



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESTUDIO DE SOCAVACIÓN DE PILAS EN UN  
PUENTE FERROVIARIO ESVAJADO**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:

**INGENIERO CIVIL**

P R E S E N T A :

**JOSÉ CARMEN VELÁZQUEZ MODESTO**

TUTOR:  
DR. JESÚS GRACIA SÁNCHEZ



MÉXICO, D. F.

2011



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## ***AGRADECIMIENTO***

A mis padres quienes me apoyaron en todos los aspectos, a mis profesores que me formaron.

**ESTUDIO DE SOCAVACIÓN DE PILAS EN UN PUENTE  
FERROVIARIO ESVAJADO**

# ÍNDICE

## INTRODUCCION

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1. Características topograficas del cauce .....	3
1.2. Antecedentes historicos.....	5
1.3. Estabilidad del cauce.....	7
2. METODOLOGIA.....	8
2.1. Ecuaciones fundamentales.....	9
2.2. Concepto de gasto.....	9
2.3. Ecuación Manning.....	9
2.4. Número de Froude.....	10
2.5. Método de Maza Sánchez.....	10
2.6. Método de Melville.....	13
2.7. Teoría de socavación en pilas.....	15
2.8. Velocidad del flujo en el río.....	16
2.9. Angulo de incidencia entre el eje de la pila y el cauce.....	16
2.10. Divagación de cauces.....	17

2.11.	Ríos	de	llanuras	17
	conmeandros.....			
2.12.	Ríos	con	curvas	18
	irregulares.....			
3.	PLANTEAMIENTO DEL CAUCE EN ESTUDIO.....			19
3.1.	Datos	geológicos	en el río	20
	Presidio.....			
3.2.	Características	geométricas	de la	21
	pila.....			
3.3.	Parámetro	hidráulico	y geométrico del río	22
	Presidio.....			
4.	CALCULOS HIDRÁULICOS.....			24
4.1.	Resultados	de	evolución en	26
	planta.....			
4.2.	Comparación	de	resultados para diferentes	27
	métodos.....			
5.	Conclusiones y recomendaciones.....			28
6.	Referencias.....			31

## INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas que presentan algunos puentes es la socavación que depende del tipo de suelo, las avenidas extraordinarias y el diseño de las pilas. Qué hace particular el caso del puente que cruza el río Presidio en el Km. 1193 +750 que fue construida en 1910. Línea “T” , Nogales – Guadalajara.

La importancia de saber la profundidad y cuales son las afectaciones estructurales que ocasionan la socavación provocadas por los vórtices que se presentan debidas a los cambios de dirección del cauce este comportamiento se puede observar en campo en forma de remolinos. Los cálculos que algunos autores clasifican la socavación de acuerdo a la ubicación, aguas arriba, abajo, o en el centro del puente. Se realizará un análisis numérico de la relación entre tirante y velocidad para calcular los posibles daños, los daños ocasionados por la socavación son el desplome del puente, la incomunicación de vía ferroviaria y la inestabilidad estructural del puente principalmente en la pilas, el puente en estudio tiene pilotes de madera hincados aproximadamente 12 y 8 m. Las grandes avenidas provocaron deslizamiento y desplome de las pilas ubicadas al centro del puente (ver Foto 1) ocasionado por los huracanes, este fenómeno ocasiona lluvias en las diferentes cuencas del territorio mexicano incrementando los niveles en los ríos, uno de ellos fue el huracán “Lane”.

Otro de los problemas que se analizará es la condición original y actual del curso del río ya que el asentamiento de los pobladores y las zonas agrícolas han ocasionado el cambio de forma del cauce, provocando que las pilas del puente sean paralelas al flujo del río Presidio, cambiando la condición de diseño.

El deposito de sedimento con la colaboración del tipo de suelo, incrementa la divagación del cauce y como consecuencia, se forma depósitos acentuados (ver Foto 2) que demuestran la importancia de conocer las características del fondo del río por medio de una curva granulométrica lo cual nos indica la distribución de los materiales depositados en el fondo del río a diferentes profundidades.

Se evaluará los resultados de socavación para la condición actual y comparar con las fórmulas propuestas para calcular la socavación, y proponer una solución al problema para evitar problemas sociales, económicos y estructurales.



Foto 1 Ubicación, antes y después del desplome de la pila numero 11 que ocasiono una socavación.



Foto 2 Depósito de sedimentos en la margen derecha, antes de llegar al cruce ferroviario.

## ***1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA***

El río Presidio tiene una dirección de oriente a poniente y cambia su curso, al llegar al poblado de Palmerito, Durango, donde adquiere una orientación suroeste o noroeste, con esta dirección penetra en el estado de Sinaloa, su curso es sinuoso y forma profundo cañones. El río atraviesa los poblados de Copala, Bajío Villa Unión y Barrón y desemboca en el Océano pacífico, donde da lugar a un estero somero denominado De Urias, el cual es de forma alargada. En el kilómetro 1193+7000 se encuentra el puente ferroviario vía Nogales Guadalajara en esa ubicación el fondo del cauce presenta arena muy poco limosa, café claro entre muy suelta y compacta como lo muestra la (Figura 1) lo que hace que el terreno sea erosionable.

Las fuertes lluvias ocasionaron el desplome de puentes esto provocó el interés en analizar el comportamiento del cauce y las consecuencias para las pilas, las afectaciones producidas son importantes ya que el funcionamiento hidráulico no es el mismo antes y después de su construcción.

En las condiciones actuales del cauce, el flujo bajo el puente del río Presidio, no es el mejor para las pilas. Por ello es importante corregir el cauce del río para detener el desplazamiento de las márgenes, lo que implica conocer los parámetros hidráulicos, geotécnicos y estructurales del puente.

Varios son los problemas al corregir los daños ocasionados por las grandes avenidas, pero lo más importante es mantener un equilibrio social, natural y de infraestructura para evitar daños a futuro.

El estudio plantea la corrección inmediata del problema para evitar la socavación en las pilas. Se presentará un criterio de corrección del río divagante, por medio del análisis de estabilidad de cauces, algunas de las soluciones son aparentemente sencillas, pero al

considerar una solución integrada que no afecta a los campesinos y propone una solución más económica y segura, es cuando se hace un balance general

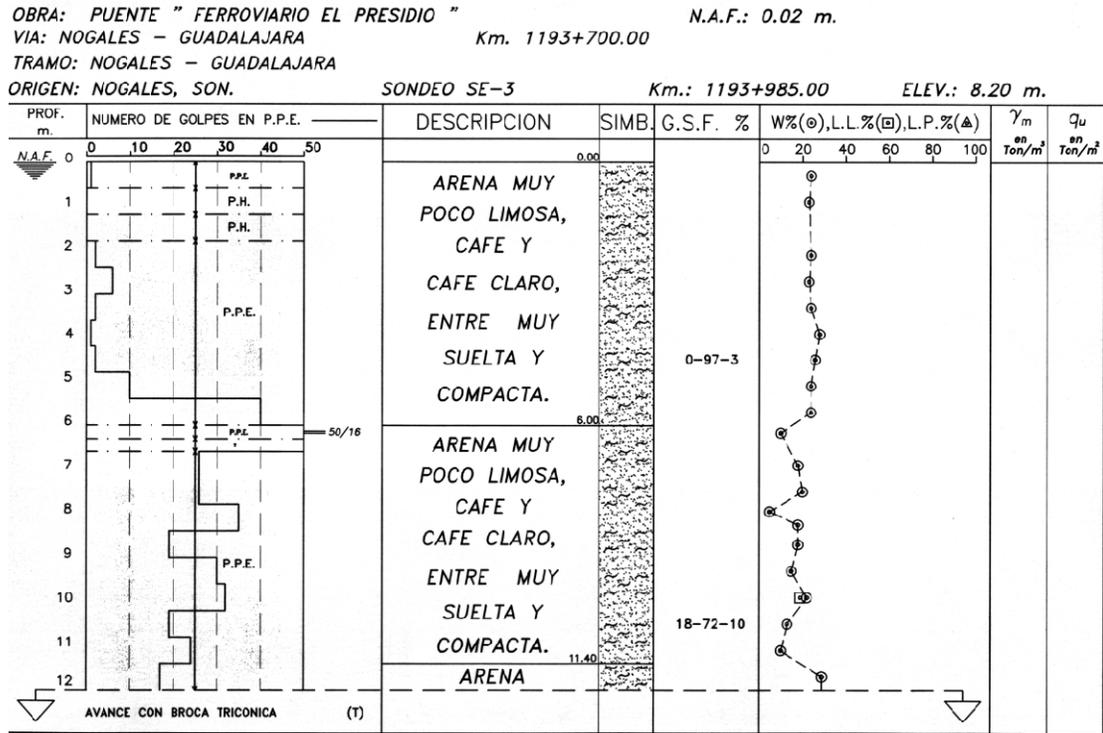


Figura 1 Sondeo numero 3 con descripción en el fondo del cauce.

### *1.1. Características topográficas del cauce*

En la visita realizada en el mes de febrero del 2007, se observó que la llegada del agua al puente es muy esviada, actualmente la dirección de la corriente es paralela al puente, erosionando el terraplén de la margen derecha, esto se verifica con el levantamiento topográfico realizado por Ferromex en febrero del 2007 (ver Figura 2).

La región donde se localiza el río se encuentra en la cuenca del río El Salto y se caracteriza por la presencia de selvas medianas en el plano costero, presenta además bosques de encinos.



## *1.2. Antecedentes históricos*

El 18 de enero de 1993 se presentó una avenida extraordinaria que provocó el colapso de los claros entre las pilas 13 y 15 estos se reconstruyeron empleando caballetes de concreto con cimentación profunda. En la información de un reporte elaborado por ello, se propuso protegerla con dos bancos metálicos, (ver Foto 3)

Es muy probable que el desplome ocurriera en 1998, la pila ya contaba con anillos de pilas de protección. Aparentemente. Las acciones mencionadas hasta el momento han detenido el asentamiento.



Foto 3 trabajos para reparar la pila numero 12

El 16 de septiembre de 2006 el huracan “Lane”, provocó el colapso de la pila 11 a consecuencia de la socavación.

En particular es importante señalar que en particular, para la pila 11, ya se habían realizado previamente trabajos de protección (1992 - 2003) (Ferromex 2006). A continuación se cita una parte del reporte técnico sobre estos trabajos.

“Trabajos Realizados en la Pila No. 11 en el año 2003, en el Puente "Presidio" Km.-1193+75.

Haciendo un poco de historia esta pila se protegió en el año de 1992, Primero; colocando tubos metálicos; se hincaron 25 tubos alrededor para cerrar con una "plancha" de concreto, posteriormente se hincaron ataguías metálicas formando una "cortina" alrededor de la pila, todo esto con el fin de protegerla de las constantes socavaciones a que esta sometida en las crecientes del río (Foto 4).

Revisando la socavación en el año 2003, se pudo apreciar que ya estaban al descubierto los pilotes de madera que van hincados abajo de la pila, llevan 14 pilotes por cada pila, así mismo los 25 tubos metálicos que rodean esta pila, se midió la socavación y esta tenía 1.20m, por lo cual se optó por rellenar toda el área con concreto ciclópeo de  $f'c=200 \text{ kg/cm}^2$ , abajo de la pila y hasta 1.70 m por fuera, sirviendo las ataguías metálicas como cimbra, en paralelo se rentaron dos tractores D-9, los cuales hicieron trabajos por 240 hrs. en el cauce abajo del puente, retirando todos los árboles muertos atorados en las pilas y rellenando con el mismo material las socavaciones presentadas en las pilas centrales. “



Foto 4 Pila No. 11, actividades realizadas en 2003

### ***1.3 Estabilidad del cauce***

En condiciones normales todos los tramos de todos los ríos han alcanzado un cierto grado de equilibrio, esto significa que si no se modifican de manera artificial, uno o varios parámetros que intervienen en esa condición de estabilidad el agua y los sedimentos continuarán escurriendo de la forma en la que la hacen.

Si se modifican en forma natural o artificial algunos parámetros, con el tiempo y lentamente, el tramo del río cambiará a una nueva condición de equilibrio. Algunos parámetros fundamentales son la pendiente, el diámetro representativo del material en el lecho del cauce y la resistencia de la erosión en las márgenes. Se debe considerar la intervención del hombre ya que las constantes invasiones a las márgenes del cauce provocan la explotación de algunos materiales útiles para la construcción y como consecuencia debilita y desequilibra el flujo del río. Algunas de las causas más comunes que modifican el curso son:

- Cambio en el río por el corte de meandros
- Movimiento telúrico que cambia la configuración del terreno
- Factores humanos (construcciones, deforestaciones, usos agropecuarios)
- Cambios de pendiente por el aumento de sedimento dentro del cauce
- Cambio en los gastos líquidos provocados por avenidas (artificiales o naturales)

Sin embargo, existen más variables que influyen en la divagación y desequilibrio del cauce. Se tendrá que considerar que cuando se construya alguna obra en los ríos, se alterará su equilibrio y como consecuencia se estimarán daños y modificaciones antes y después de la construcción de la obra.

## 2. METODOLOGIA

Para conocer la profundidad de socavación es necesario analizar las características granulométricas del fondo del cauce, ya que las condiciones para socavar dependen del material, si es cohesivo o no, de la distribución en cada estrato, la topografía aguas arriba y abajo, y la colocación del puente que depende del conocimiento del comportamiento hidráulico del cauce.

Cuando el escurrimiento proveniente de la precipitación que circula sobre la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca, esto es llamado escurrimiento superficial y afecta a los ríos produciendo alteraciones, en el fondo y en las orillas de la corriente, alterando la morfología del cauce que son ocasionados por, la capacidad de arrastre de la corriente, que remueve partículas en suspensión que son tomadas del fondo del río y son depositados en zonas donde los sedimentos puedan descender y asentarse.

Este fenómeno de arrastre de sedimentos se nota en aquellos lugares donde se hayan reducciones de área, como sucede en muchas ocasiones en los cauces donde se haya estructuras que reducen la capacidad hidráulica del río, por ejemplo cuando se colocan pilas que son necesarias para puentes que soportan grandes cantidades de carga.

Para el análisis de socavación se considera conceptos hidráulicos como son el Gasto, ecuación de Manning, numero de Froude.

### **2.1. Ecuaciones fundamentales**

Las siguientes ecuaciones son las que se consideran más apropiadas para conocer la profundidad de socavación. Se compararán los criterios de diferentes autores especializados en el campo de estudio. Se debe aclarar que los métodos a plantear consideran variables y graficas creados en laboratorio. Algunos datos del problema son incompletos lo cual se resolverá por medio de artificios matemáticos.

### **2.2. Concepto de gasto**

$$Q=VA \quad (2.1)$$

Donde:

V = Velocidad media del cauce, donde se supone que la velocidad se distribuye uniformemente sobre toda la superficie, con un valor constante y en dirección perpendicular a la sección transversal

A = Área de la sección transversal.

### **2.3. Ecuación de Manning**

Es una ecuación empírica que resulta de varias aportaciones como, (chezy, Strickler, Gaukler), y que considera aspectos geométricos, topográficos y el tipo de suelo.

$$Q_d = \frac{A}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (2.2)$$

n = Representa la rugosidad

R = Radio hidráulico

S = Pendiente del cauce

#### **2.4. Número de Froude**

El número de Froude se denota como  $F_r$ , y se define como la relación entre la raíz cuadrada de las fuerzas de inercia y las gravitacionales

$$F_r = \frac{U}{\sqrt{gh}} \quad (2.3)$$

Donde  $h$  es el tirante hidráulico, y  $g$  la aceleración de la gravedad, Este parámetro sirve para saber si un flujo está en régimen subcrítico, crítico o supercrítico, como sigue

Sí  $Fr < 1$  el flujo está en régimen subcrítico

Sí  $Fr = 1$  el flujo está en régimen crítico

Sí  $Fr > 1$  el flujo está en régimen supercrítico

#### **2.5. Método de Maza Sánchez**

Este método es aplicable para lechos cubiertos de arena y grava, el método se basa en gráficas experimentales elaboradas a partir de modelos hidráulicos en laboratorio. Este método incluye parámetros como son el ángulo de ataque o incidencia que sufren las pilas, causadas por las líneas de flujo de corriente, y considera el tipo de régimen del flujo con el concepto de número de Froude.

Los procedimientos son los siguientes:

1. Conocer los siguientes parámetros

$$F_r^2 = \frac{V^2}{gh} \quad (2.4)$$

Donde

$h$  = la profundidad antes de la erosión

$g$  = la aceleración de la gravedad  $9.8 \text{ m/s}^2$

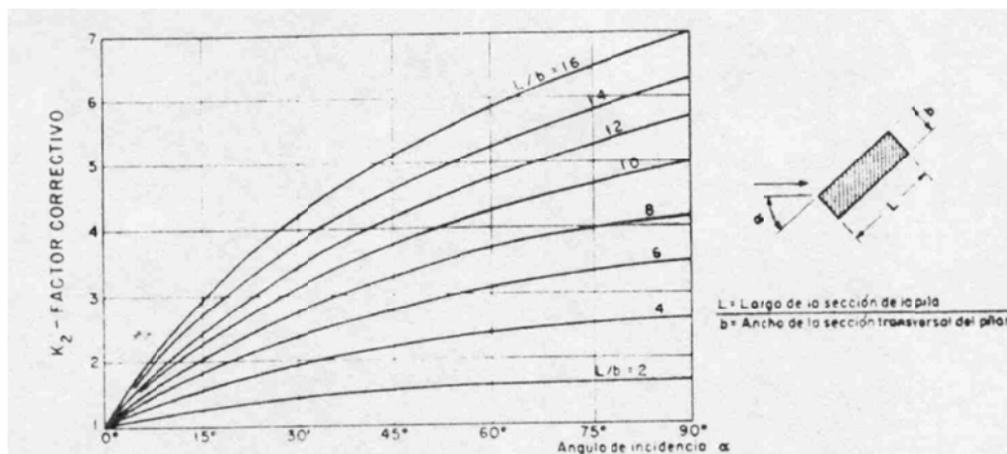
$V$  = velocidad media de la corriente

2. Si la pila es muy esviada y  $F_r^2 < 0.06$  entonces  $K_2 = 1.0$

3. Si  $F_r^2 \geq 0.06$  entonces se utilizará la siguiente expresión:

$$F_r^2 = K_2 \frac{V^2}{gh} \quad (2.5)$$

$K_2$  = factor correctivo dada en la (Grafica 1)



Grafica 1 Coeficiente de corrección cuando existe un ángulo de incidencia entre el eje de la pila y la corriente.

4. Calcular la relación  $\frac{h}{a}$ , y con la ecuación (2.4) se puede entrar en la (Grafica 2) para obtener la profundidad de socavación

$a$  = ancho de la pila, en este caso  $d = a$  y  $ds = s$  como lo muestra la (Figura 3)

$H_T$  = Profundidad de socavación media desde la superficie del flujo

$$ds = H_T - h \quad (2.6)$$

$ds$  = Profundidad de socavación media

En la (Figura 3) se representa el comportamiento del flujo sobre la pila, para ubicar de forma grafica las variables necesarias para el calculo de la socavación.

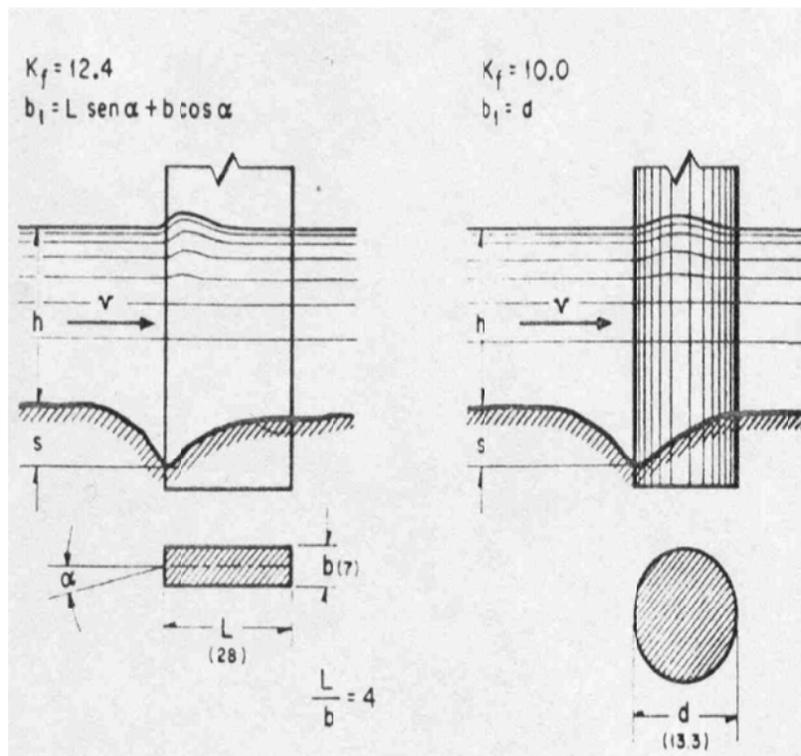
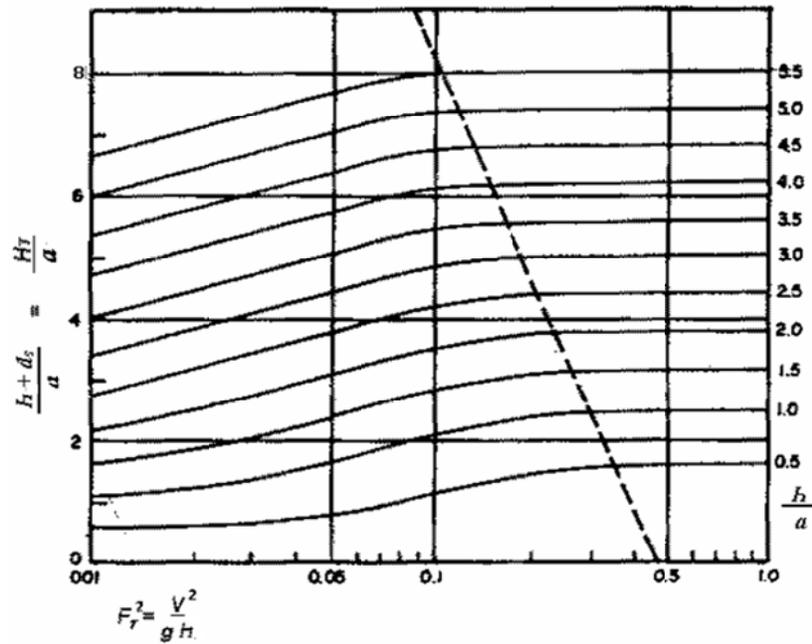


Figura 3 Relación de variables



Gráfica 2 Socavación para pila circular

## 2.6. Método de Melville

El método considera variables como el tamaño medio del fondo del cauce  $D_{50}$ , ancho del cauce de inundación, los parámetros y factores de corrección para el cálculo de la socavación son:

- $b$  = Ancho de la pila
- $b^*$  = Ancho del apoyo
- $l$  = Longitud de la pila
- $W_{1f}$  = Ancho del cauce de inundación
- $D_{50}$  = Tamaño medio
- $Q_f$  = Gasto en el canal de inundación
- $y_f$  = Tirante en el canal de inundación
- $t$  = Duración de la inundación
- $\theta$  = Ángulo de ataque que sufre las pilas

- $b_e$  = Altura de los apoyos de la pila con respecto al lecho del cauce  
 $Y$  = Nivel de la parte superior del cajón o dado  
 $ds$  = Profundidad de socavación

Para esta metodología se presenta la siguiente ecuación, que permite calcular la socavación

$$ds = K_{yb} K_I K_d K_s K_\theta \quad (2.7)$$

donde

- $K_{yb}$  = Factor para tamaño de profundidad en pilas  
 $K_I$  = Factor de intensidad del flujo este caso es 2.5 por ser lecho móvil  
 $K_d$  = Factor del tamaño del sedimento  
 $K_\theta$  = Factor de ángulo de ataque  
 $K_s$  = Ajuste de un factor de forma en este caso circular y el valor es 1

$$K_\theta = \left( \frac{l}{b_e} \text{seno } \theta + \text{coseno } \theta \right)^{0.65} \quad (2.8)$$

$$K_{yb} = 2.4 b \quad (2.9)$$

$$D_{50} = \frac{d_{\max}}{1.8} \quad (2.10)$$

$$b_e = b \left( \frac{y_f + Y}{y_f + b^*} \right) + b^* \left( \frac{b^* - Y}{b^* + y_f} \right) \quad (2.11)$$

$\frac{b_e}{d_{50}}$  es una relación para obtener el parámetro  $K_d$  (2.12)

$$K_d = 0.57 \log(2.24 * \frac{b_e}{d_{50}}) \text{ si } \frac{b_e}{d_{50}} < 25 \quad (2.13)$$

$$K_d = 1 \quad \text{si} \quad \frac{b_e}{d_{50}} > 25 \quad (2.14)$$

### ***2.7. Teoría de socavación en pilas***

La socavación es el resultado de la acción erosiva de flujo de agua que acarrea y arranca material del fondo y en las márgenes del río. La socavación del fondo de un cauce es dependiente de la velocidad media del agua y de la velocidad requerida para arrastrar sedimentos.

Cuando la estructura (puente), se ubica en una sección de un cauce cuyo fondo está formado por materiales no cohesivos, que alcanzan profundidades tales que hacen impráctica la cimentación sobre un manto de roca firme, provocan un cambio morfológico en el lecho de un cauce ocasionados por pilas, estribos, diques y terraplenes de acceso de los puentes.

Para pilas circulares la socavación se presenta cuando la velocidad media del flujo es igual a la mitad de la velocidad media crítica en la vertical frente a la pila, La separación del flujo a los lados de la pila crean vórtices, llamados de vórtice de estela, que se trasladan al fondo del cauce e interactúan con los vórtices de herradura que se forman en la base de la pila y remueve el material del lecho. La influencia de estos vórtices cesa rápidamente a medida que se alejan de la pila aguas abajo, y se presenta sedimentación lo cual confirma la presencia de vórtices de estela. (ver Figura 4)

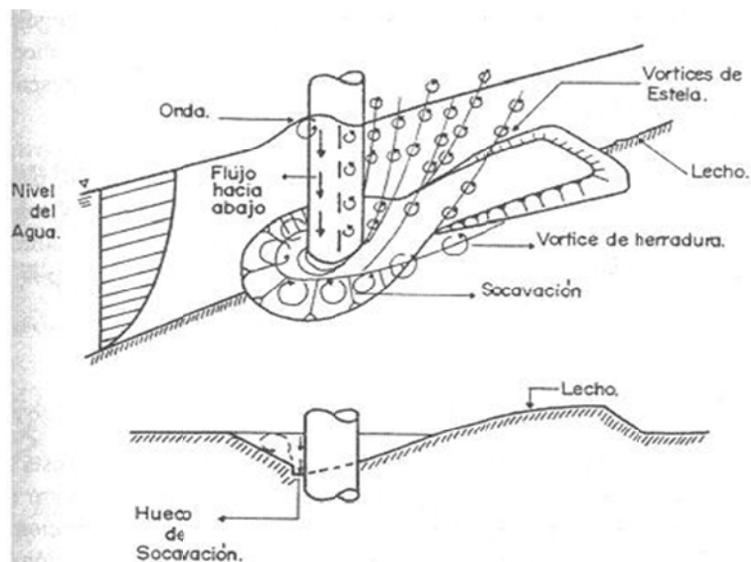


Figura 4 descripciones de los vórtices en las pilas

## 2.8. Velocidad del flujo en el río

La velocidad del flujo del río para suelos no cohesivos, es aquella velocidad capaz de levantar y poner en suspensión las partículas del fondo del cauce. La velocidad está dada en función de las características hidráulicas del río: pendiente, rugosidad y tirante. El aumento de velocidad provoca una degradación del fondo del río y como consecuencia se reduce el valor medio de la velocidad de la corriente y por ende la capacidad de arrastre, (hasta alcanzar un equilibrio entre la capacidad de arrastre del flujo y las condiciones morfológicas del río).

### 2.9. Ángulo de incidencia entre el eje de la pila y el cauce.

El efecto del ángulo de ataque es importante en la socavación local, en el caso de pilas diferentes a las circulares. A medida que aumenta el ángulo de ataque, la socavación se mueve a lo largo del lado expuesto desde aguas arriba hasta aguas abajo. El ángulo de ataque debe analizarse para flujos bajos y altos, posteriormente se deben revisar la socavación para ambas condiciones. La influencia del ángulo (Figura 5) de ataque generalmente disminuye para flujos altos, y puede darse el caso que la profundidad de socavación sea mayor para flujos bajos y ángulo de ataque mayor, que para flujos altos y ángulo de ataque menor.

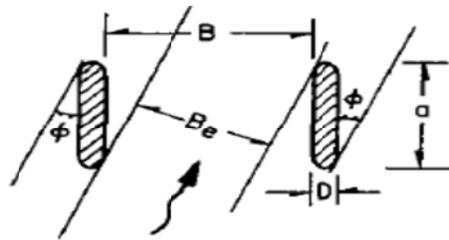


Figura 5 Trayectoria del flujo con respecto al ángulo de ataque que reciben las pilas

$B_e$  = Ancho efectivo de la superficie libre (m)

$B$  = ancho de la superficie libre (m)

$a$  = largo de la pila (m)

$\phi$  = Ángulo de esviajamiento entre la corriente y el eje de la pila ( $^{\circ}$ )

$D$  = Diámetro de la pila (m)

### 2.10. Divagación de cauces.

El cauce de un río nunca es permanente, va sufriendo alteraciones debido a su acción erosiva en las curvas. En zonas donde disminuye su velocidad aumenta el depósito de sedimento, que a su vez disminuye el paso del caudal sobre dicha zona.

Para puentes localizados en la curva del cauce los codos de un río son naturalmente inestables ya que el thalwet (fondo del cauce) se mueve y existe erosión en la parte exterior de la curva.

La sección transversal del cauce (topografía) del cauce en cualquier punto también cambiarán y con ello la localización del canal principal que es donde existen las mayores socavaciones cuando ocurra un escurrimiento superficial extraordinaria.

Cuando el cruce de un puente queda localizado sobre la curva de un río, y ésta sea estable, la profundidad máxima que se obtenga al paso de la avenida máxima dependerá de las condiciones iniciales del perfil.

### ***2.11. Ríos de llanuras con meandros***

Son aquellos en los que se observa la formación de curvas pronunciadas y regulares (Figura 6). Teóricamente los ríos que pueden formar meandros son aquellos para los cuales en número de Froude de la corriente alcanzan valores entre 0.20 y 0.02.

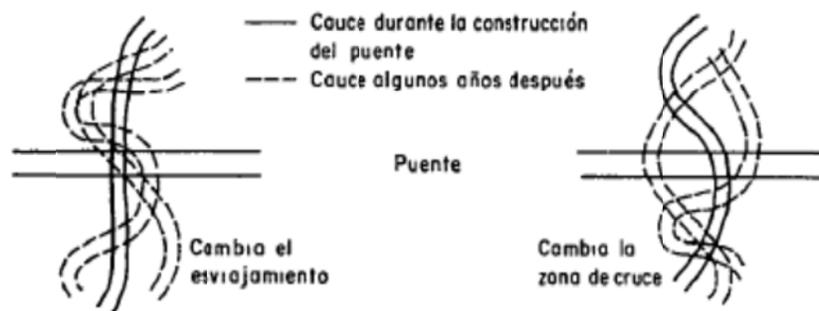


Figura 6 Comportamiento de ríos divagantes

### ***2.12. Río con curvas irregulares.***

Son aquellos en que el número de Froude de la corriente se encuentra entre 0.04 y 0.50, la principal diferencia entre ríos sin meandros y los anteriores, es que sus curvas se presenta

en forma irregular y con radio de curvatura muy diversos. Las mayores profundidades se ubican bajo la sección del puente o se presentarán en cualquier parte de la sección ver (Figura 7)

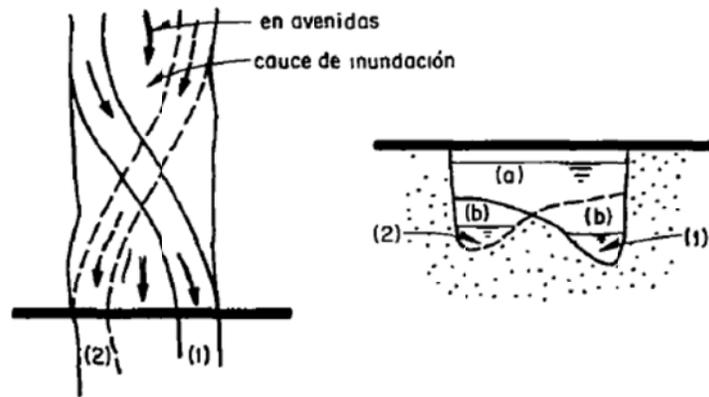


Figura 7 Río con curva irregular.

- 1 Cauce durante la construcción
- 2 Cauce algunos años después
  - a. Nivel de aguas máximas
  - b. Nivel de aguas mínimas

### 3. PLANTEAMIENTO DEL CAUCE EN ESTUDIO

El puente en estudio está ubicado en una zona de llanuras y con posible formación de meandros, como consecuencia los márgenes del cauce son fácilmente erosionables, por la presencia de material no cohesivo (arenas gravas) 100 metros aguas arriba y aguas abajo.

Para conocer el comportamiento del cauce se deberá hacer una investigación de campo, indagando información geológica, hidráulica y del uso de suelo. El problema surge a causa de las lluvias extraordinarias del día 16 de septiembre de 2006. El huracán “Lane”, ocasionó la divagación del cauce (Figura 8) y modificó el ángulo de ataque que sufren las pilas con respecto a las líneas de corriente, agravando la socavación y provocando el desplome del puente.



Figura 8 Delimitación del río Presidio en 1950 (color azul) y 1973 (color rosa)

### ***3.1 Datos geológicos en el río Presidio***

El tipo de suelo que se encuentra bajo el puente está formado por gravillas con arenas poco limosas. En los primeros 5 m de profundidad, de acuerdo a la descripción del sondeo P.P.E. se encuentra arena muy poco limosa, café y café claro, entre muy suelta y compacta. En la (Figura 9) se encuentra la distribución granulométrica, la cual es muy importante para los cálculos hidráulicos. En N.A.F. se ubica a 0.02 m y a una profundidad de 20 m, al centro del puente se encuentra arcilla arenosa de color café claro y gris verdoso, con gravas

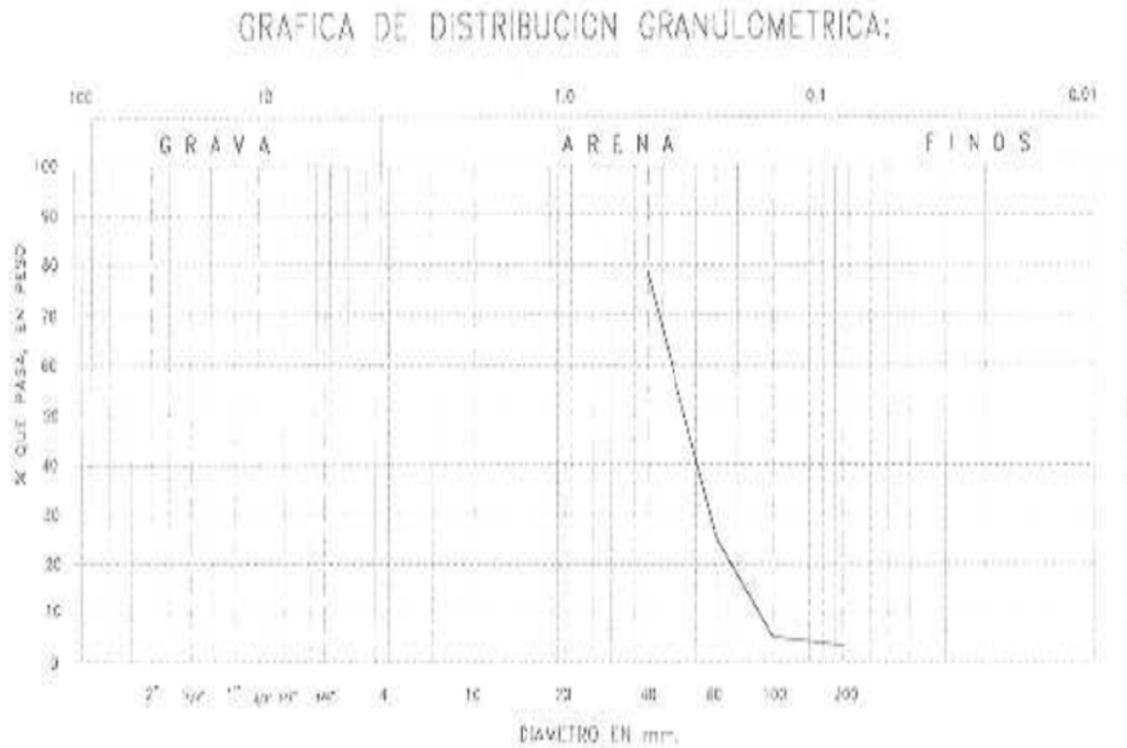


Figura 9 curva granulométrica del lecho del cauce

### 3.2 Características geométricas de la pila

Las dimensiones de las pilas se observan en la (Figura 10), se muestra en este plano el anillo protector con los pilote vistos en planta lo cual se encuentran a una profundidad que oscila entre los 8 y 12 m.

Se sabe que las pilas originales están cimentadas en pilotes de madera que ya se encuentran en mal estado, hay que considerar que la edad del puente hasta la fecha es de casi 100 años

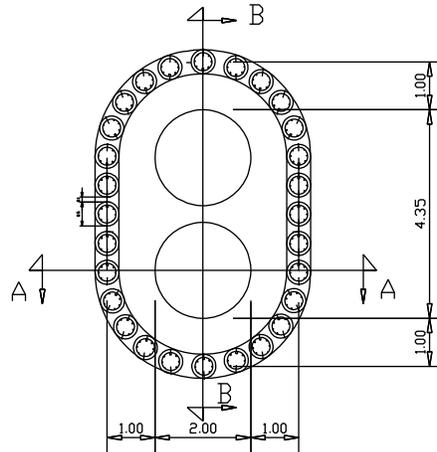


Figura 10 Vista en planta de las pilas de apoyo del puente ferroviario

La pila fallada en 2006, se encuentra casi en la parte central del puente (Figura 11) Las pilas centrales son las que han tenido más fallas, las protecciones realizadas (anillos) no han sido suficientes para protegerlas de la socavación.

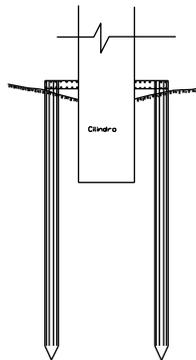


Figura 11 Perfil de las pilas de protección (anillos y pilotes hincados a 8 y 12 m)

### 3.3 Parámetro hidráulico y geométrico del río Presidio

Para aplicar y saber el comportamiento del cauce, se tendrá que obtener la geometría del cauce. En la (Figura 12) se muestra, en planta, las elevaciones del río, por lo que fue necesario hacer una sección en base a la información mostrada.

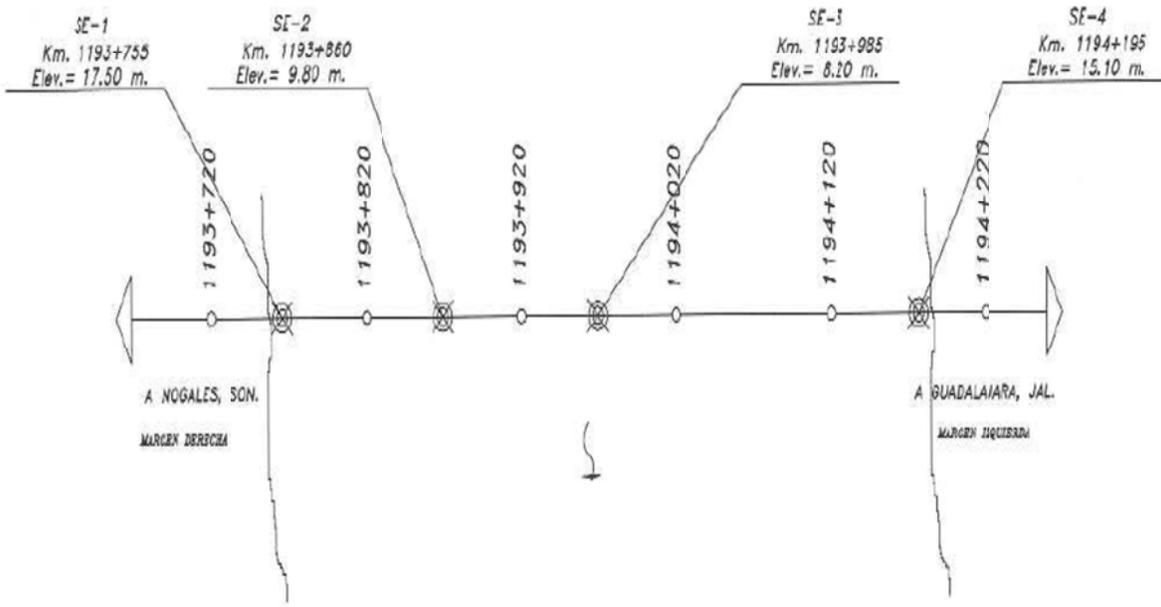


Figura 12 Vista en planta del puente ferroviario con elevaciones

En la (Figura 13) se observa la sección resultante del plano, la cual es aproximada, pero recomendable hacer un levantamiento topográfico en campo para tener al menos secciones 100 metros aguas arriba y aguas abajo del cruce ferroviario.

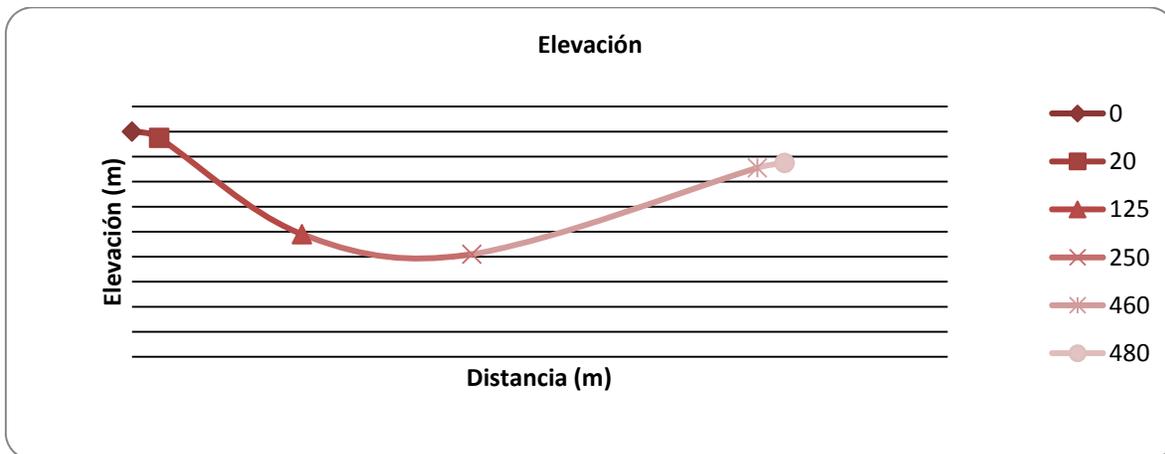


Figura 13 Sección creada a partir de información en planta

Con la ayuda de Excel construye la sección que funcionará para obtener el área hidráulica, las elevaciones máximas y mínimas, y en general, para obtener información geométrica para realizar se cálculos. En la (Tabla 1) se presenta la información del cauce.

Es importante saber el tipo de suelo y sus distribución granulométrica como lo muestra la (Figura 8) del capítulo 3.1 donde  $D_{50} = 0.5m$

Tabla 1 Datos capturados durante la investigación

Gasto ( $m^3/s$ )	5000		
Fondo natural del río (msnm)	97.5		
Velocidad (m/s)	2.5	Altura del cajón (m)	0.70
Angulo de ataque ( $^{\circ}$ )	50	Elevación del cajón (m)	0.70
Ancho se la sección (m)	265	Distancia entre pilas y cajón (m)	1
Cota de la superficie (m)	15.10	Ancho de Pilotes (m)	2
Cota del fondo (m)	8	Distancia entre pilotes (m)	10
Ancho de la Pila (m)	4.35	Profundidad de pilotes (m)	6
Largo de la Pila (m)	6.35	Cota de los Pilotes (msnm)	92

#### 4. CALCULOS HIDÁULICOS

Los cálculos se realizarán para un gasto de  $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ , tirante de  $7.5 \text{ m}$  (sobre el collar de las pilas) y un ancho efectivo de  $265 \text{ m}$ , utilizando la ecuación 2.1 se obtiene una velocidad promedio de  $2.5 \text{ m/s}$ , que corresponden a las condiciones del evento del 16 de septiembre de 2006. Las velocidades locales podrían ser significativamente mayores. En la (Tabla 2) se muestran los datos necesarios para el cálculo de socavación.

Tabla 1 datos para la metodología de Mellvile

Pila	b	0.70m
	b*	4.35m
	I	6.35m
ancho del la sección	$W_{1f}$	265m
Suelo	$D_{50}$	50mm
Flujo	$Q_f$	$5000 \text{ m}^3/\text{s}$
	$y_f$	7.5m
	$\theta$	$50^\circ$

Como primer paso se obtiene  $b_e$  con la ecuación 2.11. Sustituyendo queda

$$b_e = 0.70m * \left( \frac{7.5m + 0.7m}{7.5m + 4.35m} \right) + 0.70m * \left( \frac{4.35m - 0.7m}{4.35m + 7.5m} \right) = 1.824 m$$

$$\frac{b_e}{y} = \frac{1.824m}{7.5m} = 0.243$$

$$K_{yb} = 2.4 b = 1.680m$$

$K_s$  = valor es 1 por ser cilíndricas

De la ecuación 2.8

$$K_\theta = \left( \frac{1}{1.824m} * \text{seno}(50) + \text{cos eno}(50) \right)^{0.65} = 1.040$$

$D_{50}=50\text{mm}$  (Figura 8) en el capítulo 3.1

Para la relación  $\frac{b_e}{d_{50}} = 36.48$  por lo tanto  $K_d = 1$

Con la ecuación 2.7 la socavación  $d_s = 4.763 m$  con el método de Melville

Para el método de Maza las literales cambian pero los datos son similares como se muestra en la (Tabla 3)

Tabla 2 datos para la metodología de Maza

L=	6.35m
a=	0.7m
b=	4.35m
h=	7.5m
$\theta=$	50°

Para este método se deberá calcular  $Fr^2$  con la ecuación 2.4 lo cual se obtiene

$$F_r^2 = \frac{V^2}{gh} = \frac{\left(2.5 \frac{m}{s}\right)^2}{9.8 \frac{m}{s^2} * 7.5m} = 0.085 \text{ y como } Fr^2 > 0.06 \text{ se busca otro parámetro } K_2 \text{ ubicada}$$

en la (Grafica ) del capitulo 2.5

La relación  $L/b=1.46$  y el ángulo de ataque es de  $50^\circ$ , por lo tanto de la Figura 1,  $K_2 = 1.3$  y se obtiene con la ecuación 2.5:

$$F_r^2 = K_2 \frac{V^2}{gh} = 0.11$$

Para el segundo procedimiento se calcula la relación  $h/a = 1.72$  y con  $Fr^2 = 0.11$  se busca en

la (Grafica 2) del capitulo 2.5 donde la relación  $\frac{h+ds}{a} = 2.5$

Sustituyendo datos de la Tabla 3 se obtiene

$$Ds = 3.75m$$

#### ***4.1 Resultados de evolución en planta***

El sitio donde el río cruza al puente ferroviario presenta una divagación. Estos cambios obedecen a la dinámica morfológica del río donde influyen el material aluvial y la facilidad para que se formen meandros. El resultado es el desplazamiento lateral de las orillas exteriores de las curvas y el depósito de material sedimentables en la parte interior de ellas, acentuándose este fenómeno durante las avenidas.

Los huracanes de esta zona se caracterizan porque describen una parábola con trayectoria paralela a la costa del Pacífico, llegando, a veces, a penetrar en tierra. En general, son pocos los huracanes de alta intensidad que han tocado la zona de estudio, en su mayoría son tormentas tropicales y de invierno; sin embargo, ambos tipos de eventos han dejado precipitaciones, uno de sus efectos ha sido el desbordamiento de ríos. En el estado de Sinaloa, se han cuantificado la presencia de 37 ciclones, presentes principalmente entre

septiembre y octubre. Algunos de los eventos que más han impactado en la zona de estudio se presentan en la (Tabla 4.)

Tabla 3 Eventos ciclónicos en la zona de estudio

<b>Fecha</b>	<b>Nombre</b>	<b>Categoría</b>
1957-10-20	Sin nombre	Huracán Escala 1
1959-06-12	Sin nombre	Tormenta tropical
1962-06-25	Valerie	Huracán Escala 1
1963-09-28	Lillian	Tormenta Tropical
1964-07-07	Natalie	Tormenta Tropical
1965-09-26	Hazel	Tormenta Tropical
1973-10-25	Jeniffer	Depresión Tropical
1975-10-25	Olivia	Huracán Escala 3
1976-10-29	Naomi	Tormenta Tropical
1981	Lidia	Tormenta Tropical
1990	Diana	Tormenta tropical
1990	Sin nombre	Tormenta de invierno
1993	Lidia	Huracán
1994-10	Rosa	Huracán Escala 2
1995-09-20	Ismael	Huracán
1998	Madeleine	Huracán Escala 1
2000	Ileana	Huracán Escala 2
2006	Lane	Huracán Escala 3

#### ***4.2 Comparación de resultados para diferentes métodos***

Los resultados de socavación en el método de Melville son de 4.763 metros mientras que para Maza fueron de 3.75 metros. Como se puede observar los resultados son aproximados y se debe comparar con los resultados que se obtendrán en campo, para conocer y asegurar la profundidad de socavación.

Es importante hacer una modelación física (un modelo hidráulico que represente al río y al puente, en los laboratorios). Para conocer los puntos críticos de una sección en el cauce, sin embargo la información topográfica es escasa.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Durante el análisis de la socavación local o remoción de material del fondo del cauce de una corriente, ocurre que alrededor de una estructura apoyada en dicho fondo, como una pila de puente, es atacada por un flujo provocando desequilibrio, si la profundidad de la socavación excede determinada magnitud, la pila puede perder apoyo y fallar, lo que haría colapsar el puente. En México, los escurrimientos extraordinarios producidos por tormentas y huracanes suelen causar este tipo de daños estructurales.

En este caso la socavación es aproximadamente 4 m que es inducido por vórtices, velocidad del flujo, geometría de la Pila y el tipo de suelo, estas características son los más comunes, pero el ángulo de ataque o el ángulo de incidencia con la cual la pila de un puente recibe las fuerzas del agua, es de mucha importancia porque en este caso cuando se diseñó el puente, se asumió que el flujo sería perpendicular al puente, pero los pobladores y las grandes avenidas han ocasionado la divagación. Como consecuencia, el cauce y el puente ahora ya son paralelos. Se pensaría que las pilas como son circulares no debería de tener problemas, pero al cambiar las líneas de flujo de la corriente se convierte en un tapón y obstrucción del cauce, ocasionando la socavación, los actuales trabajos de reparación no funcionan ya que el problema seguirá, mientras que el cauce se comporte divagante, los problemas y desplomes de las pilas continuaran ya que el cauce es de llanura con meandros.

Se recomienda hacer un levantamiento topográfico 100m aguas arriba y abajo del cruce del puente Ferroviario con estudios de mecánica de suelo, modelar el río con diferentes gastos para analizar las posibles inundaciones o desplazamientos.

El mantenimiento en los puentes es lo más importante ya que reduce costos y posibles fallas estructurales es importante realizar un reemplazo de las pilas centrales.

Aguas arriba del puente ferroviario en la margen derecha, se recomienda colocar una serie de espigones, para corregir y encauzar el río (Figura 14), consecuentemente el funcionamiento hidráulico en las pilas sea correctos. Para evitar desastre en un futuro se

propone reencauzar el río reubicando las zonas agrícolas instaladas en las márgenes derechas e izquierda del río (Figura 15).

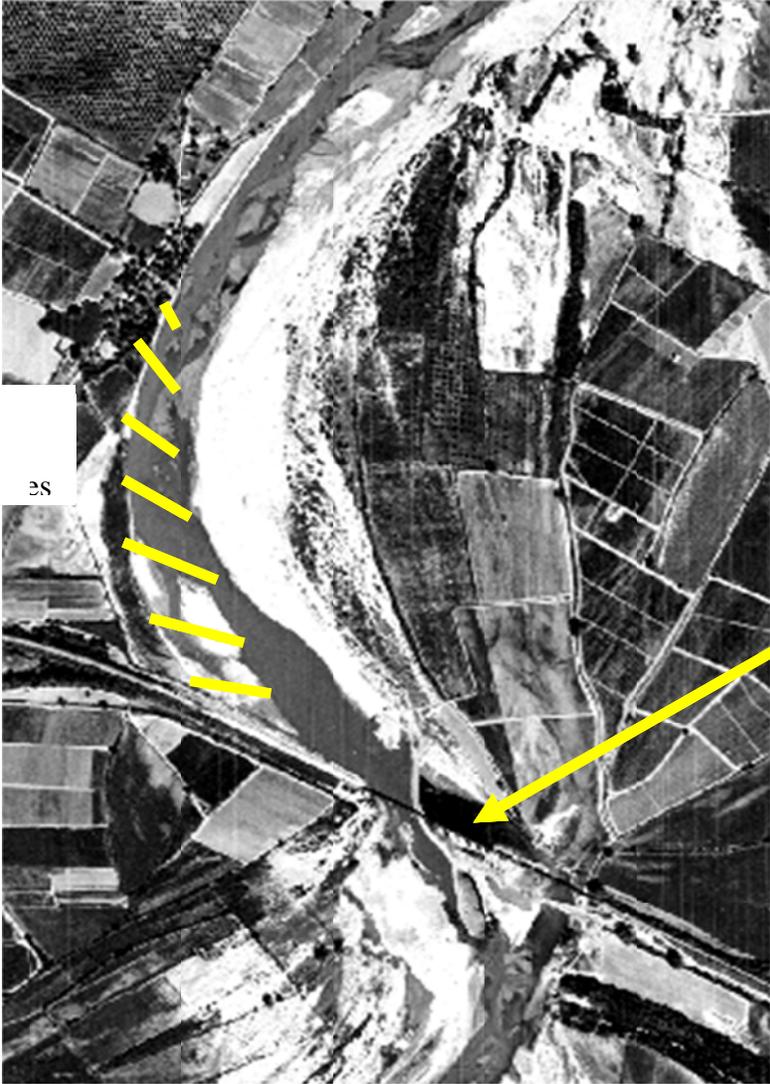


Figura 14 Espigones sobre la margen derecha

Las diferentes propuestas son los más accesibles, otras solución sería el reemplazo total del puente o hacer obras de protección a las Pilas y estribos, pero debido a la naturaleza divagante del cauce podría traer problemas al ser muy sensible el lecho del río



to

Figura 15 reencauzamiento del río

## REFERENCIAS

- M.E.GUEVARA, 1998, "SOCAVACION EN PUENTES" Facultad de Ingenieria Civil, Popayan.Cauca, Colombia
- Melville B W y Coleman S E, 2000, "BRIDGE SCOUR" Water Resources Publications, LLC
- Maza A.J.A, 1968,"Socavación en cauces naturales",serie del Instituto del Ingeniería, UNAM, número 177
- Maza, José A.; García Flores, Manuel, 1996, "Estabilidad de Cauces", serie del Instituto del Ingeniería, UNAM, número 582
- Maza, José A, 1964, "Contribución al estudio de la socavación local en pilas de puente".serie del Instituto de Ingeniería, UNAM, número 82
- FERROMEX, 2007, "Planta y perfiles de la zona del puente ferroviario" del levantamiento de febrero de 2007 (archivo electrónico) proporcionados por personal de FERROMEX
- Sotelo A., Gilberto,1974," Hidráulica general, Limusa Volumen 1