

# Acciones complementarias del Plan Hídrico Integral de Tabasco

(CONTRATO SGIH-GDIT-SGOPR-UNAM-II-2012-01)

## Informe Final

**Director Ejecutivo**

Fernando J. González Villarreal\*

**Coordinador General**

Juan Javier Carrillo Sosa\*\*

**Subtema: Análisis Geomorfológico y Geotécnico  
de las márgenes del río Carrizal**

Juan Javier Carrillo Sosa\*\*

Darío Espinoza Figueroa \*\*\*\*

Cecilia Téllez Quintanar \*\*\*\*

Armando Javier Ramírez Rascón \*\*\*\*

**Elaborado para:**

**COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA**

\* Investigador, Instituto de Ingeniería, UNAM

\*\* Técnico Académico, Instituto de Ingeniería, UNAM

\*\*\* Becario, Instituto de Ingeniería, UNAM

\*\*\*\* Consultor externo

2012



VF

## INTRODUCCIÓN

Durante muchos años la estabilidad de las márgenes; así como de algunos de los bordos, muros y estructuras de protección han sido un problema que preocupa debido a que las fallas en estos componentes representan un riesgo para la población y los intentos para mantener esta estabilidad no han producido los resultados esperados a la fecha. En el río Carrizal se presentan quizá los mayores problemas, algunos de los cuales se atribuyen a la variación de niveles en el río debido a la política operativa de la Presa Peñitas. Sin embargo no son exclusivos de este río, también en el río de la Sierra, Grijalva y Usumacinta se observan márgenes inestables y fallas en infraestructura de protección marginal en los cauces.

Es por ello que se plantea un estudio con el objetivo de analizar la evolución del corrimiento en las márgenes del río Carrizal y relacionarlo con los parámetros (características hidráulicas y propiedades del suelo de las márgenes) exclusivos de este río para ver si existe alguna relación entre dichos parámetros y la erosión de las márgenes. Este estudio permite evaluar el comportamiento del río Carrizal a una escala general, considerando su evolución y el comportamiento años atrás.

## OBJETIVO

El objetivo general de este estudio fue analizar la evolución del corrimiento en las márgenes del río Carrizal en Villahermosa mediante Sistemas de Información Geográfica con imágenes de distinto tipo y época. Como resultado de este estudio, se elaboraron análisis de estabilidad considerando las variaciones en el nivel freático y en el nivel de la superficie libre del agua del río a cada kilómetro del río Carrizal. Además se analizaron los resultados de pruebas de laboratorio para establecer la relación entre la presencia de materia orgánica y la erosividad del suelo.

## ALCANCE

Con base en imágenes digitales, se realiza el análisis geográfico del corrimiento marginal, con el fin de conocer las posibles tendencias que tiene la erosión del río Carrizal con respecto a distintas características de ese río. De forma específica, los resultados de este análisis se compararon con las características hidráulicas del río y propiedades del suelo de las márgenes, para localizar las zonas más susceptibles al corrimiento marginal en el tramo comprendido entre la estructura de control "El Macayo" y su confluencia con el río Grijalva. La importancia de este estudio radica en que podrá ser posible determinar las zonas más susceptibles a la erosión, que bajo algunas circunstancias pongan en riesgo la estabilidad de las márgenes y en algunos casos de estructuras destinadas a la protección (bordos y muros) para ello se consideraron los niveles prevalecientes en el río bajo condiciones

## METODOLOGÍA

Para el logro de los objetivos se llevaron a cabo 4 actividades: a) Recopilación de información, en donde se buscaron imágenes de satélite, fotografías aéreas, ortofotos, etc, disponibles en distintas fechas del río Carrizal. Se utilizaron principalmente ortofotos de INEGI. b) Determinación de la evolución temporal y espacial de las márgenes, en donde se trazaron segmentos de línea en las márgenes del río Carrizal para cada serie de imágenes. Se determinó la superficie de los polígonos de erosión y sedimentación que resultaron del trazo de las márgenes y se determinó la longitud de los polígonos para obtener el corrimiento marginal. c) Estimación de la tasa de erosión marginal anual, en donde se establecieron relaciones entre la erosión y las características del río, como gastos, elevaciones, características geométricas de

los meandros y propiedades del suelo de las márgenes. d) Estimación de la tasa de erosión marginal a partir de la operación del Macayo, realizando análisis de estabilidad de bordos considerando un cadenamiento a cada 1,000 metros a partir de la ubicación de la estructura de control El Macayo y hasta el entronque del río de la Sierra con el río Carrizal.

## ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio comprende el río Carrizal, entre la estructura de control El Macayo y la confluencia de este río con el río Grijalva. Son 61 kilómetros aproximadamente la longitud del río Carrizal, medidos al talweg. En la siguiente imagen se muestra la extensión de la zona de estudio.

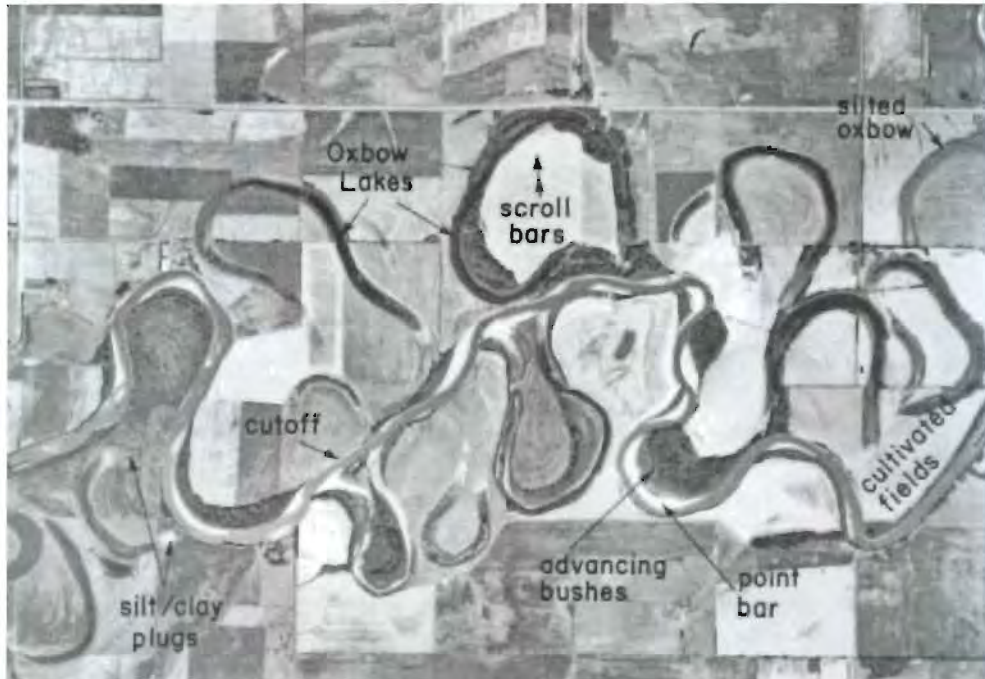


Figura 5.1 Extensión de la zona de estudio

### a) RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

De acuerdo con USACE (1994), las fotografías aéreas son usualmente la herramienta remota más práctica para el estudio de los ríos y sus cambios. Estas fotografías son útiles en la mayoría de los casos excepto para ríos pequeños o arroyos localizados en zonas boscosas. Las fotografías aéreas permiten examinar las zonas de depósito y sedimentación y las características generales como localización, y forma en planta del río en varias fechas. La calidad de las fotografías y las escalas pueden variar mucho entre distintas fechas. Las fotografías con escalas grandes no son siempre las mejores para mostrar las características del cauce, especialmente en terrenos boscosos porque las características morfológicas pueden ocultarse en la vegetación. Para ríos de tamaños medios, como es el caso del río Carrizal, se recomienda utilizar escalas entre 1:10000 y 1:30000. Cuando se comparan fotografías aéreas de distintas fechas se debe tener cuidado en las diferencias del nivel del agua, los cuales pueden ser obtenidos por los registros históricos de las estaciones hidrométricas

VF



**Figura 5.a.1. Fotografía aérea que muestra las características de un río meandroso y sus cambios a través del tiempo. USACE (1994)**

Las imágenes utilizadas en el análisis del corrimiento de las márgenes en el río Carrizal se describen en la tabla 5.a.1. Las escalas de fotografía encontradas son de 1:10000 y 1:20000 principalmente con tamaños de pixel de 1.0, 1.5 y 2.5 metros. Las fechas de imágenes corresponden a los años 2000, 2004, 2007 y 2008.

De acuerdo con INEGI<sup>1</sup>, las imágenes de sensores remotos, como las fotografías aéreas y las imágenes de satélite, son de gran utilidad por mostrar en forma directa y clara los rangos de la superficie terrestre, por lo que además de ser la fuente básica de la información cartográfica, pueden utilizarse directamente en muy diversas aplicaciones. Así, las ortofotos están definidas como una presentación fotográfica de una zona de la superficie terrestre, donde todos los elementos presentan la misma escala, libre de errores y deformaciones, con la misma validez de un plano cartográfico. Una ortofoto se consigue mediante un conjunto de imágenes aéreas (tomadas desde un avión o satélite) que han sido corregidas mediante procesos fotogramétricos, para representar una proyección ortogonal sin efectos de perspectiva, y por lo tanto es posible realizar mediciones exactas, al contrario sobre una fotografía aérea simple, que siempre presentará deformaciones causadas por la perspectiva desde la cámara, la altura o velocidad a la que se mueve el avión. A este proceso de corrección digital se le llama ortorectificación. Por lo tanto, una ortofoto u (ortofotografía) combina las características del detalle de una fotografía aérea con las propiedades geométricas de un plano. Para la generación de la ortofoto es indispensable un modelo digital de elevación para la rectificación de las fotografías, los cuales se pueden obtener a partir de restitución de vectores mediante los cuales se extraen las características más relevantes del terreno, por digitalización de curvas de nivel, directamente de las vistas tridimensionales, utilizando correlación de bloques de aerofotografías aerotrianguladas e interferometría utilizando imágenes de radar o mediante técnicas LIDAR.

<sup>1</sup> <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/ortofoto/Descripcion.aspx>

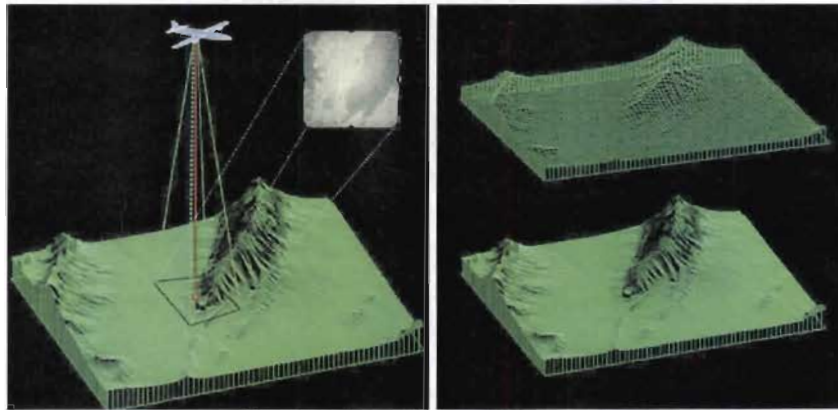


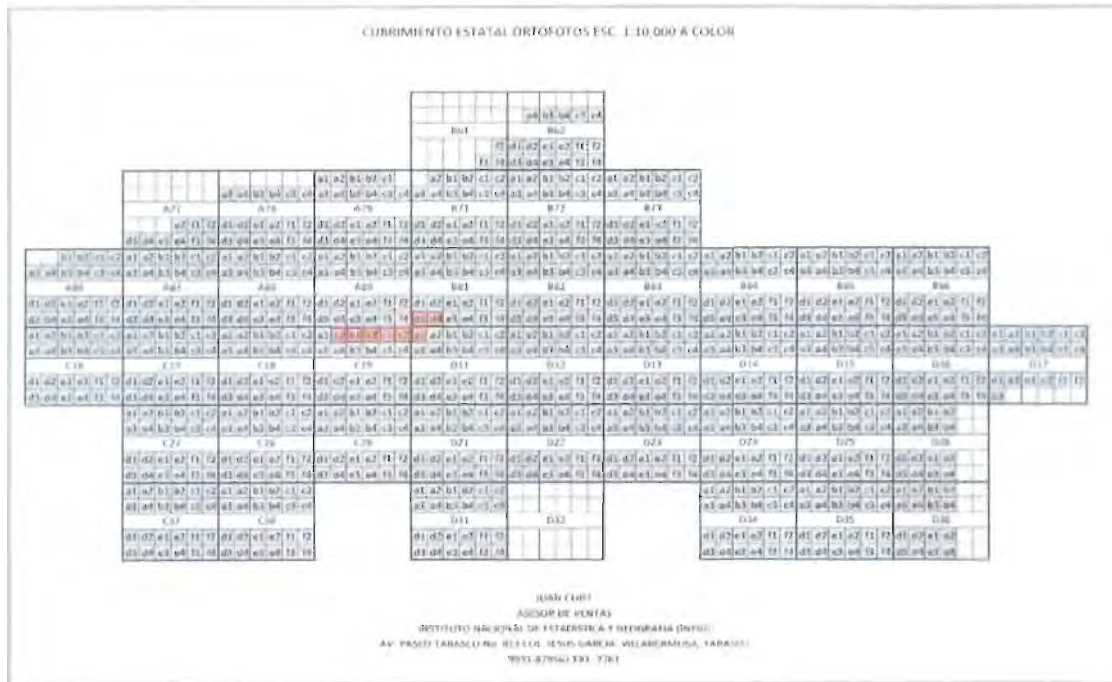
Figura 5.a.2. Proceso mediante el cual se obtienen las ortofotos. INEGI (2012)

Tabla 5.a.1. Descripción de las imágenes aéreas utilizadas en este estudio (Anexo 5.a.1)

Imagen	Fecha	Escala	Tamaño del pixel (m)	Nivel de la s.l.a en González
E15B81D	Marzo de 1995	1:20,000	2.0	s/dato
E15B81D3	Diciembre de 2007	1:10,000	1.0	3.76
E15B81D3_blanco y negro	Marzo de 2004	1:10,000	1.0	5.61
E15B81D4	Diciembre de 2007	1:10,000	1.0	3.76
E15B81D4_blanco y negro	Marzo de 2004	1:10,000	1.0	5.61
E15C19A	Noviembre de 2000	1:20,000	1.5	5.81
E15C19A1	Enero de 2008	1:10,000	1.0	5.50
E15C19A2	Enero de 2008	1:10,000	1.0	5.50
E15C19B	Noviembre de 2000	1:20,000	1.5	5.81
E15C19B1	Diciembre de 2007	1:10,000	1.0	3.76
E15C19B2	Diciembre de 2007	1:10,000	1.0	3.76
E15C19C	Noviembre de 2000	1:20,000	1.5	5.81
E15C19C1	Diciembre de 2007	1:10,000	1.0	3.76
E15C19C2	Diciembre de 2007	1:10,000	1.0	3.76
E15D11A	Noviembre de 2000	1:20,000	1.5	5.81
E15D11A1	Diciembre de 2007	1:10,000	1.0	3.76
E15D11A1_blanco y negro	Marzo de 2004	1:10,000	1.0	5.61
SPOT_601314_308088301	06 de abril de 2008	----	2.5	7.55

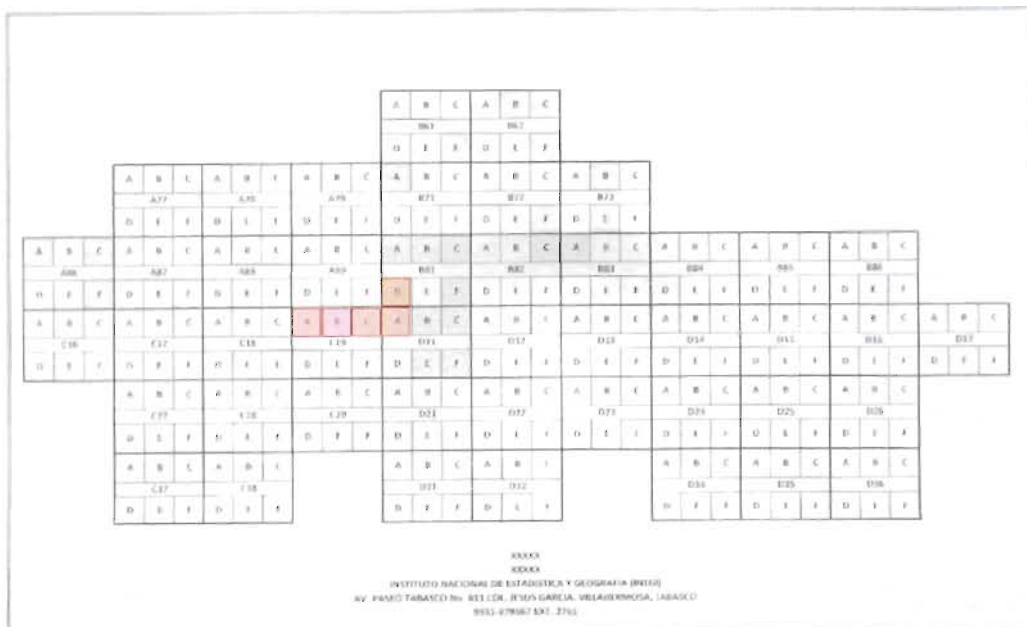
La figura siguiente muestra el cubrimiento del estado de Tabasco mediante ortofotos a escala 1:10,000 a color. En color rojo se muestran las fotografías adquiridas y utilizadas en este estudio.

# ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO Y GEOTÉCNICO DEL CORRIMIENTO DE LAS MÁRGENES DEL RÍO CARRIZAL



**Figura 5.a.3. Cobertura estatal de Tabasco en ortofotos 1:10000. INEGI**

En la figura siguiente se muestra la cobertura estatal de Tabasco en ortofotos 1:20,000. En color rojo se muestran las imágenes adquiridas.



**Figura 5.a.4. Cobertura estatal de Tabasco en ortofotos 1:20,000. INEGI**

Las imágenes aéreas descritas anteriormente se analizaron mediante un sistema de información geográfica (proyección UTM, datum WGS84), obteniéndose polígonos abiertos correspondientes a las márgenes del río. En el anexo electrónico 5.a.1 se puede consultar el metadato y las fotografías utilizadas en este estudio.

Fotografías procesadas escala 1:20,000

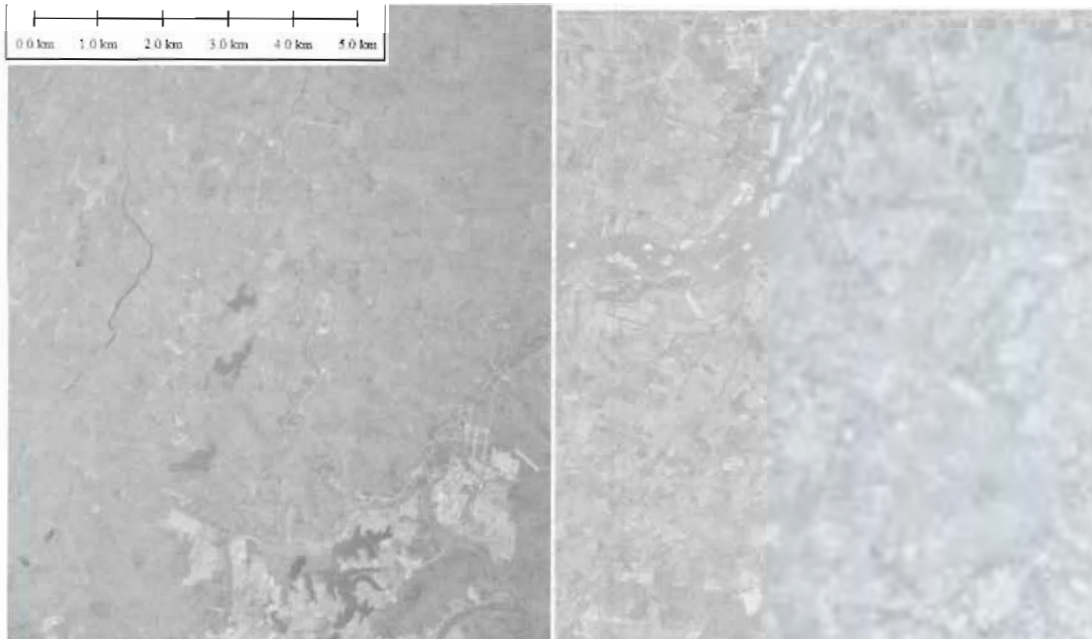


Figura 5.a.5. A la izquierda fotografía E15B81D (1995). A la derecha fotografía E15C19A (2000). Fuente: INEGI

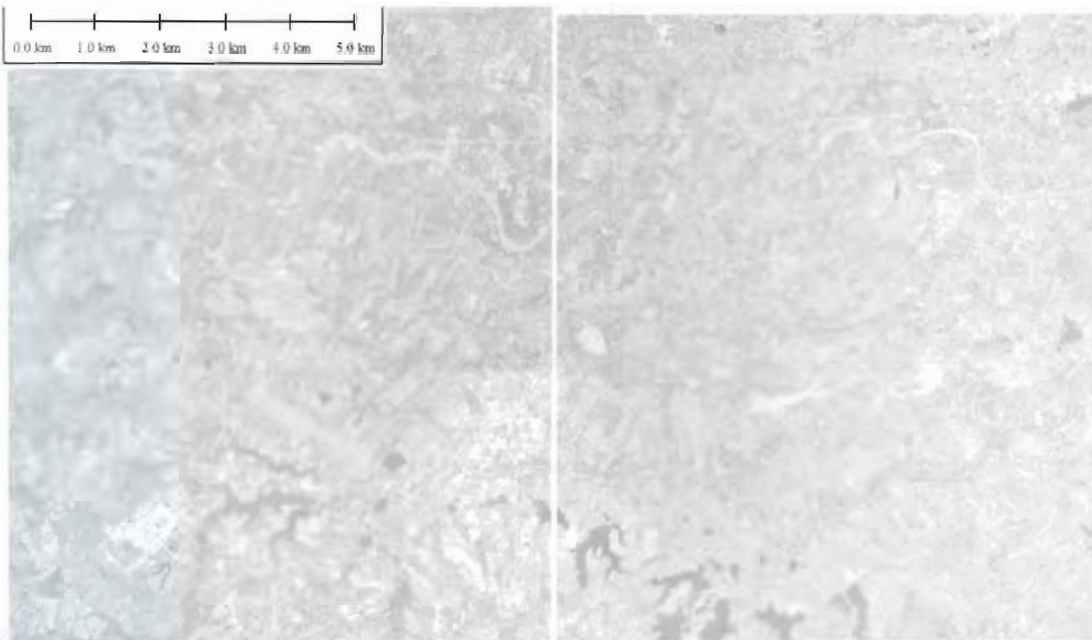


Figura 5.a.6. A la izquierda fotografía E15C19B (1995). A la derecha fotografía E15C19C (2000). Fuente: INEGI  
otografías procesadas escala 1:10,000



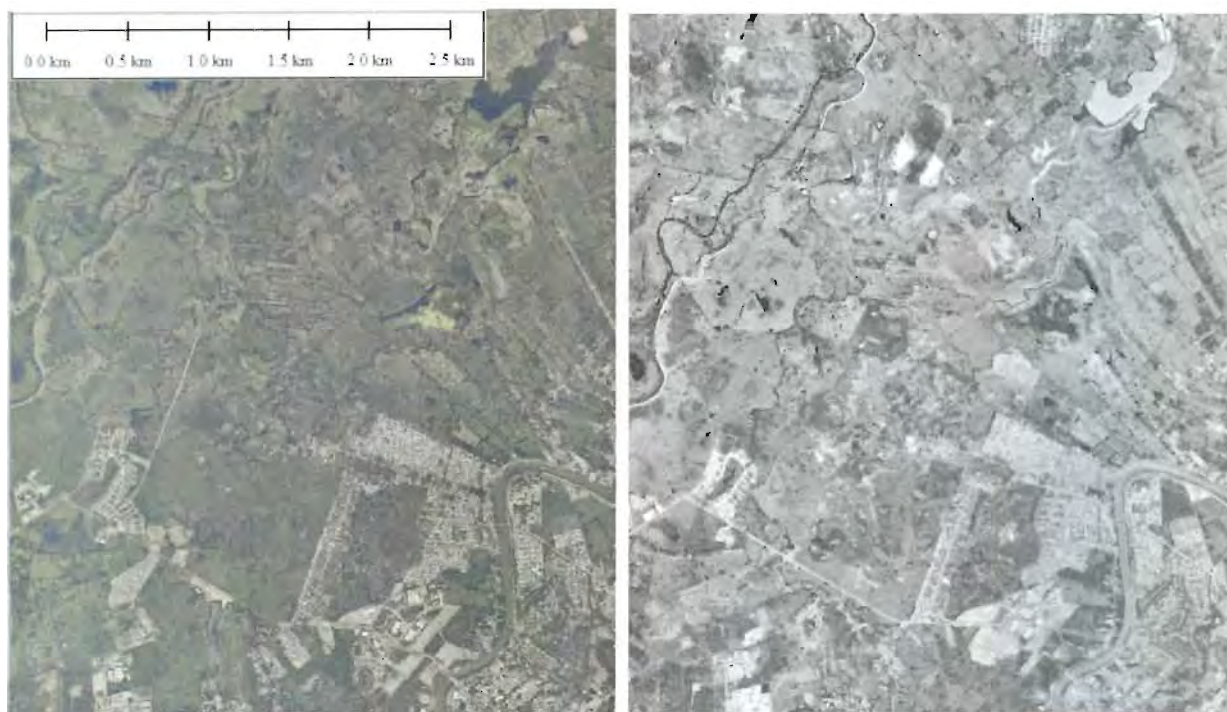


Figura 5.a.7. A la izquierda fotografía E15B81D3 (2007). A la derecha fotografía E15B81D3 (2004). Fuente: INEGI

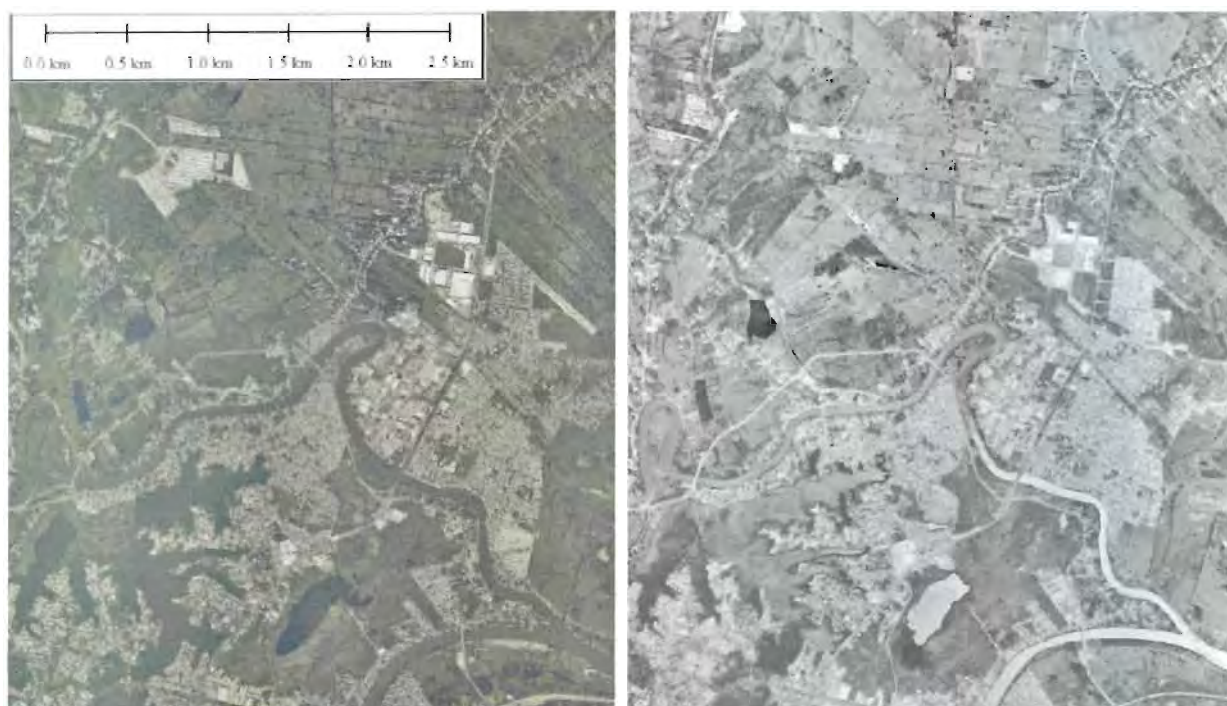


Figura 5.a.8. A la izquierda fotografía E15B81D4 (2007). A la derecha fotografía E15B81D4 (2004). Fuente: INEGI



Figura 5.a.9. A la izquierda fotografía E15C19A2 (2008). A la derecha fotografía E15C19A1 (2008). Fuente: INEGI

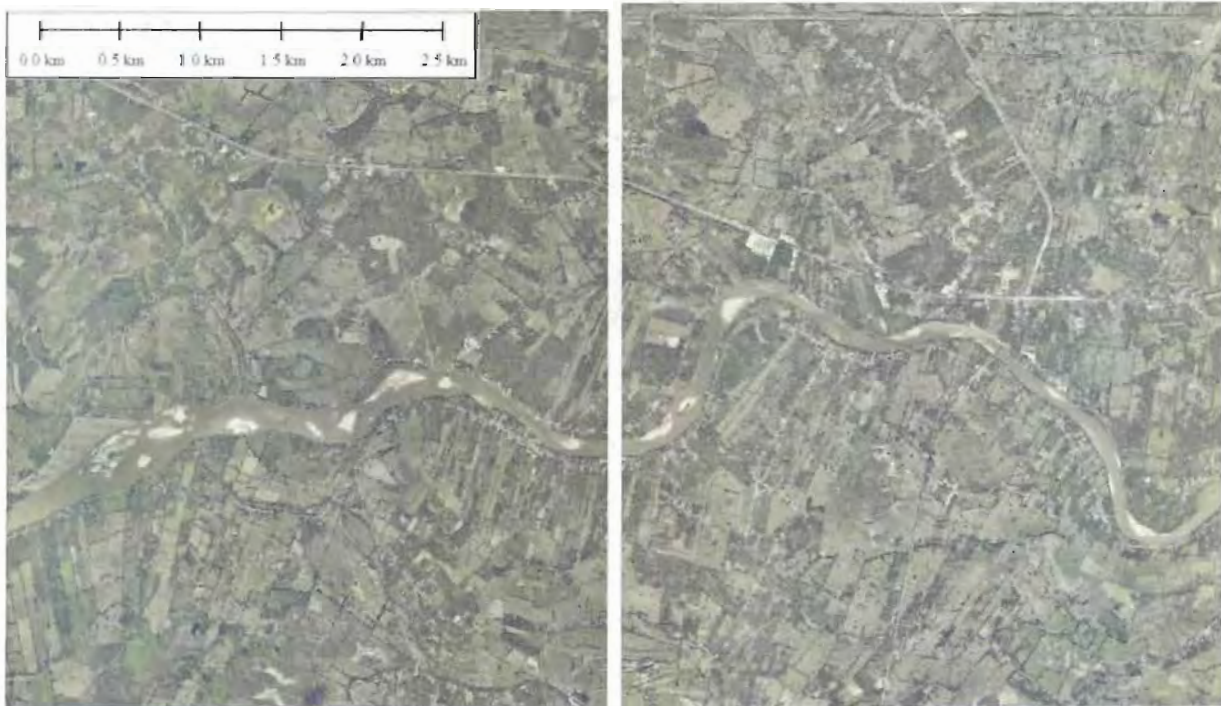


Figura 5.a.10. A la izquierda fotografía E15C19B1 (2007). A la derecha fotografía E15C19B2 (2007). Fuente: INEGI



Figura 5.a.11. A la izquierda fotografía E15C19C1 (2007). A la derecha fotografía E15C19C2 (2007). Fuente: INEGI



Figura 5.a.12. A la izquierda fotografía E15D11A1 (2007). A la derecha fotografía E15D11A1 (2004). Fuente: INEGI

## b) DETERMINACIÓN DE LA EVOLUCIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL DE LAS MÁRGENES

De forma general, la evolución de las márgenes puede ser obtenida a través de dos métodos principales:

- a) Aplicación de métodos analíticos
- b) Medición mediante fotografías aéreas y/o cartas topográficas

Los métodos analíticos permiten estimar la evolución de la forma en planta de un río y en principio fueron creados como herramienta de ayuda para los procesos de restauración en ríos y para el estudio de la morfodinámica de ríos, como es el caso del desarrollado por Abad y García (2004). Estos modelos a menudo requieren de un parámetro de erosión, que depende de cada río y que ha de ser importante para la calibración de los resultados. El segundo método permite evaluar históricamente la evolución del río y depende en gran medida de la información disponible, como fotografías aéreas, imágenes satelitales y cartas topográficas a una escala adecuada.

### *Descripción de la metodología para determinar la evolución de la erosión en las márgenes*

Para cada imagen se trazó la orilla del río, con segmentos de líneas de 2 m aproximadamente. Con la superposición de líneas de cada imagen, se obtuvieron polígonos de erosión y depósito referidos a un cadenamamiento. Para obtener la tasa de erosión se propuso la siguiente expresión:

$$Tasa(E, D) = \frac{A_{poligono}}{L_{poligono} (T_{imágenes})} \quad [5.b.1]$$

donde  $Tasa(E, S)$ , es la tasa de erosión o depósito en las márgenes del río Carrizal;  $A_{poligono}$ , es el área de cada polígono de erosión o depósito;  $L_{poligono}$ , es la longitud del polígono de erosión o depósito y  $T_{imágenes}$ , es la diferencia de tiempo entre la fecha de las imágenes utilizadas. En este estudio se presentan los resultados del corrimiento del río Carrizal entre el año 2000 y 2007. El término corrimiento está definido como el movimiento horizontal medido en las ortofotos. Para efectos de este informe, el procesamiento de la información puede visualizarse en el anexo 5.b.1 en donde se presentan 31 croquis en formato dwg y pdf. En la figura siguiente se muestra un ejemplo del análisis de fotografías aéreas.



Figura 5.b.1. Ejemplo del análisis del corrimiento con las fotografías aéreas (anexo 5.b.1)

Como ejemplo del trazo de las márgenes y de la obtención de las áreas de los polígonos de erosión se presenta la figura 5.b.2: El trazo de las márgenes del río y el procesamiento puede visualizarse en el anexo electrónico 5.b.1, para las imágenes aéreas. La figura siguiente muestra una imagen del plano en autocad que puede encontrarse en el anexo 5.b.1 y que constituye el trabajo principal de este apartado del informe.

Como ejemplo del trazo de las márgenes y de la obtención de las áreas de los polígonos de erosión se muestra la figura siguiente:

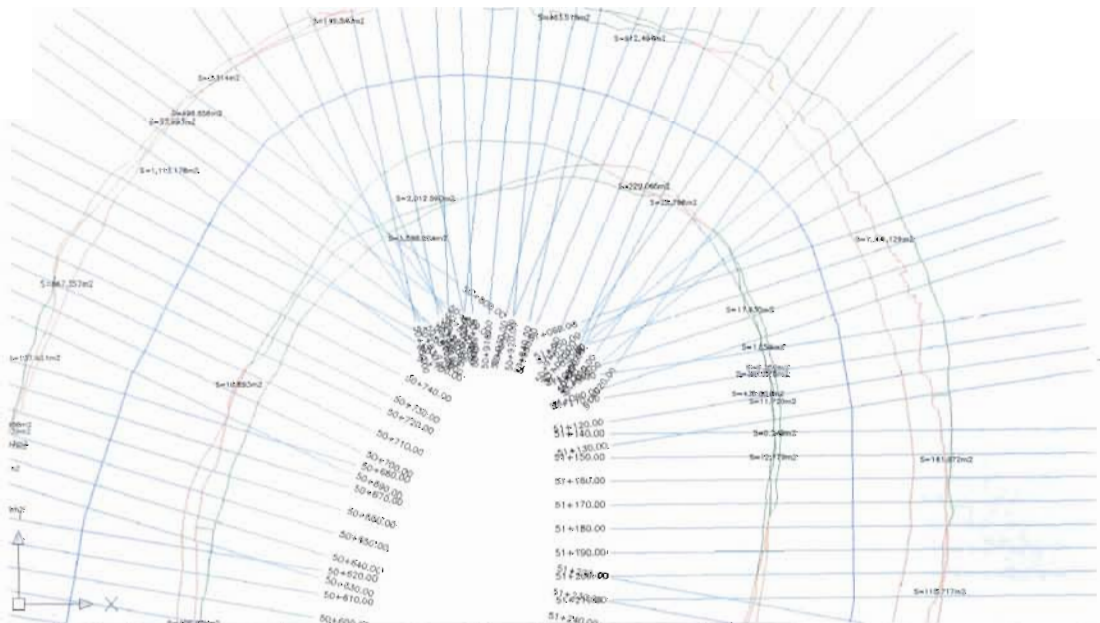


Figura 5.b.2. Ejemplo de la determinación de las superficies de erosión y sedimentación. En línea azul se muestra el cadenamiento utilizado.

La estimación del corrimiento marginal para cada cadenamamiento se puede consultar en el anexo 5.b.2.

*Corrección de mediciones en imágenes*

Como los niveles del agua para cada imagen son distintos, se realizó una corrección considerando los taludes de ambas márgenes. Se obtuvo el promedio de taludes y con ello se aplicó un factor de 4.5 m horizontales. Para la pequeña porción de la ciudad de Villahermosa, cuya imagen utilizada fue del año 1995, se obtuvo el promedio de elevaciones del mes de marzo para años posteriores, ya que para ese año no se encontraron registros de medición. La figura siguiente muestra los taludes promedio de las márgenes del río Carrizal, mediante secciones transversales a cada 1000 m de separación. La tabla que sigue muestra los diferentes niveles para cada imagen.

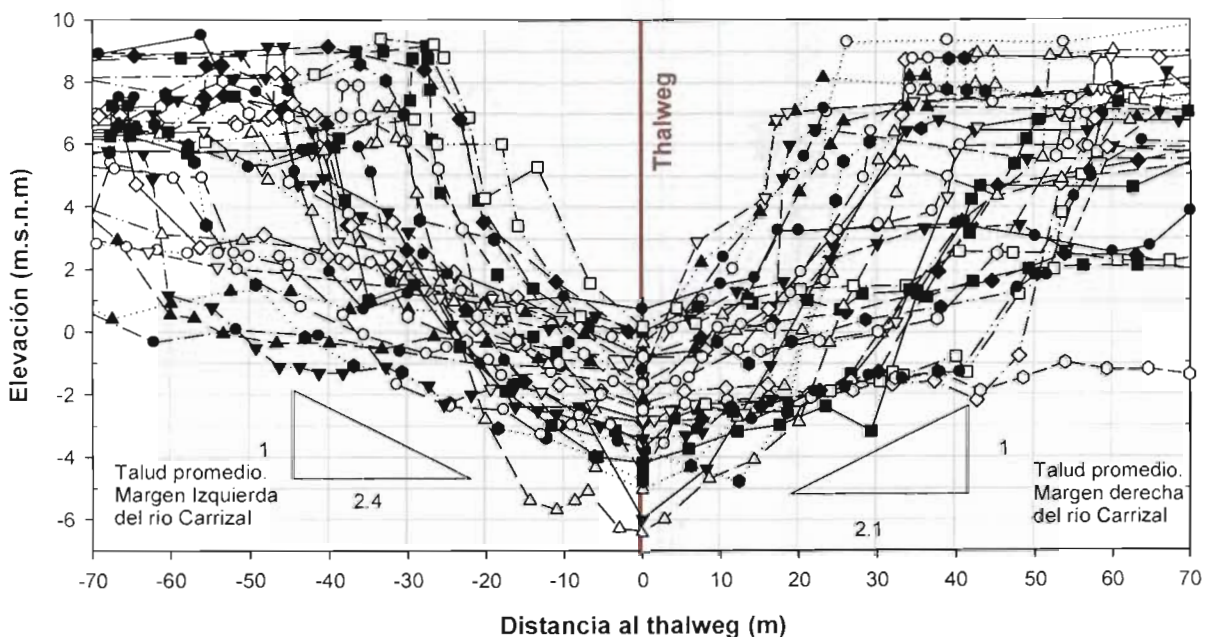


Figura 5.b.3. Secciones transversales del río Carrizal. Talud promedio (2.4:1)(H:V) para la margen izquierda y (2.1:1)(H:V) para la margen derecha.

Tabla 5.b.1. Elevaciones del agua en la estación González (Cad. 29+330).

Imagen	Fecha de imagen	Elevación promedio en la estación González (m.s.n.m)
E15B81D	Marzo de 1995	s/dato original-5.10
E15C19A, E15C19B, E15C19C y E15D11A	Noviembre de 2000	5.81
E15B81D3, E15B81D4 Y E15D11A1	Marzo de 2004	5.61
E15B81D3, E15B81D4, E15D11A1, E15C19B1, E15C19B2, E15C19C1, E15C19C2	Diciembre de 2007	3.76
E15C19A1 y E15C19A2	Enero de 2008	5.50

En las figuras 5.b.4 a 5.b.21 se muestra el procesamiento de las imágenes aéreas para la zona que corresponde a cada fotografía. Por ejemplo, en la figura 5.b.4. (figura siguiente) se muestra el procesamiento para la fotografía E15B81D de INEGI. La interpretación de los resultados del procesamiento de las imágenes (figuras 5.b.4 a 5.b.21) se presenta en el apartado c. "Estimación de la tasa de erosión marginal anual".

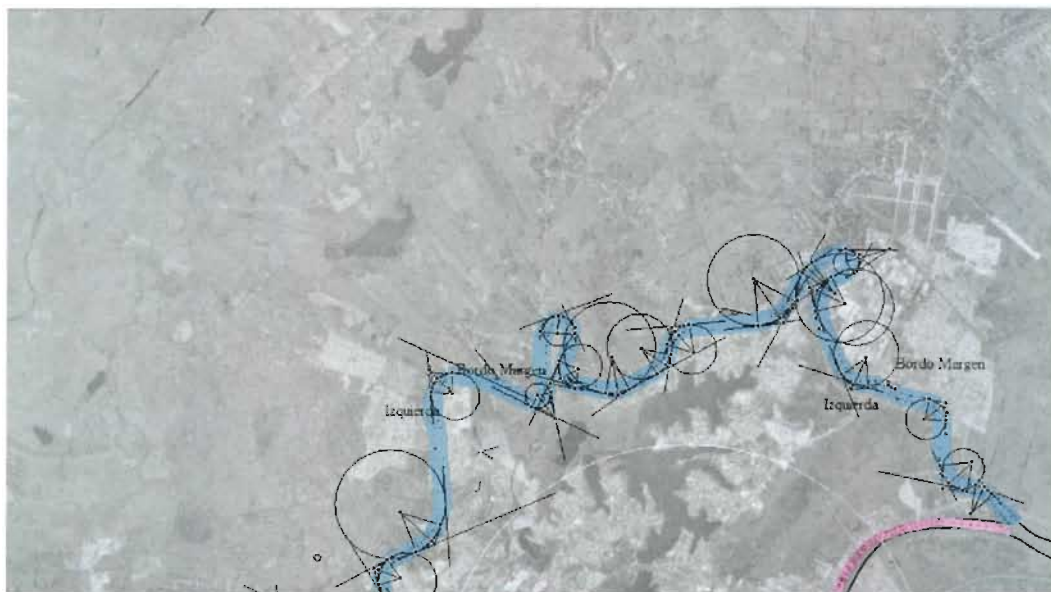


Figura. 5.b.4. Procesamiento en la zona que corresponde a la fotografía E15B81D.



Figura. 5.b.5. Procesamiento en la zona que corresponde a la fotografía E15B81D3.



Figura. 5.b.6. Procesamiento en la zona que corresponde a la fotografía E15B81D3 (blanco y negro)



Figura. 5.b.7. Procesamiento en la zona que corresponde a la fotografía E15B81D4





Figura. 5.b.8. Procesamiento en la zona que corresponde a la fotografía E15B81D4  
(blanco y negro)

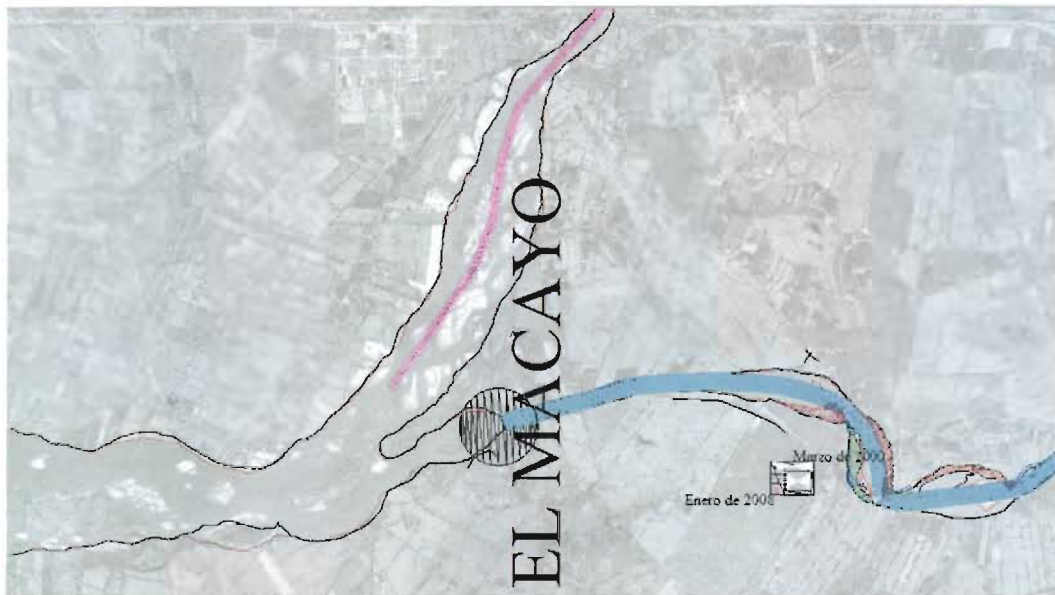


Figura. 5.b.9. Procesamiento en la zona que corresponde a la fotografía E15C19A



Figura. 5.b.10. Procesamiento en la zona que corresponde a la fotografía E15C19A1



Figura. 5.b.11. Procesamiento en la zona que corresponde a la fotografía E15C19A2

NF

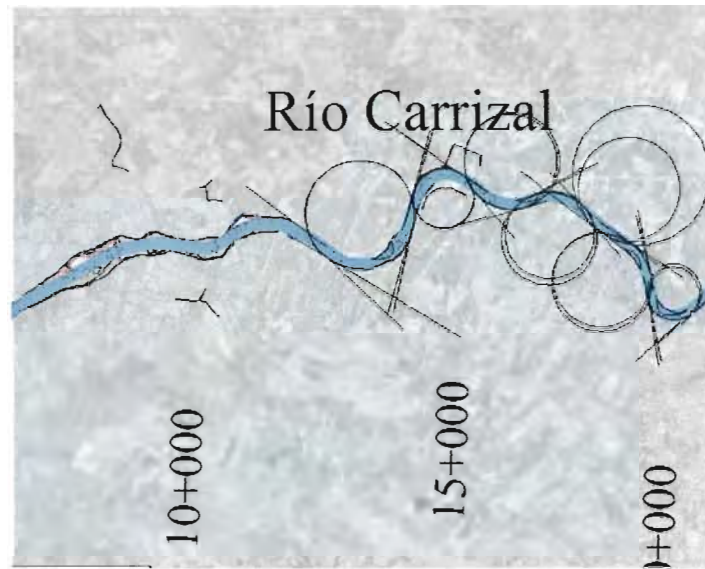


Figura. 5.b.12. Procesamiento en la zona que corresponde a la fotografía E15C19B



Figura. 5.b.13. Procesamiento en la zona que corresponde a la fotografía E15C19B1



Figura. 5.b.14. Procesamiento en la zona que corresponde a la fotografía E15C19B2

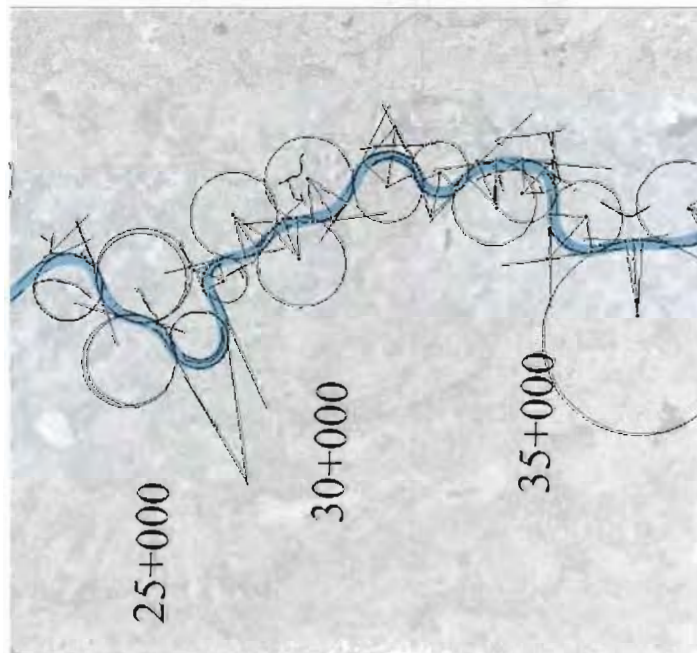


Figura. 5.b.15. Procesamiento en la zona que corresponde a la fotografía E15C19C

VF



Figura. 5.b.16. Procesamiento en la zona que corresponde a la fotografía E15C19C1



Figura. 5.b.17. Procesamiento en la zona que corresponde a la fotografía E15C19C2

A handwritten signature in black ink, located in the bottom right corner of the page. The signature is stylized and appears to be a set of initials or a name.

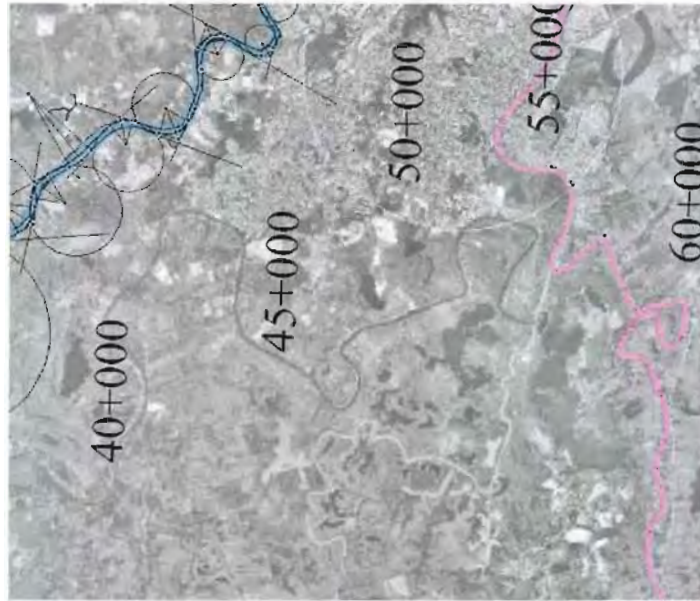


Figura. 5.b.18. Procesamiento en la zona que corresponde a la fotografía E15D11A



Figura. 5.b.19. Procesamiento en la zona que corresponde a la fotografía E15D11A1

V/F



Figura. 5.b.20. Procesamiento en la zona que corresponde a la fotografía E15D11A1 (blanco y negro)

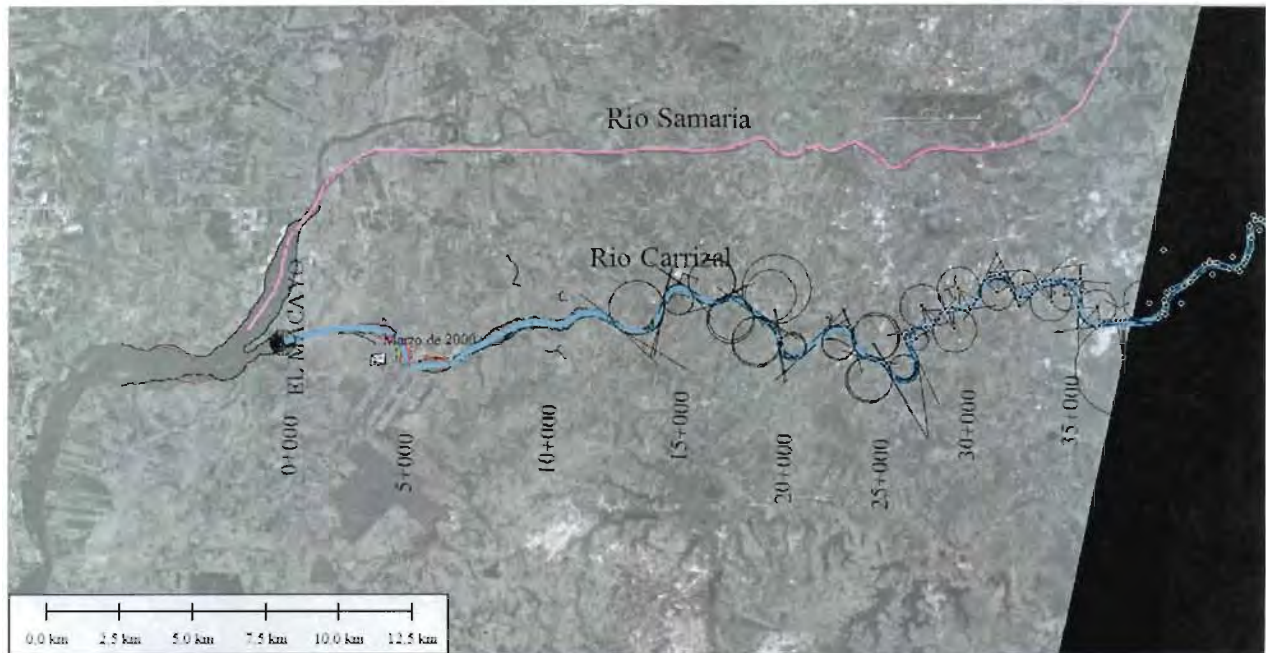


Figura. 5.b.21. Procesamiento en la zona que corresponde a la imagen SPOT 601314\_308088301

c) ESTIMACIÓN DE LA TASA DE EROSIÓN MARGINAL ANUAL

*Caracterización del corrimiento marginal*

Como resultado de la aplicación de la ecuación 5.b.1, se obtuvo la tasa de corrimiento marginal del río Carrizal. En la figura 5.c.1 se muestra que las mayores tasas de erosión, para la margen izquierda, son de 15 m/año mientras que para la margen derecha (figura 5.c.2) pueden llegar a 16 m/año. Se puede observar que, para ambas márgenes, después del cadenamamiento 10+000 las tasas de erosión son de alrededor de 1 m/año con picos que pueden alcanzar los 4 m/año. En este estudio se ha convenido utilizar el signo negativo para referir a la pérdida de margen (erosión) y signo positivo para la ganancia de margen (depósito).

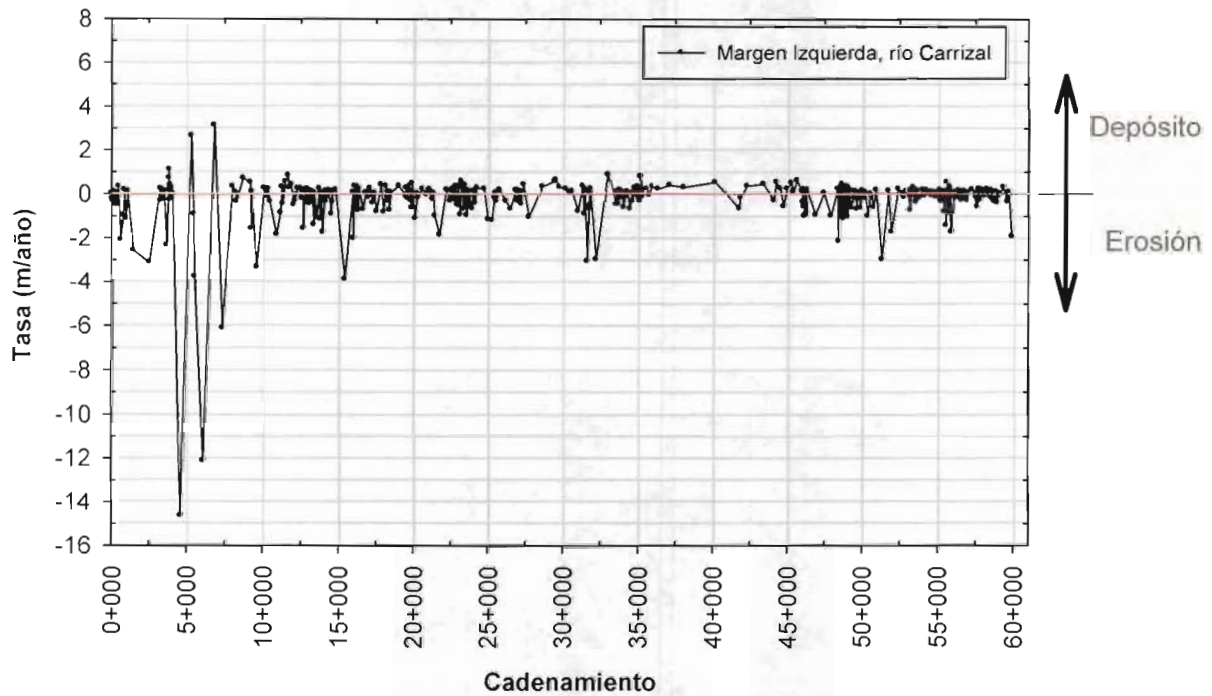
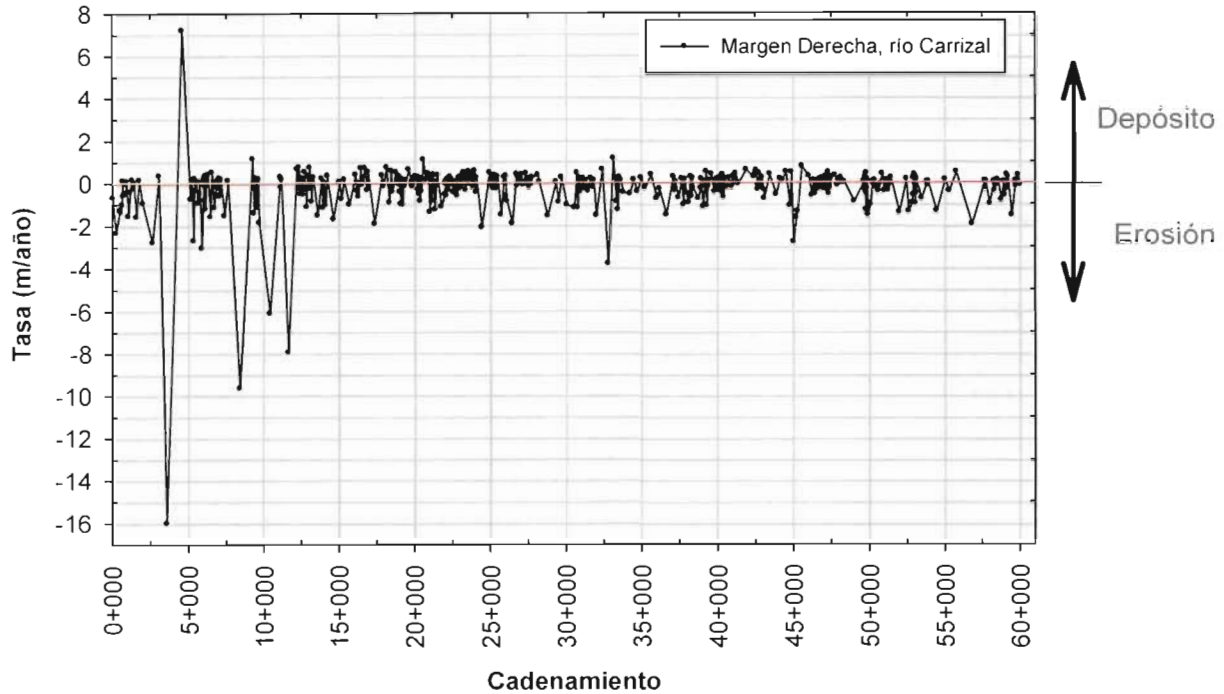


Figura 5.c.1. Tasa de cambios en la margen izquierda del río Carrizal. Periodo 2000-2007.

VF

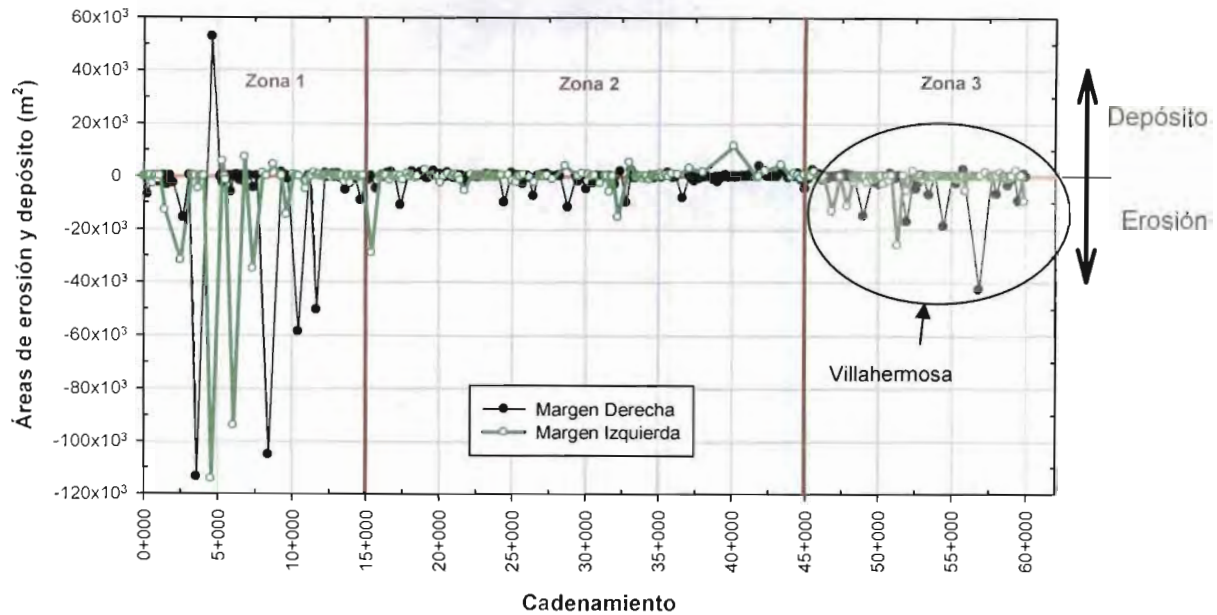




**Figura 5.c.2. Tasa de cambios en la margen derecha del río Carrizal. Periodo 2000-2007.**

Cabe mencionar que el resultado del análisis de imágenes aéreas permitió cuantificar el área (en planta) que ha perdido (erosión) o que ha sido ganada (depósito) en las márgenes, de ahí que, en este estudio, el término tasa está referido al movimiento horizontal de las márgenes del río para un determinado tiempo.

Para visualizar las características morfológicas del río Carrizal, se graficaron las áreas perdidas o ganadas por el río, considerando que las erosiones tienen signo negativo y los depósitos signo positivo. El resultado se muestra en la figura 5.c.3. Es claro notar en esta figura que existen tres zonas que denotan diferencias en la morfología del río Carrizal. La primera zona (zona 1) está comprendida entre los cadenamientos 0+000 a 15+000, en la que se presentó un gran movimiento del río. Esta zona está caracterizada por meandros no bien definidos y con cantidades importantes de islas dentro del cauce. En esta zona el suelo es predominantemente arenoso. La segunda zona, comprendida entre los cadenamientos 15+000 a 48+000, está constituida por suelos limoarenosos. Para ambas márgenes, en la zona 2, existe un comportamiento similar. En la zona 3 se observa un pequeño aumento en las cantidades de áreas de erosión en ambas márgenes, representando un aumento en el potencial de corrimiento del río Carrizal. Es en esta zona donde se encuentra la ciudad de Villahermosa y en donde se han construido varias obras de defensa de orillas.



**Figura 5.c.3. Áreas de erosión y depósito en el río Carrizal, resultado del análisis de imágenes aéreas.**

*Características del cauce*

**Ancho del río (b)**

También como resultado del análisis de imágenes aéreas, se obtuvo el ancho del río (*b*) a cada 10 m, a lo largo de los 60 km del río Carrizal (figura 5.c.4). El ancho del río está definido, en este estudio, como el ancho de la superficie libre del agua para la fecha de la imagen. Para el año 2007 se aplicó el factor de corrección para tomar en cuenta la diferencia de niveles de la superficie libre del agua, con respecto al año 2000. En la figura 5.c.4 se observa que, en la zona 1, existe una variabilidad grande en el ancho, llegando incluso a 600 m. Sin embargo, a partir del cadenamiento 8+000 el ancho decrece siguiendo una tendencia marcada, hasta llegar a 50 m. La figura 5.c.4 también muestra que después del cadenamiento 45+000 existió un aumento en el ancho de 25 metros en promedio. En el anexo 5.c.1 se muestran los resultados de la medición del ancho del río en las fotografías aéreas, para cada cadenamiento.

Para comprender de mejor forma la evolución del ancho del río, se presenta la figura 5.c.5, en donde se graficó el porcentaje de variación del ancho entre los años 2000 y 2007. El signo positivo de la figura 5.c.5 representa incrementos del ancho mientras que el signo negativo representa estrechamientos. Se observa que en la zona 1 existen grandes porcentajes de variación, del orden del 175%, debido al desplazamiento, hacia aguas abajo, de grandes porciones de margen. En la zona 2 el ancho permanece estable con un ligero incremento del ancho del orden 11.31% en promedio, y estrechamientos de 6% en promedio. En la zona 3, donde se localiza una parte de la ciudad de Villahermosa, el ancho se incrementó en promedio 35%, mientras que los estrechamientos fueron del 9%.

VJF

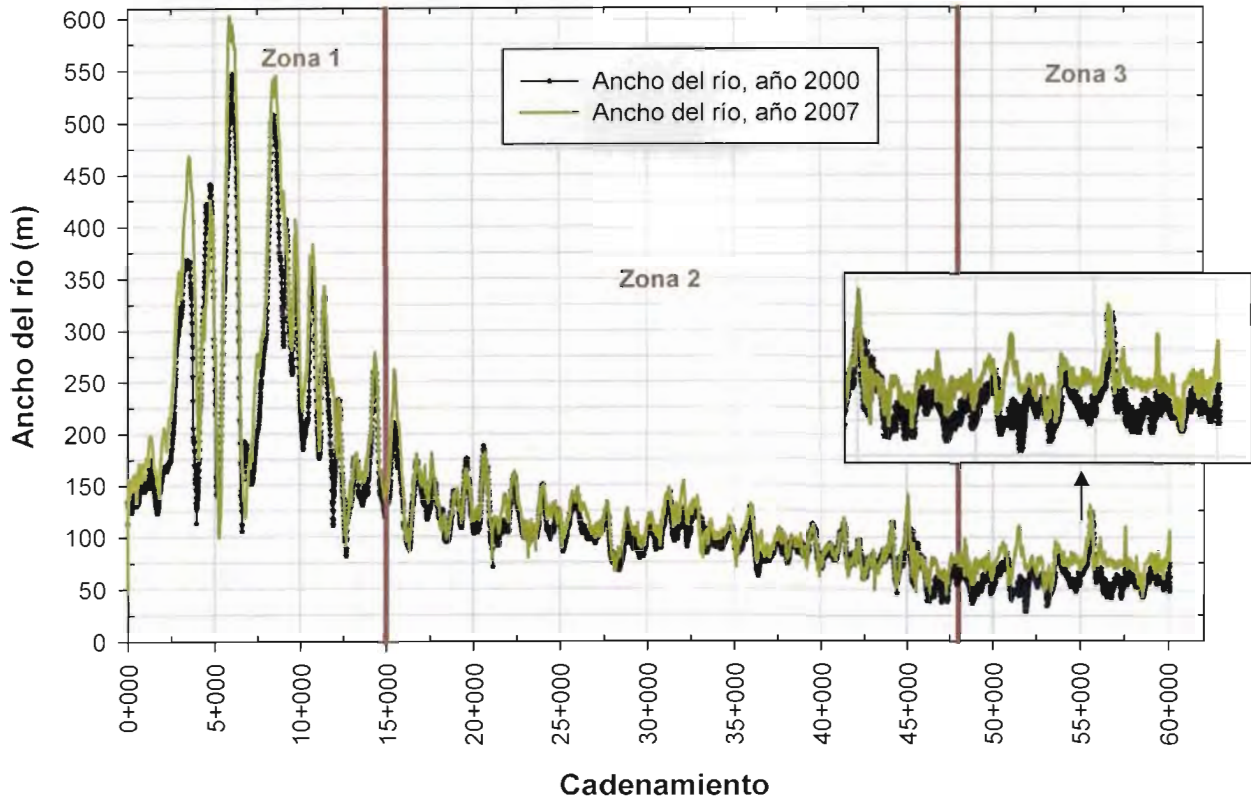


Figura 5.c.4. Evolución del ancho del río en el río Carrizal.

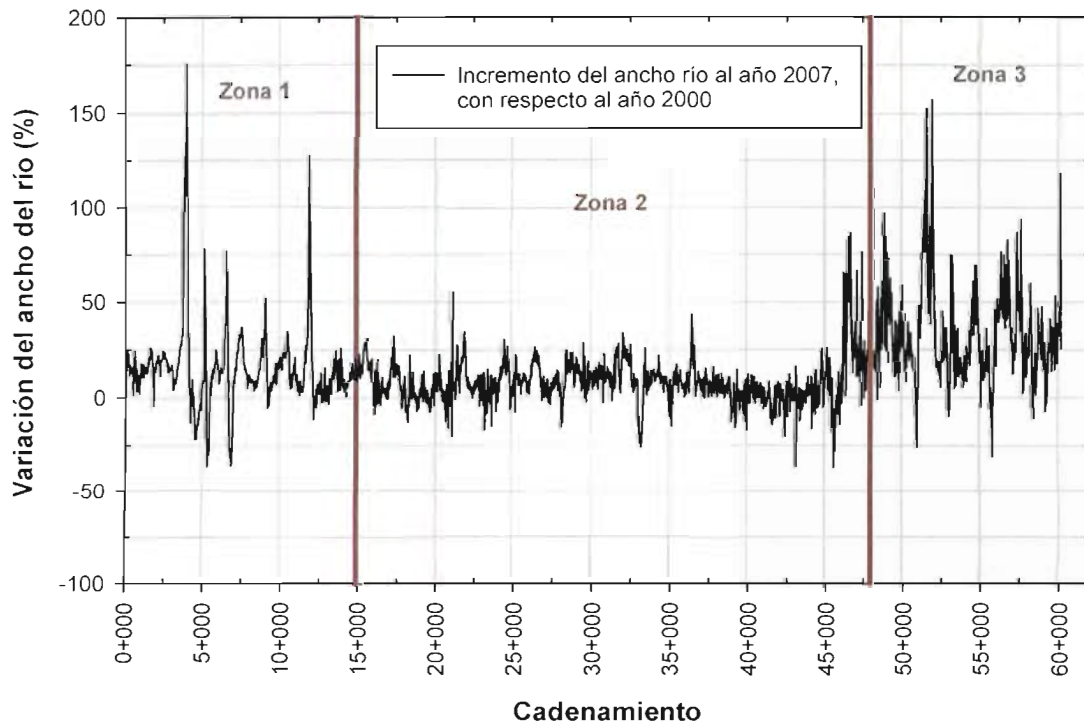
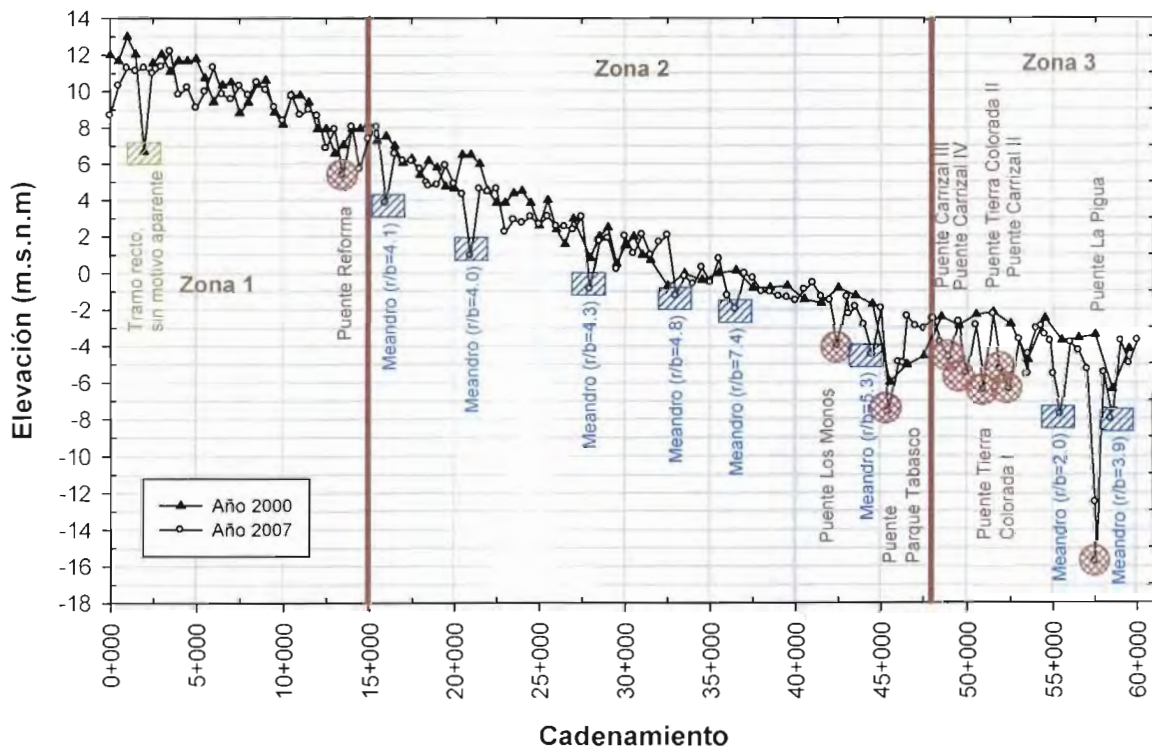


Figura 5.c.5. Porcentajes de variación del ancho del río Carrizal.

**Perfil del fondo**

Para evaluar el comportamiento del perfil del fondo del río (thalweg), se utilizó información proporcionada por CONAGUA (año 2000) y una batimetría realizada por la Secretaría de Marina de la Armada de México, en abril de 2008. La comparación de los perfiles del fondo del cauce se muestra en la figura 5.c.6, referidos al cadenamiento utilizado en el análisis de imágenes. La figura 5.c.6 muestra que, en la zona 1, el perfil del fondo se mantuvo estable, lo mismo sucedió en la zona 2. Sin embargo, es claro notar que para el año 2007 se presentaron zonas con profundizaciones acentuadas, es decir, descensos del fondo como producto de erosiones locales. Al identificar los descensos bruscos se observó que la mayoría están referidos a socavaciones en el extradós de las curvas y a socavaciones por contracción debido a la localización de puentes carreteros. En la zona 3, existe incisión del fondo, sin embargo, no es posible afirmar si se trata de una nueva condición de equilibrio del cauce o de una enorme cantidad de problemas locales, ya que en esta zona se encuentran varios puentes carreteros.



**Figura.5.c.6. Evolución del fondo del cauce del río Carrizal.**

*VF*

# ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO Y GEOTÉCNICO DEL CORRIMIENTO DE LAS MÁRGENES DEL RÍO CARRIZAL



Figura 5.c.7. Cadenamiento 13+490, localización del puente Reforma.

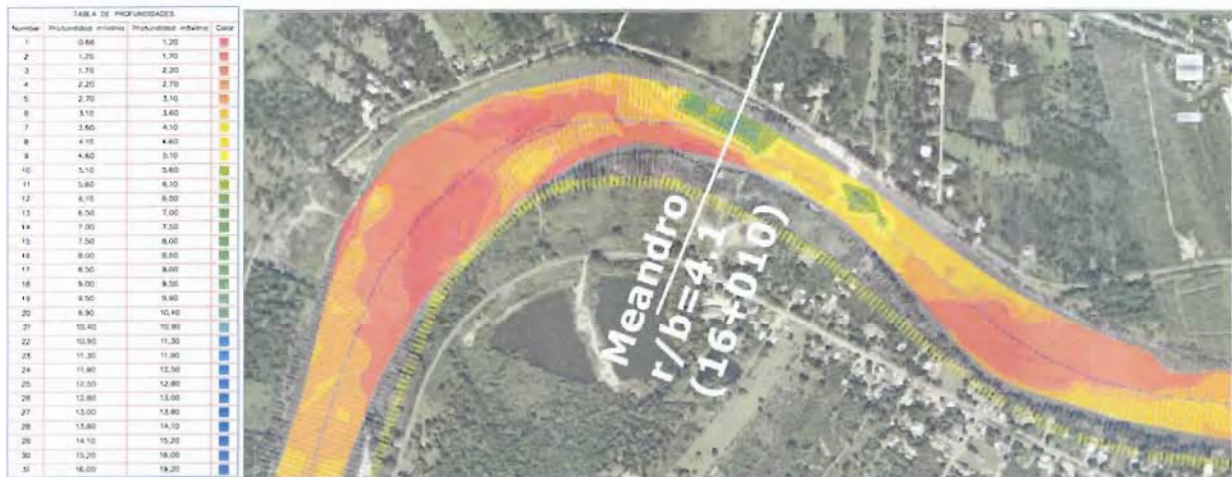


Figura 5.c.8. Cadenamiento 16+010, localización de un meandro con relación  $r/b=4.1$

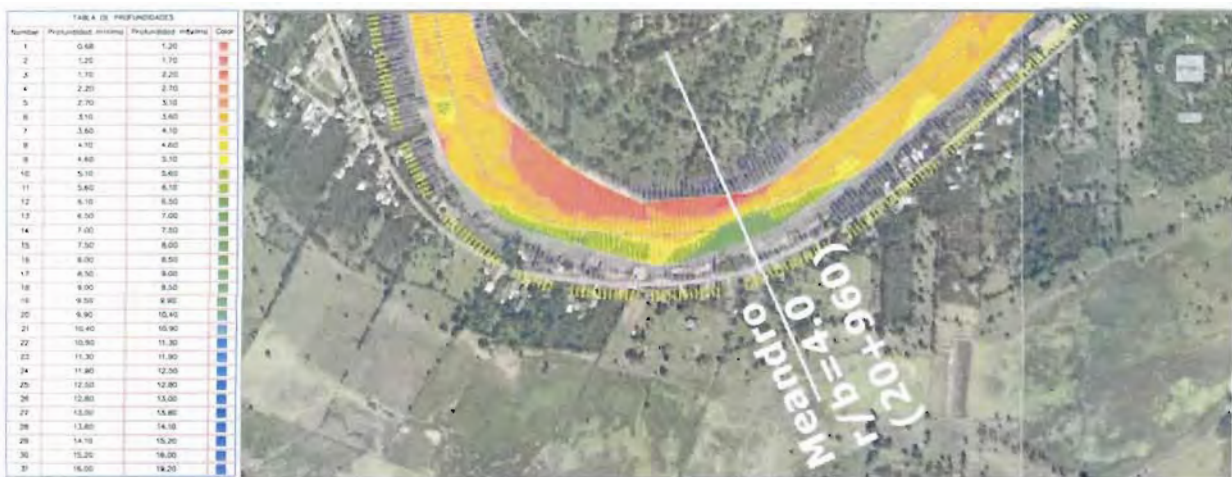


Figura 5.c.9. Cadenamiento 20+960, localización de un meandro con relación  $r/b=4$



Figura 5.c.10. Cadenamiento 27+980, localización de un meandro con relación  $r/b=4.3$



Figura 5.c.11. Cadenamiento 32+976, localización de un meandro con relación  $r/b=4.8$



Figura 5.c.12. Cadenamiento 36+456, localización de un meandro con relación  $r/b=4.7$

VF

# ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO Y GEOTÉCNICO DEL CORRIMIENTO DE LAS MÁRGENES DEL RÍO CARRIZAL



Figura 5.c.13. Cadenamiento 13+490, localización del puente Reforma.



Figura 5.c.14. Cadenamiento 16+010, localización de un meandro con relación  $r/b=4.1$



Figura 5.c.15. Cadenamiento 45+540, profundización después de una alteración artificial del río



Figura 5.c.16. Cadenamiento 49+850, localización de un meandro con relación  $r/b=2.5$



Figura 5.c.17. Cadenamiento 50+046, localización de un meandro con relación  $r/b=2.0$



Figura 5.c.18. Cadenamiento 51+950, localización del puente Tierra Colorada II

VF





Figura 5.c.19. Cadenamiento 51+950, localización de un meandro con relación  $r/b=4.2$



Figura 5.c.20. Cadenamiento 55+494, localización de un meandro con relación  $r/b=2.0$



Figura 5.c.21. Cadenamiento 57+617, localización del puente la Pigua



Figura 5.c.22 Cadenamiento 58+518, localización de un meandro con relación  $r/b=3.9$

### Geometría de meandros (relación $r/b$ )

Se sabe que en el extradós de las curvas en un río meandroso se presentan mayores profundidades del cauce como producto de la erosión causada por el flujo helicoidal que se genera ante el cambio de dirección de la corriente, por ello y con el fin de fijar las márgenes de los meandros se recurre a la construcción de obras de protección marginal. Existen publicaciones (Maza y García, 1996) que recomiendan el análisis de protecciones marginales en función del radio de curvatura ( $r$ ) y del ancho del río ( $b$ ). También Maza (2003) considera que en un meandro con radio de curvatura menor que 10 veces el ancho de la superficie libre, en el tramo recto aguas arriba de la curva ( $r < 10b$ ), el thalweg del río siempre estará cerca de la orilla exterior y por tanto, las obras localizadas en esa zona (protecciones marginales o estribos de puentes), son las que estarán siempre sujetas a las mayores erosiones en curvas. En esta afirmación también está presente la relación  $r/b$ .

Por otro lado, la mayoría de las ecuaciones para la determinación de la profundidad máxima de erosión en curvas consideran también la relación  $r/b$ , como es el caso de la fórmula de Altunin, las ecuaciones de Galay, Yaremk y Quazi, la ecuación de Thorne, la ecuación de Watanabe, Hasegawa y Houjyou (Maza, 2003). De lo anterior puede deducirse que la relación  $r/b$  tiene gran importancia para evaluar la erosión producida por el flujo del agua en las curvas de los cauces. Bajo este concepto, dentro del análisis geométrico de los meandros, se presenta la figura 5.c.24, en donde se ha graficado la evolución de la relación  $r/b$ . En esta figura el signo negativo representa curva hacia la derecha y el positivo curva hacia la izquierda. Se puede notar que casi todas las relaciones  $r/b$  se encuentran comprendidas entre 2 y 8, y disminuyeron al año 2007. Es notable que en la zona 3 existen los menores radios de curvatura que pueden deberse a la condición aguas abajo que representa la confluencia de este río con el río Grijalva. De acuerdo con Maza y García (1996), cuando la corriente de un río empieza a erosionar la orilla exterior de una curva, disminuye el radio de curvatura, y puesto que el ancho del río ( $b$ ), permanece casi constante en ese tramo, la relación  $r/b$  disminuye y la capacidad erosiva del flujo aumenta. Situación que se presenta en el río Carrizal. Los resultados de la medición de la relación  $r/b$  se presentan en el anexo 5.c.2.

V.F



Figura 5.c.23. Ejemplo del trazo de las curvas en el río Carrizal, para obtener la relación  $r/b$

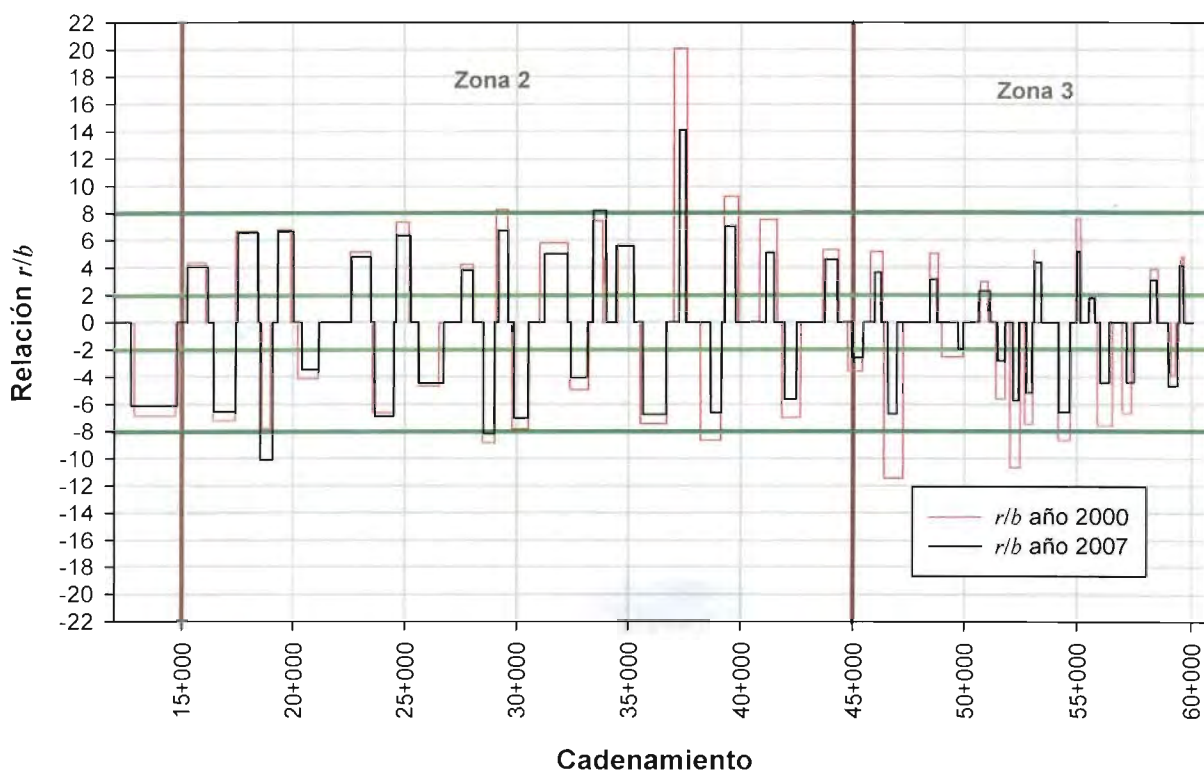


Figura 5.c.24. Evolución de la relación  $r/b$  en el río Carrizal.

### Características hidráulicas

Para conocer las características hidráulicas del río Carrizal, se utilizó información proporcionada por la Comisión Nacional del Agua, de las estaciones Macayo, González, La

Pigua y Porvenir. La estación Porvenir se encuentra 2 km aguas abajo de la confluencia con el río Grijalva.

Es importante mencionar que las variaciones en el nivel de un río provocan fenómenos de vaciado y/o llenado rápido, mismos que desestabilizan las márgenes u obras construidas sobre ella. Para evaluar el comportamiento hidráulico del río Carrizal bajo este enfoque, se presenta la figura 5.c.25, en donde se graficó la elevación de la superficie libre del agua para dos condiciones aguas abajo. La primera condición refleja la superficie del agua con una frontera aguas abajo de 1 msnm y la segunda para una frontera 5 msnm para una misma elevación aguas arriba (Macayo). Es importante notar que esta variación de niveles puede afectar hasta 30 km del río Carrizal (tramo comprendido entre la estación González y la confluencia con el río Grijalva).

De acuerdo con Juárez y Rico (2004), para que la condición de vaciado rápido tenga lugar no es preciso que ocurra un descenso total del nivel del agua en un lapso de minutos, ni de horas o días. El estado de esfuerzos correspondiente a la condición de vaciado rápido puede presentarse si el nivel del agua desciende más aprisa que lo que se disipan los excesos de presión neutral en el cuerpo de tierra, originados precisamente por dicho abatimiento. Para casos especiales de presas de tierra, han ocurrido deslizamientos importantes para velocidades de descenso del agua del orden de 20 ó 30 cm por día (Juárez y Rico, 2004), sin embargo, no necesariamente podrían ser los mismos valores para el caso de bordos o márgenes naturales de un río. En la figura 5.c.26 se muestran las velocidades de ascenso y descenso del nivel del agua para las estaciones González y Pigua.

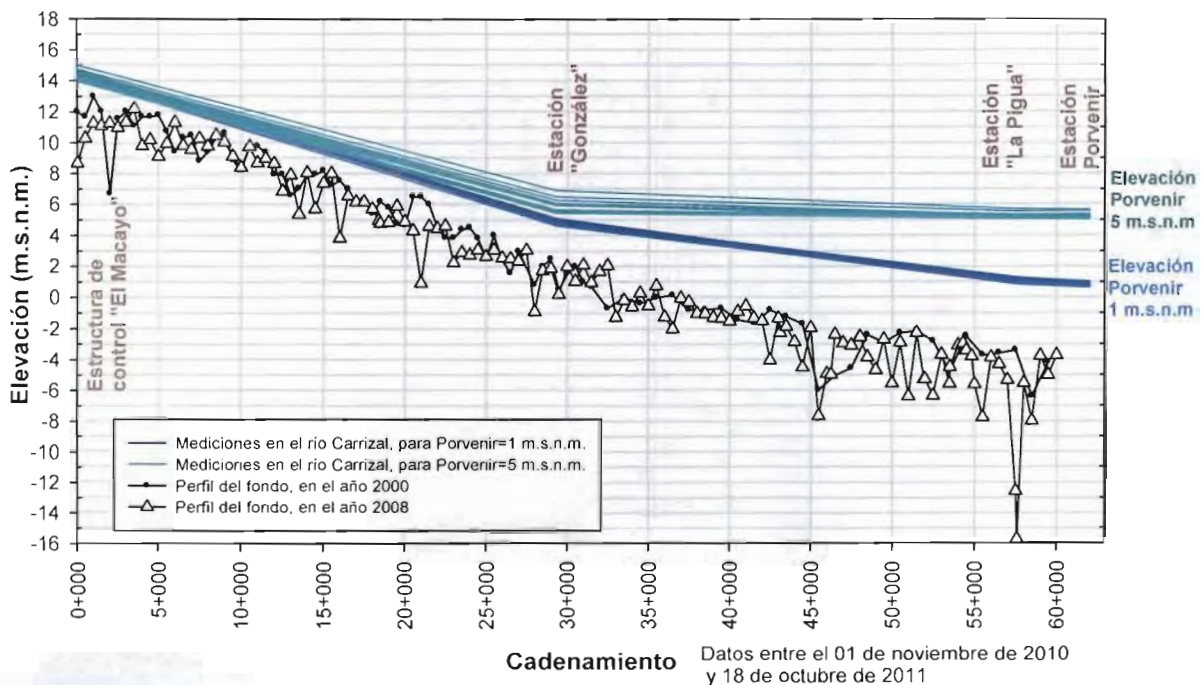


Figura 5.c.25. Niveles del agua medidos en el río Carrizal para dos condiciones aguas abajo.

*VF*

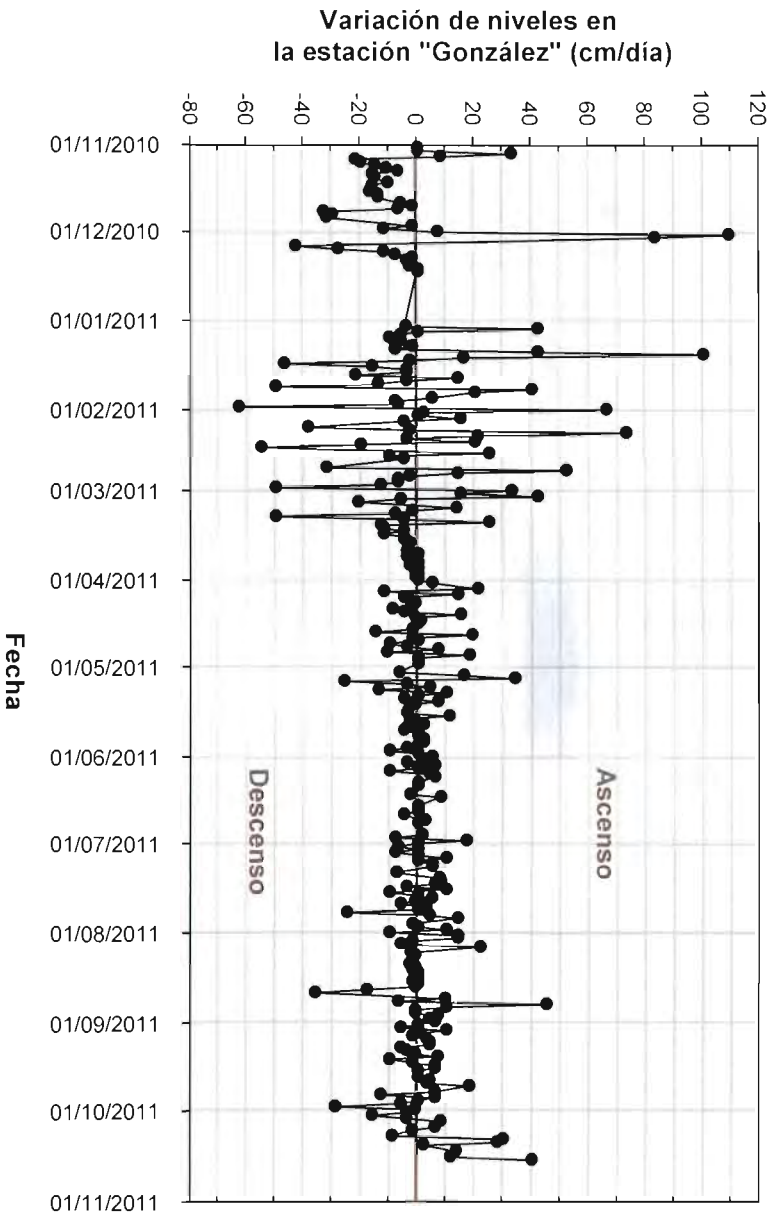
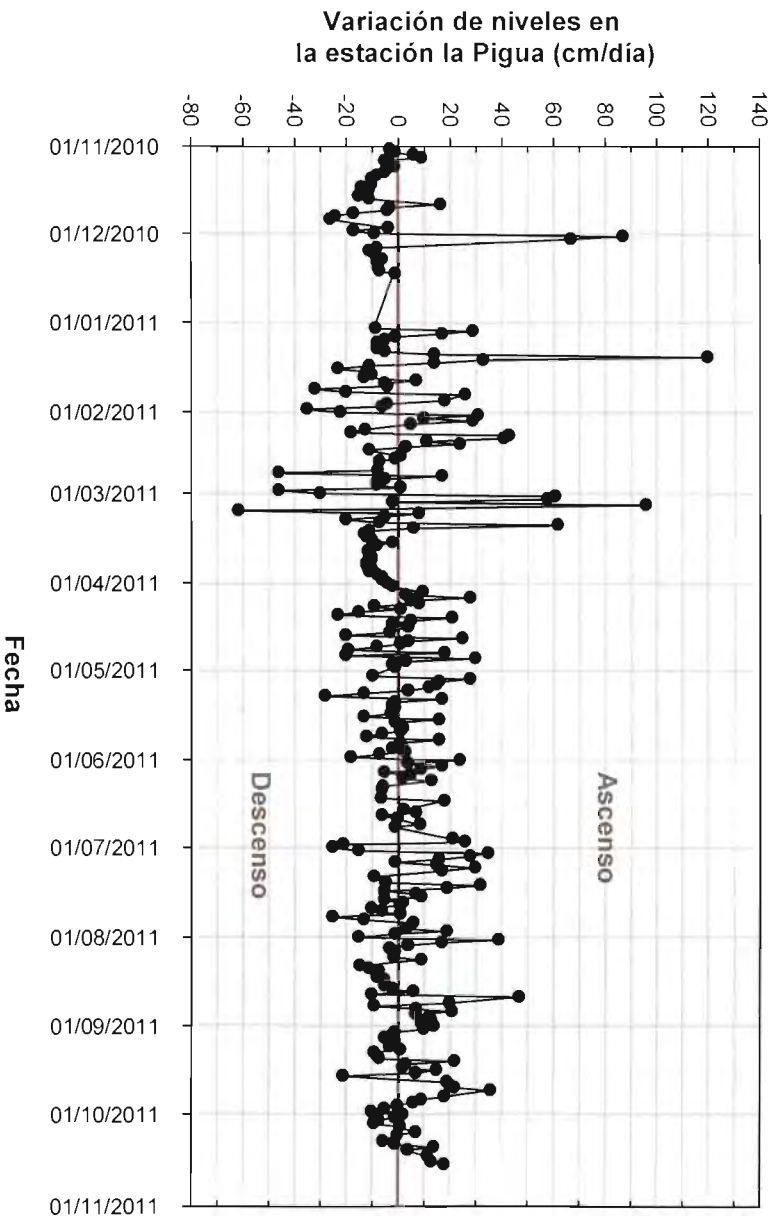


Figura 5.c.26. Velocidades de descenso del agua en el río Carrizal.

Propiedades del suelo de las márgenes

En los 29 sondeos mixtos (pruebas de penetración estándar y muestreos inalterados con tubo Shelby) realizados en las márgenes del Río Carrizal (cadenamientos 20+000 a 60+000), cuyas profundidades variaron entre 15 y 25 metros (los sondeos fueron realizados en la tercera etapa del PHIT), se encontró que el subsuelo está formado por mezclas heterogéneas de arcilla, limo y arena fina, alternados con capas de limo y arena fina o de arena fina poco limosa, todas muy blandas y sueltas, con cantidades importantes de materia orgánica en muchos casos. El valor del número de golpes obtenido con la exploración geotécnica demostró la baja capacidad de carga del suelo de las márgenes del Carrizal. En las zonas 1 y 2, no se muestra una diferencia significativa en el número de golpes. La profundidad que corresponde al número de golpes de la figura 5.c.27 es 10 m, ya que se considera, de acuerdo a las secciones transversales, que puede representar el suelo susceptible al ataque de la corriente del río. Los valores de cohesión, obtenidos de las pruebas triaxiales rápidas UU (no consolidada no drenadas), son muy bajos lo que influye en la inestabilidad del suelo de las márgenes del río Carrizal. En la zona 1 no se realizaron sondeos geotécnicos, sin embargo, en los recorridos realizados se ha podido identificar, que el suelo en apariencia es arenoso.

La información utilizada para el suelo de las márgenes surgió del resultado de laboratorio de los sondeos geotécnicos efectuados en el río Carrizal y que se detallan en el informe CONAGU-ILUNAM (2010). En las tablas siguientes, el color rojo representa los valores más bajos del número de golpes, mientras que el color verde representa los valores más altos.

Geotécnicamente, la conclusión más importante consiste en afirmar que el suelo de la margen del río Carrizal soporta con mucho trabajo los bordos de protección contra inundación y que cualquier protección adicional contra erosión fluvial, por ligera que parezca, constituye una sobrecarga importante que podría poner en riesgo la estabilidad de la margen. Además, debido que no se encontró ninguna relación entre el número de golpes (N) y la cohesión, se hace imposible, a esta escala, determinar la influencia del tipo de suelo en las fallas de las márgenes del río. De las pruebas de laboratorio realizadas a las muestras obtenidas mediante los sondeos geotécnicos, se concluyó que el suelo de las márgenes del río Carrizal está constituido por estratos de limo, arena y arcilla, formando un suelo blando y con baja capacidad de carga, lo que impide, en algunas ocasiones, soportar el peso de las protecciones marginales.

Es necesario realizar análisis de estabilidad considerando los escenarios posibles, incluyendo las condiciones de socavación y las variaciones en descenso del nivel del agua para verificar si estos factores son suficientes para que exista falla, ya sea bajo condiciones naturales y aquellas que se producen con la construcción de las obras de protección marginal y contra inundaciones. Por otro lado, comprobar la existencia de suelos dispersivos podría representar un factor influyente en la falla de dichas obras.

VF

ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO Y GEOTÉCNICO DEL CORRIMIENTO DE LAS  
MÁRGENES DEL RÍO CARRIZAL

**Tabla 5.c. 1. Número de Golpes de la prueba de penetración estándar en los sondeos realizados en la margen izquierda del río Carrizal**

Cadenamiento	20+019	23+139	25+042	33+721	35+087	35+178	36+841	41+529	44+180	48+539	51+101	53+347	55+635	57+751	57+809	58+375	58+431	58+651
Profundidad (m)	SM01CI	SM02CI	SM03CI	SM04CI	SM24CI	SM25CI	SM26CI	SM27CI	SM05CI	SM07CI	SM40CI	SM11CI	SM23CI	SM16CI	SM15CI	SM17CI	SM18CI	SM19CI
0.3	0	5	7	21	0	13	7	11	19	2	44	0	0	9	9	13	12	5
0.9	7	3	4	25	4	8	3	4	17	3	47	38	8	5	9	8	5	7
1.5	5	4	4	6	3	4	4	2	8	5	9	7	4	2	5	2	1	14
2.1	4	4	2	3	1	2	7	1	6	3	10	4	4	3	2	2	3	8
2.7	2	4	2	3	1	2	6	4	2	2	9	1	2	6	2	2	11	4
3.3	3	4	2	2	2	0	3	1	2	4	3	4	4	2	2	2	1	2
3.9	3	4	2	2	4	1	3	2	2	3	2	1	3	10	0	2	2	2
4.5	2	5	1	2	3	1	1	1	3	2	0	1	4	3	1	2	4	1
5.1	2	1	2	1	6	6	2	2	1	2	4	3	1	1	2	4	4	1
5.7	2	1	0	4	5	2	0	1	1	4	3	3	3	2	2	3	5	2
6.3	7	2	1	2	6	6	9	2	4	1	2	4	2	5	2	4	3	0
6.9	2	5	4	2	4	4	12	3	5	3	2	3	4	5	2	2	1	0
7.5	3	3	2	3	2	2	8	3	6	3	2	2	7	3	2	1	1	2
8.1	3	2	2	2	2	2	11	3	5	2	3	3	10	1	3	2	1	2
8.7	3	2	2	5	1	1	2	2	5	1	2	1	15	2	2	0	1	1
9.3		6	2	7	3	3	2	2	3	1	1	1	12	3	4	0	2	4
9.9		6	4	5	2	2	9	1	3	0	2	2		4	2	1	1	2
10.5		11	4	10	2	2	11	1	4	0	2	2		5	3	3	2	2
11.1		12	7	12	4	4	5	0	4	1	3	5		5	4	2	1	2
11.7			13	9	4	4	7	0	2	1	3	3		5	3	3	5	2
12.3			6	12	3	3	7	1	2	2	3	3		5	5	6	7	2
12.9			15		2	2	8	2	3	1	2			6	7	7	7	3
13.5			8		3	3	7				1						6	3
14.1			8		6	6	4										5	
14.7			18		14	14	2										5	
15.3			21		12	12	2										4	
15.9			21		18	18	3										4	
16.5			26		20	20	7										2	
17.1					30	30	2										0	
17.7							6										0	
18.3																	1	
18.9																	2	
19.5																	0	
20.1																	5	
20.7																	7	
21.3																	3	
21.9																	5	

Tabla 5.c.2. Número de golpes e la prueba de penetración estándar en los sondeos realizados por la margen derecha del río Carrizal

Cadenamiento	42+221	43+383	43+411	53+289	54+609	54+710	56+491	56+615	59+091	59+110	59+357
Profundidad	SM06CD	SM28CD	SM12CD	SM10CD	SM09CD	SM08CD	SM14CD	SM13CD	SM20CD	SM21CD	SM22CD

0.3	2	2	2	2	6	4	11	7	8	15	4
0.9	13	5	3	2	6	4	4	4	11	11	6
1.5	5	5	2	3	10	5	4	6	11	7	4
2.1	7	6	5	1	11	5	18	15	11	11	6
2.7	5	4	3	1	4	2	4	3	11	5	4
3.3	4	21	2	3	2	2	3	2	8	4	2
3.9	2	15	1	6	14	2	1	2	4	3	2
4.5	1	0	1	6	7	2	2	0	2	5	3
5.1	2	8	1	6	4	4	2	2	2	3	2
5.7	3	5	3	9	5	1	2	2	1	2	2
6.3	4	30	5	9	5	3	1	3	3	3	2
6.9	3	4	5	7	2	2	2	1	5	3	1
7.5	3	1	4	11	2	2	4	4	6	4	1
8.1	2	9	0	2	1	2	4	3	8	4	1
8.7	2	3	3	8	2	2	3	3	7	4	3
9.3	3	3	3	12	2	2	3	1	2	2	2
9.9	2	2	2	8	2	1	2	2	1	2	2
10.5	2	3	3	12	1	2	6	4	3	1	2
11.1	2	3	2	13	1	2	5	5	1	0	2
11.7	2	4	2	11	1	1	4	5	3	1	3
12.3	2	5	3	23	1	2	0	3	3	5	5
12.9	2	2	2	21	1	1	1	3	2	2	4
13.5	3	3	3	23	1	1	1	2	2	2	5
14.1	3	3	3	17	17	17			3	3	
14.7	2	2	2						2	2	
15.3	2	2	2						2	2	
15.9	2	2	2						1	1	
16.5	3	3	3						2	2	
17.1	3	3	3						2	2	
17.7	3	3	3						1	1	
18.3	3								2	2	
18.9									2	2	
19.5									2	2	
20.1									2	2	
20.7									2	2	
21.3									3	3	
21.9									2	2	

Tabla 5.c.3. Contenido de agua en las pruebas realizadas a los sondeos de la margen izquierda del río Carrizal



# ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO Y GEOTÉCNICO DEL CORRIMIENTO DE LAS MÁRGENES DEL RÍO CARRIZAL

Profundidad	SM01CI	SM02CI	SM03CI	SM04CI	SM24CI	SM25CI	SM26CI	SM27CI	SM05CI	SM07CI	SM40CI	SM11CI	SM23CI	SM16CI	SM15CI	SM17CI	SM18CI	SM19CI
0.3		16.6	20.8	3.4		30.6	15.3	11.9	5.6	35.9	7.2			23.3	6.7	11.7	10.8	28.9
0.9	33.1	19.9	35.2	4.9	40.6	34.6	28	24.9	20.8	39.1	10.5	15	29.8	25.6	26.3	20.6	33.3	27
1.5	36.2	22	35	24.3	43.6	25.9	16.2	39.5	33.5	37.9	29.6	32.4	29.3	33.8	28.5	34.4	31	24.1
2.1	40.3	24.1	39.2	36.5	51.6	29.8	24.3	42.3	35.8	49.7	18	30.1	32.5	34.8	37	34.9	34.9	30.5
2.7	37.8	25.9	42	35.9	39.3	44.4	39.2	40.3	39.8	48.4	21.4	40.2	37.1	33.7	30.5	27.3	38.3	34.5
3.3	46.3	28.5	46.3	39.9	47.8	37	40.6	48.5	42.1	41.4	41.8	42.1	43.4	38.5	33.5	37.8	50.8	35.7
3.9	48.4	37.1	50.4	39	40.4	36.3	44.1	57.3	55.9	43.7	39.4	51.2	37.5	41.9	35.3	54.2	57.4	43.3
4.5	49.6	38.1	32.4	35.3	48.4	35.6	30.4	54.3	39.5	37.1	33.8	46.9	37.5	69.3	56	46.5	48.3	34.6
5.1	52.2	36.3	35.4	39.8	38.7	43.9	34.2	50.5	57.6	37.8	34.6	51.2	42.6	58		40.6	52.6	46
5.7	58.3	45.4	61.4	53.6	42.6	49.6	40	55.9	60.8	31.2	34.2	46.3	36	62.5	37.5	40.3	39.7	32.3
6.3	35.2	46.6	59.8	42.1	28.7	50.3	24.9	49.8	53.6	36.1	34.3	48	29.2	54.8	58.5	57.7	66.9	31.4
6.9	32.2	35.3	40.8	43.8	43.3	48	24.5	42.6	44.2	42	37.4	46.6	30.8	50.1	51.6	37.3	54.1	43.1
7.5	64.7	39.8	40	42.5	64	44.5	20.1	48.3	41.9	45	28	36.9	31.1	37.8	78.8	42.9	47.1	44.6
8.1	44.9	34.1	41.7	48	68.2	38.1	24.7	55.6	41.4	44.2	39.8	29.6	28	33.2	48.2	43.5	50.4	35.3
8.7		43.9	71.6	30	57.2	56.4	30.3	45.3	37.6	50.3	53.5	34.3	30.6	44.2	59	40	60.2	37.6
9.3		31	25.6	34.1	55.5	81.7	29.1	89.1	51.9	65	38.1	34.5	25.7	51.5	48.1	40.6	57.1	30
9.9		30.9	28.9	35.4	58.8	39.3	24.3	51.8	47.3	32.5	52.6	44		166.6	57.8	28	49.6	36.9
10.5		29.3	35.3	27.8	92.4	43	20.8	43.6	33.6	39.3	41.3	47		99	81.2	47.4	47.8	38.3
11.1		29.2	35.8	33	73.7	47.7	24.1	38.9	34.7	34.8	62.6	74		172.6	259	49.5	47.9	41.4
11.7			32.4	35	324.3	54.4	20.9	37.6	42.8	28.3	45.7	56.9		160.4	653.4	124.6	146	56.4
12.3			17.2	43.5	332.4	56.2	24.5	46.3	40.5	33.4	118.1	58.2		159.4	253.9	190.1	250	43.7
12.9			26.1		33.7	58	24.4	62.9	51	33.6	47				38.4	190	305	78.1
13.5			20		50.5	58	27.6				53.3						187.9	55.9
14.1			22.5		49.5	44.2	60.4											314.5
14.7			17.8		52.6	41.9	58.2											106.4
15.3			20.5		45.3	47.5	57.5											153.5
15.9			21		41.2	47	50.1											228.6
16.5			17.7		52.3	49.8	52.7											39.6
17.1					36.3	45.3	47.5											27.6
17.7							46.7											33.4
18.3																		29
18.9																		30.8
19.5																		32.4
20.1																		36.8
20.7																		26.2
21.3																		28.3
21.9																		42.5

*Handwritten signature or initials.*

**Tabla 5.c.4. Resultados de la cohesión a través de pruebas TXUU realizadas a los sondeos inalterados en la margen izquierda del río Carrizal**

Sondeo	Cad	Profundidad	Cohesión Kg/cm <sup>2</sup>
SM01CI	20+019	4.2	0.3
	20+019	7.2	0.35
SM02CI	23+139	6	0.29
	23+139	8.4	0.21
SM03CI	25+042	14.4	0.8
SM04CI	33+721	6	0.4
	33+721	11.4	0.3
SM24CI	35+087	7.2	0.21
SM25CI	35+178	9.6	0.41
SM27CI	41+529	14.4	0.3
SM07CI	48+539	14.4	0.21
SM40CI	51+101	5.6	0.3
	51+101	14.6	0.36
SM11CI	53+347	8.4	0.26
	53+347	11.4	0.46
SM15CI	57+809	6.6	0.25
	57+809	10.2	0.4
SM17CI	58+375	4.2	0.25
	58+375	9	0.29
SM18CI	58+431	6	0.2
	58+431	12	0.39
	58+431	19.8	0.31
SM19CI	58+651	4.2	0.22
	58+651	12	0.62

**Tabla 5.c.5. Resultados de la cohesión a través de pruebas TXUU realizadas a los sondeos inalterados en la margen izquierda del río Carrizal**

Sondeo	Cad	Profundidad	Cohesión Kg/cm <sup>2</sup>
SM06CD	42+721	7.2	0.2
SM28CD	43+383	19.8	0.55
SM12CD	43+411	4.2	0.25
	43+411	9	0.55
SM09CD	54+609	10.2	0.32
	54+609	14.4	0.35
SM14CD	56+491	4.8	0.21
	56+491	8.4	0.35
	56+491	14.4	0.23
SM13CD	56+615	7.8	0.32
	56+615	14.4	0.25
SM20CD	59+091	9.6	0.38
SM21CD	59+110	6	0.31
	59+110	10.2	0.32
SM22CD	59+357	5.4	0.4

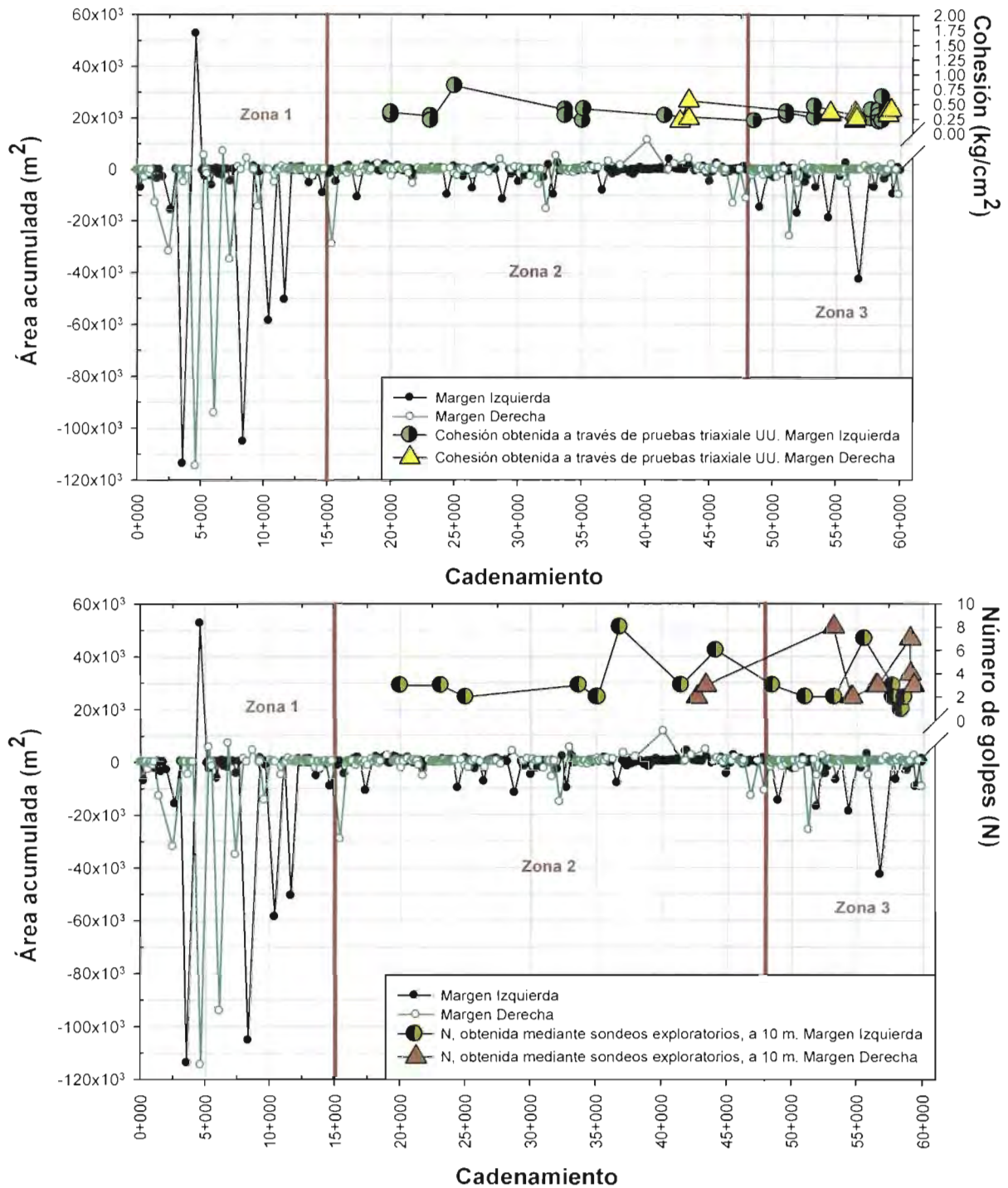


Figura 5.c.27. Áreas de erosión y depósito vs a la izquierda valores del número de golpes obtenidos mediante la exploración geotécnica. A la derecha valores de cohesión obtenidos mediante pruebas triaxiales UU (no consolidadas no drenadas)

### Comentarios finales

Se presenta una aplicación de los Sistemas de Información Geográfica para estudiar el comportamiento histórico del río Carrizal, con el fin de encontrar parámetros importantes que, de una forma general, permitan establecer algunos de los problemas que se presentan en este río, con miras a establecer los estudios adecuados para mejorar el comportamiento de las obras de protección marginal y contra inundaciones, mismas que constituyen un pilar importante para satisfacer la demanda de seguridad contra las avenidas en la ciudad de Villahermosa, Tabasco, México. El periodo de tiempo estudiado corresponde a los años 2000 y 2007.

Específicamente se encontró que las mayores tasas de erosión, de 16 m/año, se encuentran en los primeros kilómetros del río Carrizal, donde existe un mayor gradiente hidráulico.

Con base en la gráfica de áreas de erosión y depósito, fue posible identificar, morfológicamente, tres zonas con diferente potencial al corrimiento del río. En la primera zona se presenta un gran movimiento del río caracterizada por meandros no bien definidos y con cantidades importantes de islas dentro del cauce. En esta zona el suelo es predominantemente arenoso. La segunda zona está constituida por suelos limoarenosos con cierta estabilidad al corrimiento. En la zona 3 se observa un pequeño aumento en las áreas de erosión, representando un pequeño aumento en la capacidad de erosión del río Carrizal. Es en esta zona en donde se encuentra la ciudad de Villahermosa y en donde se han construido varias obras de defensa de orillas.

El análisis del ancho del río arroyo que en la zona urbana de la ciudad de Villahermosa, el ancho se incrementó en un 35% al año 2007, mientras que en la porción restante del río se mantuvo estable.

La evaluación del fondo del cauce permitió identificar zonas con profundizaciones acentuadas, es decir, descensos bruscos del fondo originados por erosiones locales principalmente en el extradós de meandros y bajo los puentes carreteros.

Con respecto a la relación ( $r/b$ ), se pudo notar que se encuentran comprendidas entre 2 y 8 y disminuyeron al año 2007. En la zona 3 se encontraron las menores relaciones  $r/b$ , condición que puede deberse a la confluencia de este río con el río Grijalva.

Al analizar las características hidráulicas del río Carrizal, se encontró que la variación de niveles como producto de las condiciones aguas abajo del río, varían significativamente incluso hasta la estación hidrométrica González. Es necesario verificar si la velocidad o magnitud de las variaciones afecta significativamente la estabilidad del suelo de las márgenes.

Geotécnicamente, la conclusión más importante consiste en afirmar que el suelo de la margen del río Carrizal trabajosamente soporta los bordos de protección contra inundación y que cualquier protección adicional contra erosión fluvial, por ligera que parezca, constituye una sobrecarga importante que podría poner en riesgo la estabilidad de la margen. Además, debido a que no se encontró ninguna relación entre el número de golpes ( $N$ ) y la cohesión, se hace imposible, a esta escala, determinar la influencia del tipo de suelo en las fallas de las márgenes del río. De las pruebas de laboratorio realizadas a las muestras obtenidas mediante los sondeos geotécnicos, se concluyó que el suelo de las márgenes del río Carrizal está constituido por estratos de limo, arena y arcilla, formando un suelo blando y con baja capacidad de carga, lo que impide, en algunas ocasiones, soportar el peso de las protecciones marginales.

VF

Es necesario realizar análisis de estabilidad considerando los escenarios posibles, incluyendo las condiciones de socavación y las variaciones en descenso del nivel del agua para verificar si estos factores son suficientes para que exista falla, ya sea bajo condiciones naturales y aquellas que se producen con la construcción de las obras de protección marginal y contra inundaciones. Por otro lado, comprobar la existencia de suelos dispersivos podría representar un factor influyente en la falla de dichas obras.

#### d) ESTIMACIÓN DE LA TASA ANUAL DE EROSIÓN MARGINAL A PARTIR DE LA OPERACIÓN DEL MACAYO

De acuerdo con los estudios realizados en el Instituto de Ingeniería, UNAM, por el Dr. José Antonio Maza (Maza, 1968) la socavación en cauces, en algunos casos llamada también erosión debida flujo de agua, se calcula como se verá a continuación, su análisis está basado en el criterio de cálculo propuesto por Lischtvan-Labediev, para determinar la socavación general cuando es producida por una avenida.

El análisis se llevó a cabo considerando el flujo de agua para la capacidad máxima de los bordos y posteriormente para la política de operación de la estructura de control el Macayo.

##### *Calculo de la socavación en cauces homogéneos*

El cálculo de la socavación general parte de un análisis previo en el cual se considera que el cauce llega a un estado de equilibrio después de la socavación por lo que la velocidad en esta condición será la velocidad media. Si se sabe que la velocidad de erosión es la que se necesita para que una partícula de suelo inicie su movimiento, se tendrá para un estado de equilibrio que:

$$V_e = V$$

Siendo la velocidad de erosión para suelos cohesivos

$$V_e = 0.60 \gamma_s^{1.18} \beta H_s^x$$

Y para suelos granulares

$$V_e = 0.68 d_m^{0.28} \beta H_s^x$$

donde

$\gamma_s$  peso volumétrico del material cohesivo seco que se encuentra a la profundidad  $H_s$  ( $\text{ton}/\text{m}^3$ )

$\beta$  coeficiente de paso que depende de la frecuencia con que se repite la avenida y cuyo valor aparece en la tabla 5.d.1.

$H_s$  tirante considerado, a cuya profundidad se desea conocer el valor de  $V_e$  para arrastrar y levantar el material

$x$  exponente variable que está en función del peso volumétrico del material seco el cual se puede leer en la tabla 5.d.2.

$d_m$  diámetro medio de las partículas de suelo granular

**Tabla 5.d.1. Valores del coeficiente  $\beta$ , (Maza, 1968)**

PROBABILIDAD (%), DE QUE SE PRESENTE EL GASTO DE DISEÑO	COEFICIENTE $\beta$
100	0.77
50	0.82
20	0.86
10	0.90
5	0.84
2	0.97
1	1.00
0.3	1.03
0.2	1.05
0.1	1.07

**Tabla 5.d.2. Valores de  $x$ ,  $1/1+x$ , para suelos cohesivos y no cohesivos, (Maza, 1968).**

SUELOS COHESIVOS			SUELOS COHESIVOS			SUELOS NO COHESIVOS			SUELOS NO COHESIVOS		
$\gamma_s$	$x$	$\frac{1}{1+x}$	$\gamma_s$	$x$	$\frac{1}{1+x}$	$d_m$	$x$	$\frac{1}{1+x}$	$d_m$	$x$	$\frac{1}{1+x}$
0.80	0.52	0.66	1.20	0.39	0.72	0.05	0.43	0.70	40.00	0.30	0.77
0.83	0.51	0.66	1.24	0.38	0.72	0.15	0.74	0.70	60.00	0.29	0.78
0.86	0.5	0.67	1.28	0.37	0.73	0.50	0.41	0.71	90.00	0.28	0.78
0.88	0.49	0.67	1.34	0.36	0.74	1.00	0.40	0.72	140.00	0.27	0.79
0.90	0.48	0.67	1.40	0.35	0.74	1.50	0.39	0.72	190.00	0.26	0.79
0.93	0.47	0.68	1.46	0.34	0.75	2.50	0.38	0.73	250.00	0.25	0.80
0.96	0.46	0.68	1.52	0.33	0.75	4.00	0.37	0.74	310.00	0.24	0.81
0.98	0.45	0.69	1.58	0.32	0.76	6.00	0.36	0.74	370.00	0.23	0.81
1.00	0.44	0.69	1.64	0.31	0.76	8.00	0.35	0.75	450.00	0.22	0.83
1.04	0.43	0.70	1.71	0.3	0.77	10.00	0.34	0.75	570.00	0.21	0.83
1.08	0.42	0.70	1.80	0.29	0.78	15.00	0.33	0.75	750.00	0.20	0.83
1.12	0.41	0.71	1.89	0.28	0.78	20.00	0.32	0.76	1000.00	0.19	0.84
1.16	0.4	0.71	2.00	0.27	0.79	25.00	0.31	0.76			

La probabilidad de que se presente el gasto de diseño ligada al periodo de retorno se elige con base en la zona por proteger como se muestra en la tabla 5.d.3.

**Tabla 5.d.3. Período de retorno de acuerdo con la zona por proteger, (Fuentes, 1999).**

VF

<i>Características de la zona por proteger</i>	<i>Tr (Años)</i>
Parcelas agrícolas sin posibles pérdidas de vidas humanas	5
Distritos de riego, sin riesgo de pérdidas de vidas humanas	25
Zonas agrícolas poco pobladas	50
Zonas agrícolas con poblados	100
Zona industrial y urbana	500
Zona densamente poblada	1000
Ciudades	1000

La velocidad media se presenta para condiciones estables en el cauce ya sea antes de la socavación o después de ésta. De acuerdo con el principio de continuidad, la velocidad real puede expresarse como

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$Q = VA$$

Donde

$Q$  gasto

$V$  velocidad

$A$  área de la sección

Para el caso de los ríos, si se toma una franja  $Be$  de la sección transversal del río como se muestra en la figura 5.d.1, la variación de la velocidad media (después de la socavación) será

$$\Delta Q = V_r H_s B e$$

$$V_r = \frac{\Delta Q}{H_s B e}$$

Por otra parte de la ecuación de Manning

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

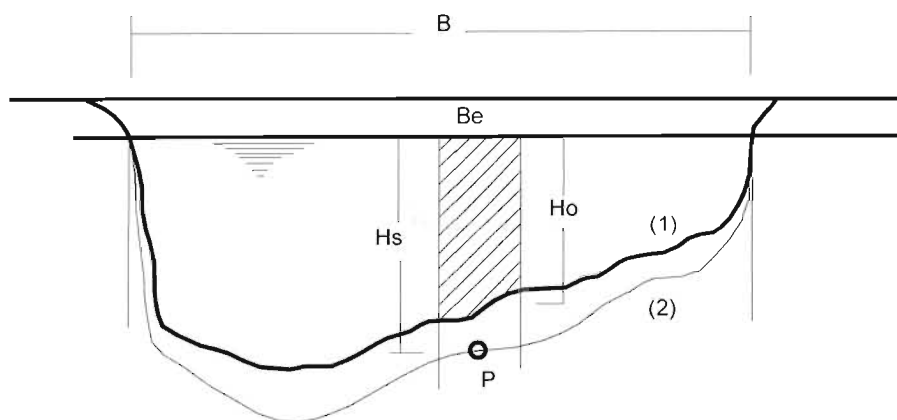


Figura 5.d.1. Variables para el cálculo de  $V_r$ , (Maza, 1968)

Con la expresión anterior es posible calcular el gasto de diseño, Maza también propone utilizar un coeficiente  $\alpha$  que se encuentre en función del tirante medio del río (área hidráulica efectiva entre el ancho total del espejo de agua  $B$ )

$$\alpha = \frac{1}{n} = \frac{Q_d}{AR_h^{2/3}}$$

$$Q_d = \alpha AR^{2/3}$$

Si se desea conocer un diferencial de gasto medio  $\Delta Q$  en una sección de tramo  $B_e$  y tirante inicial  $H_0$

$$A = H_0 B_e$$

El radio hidráulico está definido como

$$R = \frac{A}{P_m}$$

$$P_m \approx B_e$$

$$R_H = \frac{H_0 B_e}{B_e} = H_0$$

$$\Delta Q = \alpha H_0^{5/3} B_e$$

$$\alpha = \frac{\Delta Q}{H_0^{5/3} B_e} \quad [5.d.1]$$

De esta forma al igualar los gastos de la condición real con la condición media se tiene

$$\Delta Q = \alpha H_0^{5/3} B_e = V_r H_s B_e = \Delta Q$$

Con lo cual la velocidad real de la corriente queda expresada de la forma siguiente

$$V_r = \frac{\alpha H_0^{5/3}}{H_s}$$

Al igualar las velocidades y despejar de ellas el tirante después de la socavación se obtiene la expresión con la que es posible calcular dicho tirante.

Para cauces cohesivos

$$0.60 \gamma_s^{1.18} \beta H_s^x = \frac{\alpha H_0^{5/3}}{H_s}$$

Para cauces granulares

$$0.68 d_m^{0.28} \beta H_s^x = \frac{\alpha H_0^{5/3}}{H_s}$$



$$H_s^x = \frac{\alpha H_0^{5/3}}{H_s 0.60 \gamma_s^{1.18} \beta}$$

Para cauces granulares

$$H_s^x = \frac{\alpha H_0^{5/3}}{H_s 0.68 d_m^{0.28} \beta}$$

$$H_s^{1+x} = \frac{\alpha H_0^{5/3}}{0.60 \gamma_s^{1.18} \beta}$$

$$H_s^{1+x} = \frac{\alpha H_0^{5/3}}{0.68 d_m^{0.28} \beta}$$

De esta manera la expresión para calcular la profundidad de socavación será para cauces cohesivos

$$H_s = \left( \frac{\alpha H_0^{5/3}}{0.60 \gamma_s^{1.18} \beta} \right)^{\frac{1}{1+x}} \quad [5.d.2]$$

Y para cauces granulares

$$H_s = \left( \frac{\alpha H_0^{5/3}}{0.68 d_m^{0.28} \beta} \right)^{\frac{1}{1+x}} \quad [5.d.3]$$

### *Cálculo de la socavación en cauces heterogéneos*

El cálculo de la socavación para cauces con estratos puede efectuarse de 2 maneras, una de ellas es graficando las velocidades de erosión obtenidas a cada profundidad para cada uno de los estratos y graficando a la vez la velocidad real también para cada estrato y cada profundidad, el punto en donde se intersequen las curvas corresponde a la socavación esperada.

El otro método, utilizado en el presente trabajo; consiste en hacer tanteos. Se calcula la erosión para el primer estrato si la erosión obtenida se ubica por debajo de este estrato se realiza el cálculo nuevamente pero con las características del estrato siguiente si la socavación calculada vuelve a ubicarse por debajo de este estrato se prosigue el cálculo con el estrato siguiente hasta que la socavación calculada se ubique dentro del estrato de análisis. Este cálculo se realiza para diferentes puntos en la sección transversal del cauce.

### *Socavación en Ríos con cauces irregulares y material heterogéneo*

Los ríos con cauces errantes, son ríos irregulares que presentan islas que dividen el cauce y se encuentran distribuidas de forma muy irregular, estas islas llegan a dividir el río en dos, tres o más corrientes y pueden estar formadas por arena grava y boleo. Para los ríos irregulares, Maza (1968), Maza propone utilizar la profundidad máxima  $H_{max}$  medida y sustituirla en la fórmula 5.d.1, Por otro lado para cauces errantes propone considerar una velocidad  $V_C$ , en lugar de la velocidad de erosión  $V_e$ , como se ha considerado para el cálculo de cauces definidos.

$$V_c = V_{cl} H_s^{0.20}$$

donde  $V_c$  Velocidad necesaria para causar la erosión en cauces no definidos

$V_{cl}$  velocidad no erosionable máxima en m/s, cuando el tirante es de 1m. Su valor depende del material de fondo, y se obtiene de la tabla 5.d.4 en la columna correspondiente a una profundidad media de 1 m.

$H_s$  tirante de socavación

De un análisis análogo al de cauces definidos se tiene lo siguiente

$$V_c = V_r$$

$$V_{cl} H_s^{0.20} = \frac{\alpha H_0^{5/3}}{H_s}$$

$$H_s^{0.20} H_s = \frac{\alpha H_0^{5/3}}{V_{cl}}$$

$$H_s^{1.20} = \frac{\alpha H_0^{5/3}}{V_{cl}}$$

$$H_s = \left( \frac{\alpha H_0^{5/3}}{V_{cl}} \right)^{\frac{1}{1.20}}$$

Finalmente para el cálculo de la erosión en cauces irregulares se tiene

$$H_s = \left( \frac{\alpha H_0^{5/3}}{V_{cl}} \right)^{0.833} \quad [5.d.4]$$

**Tabla 5.d.4 Velocidades medias de la corriente del agua que son admisibles (no erosivas) para suelos cohesivos en m/s, (Maza, 1968).**

DENOMINACIÓN DE LOS SUELOS	PORCENTAJE DEL CONTENIDO DE PARTÍCULAS		SUELOS POCO COMPACTOS, PESO VOLUMÉTRICO DEL MATERIAL SECO HASTA 1.66 ton/m <sup>3</sup>				SUELOS MEDIANAMENTE COMPACTADOS, PESO VOLUMÉTRICO DEL MATERIAL SECO 1.20 A 1.66 ton/m <sup>3</sup>				SUELOS COMPACTOS, PESO VOLUMÉTRICO DEL MATERIAL SECO DE 1.66 A 2.04 ton/m <sup>3</sup>				SUELOS MUY COMPACTOS, EL PESO VOLUMÉTRICO DEL MATERIAL SECO DE 2.04 A 2.14 ton/m <sup>3</sup>			
	< 0.0005,	0.005-0.05	0.4	1	2	3	0.4	1	2	3	0.4	1	2	3	0.4	1	2	3
PROFUNDIDADES MEDIAS DE LA CORRIENTE EN m																		
ARCILLAS Y TIERRAS FUERTEMENTE ARCILLOSAS	30-60,	70-50	0.35	0.4	0.45	0.5	0.7	0.85	0.95	1.1	1	1.2	1.5	1.4	1.4	1.7	1.9	2.1
	20-30,	80-70																
TIERRAS LIGERAMENTE ARCILLOSAS	10 -20,	90-80	0.35	0.4	0.45	0.5	0.65	0.8	0.9	1	0.95	1.2	1.4	1.5	1.4	1.7	1.9	2.1
SUELOS DE ALUVIÓN Y ARCILLAS MARGOSAS							0.6	0.7	0.8	0.85	0.8	1	1.2	1.3	1.1	1.3	1.5	1.7
TIERRAS ARENOSAS	5-10,	20-40	SEGÚN LA TABLA DE VELOCIDADES NO EROSIVAS PARA SUELOS NO COHESIVOS															

### *Características fluviales*

Para llevar a cabo el análisis a lo largo del Río carrizal se obtuvieron secciones a cada kilómetro a partir de la estructura de control "El Macayo". Los primeros 29 kilómetros se calcularon con la batimetría obtenida en el año 2000 proporcionada por CONAGUA de la cual pudo observarse que se trata de un cauce errante de tipo irregular, por lo que la socavación para estos primeros 29 kilómetros se calculó como se describió en el subtema anterior.

Para efectuar el cálculo de la socavación para los cadenamientos 30+000 al 60+000 se utilizó la información obtenida de sondeos realizados directamente en el cauce.

Uno de los factores que intervienen para el cálculo de la socavación es el área, la cual debe corresponder al gasto para el cual se está realizando el análisis, en nuestro caso se analiza para dos condiciones,  $Q=800 \text{ m}^3/\text{s}$  correspondientes al gasto de operación de la estructura de control y  $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$  gasto máximo que puede conducir el cauce. Las elevaciones a las que llega el claro de agua para cada gasto se obtuvieron según CONAGUA-IINGEN (2008), las áreas  $A$  y anchos de superficie libre del agua resultantes se muestran en el Anexo 5.d.1

Considerando que el análisis corresponde a una zona densamente poblada se tiene de la tabla 5.d.3 un período de retorno  $T_r$ , correspondiente a 1000 años, por lo que la probabilidad de que se presente el gasto  $Q_d$ , es de 0.1 y el valor de  $\alpha$  es de 1.07 de acuerdo con la tabla 5.d.1

### *Características geotécnicas y geomorfológicas del cauce*

Para poder hacer el cálculo de la socavación se supuso que para los primeros 17 kilómetros se pueden utilizar los resultados del sondeo realizado en las margen derecha para la estructura de control El Macayo obtenidos del informe titulado "Estudio de las protecciones y márgenes inestables de los Ríos Carrizal, Usumacinta, La Sierra y Grijalva" CONAGUA-IINGEN (2010), de la misma forma se supuso que la información obtenida del sondeo realizado en el año 1999 para el kilómetro 17 es válida para los kilómetros del 18 al 29.

Las características geotécnicas utilizadas para el cálculo de la socavación de las secciones 30 a la 60 se obtuvieron de la información del informe CONAGUA-IINGEN (2010), eligiendo los sondeos más cercanos al punto en estudio. Cabe señalar que los sondeos son representativos en un radio de 250 metros a partir del punto de muestreo, por lo que para tener resultados más confiables se recomienda llevar a cabo sondeos en cada uno de los puntos de interés y que estos se realicen para una profundidad mínima de 20 m.

De la información antes mencionada se encontró que el material de este es predominantemente cohesivo, por lo que se su socavación se calculará para este tipo de material.

Los primeros 29 kilómetros del cauce presentan forma irregular e islas que dividen la corriente principal (ver figura 5.d.2), por lo que el cálculo de la socavación para estos kilómetros se realizó como se describe en el subtema titulado socavación en ríos con cauces irregulares y materiales heterogéneos. Del kilómetro 30 al 60 se utilizó el método de cálculo para cauces definidos.



**Figura 5.d.2 Zonas irregulares en el Cauce del Río Carrizal aguas abajo de la estructura de control El Macayo.**

De los valores del peso específico del material de cada sección asociado a la profundidad de cada estrato puede conocerse el valor de  $\frac{1}{1+x}$  que está en función de dicha variable. (Ver anexo 5.d.2)

Para el cálculo de las socavaciones se elaboraron 2 programas, uno para los primeros 29 kilómetros y otro para el resto de ellos, los resultados pueden observarse en el anexo 5.d.3.

#### *Resultados del análisis de socavación*

Del cálculo de las socavaciones se observaron como las zonas más desfavorables las que se tenían en las zonas de meandros y en las zonas con estructuras, sobre todo a partir de la sección 30+000 en donde el cauce se vuelve más angosto mantiene una configuración definida.

En los primeros 29 kilómetros solo se observaron socavaciones considerables solo en los cadenamientos 3, 4, 6, 8, 9, 11, 14, 23, 25. Las socavaciones más desfavorables se observaron en los cadenamientos 3+000, 6+000 y 25+000 presentando socavaciones de 6.3, 5.33 y 7.4 respectivamente (ver figura 5.d.3).

En las primeras 29 secciones donde el cauce se consideró un cauce irregular, se observó que para un gasto de 800 m<sup>3</sup>/s podían esperarse socavaciones más grandes que las esperadas para un Q=1000 m<sup>3</sup>/s esto es debido a que las secciones que ocupan un gasto menor son secciones pequeñas que incluyen las zonas de talweg con mayor profundidad y con ancho de superficie libre angosto. Cuando el gasto aumenta, la sección del río que se ocupa aumenta y abarca un mayor ancho de superficie libre y las velocidades bajan al tratarse de un cauce más ancho por lo que la socavación es menor.

El perfil de socavaciones así como su ubicación en planta a partir del kilómetro 30+000 se muestran en la figura 5.d.4. Se presentó una profundidad de socavación con valor de 16.6 m en el cadenamiento 59+000 ubicado aguas abajo del puente del Río La Pigua para una avenida de Q=1000 m<sup>3</sup>/s, mientras la socavación para este mismo punto con un Q= 800 m<sup>3</sup>/s fue de 14.4 m. Las socavaciones en el puente del periférico llegaron a los 11.7 m con un Q=1000 m<sup>3</sup>/s y a 7.2 m para un Q=800 m<sup>3</sup>/s. En la sección 43+000 correspondiente a un puente y zona de meandro a la altura del paseo Usumacinta se obtuvieron socavaciones de 6.9 y 10.6 m para Q=800 m<sup>3</sup>/s Q =1000m<sup>3</sup>/s respectivamente.

Las profundidades de socavación promedio para un Q=800 m<sup>3</sup>/s es de 4.6 m mientras que para un Q=1000 m<sup>3</sup>/s resultó de 6.6 m.

*VJF*

La geometría inicial y final de los bordos y el cauce pueden observarse en el anexo 5.d.4.

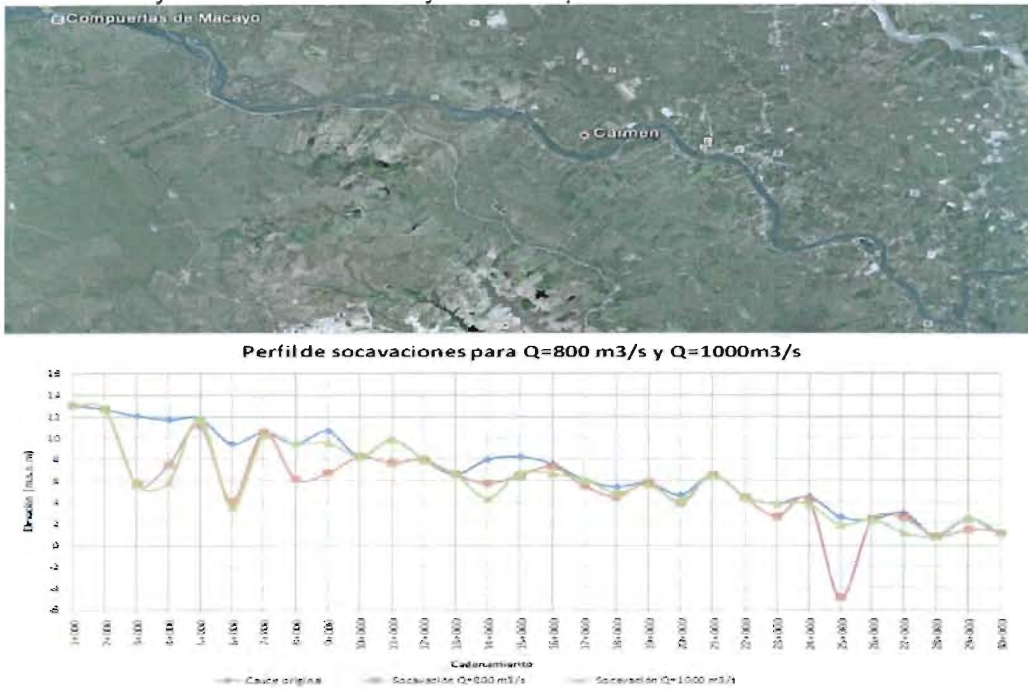


Figura 5.d.3 Perfil de socavaciones del cadenamiento 1+000 al 29+000

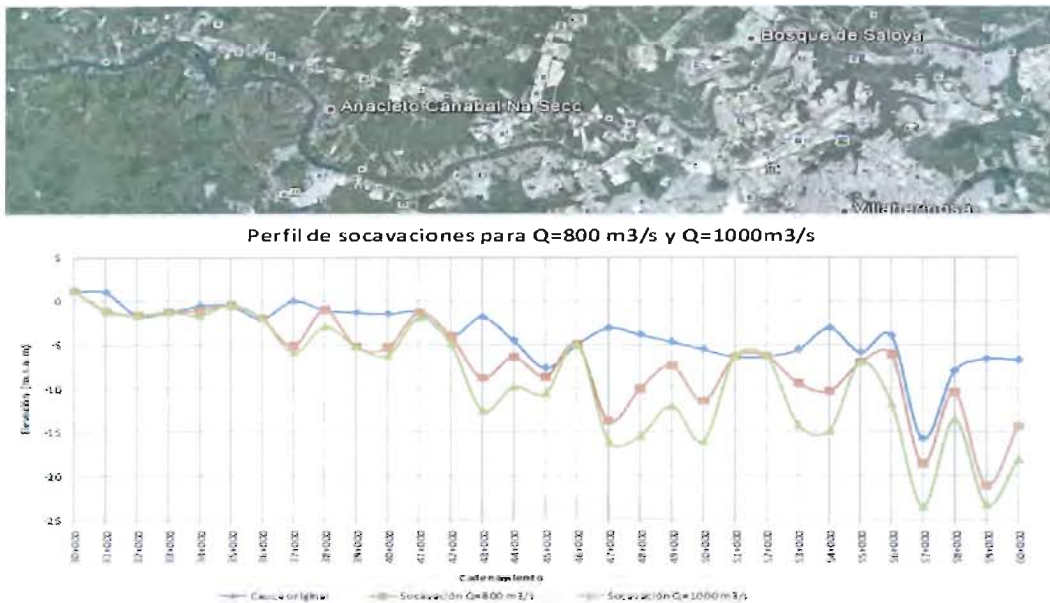


Figura 5.d.4 Perfil de socavaciones del cadenamiento 30+000 al 60+000

#### Análisis de flujo interno y deslizamiento en bordos

Dentro de las fallas por estabilidad que se presentan en los tipos de fallas que se presentan son debidas a

- Deslizamientos de taludes de tipo curvo o lineal

- Pérdida de capacidad de carga
- Fallas por movimiento del agua

Las fallas debidas al deslizamiento de taludes son producto de la variación y movimiento del agua, pueden analizarse de acuerdo con su forma de falla, que puede ser circular y analizarse por los métodos de Jambú, Fellenius, Taylor, Método Sueco, entre otros.

La mayoría de los métodos de análisis proponen una superficie de falla circular y dividen esta sección en dovelas, como es el caso del método de Jambú o de Bishop; El método de Morgenstern Price por el contrario parte de un análisis en el cual la superficie de falla no se asemeja a una superficie circular, supone simplemente una trayectoria curva. A continuación se presentan estos últimos 3 criterios de análisis y las condiciones para las que se utilizan.

### Método de Morgenstern-Price

Este método parte del análisis realizado por Spencer quien supone una trayectoria de falla curva. Su análisis se hace también dividiendo esta sección en dovelas, como se muestra en la figura 5.d.5

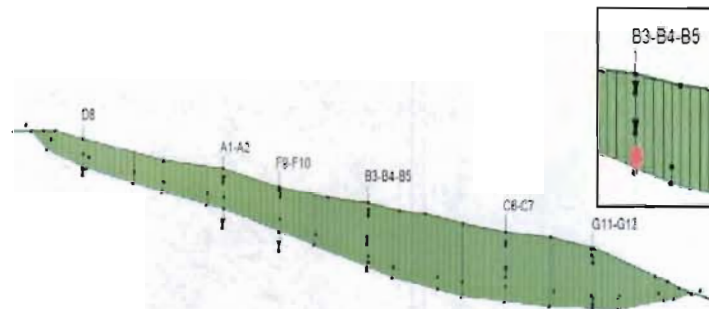


Figura 5.d.5. Sección de deslizamiento no circular dividido en dovelas (UPC, 2002-2004).

En cada dovela se analizan las fuerzas actuantes como puede observarse en la figura siguiente (ver figura 5.d.6)

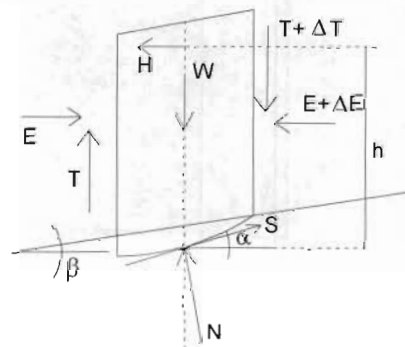


Figura 5.d.6 Análisis de fuerzas para el método de Spencer, (UIS, 2001).

De acuerdo con la figura 5.d.6 se tiene para un equilibrio de momentos lo siguiente

$$\sum \left[ \left( E + \frac{1}{2} \Delta E \right) \tan \alpha - \left( T + \frac{1}{2} \Delta T \right) \right] * a + \sum H * h = 0$$

El factor de seguridad que debe cumplir es

$$F = \frac{\sum [(W + \Delta T - U * a + V) \tan \varphi + c * a] * m}{\sum (W + V + \Delta T) \tan \alpha + R_H}$$

$$m = \frac{1}{\cos^2 \alpha} \left( \frac{\gamma_R}{\gamma_R + \tan \alpha * \tan \varphi} \right)$$

$c$  cohesión

$\varphi$  ángulo de fricción interna

$a$  ancho de cada dovela

$\alpha$  pendiente media del fondo de la dovela

$W$  peso de la dovela

$T$  tensión entre las caras verticales de las dovelas

$\Delta T$  desequilibrio de las fuerzas tangenciales entre ambas caras verticales de la dovela

$R_H$  resultante de las fuerzas horizontales actuando por el talud

$V$  Resultante vertical de todas las acciones en la dovela.

Estas ecuaciones se resuelven con base en iteraciones proponiendo valores de  $\Delta T$ . Spencer supone un ángulo delta  $\delta$ , con un valor constante en función de  $T$  y  $E$

$$\tan \delta = \frac{T}{E}$$

Esta suposición solo se cumple si la integral de línea de un vector  $\bar{R}$  que pasa por la línea de deslizamiento es igual al momento de las fuerzas horizontales aplicadas a la dovela.

$$\oint R \sin (\delta - \alpha) dl = \sum Hh$$

Siendo  $R$  la resultante de  $E$  y  $T$

$$R = \sqrt{E^2 + T^2}$$

En algunas ocasiones el ángulo  $\delta$  llega a ser muy alto, lo que puede ser debido a que las fuerzas aplicadas en horizontalmente en sentido desfavorable sean demasiado altas, si el ángulo de fricción interna del material es muy alto, los valores elevados de  $\delta$  pueden sobreestimar la resistencia al pie de la línea de rotura, lo que hace vulnerable al método de Spencer, sobre todo en las dovelas en las que el valor de  $\alpha$  es negativo.

Para minimizar este factor Morgenstern-Price propone lo siguiente:

$$\tan \delta = \lambda * f(x)$$

donde

$\lambda$  es una contante que cumple garantiza que se cumplan las condiciones de equilibrio

$x$  abscisa de acuerdo con un eje horizontal de referencia

$f(x)$  es una función a especificar por el usuario, en el método de Spencer  $f(x)=1$ .

El valor de  $\lambda$  se debe terminar con base en la ecuación que se muestra a continuación

$$\lambda = \frac{\sum Hh + \oint E * \tan \alpha * dx}{\oint f(x) * E * dx}$$

Al resolver las integrales de línea se pueden tener problemas de convergencia si se tienen valores negativos para  $f(x)$  lo que anula el denominador de esta ecuación. Una alternativa consiste en no utilizar superficies de rotura con valores demasiado pequeños (fuertes valores negativos), esto ayuda a resolver el problema sin embargo limita las pendientes de salida de las líneas de rotura.

### Método de Jambú

Si se considera un talud homogéneo, para el cual las fallas ocurren al pie del talud, su factor de seguridad asociado a los círculos de falla queda representado de la forma siguiente:

$$F_s = \frac{N_e c}{\gamma_m H}$$

$H$  altura del talud

$c$  cohesión

$\gamma_m$  peso específico del material (suelo)

$N_e$  número de estabilidad que puede obtenerse de la figura 5.d.7, a través del parámetro

$$\lambda_{c\varphi} = \frac{\gamma H}{c} \tan \varphi$$

Cuyo valor puede leerse de la figura 5.d.8. Las figuras 5.d.7 y 5.d.8 permiten resolver el problema de una forma práctica, sin embargo, el problema puede resolverse a través de iteraciones sucesivas considerando además las fuerzas del estado tensorial de cada una de las dovelas, un análisis así resulta más completo y confiable, sin embargo requiere de la ayuda de herramientas computacionales para su desarrollo.





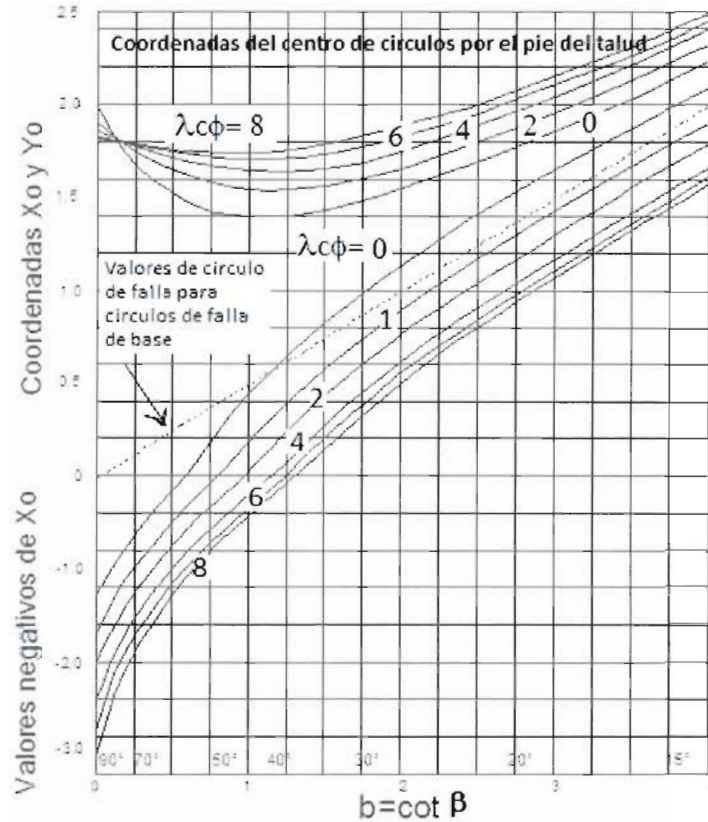


Figura 5.d.7 Coordenadas de los centros de círculos críticos por el pie de talud para método de Jambu, (Juárez, 1979).

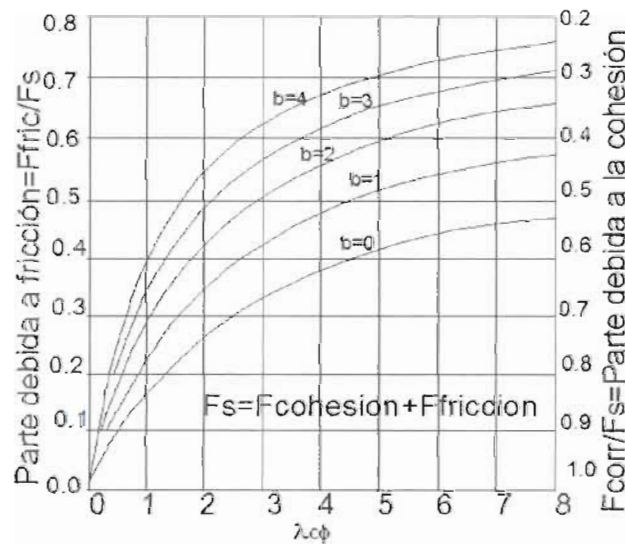


Figura 5.d.8 Contribución de la fricción y la cohesión al factor de seguridad para método de Jambu, (Juárez, 1979).

### Método de Bishop

El método de Bishop, supone una superficie deslizante circular dividida en Dovelas verticales, para las cuales considera las fuerzas de tensión, sin considerar la dirección ni sentido de estas ni la fuerza cortante.

Para cada dovela se dibujan las fuerzas actuantes, a partir de estas se realiza el análisis de estabilidad para cumplir las condiciones de equilibrio estático. Para este análisis las fuerzas actuantes son expresadas en sus componentes vertical y horizontal (ver figura 5.d.9).

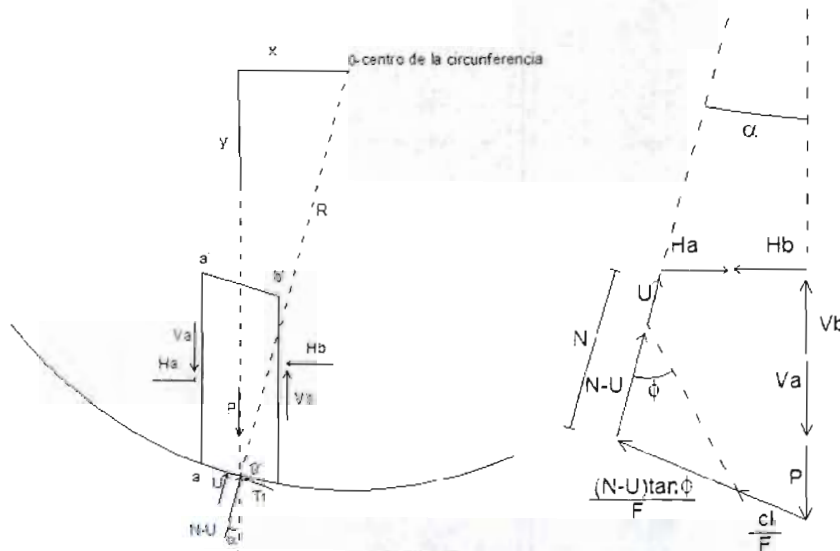


Figura 5.d.9 Fuerzas actuantes en las dovelas para el Método de Bishop, (UIS, 2001).

De esta manera, Bishop propone que para una dovela de longitud  $l$ , la fuerza tangencial se expresa de la siguiente manera:

$$\tau_r = \frac{cl}{F} + \frac{(N - U) \tan \varphi}{F}$$

donde

- $F$  coeficiente de seguridad
- $l$  longitud de la dovela en la zona de rotura
- $\tau_r$  fuerza tangencial resistente en la base deslizante
- $U$  presión de poro
- $N$  componente normal del peso de la dovela
- $\varphi$  ángulo de fricción interna

Considerando el eje X y el eje 0-0' se pueden considerar momentos respecto al centro de la circunferencia, por lo que las fuerzas normales se anulan, de la misma forma que sucede con las fuerzas  $H_a$ ,  $H_b$ ,  $V_a$ ,  $V_b$ . De esta manera las ecuaciones de equilibrio quedan expresadas

$$\sum N = \sum (P + V_a - V_b) \cos \alpha - \sum (H_a - H_b) \operatorname{sen} \alpha$$

$$\sum (P + Va - Vb) = \sum \left[ N \cos \alpha + \frac{(n - U) \tan \varphi}{F} \operatorname{sen} \alpha + \frac{cl}{F} \operatorname{sen} \alpha \right]$$

$$\sum (P * x) = \sum (P * R \operatorname{sen} \alpha) = \frac{R}{F} \sum [cl + (N - U) \tan \varphi]$$

Y en una sola ecuación

$$F = \frac{1}{\sum P \operatorname{sen} \alpha} \sum \frac{\left( \frac{P + Va + Vb}{\cos \alpha} - U \right) \tan \varphi + cl}{1 + \frac{\tan \alpha \tan \varphi}{F}}$$

Dado que las únicas incógnitas son Va-Vb y F; sabiendo que  $\Sigma(Va-Vb) = 0$  y que  $\Sigma(Ha-Hb) = 0$ , resulta

$$\sum \frac{(P + Va + Vb) \left( \frac{\tan \varphi}{F} - \tan \alpha \right) + \frac{cl - U \tan \varphi}{F \cos \alpha}}{1 + \frac{\tan \alpha \tan \varphi}{F}}$$

Para simplificar aun más la expresión considerando que el termino  $\sum \frac{(Va-Vb) \tan \varphi}{\cos \alpha} = 0$  que implicaría que los ángulos  $\varphi$  y  $\alpha$  fueran iguales entre si en todas las dovelas y diferentes de  $90^\circ$  se tiene

$$F = \frac{1}{\sum P \operatorname{sen} \alpha} \sum \frac{\left( \frac{P}{\cos \alpha} - U \right) \tan \varphi + cl}{1 + \frac{\tan \alpha \tan \varphi}{F}}$$

De la ecuación anterior se procede a hacer iteraciones hasta encontrar el valor de  $F$ , se puede comenzar el análisis con el método sueco para tener una idea de los valores que puede tomar  $F$ .

### Software para análisis de estabilidad

GeoSlope es una empresa que ha desarrollado un paquete llamado GeoStudio, este paquete incluye los siguientes programas

- SLOPE/W para el análisis de la estabilidad de taludes
- SEEP/W para calculo de redes de flujo y filtraciones
- SIGMA/W para calculo de tensiones y deformaciones de suelos sometidos a cargas
- QUAKE/W comportamiento de las estructuras ante sismos
- TEMP/W para analizar el efecto del calor en suelos
- CTRAN/W analiza la difusión de contaminantes en suelos
- VADOSE se utiliza para la modelación de acuíferos

Dentro de los programas anteriores el utilizado para conocer estabildades de talud es SLOPE/W con el que es posible calcular el factor de seguridad necesario para garantizar la estabilidad de taludes naturales o artificiales. Este Software permite analizar el talud bajo diferentes condiciones, características del suelo, ángulos de reposo, para diferentes tirantes,

etcétera; el programa SEEP/W permite analizar el comportamiento del agua en el terraplén y su cimentación.

En nuestro estudio, nos interesan las condiciones en las que trabaja y falla la estructura, así como las trayectorias que recorre el flujo en el interior del cuerpo del bordo, la ventaja que representa este programa es que es posible analizar los tipos de fallas para diferentes tirantes y diferentes configuraciones y características del material.

### **SLOPE/W**

El programa SLOPE/W permite realizar 12 tipos diferentes de análisis, con diferentes criterios.

1. Morgestern-Price
2. Spencer
3. Método General de Equilibrio Límite (GLE, General Limit Equilibrium Method)
4. Cuerpo de Ingenieros #1
5. Cuerpo de Ingenieros #2
6. Lowe-Karafiath
7. Jambú Generalizado
8. Sarma (Para taludes de 90°)
9. Método de Bishop ordinario y Jambú
10. Sigma/W Stess (Correspondiente al método de elementos finitos con el que fue diseñado el programa)
11. Quake/W Stress (Método de elementos finitos utilizado para calcular los efectos del sismo)
12. Quake/W Deformación de Newmark (Análisis sísmico basado en los estudios de Newmark)

De los métodos mencionados anteriormente los más comunes en Latinoamérica para este tipo de análisis son el método de Jambú, Bishop; el Morgenstern-Price este último representa una buena opción para llevar a cabo los análisis ya que los dos primeros no consideran el efecto de la fuerza cortante y este último incluye una función que relaciona las fuerzas cortantes con los momentos normales.

### **Uso y alimentación de SLOPE/W**

Seep/W permite conocer los factores de seguridad para múltiples círculos de falla en taludes, mostrando el más desfavorable. Su uso es relativamente sencillo y cuenta con herramientas que permiten exportar e importar geometrías a Autocad lo que facilita el trabajo. El Programa GeoSlope tiene la capacidad de generar proyectos que incluyan varios tipos de análisis por lo que puede realizarse un análisis de estabilidad de taludes y a la vez aplicar un análisis de flujo interno o de deformaciones para el mismo proyecto sin necesidad de crear otro proyecto.

Dentro de las características y tipo de análisis este programa permite elegir los criterios métodos que mejor se adapten al proyecto, puede elegirse el método de análisis ya sea Bishop, Jambú e incluso es posible cambiar el tipo de análisis para verificar las diferencias entre estos.

Otra de las opciones que se eligen de acuerdo con el criterio del proyectista son las zonas y círculos de falla, Slope/W cuenta con tres opciones para determinar los factores de seguridad mínimos

- Elegir la entrada y salida de la falla
- Elegir los centros de los posibles círculos de falla
- Selección automática de la falla

En el caso de estabilidad de taludes el programa permite realizar el análisis en condiciones de equilibrio límite, considerando deformaciones y en caso de sismos. Para este trabajo se utilizó la condición de equilibrio límite que corresponde a un análisis de momentos y fuerzas que cumplen con el equilibrio estático.

Como en un análisis de taludes uno de los principales factores que interviene es el comportamiento de los materiales, resulta necesario alimentar el programa con dichos datos. Las características geotécnicas del material se eligen dependiendo del tipo de comportamiento que puede tener el suelo, Seep/W ofrece los siguientes criterios

- Mohr-Coulomb para suelos con características cohesivo-friccionantes definidas
- Análisis sin drenaje (Undrained  $\Phi=0$ ) útil cuando se utiliza material puramente cohesivo.
- Material rocoso impenetrable (Bedrock, impenetrable)
- Materiales con tendencia de rotura bilineal (Bilinear)
- Materiales que incrementan su cohesión con la profundidad ( $s=f$  depth)
- Materiales cuya cohesión puede definirse por medio de una función ( $s=f$  datum)
- Material anisotropico cuyo comportamiento horizontal es diferente al vertical (Anisotropic Strength)
- Materiales cuyos esfuerzos normales y cortantes estén relacionados por una función (Shear/Normal  $F_n$ )
- Materiales con propiedades físicas diferentes cuyo comportamiento que puede ser expresado como una función (Anisotropic  $F_n$ )
- Materiales que cuentan con características cohesivas y friccionantes cuyo comportamiento puede definirse por medio de una función (Spatial Mohr-Coulomb)

El programa también cuenta con un par de combinaciones de los comportamientos anteriores para materiales con características cohesivo-friccionantes que presentan una variación con respecto a su profundidad y que sigue el comportamiento de una función.

De los comportamientos vistos anteriormente, en este trabajo se utilizó el de Mohr-Coulomb siendo este el más utilizado para los análisis de estabilidad, posteriormente se comparó utilizando el criterio de comportamiento para material puramente cohesivo. Esto se realizó así debido a que se encontró que el material es predominantemente cohesivo pero en algunos casos los resultados de sondeos reflejaron presencia de material arcillo-arenoso.

Las características con las que se alimenta el programa para un material analizado bajo las características de Mohr-Coulomb son

- Peso volumétrico ( $\text{kN/m}^3$ )
- Cohesión (kPa)
- Angulo de fricción interna ( $\phi$  °)

Una vez que se cuenta con la geometría del proyecto y sus características y materiales, debe indicarse la línea de flujo superior al que estará expuesto el terraplén; esta línea puede dibujarse directamente u obtenerse de un análisis con Seep/w (programa del mismo paquete computacional) como se verá posteriormente.

Al correr el análisis el programa encuentra el factor de seguridad mínimo y muestra las diferentes superficies de deslizamiento como puede verse en la figura 5.d.10.

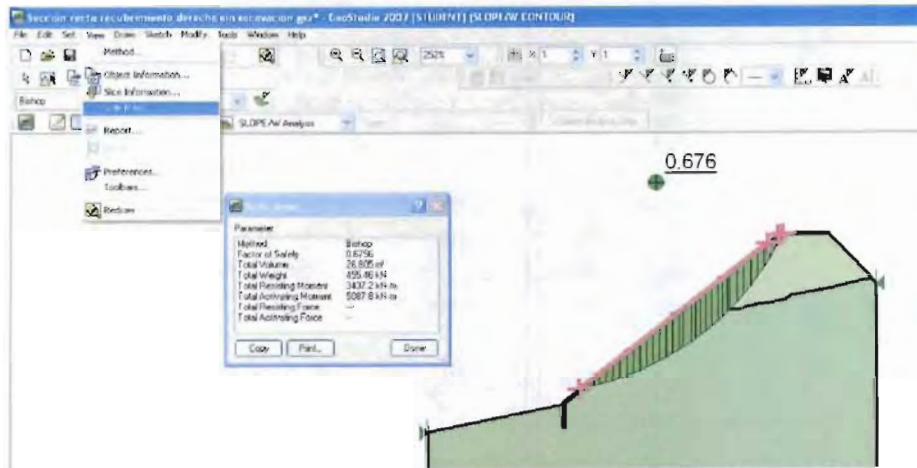


Figura 5.d.10. Resultados del deslizamiento más desfavorable del análisis en SLOPE/W.

### Análisis de flujo interno

La ecuación fundamental del flujo de agua en suelo es conocida como ecuación de Laplace.

$$\nabla^2 h = \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0$$

La solución matemática de la ecuación de Laplace son 2 familias de curvas;  $\psi = cte$  y  $\phi = cte$  ortogonales entre si llamadas líneas de flujo y líneas equipotenciales respectivamente conjunto de estas líneas se le llama red de flujo. Si se conoce la red de flujo puede conocerse el gasto de filtración, las presiones hidrodinámicas y el gradiente hidráulico.

### Gasto de filtrado

Para determinar el gasto de infiltración de flujo a través de un suelo, se considera un cuadro formado por dos líneas de flujo y dos líneas equipotenciales como se muestra en la figura 5.d.11.

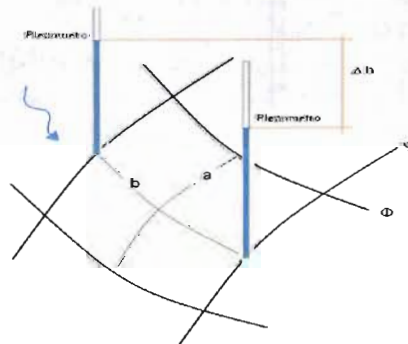


Figura 5.d.11. Cargas piezométricas en un cuadro de la red de flujo.

VF

El gasto que circula a través de la sección calculado con la ley de Darcy es:

$$\Delta q = ka \frac{\Delta h}{b}$$

Si el gasto total es

$$\Delta q = \frac{q}{n_f}$$

Y la pérdida de carga total es

$$\Delta h = \frac{h}{n_e}$$

donde

$a$  área media del rectángulo curvilíneo normal al flujo

$b$  distancia media recorrida por el agua

$\Delta h$  caída constante de potencial hidráulico entre las líneas de corriente  $\varphi$

$n_e$  número de caídas de potencial hidráulico que hay en la zona de flujo (número de segmentos entre las líneas equipotenciales)

$n_f$  número total de canales que tiene la red de flujo (número de segmentos entre las líneas de flujo)

$q$  gasto total

$h$  pérdida de carga total

De acuerdo con la ley de Darcy y considerando las ecuaciones anteriores el gasto total será

$$q = kh \frac{n_f a}{n_e b}$$

Si se supone la sección como un cuadrado en donde  $a=b$  la ecuación anterior queda como

$$q = kh \frac{n_f}{n_e}$$

El último término, depende solamente de la forma de la región del flujo conocido como Factor de Forma

$$F_f = \frac{n_f}{n_e}$$

De tal manera que la ecuación queda finalmente como

$$q = khF_f$$

Donde  $k$  es el coeficiente de permeabilidad del suelo y que puede interpretarse como el volumen de filtración del suelo a través de un área establecida. El valor de  $k$  es determinado por medio de muestras de suelo analizadas en laboratorio. En el campo el valor de  $k$  es variable por las irregularidades que se presentan, en este caso el valor de  $k$  es solo un valor representativo que se usa para conocer la capacidad del suelo para dejar pasar el agua entre sus partículas por lo que para este caso especial el coeficiente  $k$  suele llamarse coeficiente de conductividad hidráulica.

Si un suelo presenta la misma permeabilidad en cualquier dirección es isotrópico, esta condición no depende del tipo de material de la estructura puesto que pueden existir

- Suelo homogéneo e isotrópico
- Suelo homogéneo no isotrópico

- Suelo no homogéneo e isotrópico
- Suelo no homogéneo no isotrópico

En el primer caso el valor de k no cambia de un punto a otro ni en ninguna dirección, para el segundo caso la permeabilidad cambia de una dirección a otra pero la permeabilidad es la misma, en el tercer caso el valor de k es constante en un punto pero diferente de un punto a otro, en el caso de un suelo no homogéneo y anisotrópico el valor de k es diferente en todos sus puntos y variable de una dirección a otra.

En el caso de suelos estratificados o estructuras construidas en capas, el medio se considera no homogéneo y no isotrópico.

En la tabla 5.d.5 se muestran algunos valores del coeficiente de permeabilidad de acuerdo con diferentes clasificaciones.

**Tabla 5.d.5. Coeficientes de permeabilidad, (Sotelo, 2009)**

SUELO	k (cm/s)
Aluviones de bloques calcareos	$3 \times 10^{-4}$
Arcillas provenientes de los gneiss	$10^{-5}$ a $10^{-7}$
Concretos	$10^{-6}$ a $10^{-8}$
Calcareas para construcción (Según Macmillan)	$2 \times 10^{-2}$ a $2 \times 10^{-2}$

PERMEABILIDAD TOLERABLE EN ROCAS	k (cm/s)
Según Ehrenberg	$3 \times 10^{-8}$
Según F.A.W.G. de Berlín	$1 \times 10^{-7}$
Gravas y arenas de 0.1 a 25 mm	$5 \times 10^{-2}$ a $2 \times 10^{-2}$
Arena uniforme (0.77mm) Según Darcy	$3 \times 10^{-4}$
Arena Gruesa (0.1 a 5 mm)	$1 \times 10^{-4}$
Arena media (0 a 2 mm)	$2 \times 10^{-5}$
Arena fina (0 a 1 mm)	$4 \times 10^{-6}$

### Gradiente hidráulico y presión intersticial

Como se mencionó en el subcapítulo 6.1 la pérdida de carga puede estimarse de la red de flujo y su valor corresponde a la carga que se encuentra entre cada línea equipotencial medida verticalmente (ver figura 5.d.11), estas caídas de presión pueden calcularse con la expresión siguiente

$$\Delta h = \frac{H}{n_e}$$

donde

$H$  tirante de agua al que está expuesta la estructura

$n_e$  número de segmentos entre las líneas equipotenciales elegidas para dibujar la red

$n_f$  número de segmentos entre las líneas de flujo

$\Delta h$  caída de presión o pérdida de carga



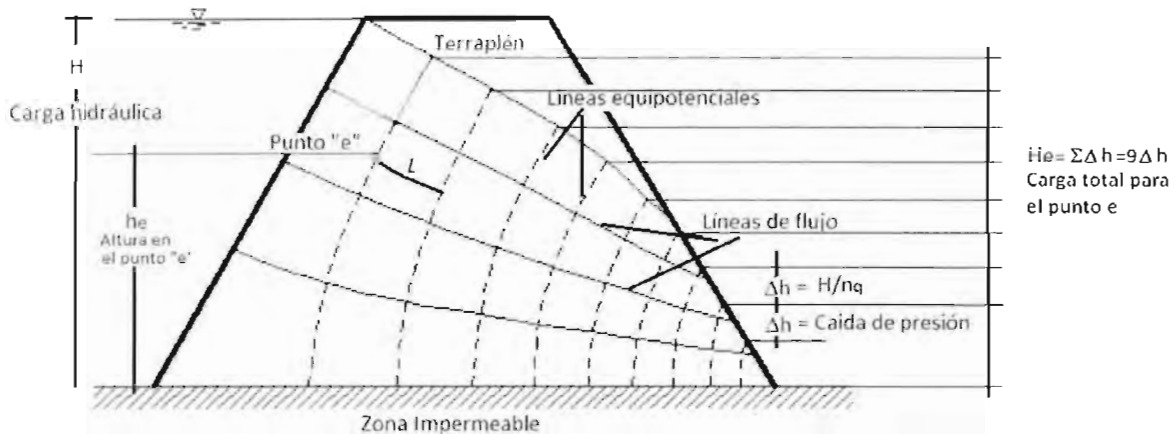


Figura 5.d.12. Red de flujo en un terraplén, (Juárez, 1997).

De esta manera a la salida del agua la pérdida de carga total será  $\Delta h * n_f$

Finalmente si se desea conocer el gradiente hidráulico puede utilizarse la ecuación siguiente

$$i = \frac{H}{n_e} = \frac{\Delta h}{L}$$

donde

$L$  longitud del segmento de línea de flujo en análisis

$i$  gradiente hidráulico

Si se conoce la pérdida de carga, el gradiente hidráulico para una sección será la pérdida de carga de esta sección multiplicada por la longitud de la línea de flujo de esta misma sección.

La carga total  $H_e$  en un punto de altura  $h_e$  será la suma de las pérdidas de carga ( $\sum \Delta h$ ) hasta ese punto medidas de la base del terraplén o a partir de la zona impermeable en donde este desplantado. Conociendo esto, la presión intersticial será

$$P = (H_e - h_e) * \gamma_w$$

$P$  presión intersticial o presión de poro ( $\text{ton}/\text{m}^2$ )

$H_e$  Carga total en el punto de interés

$h_e$  altura del punto (m)

$\gamma_w$  peso específico del agua ( $1 \text{ ton}/\text{m}^3$ )

### Velocidades de filtrado

Una vez que se conoce el gradiente hidráulico en un punto de interés, es posible calcular la velocidad del agua basta con hacer uso de la ley de Darcy.

Darcy propone la siguiente ecuación para el cálculo del gasto

$$Q = \frac{\partial V}{\partial t} = kiA$$

De la ecuación de continuidad se tiene que

$$Q = vA$$

donde

- $Q$  gasto ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )
- $\Delta V$  diferencial de la variación del volumen
- $\Delta t$  diferencial del tiempo
- $K$  coeficiente de permeabilidad ( $\text{cm/s}$ )
- $i$  gradiente hidráulico (adimensional)
- $A$  área transversal ( $\text{m}^2$ )
- $v$  velocidad ( $\text{cm/s}$ )

Al relacionar ambas ecuaciones se obtiene

$$Q = \Delta V / \Delta t$$

Que es la expresión correspondiente a la ley de Darcy.

### SEEP/W

Como dibujar una red de flujo a mano puede ser muy variable, se recomienda hacer pocas líneas de flujo para que el problema pueda visualizarse más fácilmente, sin embargo mientras más densa sea la red mejores serán los resultados que se obtengan de ella. Si una red presenta muchos puntos se necesitarán muchos cálculos y una solución a mano no sería viable, es por eso que se debe recurrir a la ayuda de la computadora.

Como es sabido el método de elemento finito consiste en dividir el elemento de análisis en pequeños elementos definidos geoméricamente para los cuales se pueden analizar las condiciones en las zonas donde se intersecan, dado que las redes de flujo dividen el terraplén en elementos definidos, es posible aplicar a estos (Analizar en cada punto) por medio de elemento finito y conocer así las condiciones del flujo interno.

En los temas siguientes se hablará de una herramienta de GeoStudio (SEEP/W) la cual utilizando elemento finito puede calcular la red de flujo y las condiciones hidráulicas para diferentes tipos de material y condiciones de flujo.

En la versión 2007 de este programa se pueden llevar a cabo dos tipos de análisis en las redes de flujo

- Régimen estacionario, el tiempo no interviene como variable en el proceso.
- Régimen transitorio, se tiene en cuenta la evolución del sistema con el tiempo, como es el caso de avenidas.

El programa permite proponer la geometría del cauce o de las estructuras dibujando directamente con las herramientas del programa, pero también permite importar regiones definidas en AutoCad lo cual facilita en gran medida el trabajo.

Las características del material del cauce pueden definirse directamente conociendo previamente estas características con base en estudios de laboratorio, sin embargo el programa cuenta también con archivos precargados para diferentes modelos de comportamiento de algunos materiales que pueden ser de gran ayuda. Las propiedades del suelo que considera el paquete son

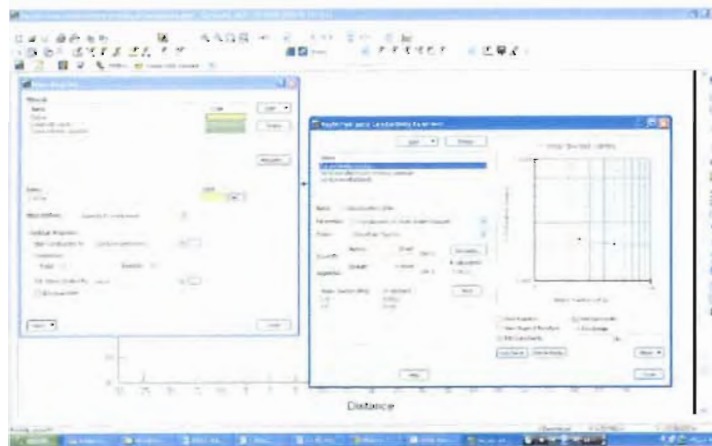
VF

- Permeabilidad del terreno.
- Relación entre permeabilidades  $K_y/K_x$
- Variación direccional de la permeabilidad de la componente  $k_x$ .
- Modelo de estado saturados e insaturado y saturado
- Definición de función de conductividad en suelos insaturados.

### Uso y alimentación de SEEP/W

Seep/w cuenta con dos opciones para elegir el comportamiento del flujo ya sea estacionario o transitorio; en el segundo caso es necesario proporcionar una función que indique la variación del flujo respecto al tiempo.

Al igual que Slope/w es necesario proporcionar las condiciones en que trabajan, es decir si el material estará completamente saturado, si trabajará seco o en ambas condiciones. En el primer caso basta con indicar el valor de su coeficiente de conductividad saturado a diferencia del último en el que es necesario indicar una función que indica el comportamiento del agua en el material es decir la función de conductividad hidráulica que puede ser capturada directamente como se muestra en la figura 5.d.12 con base en los valores obtenidos de estudios de laboratorio o cargada de los archivos que ofrece geostudio, conociendo su contenido de agua residual y  $K$  de saturación.



**Figura 5.d.13 Características de los materiales y funciones de conductividad hidráulica en SEEP/W de Geostudio.**

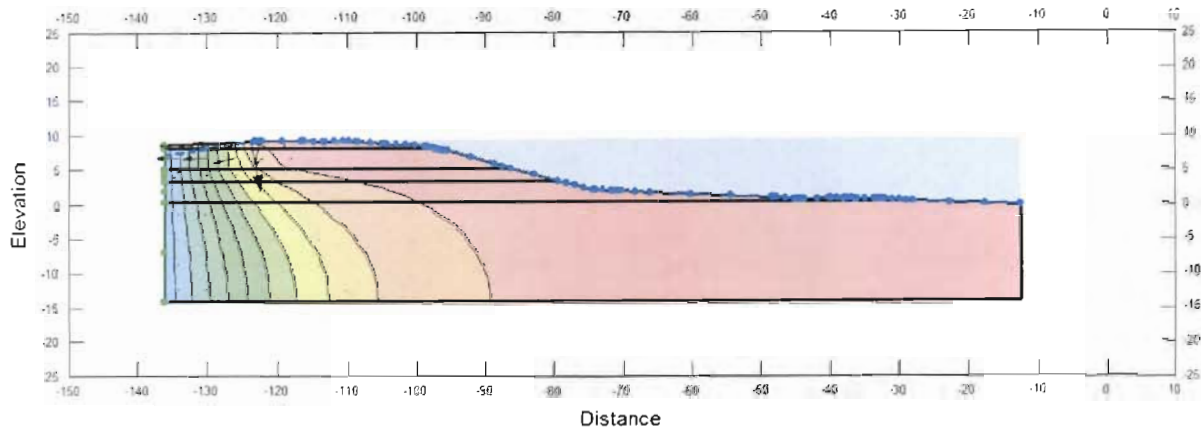
Para las condiciones de frontera deben definirse las siguientes características del proyecto:

- Sección de posibles filtraciones
- Posición del tirante de agua

Una de las ventajas que con las que cuenta este programa es que es posible obtener el gasto de filtrado para las secciones deseadas.

Al correr el programa se obtienen las líneas de flujo con sus respectivas líneas equipotenciales y la variación de la presión interna identificada por una gama de colores. Dentro de la red de flujo generada se pueden conocer las características de cada nodo entre ellas posición del nodo, su carga, presión de poro, carga piezométrica, gasto, velocidades, la conductividad en

cada eje, entre otras cosas. (ver figura 5.d.13) Las características del flujo pueden consultarse de punto en punto o generarse una grafica que muestre su comportamiento.



**Figura 5.d.14 Información de resultados para un nodo de la malla de análisis con SEEP/W**

Un análisis como este puede realizarse para complementar un análisis de estabilidad de taludes.

Las líneas de flujo y sus equipotenciales en estado estacionario y transitorio obtenidas con el programa Geostudio se encuentran en el anexo 5.d.6.

### *Características Geotécnicas*

Para poder utilizar los programas de Geostudio, es necesario contar con la geometría de la sección, las características y propiedades de los materiales.

Para alimentar el programa SLOPE/W se supuso que para los primeros 17 kilómetros se pueden utilizar los resultados del sondeo realizado en las margen derecha para la estructura de control El Macayo obtenidos del informe titulado "Estudio de las protecciones y márgenes inestables de los Ríos Carrizal, Usumacinta, La Sierra y Grijalva" CONAGUA-IINGEN (2010), de la misma forma se supuso que la información obtenida del sondeo realizado en el año 1999 para el kilómetro 17 es válida para los kilómetros del 18 al 29.

Las características geotécnicas utilizadas para las secciones 30 a la 60 se obtuvieron de la información del informe CONAGUA-IINGEN (2010), eligiendo los sondeos más cercanos al punto en estudio, se recomienda para tener resultados más confiables llevar a cabo sondeos en cada uno de los puntos de interés y que estos se realicen para una profundidad mínima de 20 m.

El análisis de estabilidad se realizó para el estado posterior a la socavación, analizada bajo dos condiciones, la primera considerando el gasto máximo que pueden conducir el río que es de  $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$  y el correspondiente a la política de operación de la estructura de control El Macayo con un  $Q_d= 800 \text{ m}^3/\text{s}$ . De las secciones resultantes del análisis de la socavación se geraron archivos en dxf (en Autocad), que se exportaron a proyectos de GeoStudio para conocer las condiciones de flujo interno y la estabilidad ante deslizamiento.

Las características geotécnicas de los materiales tanto del cauce como del bordo se dividirán en estratos de acuerdo con el valor de la cohesión obtenido de los sondeos para el informe

CONAGUA-IINGEN (2010). El valor del peso volumétrico también es proporcionado por estos estudios. Las los estratos elegidos y sus características representativas se encuentran en el anexo 5.d.5.

El valor del coeficiente de permeabilidad fue obtenido con la conductividad hidráulica saturada de los materiales, este valor se seleccionó con la tabla 5.d.5 de acuerdo con el tipo de material. Conociendo sus coeficientes de saturación, se utilizó la herramienta de estimación de la función de conductividad hidráulica que proporciona el programa Geostudio; esta función se obtuvo con el método de Van Genuchten y la función de contenido de agua obtenida de los resultados de pruebas en el informe CONAGUA-IINGEN (2010).

### *Resultados del análisis de estabilidad de talud y comentarios finales*

Los factores de seguridad calculados para los primeros 29 kilómetros mostraron factores de seguridad mayores a 1.5, a excepción de los cadenamientos 3+000,4+000 Y 6+000. EN la sección 3+000 se obtuvieron factores de seguridad de 1.3 en ambas márgenes por lo que puede esperarse que estas fallen ante una avenida, en la sección 4+000 margen izquierda el factor de seguridad también presenta un valor de 1.3 por lo que también fallaría; el valor del factor de seguridad en el caso de la sección 6+000 fue de 0.8, mucho más bajo que los dos anteriores y representando el mismo riesgo. El resto de las secciones con factores de seguridad mayor a 1.5, no presentan tanto riesgo sin embargo se pudo observar que estos factores tuvieron una disminución promedio del 32% para condiciones de flujo transitorio, comparadas con el factor de seguridad obtenido en condiciones estacionarias. Los resultados pueden observarse en la tabla 5.d.6 y las figuras siguientes. (Ver figuras 5.d.15, 5.d.16, 5.d.17, 5.d.18)

**Tabla 5.d.6 Valor del factor de seguridad sin condiciones transitorias y posterior a ellas.**

FACTORES DE SEGURIDAD				
	MARGEN IZQUIERDA		MARGEN DERECHA	
.SECCION	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
1+000	3.8	3.3	3.1	3.1
2+000	6.1	4.2	6.8	6.4
3+000	2.5	1.3	2.3	1.3
4+000	2.4	1.3	3.0	2.3
5+000	5.0	5.0	6.4	6.4
6+000	3.2	3.2	1.6	0.8
7+000	5.3	5.2	4.8	3.9
8+000	4.7	2.9	9.3	9.7
9+000	10.9	8.0	7.8	6.0
10+000	6.7	5.2	7.5	6.0
11+000	5.8	5.3	8.4	5.6
12+000	84.8	38.1	9.9	9.9
13+000	11.7	6.0	20.9	10.8
14+000	21.2	12.8	39.8	21.5
15+000	35.2	20.9	30.1	17.6
16+000	34.5	15.6	31.5	17.1

FACTORES DE SEGURIDAD				
SECCION	MARGEN IZQUIERDA		MARGEN DERECHA	
	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
17+000	16.2	8.9	12.9	8.7
18+000	41.9	20.1	18.8	13.1
19+000	18.8	18.1	33.9	20.5
20+000	27.7	11.9	33.2	18.4
21+000	23.8	15.6	14.5	7.8
22+000	15.0	7.9	23.0	15.2
23+000	11.5	5.9	38.4	19.5
24+000	31.7	16.1	16.2	9.0
25+000	17.8	12.2	7.8	5.1
26+000	12.0	7.3	12.3	6.5
27+000	21.4	17.5	23.5	13.0
28+000	11.4	9.5	24.0	14.5
29+000	9.2	6.9	19.0	10.1
30+000	1.7	1.4	3	1.8
31+000	7.6	2.9	2.8	1.3
32+000	2.2	0.8	6.9	2.4
33+000	1.7	1	20	28
34+000	2.7	1.1	1.4	0.6
35+000	3	1.1	1.6	0.6
36+000	0.3	0.2	2.5	1.8
37+000	1.3	0.6	0.8	0.5
38+000	2.7	1.1	3.2	2.9
39+000	1.4	0.5	1.4	0.6
40+000	11.8	5.1	1	0.6
41+000	1	0.4	0.9	0.4
42+000	1.3	0.3	3.6	1.9
43+000	0.9	0.3	0.9	0.6
44+000	3.7	2.2	3	1
45+000	1.4	1.2	3	1
46+000	14	3.2	15.8	7.5
47+000	1.1	0.8	1.1	0.8
48+000	1.3	0.7	1	0.6
49+000	1.8	0.6	1.3	0.6
50+000	0.8	0.7	1.3	0.7
51+000	2.7	1.5	7.6	4
52+000	3.9	2.8	2.8	2.1
53+000	2.2	1.1	1.2	0.6
54+000	7.5	5.3	5.5	3.1

*VF*

FACTORES DE SEGURIDAD				
	MARGEN IZQUIERDA		MARGEN DERECHA	
SECCION	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
55+000	1.7	0.6	1.7	0.6
56+000	2.2	0.8	1.9	0.8
57+000	6.3	5.5	3.7	2
58+000	3.1	1.2	4.3	3.8
59+000	1.3	0.7	1.6	0.8
60+000	1	0.7	1.6	1.1

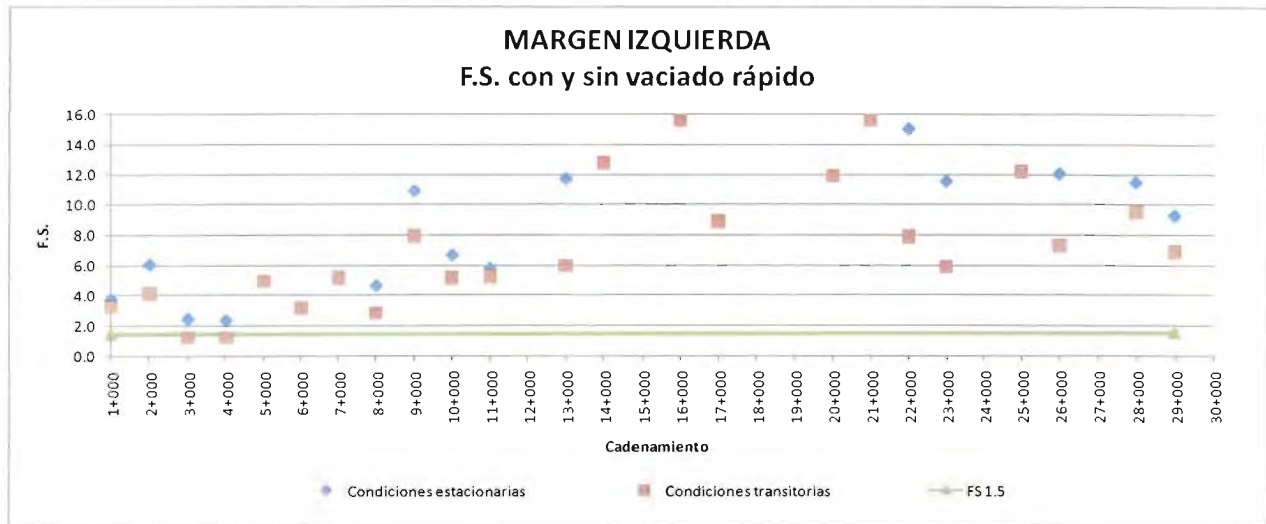


Figura 5.d.15 Factores de seguridad del cadenamiento 1+000 al 29+000, margen izquierda.

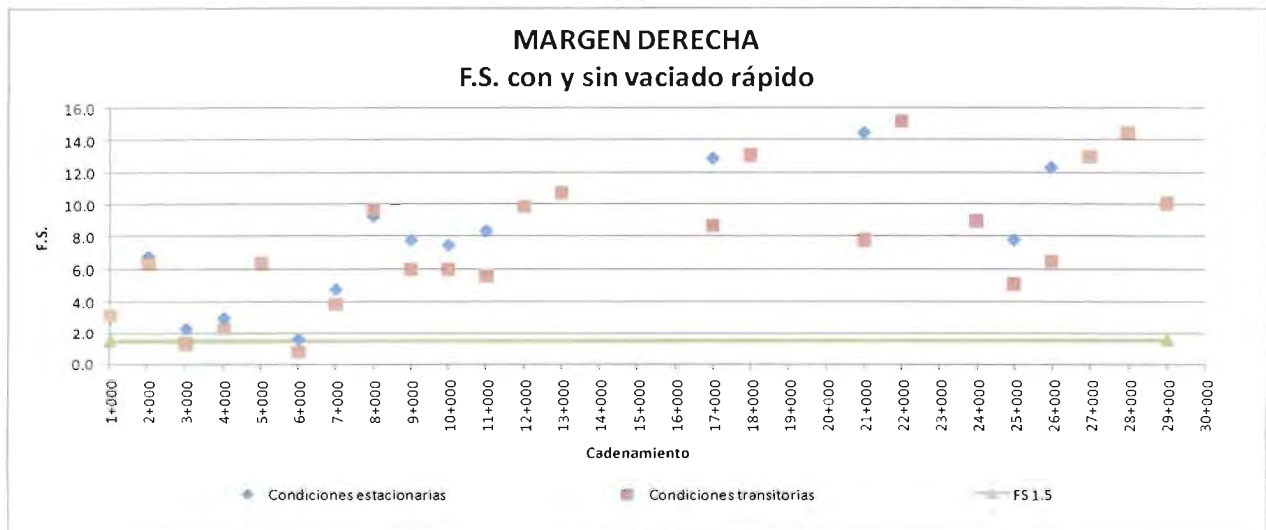


Figura 5.d.16 Factores de seguridad del cadenamiento 1+000 al 29+000, margen derecha.

De los análisis realizados de las secciones 30+000 a la 60+000 pudieron factores de seguridad menores a 1.5 antes de iniciar el vaciado rápido por lo que se observó la presencia de falla producida por la socavación calculada con un gasto de 800 m<sup>3</sup>/s.

En la margen izquierda, de las 31 secciones 24 presentaron falla de las cuales 11 de ellas fueron debidas únicamente a la socavación y 13 al vaciado rápido. En la margen izquierda el 46% del las fallas fueron debidas a la socavación y el 54% debidas al flujo transitorio producido con un vaciado rápido.

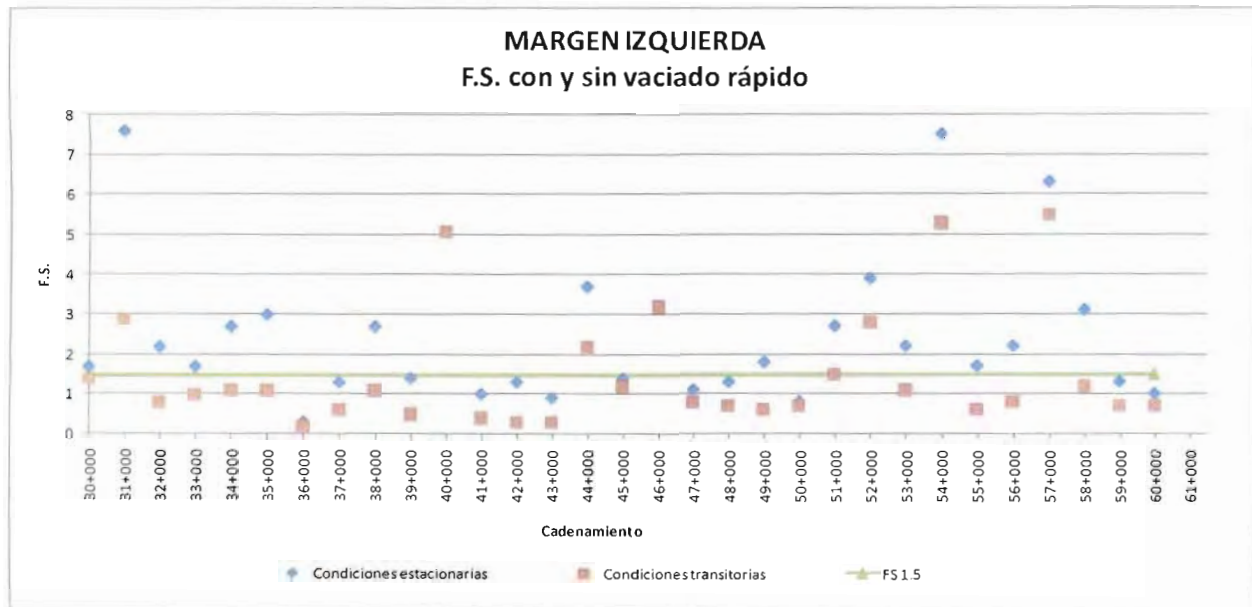


Figura 5.d.17 Factores de seguridad del cadenamiento 30+000al 60+000, margen izquierda.

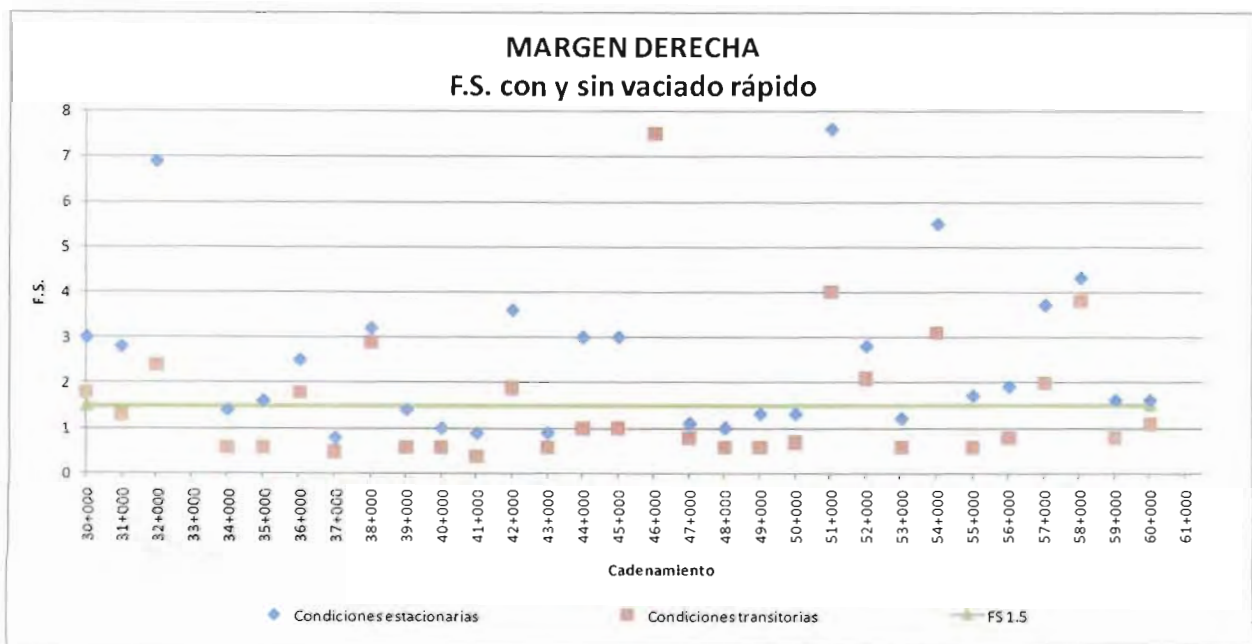


Figura 5.d.18 Factores de seguridad del cadenamiento 30+000al 60+000, margen derecha.



En la margen derecha, de las 31 secciones 18 presentaron falla 11 de ellas debidas a la socavación y 7 producidas por un vaciado rápido, el 61% de las fallas fueron debidas a la socavación y el 39% debidas al vaciado rápido. El porcentaje de fallas producidas por la presencia de flujo transitorio y socavación son muy parecidas por lo que se recomienda utilizar una política de operación en la que se consideren gastos y velocidades de salida bajas y dosificadas hasta llegar a los 800 m<sup>3</sup>/s y de igual forma se recomienda que al cerrar las compuertas las variaciones en los niveles del cauce sean graduales para evitar fallas tanto en taludes de bordos como en las márgenes del río.

El valor del F.S y la superficie de deslizamiento para cada uno de los cadenamientos obtenidos en geostudio se encuentran en el anexo 5.d.6.

## e) ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO EN MUESTRAS DE SUELOS DE LOS RÍOS CARRIZAL, GRIJALVA Y USUMACINTA

### *Introducción*

En trabajos anteriores se han presentado y discutido las manifestaciones típicas de inestabilidad de las márgenes de los ríos Carrizal y Grijalva, principalmente en la zona de Villahermosa; las particularidades más evidentes de dichas manifestaciones son:

- El volcamiento hacia el cauce de obras de contención
- El hundimiento del terreno en las márgenes
- La erosión tras las protecciones contra erosión fluvial
- Las horadaciones y oquedades producidas tanto por causas externas (fauna, erosión fluvial, gravedad, etc.), como internas (flujo y microfauna subterráneos).

Causas que explicarían esa conjunción de manifestaciones son:

- a. Comportamiento fluido-viscoso del subsuelo
- b. Erosión interna

En este reporte se discuten y documentan las investigaciones, observaciones, mediciones y conclusiones que justifican la suposición de las causas arriba mencionadas, así como sus manifestaciones, y se propone una posible solución para la estabilización de las márgenes.

### *Consideraciones sobre el agua subterránea y la materia orgánica*

La visión meramente geotécnica de la estabilidad de laderas tiende a considerar al subsuelo como una masa sólida dentro de la que puede desarrollarse una superficie de deslizamiento sobre la que eventualmente resbale la ladera, asignando al agua de los intersticios un efecto sólo mecánico e ignorando la fase orgánica.

Considerar las interacciones entre las tres fases, la mineral, la líquida y la orgánica, permite establecer un contexto en que los fenómenos observados encuentran una explicación plausible. Conviene entender que:

- a. Estado sólido de una masa de suelo significa una condición circunstancial en la que los enlaces o ligas entre las partículas minerales son suficientemente fuertes como para mantenerlas juntas y por tanto conservar la forma de la masa de suelo; si se debilitan las ligas por la aparición de una interface entre las partículas o porque disminuye el número de éstas y por tanto es menor la suma de ligas interpartículas dentro de la masa, la masa de suelo pierde solidez.
- b. La erosión interna del suelo sólo puede concebirse aceptando la participación de agentes de desintegración de la masa de suelo y de agentes de transporte que se lleven las partículas desprendidas; ello no puede explicarse satisfactoriamente ignorando las interacciones químicas, mecánicas y físicas entre las fases mineral, líquida y orgánica.

### *Consideraciones físicas y mecánicas*



Las cuencas tabasqueñas se encuentran entre las de mayor pluviosidad del mundo, por lo que el importante volumen de agua infiltrada al subsuelo que fluye subterráneamente hacia los ríos, desfoga en las márgenes por una superficie muy inferior a la de infiltración, a través de los poros del suelo, ejerciendo por ello considerables fuerzas de filtración sobre sus partículas minerales, pudiendo desprenderlas; adicionalmente, si el subsuelo pierde solidez, se convierte en un lodo que escurriría por la acción del flujo subterráneo y de la gravedad.

Una consecuencia de lo anterior es que las partículas insuficientemente ligadas a sus vecinas son arrastradas a través de los poros por el flujo subterráneo, hasta donde se atorán o hasta el río, lo que inevitablemente ocurre con las partículas que afloran en la superficie de las márgenes, la que continuamente se renueva por la pérdida de las partículas que la formaban en el momento anterior, es decir, la combinación de la erosión superficial con la erosión interna aceleran la desintegración de las márgenes del río.

Si adicionalmente se tiene en cuenta la heterogeneidad del subsuelo, resulta lógico que haya vías preferenciales de flujo a través de las zonas más permeables y porosas, formadas por partículas más gruesas (limo o arena), cuya adherencia con las contiguas (cohesión) es prácticamente nula. Ello provoca que las partículas superficiales vayan desprendiéndose, engendrando la formación de ductos de progresión retrógrada, que al unirse con otros, crean oquedades cada vez mayores al interior del subsuelo.

Por otra parte, siendo dichas vías fácilmente excavables y saturadas, constituyen una superficie ideal para que varias especies animales (hypostomus, cangrejos, iguanas, etc.) excaven ahí sus madrigueras, contribuyendo así a la tubificación.

Es importante observar que tanto la fluidificación como la erosión interna son más probables en las márgenes del río que tierra adentro, pues el desconfinamiento horizontal permite el escurrimiento fluido y la dificultad para perder partículas es proporcional a la distancia que éstas deben recorrer por los tortuosos intersticios del subsuelo.

### *Consideraciones químicas y bioquímicas*

#### **Materia Orgánica**

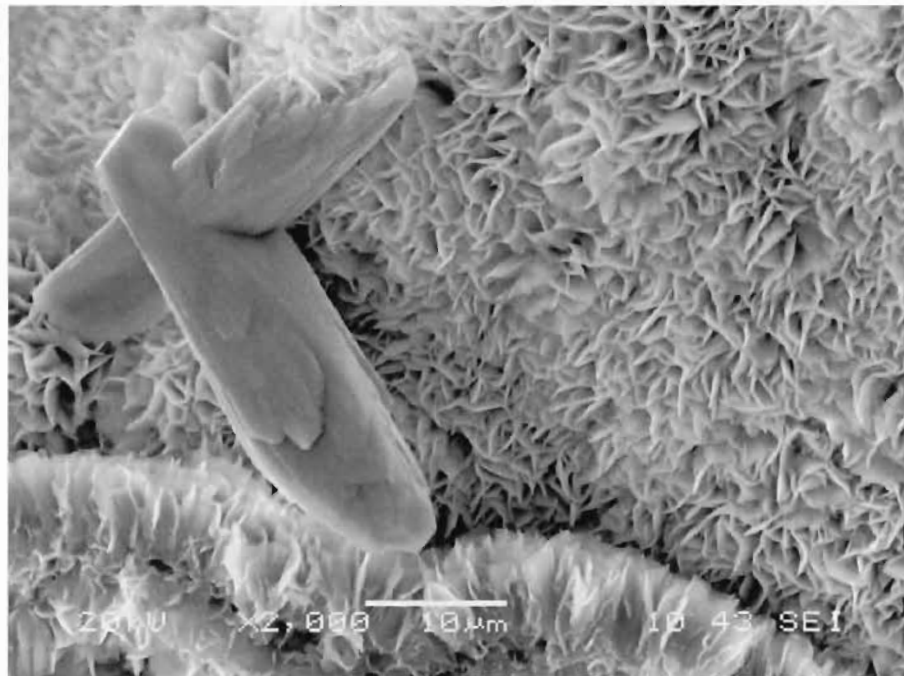
En suelos y aguas naturales siempre hay microbios, cuya densidad poblacional oscila entre  $10^3$  y  $10^9$  individuos/cm<sup>3</sup>, incrementándose considerablemente en suelos agrícolas; los microbios juegan un importante papel en el reciclaje de suelos y rocas, ya que entre otros efectos, tanto para hacerse de energía mediante el rompimiento de moléculas, como porque requieren hierro y manganeso para su metabolismo, cubren las superficies de los cristales con biopelículas en concentraciones tan altas como  $10^8$  microbios/cm<sup>2</sup>, por lo que si conservadoramente se supone que las arcillas que nos ocupan tienen una superficie específica de  $50\text{m}^2/\text{gr}$  ( $5\text{E}5\text{ cm}^2/\text{gr}$ ) (la superficie específica de las esmectitas, familia a la que pertenecen las del sitio<sup>3</sup>, oscila entre 60 y  $300\text{ m}^2/\text{gr}$ ), en una partícula de arcilla de  $2\mu$  por lado, cuya superficie total sea de  $8\mu^2$  ( $8\text{E}-08\text{ cm}^2$ ), se tendría una población de cuando menos 64 microbios por partícula de arcilla, pero como siempre forman grumos, el número sería mucho mayor, lo que adicionalmente a su acción solvente, afecta las ligas fisicoquímicas entre partículas minerales y lubrica sus

---

<sup>2</sup> Grotzinger, J, et al, Understanding Earth, 5th ed, pp 247-251, W.H. Freeman & Co., 2007

<sup>3</sup> Dr. Liberto de Pablo, Instituto de Geología, UNAM, Comunicación personal

superficies. La figura 1 corresponde a una fotografía con microscopio electrónico de una esmectita típica.



**Figura 5.e. 1. Esmectitas de sedimentos marinos con un par cruciforme de cristales de calcita. La raya blanca muestra la escala de la fotografía. Notar la cantidad de intersticios que pueden albergar microbios (tomada de la web).**

### Salinidad

La resistencia mecánica de un suelo arcilloso (como la de cualquier sólido) es un reflejo de la fuerza de atracción interatómica e intermolecular entre las superficies de sus partículas y la de los filamentos y raicillas capilares de plantas y hongos (*hyphæ*) que se entrelazan entre los grumos. Las partículas de arcilla (silicoaluminatos) son pequeñas ( $< 2\mu$ ) pero tienen una gran superficie específica negativamente cargada (p.ej. la superficie específica de las esmectitas, familia a la que pertenecen las arcillas del sitio<sup>4</sup>, oscila entre 60 y 300  $m^2/gr$ )<sup>5</sup>.

Los cationes ( $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $NH_4^+$ )<sup>6</sup> presentes en el suelo, son electrostáticamente atraídos por la superficie negativamente cargada, para contribuir a neutralizar la carga con una capa cuyo espesor depende de su carga positiva.

Los cationes disueltos en el agua subterránea también influyen en el espesor de la capa, pues los que están adheridos a las partículas de arcilla se difunden en el agua hasta homogenizar la concentración, lo que significa que a mayor salinidad del agua subterránea es menor el espesor de la capa de cationes alrededor de las partículas de arcilla, siendo ello importante pues

<sup>4</sup> Dr. Liberto de Pablo, Instituto de Geología, UNAM, Comunicación personal.

<sup>5</sup> García Romero, E., **Las Arcillas: Propiedades y Usos**; Universidad Complutense, Madrid, 2001.

<sup>6</sup> La Composición Química de las Aguas Subterráneas Naturales; Instituto Geológico y Minero de

España; [http://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/pdf/lib43/1\\_1.pdf](http://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/pdf/lib43/1_1.pdf)

rodeadas de cationes, las partículas sólo se repelerían si no actuaran las *fuerzas de Van der Wall*, que requieren mucha proximidad para ejercer su atracción y poder de floculación.

Los cationes adheridos a las partículas de arcilla son intercambiables con los que pudiera traer disueltos en el agua subterránea, intercambio que depende de la disponibilidad y tamaño físico de éstos.

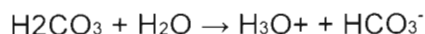
Dado que varias de las *difracciones Rx* realizadas en muestras de los ríos Carrizal y Grijalva, cuyos resultados se presentan en e.5.2., mostraron una presencia importante de *albita*, silicoaluminato preponderantemente sódico, conviene precisar que los suelos sódicos son típicamente dispersivos pues teniendo sólo una carga positiva el  $\text{Na}^+$  propicia la formación de una gruesa capa cuyo espesor no permite la cercanía necesaria para que las *fuerzas de Van der Wall* (de atracción) logren la floculación. Cabe mencionar que.

Por todo lo anterior, es de esperarse que cuando el flujo subterráneo es bajo en sales:

- Ocurra lavado de cationes ocasionando la disminución de las fuerzas de enlace, e incluso la repulsión, entre partículas.
- La defloculación de los grumos y el consiguiente incremento de la propensión a la *tubificación* del subsuelo<sup>7</sup>.

Es importante agregar que una proporción importante del subsuelo de las márgenes de los ríos Carrizal y Grijalva está constituido por materia orgánica y raíces en descomposición, lo que aumenta su *Capacidad de Intercambio Catiónico* (CIC)<sup>8,9</sup> y por tanto la facilidad para que un agua subterránea dulce libere y se lleve los cationes adheridos a las partículas de arcilla, debilitando los enlaces que darían consistencia al suelo, e incluso propiciando la dispersión.

Por otra parte, teniendo en cuenta la importante presencia de calizas en la cuenca, podría esperarse una participación de la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) como aglutinante, pero dada la gran cantidad de materia orgánica (productora de  $\text{CO}_2$ ) hallada en todos los sondeos, se produciría ácido carbónico:



Que atacaría a los carbonatos:

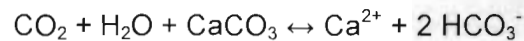


En síntesis:

<sup>7</sup> Reséndiz, D., **Relevance of Atterberg Limits in Evaluating Piping and Breaching Potential**, Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects, ASTM STP 623, J.L. Sherard and R.S. Decker, Eds., American Society for Testing and Materials, 1977, pp.341-353.

<sup>8</sup> Capacidad que tiene un suelo para retener y liberar iones positivos, debido a su contenido de arcilla y de materia orgánica. Las arcillas están cargadas negativamente, por lo que exhiben capacidades de intercambio catiónico mayores.

<sup>9</sup> [http://es.wikipedia.org/wiki/Capacidad\\_de\\_intercambio\\_cati%C3%B3nico](http://es.wikipedia.org/wiki/Capacidad_de_intercambio_cati%C3%B3nico)



Lo que explica la relativamente escasa presencia de calcita, en los suelos de las márgenes de los ríos Carrizal y Grijalva.

A manera de conclusión puede decirse que, en adición a los perjuicios mecánicos, la abundancia e materia orgánica en el subsuelo:

- ocasiona su acidificación y en consecuencia:
- disuelve los carbonatos,
- propicia la defloculación de las arcillas,
- es un factor determinante en la desintegración de los minerales y por tanto
- acelera la meteorización de las rocas.

### *Manifestaciones de Inestabilidad*

Adicionalmente a las evidencias mostradas en las fotografías de las siguientes páginas, que prueban la ocurrencia de volcamiento de las márgenes hacia el cauce, así como de importantes procesos de erosión interna en muchas márgenes de los ríos Carrizal y Grijalva, en el **Anexo A** se presentan los perfiles de peso volumétrico seco de los suelos, cuyos valores mayoritariamente son inferiores a  $12 \text{ kN/m}^3$ , lo que refleja una gran cantidad de vacíos, al grado de que conforme a varios criterios geotécnicos, entre ellos el de la C.F.E.<sup>10</sup> puede clasificarseles como **suelos colapsables**.

Las siguientes fotografías muestran formas típicas de inestabilidad de las márgenes de los cauces de la planicie tabasqueña y aspectos relacionados con dichas inestabilidades.



**Figura 5.e. 2. En la mayoría de las márgenes "protegidas" con pedraplenes el subsuelo fue incapaz de soportar su peso. La inclinación de los pilotes y el hundimiento manifiestan que, lejos de tratarse de una típica falla de talud de sección circular a volumen constante, se produjo el colapso y volcamiento de la margen, incluyendo a los pilotes.**

<sup>10</sup> CFE, Cimentaciones para estructuras de líneas de transmisión, Especificación JA100-64, Agosto 2011, p.2.



Figura 5.e. 3. Colapso de la margen y agrietamiento por *volcamiento* incipiente.



Figura 5.e. 4. En el mismo sitio de la figura anterior se observa la superficie hundida (cubierta por vegetación) de la margen colapsada y agrietamiento por *volcamiento* incipiente que incluye a las tablaestacas que inútilmente tratan de contenerlo.



Figura 5.e. 5. Erosión marginal *por derrumbe*, de un frente horadado por la fauna acuática (principalmente plecostomos y cangrejos) en una mancha húmeda y blanda bien delimitada, lo que delata mayor permeabilidad que la del suelo a su alrededor.



Figura 5.e. 6. Horadaciones realizadas por diversos animales en una superficie agrietada y fisurada de suelo poco cohesivo; las fisuras y grietas son vías preferentes del flujo subterráneo y por tanto de erosión interna.





Figura 5.e. 7. Erosión interna de una capa de arena.



Figura 5.e. 8. Erosión marginal *por derrumbe* de un suelo minado por erosión interna.

Sobre un suelo como éste, el peso de un bordo o de una protección superficial, dinamizado, o no, por las vibraciones del tránsito pesado, o bien las vibraciones de alguna descarga de agua, podrían ocasionar el colapso de las oquedades, lo que en superficie se manifestaría como hundimientos. Un ejemplo claro de ello es del cárcamo de descarga municipal, sobre la margen izquierda del Río Grijalva, ubicado en la Av. Carlos A. Madrazo, entre las avenidas G. Méndez y Magallanes.



Figura 5.e. 9. Cuando el flujo subterráneo desfoga en un sitio muy localizado produce *desconchamientos* que avanzan en forma retrógrada hacia el interior de la margen. El mismo fenómeno ocurre a escalas inferiores, hasta llegar a tamaños tan reducidos que lo que se desprende son partículas individuales o pequeños grumos. Son diferentes manifestaciones de *tubificación*.



Figura 5.e. 10. Las grietas son vías preferentes del flujo subterráneo que éste amplía y profundiza rápidamente, debilitando las márgenes y propiciando el derrumbe de bloques desprendidos.



Figura 5.e. 11. En este sitio, la erosión interna de la capa observada al nivel del agua dejó sin soporte a las capas superiores que se *derrumbaron* por desprendimiento, dejando colgada la protección contra erosión fluvial que resultó inútil para evitar este tipo de erosión marginal.



Figura 5.e. 12. En "La Pigua" también se presentó un hundimiento del terreno bajo un terraplén reforzado ("tierra armada"), apareciendo en superficie una oquedad importante. Nótese la inclinación hacia el cauce de la margen hundida, lo que no corresponde a una falla circular.



Figura 5.e. 13. Hundimiento bajo una "protección" de colchacrete.



Figura 5.e. 14. Hundimiento bajo una "protección" de costales de mortero.



**Figura 5.e. 15.** Donde fue posible observar los extremos de las protecciones contra la erosión fluvial, se halló que tras éstas el suelo superficial ha sido erosionado, siendo posible que la causa sea el arrastre de partículas cuando el flujo subterráneo alcanza la superficie. En este caso es el extremo de aguas arriba de la protección.



**Figura 5.e. 16 y 17. De manera similar al caso de la fotografía anterior, donde se encontró abierta la protección contra la erosión fluvial, se halló que tras éstas el suelo superficial ha sido erosionado, siendo el desfogue del flujo subterráneo la causa más probable.**



**Figura 5.e. 18. Mismo pie de fotografía que la fotografía 12, sólo que en este caso se trata del extremo de aguas abajo de la protección.**



Figura 5.e.s 19 y 20. En la margen izquierda del Río Carrizal, en el tramo d la Zona Industrial de Villahermosa, se presentó la evidencia más clara de erosión interna cuando, sin corrimiento de la margen se hundió la superficie junto a ella, dejando ver importantes oquedades bajo el bloque caído.

VTF





Figura 5.e. 21. Algún efecto dispersivo parecen tener las aguas negras, pues en distintos sitios donde las descargas escurren sobre la margen, ésta resulta notablemente más erosionada que sus flancos, como en este sitio *protegido* de la margen derecha de un brazo de Río Usumacinta, en Balancán, donde el agua negra se infiltra entre las tabletas de concreto de la protección.



Figura 5.e. 22. Consecuencias similares en una descarga en el Río Carrizal, en Villahermosa.



**Figura 5.e. 23.** En la margen derecha del Río Usumacinta, en Tenosique, alrededor de una descarga de drenaje municipal al lado del embarcadero, la erosión interna bajo el malecón ha adquirido dimensiones de consideración. De no atenderse con presteza este problema, la reparación y las consecuencias podrán ser extraordinariamente costosas, ya que la erosión avanza bajo la ciudad y puede existir bajo otros sitios.

### *Sondeos y pruebas de laboratorio*

#### **Sondeos**

Los estudios de la 3ª etapa del PHIT comprendieron la realización de 50 sondeos mixtos (penetración estándar con muestreo representativo continuo y muestreo inalterado con tubo Shelby) a una profundidad promedio de 15m.

Cada sondeo se denominó con cuatro caracteres: los dos primeros indican el orden consecutivo en que fueron ejecutados, el tercero la inicial del río (C: Carrizal, G: Grijalva, U: Usumacinta) y el cuarto la margen (I: izquierda, D: derecha). Así, por ejemplo, el sondeo 30 GD, fue el 30º ejecutado y se realizó en la margen Derecha del Grijalva. Los perfiles estratigráficos y geotécnicos de todos los sondeos realizados se presentan en el **Anexo A**.

Aunque en cada perfil se indican las coordenadas UTM del sitio respectivo, en las figuras siguientes se muestra la ubicación de los sitios en donde se realizaron sondeos mixtos alrededor de la ciudad de Villahermosa, así como en Tenosique, Balancán y Emiliano Zapata, cabeceras municipales ribereñas del río Usumacinta.

VJF



Figura 5.e. 24. Localización de los sondeos en los ríos Grijalva y Carrizal (foto Google Earth).



Figura 5.e. 25. Localización de los sondeos en Balancán, sobre la margen derecha de un brazo del Río Usumacinta. (foto Google Earth).



Figura 5.e. 26. Localización de los sondeos en Emiliano Zapata, sobre la margen izquierda del Río Usumacinta. (foto Google Earth).



Figura 5.e. 27. Localización de los sondeos en Tenosique, sobre la margen derecha del Río Usumacinta. (foto Google Earth).

VJ

### *Pruebas de laboratorio*

A continuación se describen los ensayos de laboratorio y observaciones al microscopio realizados con la intención de explicar las causas de la inconsistencia y de la erosión interna del subsuelo de las márgenes, en el entendido de que para su comprensión debe establecerse el contexto en que ocurre la inestabilidad:

- La cuenca es una de las más lluviosas del mundo y su superficie de infiltración es desproporcionalmente superior a la de las márgenes a través de las cuales brota el flujo subterráneo, ocasionando importantes fuerzas de filtración sobre las partículas del subsuelo y la consiguiente erosión interna en la proximidad de las superficies por las que el agua subterránea brota a la superficie.
- El territorio tabasqueño se ha formado ganando terreno al mar con el depósito de los detritos de erosión de la Sierra de Chiapas, en un clima cálido y húmedo, propicio para el desarrollo de una biósfera vasta, exuberante y permanente, cuyos abundantes residuos forman parte importante del subsuelo de la planicie.
- La cuenca tabasqueña está coronada por una amplia franja de rocas carbonatadas y paradójicamente no es mucha la calcita hallada en el subsuelo.
- Además de la abundancia de arcillas, en la mayoría de las muestras recuperadas de los sondeos se encontró mica, lo que hace suponer la pasada existencia de una superficie de rocas volcánicas muy superior a la de los escasos volcanes que hoy presenta la cuenca.

Por lo anterior y aprovechando que se contaba con las muestras restantes de los 50 sondeos realizados para la 3ª etapa del PHIT, se realizaron las siguientes pruebas de laboratorio y estudios:

- Determinación de la salinidad, el *pH* y el porcentaje de oxígeno disuelto, en las 1090 muestras disponibles.

Asimismo, en muestras representativas de los suelos donde hay vestigios de erosión interna, distribuidos estratégicamente a lo largo de los tramos estudiados:

- Determinación del contenido de fosfatos en 62 muestras.
- 66 pruebas de desmoronamiento y dispersividad<sup>11</sup> (crumb test).
- 20 observaciones de microscopio óptico.
- 9 observaciones en microscopio de barrido electrónico.
- Refracciones de Rx para conocer los elementos químicos de las partículas de suelo.

### *Salinidad, pH, oxígeno disuelto*

#### **Salinidad**

Como ya se dijo, la salinidad del agua subterránea depende de condiciones particulares de cada sitio, pero para calificar la salinidad del agua, en general, la UNESCO<sup>12</sup> acepta la siguiente escala:

<sup>11</sup> U.S. Bureau of Reclamation, ***Characteristics and problems of dispersive clay soils***; R-91-09, Oct. 1991.

<sup>12</sup> UNESCO. 1981a. Escala práctica de salinidad 1978 y la Ecuación Internacional de estado del agua de mar 1980. *Tech. Pap. Mar. Sci.*, 36: 25 pp.

Salinidad del agua			
Agua dulce	Agua salobre	Agua de mar	Salmuera
< 0,05 %	0,05 – 3 %	3 – 5 %	> 5 %
< 0,5 ppt	0,5 – 30 ppt	30 – 50 ppt	> 50 ppt

Al respecto se precisa que los valores de salinidad que se reportan en este escrito están medidos en UPS<sup>13</sup>, que equivaldrían a los porcentajes (% , tercera línea) de la tabla anterior.

La salinidad, el *pH* y el oxígeno disuelto del agua intersticial fueron determinados con un medidor multiparamétrico *Hanna*, modelo HI 9828, conforme a la metodología propuesta por Jackson<sup>14</sup>, que continúa siendo la más aceptada internacionalmente. En las Figura 5.e.s 28, 29 y 30 se muestra el equipo utilizado y el procedimiento seguido.

Los perfiles de salinidad y *pH* de los 50 sondeos, emparejados con los perfiles estratigráficos y geotécnicos, que ya se habían presentado en el informe de la 3ª etapa del PHIT, se incluyen en el **Anexo A** de éste informe. A los perfiles mencionados se añadió también el de peso volumétrico seco, ya que dicho valor es un reflejo de la erosión interna y por tanto de la *colapsabilidad*. Se considera que un suelo es colapsable cuando su peso volumétrico seco es inferior a 12.0 kN/m<sup>3</sup> (C.F.E., 2011)<sup>15</sup>.

En los siguientes párrafos se discuten los aspectos de dichas mediciones pertinentes para la comprensión del comportamiento del suelo que conforma las márgenes de los ríos tabasqueños.

### pH

Es innecesario hacer aclaraciones adicionales respecto a las mediciones de *pH*.

### Oxígeno Disuelto

Los valores de oxígeno disuelto presentados en el *Anexo B* corresponden a la comparación entre la concentración de oxígeno en aire y en agua, pero como la medición se hizo en el laboratorio del Instituto de Ingeniería la comparación pierde sentido, lo que de todas formas no tiene importancia, tanto porque hacerlo en campo hubiera implicado su medición en el momento de extraer las muestras, cuando aún no se había previsto la problemática que aquí se discute,

<sup>13</sup> Antes de 1978, la salinidad o halinidad se expresaba como ‰, basándose en la relación de conductividad eléctrica de la muestra de "agua de Copenhage" (agua de manantial que se distribuye como una muestra estándar mundial). En 1978, los oceanógrafos redefinen la salinidad en **Unidades Prácticas de Salinidad** (UPS's): relación de conductividad de una muestra de agua de mar con una solución estándar de KCl. (1UPS = 1g/lit = 0.1ppt).

<sup>14</sup> Jackson, M.L., *Soil Chemical Analysis*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., U.S.A., 1964, ch.3, p.41.

<sup>15</sup> Comisión Federal de Electricidad, **Cimentaciones para estructuras de líneas de transmisión**, Especificación CFE JA100-64, agosto de 2011.

como porque la presencia de oxígeno disuelto no tiene implicaciones en lo tratado. Por lo anterior no se presentan gráficas ni se discuten los valores registrados.



Figura 5.e. 28. Medición de salinidad, pH y OD de las muestras; pueden observarse los vasos con las muestras diluidas en agua destilada, el líquido azul para calibración de la sonda, el medidor y la sonda.



Figura 5.e. 29. Medidor multiparamétrico Hanna HI 9828.



Figura 5.e. 30. Sonda del medidor multiparamétrico *Hanna HI 9828*.

### Fosfatos

Debido a que los fosfatos son aniones de importante poder defloculante de las arcillas y a que es un componente frecuente de los fertilizantes agrícolas, se consideró probable que estuviese presente en el agua subterránea de las márgenes, por lo que se eligieron 62 muestras convenientemente distribuidas, las que se repartieron entre el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria del Instituto de Ingeniería, y en el Laboratorio de Química de la Facultad de Química, ambos de la UNAM.

En todos los casos los valores reportados fueron menores al 1%, por lo que se descartó la posibilidad de que en la erosión interna influyeran los fosfatos. Los registros con los resultados correspondientes se presentan en el Anexo C.

Para la determinación del contenido de fosfatos se usó el método de *Cromatografía de Iones*<sup>16</sup> y las muestras fueron preparadas conforme a lo recomendado por Thomas *et al*<sup>17</sup>.

<sup>16</sup> Pfaff, J.D., *Determination of inorganic anions by ion chromatography*, Environmental Monitoring Systems Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio 45268, Revision 2.1, August 1993.

<sup>17</sup> Thomas, D.H., M. Rey & P.E. Jackson, *Determination of inorganic cations and ammonium in environmental waters by ion chromatography with a high-capacity cation-exchange column*, Journal of Chromatography A, 956 (2002) 181–186





Figura 5.e. 31. Secado de muestras para determinación de fosfatos y de muestras para observación en el microscopio electrónico.



Figura 5.e. 32. Equipo para la determinación de fosfatos por cromatografía de iones.

### Desmoronamiento y dispersividad

También se supuso la posibilidad de que las arcillas de los suelos estudiados fueran dispersivas, por lo que se realizaron 63 determinaciones de desmoronamiento y dispersividad (crumbl test), conforme al procedimiento recomendado por el USBR<sup>18</sup>, los resultados en las condiciones de laboratorio, presentadas en el **Anexo D**, descartan que pueda considerarse como dispersivas a las arcillas de la Planicie Tabasqueña, aunque algunas mostraron poca tendencia al desmoronamiento. Lo anterior puede significar que sin cargas adicionales a su propio peso los especímenes son estables, pero que bajo las cargas, el flujo subterráneo ácido y las fuerzas de filtración presentes en el sitio su respuesta es diferente; asimismo debe tenerse en cuenta que los ensayos aquí reportados se realizaron varios meses después de extraídas las muestras.

### Peso volumétrico seco

Como se mencionó anteriormente, un suelo cuyo peso volumétrico es inferior a  $12\text{kN/m}^3$  tiene tal porcentaje de oquedades que se considera colapsable<sup>19</sup>. Por lo que se graficaron los perfiles correspondientes para todos los sondeos (**Anexo A**), encontrándose que una proporción que probablemente mayor al 50% de las muestras extraídas de los 44 sondeos realizados en las márgenes de los ríos Carrizal y Grijalva son colapsables.

### Observaciones con microscopio

#### Microscopio Óptico

Con el microscopio óptico del laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería que se muestra en la Figura 5.e. 28 se realizaron 20 observaciones en 18 muestras representativas de diversos sitios y características.

Debe mencionarse que el microscopio funciona con iluminación inferior, lo que impide observar muestras opacas, por lo que aunque se usaron objetivos 25X, 100X y 400X, lo que sobrepuesto a la amplificación 10X del equipo, permitió amplificaciones de 250, 1,000 y 4,000 veces. Debido a que la iluminación de la muestra es desde abajo, éstas debieron embarrarse en los portaobjetos para dejar capas translúcidas, lo que impidió observar las estructuras inalteradas, sin embargo fue posible observar la distribución granulométrica, la forma de las partículas y la presencia de materia orgánica.

---

<sup>18</sup> Knodel, P.C., United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, *Characteristics and Problems of Dispersive Clay Soils*, pub. R-31-09, p. 5, Oct 1991

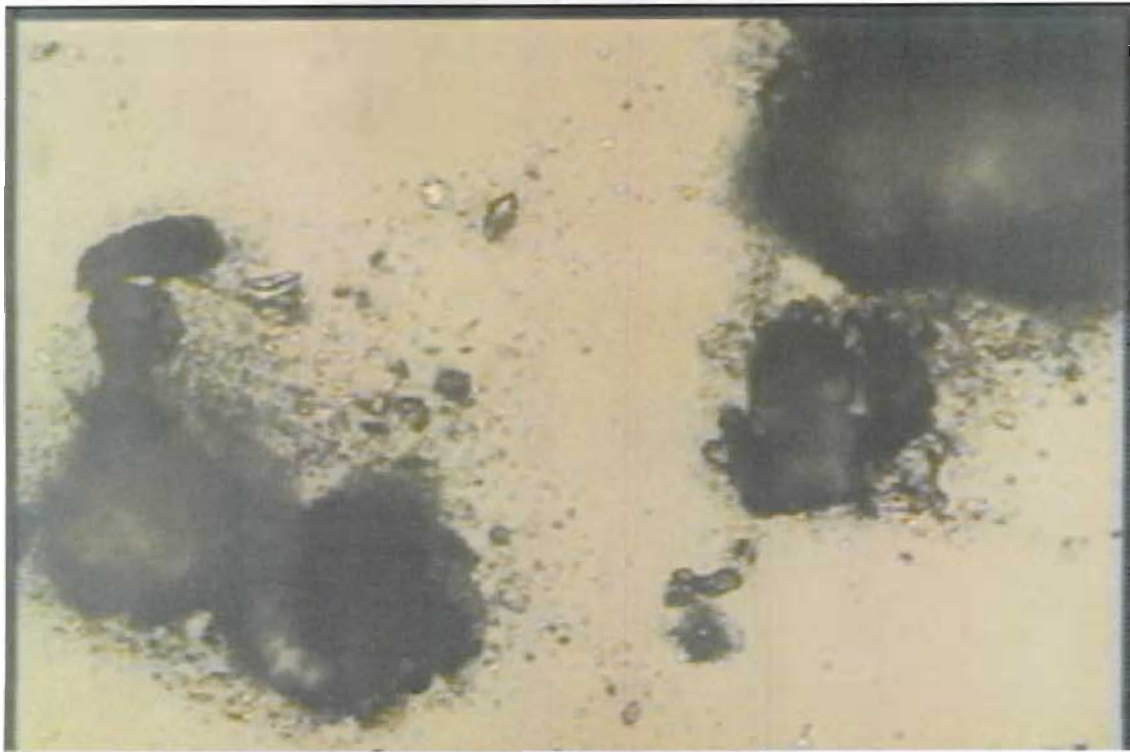
<sup>19</sup> Comisión Federal de Electricidad, op. cit.



**Figura 5.e. 33. Microscopio óptico del laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería.**

El procedimiento para cada observación consistió en colocar un fragmento del orden de  $0.5 \text{ cm}^3$  sobre el portaobjetos, agregarle 3 o 4 gotas de agua destilada y esparcir el suelo con una espátula hasta dejar una capa translúcida que permitiera el paso de la luz inferior. Una vez colocado el portaobjetos con la muestra en el microscopio se eligió el objetivo que permitiera observar las características deseadas, se recorrió la muestra hasta encontrar un campo visual apropiado y se guardó la fotografía de la observación.

En la Figura 5.e. 34 se presenta la observación de una muestra amplificada 1,000 veces, obtenida a 4.5m de profundidad en el sondeo 10-CD, el suelo corresponde a una arena de calcita de bordes subredondeados por transporte, con muy poco limo *residuo* de la miama arena e importante contenido de materia orgánica que parece formar biopelículas alrededor de las partículas minerales.



**Figura 5.e. 34. Sondeo 10-CD, muestra 8, prof: 4.5m., 100X, Arena fina escasamente limosa. Nótese la cubierta de materia orgánica (negra) alrededor de las partículas de calcita.**

La Figura 5.e. 35 presenta arena fina de calcita, obtenida a 6.3m de profundidad en el sondeo 19-CI. La toma, amplificada 1,000 veces permite ver los bordes poco desgastados, que delatan la estructura romboidal de los cristales, una distribución granulométrica no muy bien graduada y gran cantidad de materia orgánica que quizá antes de la manipulación estuviera formando biopelículas alrededor de los cristales.



**Figura 5.e. 35. Sondeo 19-CI, muestra 11, prof: 6.3m., 100X, Arena fina (calcita). de aristas redondeadas y otras angulosas, poco limosa, con mica y materia orgánica.**

La toma presentada en la Figura 5.e. 36 corresponde a una arena aparentemente cuarcífera, poco limosa, procedente de 5,7 m de profundidad, obtenida en el sondeo 45-UD en la margen derecha del río Usumacinta, en la ciudad de Balancán. La redondez de las partículas, que parecen ser de cuarzo, delata un largo transporte y pocos finos limosos; se trata de un suelo no cohesivo y con poca materia orgánica.

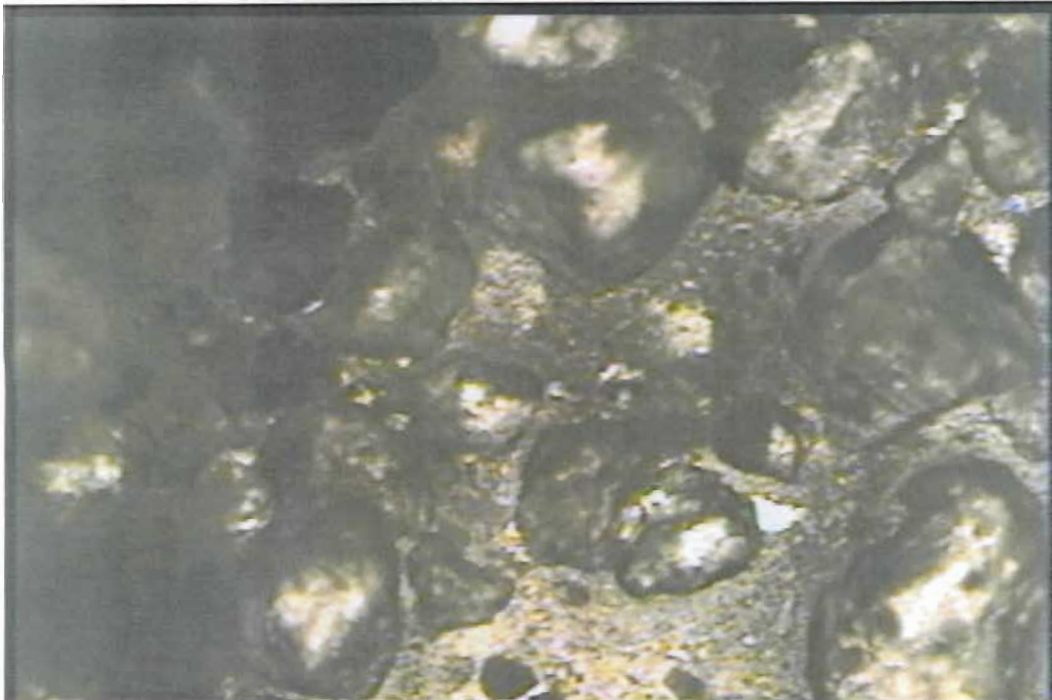


Figura 5.e. 36. Sondeo 45-UD (Balancán), muestra 10, prof: 5.7m., 25X, Arena fina (cuarzo) de aristas redondeadas, escasamente limosa, con mica.

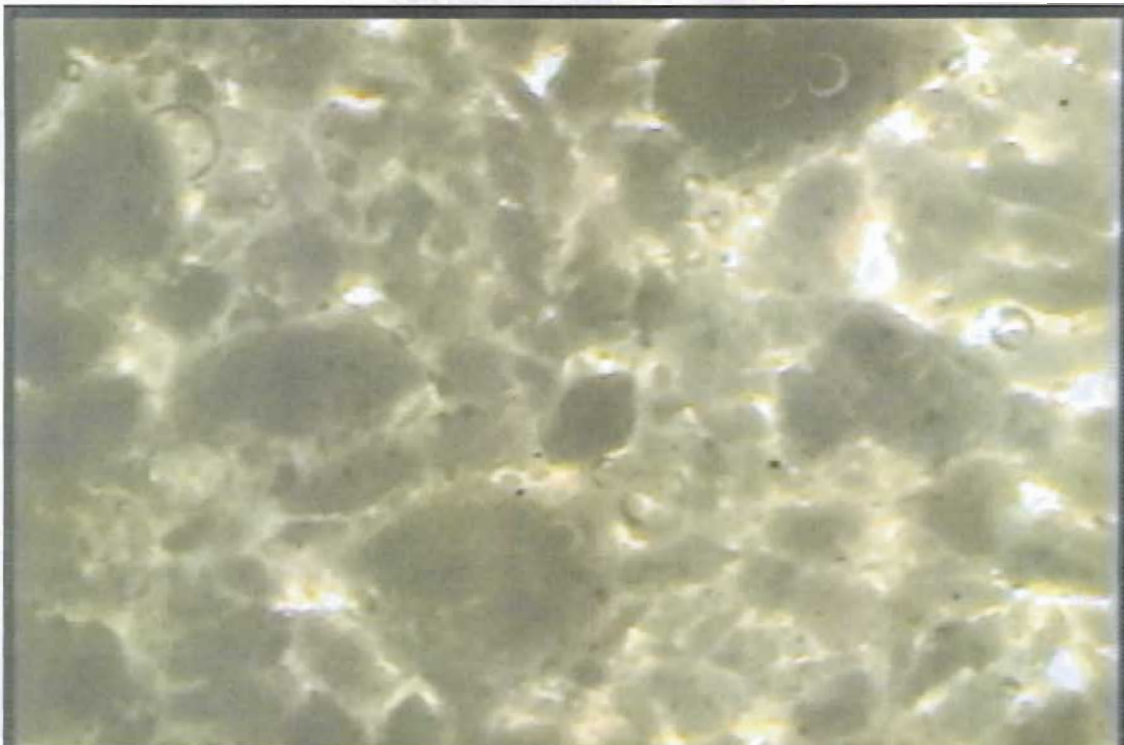


Figura 5.e. 37. Sondeo 45-UD (Balancán), muestra 14, prof: 8.7m., 25X, Arcilla gris verdoso claro, con grumos de calcita. Nótese la falta de cohesión entre partículas y la porosidad.

La arena uniforme redondeada, no cohesiva y aparentemente cuarcífera, obtenida a 5.7m de profundidad en el sondeo 46-UI realizado en la margen izquierda del río Usumacinta, en la ciudad de Emiliano Zapata. La toma amplificada 250 veces muestra algo de materia orgánica y ausencia de finos.



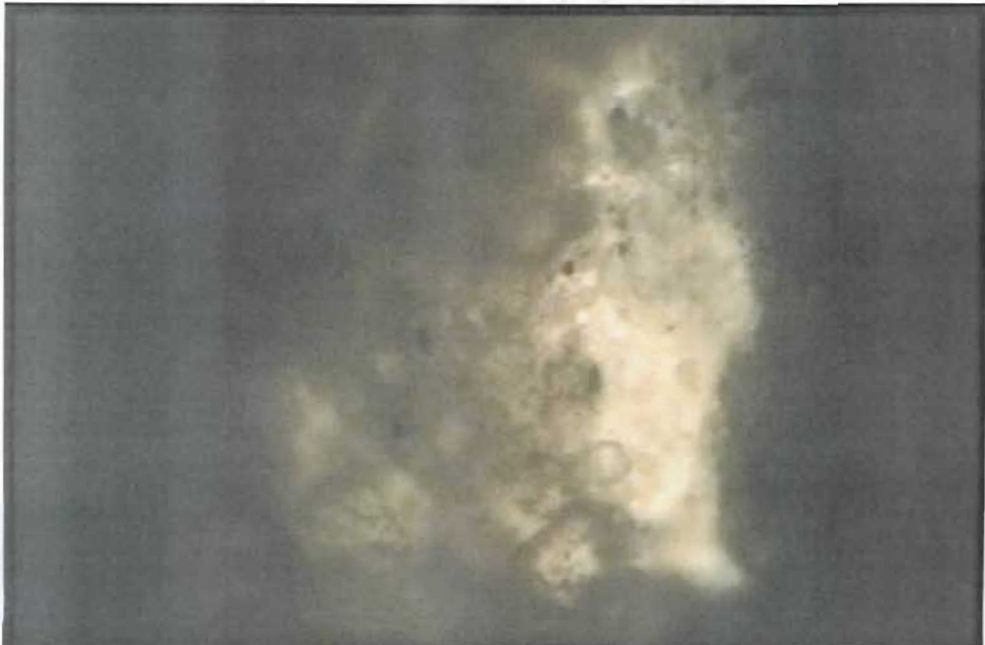
**Figura 5.e. 38. Sondeo 46-UI (E. Zapata), muestra 10, prof: 5.7m., 25X, Arena fina (cuarzo) de aristas redondeadas, sin finos, con materia orgánica.**

La toma presentada en la Figura 5.e. 39, amplificada 1,000 veces muestra arena fina, angulosa, aparentemente de calcita; la turbidez podría delatar la presencia de materia orgánica. La mancha oscura de la parte superior parece corresponder a un ferromagnesiano. Antes de la manipulación, la muestra fue clasificada como arcilla limosa con poca arena. Los finos fueron lavados por el exceso de agua destilada requerido para adelgazar la muestra hasta hacerla translúcida. La muestra proviene de 6.9m de profundidad en la margen izquierda del río Usumacinta en la ciudad de Tenosique.



**Figura 5.e. 39. Sondeo 48-UI (Tenosique), muestra 11, prof: 6.9m., 100X, La muestra, antes de la manipulación corresponde a arcilla limosa con poca arena angulosa (calcita) y grumos de calcita.**

En la Figura 5.e. 40 se presenta el intersticio de una muestra de arcilla limosa poco arenosa, amplificada 1,000 veces y los alrededores oscuros podrían corresponder a materia orgánica, sin embargo el intersticio sólo muestra arena muy fina y limo de aristas redondeadas, probablemente de cuarzo, con pocas partículas ferromagnesianas.



**Figura 5.e. 40. Sondeo 04-Cf (Villahermosa), muestra 16, prof: 9.3m., 100X, Arcilla limosa con poca arena subredondeada (calcita), con mica y con materia orgánica.**

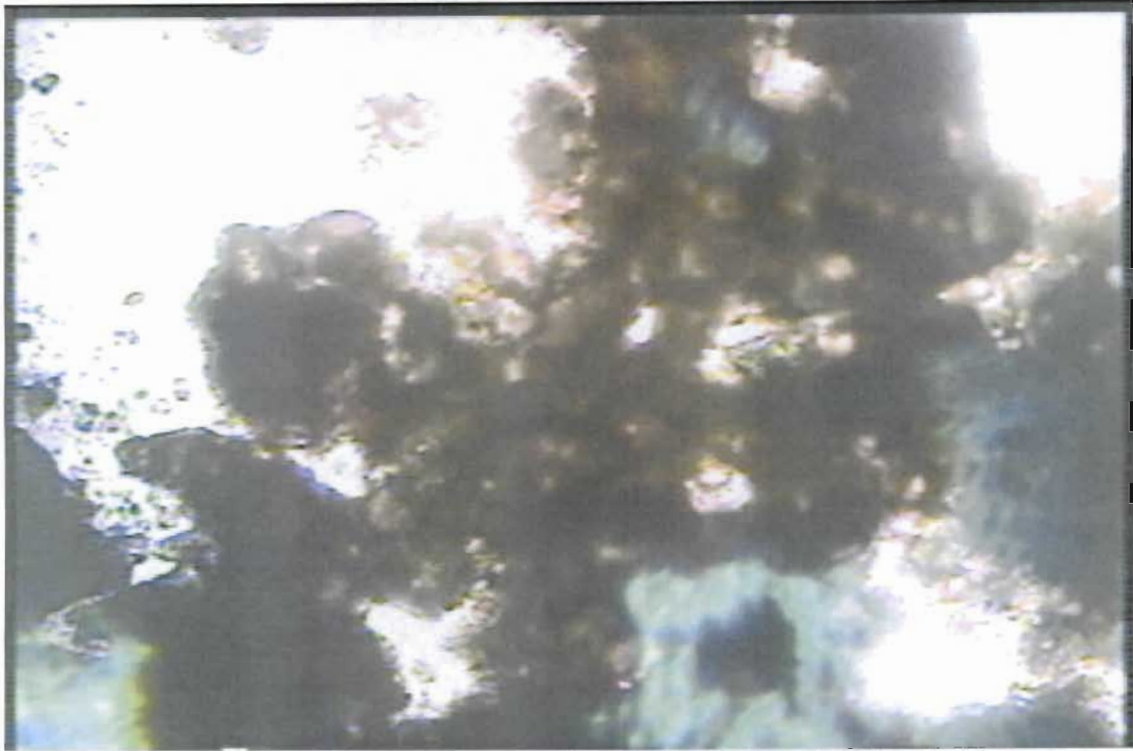


Obtenida de 9.3m de profundidad, la imagen de la Figura 5.e. 41 muestra, ampliada 4,000 veces un área muy diluida de lo que antes de su colocación en el portaobjetos fue una arcilla limosa con poca arena fina. La angulosidad de la arena parece corresponder a calcita, y las zonas más oscuras muy probablemente son materia orgánica, lo que parece corroborar la turbidez del medio acuoso.



**Figura 5.e. 41. Sondeo 04-CI (Villahermosa), muestra 16, prof: 9.3m., 400X, Arcilla limosa con poca arena angulosa (calcita).**

La imagen ampliada 250 veces que se presenta en la Figura 5.e. 42, corresponde a una arcilla poco limosa, con muy poca arena fina y con una apreciable cantidad de materia orgánica que cubre varias partículas minerales, redondeadas. Algunas partículas e arena parecen de calcita. La muestra fue sacada de 5.7m de profundidad en el sondeo 46-CI, de la margen izquierda del río Carrizal.



**Figura 5.e. 42. Sondeo 16-CI (Villahermosa), muestra 10, prof: 5.7m., 25X, Arcilla poco limosa con escasa arena redondeada y materia orgánica.**

En la Figura 5.e. 43 se presenta la imagen, amplificada 1,000 veces, de una arcilla poco limosa y con muy poca arena. La zona oscura del lado izquierdo parece corresponder a materia orgánica, los cristales rosa-naranja podrían ser feldespatos y las partículas oscuras ferromagnesianas. El conjunto tiene la apariencia de un gel, lo que podría deberse a una considerable cantidad de materia orgánica, de hecho, la partícula alargada de color rojizo oscuro, que aparece en la parte inferior central izquierda. Se trata de una muestra de 5.1m de profundidad, obtenida de la margen izquierda del río Carrizal.



**Figura 5.e. 43. Sondeo 27-CI (Villahermosa), muestra 09, prof: 5.1m., 100X, Arcilla poco limosa con escasa arena redondeada (calcita) y materia orgánica.**

Otro campo de la muestra de la Figura 5.e. anterior, amplificado 4,000 veces, se muestra en la Figura 5.e. 44, que parece indicar un predominio de partículas de origen ígneo (cuarzo, feldespatos y ferromagnesianos), así como la apariencia de gel y una zona sombreada de materia orgánica.



**Figura 5.e. 44. Sondeo 27-CI (Villahermosa), muestra 09, prof: 5.1m., 400X, Arcilla poco limosa con escasa arena redondeada y materia orgánica.**

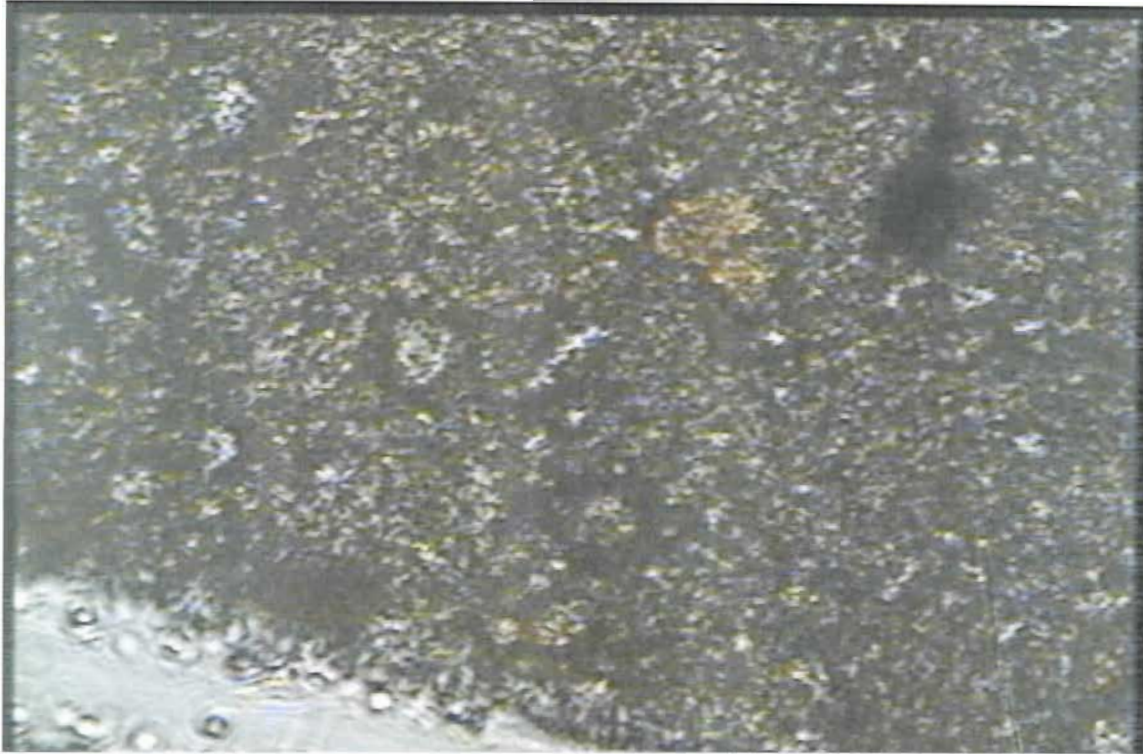
En la Figura 5.e. 45 se muestra la imagen de lo que a simple vista parece arcilla con poca arena fina y algunas oxidaciones, y que en este campo, amplificado 250 veces, tiene apariencia de limo con poca arena fina y ferromagnesianos. Las diagonales blancas son surcos dejados por partículas de arena durante la preparación, que corresponde a una muestra de la margen derecha del río Grijalva, de 5.7 m de profundidad, obtenida en el sondeo 34.



**Figura 5.e. 45. Sondeo 34-GD (Villahermosa), muestra 10, prof: 5.7m., 25X, Arcilla con poca arena fina y oxidaciones.**

Otro campo de la muestra presentada en la figura anterior, amplificado 4,000 veces, permite distinguir que las partículas de arena fina y limo están rodeadas de materia orgánica. A simple vista y al tacto la muestra se clasifica como arcilla con poca arena fina y con oxidaciones, lo que parece haberse modificado por el procedimiento requerido para observarla en el microscopio de luz inferior, que aunque resulta útil para distinguir algunos objetos requirió el diluido de la muestra y la destrucción de su estructura.





**Figura 5.e. 46. Sondeo 34-GD (Villahermosa), muestra 10, prof: 5.7m., 400X, Aspecto de una arcilla con poca arena fina y oxidaciones.**

Procedente del mismo sondeo 34 de la margen derecha del río Grijalva, pero de 14.7m de profundidad, la Figura 5.e. 47 presenta lo que a simple vista y al tacto se clasificó como arcilla poco limosa con muy poca arena y materia orgánica, y que amplificada 1,000 veces, después de manipulada por el procedimiento de montaje en el microscopio, permite distinguir partículas de arena y limo de cuarzo cubiertas por una considerable cantidad de materia orgánica (biopelículas).

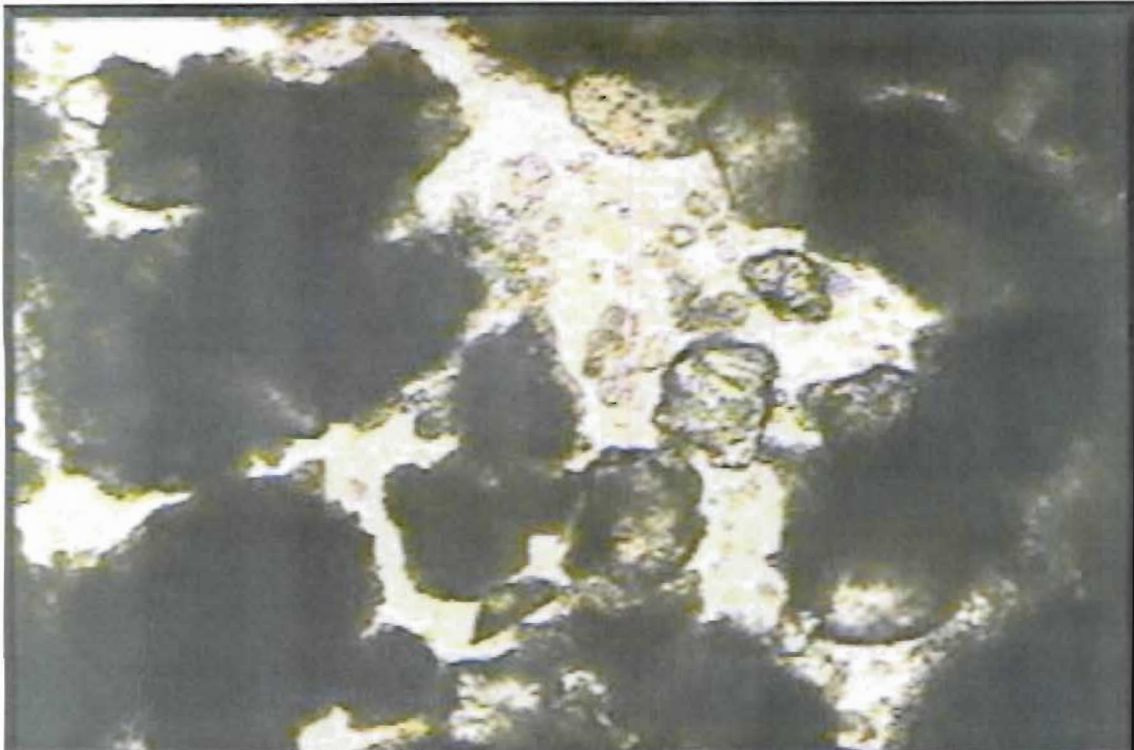


Figura 5.e. 47. Sondeo 34-GD (Villahermosa), muestra 25, prof: 14.7m., 100X, Arcilla poco limosa con escasa arena fina y materia orgánica.

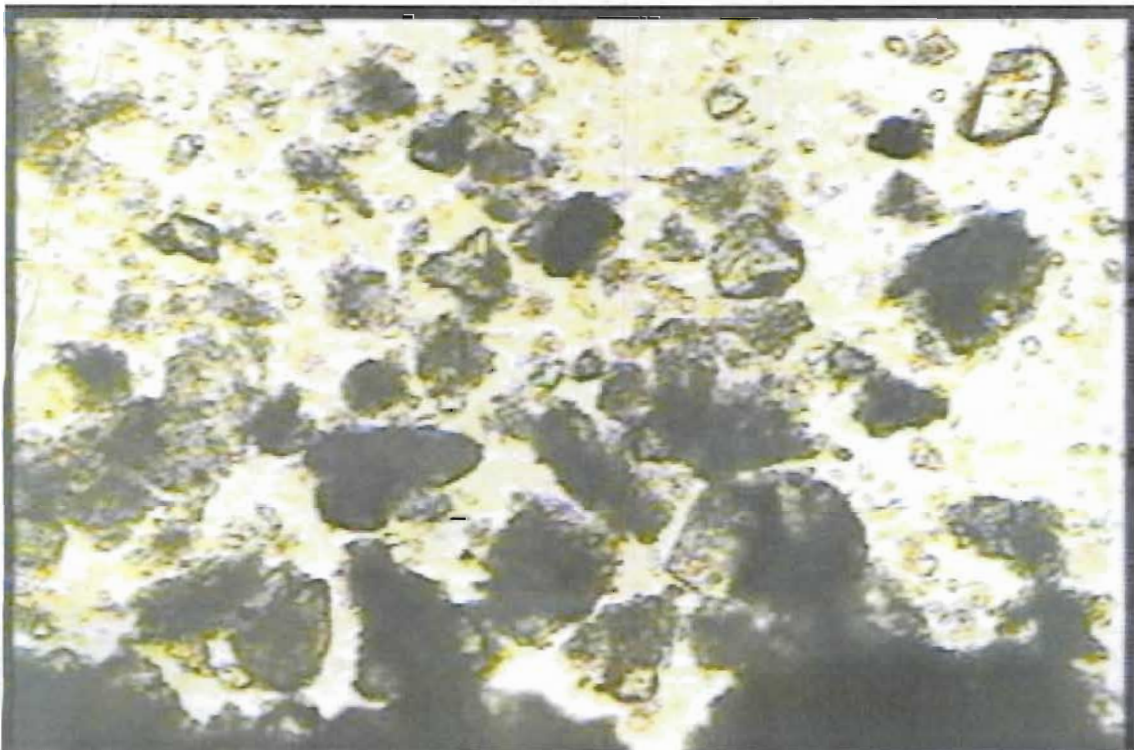
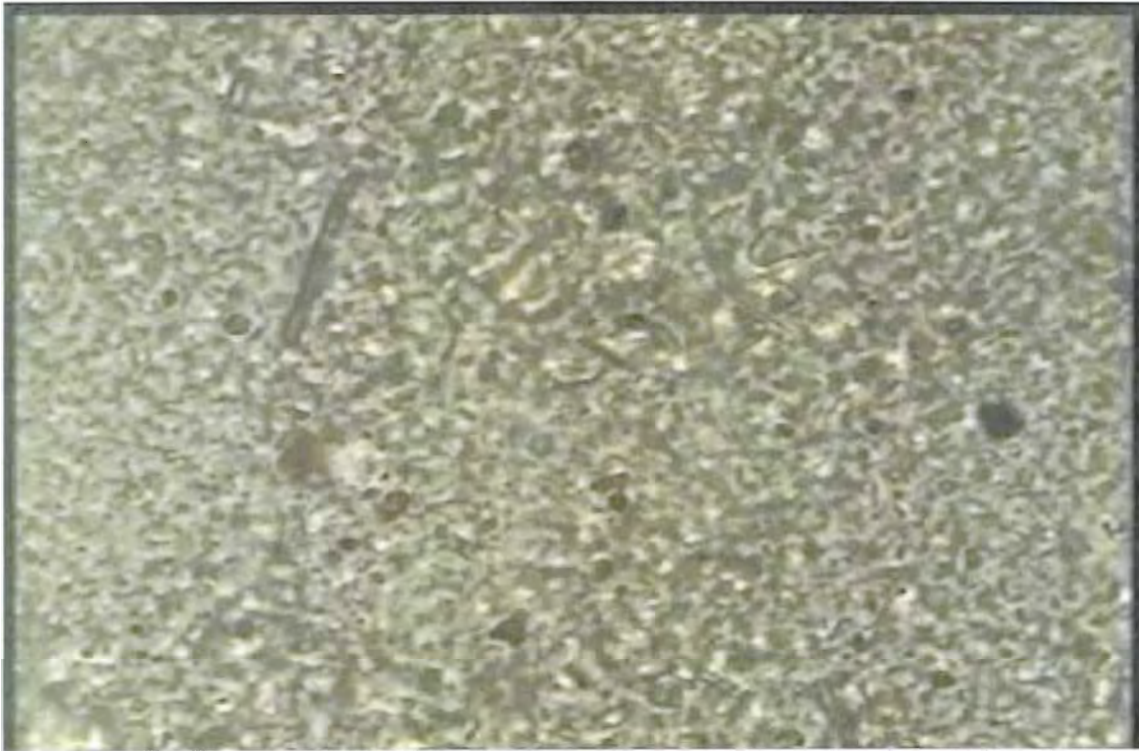


Figura 5.e. 48. Sondeo 34-GD (Villahermosa), muestra 25, prof: 14.7m., 100X, Arcilla poco limosa con escasa arena fina y materia orgánica.

A handwritten signature or set of initials in black ink, located in the bottom right corner of the page.

En la Figura 5.e. 49 se presenta, amplificada 1,000 veces, la imagen de una muestra recuperada a 4.5 m en el sondeo 2, realizado en la margen izquierda del río Carrizal, que visualmente y al tacto fue clasificada como limo con arena fina, fósiles y materia orgánica, descripción que no parece cambiar observándola al microscopio, donde puede añadirse que se trata de un suelo no cohesivo formado por partículas minerales y orgánicas, inmersas en un gel.



**Figura 5.e. 49. Sondeo 02-CI (Villahermosa), muestra 07, prof: 4.5m., 100X, Limo con arena fina (calcita), fósiles, mica y materia orgánica.**

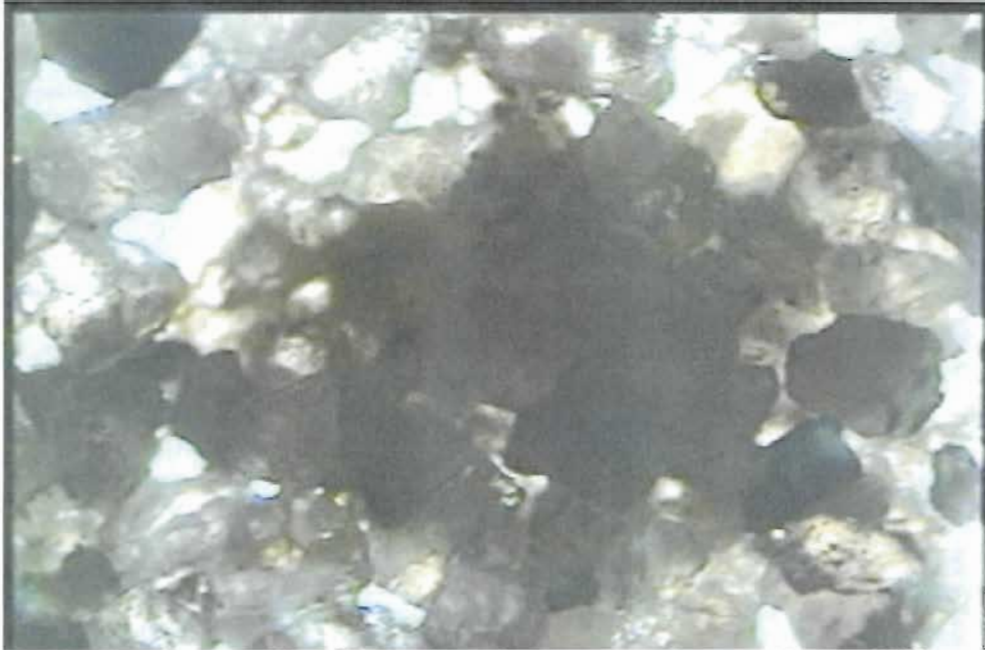
Otro campo de la observación presentada en la figura anterior se muestra en la Figura 5.e. 50, donde el aglutinante sigue cumpliendo su función a pesar de lo delgado de la capa, siendo posible distinguir a las partículas minerales como preponderantemente cuarcíferas.



**Figura 5.e. 50. Sondeo 02-CI (Villahermosa), muestra 07, prof: 4.5m., 100X, Limo con arena fina (calcita), fósiles, mica y materia orgánica.**

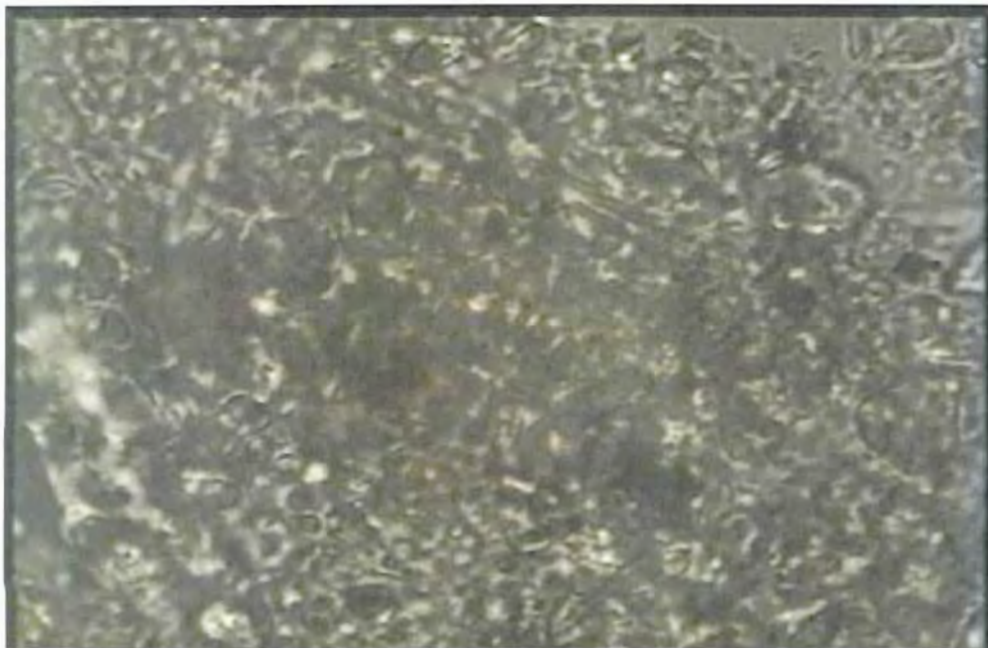
La Figura 5.e. 51 presenta la imagen, amplificada 250 veces, de una muestra clasificada al tacto y visualmente como arena fina y media, polimíctica, con mica y muy pocos finos de limo y arcilla. Al microscopio no se distingue la arcilla que quizá fue lavada durante la preparación de la muestra y la arena es demasiado angulosa como para haber llegado suelta hasta Villahermosa, donde fue colectada de una profundidad de 5.7m en el sondeo 10 realizado en la margen derecha del río Carrizal. La zona sombreada del centro parece ser materia orgánica.





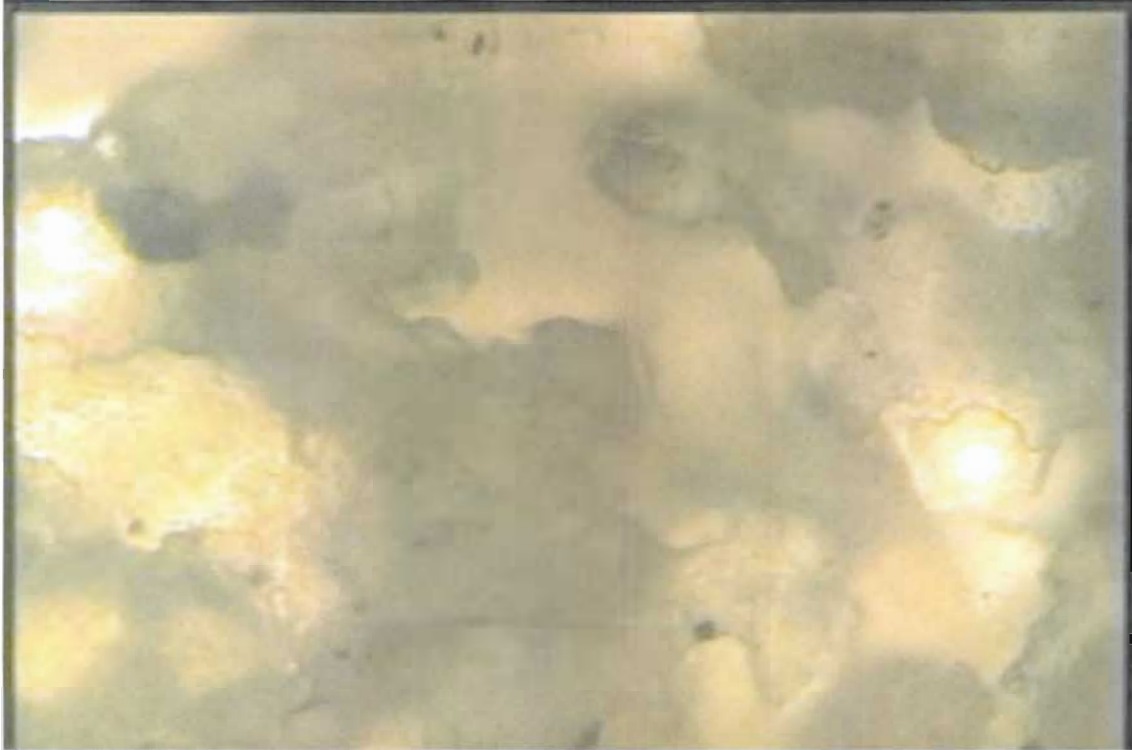
**Figura 5.e. 51. Sondeo 10-CD (Villahermosa), muestra 10, prof: 5.7m., 25X, arena fina y media (polimíctica), mica y escasos finos de limo y arcilla.**

La imagen amplificada 1,000 veces de una muestra que al tacto y visualmente fue clasificada como limo poco arcilloso con muy poca arena fina y materia orgánica, recuperada a 5.1m d profundidad de la margen izquierda del río Carrizal, en el sondeo 15, permite distinguir algunas bacterias filiformes, así como biopelículas alrededor de las partículas redondeadas, que efectivamente, parecen ser mayoritariamente limosas.



**Figura 5.e. 52. Sondeo 15-CI (Villahermosa), muestra 09, prof: 5.1m., 100X, limo poco arcilloso con escasa arena fina, con materia orgánica.**

En la Figura 5.e. 53 se presenta la imagen, ampliada 1,000 veces, de una arena fina de calcita, con limo del mismo mineral y escasos ferromagnesianos, todo en una matriz viscosa que seguramente contiene mucha materia orgánica. La muestra fue obtenida de 4.5 m de profundidad en el sondeo 36, efectuado en la margen derecha del río Grijalva.



**Figura 5.e. 53. Sondeo 36-GD (Villahermosa), muestra 08, prof: 4.5m., 100X, Arena (calcita) fina poco arcillolimososa, con mica.**

### **Microscopio electrónico y Refracción Rx**

#### **Microscopio electrónico**

Con el fin de inspeccionar la estructura interna de los suelos, en el microscopio de barrido electrónico del Instituto de Investigación en Materiales, de la U.N.A.M. se hicieron las observaciones que se presentan en las Figura 5.e.s 56 a 64.

Para ello se cortaron cuidadosamente fragmentos de aproximadamente  $0.5\text{cm}^3$  de muestras inalteradas, las que se fijaron mediante cinta adhesiva de carbono a unas bases cilíndricas de bronce, de 1 cm de diámetro, como se muestra en las Figura 5.e. 54, para posteriormente secarlas en un horno a  $110^\circ\text{C}$  durante 24 horas y conservarlas en un recipiente sellado conteniendo sílica gel para conservar las muestras totalmente secas, ya que cualquier cantidad de humedad se vaporizaría en el microscopio electrónico impidiendo cualquier observación; desafortunadamente, ese secado tan intenso provoca contracciones del suelo, modificando su estructura interna.



**Figura 5.e. 54. Muestra 14 del sondeo 13CD, de la margen derecha del río Carrizal, lista para su observación en el microscopio electrónico.**

En la Figura 5.e. 55 se muestra el microscopio electrónico durante una de las observaciones.

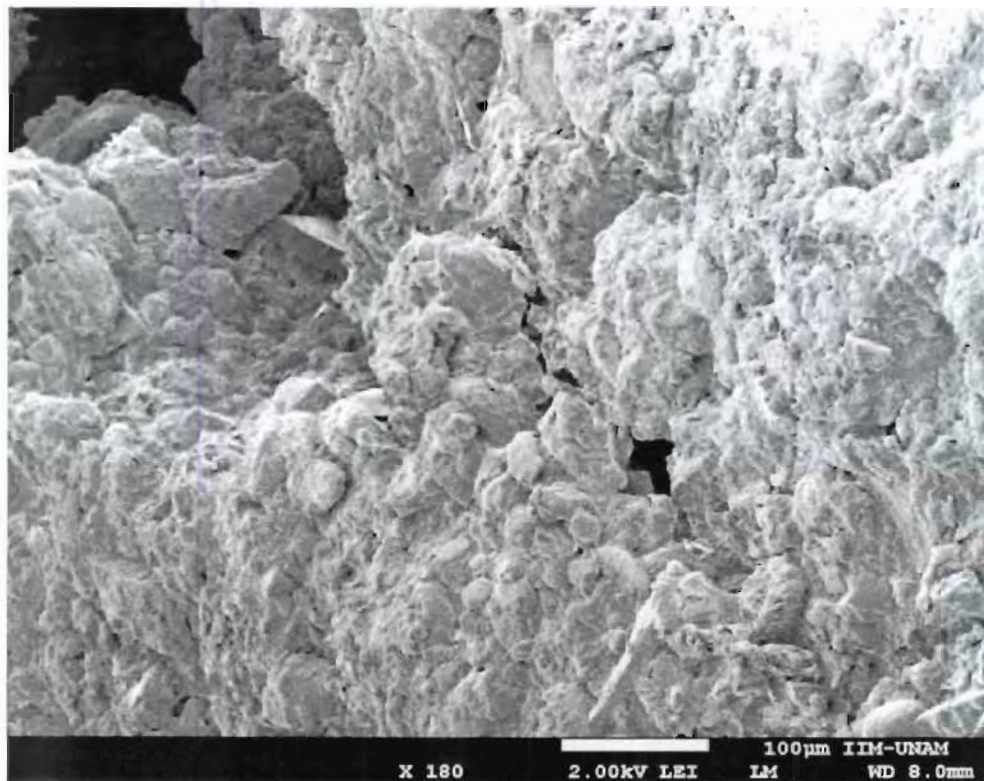


**Figura 5.e. 55. Vista del microscopio electrónico de barrido del Instituto de Investigación en Materiales de la UNAM.**

A continuación se presentan las nueve observaciones realizadas con el microscopio electrónico de barrido.

Debido a que la muestra obtenida a 12.3 m d profundidad en el sondeo 19, realizado en la margen izquierda del río Carrizal es representativa de los suelos de las márgenes a que se refiere el estudio, de ella se hicieron varias observaciones presentadas en las Figura 5.e.s 56 a 61. Al tacto y a simple vista el suelo se clasifica como arcilla poco limosa con poca arena fina y con materia orgánica, la que lamentablemente no podría observarse pues se hubiera consumido durante el secado. En todas las fotografías se presenta una escala gráfica.

En la Figura 5.e. 56 puede observarse una horadación cilíndrica que posiblemente contenía una raíz, aunque también podría tratarse de erosión por flujo subterráneo, al igual que la fisura diagonal, que aunque pudo ser ocasionada por contracción durante el secado presenta un ensanchamiento que no tiene ese origen.



**Figura 5.e. 56. Sondeo 19-CI (Villahermosa), muestra 21, prof: 12.3m. La escala gráfica de la parte inferior muestra una línea blanca que mide 100 micras.**

La Figura 5.e. 57 presenta un mayor agrandamiento de la imagen y permite ver los paquetes de partículas de arcilla, así como algunos orificios posiblemente causados por flujo. De la parte superior parece que fue arrancado el suelo faltante, lo que pudiera corresponder a erosión con el consiguiente desprendimiento de partículas.

A handwritten signature or set of initials, possibly 'VF', is located in the bottom right corner of the page.

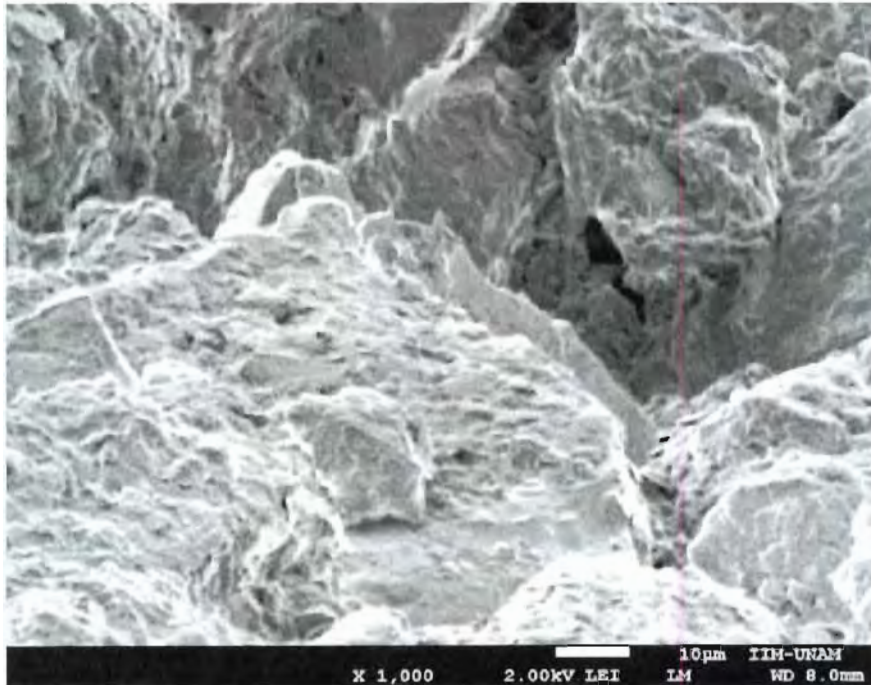


Figura 5.e. 57. Sondeo 19-CI (Villahermosa), muestra 21, prof: 12.3m. La escala gráfica de la parte inferior muestra una línea blanca que mide 10 micras.

En la figura 5.e.58 el aumento no es muy grande y puede verse el aspecto de la muestra a mayor distancia. Nótese los agrietamientos y ductos que afloran en la superficie de la muestra.



Figura 5.e. 58. Sondeo 19-CI (Villahermosa), muestra 21, prof: 12.3m. La escala gráfica de la parte inferior muestra una línea blanca que mide 100 micras.

La Figura 5.e. 59 presenta un gran acercamiento y puede verse la superficie de las partículas de arcilla, cuyas oquedades permitirían albergar bastante materia orgánica

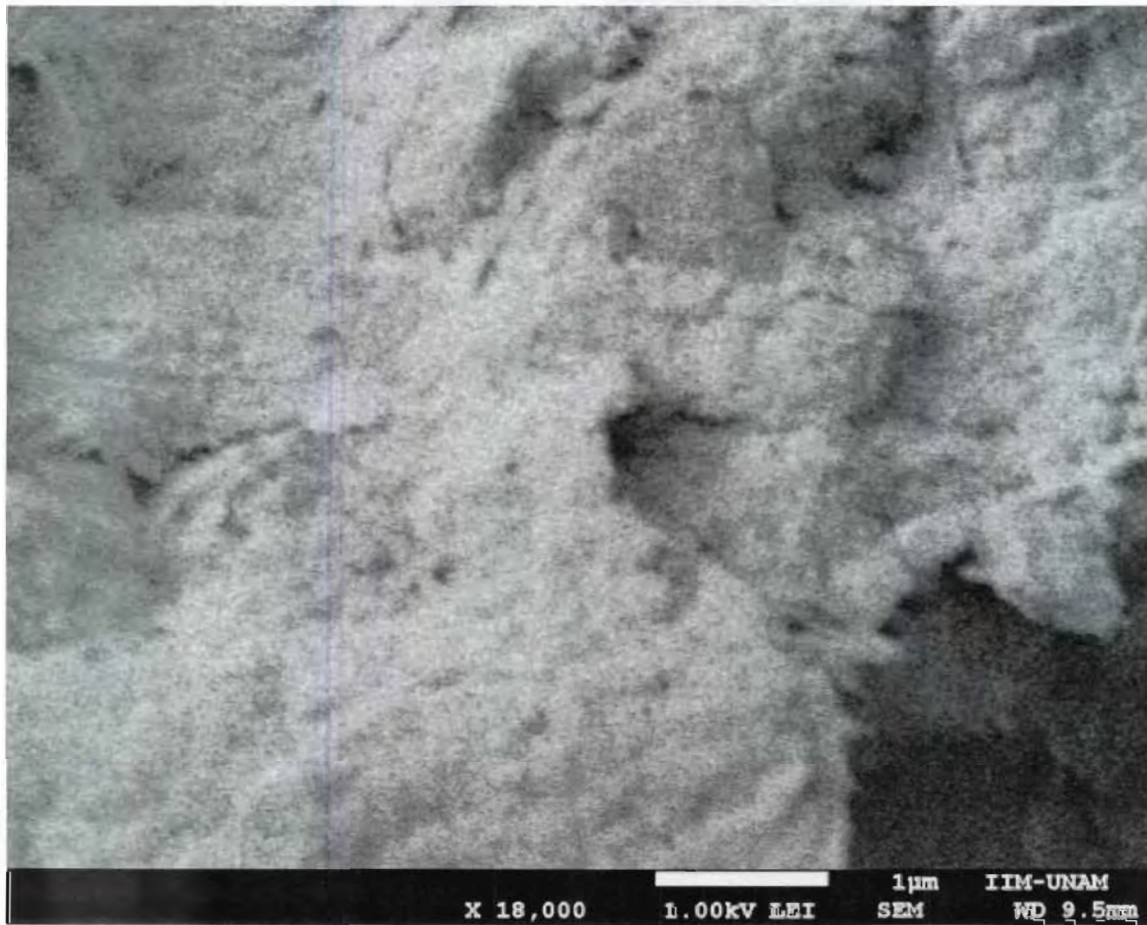


Figura 5.e. 59. Sondeo 19-CI (Villahermosa), muestra 21, prof: 12.3m. La escala gráfica de la parte inferior muestra una línea blanca que mide una micra.

Otro campo de la misma muestra es presentado en la Figura 5.e. 60, donde la horadación de la parte superior izquierda pudo haber estado ocupada por alguna raicilla, aunque se observan varias discontinuidades abiertas por las que el flujo seguramente pasa.

VF



Figura 5.e. 60. Sondeo 19-CI (Villahermosa), muestra 21, prof: 12.3m. La escala gráfica de la parte inferior muestra una línea blanca que mide diez micras.

La falta de coincidencia de formas en la discontinuidad vertical abierta que se presenta en la Figura 5.e. 61, descarta que haya sido originada por contracción durante el secado y permite suponer que se trata de erosión por flujo subterráneo. El ducto de la parte izquierda si parece ser el molde de una raicilla.

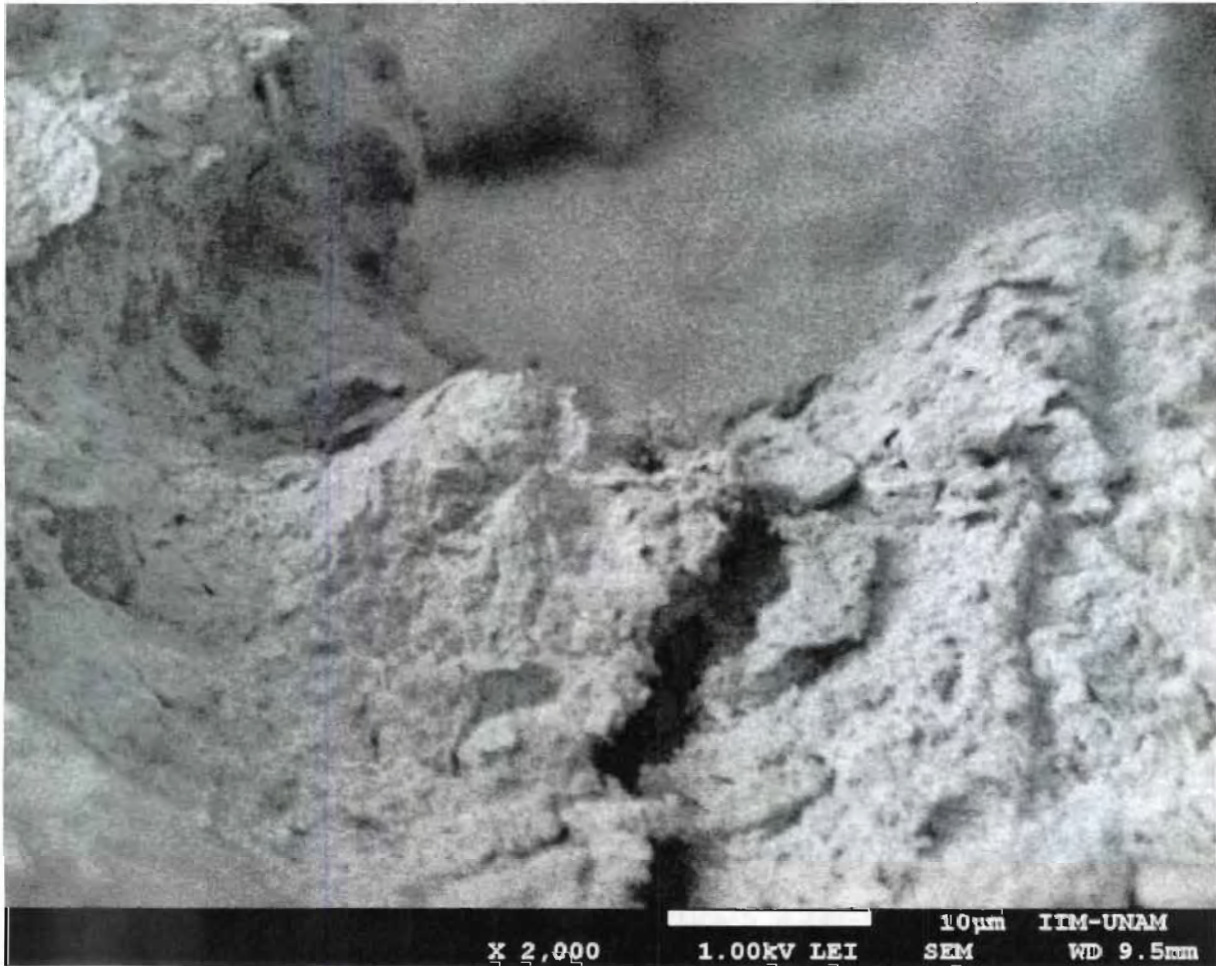


Figura 5.e. 61. Sondeo 19-CI (Villahermosa), muestra 21, prof: 12.3m. La escala gráfica de la parte inferior muestra una línea blanca que mide diez micras.

La Figura 5.e. 62 presenta una observación de una muestra de 7.5 m de profundidad obtenida en el sondeo 6 de la margen derecha del río Carrizal, que a simple vista se clasificó como arcilla limosa con escasa arena fina. La fotografía permite distinguir la estructura grumosa de esta arcilla, que permite el flujo entre los grumos. Algunas discontinuidades son mayores, como la de la parte inferior izquierda.





**Figura 5.e. 62. Sondeo 06-CD (Villahermosa), muestra 13, prof: 07.5m. La escala gráfica de la parte inferior muestra una línea blanca que mide diez micras.**

De la margen derecha del río Grijalva, a 5.7 m de profundidad se extrajo la muestra que se observa en la Figura 5.e. 63, y que a simple vista fue clasificada como arcilla poco limosa con escasa arena fina, con materia orgánica. Nótese las discontinuidades abiertas que no parecen originadas por contracciones por secado.



Figura 5.e. 63. Sondeo 32-GD (Villahermosa), muestra 10, prof: 5.7m. La escala gráfica de la parte inferior muestra una línea blanca que mide una micra.

Muy diferente a los anteriores es el aspecto de esta arcilla procedente de Tenosique, tomada del sondeo 48, a 4.5m de profundidad, en la margen izquierda del río Usumacinta, donde pequeños restos de materia orgánica se alojan en las discontinuidades abiertas. Los bordes romos parecieran resultado de la disolución.



Figura 5.e. 64. Sondeo 48-UI (Tenosique), muestra 07, prof: 4.5m. La escala gráfica de la parte inferior muestra una línea blanca que mide una micra.

### Refracción Rx

A continuación se presentan gráficas de refracción por rayos X para determinar la composición de algunas de las muestras observadas en el microscopio electrónico, aclarándose que las fechas impresas son incorrectas por falta de ajuste del equipo. Las determinaciones fueron realizadas en los institutos de Geología y de Investigación en Materiales, de la UNAM.

La Figura 5.e. 65 presenta el gráfico resultante de la refracción Rx realizada en la muestra 13 del sondeo 06CD, obtenida a 7.5m de profundidad en la margen derecha del río Carrizal, la que en orden decreciente contiene cuarzo, montmorilonita (esmedicta), illita, caolinita y anortita, es decir, es una composición francamente arcillosa.

Asimismo, la Figura 5.e. 66 presenta los resultados de la muestra 21 del sondeo 19CI, con predominio de los siguientes elementos, en orden decreciente: Oxígeno, Hierro, Silicio, Aluminio, Carbono y Magnesio, formando Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), Sílice ( $\text{SiO}_2$ ), Óxido de Magnesio ( $\text{MgO}$ ), Óxido de Aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y Hierro libre ( $\text{Fe}$ ), lo que manifiesta aportaciones tanto de las calizas como de rocas volcánicas.

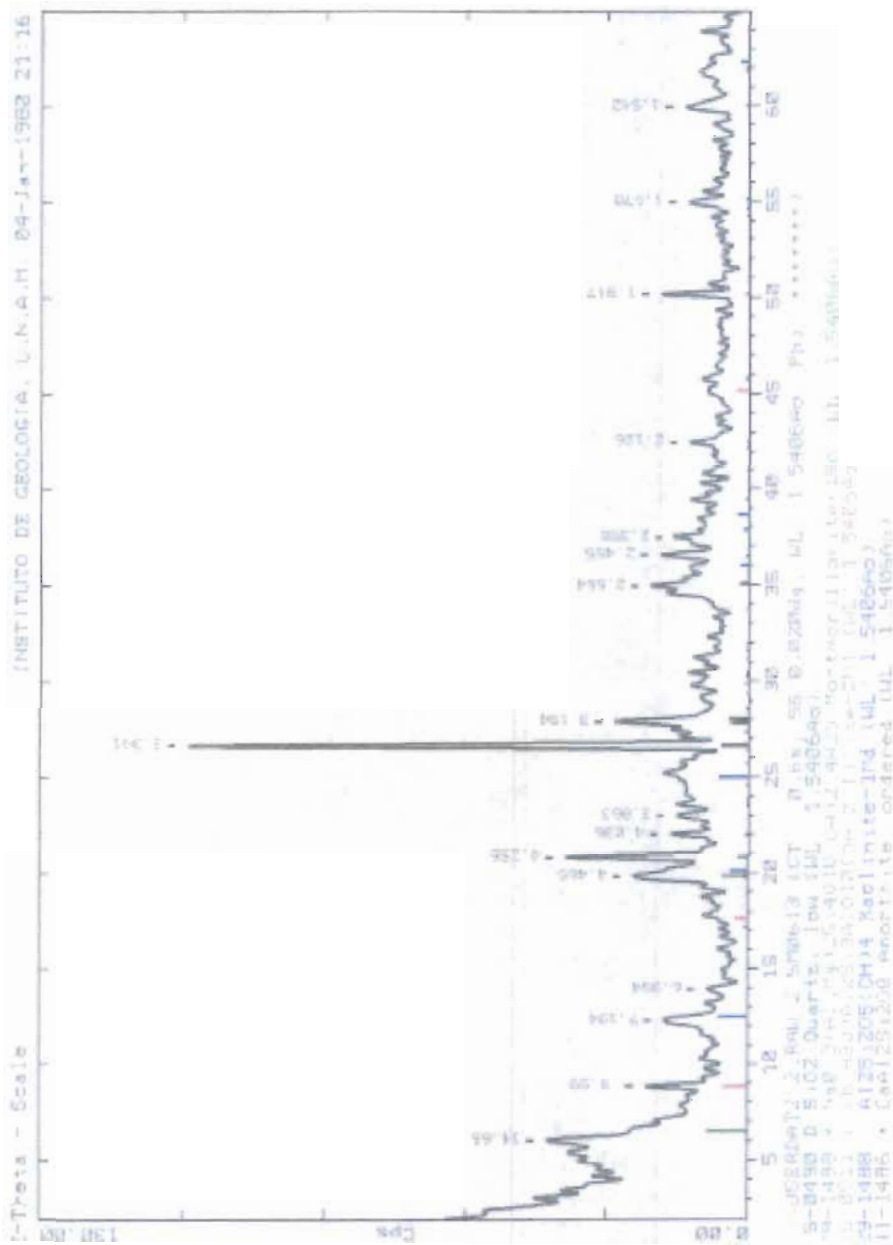


Figura 5.e. 65. Resultado de la refracción de rayos X determinada en la muestra de 7.5m de profundidad, obtenida del sondeo 06CD de la margen derecha del río Carrizal.

VF

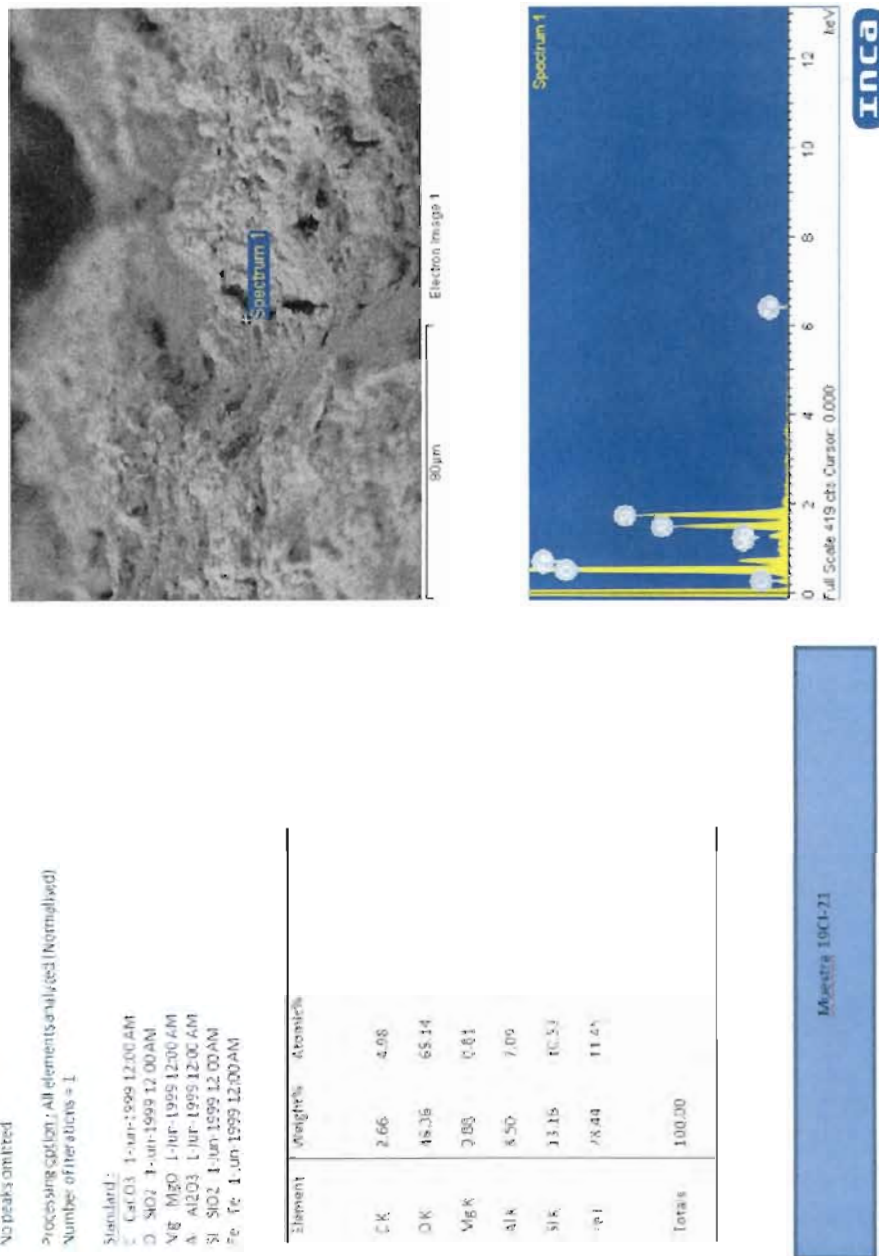


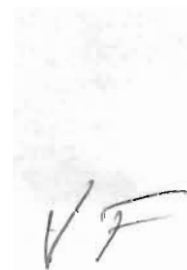
Figura 5.e. 66. Resultado de la refracción de rayos X determinada en la muestra de 12.3m de profundidad, obtenida del sondeo 19Cl de la margen izquierda del río Carrizal.

### Conclusiones y Recomendaciones

- La inestabilidad de las márgenes de los ríos Carrizal y Grijalva es ocasionada por la fluidificación y por la erosión interna del subsuelo, las que a su vez son originadas por el flujo subterráneo. Ambas causas ocasionan que el suelo sea incapaz de soportar cargas mínimas, e incluso de autosoportarse al perder confinamiento lateral, lo que lo hace escurrir como un lodo hacia los cauces. Lógicamente, ambos fenómenos se agudizan en la proximidad de las márgenes debido al desconfinamiento que representa el mismo cauce y a que lo tortuoso de las trayectorias intersticiales que deben recorrer

las partículas desprendidas por la erosión interna hace que el fenómeno se dificulte a medida que las partículas desprendidas están más lejos de las márgenes donde serían expulsadas.

- En el caso del río Usumacinta la causa de inestabilidad es la falta de cohesión del suelo, lo que facilita que las partículas minerales se salgan (escurran) junto con el agua cuando desciende el nivel del río y se drenan los suelos saturados.
- El flujo subterráneo, sobre todo cuando es incrementado por el descenso del nivel freático, tiene importantes efectos en la estabilidad ya que además de infligir fuerzas de filtración hacia el cauce y erosionar internamente, mantiene al subsuelo en estado de sumersión, debilitando su resistencia mecánica. En dicha condición, cualquier incremento de carga, como el peso de las supuestas protecciones, o las cargas dinámicas ocasionadas por vibraciones de tuberías o por el paso de tránsito pesado, hace aún más probable el colapso de la estructura interna del suelo.
- La erosión marginal en los ríos Carrizal, Grijalva y Usumacinta se manifiesta como desprendimientos de masas de suelo cuando ha ocurrido socavación, como hundimientos del terreno cuando dicha erosión se ha generalizado y se colapsan las oquedades y como escurrimiento de masas lodosas, evidenciando todas ellas que la estabilidad no puede analizarse con métodos geotécnicos clásicos, que suponen el deslizamiento de una masa sólida de volumen constante sobre una superficie curva.
- Resulta claro que en las condiciones mencionadas, la estabilización de las márgenes no puede resolverse con protecciones superficiales artificiales, que además de ser muy costosas, de impedir la observación del progreso del fenómeno y de constituir sobrecargas importantes, no tienen utilidad alguna.
- Aunque no parece haber una solución fácil y barata para estabilizar definitivamente las márgenes, deben ensayarse tramos piloto enfocados a disminuir el flujo subterráneo que aflora en la superficie de las márgenes y a mitigar la migración de partículas de suelo. Para ello se propone ensayar, en varios sitios representativos de distintas condiciones, variantes de esa posible solución, conforme se indicó en el informe de la 3ª etapa del PHIT.
- Es recomendable instalar inclinómetros y referencias superficiales para control topográfico para cuantificar la velocidad de los fenómenos evidenciados.



## REFERENCIAS

[UPC, Universidad Politécnica de Cataluña \(2002-2004\). Stability Analysis. Cataluña España. Disponible en: http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6444/6/05.pdf](http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6444/6/05.pdf)

Juárez E., Rico A. (1997). **Mecánica de suelos, teoría y aplicaciones**. Tomo II y III, Ed. Limusa, México 1979. México.

A.F. Salarashayeri and M. Siosemarde. **Prediction of soil Hydraulic Conductivity from Particla- Size Distribution**. World Academy of Science, Engineering and technology 61 2012. Pag 454.

Agua. Delegación local Tabasco. Periodo 1999-2011.

**CONAGUA-IIUNAM** (2008). "Plan Hídrico Integral de Tabasco, Primera etapa". Modelación de los escurrimientos y niveles provocados por el evento 2007 y de los correspondientes a las soluciones propuestas en los ríos y lagunas alrededor de Villahermosa.

**CONAGUA-IIUNAM** (2010). "Plan Hídrico Integral de Tabasco, Primera etapa". Modelación de los escurrimientos y niveles provocados por el evento 2007 y de los correspondientes a las soluciones propuestas en los ríos y lagunas alrededor de Villahermosa.

**Fuentes M. O., Franco, V.** (1999) **Estudio Hidrológico para Obras de Protección**, UNAM, Series del Instituto de Ingeniería, Publicación 613. México DF.

**INEGI** (2010). Ortofotos digitales escala 1:10000 y 1:20000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

**Juárez, E. y Rico, A.** (2004). **Mecánica de Suelos. Tomo II. Teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos**. Editorial Limusa, Noriega Editores. México, D.F. ISBN 968-18-0128-8-23.2, pp.631-632.

**Maza J.A.** (1968). **Socavación en Cauces Naturales**. Publicación 117, Serie azul del Instituto de Ingeniería UNAM. México.

**Maza, J.A. y García, M.** (1996). Estabilización y rectificación de ríos. Capítulo 14 del Manual de Ingeniería de Ríos. Instituto de Ingeniería de la UNAM, México, pp. 1-3.

**Velázquez, G.** (1994). **Los recursos hidráulicos del estado de Tabasco: ensayo monográfico**. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. División Académica de Ingeniería y Tecnología. Centro de Investigación.

**Berezowsky M., Jiménez A. A.** (1993), Cálculo de Perfiles en Ríos de Fondo Arenoso con Métodos de Resistencia al Flujo de Hidráulica Fluvial, Instituto de Ingeniería de la UNAM N. 557

**Berezowsky M., Jiménez A. A.** (1995), Flujo no Permanente en Ríos, Instituto de Ingeniería de la UNAM N. 574

**CIRIA, CUR, CETMEF** (2007), *The Rock Manual. The use of Rock in Hydraulic Engineering*, Segunda Edición, C683, CIRIA, Londres

**DECDFI** (2008), Lineamientos de los Diplomados, División de Educación Continua y a distancia de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

**Escarameia M.** (1998), River and Channel Revetments. A design manual.

**Gracia J., Maza J. A.** (1997), Morfología de Ríos, Instituto de Ingeniería de la UNAM N. 590

**Maza J. A., García M.** (1984), Hidrodinámica. Bases para Hidráulica Fluvial. Series del Instituto de Ingeniería N. D-20.

**Martín vide J. P.** (2003), Ingeniería de Ríos, Ediciones UPC, Editorial Alfaomega

**Maza J. A., Springall R.** (1968), Modelos Fluviales de Fondo Móvil y su Calibración, Facultad de Ingeniería de la UNAM N. 190

**Maza J. A** (1969), Modelos Fluviales, Facultad de Ingeniería de la UNAM N. 216

**Maza, J. A., Cruickshank C.** (1975), Estabilidad de Cauces Arenosos, Facultad de Ingeniería de la UNAM N.355

**Maza J. A, García M.** (1996), Estabilidad de cauces, Instituto de Ingeniería de la UNAM N. 582

**Maza J. A, García M.** (1996), Estabilización y Rectificación de Cauces, Instituto de Ingeniería de la UNAM N. 583

**Maza J. A, García M.** (1996), Transporte de Sedimentos, Instituto de Ingeniería de la UNAM N. 584

**Maza J. A., Franco V.** (1997), Obras de Protección para Control de Inundaciones, Instituto de Ingeniería de la UNAM N. 591

**Maza J. A.** (1977), Scour in Rivers-Beds, Facultad de Ingeniería de la UNAM N. E-23

**OMM** (2009), Organización Meteorológica Mundial. Gestión Integrada de Crecidas: Documento Conceptual

**Pilarczyk K.** (1998), Dikes and Revetments. Design, maintenance and safety assessment.

**Zozaya, V. P.** (2006), Las redes y la transferencia de conocimientos, Boletín GC: Gestión cultural N° 14, Redes culturales, julio, ISSN:1697-073X

Página web: [www.conagua.gob.mx](http://www.conagua.gob.mx) <http://www.conagua.gob.mx>

**CONAGUA** (2010). Información hidrométrica, climatológica y de presas. Comisión Nacional del

**CONAGUA-IIUNAM** (2012). Informe del Estudio de las protecciones y márgenes inestables de los ríos La Sierra, Carrizal, Grijalva y Usumacinta. Informe del Plan Hídrico Integral de Tabasco