. Separación de espigones en curvas, S_c

9.1. Cuando la margen es paralela a la línea extrema de defensa

$$2,5 L_t \leq S_c \leq 4 L_t$$

9.1.1. Si $r > 4B$, se recomienda:

$$S_c = 4 L_t$$

9.1.2. En diseños muy conservadores o cuando no se puede permitir la erosión de la orilla entre ellos se utiliza:

$$S_c = 2 L_t$$

9.2. Cuando la margen es irregular, la ubicación de los espigones y por tanto su separación, se obtiene gráficamente igual que en el numeral 5.

9.2.1. En diseños conservadores conviene reducir la separación entre espigones en un 20%. Para ello, al seguir lo indicado en el gráfico del numeral 5, se debe dibujar la ubicación de un espigón ya reducida su separación, con respecto al anterior, en un 20% aproximadamente. Una vez ubicado se repite el procedimiento señalado para localizar el siguiente espigón aguas abajo, y así sucesivamente.

10. Separación de espigones en tramos rectos, S_s

10.1. Cuando la margen es paralela a la línea externa de defensa

$$4 L_t \leq S_s \leq 6,3 L_t$$

10.1.1. En un diseño conservador

$$S_s = 6 L_t$$

10.1.2. En un diseño muy conservador o cuando no se puede permitir la erosión de la margen entre ellos

$$S_s = 3 L_t$$

10.2. Cuando la margen es irregular, se recomienda hacer lo señalado en los numerales 9.2 y 9.2.1

11. La separación y longitud de los primeros espigones no es indispensable o relevante en el diseño.

12. Pendiente longitudinal de la corona

La corona de los espigones debe tener una pendiente hacia dentro del río, ella estará limitada por la elevación del agua durante la construcción de las obras. Si se trabaja en seco, la corona debe terminar a unos 50 cm sobre el fondo del río. En espigones de enrocamiento, la pendiente seleccionada debe permitir, en forma segura, el desplazamiento de los camiones y equipo de construcción. Cuando se construye con gaviones o tabla-estacados, la corona tendrá escalones y de ser posible biselados.

13. Elevación de la corona

En su parte inicial o unión con la orilla del río, debe ser igual a la elevación de la margen en ríos de planicie o igual a la elevación de la superficie libre del agua asociada al gasto formativo cuando las márgenes son muy elevadas. En su parte final deben alcanzar la elevación mínima que permita el agua durante la temporada de estiaje. En ríos sin agua, durante la construcción conviene que llegue a 50 cm sobre el fondo.

14. Ancho de la corona o del espigón

Será definido por el material y el proceso constructivo

15. Erosión en el extremo

Los espigones apoyados directamente sobre el fondo del río pueden sufrir erosión en su extremo. Cuando la obra descansa sobre una carpeta de enrocamiento colocada previamente, se evita esa erosión.

16. Conservación y reparaciones

Se debe llevar a cabo durante el primer estiaje posterior a su construcción y en ocasiones durante el segundo o tercer estiaje siguiente. Las principales acciones a emprender son:

16.1. Prolongar los espigones hasta su longitud de diseño, cuando sus extremos hayan sido erosionados (aplica a espigones formados con enrocamiento).

16.2. Unir los espigones que hayan fallado con la orilla, de preferencia anclarlo a un sitio de material más estable.

6. INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DE LAS PILAS INTERMEDIAS, COMO PROTECCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE UN PUENTE

De estudios efectuados por la Universidad del Cauca, en Colombia, sobre procesos fluviales, se destaca que existe gran variedad de razones por las cuales se produce la socavación en los elementos de apoyo de un puente. Sin embargo, una vez que el río ha perdido su forma habitual e inicia a divagar, es imposible realizar un ajuste inmediato en su cauce, por lo que es necesario, garantizar la estabilidad de la estructura a través de varias técnicas ingenieriles, como puede mencionarse, el uso de geometrías adecuadas en pilas que permitan manejar adecuadamente el efecto erosivo local del agua, mientras se implementan otras medidas de protección.

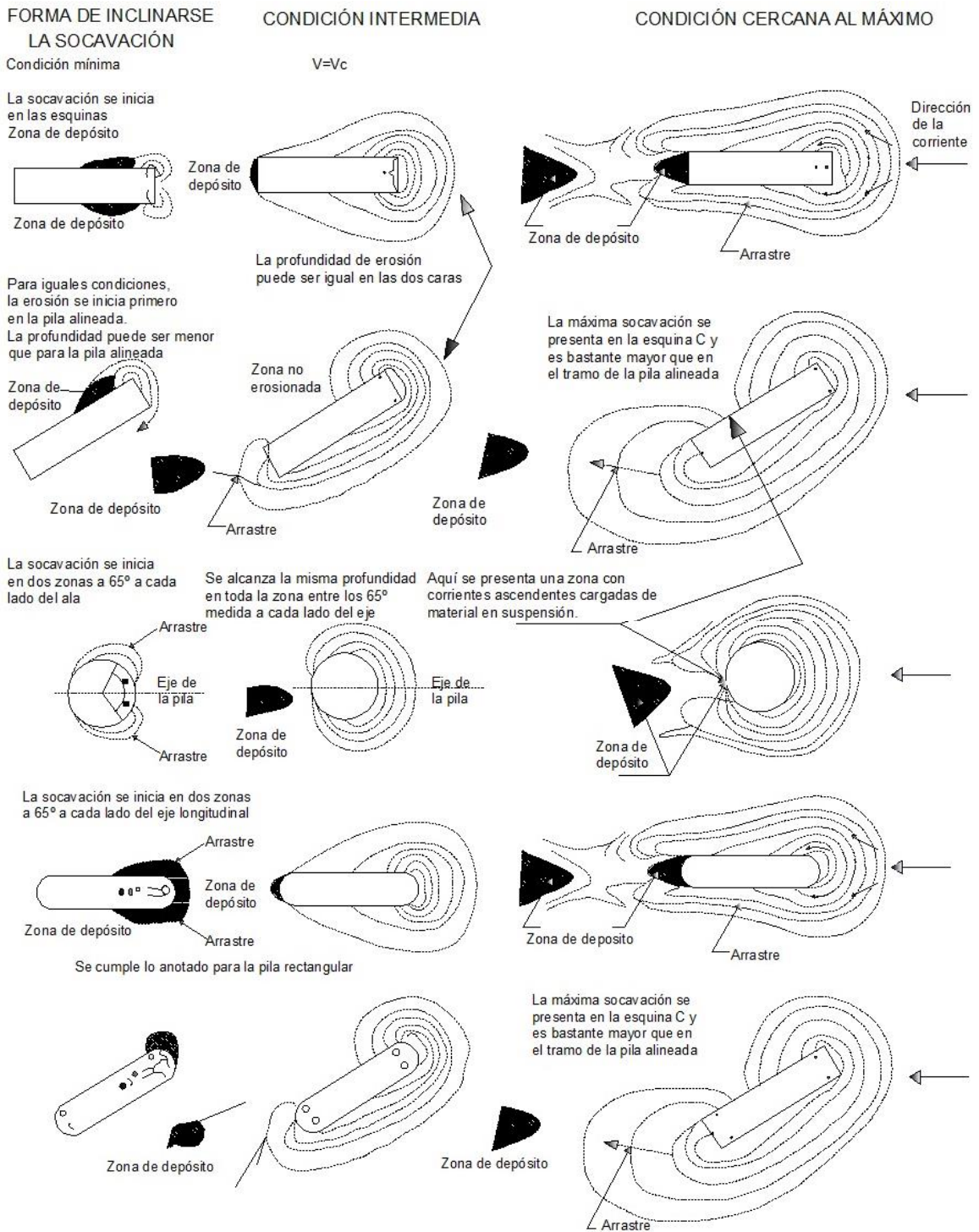
La socavación está asociada a la separación tridimensional del flujo en la cara aguas arriba de la pila y a un vórtice periódico al pie de ella. La acumulación de agua hacia aguas arriba de la obstrucción produce una onda en la superficie y flujo vertical hacia abajo que crea un fuerte gradiente de presiones lo que ocasiona separación del flujo y consecuentemente se originan remolinos al pie de la pila, llamados vórtices de herraduras que son causantes de la socavación.

Bajo la acción de los vórtices, el sedimento es transportado de manera rotacional. El flujo hacia abajo al frente de la pila actúa como un chorro vertical que forma surcos, para luego dar giros en 180°.

El flujo hacia arriba combinado con los vórtices de herradura que se forman en la base de la pila, remueven el material del lecho y si la tasa de transporte de sedimento desde la zona de obstrucción es mayor que el aporte de sedimentos proveniente de aguas arriba, se crea el hueco de socavación. En la Figura N° 19 se presentan casos típicos de este fenómeno donde se aprecia la influencia de la geometría de las pilas.

Figura N° 19

PATRONES DE SOCAVACIÓN PARA DIFERENTES FORMAS DE PILAS
Maza J. A. 1967



6.1. FACTORES EXTERNOS QUE PUEDEN AFECTAR LA ESTABILIDAD DE UN PUENTE

Se considera en estado de equilibrio un río cuando no varía el perfil del fondo y de las márgenes del cauce, entonces existe compensación entre los sedimentos que son transportados hacia el sitio y desde el sitio.

Se considera en estado de erosión o degradación a un río si el nivel del lecho baja o si las márgenes se desplazan hacia afuera, lo que se presenta cuando la carga de sedimentos es inferior a la capacidad de transporte del flujo de agua.

Se considera en estado de sedimentación o gradación al río si el nivel del lecho se eleva o si las márgenes se desplazan hacia el interior del cauce y ocurre cuando hay excesos de sedimentos en el cauce.

El análisis combinado de los varios aspectos involucrados como hidráulica, hidrología, geomorfología fluvial, mecánica de ríos y estructuras, resulta de utilidad en la identificación de factores que intervienen en la localización exitosa y en el diseño de una estructura, como puede mencionarse:

Características y tipo de río.- Geometría, estabilidad del cauce, materiales de lecho y orillas. Puede ser recto, en meandros o entrenzado; pequeño, mediano o grande; torrencial o aluvial, joven, maduro o ser viejo. Cada tipo de río, implica diferentes consideraciones de diseño.

Hidrología.- El registro de caudales y niveles máximos, caudal, hidrograma, la distribución de la velocidad a través de la sección transversal del río, posición del thalweg,

Características de la cuenca de drenaje.- El agua que fluye en un río y su sedimento, están ligados con la clase de cuenca hidrográfica. Entonces necesario evaluar las características geológicas, hidrológicas, topográficas y el uso de la cuenca hidrográfica.

Estabilización del cauce.- Localización y diseño de estructuras de control fluvial dependen de las características del río y de las condiciones impuestas por el puente, como el caso de espigones.

Respuestas a corto plazo.- El estudio de la interacciones puente – río que incluya análisis de información aguas arriba y abajo, coadyuva a determinar la respuesta del sistema fluvial ante la construcción de la estructura.

Respuestas a largo plazo.- Las simulaciones informáticas sirven en este punto para predecir comportamientos en el río, incluida la carretera, al igual que evaluaciones cualitativas, cuantitativas y los modelos físicos resultan fuente de información para su calibración.

Selección del sitio.- La forma, alineamiento del río, fluctuaciones en el tiempo, características geológicas, hidrológicas e hidráulicas del río.

De los resultados obtenidos por varios investigadores a través de estudios al comportamiento de los ríos, han podido determinar que la profundidad de socavación varía de acuerdo a la geometría de las pilas, debido principalmente a la facilidad con la que el agua fluye a través de ellas.

Es así como la forma circular de la columna permite que se formen líneas de flujo homogéneas lo que hace que la formación de vórtices sean mínimos que no influyen aparentemente sobre la pila y su cimentación.

6.2. CÁLCULO DE LA PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN

Para establecer la profundidad de socavación, la Universidad del Estado de Colorado, (CSU), propone utilizar la siguiente fórmula:

$$\frac{y_s}{h} = 2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot \left(\frac{D}{h}\right)^{0.65} \cdot Fr^{0.43} \quad Ecu 43$$

Donde los factores de corrección k_1 , k_2 , k_3 y k_4 son exclusivamente para el cálculo de la profundidad de socavación local en la pila de sección en estudio.

El factor de corrección k_1 se refiere a la influencia de la forma de la sección transversal de la columna en la socavación. La más frecuente es la sección circular para la que k_1 es igual a 1. A medida que el perfil se vuelve más hidrodinámico, el valor de la erosión disminuye.

Para una relación L/D igual a 2, en una pila prismática se puede tomar los valores k1 de corrección del Cuadro N° 10.

Cuadro N° 10

FACTOR DE CORRECCIÓN POR FORMA

Forma de la pila	Factor k1
Circular	1,0
Cuadrada	1,1
Triangular	0,9
Hexagonal	1,1

El factor k2 se refiere a la influencia del ángulo de ataque de la corriente hacia la pila. Esta influencia es irrelevante en secciones circulares por su simetría. Sin embargo, consideremos que el tipo de columna que queremos analizar está formada por un cuerpo prismático, cuyas dimensiones más pequeñas son formadas por semicírculos, lo que logra una figura hidrodinámica eficiente, con la ventaja de existe una mínima posibilidad de que formen vórtices en sus alrededores y la rigidez que presentan las secciones alargadas.

El factor de corrección k2 en función del ángulo de ataque theta y de la relación L/D se obtiene de:

$$k2 = \left(\cos \theta + \frac{L}{D} \text{sen } \theta \right)^{0.65}$$

Ecu 44

Cuadro N° 11

ÁNGULOS DE INCIDENCIA

Ángulo de ataque	L/D = 4	L/D = 8	L/D = 12
0°	1,0	1,0	1,0
15°	1,5	2,0	2,5
30°	2,0	2,75	3,5
45°	2,3	3,3	4,3
90°	2,5	3,9	5,0

Para el caso en que $L/D > 12$, se usan los valores de $L/D = 12$ como máximo.

El factor k_3 , se refiere a la condición del lecho para facilitar el transporte sólido por influencia dunas.

Cuadro N° 12

FACTOR DE CORRECCIÓN POR CONDICIÓN DEL LECHO

Altura de dunas (m)	K_3
0 – 3	1,1
3 –10	1,1 – 1,2
>10	1,3

Frecuentemente se asume un valor de k_3 de 1,1 en vista de que el lecho de un río tiende a ser plano durante las crecientes.

El factor k_4 hace una corrección considerando el acorazamiento del sedimento del lecho para materiales con $D_{50} \geq 0.002$ m ó $D_{95} \geq 0.02$ m. En situaciones extremas puede llegar a ser tan bajo como 0,4, pero comúnmente se asumen valores iguales o menores que 1.

6.3. CÁLCULO DE EXTENSIÓN DE LA SOCAVACIÓN

El Dr. Ing. Arturo Roche Felices, autor de “Erosión en Pilares y Estribos de Puentes”, sugiere como dato práctico para definir la extensión de socavación, como dos veces la profundidad máxima de socavación en la pila analizada.

$$L_s = 2 \cdot y_s$$

Ecu 45

donde:

Ls: Longitud de socavación

ys: Profundidad máxima de socavación

7. ASPECTOS TEÓRICOS EN MODELOS

7.1. INTRODUCCIÓN

La investigación científica a través de modelos matemáticos y los modelos físicos, complementados entre sí, facilita enormemente la comprensión de los fenómenos que a menudo se presentan en la naturaleza, siendo de especial importancia en el área de la ingeniería hidráulica.

La facilidad de simular la gran mayoría de variables que afectan nuestras obras y el impacto que puede provocar de su presencia en el entorno, constituye el éxito de su ejecución, pues podemos obtener aproximaciones importantes a la realidad. Ante la dificultad de comprender la totalidad de los fenómenos que se pudiesen presentar con las obras civiles, los modelos hidráulicos constituyen una eficiente herramienta para representar su comportamiento de manera simplificada y práctica, a diferencia de la representación que se obtiene a través de los modelos matemáticos, donde los diferentes sistemas de ecuaciones, complican la integración de variables que se quiere representar.

El éxito de los resultados que se obtendrán, radica en el estudio preliminar profundo del río, sus principales características, el entorno y posibles afectaciones, las cuales debemos simular de manera ideal en nuestro modelo de laboratorio. Obviamente será necesario dejar de lado, determinadas variables ante la dificultad de ser representadas físicamente en laboratorio, sin embargo deben estar presentes para complementarse con los resultados del modelo ideal de laboratorio.

Los modelos reducidos, modelos físicos o modelos hidráulicos son una técnica para resolver problemas de ingeniería hidráulica, consistente en el ensayo de una réplica del problema a escala reducida. La réplica reducida es lo que llamamos modelo, frente a la realidad que llamamos prototipo. El cálculo es imperfecto debido principalmente a la complejidad de los fenómenos de turbulencia y a la dificultad que imponen los contornos reales, tridimensionales y variables como en un río.

7.2. CONDICIONES DE SIMILITUD

Dentro de las variables y condiciones de trabajo que se manejan en un modelo de

hidráulico, las leyes físicas básicas que deben considerarse son la de gravedad y viscosidad, por tratarse de un flujo de agua libre; y, la rugosidad, donde el material de las paredes y fondo del modelo, tendrán influencia en los resultados que se obtengan de las pruebas de laboratorio.

En un fluido de superficie libre donde las fuerzas de inercia se equilibran por efecto de la gravedad, como en un flujo turbulento a superficie libre, donde la viscosidad del agua a temperatura ambiente (20 °C) es de 0,0100 poises resulta despreciable, se da lo que se conoce como semejanza de Froude, a medida que aumenta el número de Froude, mayor es la reacción inercial de cualquier fuerza; en tanto disminuye, mayor es el efecto de la fuerza gravitacional. Esto garantiza que en su proporción con la resultante, se reproduzcan correctamente los fenómenos en el modelo.

Dado que el proyecto es una simulación de un cauce fluvial a superficie libre, en el cual las fuerzas inerciales y gravitacionales son predominantes, se define que el criterio de similitud según Froude es el que rige el modelo.

$$Fr_m = Fr_p ; Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot y}} \quad \text{Ecu 46}$$

dónde:

Fr_m : Froude Modelo

Fr_p : Froude Prototipo

V : Velocidad

g : Aceleración de la gravedad

y : Calado

Para efectos de conseguir resultados lo más cercanos a la realidad, debemos cumplir las leyes de Froude y de Reynolds en cuanto al flujo en canales.

Si en el flujo normal de un líquido como es el agua existe gradiente de velocidad, se desarrollan fuerzas de fricción que actúan tangencialmente a las mismas. Estas fuerzas de fricción tratan de inducir rotación entre las partículas en movimiento, pero simultáneamente la viscosidad trata de impedir la rotación.

Cuando el gradiente de velocidad es bajo, la fuerza de inercia es mayor que la de fricción, las partículas se desplazan pero no rotan, o lo hacen pero con muy poca energía, el resultado final es un movimiento en el cual las partículas siguen trayectorias definidas, y

todas las partículas que pasan por un punto en el campo del flujo siguen la misma trayectoria. Este tipo de flujo se denomina "laminar", queriendo significar con ello que las partículas se desplazan en forma de capas o láminas, aspecto que favorece a la sedimentación de partículas y por consecuencia la formación de nuevas orillas.

Al aumentar el gradiente de velocidad se incrementa la fricción entre partículas vecinas al fluido, y estas adquieren una energía de rotación apreciable, la viscosidad pierde su efecto, y debido a la rotación las partículas cambian de trayectoria. Al pasar de unas trayectorias a otras, las partículas chocan entre sí y cambian de rumbo en forma errática. Éste tipo de flujo se denomina "turbulento" y se caracteriza porque las partículas no se mueven siguiendo trayectorias definidas, la acción de la viscosidad es despreciable y sus partículas poseen energía de rotación apreciable, por lo que se mueven en forma errática chocando unas con otras, aspecto que favorece a la erosión y socavación del medio.

En consecuencia, cuando las fuerzas de inercia del fluido en movimiento son muy bajas, la viscosidad es la fuerza dominante y el flujo es laminar y en los casos que predominan las fuerzas de inercia el flujo es turbulento. Para efectos de determinar numéricamente ese fenómeno, Reynolds estableció una relación que permite establecer el tipo de flujo

$$N_R = VR_h/\mu \qquad \text{Ecu 47}$$

donde:

- V: Velocidad promedio del fluido en m/s,
- R_h : Radio hidráulico, relación del área mojada A_c y el perímetro mojado p
- μ : Viscosidad cinemática $N \text{ s/m}^2$, relación entre viscosidad dinámica y la densidad del fluido

Se observa que para canales abiertos, como el modelo de simulación del río:

- | | | |
|----------------------------------|---|-----------------------|
| Número de Reynolds < 2000 | : | Flujo laminar |
| Número de Reynolds > 3000 | : | Flujo turbulento |
| 2000 > Número de Reynolds < 3000 | : | Régimen de transición |

Sin embargo, el número de Reynolds y los términos laminar y turbulentos no bastan para caracterizar todas las clases de flujo en los canales abiertos, El mecanismo principal que sostiene flujo en un canal abierto es la fuerza de gravitación. El parámetro que representa este efecto gravitacional es el Número de Froude, puede expresarse de forma

adimensional.

$$Fr = \sqrt{V^2/gL}$$

Ecu 48

donde:

- L: Longitud [m]
- V: Velocidad [m/s]
- g: Aceleración de la gravedad [m/s²]

De esta manera, el flujo se clasifica como:

Fr<1: Flujo subcrítico o tranquilo, tiene una velocidad relativa baja y la profundidad es relativamente grande, prevalece la energía potencial. Corresponde a un régimen de llanura.

Fr=1: Flujo crítico, es un estado teórico en corrientes naturales y representa el punto de transición entre los regímenes subcrítico y supercrítico.

Fr>1: Flujo supercrítico o rápido, tiene una velocidad relativamente alta y poca profundidad prevalece la energía cinética. Propios de cauces de gran pendiente o ríos de montaña.

Entonces el flujo puede ser:

Subcrítico laminar	$N_R < 500$;	$N_F < 1$
Subcrítico turbulento	$N_R > 2000$;	$N_F < 1$
Supercrítico laminar	$N_R < 500$;	$N_F > 1$
Supercrítico turbulento	$N_R > 2000$;	$N_F > 1$

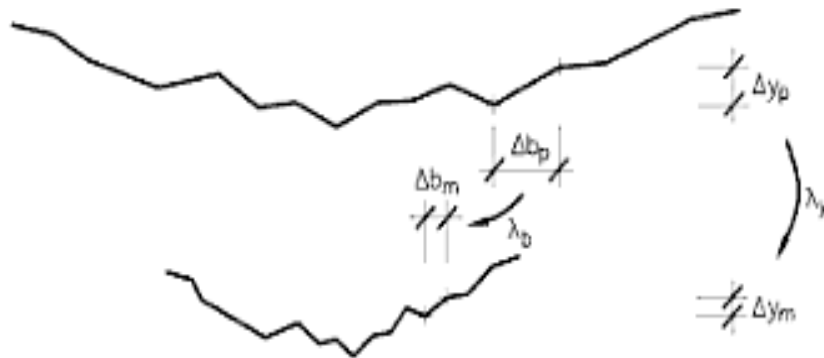
La base de los modelos reducidos es la teoría de la semejanza. La semejanza dinámica completa entre modelo y prototipo es imposible, es decir cada fuerza presente en el problema se reduce de una manera diferente y no en la misma proporción, de prototipo a modelo. Sin embargo, el modelo puede ser aún una buena representación del movimiento real si una fuerza es tan dominante sobre las demás que también pese a la diferente proporción en que se reducen, es dominante en el modelo.

Los problemas de obras hidráulicas y de ingeniería fluvial son dominados por la fuerza de

la gravedad. Las escalas de semejanza más útiles que se deducen de la semejanza de Froude son la de la velocidad $\lambda_v = \lambda^{1/2}$ y la del caudal $\lambda_Q = \lambda^{5/2}$, siendo λ , la escala geométrica. Si una fuerza menor como la viscosidad, tensión superficial, etc., toma en el modelo una importancia como para alterar el movimiento, hablaremos entonces de un efecto de escala.

Figura N° 20

CONSIDERACIÓN DEL PERÍMETRO MOJADO



7.2.1. Similitud hidráulica

La teoría de similitud evocada por Kline señala que: “Si dos sistemas obedecen al mismo grupo de ecuaciones y condiciones gobernantes, y si los valores de todos los parámetros y las condiciones se hacen idénticas, los dos sistemas deben de exhibir comportamientos similares con tal de que exista una solución única para el grupo de ecuaciones y condiciones”.

La correspondencia constante entre las variables del mismo tipo entre el modelo y la realidad, se vuelve muy compleja ya que, no solo se debe lograr similitud en las dimensiones geométricas, sino que también debe simularse las fuerzas actuantes en el fenómeno. Aunque dichas variables, evidentemente no pueden ser reducidas a la escala de un modelo, si es posible adecuarlas de tal manera que permita la visualización de comportamientos y consecuencias que los modelos matemáticos no pueden predecir.

7.2.2. Similitud geométrica

La correspondencia geométrica se logra cuando obtenemos que la relación de todas las longitudes en el modelo, sean iguales, esta similitud se expresa, con la escala de líneas

(l_e), que cuantifica el tamaño relativo de los dos sistemas, siendo “p”, el prototipo o sector que se pretende simular y “m”, el modelo.

$$l_e = \frac{l_p}{l_m} \quad \text{ó} \quad \text{Escala} = \frac{\text{Terreno}}{\text{Papel}} \quad \text{Ecu 49}$$

Esta similitud es posible mantenerla en dimensiones sobre planos horizontales, ya que en los verticales, se distorsiona ante la magnitud de toda la escena por representar, puesto que, el conservar la misma escala de líneas en las tres direcciones implicaría tener tirantes muy pequeños y obras innecesariamente grandes.

Para el área y el volumen se tendrá, en un modelo no distorsionado:

$$A_e = \frac{A_p}{A_m} = l_e^2 \quad \text{Ecu 50}$$

$$V_e = A_e \cdot l_e = \frac{V_p}{V_m} = l_e^3 \quad \text{Ecu 51}$$

7.2.3. Similitud cinemática

La similitud cinemática en el flujo se obtiene cuando las regiones donde ocurre tal flujo son geoméricamente similares, se puede garantizar esa semejanza cuando las velocidades en puntos correspondientes del flujo son paralelas y guardan una proporción constante a través de todo el campo de flujo.

Es decir, que existe semejanza cinemática entre modelo y realidad si, las trayectorias de partículas homólogas son geoméricamente semejantes y, las relaciones entre las velocidades de las partículas homólogas son iguales.

Relaciones de velocidad, aceleración y caudal:

$$\frac{V_m}{V_p} = \frac{\frac{L_m}{T_m}}{\frac{L_p}{T_p}} = \frac{L_m \cdot T_p}{L_p \cdot T_m} = \frac{L_r}{T_r} \quad \text{Ecu 52}$$

$$\frac{a_m}{a_p} = \frac{\frac{L_m}{T_m^2}}{\frac{L_p}{T_p^2}} = \frac{L_m \cdot T_p^2}{L_p \cdot T_m^2} = \frac{L_r}{T_r^2} \quad \text{Ecu 53}$$

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \frac{\frac{L_m^3}{T_m}}{\frac{L_p^3}{T_p}} = \frac{L_m^3 \cdot T_p}{L_p^3 \cdot T_m} = \frac{L_r^3}{T_r} \quad \text{Ecu 54}$$

7.2.4. Similitud dinámica

La semejanza dinámica requiere que las masas y las fuerzas que actúan sobre las partículas de un fluido en el modelo y en el prototipo tengan proporción. Existe la condición de que, para que se cumpla la semejanza dinámica, se deben cumplir las semejanzas cinemática y geométrica. Sin embargo, no siempre es posible alcanzar las tres similitudes al mismo tiempo.

Las fuerzas más comunes que actúan sobre la partícula de fluido, expresadas en términos de las mismas unidades físicas, son:

Inercia:

$$F_i = m \cdot a = \rho \cdot L^3 \cdot \frac{v^2}{L} = \rho \cdot L^2 \cdot v^2 \quad \text{Ecu 55}$$

Gravedad:

$$F_g = m \cdot g = \rho \cdot L^3 \cdot g \quad \text{Ecu 56}$$

Viscosidad:

$$F_f = \tau \cdot A = \mu \cdot \frac{dv}{dy} \cdot L^2 = \mu \cdot \frac{v}{L} \cdot L^2 = \mu \cdot v \cdot L \quad \text{Ecu 57}$$

Tensión superficial:

$$F_s = \sigma \cdot L \quad \text{Ecu 58}$$

Presión:

$$F_p = p \cdot A = p \cdot L^2 \quad \text{Ecu 59}$$

Elasticidad:

$$F_e = K \cdot A = K \cdot L^2 \quad \text{Ecu 60}$$

donde:

- ρ : Densidad del fluido,
- L : Dimensión de longitud,
- τ : Tensión tangencial,
- μ : Viscosidad dinámica,
- dy/dv : Velocidad diferencial a través de un espesor dy de fluido,
- σ : Tensión superficial,

-
-
- K: Módulo de elasticidad del fluido,
 - a: Aceleración de una partícula de fluido,
 - p: Presión media,
 - A: Área sobre la que actúa dicha presión,

De la aplicación de las fórmulas para determinar las fuerzas actuantes, se cumplirá que:

$$F_i = F_g + F_f + F_s + F_p + F_e \quad \text{Ecu 61}$$

Debiendo llegar a determinar la semejanza dinámica entre el fluido del modelo y del prototipo, si se cumple que:

$$\frac{(F_i)_m}{(F_i)_p} = \frac{(F_g + F_f + F_s + F_p + F_e)_m}{(F_g + F_f + F_s + F_p + F_e)_p} \quad \text{Ecu 62}$$

7.3. EFECTOS DE ESCALA

La determinación de las escalas del modelo requiere del análisis de numerosos factores. Las exigencias teóricas, las circunstancias de tipo práctico vinculadas al lugar donde instalaremos el modelo, como el caso de un laboratorio y los objetivos de la investigación, requiere no sólo el conocimiento profundo de las circunstancias teóricas aplicables, sino también de las situaciones vinculadas al lugar donde se va a realizar la investigación, así como los instrumentos de medición disponibles.

Los objetivos que se alcancen en determinado laboratorio con escalas adaptadas a ese entorno, puede variar de otro de diferentes características, debido fundamentalmente a la escala del modelo, hasta puede aparecer fenómenos, como la tensión superficial presente en el modelo, que no corresponden a los que se presentan en la naturaleza, efecto que se denomina efectos de escala.

Las certezas en el dimensionamiento, técnicas de mediciones, fiabilidad de la representación de las variables y resultados experimentales, crece con el tamaño del modelo. Sin embargo, el costo y las facilidades para el manejo de un modelo de gran tamaño, deben ser equilibrados a fin de lograr las metas establecidas a un costo razonable.

7.4. TIPOS DE MODELOS HIDRÁULICOS

Los modelos hidráulicos a escala pueden dividirse en no distorsionados y distorsionados. En los modelos hidráulicos no distorsionados se ocupa una escala única para todas las dimensiones, lo que origina prototipos extremadamente grandes y costosos. Por otro lado se puede realizar los mismos análisis en un modelo distorsionado que consisten en que exista una escala diferente para cada dimensión, tomando en cuenta que los resultados serán menos exactos que los anteriores.

Los modelos reducidos de ingeniería fluvial se pueden clasificar en cuatro grandes tipos, todos ellos analizados según la semejanza de Froude:

- Los modelos de estructuras hidráulicas, es decir, de obras de corta extensión, emplazadas en los ríos y estudiadas en sus características hidráulicas. El fondo es fijo (no erosionable). La preparación del modelo debe atender sobre todo a la correcta reproducción de la geometría
 - Los modelos de lecho fijo o modelos "hidráulicos" de ríos, en sentido estricto. Son de contornos o lecho fijo (no erosionable), y reproducen un tramo extenso del río. El objetivo del modelo es el estudio de las magnitudes hidráulicas: calados, velocidades, superficie inundada, etc. El modelo debe representar correctamente la geometría y la rugosidad fluvial
 - Los modelos de lecho móvil o modelos "fluviales". Son de lecho móvil (erosionable), y también reproducen un tramo extenso del río. El objetivo del modelo es por un lado las magnitudes hidráulicas y por otro el comportamiento del fondo erosionable: erosiones, sedimentaciones, etc. El modelo debe representar correctamente la geometría y la rugosidad y debe emplear criterios de semejanza respecto al sedimento utilizado y respecto a] caudal sólido
 - Los modelos de obras locales en lecho móvil, de corta extensión y realizados para el estudio de fenómenos locales de la superficie libre y sobre todo del lecho, tal como la erosión local. Deben reproducir correctamente la geometría y emplear criterios de semejanza respecto al sedimento
-
-

8. APLICACIÓN PRÁCTICA DEL PROCEDIMIENTO

En busca de realizar un aporte a la comunidad y a la vez establecer la viabilidad práctica del presente trabajo de tesis, se ha buscado en todo sistema fluvial del Ecuador, lugares de importancia estratégica en los cuales se requiera de intervenciones de estabilización de riberas. De los casos analizados, ha sido de particular importancia la ciudad de El Coca, ante una posible socavación progresiva que a futuro, que podría poner en riesgo la estabilidad del puente antiguo y el que actualmente se encuentra en construcción para unir la carretera El Coca – Auca – Tigüino, vía que es de estratégica importancia por las actividades petroleras de la zona.

Actualmente se ha presentado un pequeño islote ubicado en la margen izquierda del río Napo frente al muelle fluvial de pasajeros, el cual, como se observa en las fotografías, esta provocando un paulatino deterioro de la orilla derecha. Esta socavación se prevé que avanzará hasta la desembocadura con el río Coca, por lo que el río Napo, probablemente flanqueará a los puentes existentes inundando esas zonas debido a su topografía, en cuyo caso se haría necesario realizar obras emergentes o nuevos puentes, donde el estado ecuatoriano deberá realizar importantes inversiones a fin de mantener esa importante vía en operación. Cabe señalar que procedimientos de estabilización de riberas oportunamente implementados, resulta muy económicos si se compara con los beneficios logrados.

Para realizar los estudios respectivos, se sugiere investigar en las entidades públicas encargadas de las obras de infraestructura en cada región, a fin de obtener información como la que se detalla a continuación:

8.1. ESTUDIO HIDROGÓGICO – HIDRÁULICO

El puente que sirve a la ciudad de Francisco de Orellana está ubicado aproximadamente a 200 m aguas abajo del puente existente, en un tramo recto y angosto del río Napo, limitado aguas arriba por la confluencia del río Payamino y aguas abajo por la confluencia del río Napo con el Coca.

El propósito de su construcción es dejar de lado el puente antiguo que fue construido en 1973, con la calzada angosta de 3,80 m de ancho y una luz cercana a los 480 m. El puente existente está soportando por cinco pilas que se ubican dentro del cauce natural y que frecuentemente han soportado el impacto de material flotante arrastrado durante los eventos extraordinarios. Sin embargo es el único elemento que permite la circulación y el paso entre los dos márgenes del río, razón por la que esta estructura resulta estratégica para la viabilidad de la zona así como para el desarrollo de la ciudad de las actividades petroleras del país

Ese lugar, la cuenca de aportación del río Napo es de 12 442 km², generando caudales para diferentes periodos de retorno, que se muestran en el siguiente cuadro:

Período de retorno Tr (años)	Caudal (m ³ /s)
5	4 126
10	5 516
25	7 028
50	8 004
100	8 803

El caudal de diseño seleccionado es el correspondiente a una frecuencia de 100 años, esto es, 8,803 m³/s. Para este caudal en la sección del puente se obtiene que el tirante es de 13,08 m y su velocidad media de 4,7m/s, con régimen de flujo subcrítico.

Los ríos Coca y Payamino, ejercen gran influencia en el flujo de sedimentos pues, existe divagación en la ubicación del eje del thalweg, que se explica por la presencia aleatoria de bancos de arena, hecho que ocurre por temporadas debido al comportamiento de esos ríos, y a su comportamiento energético. Esta condición de fluctuación de energía en los ríos no es estable ni permanente.

Cuando el nivel energético del río Coca es mayor que el del río Napo, este último se remansa, reduciendo su velocidad, provocando depósitos de material sólido, principalmente sobre la margen izquierda, concentrándose el flujo sobre la margen derecha, con mayores velocidades lo cual evita la acumulación de sedimentos, ocasionando, por el contrario, procesos de socavación y erosión en el lecho.

En cambio, cuando el nivel energético del río Payamino es similar o superior al del río Napo, el flujo se concentra sobre la margen derecha generando socavación y erosión, mientras que sobre la margen izquierda las velocidades son menores por lo que aparece la acumulación de sedimentos.

El río Napo, en el sector, presenta condiciones complejas, caracterizados por la inestabilidad y movilidad transversal y longitudinal del cauce, por lo que resulta difícil anticipar su comportamiento en el tiempo tanto en lo relacionado a la orientación del flujo como al movimiento y depósito de sedimentos. La corriente arrastra gran cantidad de material y sedimentos a velocidades considerables. Esto provoca daños en las estructuras tanto por los golpes como por efectos de socavación del material granular no cohesivo, cuya potencia está estimada en 10 m.

El sector de emplazamiento de la nueva estructura, tiene márgenes laterales relativamente mucho más permanentes en el tiempo, que los cauces de caudales normales, que divagan frecuentemente dentro del cauce mayor como consecuencia de la presencia de los islotes.

En este tipo de tramos de cursos naturales, las obras de protección de las pilas, quedan rápidamente fuera de la zona de control, pierden su funcionalidad o fracasan porque están sujetas a fenómenos diferentes para los que fueron diseñadas. Condición que permite afirmar que no interesa la forma de la pila, tampoco el sistema de protección local que le brindemos, la solución debe llevarse a un nivel más general, esto es a proveer al sector de emplazamiento y a su entorno, de riberas estables y permanentes, más allá del área de estudio establecida comúnmente en 200 m, tanto aguas arriba como aguas abajo.



8.2. ESTUDIO FLUVIOMORFOLÓGICO

8.2.1. Caracterización de la cuenca de drenaje

La cuenca del río Napo se encuentra ubicada entre los paralelos 00° 01' y 01° 10' de latitud Sur y entre los meridianos 77° 20' y 78° 30' de longitud Oeste; La elevación media de la cuenca esta alrededor de los 1500 msnm.

En resumen los principales parámetros de caracterización de la cuenca de drenaje del río Napo se los aprecia en el siguiente cuadro:

PARÁMETRO	VALOR
El área de la cuenca del río AJ Río Coca (Sitio del proyecto)	12 442 km ²
Coefficiente de compacidad Kc	Kc = 1,58
	Mayor tendencia a las crecidas mientras sea

	próximo a 1
	Kf = 0,36
Factor de Forma, Kf	Una cuenca con factor de forma bajo está menos sujeta a crecidas que otra con igual tamaño y factor de forma más alto
Vegetación	Exuberante, encierra la mayor reserva forestal con gran variedad de especies
Sistema de drenaje	El río Napo corresponde al 6 ^{to} orden
Densidad de drenaje	D = 1,9 km//km ² 0.5 km/km ² es drenaje pobre, 3,5 km/km ² es excepcionalmente bien drenada, por lo que la cuenca es bien drenada.
Extensión media de la escorrentía superficial (km ²)	285 km ² . A mayores valores, mayor recorrido del agua hasta el cauce
Sinuosidad de la corriente	1.18 Valor menor a 1,25, por lo tanto es de tendencia sinuosa
Pendiente media de la cuenca	15%
Curva hipsométrica	A mayor pendiente, menor tiempo de concentración Cota vs. área acumulada así como las áreas trazadas para el cálculo de la curva
Pendiente media del curso principal	0,14% Pendiente media en el tramo analizado, considerando 1000 m aguas arriba y 1000 m aguas abajo de la sección de implantación. A mayor pendiente, mayor velocidad

Los contornos del flujo no son constantes y, tanto en el cauce principal del río como en las zonas identificadas históricamente como de inundación, se producen regularmente acumulaciones de material y posteriormente su erosión, como función de la velocidad de flujo, de la carga sólida transportada y de los niveles energéticos de los ríos Payamino y Coca.

8.2.2. Determinación del coeficiente de rugosidad "n"

Según el procedimiento de Cowan y tomando en cuenta los factores primarios que Influyen en la determinación del valor del coeficiente de rugosidad "n", el valor será igual a:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m_5$$

Factor n _i	Efecto considerado
n ₀	Uniformidad del material que conforma el cauce
n ₁	Grado de irregularidad de la superficie de la sección
n ₂	Variaciones en forma y tamaño de la sección transversal
n ₃	Presencia de obstrucciones
n ₄	Presencia de cobertura vegetal en el cauce

m_5

Grado de meandro del tramo

Valores para estimación del coeficiente “n” en el cauce principal del río Napo

Factor n_i	Efecto considerado	Calificación	Valor adoptado
n_0	Material natural en canal uniforme	Arena de tamaño uniforme	0,017
n_1	Irregularidad de la superficie	Menor	0,001
n_2	Variación en forma y tamaño de la sección transversal	Variación gradual en la sección transversal	0,000
n_3	Presencia de obstrucciones	Efecto relativo menor de las obstrucciones del tramo evaluado	0,005
n_4	Vegetación presente	No existe vegetación en el cauce principal	0,000
m_5	Grado de meandros	Apreciable	1,300
Valor “n” cauce principal :			0,030

Valores para estimación del coeficiente “n” en las márgenes de inundación

Factor n_i	Efecto considerado	Calificación	Valor adoptado
n_0	Material natural en canal uniforme	Material regular relativamente fino como grava o arena	0,013
n_1	Irregularidad de la superficie	Menor	0,001
n_2	Variación en forma y tamaño de la sección transversal	Variación gradual en la sección transversal	0,000
n_3	Presencia de obstrucciones	Efecto relativo menor de las obstrucciones del tramo evaluado	0,005
n_4	Vegetación presente	Poca presencia de vegetación de tamaño mediano	0,008
m_5	Grado de meandros	Apreciable	1,300
Valor “n” márgenes de inundación :			0,035

El material sólido que conforma el cauce principal y de inundación del tramo donde se ubica el puente, corresponde al tamaño de las arenas o menor. No existen sedimentos gruesos. El material sólido que ha sido arrastrado por el río desde los tramos superior y medio se ha depositado y avanza en forma de bancos de azolve cuya ubicación, no es fija e impredecible en el tiempo. El material sólido más fino sigue siendo transportado mediante procesos de suspensión.

La sinuosidad en el trazado y presencia de la desembocadura del río Coca, que genera un efecto de remanso sobre el Napo cuando su nivel energético es mayor, dificulta la descarga produciéndose un incremento de niveles, una disminución de velocidades y un mayor depósito de material sólido. La descarga del río Payamino, en cambio altera las condiciones de flujo debido al aporte de caudal líquido y sólido que debe ser absorbido en el tramo de interés.

8.3. ESTUDIO HIDROLÓGICO

8.3.1. Generalidades sobre las características climáticas

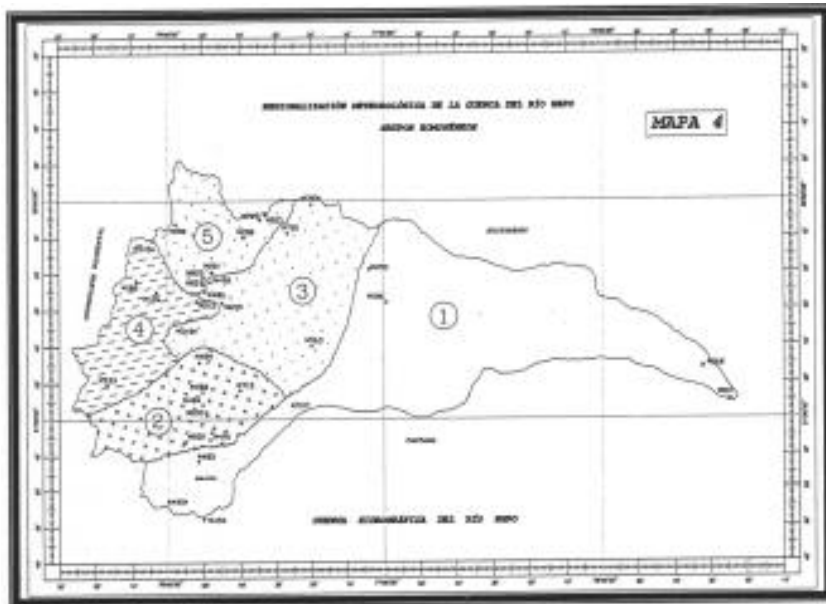
8.3.1.1. Clima de la cuenca del río Napo

Esta zona presenta un clima tropical - húmedo, con lluvias persistentes, una intensa evaporación y temperaturas promedio de 25° C; En zonas similares a 500 msnm, y que comprende la depresión Ila – Archidona - Jondachi, al norte, la del Upano al centro, y las Del Zamora Chinchipe al sur, la temperatura media es de 25° C, con lluvias abundantes, es la zona de mayor pluviosidad en el país. Soporta una humedad constante que en algunos meses se mantiene por encima del 90%.

En el bajo Oriente, que comprende la selva ecuatorial, existe un clima cálido ecuatorial, cuyas temperaturas oscilan por los 26° C, con lluvias abundantes pero sin estación seca; la media de las lluvias es 2879 mm y la humedad relativa pasa del 80%, con vientos dominantes alisios de norte a este.

Esta situación justifica la presencia de lluvias todo el año, siendo más notorias en los meses entre enero y julio causando crecidas e inundaciones en las poblaciones ribereñas.

Delos estudios realizados para el proyecto Coca – Codo Sinclair y de los registros del INHAMI, la zona se obtiene una regionalización pluviométrica de la cuenca del río Napo en función de la precipitación anual y de su altura, apreciando que el lugar del estudio, se encuentra en la zona No. 1 con una altura de 290 msnm.



$$P_{(mm)} = 150,96 (\text{altitud})^{0,5263}$$

$$P_{(\text{media anual})} = 2984,2 \text{ mm}$$

Valores de intensidades máximas en 24 Horas

Tr (años)	Intensidades máximas en 24 horas (mm)
5	11,21
10	12,94
25	15,10
50	17,26
100	19,42

Para la estación INHAMI en el Coca:

Tiempo de duración 5 min < 120 min.

$$I_{TR} = 75,204 Id_{TR} t^{-0,4828}$$

Tiempo de duración 120 min < 1440 min

$$I_{TR} = 371,89 Id_{TR} t^{-0,8152}$$

donde

I_{TR} : Intensidad máxima para cualquier período de retorno (mm/hora)

Id_{TR} : Intensidad diaria para un período de retorno dado (mm/hora)

Td : Tiempo de duración de la lluvia (minutos)

Con los valores de $I_{d_{TR}}$ para la zona de estudio, se obtiene los valores de intensidad de lluvia de 554 min., el mismo que corresponde al calculado para el tiempo de concentración T_c de la cuenca para diferentes períodos de retorno.

**Valores de $I_{d_{TR}}$ e I_{TR}
($T_d = 554,0$ min)**

Tr (años)	$I_{d_{TR}}$	Intensidad de lluvias (mm/hora)
100	3	103,6
50	2,8	119,5
25	2	139,4
10	1,8	159,4
5	1,5	179,3

Para determinar valores para caudales de escorrentía, debemos considera que la escorrentía total se divide en dos partes: la escorrentía directa, que es aquel flujo superficial o subsuperficial que llega pronto al cauce; y, el caudal base, que es el resto del agua que falta por llegar a la corriente y que en la mayoría de los casos se refiere a aportes por flujos de agua subterránea.

Los caudales medios mensuales del río Napo antes de la junta con el río Coca corresponden a los siguientes valores:

Q MENSUAL MÁXIMO =	1 896 m ³ /s
Q MENSUAL MEDIO =	941,7 m ³ /s
Q MENSUAL MÍNIMO =	353,3 m ³ /s

Con el estudio de regionalización hidrometeorológica de las cuencas amazónicas, para la cuenca del río Napo se han obtenido valores en función de la superficie de la cuenca, los que corresponden a:

Q MENSUAL =	1 017,41 m ³ /s
Q ANUAL =	1 063,05 m ³ /s
Q EXTREMO =	3 428,12 m ³ /s

Factores adimensionales para la estación H735 (Coca)

PERIODO DE RETORNO				
5	10	20	50	100

Factores	1,6814	2,1774	2,6531	3,269	3,7305
Caudales (m³/s)	5 764,0	7 464,3	9 095,3	11 206,0	12 788,0

Las características de la cuenca justifican el hecho de que las variaciones estacionales en el río Napo varíen entre 0.50 a 1.50 veces el caudal medio mensual multianual presentando un régimen hidrológico unimodal.

A partir de la serie de caudales medios diarios obtenidos a base de la correlación con la cuenca del Coca AJ Napo, se define el caudal medio interanual en 941,7 m³/s, siendo el caudal mínimo medio de 816,8 m³/s, con una oscilación entre 353,4 m³/s en el mes de enero y 970,22 m³/s en el mes de junio.

Los valores extremos mínimos son por lo tanto menores a 353,4 m³/s, que ocurren preferentemente durante los meses de diciembre o enero, en condiciones normales.

El caudal máximo medio interanual obtenido de la serie de caudales medios mensuales es de 1 051,20 m³/s, con una variación entre 961,43 m³/s y 1 896,93 m³/s. Se ha observado que las crecidas del río Napo ocurren preferentemente entre los meses de marzo a junio.

8.3.2. Determinación de los niveles de la superficie libre del agua y velocidades medias en el área de estudio

De las ecuaciones de flujo uniforme más utilizadas, obtenemos según Manning:

$$V = \frac{1}{n} * R_h^{2/3} * S^{1/2}$$

donde:

- V: Velocidad de flujo, en m/s
- n: Coeficiente de Manning
- Rh: Radio hidráulico de la sección, en m
- S: Gradiente o pendiente hidráulica, adimensional (línea de energía)

$$Q = V * A$$

donde:

- Q : Caudal medio m³/s
 - A : Area hidráulica, m²
-
-

**Profundidades y velocidades medias de flujo en el tramo de estudio
para el caudal de diseño para el Tr = 100 años**

Ubicación de la sección	Profundidades (m)	Velocidades medias (m/s)	Régimen de flujo
Eje del nuevo puente	13,08	4,70	Sub crítico

8.4. ESTUDIO SEDIMENTOLÓGICO

Al referirse sobre este tema, hay que considerar que entre estos factores, los que tienen relación directa con el régimen hidrológico son la erosión laminar y el transporte de sólidos. Los sedimentos transportados por el río debido a acciones de algunos factores geomorfológicos como:

- La erosión laminar o pérdida de suelo desde las zonas de mayor pendiente, que conforman la parte alta de la cuenca y que alimenta al material del fondo de los cauces por el escurrimiento superficial.
- Deslizamientos de los taludes provocados por las corrientes naturales que actúan permanentemente en el pie de los mismos. Las masas desprendidas son capaces de taponar las secciones transversales generando el riesgo posterior de rupturas violentas por la formación errática de diques.
- Transporte de material sólido por el flujo de agua en suspensión y junto al fondo

La erosión laminar a diferencia de la erosión en cárcavas o en forma de grandes movimiento de masa de suelo, depende de varios factores entre los que se puede mencionar:

CLIMA:	Duración e intensidad de la lluvia.
SUELO:	Textura, estructura, permeabilidad de las capas superficiales, tipo de material del subsuelo, infiltración en los diferentes horizontes del subsuelo.
FISIOGRAFÍA:	Tipo de relieve orográfico, pendiente, longitud, forma y densidad de drenaje.
VEGETACIÓN:	Tipo y densidad de cobertura vegetal, métodos de riego utilizado en cultivos.

Un factor importante que debe tomarse en cuenta para la selección del valor de índice de erosión se refiere al área y forma de la cuenca, pues el comportamiento y efecto de la erosión laminar depende del factor topográfico que involucra pendientes y longitudes de la zona de aporte al cauce natural, A base de la información presentada en el estudio Hidro - sedimentológico de las cuencas del Pastaza y Paute, se observa que la subcuenca definida hasta la estación Pastaza AJ Encanto tiene un área aproximadamente del mismo orden de magnitud que la cuenca analizada.

En este caso, a base de la medición de la carga de material sólido en el curso natural se ha registrado un valor de índice de erosión igual a 345 ton/km²/año, que se considera como representativo y adecuado para la cuenca del río Napo AJ Coca.

El inicio del movimiento de las partículas se relaciona con el esfuerzo de corte en el fondo, el esfuerzo de corte crítico, la velocidad media en la vertical y la velocidad en el fondo del cauce. Lo que se requiere evaluar es la cantidad total del material que puede ser transportado ya sea en suspensión o rodando, deslizándose o saltando en el estrato del fondo del cauce natural del río, debido a que durante la crecida las dos formas de movimiento son importantes.

Hay tres parámetros importantes que afectan la carga de fondo y que debe considerarse:

- El tamaño del material de fondo o la velocidad de caída de las partículas.
- La pendiente longitudinal de la corriente o velocidad promedio de la corriente.
- La naturaleza del cauce, lo que incluye: profundidad, tamaño, forma y rugosidad.

Con el área de aporte, el peso específico del sedimento saturado igual a 1,5 Ton/m³ se obtiene el caudal sólido de 0,098 m³/s, que sería producido únicamente por erosión laminar de la cuenca del río Napo.

Para efecto de cuantificación del volumen total de material sólido que ingresa al tramo de estudio, se adopta un valor igual al doble del caudal sólido producido por erosión laminar en la cuenca. Esto da como resultado que la carga sólida que ingresa al tramo es del orden de 0,2 m³/s.

8.4.1. Evaluación teórica de la capacidad de transporte en el tramo en estudio

En razón de que el tramo analizado presenta bajas pendientes y los procesos de transporte generan suspensión y acarreo junto al fondo, se considera aplicables para el cálculo de transporte en ríos de llanura a las ecuaciones de Engelund - Hansen, Leo Van Rijn y Frijlink.

Capacidad de arrastre (expresada en caudales) como función de los caudales pico líquidos

Periodo de retorno Tr (años)	Caudal líquido (m ³ /s)	Caudal sólido (m ³ /s/m)		
		ENGELUND - HANSEN	VAN RIJN	FRIJLINK
5	4 126,0	0,02404	0,00609	0,00065
10	5 716,0	0,03331	0,01339	0,00097
25	7 028,0	0,04095	0,02119	0,00108
50	8 004,0	0,04664	0,02832	0,00116

100	8 803,0	0,05129	0,03531	0,00124
-----	---------	---------	---------	---------

Para la evaluación del volumen total de sólidos, es importante aclarar que esta capacidad de transporte se presenta únicamente durante el tiempo de duración de la crecida que puede variar entre 2 a 4 horas.

Se observa que la capacidad de transporte en el tramo de aproximación y en la sección de emplazamiento del puente varía entre 9,36 m³/hora/m a 17,84 m³/hora/m, durante el período de crecida de 4 horas, lo que significa que es posible evaluar el volumen de material sólido que el río podría arrastrar durante el tiempo de duración de una crecida.

La capacidad de transporte en la sección de implantación del puente para los caudales de crecida. Además, la morfología del cauce presenta ensanchamientos considerables tanto hacia aguas arriba como hacia aguas abajo de la sección de implantación seleccionada, lo que provoca una disminución de la capacidad de arrastre dando lugar a la formación de bancos de azolve.

Las profundidades de flujo se presentan para la sección de implantación del puente y varían entre 9,66 y 13,06 m; las velocidades correspondientes fluctúan entre 3,76 m/s y 4,70 m/s.

8.5. INFORMACIÓN DE MECÁNICA DE SUELOS

Con el objeto de lograr las evaluaciones de las profundidades probables por socavación y por azolve en la sección transversal de la zona alrededor del puente, la misma que va a ser bastante similar a la zona identificada como de potencial riesgo por la socavación en proceso, se realizó una granulometría del material en el lecho aluvial, de cuyo análisis se obtendrán los parámetros característicos de tamaño de las partículas que conforman este lecho.

ENSAYO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS

UBICACIÓN:	CIUDAD DE EL COCA – MARGEN DERECHA				
PERFORACIÓN:	PR - 2				
MUESTRA No.	PR – 10				
PROF: (m)	10,00 – 10, 45		FECHA:	NOVIEMBRE 2001	
	PESO HÚMEDO (gr)	PESO SECO (gr)	PESO TARA (gr)	CONTENIDO HUMEDAD (%)	VALOR PROM
CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL	69,88	61,87	9,56	15,31	15,78
	66,63	58,64	9,47	16,25	
LIMITE LIQUIDO	NO PLÁSTICO				
LIMITE PLÁSTICO	NO PLÁSTICO				

TIPO DE SUELO

GRAVA	60	CLASIFICACIÓN SUCS
ARENA	29	
FINOS	11	GW - GM

DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA

PESO INICIAL: (gr)			160,23
PESO PARA CALCULO: (gr)			138,39
TAMIZ No.	PESO RETENIDO ACUMULADO (gr)	% RETENIDO	% PASA
1"	16,20	12	88
3/4"	33,10	24	76
1/2"	63,32	46	54
3/8"	73,61	53	47
No. 4	83,29	60	40
No. 10	89,45	65	35
No. 40	111,27	80	20
No. 200	122,74	89	11

Los perfiles de socavación general en cauces naturales para suelos heterogéneos del proyecto sobre el tramo del Río Napo, donde se ubicará la estructura del puente atirantado constan en el Anexo 2.

8.6. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICO – GEOTÉCNICA DEL SECTOR MARGEN IZQUIERDA

El subsuelo encontrado en las 2 perforaciones efectuadas (P1 y P2), hasta la profundidad estudiada, comprende los siguientes estratos y caracterización geomecánica:

ESTRATO A.- Limo arcilloso de consistencia media con algo de arena fina y residuos de materia orgánica, con N_{spt} en el orden de 10. En el área de estos sondeos, su presencia es poco significativa por su espesor de 0.75 m, a lo mucho.

ESTRATO B.- Arenas limosas de grano medio a grueso con algunas gravas de compacidad relativa suelta a media densa. Se encuentra bajo la capa anterior y está localizada aproximadamente entre las cotas + 247,30 y + 233,50. Comprende un espesor superficial de aluviales de baja compacidad con registros de N_{spt} desde 10 a 31.

Presenta intercalaciones de estratos de limos arenosos de consistencia medio duro o arenas limosas, con espesor hasta de 2 m, bajo la cota +230.00

El contenido de finos según el porcentaje que pasa el tamiz # 200 en el ensayo granulométrico, varía de 6 a 25% y según el SUCS se clasifican en su mayoría como SP - SM y en menor proporción como SM.

ESTRATO C.- Constituido por Depósitos aluviales formados por arenas de grano medio o grueso con gravas de hasta 1", de alta compacidad relativa, con registros de Nspt que varían desde 56 hasta mayor de 200. Se encuentran entre 15 y 33,0 m de profundidad (cotas + 233,50 a + 215,00. El contenido de finos es muy pequeño, entre 1,0 y 8% por lo que según SUCS se clasifican como SP, SP-SM, SW-SM, y SW, de muy alta resistencia al corte.

ESTRATO D.- Rocas sedimentarias blandas, limolitas y argilitas, desde la cota +215,0 a las + 203,0. Presenta alto índice de recuperación y calidad, bajo grado de fracturamiento, con registros de RQD (Rock Quality Designation) mayor de 75% y Nspt mayor de 200.

Los registros de perforación y los perfiles estratigráficos de las perforaciones efectuadas en el río Napo, se presentan en el Anexo 3.

8.7. RECUPERACIÓN DE UNA PARTE DE LA RIBERA DEL RÍO NAPO, UTILIZANDO LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Con toda la información estudio hidrológico, hidráulico, fluviomorfológico, sedimentológico, de mecánica de suelos y la caracterización geológico – geotécnica, que para el presente caso ha sido obtenida del estudio definitivo para el rediseño de la superestructura del puente sobre el río Napo y sus accesos, ubicado en la carretera Coca – Auca – Tigüino en la provincia de Orellana, que el Ministerio de Transporte y Obras Públicas dispone para la ejecución de dicha estructura, además se ha logrado importante información de la documentación contractual que reposa en el Consejo Provincial de Sucumbíos, entidad que lleva a cabo la ejecución de la construcción del puente atirantado sobre el río Napo.

Durante el mes de septiembre del 2011 en la visita de reconocimiento del sitio escogido, esto es la ciudad de El Coca, Provincia de Orellana, específicamente en la zona del muelle fluvial de pasajeros y su orilla contraria, se determinó la necesidad de adaptar un Formulario de Registro de Campo, como complemento de la información recabada (Anexo 1), con lo que se contaría con todos los elementos de juicio necesarios para aplicar el procedimiento de cálculo descrito en el Capítulo 5.

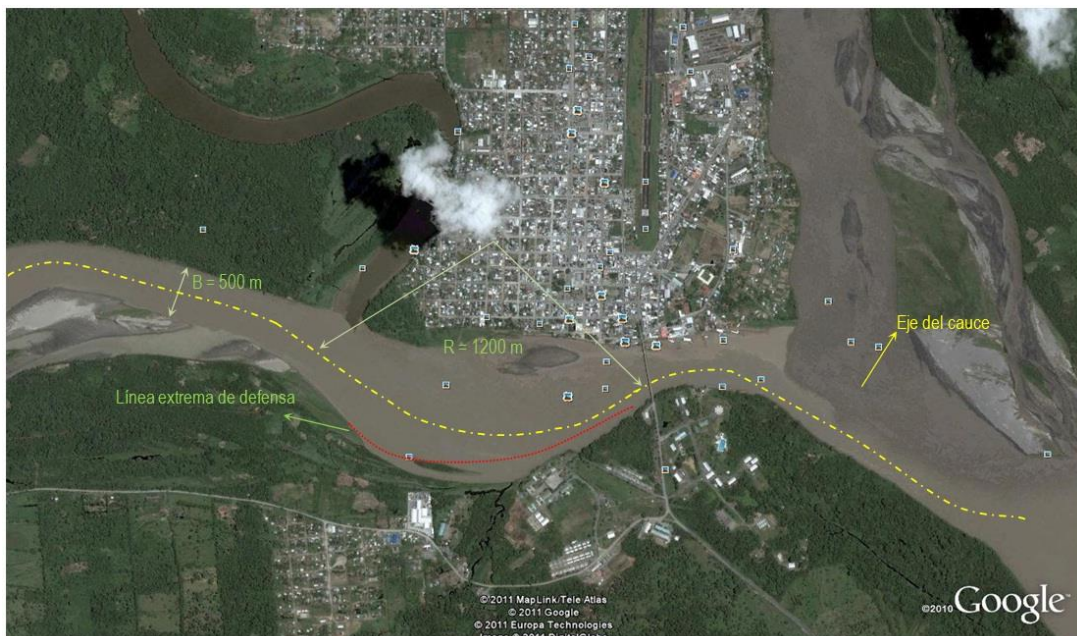
Es de señalar que el método presentado resulta teóricamente aplicable y que se sustenta en experiencias similares en otros países, producto de amplias investigaciones sobre el uso de estas protecciones ribereñas.

Para el caso particular de estudio, se ha visto la necesidad de realizar intervenciones por etapas debido principalmente a la magnitud y estado de socavación de la orilla. El período entre cada intervención dependerá de tres factores decisivos y dependen entre sí, como son, el grado de sedimentación del río, el comportamiento energético del río Coca y el del río Payamino.

8.7.1. Trazar el eje del río o de la rectificación

La determinación de los parámetros geométricos del cauce consiste en un sencillo proceso gráfico, mediante el uso de fotografías aéreas, cartas topográficas o el empleo de imágenes satelitales disponibles en el internet del lugar en estudio y a una escala conveniente, que permita tener una idea global de los objetivos y resultados esperados de la implementación de gaviones sucesivos para corregir la orilla en proceso de socavación.

De conformidad con lo base teórica del método, se sugiere establecer el eje del cauce, con el fin de trazar paralelas a éste las líneas extremas de defensa, definiendo así las nuevas orillas del río. De la experiencia profesional y por el comportamiento del río Napo en la zona de estudio, se considera más adecuado establecer la línea de eje por donde se encuentra las zonas de mayor profundidad ya que allí es donde se desarrollan las mayores velocidades y por lo tanto de mayor capacidad energética del agua.



Las márgenes del río Napo están formadas por lo general de arena limosa, la orilla que se desea proteger es una curva aislada muy extensa, donde se presume que su origen resulta de la formación de un gran banco de arena ubicado en la orilla contraria que empuja la corriente hacia el

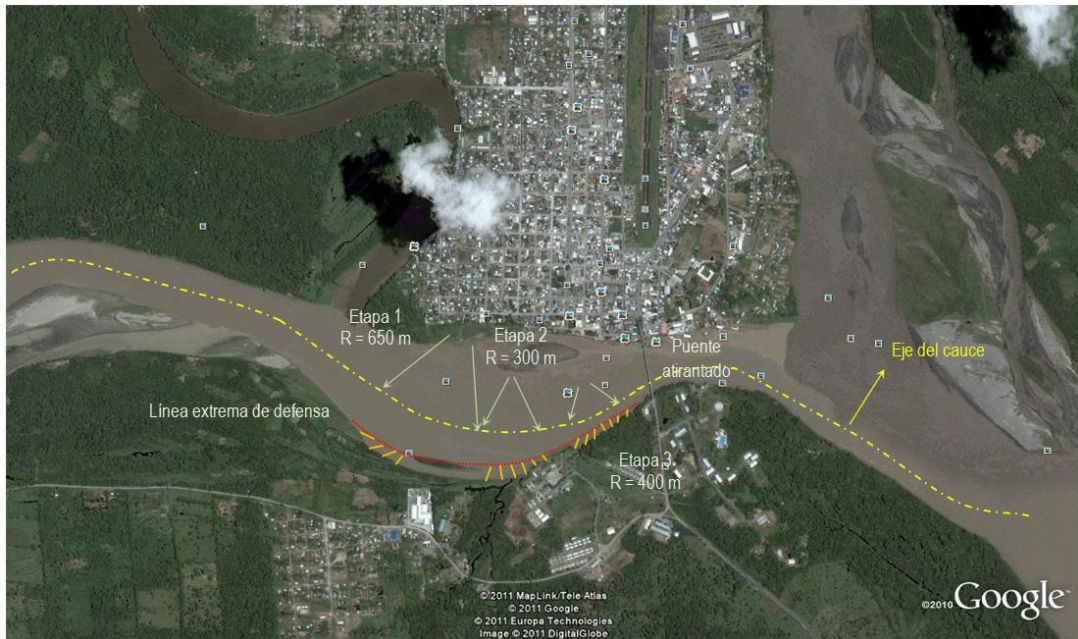
otro lado, provocando la desestabilización del encauzamiento natural. Por esa razón, debe realizarse intervenciones por etapas, con la finalidad de ir recuperando paulatinamente la orilla, aprovechando los islotes que aún persisten conjuntamente con los espigones ubicados estratégicamente.

Desde un punto de vista particular, el objetivo principal de la aplicación de la metodología en este caso, se concentra en recuperar y estabilizar una sección de la orilla más afectada por la acción erosiva del agua. Sin embargo, cabe mencionar que la permanencia de una sección más amplia del río es esa zona, es fundamental debido a la presencia de la desembocadura del río Payamino, donde el cuerpo de agua funciona a la vez como un dissipador de energía en épocas de crecida, igual efecto tiene cuando el Coca presenta un mayor comportamiento.

Es precisamente este comportamiento errático en los ríos afluentes del Napo en esa zona, que provoca la erosión descontrolada de las orillas, razón por la que debe estabilizarse y proteger los puentes que sirven de comunicación a zonas petroleras de vital importancia económica para el país.

En función del análisis señalado, partimos con la siguiente información:

- Ancho en tramos rectos: $B_{\text{Napo}} = 600 \text{ m}$
 - Ancho en la zona a intervenir $B_{i\text{Napo}} = 1200 \text{ m}$
 - Radios de curvatura:
 - Etapa 1 $r_{1\text{Napo}} = 650 \text{ m}$
 - Etapa 2 $r_{2\text{Napo}} = 300 \text{ m}$
 - Etapa 3 $r_{3\text{Napo}} = 400 \text{ m}$
 - Tirante del río: $d_{\text{Napo}} = 8 \text{ m}$
 - Tirante del río en estiaje: $d_{e\text{Napo}} = 6 \text{ m}$
 - Altura media en la orilla: $h_{m\text{Napo}} = 3 \text{ m}$
-
-



8.7.2. Longitud de los espigones

La sección del sector intervenido es extensa y tradicionalmente trabaja absorbiendo el comportamiento energético de los ríos Coca y Payamino, por lo que conviene detener el avance progresivo de la erosión hacia la orilla derecha. Considerando este aspecto y con el fin de aumentar la seguridad de la protección planteada, se optará por reducir la separación entre los espigones, en lugar de empotrarlos.

En el presente caso: $L = L_t + L_e \rightarrow 0$ la longitud de empotramiento, L_e , es igual a 0.

Se debe verificar que: $d \leq L_t \leq B/4 \rightarrow 10 \leq L_t \leq 300/4$

Por lo tanto la longitud de los espigones a proyectar varía entre 10 y 75 m.

En ríos con márgenes irregulares, la longitud de los espigones será la que resulte de seguir la metodología sugerida en la Figura N° 10.

Inicialmente hay que poner de manifiesto que en nuestro país, se ha generalizado el uso de gaviones para la construcción de todo tipo de muros, especialmente fluviales por su rapidez y facilidad constructiva. En tal razón, se propone como alternativa válida, la ejecución de espigones a partir de gaviones, en lugar de realizar muros de escollera que también resultan efectivos.

8.7.3. Ángulos de orientación y de expansión de los espigones

Los espigones están orientados hacia aguas abajo, por lo que cumpliendo las siguientes condiciones:

$$60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \qquad 11^\circ \leq \beta \leq 14^\circ;$$

Los ángulos de orientación y expansión adoptados, α y β , respectivamente, para un diseño económico son:

$$\alpha = 70^\circ \qquad \beta = 14^\circ$$

Sin embargo los ángulos efectivos a emplearse, dependerá de la alineación de la ribera existente y la línea extrema de defensa, respetando los límites antes señalados.

8.7.4. Separación de espigones en curvas, S_c

En esta zona del río Napo, la orilla que se quiere proteger no es paralela a la línea de protección de espigones que se plantea, por lo que no se puede aplicar la condición $2,5 L_t \leq S_c \leq 4 L_t$, ni tampoco se cumple que $r > 4B$.

Por lo tanto se tiene que: $S_c = 2 L_t$ $S_c = 2 (70) m$ $S_c = 150 m$

Al no ser los espigones empotrados y para mayor seguridad se reduce la separación en un 20%, por lo tanto:

$$S_c \approx 125 m$$

Se debe considerar que la orilla a ser intervenida es un tanto irregular, por lo que esta separación deberá variar conforme a la geometría de la ribera, pero en todo caso, la separación calculada deberá ser tomada en cuenta.

8.7.5. Pendiente longitudinal de la corona

El sitio analizado del río Napo, tiene presencia de agua todo el año, por lo que la pendiente longitudinal de la corona de los espigones debe ser de 2.5% hacia el eje del río.

8.7.6. Elevación de la corona

Se estima que cada espigón debe estar un metro sobre el nivel habitual de la corriente, esto es 6 m, y en su punto más bajo ubicado hacia el eje del río alcanzará los 4 m medidos desde el fondo del cauce, esto es la altura efectiva, dejando la corona sumergida.

8.7.7. Ancho de la corona o del espigón

En el Ecuador, el uso de gaviones es muy utilizado en la construcción de muros de contención, debido especialmente por su facilidad constructiva, disponibilidad de los materiales, equipo no especializado al igual que su mano de obra. Por esas razones se plantea la construcción de espigones mediante gaviones, por lo que su ancho será igual a 2.00 m en la parte superior, decreciendo hasta llegar a la cimentación que deberá ser evaluada en sitio, dependiendo de la capacidad portante prefiriendo realizar enrocados iniciales donde se asiente la estructura, a fin de prevenir erosión y asentamientos. Se deberá evaluar la colocación de colchoneta o un mejoramiento de suelo.

8.7.8. Erosión local en el extremo del espigón

A medida que se va construyendo cada espigón, se produce socavación en el extremo por lo que se requiere ir rellenando esas depresiones, por lo que para el uso de gaviones, es preferible utilizar una capa de grava o enrocamiento de grandes dimensiones a fin de que no sea arrastrado por la corriente, en un espesor de al menos 50 cm. Para obtener un referente del grado de socavación en la punta, podremos utilizar la ecuación obtenida por Maza con base en los datos los datos y el criterio inicial de Latuischenkov, y se la puede usar con cualquier sistema congruente de unidades por ser adicionalmente correcta.

$$d_e = 0,855 d_o \left[4,17 + L_n \frac{Q_1}{Q} \right] e^{(0,0028\alpha - 0,24k)}$$

dónde:

- d_e : Profundidad máxima en la zona erosionada al final del espigón, medida desde la superficie, asociada al gasto Q
- d_o : Profundidad del flujo, en una zona cercana al extremo del espigón no afectada por la erosión, asociada al gasto Q
- α : Angulo entre el eje longitudinal del espigón y la dirección del flujo, medido hacia aguas abajo
- k : Talud del extremo del espigón. Es igual a $k = \cot\varphi$, en el que φ es el angulo que forma el talud del extremo del espigon con la horizontal
- Q_1 : Gasto teórico que podría pasar por la zona ocupada por el espigón se obtiene al calcular el gasto unitario $q = Q/b$ y multiplicarlo por la longitud del espigón proyectada en un plano perpendicular a la dirección del flujo.
- Q : Gasto total en el río. Para el cálculo de la socavación se utiliza el gasto asociado en un periodo de retorno entre 25 y 50 años y es mayor que el formativo y puede producir desbordamientos.

Entonces:

- d_o = 5 m
 - α = 60° (variable de acuerdo a la forma de la orilla)
 - k = Igual a $k = \cot\varphi$; $\varphi = 70^\circ$, por lo que $k = 0,364$
-
-

$$q = Q/b = 941,70 \text{ m}^3/\text{s}/350 \text{ m} = 2,69 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$

$$L_e = 70 \text{ m}$$

$$Q_1 = 215,25 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{20 \text{ años}} = 9\,095,3 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Entonces aplicando: } d_e = 0,855 d_o \left[4,17 + L_n \frac{Q_1}{Q} \right] e^{(0,0028\alpha - 0,24k)}$$

$$d_e = 1,98 \text{ m}$$

La flexibilidad de los espigones contruidos a partir de gaviones, ayuda a mantener la seguridad de la estructura sí la socavación que se presenta es mayor que la calculada, en cambio un espigón de roca dispuesto a manera de un enrocamiento no tiene el mismo margen de seguridad. Es sin embargo importante que la estructura cuente con protecciones adicionales como delantales de protección desde el medio a la punta del espigón, en caso de que la corriente guarde importantes niveles de energía en determinadas épocas del año.

8.8 RESULTADOS ESPERADOS EN LA ZONA DE INTERVENCIÓN

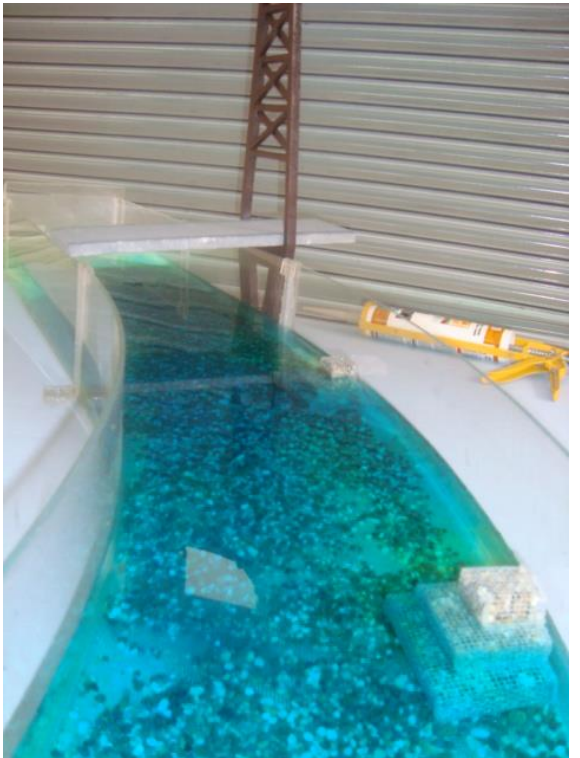
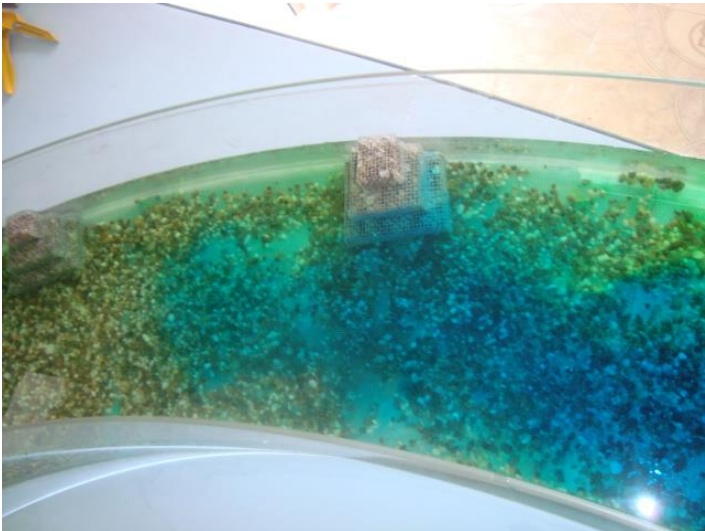
Situación actual :



Aplicación teórica :









Situación esperada :



De la aplicación del método en las tres etapas propuestas, teóricamente se habrían recuperado aproximadamente 55 Ha de terreno, siendo esta nueva franja una línea natural de defensa contra la erosión progresiva que provoca la variación de los niveles energéticos de los ríos Coca y Payamino, debiendo procurar además, un monitoreo constante de las márgenes de la ribera del Napo, a fin de proteger al sistema vial que comunica a las áreas petroleras de importancia estratégica para el país.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1. CONCLUSIONES

El uso de modelos hidráulicos fusionados con las predicciones matemáticas, resultan herramientas de gran ayuda y alcance, que permiten de una manera económica y práctica, predecir comportamientos más cercanos a la realidad.

La definición de las variables que intervienen en el análisis del fenómeno estudiado y que deben ser adecuadamente reflejadas en modelo, constituyen la clave de la presente investigación, en vista de que se pretenden obtener las mejores prácticas para proteger estructuras viales como puentes, los cuales por definición, constituyen elementos claves dentro de una carretera y por lo tanto, del aparato productivo y comercial de una región.

El uso adecuado de pilas con geometrías eficientes, refiriéndonos al tema hidráulico, constituyen el primer paso para la auto conservación de la estructura. Sin embargo no es la solución más óptima ni definitiva, ya que como ha sido demostrado, la estabilización del cauce antes y después de la obra que buscamos proteger, evita que el río “flanquee” al puente provocando su inminente colapso, por lo que la sección de una pilas intermedia, no ofrece mayores garantías para la estabilidad de la estructura ante el efecto erosivo del agua y divagación del cauce.

Una vez que se ha conseguido estabilizar el cauce del río dentro del área de afectación a la estructura, implícitamente hemos definido también otras variables, como los ángulos de ataque del flujo, por lo que resulta sencillo predecir el comportamiento de los efectos erosivos y de socavación en pie de las pilas especialmente en situaciones críticas como avenidas.

El uso de espigones para estabilizar riberas y generación de unas nuevas, constituyen la solución más económica y efectiva, especialmente por la rapidez y facilidad constructiva. Sin embargo, deben ser constantemente monitoreados y revegetados para asegurar su funcionamiento y perdurabilidad.

La sobreexplotación de bosques, uso desmedido e irracional de los recursos naturales que se generan alrededor de los ríos, son las principales causas de los procesos erosivos erráticos que ponen en riesgo las estructuras viales, aspectos que deben considerarse en

la búsqueda de soluciones amigables con el ambiente, como es el uso adecuado y planificado de un sistema de espigones.

Corresponde a las organizaciones gubernamentales y a la falta de ellas, es papel de las entidades académicas, realizar campañas de monitoreo del comportamiento de ríos en el país, para prever y controlar la movilidad de los meandros fluviales que regularmente afectan a la red vial nacional. Este estudio debe extenderse aguas arriba de esas regiones para poder garantizar el trazado del río.

El estudio científico de los fenómenos que se involucran dentro de los procesos erosivos de nuestros ríos debe ser sistemáticamente analizados, a fin de contar con simulaciones teóricas propias y adecuadas a nuestra realidad. En el presente estudio se ha tomado como válidas, varias teorías y fórmulas que han sido obtenidas y ampliamente estudiadas mediante investigaciones fundamentadas con modelaciones hidráulicas y matemáticas, que han servido como base para la presente propuesta de estabilización de riberas.

9.2. RECOMENDACIONES

A fin de conseguir las mejores aproximaciones en la definición de la línea última de defensa y de los ángulos que intervienen en la determinación de los parámetros de orientación de los espigones, debe mantenerse un monitoreo y una base de datos permanente, para poder intervenir oportunamente y garantizar su funcionalidad.

Poner en conocimiento de los entes responsables de la planificación de proyectos a nivel nacional, sobre el hecho observado, a fin de que a futuro tomen las directrices necesarias a fin de precautelar las inversiones del estado ecuatoriano y se garantice la funcionalidad de las vías de comunicación que sirven a esta región.

9.3. BIBLIOGRAFÍA DE CONSULTA

- (1) Muñoz, E.E., Valbuena, E.A., y Hernandez, R., (2004), “Estado y daños típicos de los puentes de la red vial nacional de Colombia, basados en inspecciones visuales”. Rutas, Número 104, septiembre – octubre, España.
 - (2) Muñoz. E.E., (2000), “Estadística de las causas de falla de puentes en Colombia”. Apuntes. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
 - (3) INVIAS y DCD (1996), “Manual de inspección principal de puentes”, proyecto INVIAS y Directorado de Carreteras de Dinamarca, Bogotá Colombia.
 - (4) INVIAS y DCD (1996), “Manual de inspección especial de carreteras de Puentes”. INVIAS y Directorado de Carreteras de Dinamarca, Bogotá Colombia.
 - (5) Programa modelos agroforestales para un desarrollo sustentable de la agricultura familiar campesina. Cartilla Agroforestal N° 7: Protección y Recuperación de Riberas Cursos de Aguas.
 - (6) XVI Congreso Nacional de ingeniería civil, Arequipa 2007. Conferencia consideraciones sobre las defensas fluviales a base de espigones. Dr.- Ing. Arturo Rocha Felices, Consultor de proyectos hidráulicos.
 - (7) Diseño de espigones, News letter 6/2001y 7/2002, Ing. Gabriel E. Amores
 - (8) Ingeniería de Costas, Práctica 2. Evolución costera bajo la influencia humana. José A. Jiménez, 2003/4
 - (9) DRENAJE DE OBRAS VIALES, Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, MOP, República del Ecuador, Mayo 1981, Capítulo VII, Puentes.
 - (10) HIDRÁULICA FLUVIAL, Martín Vide, J., Ediciones Universidad Politécnica de Cataluña, UPC, 2000, Capítulo VII, Hidráulica de Puentes.
 - (11) Maza Álvarez y García Flores, “Estabilización y Rectificación de Ríos”.
-
-

(12) Rocha Felices, Arturo. "Defensas con espigones".

(13) Rocha Felices, Arturo. "Consideraciones sobre las defensas fluviales a base de espigones". XVI Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Arequipa 2007.

Sector de estudio: _____ Coordenadas _____ ;

DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DEL VALLE

Forma:	Extensión:	Ancho promedio: _____ Km
0 ninguna	0 ninguna	Ancho máximo: _____ Km
1 indefinida	1 angosta (< 1Ws?)	Longitud del canal en la cuenca del valle a la
izquierda: _____ %		
2 fragmentaria	2 moderada (1-5 Ws?)	a la
derecha: _____ %		
3 continua	3 ancha (>5 Ws?)	

Vegetación:	Tipo de Bosque	Uso del suelo:
0 0 no aplica	0 0 no aplica	0 0 no cultivadas ni construida
1 1 casi inexistente o escaso	1 1 coníferos	1 1 parcialmente cultivada
2 2 hierba	2 2 otros	2 2 cultivada
3 3 arbustos		3 3 parcialmente construida
4 4 escasamente arborizadas		4 4 principalmente construida
5 5 moderadamente arborizadas		

Comentarios: _____
 6 6 boscosa

 7 7 pantanos o ciénegas

DESCRIPCIÓN DEL CAUCE (media estadística a largo plazo)

Modelo del cauce:	Islas:	Tipo de flujo:	Tipo de bancos:
1 recto	0 ninguna	1 superficie uniforme del agua	0 0 0 ninguno
2 sinuoso	1 ocasionales	2 superficie uniforme con rápidos	1 1 1 cauce con
bancos laterales			
3 irregular	2 frecuentes	3 irregular	2 2 2 bancos
puntuales			
4 meandros regulares	3 divididas	4 flujo laminar o lento	3 3 3 canal con
bancos unidos			
5 meandros irregulares	4 trezadas	5 flujo reducido	4 4 4 bancos en
la mitad del cauce			
6 meandros tortuosos			5 5 5 bancos en
diamante			
			6 6 6 bancos en
diagonal			
			7 7 7 bancos de
arena o grandes			
			dunas

Dimensiones de meandros:	Obstrucciones naturales:	Grado de obstrucción:	Comentarios:
ancho de la cinta _____ Km	0 0 ninguna	0 0 ninguno	
longitud de onda _____ Km	1 1 largas	1 1 menor incidencia	
roca medianas	2 2 mayor incidencia	sinuosidad _____	2 2 represa de

3	3	rocas (material acumulado)	3	3	menor frecuencia
4	4	vegetación	4	4	mayor frecuencia

ACTIVIDAD LATERAL DEL CAUCE

Actividad lateral:	Estabilidad lateral:	Comentarios:
0 no detectable	0 estable	
1 evolución descendente	1 ligeramente inestable	
2 evolución y cortes	2 moderadamente inestable	
3 principalmente cortes	3 muy inestable	
5 actividad lateral irregular		

BANCOS DEL CAUCE Y DEL LECHO

Bancos de material aluvial:
el banco:

- | | | | |
|---|---|---|---------------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | bancos no aluviales |
| 1 | 1 | 1 | arcilla y limo (cohesivos) |
| 2 | 2 | 2 | limo y arena (no-cohesivos) |
| 3 | 3 | 3 | arena y grava (< 64 mm)
muy densa |
| 4 | 4 | 4 | arena, guijarros o piedra chispa |
| 5 | 5 | 5 | arena cubierta por sedimentos |
| 6 | 6 | 6 | grava cubierta por sedimentos |
| 7 | 7 | 7 | piedra chispa cubierta por sedimentos |

Bancos de material no aluvial:

- | | | | |
|---|---|---|--------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | material aluvial |
| 1 | 1 | 1 | depósitos lacustres |
| 2 | 2 | 2 | sedimentos de glaciares |
| 3 | 3 | 3 | roca fácilmente erosionable |
| 4 | 4 | 4 | roca moderadamente erosionable |
| 5 | 5 | 5 | roca resistente |
| 6 | 6 | 6 | roca sana |

Vegetación en

- | | |
|---|------------|
| 0 | ninguno |
| 1 | escasa |
| 2 | buena |
| 3 | vegetación |

Porcentaje de aluvial en margen izquierda _____%

Porcentaje de aluvial en margen derecha _____%

Material predominante en el lecho:

_____ m

- | | |
|---|------------------------------|
| 1 | arena |
| 2 | arena con gravas localizadas |
| 3 | gravas |
| 4 | gravas con arena localizada |
| 5 | arena y grava |

Profundidad del aluvial:

- | | |
|---|-------------------|
| 0 | no existe aluvial |
| 1 | poco profundo |
| 2 | moderado |
| 3 | profundo |

Profundidad estimada del aluvial:

Referencia de los comentarios:

LECHO ROCOSO BAJO EL CAUCE

Presencia de afloramientos rocosos en el lecho:

- | | |
|-------|--|
| 0 | ninguno |
| 1 | una ocasión
cohesivo |
| 2 | dos ocasiones
erosionable |
| _____ | _____ ocasiones
moderadamente erosionable |
| 9 | varias ocasiones
resistente |

Tipo de roca en la base del cauce:
Erosionabilidad:

- | | | | | | | | |
|---|---|---|------------------------------|---|---|---|------------|
| 0 | 0 | 0 | no aplica (poca profundidad) | 0 | 0 | 0 | no aplica |
| 1 | 1 | 1 | arcilla compacta | 1 | 1 | 1 | suave |
| 2 | 2 | 2 | esquistos | 2 | 2 | 2 | fácilmente |
| 3 | 3 | 3 | caliza | 3 | 3 | 3 | |
| 4 | 4 | 4 | arenisca | 4 | 4 | 4 | |
| 5 | 5 | 5 | conglomerados | | | | |
| 6 | 6 | 6 | granito | | | | |
| 7 | 7 | 7 | _____ | | | | |

Comentarios:
