



UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y MINAS
DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL



“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

Tesis que para obtener el grado de

Doctor en Ingeniería Civil

Presenta:

M.I.H. Jesús Enrique León Jiménez

Directora de tesis:

Dra. Liliana Guadalupe Lizárraga Mendiola

Hermosillo, Sonora, Junio 2017

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess



UNIVERSIDAD DE SONORA DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DOCTORADO INTERINSTITUCIONAL EN INGENIERÍA CIVIL
DEL CONSORCIO DE UNIVERSIDADES MEXICANAS (CUMex)

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

Tesis que para obtener el grado de:

Doctor en Ingeniería Civil

Con Área Disciplinaria en: Ingeniería Ambiental y Desarrollo Hidráulico

Presenta:

M.I.H. Jesús Enrique León Jiménez

Comité Doctoral:

Directora de Tesis: Dra. Liliana Guadalupe Lizárraga Mendiola (UAEH)

Co-Director de Tesis: Dr. Dagoberto Burgos Flores (UNISON)

Asesor: Dr. Ruperto Ortiz Gómez (UAZ)

Asesor: Dr. Víctor Hugo Guerra Cobián (UANL)

Asesor: Dr. José Guadalupe Fabián Rivera Trejo (UJAT)

Hermosillo, Sonora, Junio de 2017

COMITÉ DOCTORAL DE EVALUACIÓN

DRA. LILIANA GUADALUPE LIZÁRRAGA MENDIOLA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
PRESIDENTE

DR. DAGOBERTO BURGOS FLORES
UNIVERSIDAD DE SONORA
SECRETARÍO

DR. ADRIÁN LEONARDO FERRIÑO FIERRO
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRIMER VOCAL

DR. JUAN ARCADIO SAINZ HERNÁNDEZ
UNIVERSIDAD DE SONORA
SEGUNDO VOCAL

DR. SILVIA MONTIEL PALMA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
TERCER VOCAL

DEDICATORIA:

*A mis padres, Hermanos y Abuelos: Jesús León Pérez y Enriqueta Jiménez
Alegría; Jorge y Gerson; Esteban y Marqueza.*

A mi esposa Elvira y mis hijos Alejandra, Daira, Daniel y Liam

AGRADECIMIENTOS:

Agradezco a Dios y a las personas que han logrado de mi la persona que soy.

- En este tenor agradezco primeramente a mis padres, hermanos y esposa, ya que sin ellos y sin su ayuda, este logro no se hubiera culminado.
- Agradezco a la DRA. LILIANA G. LIZÁRRAGA MENDIOLA, y el apoyo brindado a lo largo de este viaje, que por fin acabo.
- Agradezco a mis amigos el M.C. José Antonio Nungaray Núñez, Ing. Alfonso Gabriel Lira Gonzales ya que sin sus valiosos apoyos este logro no se hubiera dado; y la meta alcanzada y el cambio de pensamiento por fin este permeando a nivel nacional, todo gracias a sus apoyos.
- Agradezco al Comité Coordinador del Doctorado del CUMex y especialmente al Dr. Dagoberto Burgos y Dr. Ruperto Ortiz. Gracias por sus consejos y valioso apoyo.
- Agradezco al Dr. Jose Guadalupe Fabian Rivera Trejo, gracias por sus consejos.
- Agradezco a mis compañeros de trabajo Roberto Sergio Flowers Cano, Gaston Priego hernandez, Alan noriega, Jhon Diaz y Luis Perera. Por lo que hicieron, por mí estaré eternamente agradecido.
- Agradezco a mi hermano Jorge Alejandro León Jiménez por estar todos estos años a mi lado, sin él al igual que todas las demás personas no hubiera realizado este logro.
- Finalmente agradezco a la Universidad de Sonora y Universidad Juárez Autónoma de Tabasco ya que sin estas instituciones jamás se hubiera concretado esta meta lograda. En lo personal a la Dr. Laura Lorena.

RESUMEN

Desde la antigüedad los ríos han sido parte fundamental en el desarrollo de las civilizaciones. Conforme se ha ido observando y conociendo las variables que rigen su comportamiento, ha mejorado su aprovechamiento. Sin embargo estos aprovechamientos han requerido de estructuras implementadas sobre ellos que podrían ser clasificadas como transversales (espigones y puentes) y laterales (obras derivadoras). Éstas que con el tiempo y la operación continua, han modificado el régimen natural de los ríos. Las zonas de alteración más visibles son las curvas, confluencias y bifurcaciones. En ellas se ha observado un cambio de la distribución en la hidrodinámica e intensidad de sedimentos, que mediante campañas de aforo directas (métodos tradicionales) y estaciones hidrométricas, se ha tratado de explicar y cuantificar la alteración a la que se ven sometidas por las estructuras.

La tesis primeramente identifica el cambio de régimen al que han sido sometidos los ríos de Tabasco, antes y después de la operación de las estructuras; identificando con ello, los ríos que han sufrido un cambio en el régimen de operación. Una vez identificados estos cambios, se realizaron campañas de medición en los sitios con mayor alteración.

Las zonas más representativas fueron una bifurcación, una confluencia, zonas de puentes, curvas con espigones en los ríos Mezcalapa, Carrizal, Sierra y Grijalva. Posterior a ello La obtención de la hidrodinámica, concentración y distribución de sedimentos fue mediante un Acoustic Doppler Current Profiler en lo sucesivo ADCP. Para el caso de estudio con las técnicas acústicas, se encontraron patrones similares en curvas y bifurcación con espigones, pilas de puentes en tramos rectos y confluencia, consideradas como estructuras interpuestas al flujo, observando que la distribución del sedimento fue sobre ambas márgenes, generando un déficit en las zonas centrales del cauce acelerando el proceso de erosión. De igual forma se pudo observar que ha existido una variación en la proporción de los gastos en los ríos, que de acuerdo a las mediciones en las confluencias y las bifurcaciones ambas han presentado un desbalance en la hidrodinámica y la distribución de los sedimentos, por lo que antes de las estructuras y ahora con las estructuras se demuestra un desequilibrio y alteración del régimen en los ríos donde operan estructuras transversales y laterales.

ABSTRACT

Since ancient times, rivers have been a fundamental part of the development of civilizations. As has been observed and knowing the variables that govern their behavior, has improved its use. However, these exploitations have required structures implemented on them cross (piers and bridges) and lateral (drifting). That they have modified the natural regime of the rivers with the time and the continuous operation. The most visible zones of alteration in rivers are the curves, confluences and bifurcations. In them, a change in the distribution of hydrodynamics and sediment intensity has been observed, which, through direct gauging campaigns (traditional methods) and hydrometric stations, have tried to explain and quantify the alteration to which they are subjected by the structures. The thesis firstly identifies the change of regime to which the rivers of Tabasco, before and after operation of the structures, have been subjected. Identifying with it, the rivers that have undergone a change in the regime of operation. Once these changes were identified, measurement campaigns were carried out at sites with the greatest alteration. Being a bifurcation, a confluence, zones of bridges, curves with piers the most representative in the rivers Mezcalapa, Carrizal, Sierra and Grijalva. Subsequent to this. Hydrodynamics, concentration and distribution of sediments were obtained through an ADCP. For the case study with the acoustic techniques, similar patterns were found in curves and bifurcation with piers, piles of bridges in straight stretches and confluence, considered as structures interposed to the flow, observing that the distribution of the sediment was on both margins, generating a deficit in the central zones of the channel accelerating the process of erosion. In the same way, it was observed that there has been a variation in the proportion of the expenses in the rivers, which according to the measurements at the confluences and the bifurcations both have presented an imbalance in the hydrodynamics and the distribution of the sediments, That before the structures and now with the structures shows an imbalance and alteration of the regime in the rivers where transverse and lateral structures operate.

INDICE

	PÁGINA
INDICE.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS	10
ÍNDICE DE TABLAS	15
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	16
1.1. ANTECEDENTES.....	16
1.2. DESARROLLO DE LA TESIS	18
1.3 .HIPÓTESIS	21
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	21
1.5. OBJETIVO GENERAL	22
1.5.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
2. EVOLUCION DE CONFLUENCIAS POR ESTRUCTURAS DERIVADORAS Y TRANVERSALES EN RÍOS DE PLANICIE: ESTUDIO DE GRAN VISION EN TABASCO.	23
2.1. RESUMEN.....	23
2.2. INTRODUCCIÓN.....	24
2.3. LOCALIZACIÓN	25
2.4. METODOLOGÍA	26
2.4.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	26
2.4.2. DEPURACIÓN Y TRATADO DE INFORMACIÓN.....	27
2.5. RESULTADOS	27
2.5.1. GRAFICAS GASTO-ELEVACIÓN.....	27
2.6. CONCLUSIONES.....	31
REFERENCIAS	31
3. CAMBIO DE REGIMEN EN RÍOS POR EFECTO DE ESTRUCTURAS TRANSVERSALES Y DERIVADORAS LATERALES EN TABASCO, MEXICO	34
3.1. RESUMEN.....	34
3.2 INTRODUCCIÓN.....	35
3.3 LOCALIZACIÓN	36
3.4 METODOLOGÍA	37
3.4.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	37
3.4.2 DEPURACIÓN Y TRATADO DE INFORMACIÓN.....	38
3.5 RESULTADOS	39
3.5.1 CONFLUENCIA GRIJALVA1-LA SIERRA	39
3.5.2 BIFURCACIÓN SAMARIA-CARRIZAL	40
3.5.3 CONFLUENCIA GRIJALVA2-CARRIZAL	41
3.6 CONCLUSIONES.....	42
REFERENCIAS	43
4. ALTERACIÓN DE LA HIDRODINÁMICA EN CURVAS DE RÍOS POR ESTRUCTURAS DERIVADORAS: CASO DE ESTUDIO, RÍO BAJO GRIJALVA.	44
4.1. RESUMEN.....	44

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

4.2. INTRODUCCIÓN.....	45
4.3. LOCALIZACIÓN	46
4.4. METODOLOGIA	47
4.4.1. HIDRODINÁMICA MEDIANTE PERFILADORES ACÚSTICOS DOPPLER.....	47
4.4.2. CORRIENTES SECUNDARIAS	47
4.4.3. ESTRUCTURAS DERIVADORAS LATERALES	48
4.5. RESULTADOS	49
4.5.1. VELOCIDADES EN PLANTA	49
4.5.2. MAGNITUD DE LA VELOCIDAD Y VECTORES DE FLUJOS SECUNDARIOS	51
4.6. CONCLUSIONES.....	54
REFERENCIAS	54
5. ALTERACION DE CORRIENTES SECUNDARIAS POR ESPIGONES, ESTIMADAS MEDIANTE TECNICAS DOPPLER EN EL RÍO CARRIZAL.....	56
5.1. RESUMEN.....	56
5.2. INTRODUCCIÓN.....	57
5.3. LOCALIZACIÓN	59
5.4. METODOLOGÍA	60
5.4.1. TOPOGRAFÍAS COMPLEJAS.....	60
5.4.2. HIDRODINÁMICA MEDIANTE PERFILADORES ACÚSTICOS DOPPLER.....	60
5.4.3. CORRIENTES SECUNDARIAS	61
5.4.4. ESTRUCTURAS DE ESPIGONES.....	61
5.5. RESULTADOS	63
5.5.1. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN	63
5.5.2. VELOCIDADES EN PLANTA	63
5.5.3. MAGNITUD DE LA VELOCIDAD Y VECTORES DE FLUJOS SECUNDARIOS	64
5.6. CONCLUSIONES.....	67
REFERENCIAS	67
6. ALTERACION DE LA DISTRIBUCION Y CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS POR ESPIGONES ESTIMADOS CON ADCP EN EL RÍO CARRIZAL.....	70
6.1. RESUMEN.....	70
6.2. INTRODUCCIÓN.....	71
6.2.1. ZONAS HIDRODINÁMICAS EN ESPIGONES.	71
6.3. LOCALIZACIÓN	73
6.4. METODOLOGÍA	74
6.4.1. TOPOGRAFÍAS COMPLEJAS.....	74
6.4.2. HIDRODINÁMICA MEDIANTE PERFILADORES ACÚSTICOS DOPPLER.....	74
6.4.3. MUESTREO DE SEDIMENTOS EN CAMPO	75
6.5. RESULTADOS	76
6.5.1. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES.....	76
6.5.2. VELOCIDADES EN PLANTA	76
6.5.3. INTENSIDAD DE SEDIMENTOS E HIDRODINÁMICA.....	77
6.5.4. GRANULOMETRÍAS DEL MUESTRO EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	81
6.6. CONCLUSIONES.....	82

REFERENCIAS	82
7. CAMBIO HIDRODINAMICO Y EVOLUCION DE FONDO EN RÍOS DE PLANICIE POR ESPIGONES (EN ARBITRAJE)	84
7.1. RESUMEN.....	84
7.2. INTRODUCCIÓN.....	84
7.3. LOCALIZACIÓN	86
7.4. METODOLOGÍA	87
7.4.1. MEDICIONES DE CAMPO (ADCP Y ESTACIÓN TOTAL).....	87
7.4.2. MÉTODOS TRADICIONALES.....	87
7.4.2.1. PREDICCIÓN Y MITIGACIÓN CON ESPIGONES	87
7.4.2.2. CARACTERIZACIÓN DEL SEDIMENTO Y GRANULOMETRÍA DEL RÍO DE LA SIERRA.	89
7.4.2.3. CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DE LA ZONA DEL RÍO EL TINTILLO.....	90
7.4.3. SIMULACIÓN NUMÉRICA.....	90
7.4.3.1. ESTIMACIÓN DE HIDRODINÁMICA 2D EN IBER 2.1.2.....	90
7.4.3.2. IMPLEMENTACIÓN DE FONDO EN LA MODELACIÓN 2D IBER 2.1.2. .	91
7.4.3.3. IMPLEMENTACIÓN DE HERRAMIENTA NUMÉRICA IBER	92
7.4.3.4. CONDICIONES DE CONTORNO E INICIALES	93
7.5. RESULTADOS	95
7.6. CONCLUSIONES.....	97
REFERENCIAS	98
8. HIDRODINAMICA, CONCENTRACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE SEDIMENTOS DE BIFURCACIÓN CON ESPIGONES, ESTIMADOS MEDIANTE ADCP	100
8.1. RESUMEN.....	100
8.2. INTRODUCCIÓN.....	101
8.3. LOCALIZACIÓN	103
8.4. METODOLOGÍA	104
8.5. RESULTADOS	107
8.5.1. TOPOGRAFÍAS COMPLEJAS DE FONDO Y MÁRGENES.....	108
8.5.2. HIDRODINÁMICA, CONCENTRACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE SEDIMENTOS.....	108
8.5.3. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS CORTANTES EN LAS SECCIONES TRANSVERSALES.....	117
8.6. CONCLUSIONES.....	120
REFERENCIAS	121
9. DISTRIBUCION DE GASTOS SÓLIDOS Y LIQUIDOS EN UNA CONFLUENCIA, ESTIMADOS EN PLANTA Y TRANSVERSALMENTE CON ADCP: CASO DE ESTUDIO RÍOS SIERRA Y PICHUCALCO	123
9.1. RESUMEN.....	123
9.2. INTRODUCCIÓN.....	124
9.2.1. CARACTERÍSTICAS DE CONFLUENCIAS DE RÍOS	125
9.3. LOCALIZACIÓN	127
9.4. METODOLOGÍA	127
9.4.1. LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO MEDIANTE PERFILADORES ACÚSTICOS DOPPLER	128

9.4.2. HIDRODINÁMICA MEDIANTE PERFILADORES ACÚSTICOS DOPPLER	130
9.4.2.1. ESTUDIOS PRELIMINARES. LEVANTAMIENTO DEL CAMPO DE VELOCIDADES	130
9.4.3. MUESTREO DE SEDIMENTOS EN CAMPO	133
9.5. RESULTADOS	135
9.5.1. VELOCIDAD EN PLANTA DE LA ZONA DE LA CONFLUENCIA GRIJALVA-SIERRA DEL 12 DE ENERO DE 2017	135
9.5.2. CONCENTRACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE SEDIMENTOS DEL DÍA 12 DE ENERO DE 2017	138
9.5.3. VELOCIDAD EN PLANTA DE LA ZONA DE LA CONFLUENCIA GRIJALVA-SIERRA DEL 15 DE ENERO DE 2017	139
9.5.4. CONCENTRACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE SEDIMENTOS DEL DÍA 15 DE ENERO DE 2017	142
9.5.5. COMPARACIÓN DE SECCIONES TRASVERSALES DE VELOCIDADES Y DE INTENSIDADES	142
9.5.6. ANÁLISIS DE GASTOS OBTENIDOS	149
9.6. CONCLUSIONES.....	150
REFERENCIAS	150
10. CAMBIO EN LA HIDRODINAMICA E INTENSIDAD DE SEDIMENTOS POR PILAS DE PUENTES, ANTES Y DESPUES DE UNA CONFLUENCIA: ... CASO DE ESTUDIO RÍOS GRIJALVA ALTO Y SIERRA	154
10.1. RESUMEN.....	154
10.2. INTRODUCCIÓN.....	155
10.3. LOCALIZACIÓN	156
10.4. METODOLOGÍA	157
10.4.1. TOPOBATIMETRÍA	157
10.4.2. HIDRODINÁMICA MEDIANTE PERFILADORES ACÚSTICOS DOPPLER	158
10.4.3. VELOCIDADES SECUNDARIAS E INTENSIDAD DE SEDIMENTOS.....	158
10.5. RESULTADOS	159
10.5.1. COMPARACIÓN DE TOPOBATIMETRÍAS.....	160
10.5.2. VELOCIDADES EN PLANTA, SECUNDARIAS E INTENSIDAD DE SEDIMENTOS EN PUENTE MAJAHUA I.....	160
10.5.2. VELOCIDADES EN PLANTA, SECUNDARIAS E INTENSIDAD DE SEDIMENTOS EN PUENTE MAJAHUA II.....	166
10.6. CONCLUSIONES.....	172
REFERENCIAS	172
11. CONCLUSIONES Y LINEAS DE INVESTIGACION FUTURA	174
ANEXOS	180
ANEXO A: CAMBIO DE REGIMEN EN CUENCAS ALTAS NO AFORADAS. ...	180
ANEXO B: MODELACION DEL ESCURRIMIENTO EN CUENCAS ALTAS NO AFORADAS (EN ARBITRAJE).....	204

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Localización general y ubicación de la zona de estudio (fuente propia).
Figura 2.2. Comparativa Estación González.
Figura 2.3. Comparativa Estación Pueblo Nuevo.
Figura 2.4. Comparativa Estación San Joaquin
Figura 2.5. Migración de confluencia Ríos Pichucalco- Sierra.
Figura 2.6. Comparativa Estación Gaviotas
Figura 2.7. Comparativa Estación Porvenir
Figura 2.8. Migración de confluencia Ríos Gijalva Carrizal
Figura 3.1. Localización general y ubicación de la zona de estudio.
Figura 3.2. Localización general y ubicación de la zona de estudio.
Figura 3.3. Distribución de la confluencia Grijalva1-La Sierra antes de 2010.
Figura 3.4. Distribución de la confluencia Grijalva1-La Sierra después del 2010.
Figura 3.5. Distribución de la bifurcación Samaria-Carrizal antes de 2010.
Figura 3.6. Distribución de la bifurcación Samaria-Carrizal antes de 2010.
Figura 3.7. Distribución de la confluencia Grijalva1-Carrizal antes del 2010.
Figura 3.8. Distribución de la confluencia Grijalva2-Carrizal después del 2010.
Figura 4.1. Ubicación de la zona de estudio en el río Bajo Grijalval.
Figura 4.2. Perfilador Acústico Doppler y operación de la instrumentación del equipo.
Figura 4.3. Flujo en espiral transmitido característico de las corrientes secundarias.
Figura 4.4. Arreglo general de un derivación lateral (Maza, 1993).
Figura 4.5. Magnitudes de la velocidad en la curva 1.
Figura 4.6. Magnitudes de la velocidad en la curva 2.
Figura 4.7. Magnitudes de la velocidad en la curva 3.
Figura 4.8. Magnitud de la velocidad y velocidades secundarias de la curva 1.
Figura 4.9. Magnitud de la velocidad y velocidades secundarias de la curva 2.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

Figura 4.10. Magnitud de la velocidad y velocidades secundarias de la curva 3.
Figura 5.1. Ubicación de la zona de estudio en el río Carrizal.
Figura 5.2. Configuración de fondo con ADCP multihaz.
Figura 5.3. Perfilador Acústico Doppler y operación de la instrumentación del equipo.
Figura 5.4. Flujo en espiral transmitido, característico de las corrientes secundarias.
Figura 5.5. Configuración preferente de puesta en marcha de espigones.
Figura 5.6. Desvío de líneas de corrientes en laboratorios.
Figura 5.7. Levantamiento de topobatemetría del río Carrizal.
Figura 5.8. Velocidades en planta del río Carrizal.
Figura 5.9. Velocidades y vectores transversales de la sección 1, en el río Carrizal.
Figura 5.10. Velocidades y vectores transversales de la sección 2, en el río Carrizal.
Figura 5.11. Velocidades y vectores transversales de la sección 3, en el río Carrizal.
Figura 5.12. Velocidades y vectores transversales de la sección 4, en el río Carrizal.
Figura 6.1. Zonas de operación de espigones.
Figura 6.2. Localización general y ubicación de la zona de estudio en el río Carrizal.
Figura 6.3. Secciones de campo en el río Carrizal.
Figura 6.4. Perfilador acústico Doppler River ray.
Figura 6.5. Muestreo con draga de material de fondo río Carrizal.
Figura 6.6. Modelo digital de elevaciones en zona de estudio Río Carrizal.
Figura 6.7. Velocidades en planta en zonas de espigones.
Figura 6.8. Velocidades transversales aguas arriba de los espigones (C1).
Figura 6.9. Velocidades trasversales entre espigones (C2).
Figura 6.10. Velocidades transversales aguas debajo de los espigones (C3).
Figura 6.11. Intensidades transversales aguas arriba de los espigones (C1).
Figura 6.12. Intensidades trasversales entre espigones (C2).
Figura 6.13. Intensidades transversales aguas debajo de los espigones (C3).
Figura 6.14. Granulometrías obtenidas de las zonas de estudios.
Figura 7.1. Localización y Ubicación de las zonas de estudio Río tintillo y la Sierra.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

Figura 7.2. Levantamiento de geometrías complejas, con equipo estación total (Leica Ts06 Plus) y ADCP (Riverray).
Figura 7.3. Análisis granulométrico del río de la Sierra.
Figura 7.4. Análisis Granulométrico del río Tintillo.
Figura 7.5. Estructuración del mallado en el módulo de Iber.
Figura 7.6. Superficie creada con técnica de error cordal.
Figura 7.7. Mallado y calidad de la forma.
Figura 7.8. Asignación de valores de tiempo de simulación e intervalos de resultados.
Figura 7.9. Cambio de régimen por acción de 16 espigones, Río la Sierra.
Figura 7.10. Cambio de régimen por acción de 10 espigones, Río Tintillo.
Figura 8.1. Bifurcación de ríos Samaria-Carrizal y Estructuras actuales.
Figura 8.2. Estación total y forma de obtención de batimetrías de cauces con ADCP
Figura 8.3. Ubicación y campañas de mediciones realizadas.
Figura 8.4. Monitoreo en la bifurcación 2002-2005 (Fuente UJAT)
Figura 8.5. Monitoreos de estaciones actuales de gastos líquidos y sólidos. (Fuente UNAM)
Figura 8.6. Datos granulométricos de campañas actuales de medición en la bifurcación (Fuente UNAM)
Figura 8.7. Distribución de velocidades sobre la transversal con ADCP.
Figura 8.8. Distribución de celdas preestablecidas sobre la transversal con ADCP.
Figura 8.9. Topobatimetría de la bifurcación de los Ríos Samaria-Carrizal con ADCP y estación total.
Figura 8.10. Distribución de velocidades en planta medidas en septiembre de 2016.
Figura 8.11. Distribución de velocidades en planta medidas en noviembre de 2016.
Figura 8.12. Distribución de corrientes secundarias sección 1 (septiembre).
Figura 8.13. Distribución de corrientes secundarias sección 1 (noviembre).
Figura 8.14. Distribución de corrientes secundarias sección 2 (septiembre).
Figura 8.15. Distribución de corrientes secundarias sección 2 (noviembre).
Figura 8.16. Distribución de corrientes secundarias sección 3 (septiembre).
Figura 8.17. Distribución de corrientes secundarias sección 3 (noviembre).

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

Figura 8.18. Concentración de sedimentos en la sección 1 (septiembre).
Figura 8.19. Concentración de sedimentos en la sección 1 (noviembre).
Figura 8.20. Concentración de sedimentos en la sección 2 (septiembre).
Figura 8.21. Concentración de sedimentos en la sección 2 (noviembre).
Figura 8.22. Concentración de sedimentos en la sección 3 (septiembre).
Figura 8.23. Concentración de sedimentos en la sección 3 (noviembre).
Figura 8.24. Esfuerzos Sección 1 (Septiembre).
Figura 8.25. Esfuerzos Sección 1 (noviembre).
Figura 8.26. Esfuerzos Sección 2 (Septiembre).
Figura 8.27. Esfuerzos Sección 2 (noviembre).
Figura 8.28. Esfuerzos Sección 3 (Septiembre).
Figura 8.29. Esfuerzos Sección 3 (noviembre).
Figura 9.1. Zonas hidrodinámicas en confluencias
Figura 9.2. Localización de la zona de estudio.
Figura 9.3. Perfilador acústico Doppler
Figura 9.4. Recorrido del levantamiento batimétrico.
Figura 9.5. Funcionamiento Perfilador acústico Doppler (USGS, 2013)
Figura 9.6. Secciones levantadas el día 12 de enero de 2017.
Figura 9.7. Uso del Perfilador acústico Doppler River ray.
Figura 9.8. Secciones levantadas el día 15 de enero de 2017.
Figura 9.9. Recolecta de la información en una computadora portátil y recorrido con el ADCP.
Figura 9.10. Muestreo con draga de material de fondo río Carrizal.
Figura 9.11. Puntos de los sondeos realizados.
Figura 9.12. Velocidad en planta del 12 de enero de 2017.
Figura 9.13. Línea de influencia de las velocidades encontradas en la zona de la confluencia Grijalva-Sierra del día 12 de enero de 2017.
Figura 9.14. Magnitud de la velocidad en planta obtenida del día 12 de enero de 2017.
Figura 9.15. Distribución del sedimento en suspensión del día 12 de enero de 2017.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

Figura 9.16. Velocidad en planta del 15 de enero de 2017.
Figura 9.17. Línea de influencia de las velocidades encontradas en la zona de la confluencia Grijalva-Sierra el día 15 de enero de 2017.
Figura 9.18 Magnitud de la velocidad en planta obtenida del día 15 de enero de 2017.
Figura 9.19. Distribución del sedimento en suspensión del día 15 de enero de 2017.
Figura 9.20. Secciones comparadas.
Figura 9.21. Secciones transversales comparadas del río Grijalva Bajo.
Figura 9.22. Secciones transversales comparadas de la confluencia Grijalva-Sierra.
Figura 9.23. Secciones transversales comparadas del río de La Sierra.
Figura 9.24. Secciones transversales comparadas antes del puente ubicado en el río Grijalva Alto.
Figura 9.25. Secciones transversales comparadas después del puente ubicado en el río Grijalva Alto.
Figura 10.1. Localización de las zonas de estudios.
Figura 10.2. Secciones de control sobre los puentes La Majahua I y II.
Figura 10.3. Forma de estimar el fondo e hidrodinámica con ADCP
Figura 10.4. Flujo en espiral característico de las velocidades secundarias.
Figura 10.5. Sección y celda tipo de los resultados estimados mediante ADCP.
Figura 10.6. Comparación batimetrías.
Figura 10.7. Vectores de velocidad en planta a) del 12 de enero de 2017 y b) 15 de enero de 2017.
Figura 10.8. Velocidades secundarias de los días a) 12 de enero de 2017 y b) 15 de enero de 2017.
Figura 10.9. Intensidad de sedimento en suspensión en planta de los días a) 12 de enero de 2017 y b) 15 de enero de 2017.
Figura 10.10. Magnitud de la velocidad vs velocidad secundaria a) secciones del 12 de enero de 2017 y b) secciones del 15 de enero de 2017 (ordenadas de aguas arribas a aguas abajo).
Figura 10.11. Intensidad vs velocidad secundaria a) secciones del 12 de enero de 2017 y b) secciones del 15 de enero de 2017 (ordenadas de aguas arribas a aguas abajo).
Figura 10.12. Vectores de velocidad en planta a) del 12 de enero de 2017 y b) 15 de enero de 2017.
Figura 10.13. Velocidades secundarias de los días a) 12 de enero de 2017 y b) 15 de enero de 2017.
Figura 10.14. Intensidad de sedimento en suspensión en planta de los días a) 12 de enero de 2017 y b) 15 de enero de 2017.
Figura 10.15. Magnitud de la velocidad vs velocidad secundaria a) secciones del 12 de enero de 2017 y b) secciones del 15 de enero de 2017 (ordenadas de aguas arribas a aguas abajo).

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

Figura 10.16. Intensidad vs velocidad secundaria a) secciones del 12 de enero de 2017 y b) secciones del 15 de enero de 2017 (ordenadas de aguas arriba a aguas abajo).

Figura 10.17. Secciones de confluencia e interacción Ríos Sierra Y Grijalva Alto.

Figura 10.18. Intensidad, vectores de velocidad secundaria y rotación antihorario de Río Sierra y Grijalva Alto.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Estaciones Analizadas

Tabla 3.1. Estaciones Analizadas

Tabla 7.1. Gatos de diseño o formativos evaluados en el río de la Sierra

Tabla 7.2. Gasto-elevación evaluados en el río Tintillo.

Tabla 9.1. Gastos obtenidos de las campañas de medición.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. ANTECEDENTES

La naturaleza de los ríos es muy compleja. Durante años se ha tratado de explicar las variables y leyes que rigen su comportamiento. Civilizaciones antiguas como las precolombinas y egipcias, fueron de las primeras en dar aprovechamiento a los ríos mediante canales artificiales y obras de protecciones.

Sin embargo conforme el tiempo avanzó, el hombre trató de tener control de los ríos y del dominio aparente y surgieron nuevas interrogantes sobre su comportamiento. Decidido a gobernarlo, mediante observaciones dedujo inicialmente que había zonas que de forma natural se erosionaban y conforme más era el control sobre los ríos, más efectos adversos tenían.

Unas de las herramientas iniciales utilizadas después de las observaciones fueron la física y las matemáticas, con ella surgió la mecánica de fluidos y mediante rigurosos análisis se describieron muchos fenómenos observados. Uno de ellos fue el comportamiento del flujo en curvas, siendo Rozovskii en 1957 uno de los pioneros que describió teóricamente la distribución de velocidades y se acuñó el término de corrientes secundarias como el principal motor erosivo de una curva. Aunque principalmente en las curvas es donde el efecto es mayor, Falcón en 1984 encontró que en zonas rectas existen y son debidas al esfuerzo cortante de fondo, estructuras, y zonas de cavidades en la transversal y longitudinal del cauce.

Recientemente surge el interés en uno de los fenómenos observados en la antigüedad, el efecto adverso del control sobre ellos. Y a pesar que teóricamente se tienen identificadas las variables de un río, los sedimentos empiezan a jugar un papel importante. Por lo que investigaciones enfocadas a entender este fenómeno multivariable ha generado avances considerables en las técnicas de muestreos de los datos.

Las técnicas convencionales utilizadas para medir gastos líquidos y sólidos, es mediante aforos y éstos son puntuales sobre una sección transversal y tienen un tiempo de ejecución grande. Por desgracia estas mediciones no reflejan el comportamiento tridimensional, y la

distribución del vector velocidad y sedimentos eran interrogantes. Actualmente y gracias al avance tecnológico los ADCP, empezaron a ser una herramienta útil y según Barua y Rahman en 1998, fue muy bien aceptada esta metodología por la comunidad científica y empresarial, por la eficiencia y rapidez de las mediciones del flujo sedimentos y velocidades. Ahora el campo de acción mencionado por Tarrab en 2010 se abrió a la medición de velocidad tridimensional en cuerpos de aguas tales como ríos y canales artificiales o naturales permitiendo con ello la caracterización de la dinámica fluvial y los procesos hidrodinámicos asociados.

Ahora teniendo las herramientas necesarias para identificar los procesos complejos en ríos, el hombre ha tratado de explicar cuál es el cambio de régimen al que se someten los ríos meándricos (con curvas) cuando se implementa una acción estructural en ellos. Walker en 1985 y recientemente Robertson en 2001, encontraron que la alteración del régimen natural del río puede ocurrir debido a la reducción o el aumento del flujo, la alteración de su estacionalidad, el cambio de frecuencia y duración; tal es el caso de estructuras de control laterales y espigones.

Domínguez en 2014, mencionó que la mayoría de los ríos en el mundo han sido modificados en su estructura y funcionamiento, y esta modificación notoria se ha identificado en curvas, confluencias y bifurcaciones; donde la complejidad hidrodinámica, distribución y concentración de sedimentos generan fenómenos de alteración al régimen de los ríos.

Los procesos observados por Seo en 2008 en curvas de ríos mencionan que el radio de curvatura juega un papel importante en la evolución de los cauces meándricos, ya que en curvas cerradas el efecto es más representativo que en cauces con radios de curvaturas más abiertos. Por lo tanto el proceso de migración por efecto de las corrientes secundarias es más representativo y acelerado con gastos altos. Debido a esto la mano del hombre ha tratado de evitar esta migración y muchas acciones mediante el uso de espigones se dan en las curvas y Mohammad en 2014, demostró que los espigones por la contracción que generan sobre la sección transversal, alteran la distribución y concentración de sedimentos, acrecentando la tasa de transporte. Por otra parte Wout en 2014 demostró que las bifurcaciones son las encargadas de distribuir en los ríos los gastos sólidos y

líquidos y la distribución de la carga líquida y sedimentológica no es proporcional en sus bifurcados. Y a su vez Leif en 2006 atribuyó este fenómeno de distribución a la generación de formas de fondo diferentes, demostrando que era uno de los indicadores de la estabilidad en una bifurcación. Ahora bien la estabilidad en los bifurcados también se debe en gran medida a los ángulos entre ríos bifurcados, formaciones de islas y alta vegetación (Leif, 2006).

Se ha observado que la distribución de la carga sedimentológica en una bifurcación puede ser afectada si aguas arriba de ella existen curvas sin alteración demostrando que la distribución preferencial del gasto sólido más pesado, es sobre la parte externa de la curva y la líquida sobre la interna. Por lo anterior Kleinhans en 2007 establece que uno de los bifurcados siempre transporta más sedimentos.

Entender esto ha llevado a autores como Yossef y Vriend en 2011 a usar modelos numéricos para explicar la alteración que provocan en la hidrodinámica, el transporte de sedimento y la evolución vertical y longitudinal sobre el lecho del cauce. Estos modelos son calibrados mediante modelos físicos, sin embargo el factor de escala genera incertidumbre en los resultados obtenidos (Maza,1993).

1.2. DESARROLLO DE LA TESIS

Para el caso de estudio motivo de la tesis, se abordan en sus capítulos tres aspectos generales:

- El primer aspecto es una visión global de la alteración al régimen de ríos mediante el uso de herramienta estadística y de la hidrométrica local por medio del análisis de dos confluencias y una bifurcación en el estado de Tabasco con la finalidad de evaluar el proceso del cambio de régimen y la relación con la puesta en marcha de estructuras de control, laterales y espigones partir de 2010.
- El segundo aspecto fue identificar mediante mediciones en campo con ADCP y muestreos de sedimentos la alteración de la hidrodinámica, concentración y distribución de los mismos realizando dos campañas de mediciones diferentes.

- El tercer aspecto de la tesis fue la identificación de patrones de corrientes secundarias y su relación con el transporte de sedimentos. La estimación y aplicación de los parámetros tridimensionales obtenidos se utilizaron para correlacionar los esfuerzos de corte y la relación que guardan con la evolución de fondo. quede igual mediante la Implementación de un modelo numérico bidimensional, calibrado con las mediciones de campo se pudo predecir el cambio en las variables hidrodinámicas con escenarios diferentes a los medidos.

Finalmente para dar un seguimiento específico a la tesis, se abordó de la siguiente manera cada aspecto ante mencionado:

- Los capítulos uno y dos abordan el cambio de régimen global sufrido en dos confluencias y una bifurcación, así como la inversión de gastos sufridos en sus confluencias y bifurcados por las estructuras.
- Los capítulos tres al siete describen la operación actual de los espigones con las mediciones de la hidrodinámica y transporte de sedimentos con tridimensional con ADCP; así como la implementación de ecuaciones teóricas y modelación numérica.
- Los capítulos ocho a diez abordan de forma específica una bifurcación y una confluencia identificadas por su alteración a su geometría y régimen en los capítulos uno y dos y un análisis de otra estructura de interés de las pilas en dos puentes entre confluencias.
- En anexos se presentan investigaciones futuras de la respuesta en zonas altas de cuencas al cambio de régimen que son sometidas por su sobreexplotación.

Una vez analizados todos los aspectos antes mencionados en la tesis se dejan asentados muchos patrones de flujo líquidos y sólidos encontrados en campo demostrando que los espigones en curvas generan una redistribución de las corrientes secundarias con lo que el efecto erosivo se aleja de la margen. Se identificó de igual forma que en curvas naturales sobre la margen izquierda orientadas hacia abajo del flujo existe un patrón desarrollado

de los flujos secundarios que hacen más prolífera la erosión y migración, no así sobre la margen derecha orientada hacia arriba, donde los flujos no estaban desarrollados y la vorticidad característica no era aparente.

Se encontró que la distribución y concentración de sedimentos en espigones está correlacionada con la vorticidad de las corrientes secundarias y si el giro era conforme al sentido horario de las manecillas del reloj la concentración era preferentemente mayor y caso contrario si era antihorario.

En la zona de la bifurcación sobre la curva aguas arriba con espigones, se observó que a pesar de la nueva orientación del flujo- sedimento en los bifurcados. La proporción en la distribución de sedimentos y de los patrones de flujo se sigue manteniendo. Sin embargo, la implementación de una estructura de control sobre uno de sus bifurcados invirtió el régimen y la estabilidad por lo que actualmente y de acuerdo a la literatura una vez que se implementan acciones sobre uno de sus bifurcados es necesaria la implementación de acciones sobre el segundo bifurcado. De igual forma se encontró el patrón recurrente de giro de las corrientes secundarias y concentración de sedimentos en sentido horario. Ahora bien de los muestreos de campañas anteriores de sólidos de fondo y suspensión y mediante la implementación del promedio de la celdas en la transversal de los ADCP en sus pinges de 10 x10 cm se estimaron los esfuerzos de corte, encontrando que las zonas que se predecían de la medición de dos campañas distintas, se habían erosionado y sedimentado correctamente.

Sobre una de las confluencias, seleccionada por la evolución geométrica y de régimen por las estructuras implementadas en sus ríos, se identificó que si uno de sus afluentes en su gasto era 20% de la suma de ambos, la influencia sobre las corrientes secundarias era del afluente que aportaba más gasto y la distribución de los sedimentos era sobre la parte interna de la curva. Ahora bien si era una distribución del 50% en ambos afluentes, la distribución de las corrientes secundarias del afluente pequeño se adicionaban en un 50% al mayor ya que en la salida del afluente pequeño existe un puente y al verificar la operación hidrodinámica se observó que ellos generaban una obstrucción y división de la vorticidad de las corrientes secundarias y orientación de los sedimentos.

Finalmente se hizo una descripción de la operación de dos puentes y su influencia sobre las corrientes secundarias: uno aguas abajo y otra agua arriba de una confluencia. Para el primer caso se identificó que en donde se redistribuyen las líneas flujo en planta las corrientes secundarias se particionan y desarrollan mejor en sentido de giro contrarias y las zonas preferentes no necesariamente siguen el patrón identificado de mayor concentración en sentido de las manecillas del reloj.

1.3 .HIPÓTESIS

Las estructuras de control, laterales y espigones, generan y alteran la hidrodinámica, concentración y distribución de sedimentos en curvas, confluencias y bifurcaciones por lo que las corrientes secundarias y las intensidades de sedimentos medidas con ADCP pueden describir y analizar los patrones tridimensionales de migración en esas zonas.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Tabasco es una zona donde existen características hidráulicas peculiares ya que en sus ríos existen estructuras laterales de control, transversales como pilas de puentes y espigones en curvas.

En conjunto todas ellas han generado cambios en los regímenes de sus ríos y puesto que la construcción y operación de las obras fue a partir del 2010, es necesaria una caracterización de forma global de la alteración del régimen hidráulico y distribución de los sedimentos. Utilizando los datos hidrométricos del antes y después, así como una evaluación directa en campo del comportamiento alterado de las corrientes secundarias motor de migración de curvas y el efecto que se tiene en las zonas donde existen espigones, así como la estructura actual de la hidrodinámica e intensidad de sedimentos en sus confluencias y bifurcaciones. Se podrá definir el efecto general y local de cada pieza de análisis, conociendo y estableciendo el grado de alteración actual en los Ríos de Tabasco.

1.5. OBJETIVO GENERAL

Identificar el Cambio Hidrodinámico e intensidad de sedimentos en ríos de planicie por estructuras de control transversales y laterales en ríos de Tabasco.

1.5.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar la evolución histórica de confluencias por estructuras derivadoras y transversales en ríos de planicie en Tabasco
- Estimar el cambio de régimen histórico en ríos por efecto de estructuras transversales y derivadoras laterales en Tabasco.
- Determinar la alteración de la hidrodinámica en curvas sin espigones en el río bajo Grijalva
- Identificar la alteración de corrientes secundarias, distribución y concentración por espigones, estimadas mediante técnicas Doppler en el río Carrizal
- Estimar el cambio hidrodinámico y evolución de fondo en ríos de planicie por espigones mediante métodos tradicionales y modelación numérica.
- Identificar la hidrodinámica, concentración y distribución de sedimentos de bifurcación con espigones, estimados mediante ADCP.
- Estimar la distribución de gastos sólidos y líquidos en la confluencia de los ríos Sierra y Pichucalco.
- Identificar el cambio en la hidrodinámica e intensidad de sedimentos por pilas de puentes, antes y después de una confluencia: ríos Pichucalco y viejo Mezcalapa.

2. EVOLUCION DE CONFLUENCIAS POR ESTRUCTURAS DERIVADORAS Y TRANVERSALES EN RÍOS DE PLANICIE: ESTUDIO DE GRAN VISION EN TABASCO.

2.1. RESUMEN

Los ríos aluviales estabilizan sus meandros en miles de años y este grado de estabilidad depende de igual forma de las acciones del hombre sobre él. El presente estudio se centra en explicar a grandes rasgos el cambio de régimen al que han sido sometidas las parejas de ríos confluyentes, Grijalva-Carrizal y Sierra-Pichucalco usando como medio de evaluación los registros históricos de cinco estaciones hidrométricas de gasto y elevación.

El parteaguas de análisis fue el año 2010, ya que en este año se construyeron y empezaron a operar las estructuras. El análisis realizado a la información indica el antes y el después de operación de las estructuras. Se elaboraron gráficas comparativas, contrastadas con las imágenes históricas de las evoluciones de las confluencias. Se observó que, a partir de dicho año las estaciones de influencia sobre la confluencia de los Ríos Grijalva-Carrizal mostraban un grado de estabilidad alto, mismo que se verificó con la evolución histórica de la confluencia en ortofotos. Sin embargo en las estaciones de influencia con la confluencia Pichucalco-Sierra, existe un desbalance del régimen y en las ortofotos históricas comparadas del antes y el después de las estructuras, se observó que hay un proceso de migración agresivo.

De lo anterior descrito se concluye que las confluencias son un indicador global del cambio de régimen hidrodinámico y sedimentológico al que son sometidos algunos Ríos y los indicadores utilizados a gran visión como las estaciones hidrométricas proveen de información suficiente para respaldar dicha observación.

Palabras claves: confluencias, estructuras de control y estructuras derivadoras.

2.2. INTRODUCCIÓN

El hombre ha modificado los caudales circulantes por los ríos con fines de aprovechamiento o como medida de protección contra inundaciones. La alteración del régimen natural del río puede ocurrir debido a la reducción o el aumento del flujo, la alteración de su estacionalidad, el cambio de frecuencia y duración (Walker, 1985; Gehrke *et al.* 1995; Kingsford, 1995; Maheshwari *et al.* 1995; Poff *et al.* 1997; Boulton y Brock, 1999; Robertson *et al.*, 2001). Las alteraciones causadas en la mayoría de los casos por influencias antropogénicas como la construcción de estructuras hidráulicas, modifican el escurrimiento natural. Varios estudios han analizado la respuesta de los ríos al impacto humano (Ibisate *et al.* 2011). Mostrando cambios significativos al canal, que generalmente modifican la morfología del cauce (Leopold, 1973; Williams y Wolman, 1984; Knighton, 1991; Kondolf, 1997). La morfología está condicionada por tres elementos: caudales líquidos (flujo líquido), aportación sedimentaria (flujo sólido) y las características del valle (geometría). Una mejor comprensión de los ajustes de canal es esencial para la prevención de sus consecuencias y predecir su evolución futura.

En las últimas décadas, la modificación de caudales ha adquirido especial interés e importancia alrededor del mundo, particularmente debido al incremento de la construcción de diversas obras de protección.

Ejemplo de ello es el estado de Tabasco el cual es una de las entidades federativas que cuenta con la mayor variedad de recursos naturales dentro del territorio nacional, debido principalmente a la morfología plana característica de la región, a las abundantes lluvias provocadas por fenómenos meteorológicos y a los caudales que escurren normalmente de la Sierra del estado de Chiapas y de la república de Guatemala. El desbordamiento de los ríos debido a eventos extraordinarios afectan los centros de población y tierras productivas de cultivo y ganadería, ocasionando pérdidas materiales que frenan y limitan el desarrollo y potencial económico de la región.

Aunado a lo anterior se han realizado diversos estudios encaminados al control de las inundaciones, provocadas por las fuertes lluvias que normalmente se presentan en la región lo que ha llevado a la construcción de obras tales como estructuras de control, estructuras derivadoras laterales (cauces de alivio), rectificación de cauces, construcción

de obras de contención, desazolves, obras de protección y espigones. Por ello la mayoría de cauces que escurren por zonas poblacionales se encuentran intervenidos, alterando su escurrimiento natural. Pero a pesar de las numerosas obras construidas, año con año se siguen presentando problemas de inundaciones.

Un caso particular es la ciudad de Villahermosa, Tabasco, donde la mayor parte de ésta, se encuentra entre los ríos Carrizal y La Sierra. Con el objetivo de disminuir el riesgo de inundación se han realizado estudios para diseñar obras hidráulicas que controlen las avenidas en ambos ríos y así evitar que éstos se desborden principalmente en los tramos que pasan a un lado de la ciudad.

Debido a esto se planteó como objetivo de este trabajo analizar la variabilidad de los caudales con respecto a la elevación, antes y después de la construcción de las obras.

Una de esas obras hidráulicas es la estructura de control denominada el Macayo, la cual se ha ubicado en el río Carrizal aproximadamente a 2.5 km aguas abajo de la bifurcación del río Mezcalapa en los ríos Samaria y Carrizal. De igual manera se analizan las estructuras derivadoras Sabanilla y el censo ubicadas en la margen derecha del río de la Sierra.

2.3. LOCALIZACIÓN

Las estructuras y estaciones analizadas se encuentran en los ríos Carrizal, Grijalva, Pichucalco y de La Sierra. Todos éstos ubicados en el estado de Tabasco. La estructura de control transversal El Macayo se ubica en el inicio del río Carrizal en las coordenadas UTM 470,215.00 Este y 1,985,409.00 Norte, y las estructuras derivadoras laterales El Censo y Sabanilla se ubican en el río de La Sierra en las coordenadas UTM 513908.00, 512569.00 Este y 1977489.00, 1979742.00 Norte respectivamente (Figura 2.1)

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”



Figura 2.1. Localización general y ubicación de la zona de estudio.

2.4. METODOLOGÍA

2.4.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

El método utilizado parte de la elaboración de un grupo de parámetros hidrológicos que caracterizan el régimen de los gastos a través de sus crecidas, sus épocas de estiaje, los cambios que se producen dentro del régimen anual. Estas variables se obtienen a partir del registro histórico de datos obtenidos en estaciones de aforo.

Las obras estudiadas iniciaron su funcionamiento en el año 2010 (CONAGUA,2014)

Para apreciar el cambio de régimen de los ríos donde se ubican tales obras, se seleccionaron las estaciones hidrométricas cercanas a cada obra, se comprobó que su registro histórico diario cubriera un mínimo de 10 años (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Estaciones Analizadas

Estación	Ubicación UTM		Años de registro	Antes de 2010	Después de 2010
	X	Y			
González	474381	1985286	18	14	4
Pueblo Nuevo	513952	1976314	19	15	4
San Joaquín	505283	1979129	14	10	4
Gaviotas	509469	1987001	19	15	4
Porvenir	512898	1990920	15	11	4

2.4.2. DEPURACIÓN Y TRATADO DE INFORMACIÓN

Para el tratamiento de datos, por cada estación, fue necesario la confiabilidad, período y la consistencia de toda la serie a nivel mensual de cada uno de ellos. Con esta finalidad se compararon las varianzas de cada estación usando el método estadístico de la Distribución F (Bennis *et al.* 1997; Smith *et al.* 1997; Khalit *et al.* 2001; Infante *et al.* 2008; Campos, 2015). Con esta información se elaboraron gráficas comparativas antes y después de la construcción de las obras con la finalidad de observar el comportamiento del régimen.

2.5. RESULTADOS

2.5.1. GRAFICAS GASTO-ELEVACIÓN

Para cada estación se obtuvo una gráfica Gasto-Elevación donde se compara la variación de los gastos antes y después de las obras construidas.

Para la estación González ubicada en el río Carrizal, la variación de los gastos, asociada a una elevación dada, dejó de ser tan abierta, bajando tanto los niveles y gastos aforados. Esto demuestra que obras de control en los inicios de cauces provocan una disminución del régimen hidráulico (figura 2.2).

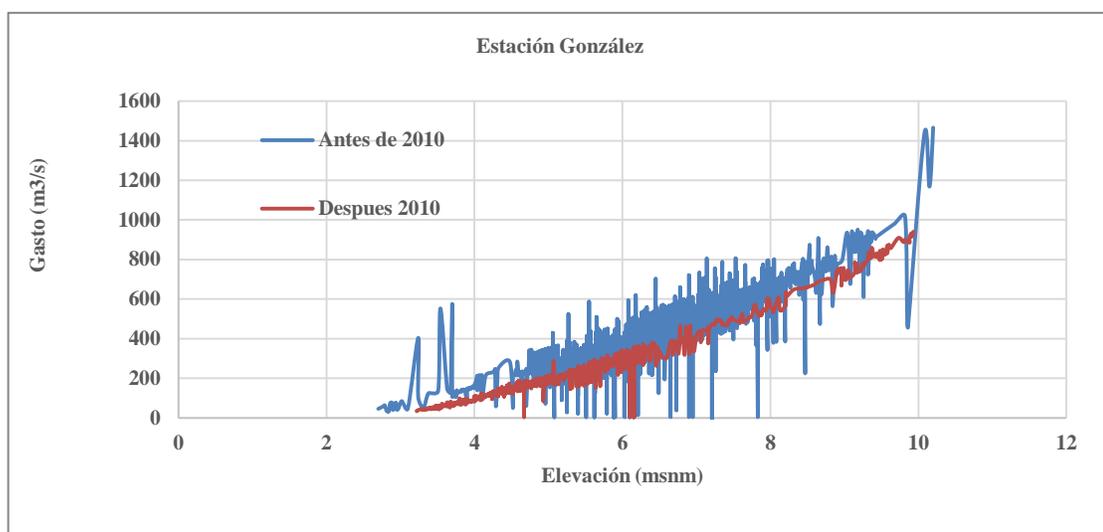


Figura 2.2.Comparativa Estación González.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

Para la estación Pueblo Nuevo ubicada en el río de La Sierra la variación de los gastos, asociado a una elevación dada se abrió y para láminas mayores a 7 msnm los gastos empezaron a subir. (Figura 2.3.). Este comportamiento está regido por la operación de las estructuras sabanilla y censo aguas abajo de la estación.

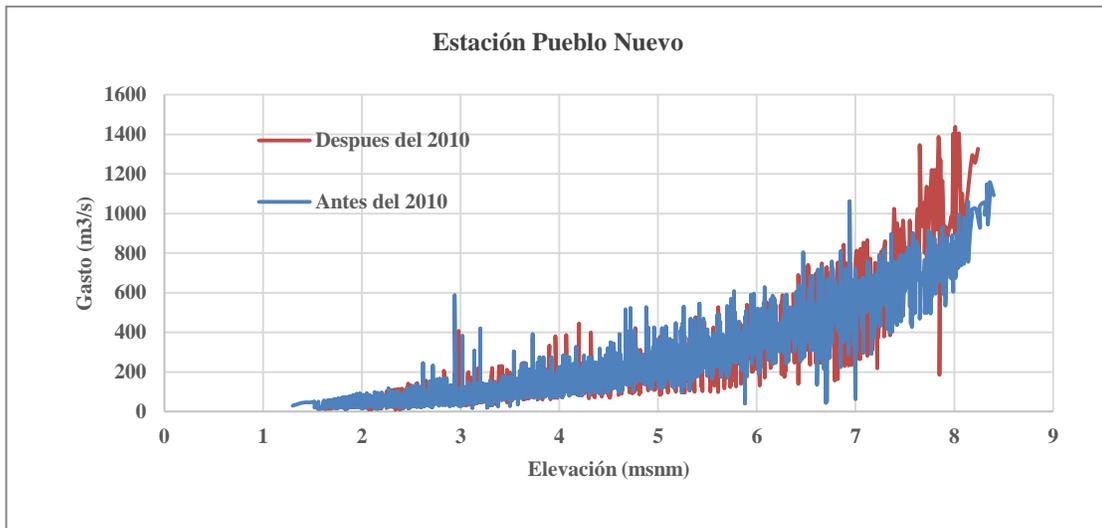


Figura 2.3. Comparativa Estación Pueblo Nuevo.

Para la estación San Joaquín ubicada en el río Pichucalco la variación de los gastos, asociado a una elevación dada se abrió, pero tales gastos siguen la misma escala de intensidad (figura 2.4).

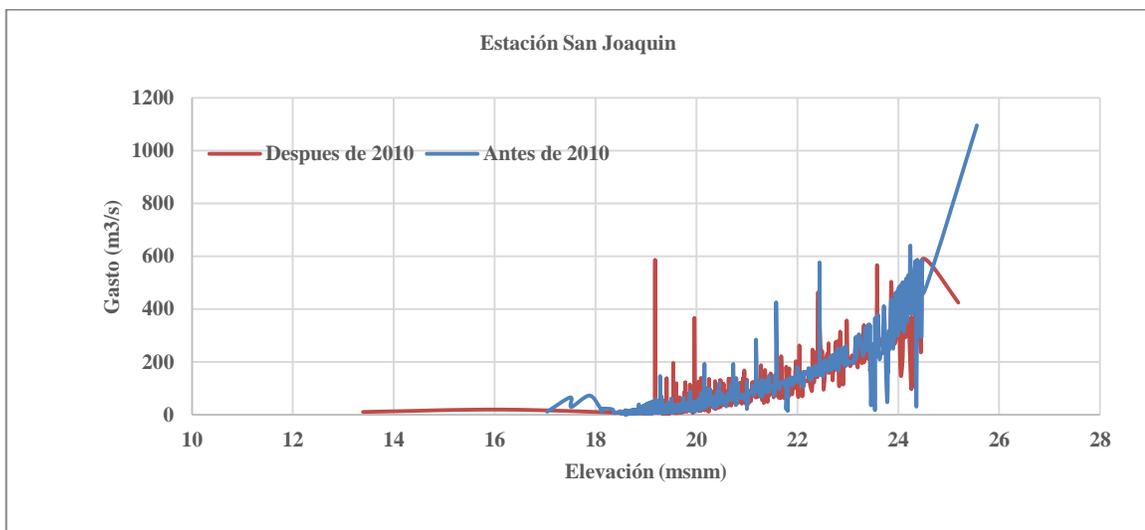


Figura 2.4. Comparativa Estación San Joaquín

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

La figura 2.5 presenta uno de los indicadores actuales de migración por cambio de régimen en la confluencia del río Sierra y Pichucalco.



Figura 2.5. Migración de confluencia Ríos Pichucalco- Sierra.

Para la estación Gaviotas ubicada en el río Grijalva aguas abajo de la confluencia del río Pichucalco y el de La Sierra, la variación de los gastos, asociado a una elevación dejó de ser tan abierta y los gastos en ella comenzaron a disminuir. (Figura 2.6). Para este caso es más notorio el cambio de régimen ya que las estructuras derivadoras aguas arriba, operan para gastos extraordinarios.

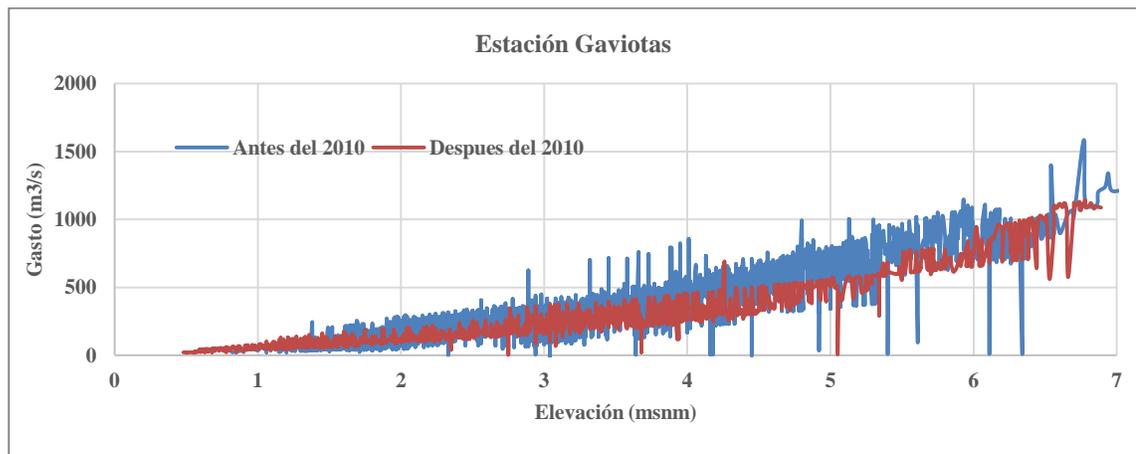


Figura 2.6. Comparativa Estación Gaviotas

La estación Porvenir ubicada en el río Grijalva abajo de la confluencia Grijalva-Carrizal presentó un régimen similar tanto en gastos bajos como en altos y uno menor en gastos intermedios, por lo que de acuerdo a estos aforos se apreció un cambio de régimen global del sistema a partir de 2010 (figura 2.7).

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

De igual forma se observa que no se han presentado eventos extraordinarios por lo que el pico mostrado en la figura no se puede comparar. Esto también es un indicador de la operación de las estructuras controlando avenidas extraordinarias en el momento de su operación.

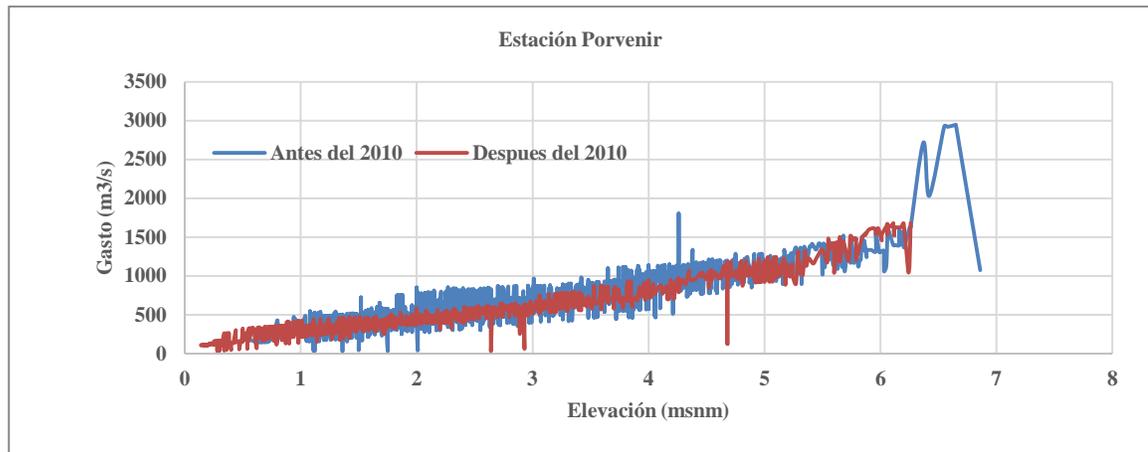


Figura 2. 7. Comparativa Estación Porvenir

En la figura 2.8 se presentan las migraciones laterales y del ángulo de la confluencia por sobre posición de imágenes satelitales, resultantes del cambio de régimen hidráulico histórico a partir del 2002. Observando que antes del 2010 las líneas laterales son similares y algunos casos presentan recuperación de las márgenes, por lo que la migración de estos ríos actualmente muestran que es una zona estable y de acuerdo a los indicadores de las figuras 2.2, 2.6 y 2.7 el régimen hidráulico global mostro de igual forma una disminución en sus gastos y elevaciones.



Figura 2.8. Migración de confluencia Ríos Gijalva Carrizal

2.6. CONCLUSIONES

De las gráficas anteriores se concluye que como resultado de este cambio de régimen para gastos excedentes, los ríos Pichucalco y de la Sierra presentan el comportamiento de ríos jóvenes, mientras que el río Carrizal y Grijalva presenta el comportamiento de un río completamente estabilizado.

El efecto más generalizado sobre el régimen de gastos en las cinco estaciones estudiadas, ha sido la reducción de la magnitud de las avenidas. Además de los umbrales de confianza, después de las regulaciones ocasionadas con las obras empiezan a ser más angostas, siendo una excepción la estación Pueblo Nuevo que ha elevado sus gastos, lo cual podría deberse a las lluvias abundantes en la Sierra del estado de Chiapas.

Con esta reducción de gastos siguen desapareciendo determinados procesos hidrológicos y geomorfológicos que son específicos del caudal dominante, tales como son la creación de erosiones verticales y horizontales, tanto en las secciones transversal como longitudinal de los ríos Carrizal y Grijalva, no así el proceso de los ríos Pichucalco y Sierra, donde por el cambio de régimen aparente existe actualmente migración.

Para tener una completa descripción del cambio de régimen al que están sometidas las confluencias de los ríos es necesario que en trabajos futuros se haga un diagnóstico de las tasas de sedimentos. De esa manera se conocerá su concentración y distribución actual y ver si esta variable también es afectada por el cambio de régimen.

REFERENCIAS

- 1.- Bennis, S., Berrada, F. and Kang, N.** (1997). Improving single-variable and multivariable techniques for estimating missing hydrological data. *Journal of Hydrology*, volumen 91 (números 1-4), 87-105.
- 2.- Boulton, A.J. and Brock, M.A.** (1999). *Australian Freshwater Ecology: Processes and Management*. Glen Eagles Publishing, Adelaide.
- 3.- Campos-Aranda, F.D.** (2015). Estimación simultánea de datos hidrológicos anuales faltantes en múltiples sitios. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 16(2), 295-306.

- 4.- Gehrke, P.C., Brown, P., Schiller, C.B., Moffatt, D.B. and Bruce, A.M. (1995).** River regulation and fish communities in the Murray Darling River system, Australia. *Regulated Rivers: Research and Management* 11: 363-375.
- 5.- Ibisate, A., Ollero, A., and Elena, D. (2011).** Influence of catchment processes on fluvial morphology and river habitats, *30(2)*, 169–182.
- 6. Infante, S., Ortega, J., & Cedeño, F. (2008).** Estimación de datos faltantes en estaciones meteorológicas de Venezuela vía un modelo de redes neuronales. *Revista de climatología*, 8, 51-70.
- 7. Khalil, M., Panu, U.S. and Lenox, W.C. (2001).** Groups and neural networks based streamflow data infilling procedures. *Journal of Hydrology*, volumen 241 (números 3-4): 153-176.
- 8.- Knighton, A.D. (1991).** Channel bed adjustment along mine-affected rivers of northeast Tasmania. *Geomorphology* 4, 205 – 219.
- 9.- Kingsford, R.T. (1995).** Ecological effects of river management in New South Wales. In *Conserving Biodiversity; Threats and Solutions*. pp. 144-161. Eds. R. Bradstock, T.D. Auld, D.A. Keith, R.T. Kingsford, D. Lunney and D. Sivertson, Surrey Beatty and Sons, Sydney.
- 10.- Kondolf, M.G. (1997).** Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental Management* 21 (4), 533 – 551.
- 11.- Leopold, L.B. (1973).** River channel change with time: an example. *Geological Society of America Bulletin* 84, 1845 – 1860.
- 12.- Maheshwari, B.L., Walker, K.F. and McMahon, T.A. (1995).** Effects of river regulation on the flow regime of the River Murray, Australia. *Regulated Rivers: Research and Management* 10: 15-38.
- 13.- Poff, N.L., Allan, J.D., Bain, M.B., Karr, J.R. Prestegard, K.L., Richter, B.D., Sparks, R.E. and Stromberg, J.C. (1997).** The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*. 47: 769-784.

14.- Robertson, A.I., Bacon, P. and Heagney, G. (2001). The responses of floodplain primary production to flood frequency and timing. *Journal of Applied Ecology* 38: 126-136.

15.- Smith, D., Kniveton, D. and Barret, E. (1997). Statistical modeling approach to passive microwave rainfall retrieval. *Journal Of Applied Meteorology*. Vol. 37, No. 2, 1997.135-154 pp.

16.- Walker, K.F. (1985). A review of the ecological effects of flow regulation on the Lower River Murray, Australia. *Regulated Rivers: Research and Management* 8: 103-119.

17.- Williams, G.P., Wolman, M.G. (1984). Downstream effects of dams on alluvial rivers. U.S. Geological Survey Professional Paper 1286 (83 pp.).

3. CAMBIO DE REGIMEN EN RÍOS POR EFECTO DE ESTRUCTURAS TRANSVERSALES Y DERIVADORAS LATERALES EN TABASCO, MEXICO

3.1. RESUMEN

La estabilidad de los ríos de planicie es el resultado de miles de años de evolución y su migración está en función de las características geotécnicas de cada zona. A diferencia de los ríos de montaña, que se encuentran confinados en sus valles, los ríos de planicie se abren sobre extensiones de varios kilómetros. El presente estudio se centra en la influencia antropogénica sobre los cauces de planicie abordando el cambio de régimen al que han sido sometidos, tomando como indicadores los registros históricos de las mediciones hidrométricas de gasto y elevación. Se generaron dos estratos de análisis para seis estaciones de medición sobre los ríos confluentes de Pichucalco-Sierra y Grijalva-Carrizal. Tomando como parteaguas del análisis el antes y después de la operación de las estructuras derivadoras laterales y transversales. También se realizaron campañas de medición con equipos Doppler, para identificar gastos puntuales, elevaciones de lámina de agua y campos de velocidades. Una vez procesada esta información, se elaboraron gráficas comparativas. Se identificó el inicio de la operación de las estructuras en el año 2010. Se observó que, a partir de dicho año, la estación Pueblo Nuevo, misma que se encuentra aguas arriba de las estructuras, registra cambios de régimen cuando se presentan gastos para los cuales las estructuras operan, pero no registran ninguna alteración cuando los gastos son bajos. Los cambios registrados son los siguientes: el río Pichucalco incrementa su régimen, mientras que el Río Carrizal y Grijalva disminuyen su régimen hidráulico. Llegamos a la conclusión de que, como resultado de este cambio de régimen para gastos excedentes, los ríos Pichucalco y de la Sierra presentan el comportamiento de ríos jóvenes, mientras que el río Carrizal presenta el comportamiento de un río completamente estabilizado.

Palabras claves: Confluencias, Obras de Protección y Régimen Hidráulico.

3.2 INTRODUCCIÓN

La actividad humana ha modificado los ríos desde el principio de los tiempos, ya sea para su aprovechamiento o para el control de inundaciones. En las últimas décadas, la modificación de los ríos ha adquirido especial interés e importancia alrededor del mundo, particularmente debido al incremento de diversas obras de protección y regulación.

Obras como estructuras de control, estructuras derivadoras laterales (cauces de alivio), rectificación de cauces, construcción de obras de contención, desazolves y espigones alteran el comportamiento del régimen fluvial (Ashraf *et al.* 2016).

Varios autores han analizado la respuesta de los ríos a diversas obras en ellos (Ibisate *et al.* 2011), y han encontrado diversas alteraciones, estas alteraciones suelen estar presentes ya sea en su geometría (Leopold, 1973), en su hidrodinámica (Knighton, 1991) y su transporte de sedimentos (Kondolf, 1997).

Un caso particular en la construcción de estas obras es el Estado de Tabasco, debido a la excesiva lluvia en la Sierra del estado de Chiapas y a la topografía casi plana del estado de Tabasco, múltiples obras de regulación se han construido, esto con el fin de evitar en sus principales ciudades se inundaciones.

Una de esas obras es la estructura de control denominada el Macayo, la cual se ha ubicado en el río Carrizal, aproximadamente 2.5 km aguas abajo de la bifurcación del río Mezcalapa. Otras dos obras son las estructuras derivadoras Sabanilla y el Censo ubicadas en la margen derecha del río de La Sierra aguas arriba de la confluencia Grijalva-La Sierra.

Debido a esto se planteó como objetivo analizar las alteraciones sufridas en los principales ríos del estado de Tabasco, enfocándose particularmente en la variación y distribución hidrodinámica en las confluencias y bifurcaciones cercanas a estas obras hidráulicas.

3.3 LOCALIZACIÓN

Las zonas estudiadas son 3:

- 1) La bifurcación Samaria-Carrizal, en las coordenadas 468626 E y 1985260.23 N, donde el río Mezcalapa le da origen a los ríos Samaria y Carrizal.
- 2) La confluencia del Grijalva1-La Sierra en las coordenadas 509101.70 E y 1985637.64 N donde estos dos ríos se forman para darle paso a el Río Grijalva2.
- 3) Y la confluencia Grijalva2-Carrizal en las coordenadas 511403.31 E y 1990830.51 N, donde el río Grijalva2 y el Carrizal se unen para formar Nuevamente el Río Grijalva. (ver figura 3.1.).



Figura 3.1. Localización general y ubicación de la zona de estudio.

3.4 METODOLOGÍA

3.4.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

La metodología utilizada parte de la elaboración de tablas, donde se agrupan parámetros hidrológicos que caracterizan el régimen de los ríos a través de sus crecidas y sus épocas de estiaje tales como son las cotas y caudales.

Estas variables se obtienen a partir de registros históricos de datos obtenidos en estaciones hidrométricas, antes y después de las obras tomando como parteaguas el año 2010.

Para apreciar el evidente cambio en el funcionamiento de los ríos intervenidos se construyeron graficas espejo. En ellas se plasmó la distribución de los gastos, tomando como criterio en la distribución de los gastos que la suma del porcentaje de sus gastos era la unidad del gasto total antes de bifurcar o después de confluir.

Para al estudio se escogieron estaciones hidrométricas en los ríos intervenidos, para esto la información se depuró conforme a la fecha de medición y no se tomaron en cuenta los registros en los que hacía falta datos, (ver Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Estaciones Analizadas

Estación	Ubicación UTM		Años de registro	Antes de 2010	Después de 2010
	X	Y			
González	474381	1985286	27	13	4
Pueblo Nuevo	513952	1976314	27	13	4
San Joaquín	505283	1979129	27	13	4
Gaviotas	509469	1987001	27	13	4
Porvenir	512898	1990920	27	13	4
Samaria	471268	1990299	27	13	4

3.4.2 DEPURACIÓN Y TRATADO DE INFORMACIÓN

Para el tratamiento de datos, en cada estación fue necesario verificar los días en que existía información simultánea. Esto con la finalidad de comparar la continuidad de los gastos en cada estación, (ver Figura 3.2).

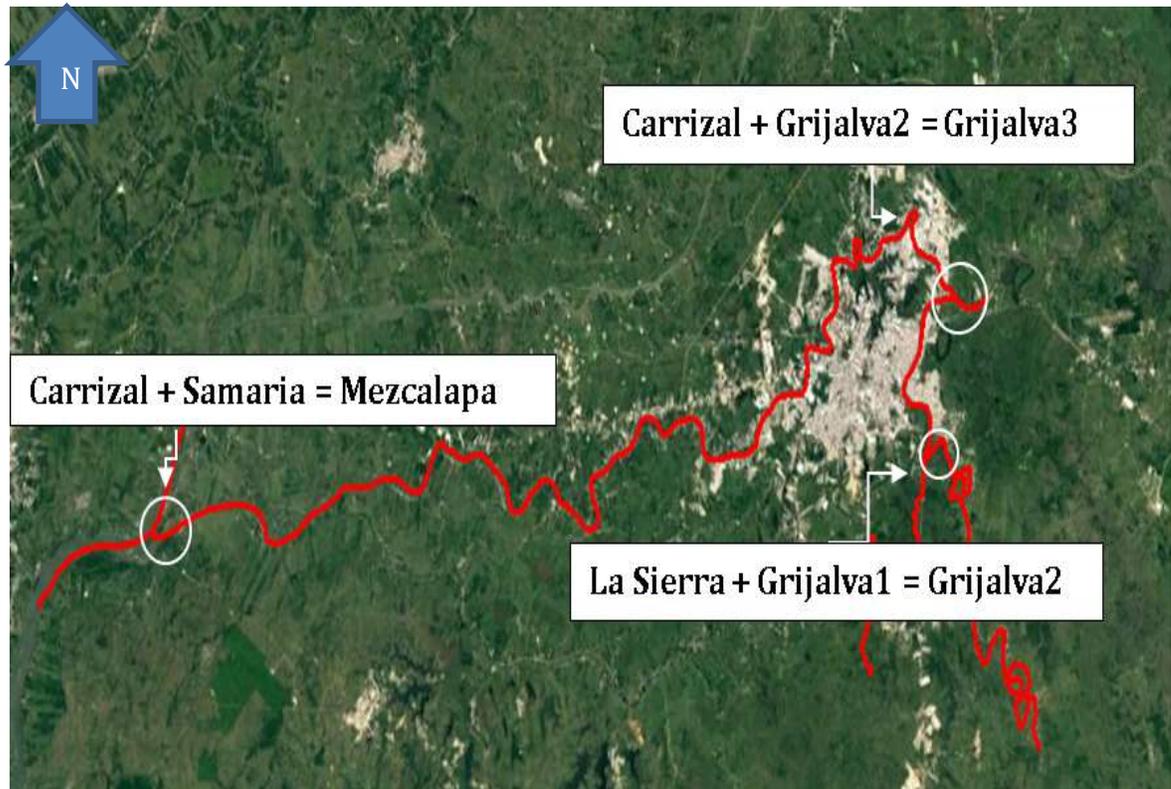


Figura 3.2. Esquema de continuidad en la suma de gastos de los ríos bifurcados y confluentes.

Los factores como son las pérdidas, el clima, la geometría, el tipo de vegetación y el intervalo de tiempo en la medición (Aparicio, 2011) hacen que la continuidad o períodos de datos medibles sea homogéneo.

En tales casos se tuvo que adicionar o quitar caudal aplicando el criterio probabilístico de la proporcionalidad directa (Fiol *et al.*1999) en la que para cada caso existían dos variables Q_1 y Q_2 y un resultado Q_T , donde Q_1 y Q_2 son (directamente) proporcionales a Q_T y éstas variaban proporcionalmente con una constante k .

Dónde:

$$Q_1 + Q_2 = Q_T \quad (1)$$

Y las constantes de proporcionalidad “k” están dadas por:

$$k_1 = \frac{Q_1}{Q_T} \quad y \quad k_2 = \frac{Q_2}{Q_T} \quad (2)$$

Y para los nuevos datos:

$$Q_{1N} = Q_T(k_1) \quad y \quad Q_{2N} = Q_T(k_2) \quad (3)$$

Estas constantes de proporcionalidad varían y dependen de la confluencia y del tiempo. Como resultado de este análisis, se tuvieron más de 10000 constantes k, para los ríos analizados.

3.5 RESULTADOS

Para cada estación se obtuvieron dos gráficas espejo donde se compara la variación la distribución hidráulica de los caudales en las confluencias antes y después de las obras construidas, esto con el objetivo de apreciar mejor el cambio de régimen.

3.5.1 CONFLUENCIA GRIJALVA1-LA SIERRA

Antes del 2010 la distribución promedio de los caudales en la confluencia era de un 54% para el río de La Sierra y un 46% río Grijalva1 lo que significaba que la confluencia tenía un equilibrio entre ambos ríos, ya que su aporte era similar (ver Figura 3.3), sin embargo, después del año 2010 la distribución promedio se vio alterada, para La Sierra el porcentaje de distribución pasó a ser de 73% y el del río Grijalva1 a 27% (ver Figura 3.4).

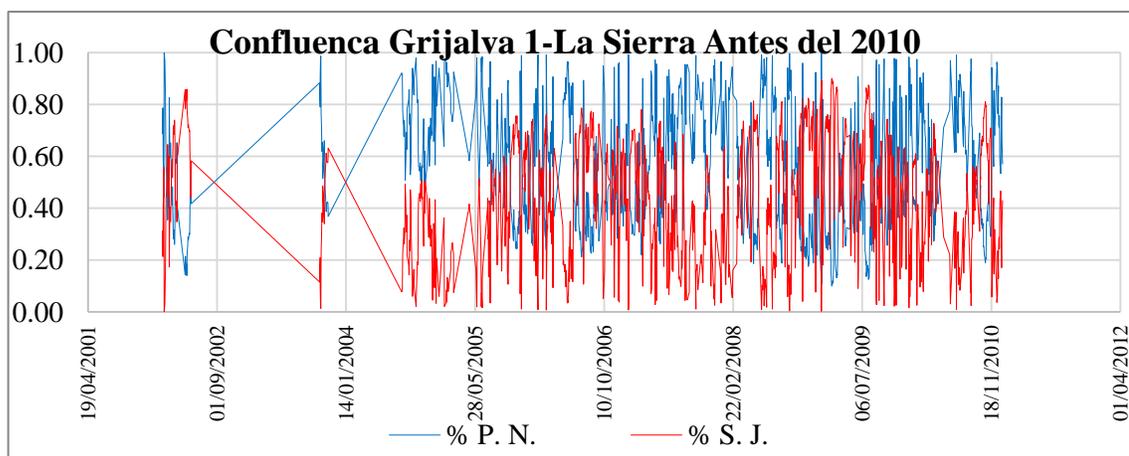


Figura 3.3. Distribución de la confluencia Grijalva1-La Sierra antes de 2010.

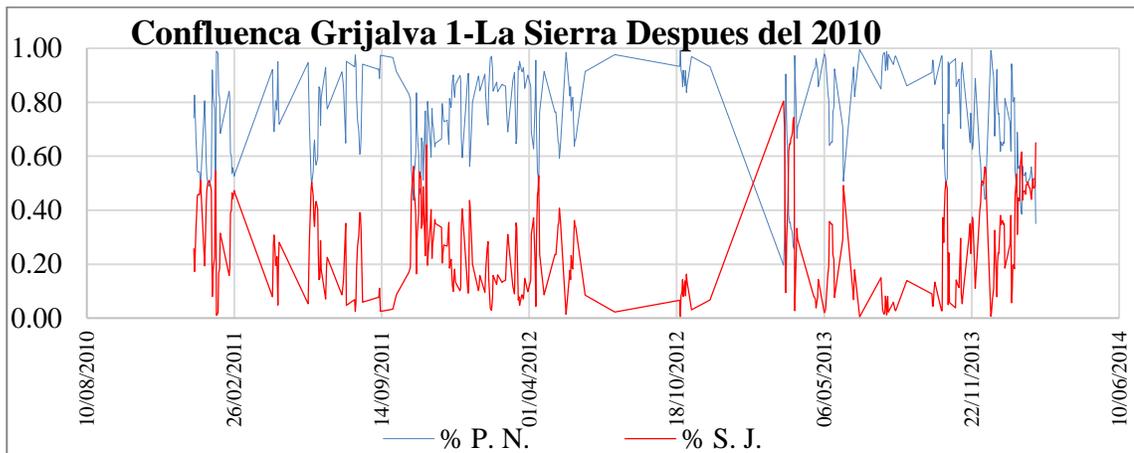


Figura 3.4. Distribución de la confluencia Grijalva1-La Sierra después del 2010.

3.5.2 BIFURCACIÓN SAMARIA-CARRIZAL

Antes del 2010 la distribución promedio de los caudales en la confluencia era de un 53% para el río Samaria y un 47% río Carrizal lo que significaba que la confluencia tenía un equilibrio entre ambos ríos, ya que su aporte era similar (ver Figura 3.5), sin embargo, después del año 2010 la distribución promedio se vio alterada. En Samaria el porcentaje de distribución fue de 78% y el del río Carrizal 22% (ver Figura 3.6).

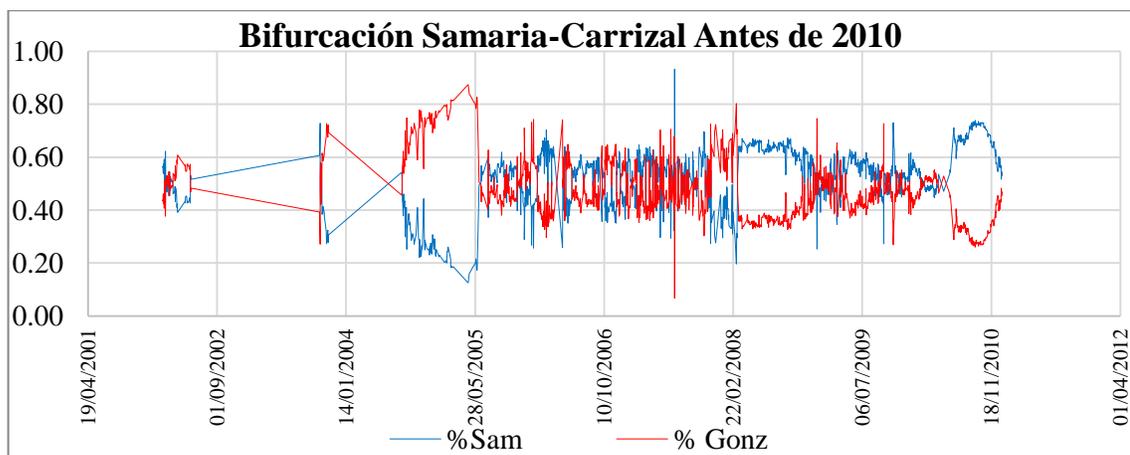


Figura 3.5. Distribución de la bifurcación Samaria-Carrizal antes de 2010.

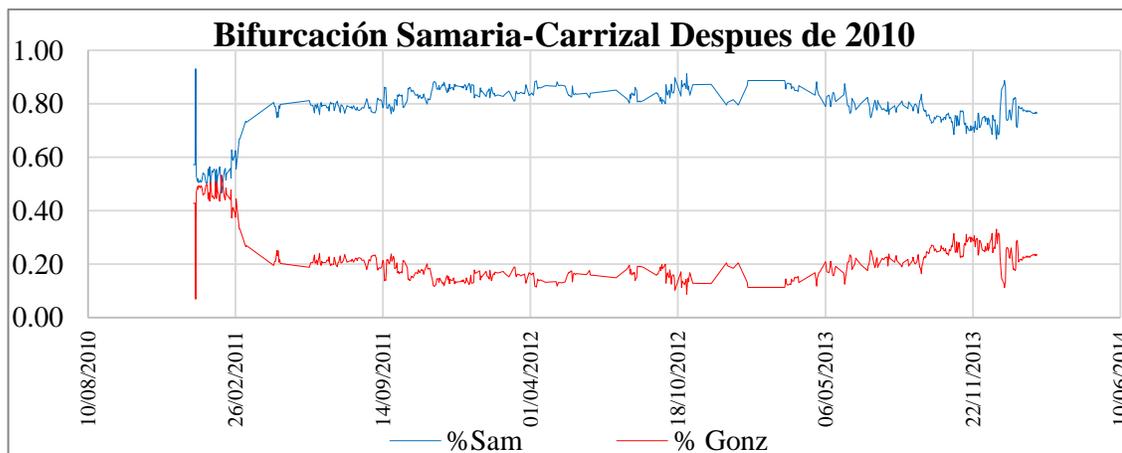


Figura 3.6. Distribución de la bifurcación Samaria-Carrizal antes de 2010.

3.5.3 CONFLUENCIA GRIJALVA2-CARRIZAL

Antes del 2010 la distribución promedio de los caudales en la confluencia era de un 46% para el río Grijalva2 y un 54% río Carrizal lo que significaba que la confluencia tenía un equilibrio entre ambos ríos, ya que su aporte era similar (ver Figura 3.7), sin embargo, después del año 2010 la distribución promedio se vio invertida, para el río Grijalva2 el porcentaje de distribución paso a ser de 56% y el del río Carrizal a 44% lo que significa que a pesar de invertir su distribución el río sigue en equilibrio (ver Figura 3.8).

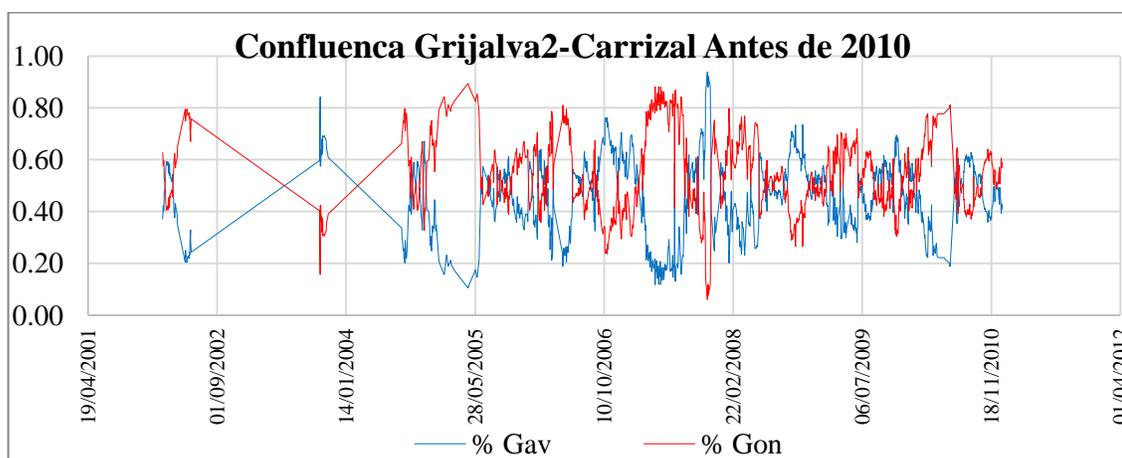


Figura 3.7. Distribución de la confluencia Grijalva1-Carrizal antes del 2010.

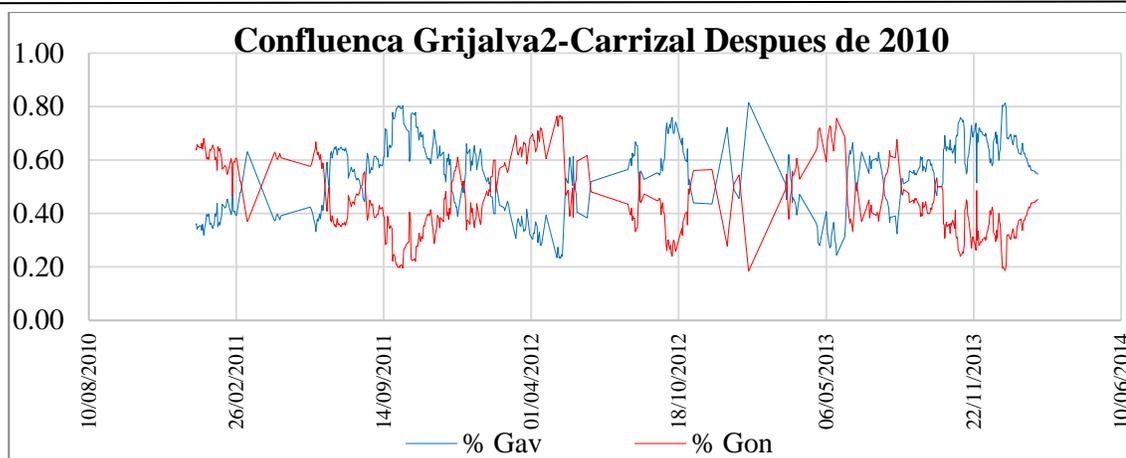


Figura 3.8. Distribución de la confluencia Grijalva2-Carrizal después del 2010.

3.6 CONCLUSIONES

De las gráficas anteriores se concluye que, como resultado de este cambio de régimen la bifurcación Samaria-Carrizal es la más afectada, debido a que en ella se encuentra la obra transversal, tanto en cuestión a la distribución promedio, como en la distribución diaria, ya que en la gráfica se nota que los ríos antes del 2010 alternaban cuál era el principal y el secundario y después de ella el río Samaria paso a ser el principal y el Carrizal a ser secundario.

A pesar de ese cambio drástico, en la confluencia Grijalva2-Carrizal la alteración no fue catastrófica ya que aguas abajo en la estación porvenir de acuerdo al registro histórico se mantuvo un régimen similar para gastos altos y bajos y disminuido para gastos intermedios, debido a que sólo se invirtieron en la distribución promedio y para la distribución diaria sigue existiendo un efecto de oscilatorio entre el río principal y secundario.

También se aprecia que en la confluencia Grijalva1-La Sierra sufrió un cambio aparente, esto se debe al cambio de régimen en la zona de la confluencia Grijalva2- Carrizal ya que a partir de 2010 la inversión de gastos en la bifurcación Samaria-Carrizal, generó sobre esa confluencia una descarga acelerada del río Grijalva2 al no existir la obstrucción provocada por los gastos del río Carrizal, que actualmente están controlados y carecen de un aporte de sedimento al original antes de la operación de la estructura de control el Macayo. Debido a esto el efecto rotario que tenían el río Grijalva1 y La Sierra se perdió. Y el gradiente de descarga del río de la Sierra ha tratado de compensar de forma global el control de los gastos sobre el río Carrizal.

Para tener una completa descripción del cambio de régimen al que están sometidos todos los ríos lo que incluye una descripción tridimensional de la distribución de gastos sólidos y líquidos, es necesario que en trabajos futuros se analicen de forma específica la interacción flujo-sedimento de las bifurcaciones y confluencias, mediante técnicas Doppler.

Otro trabajo a desarrollar sería el estudio de los regímenes por los escurrimientos líquidos- sólidos en las cuencas altas, puesto que ellos son el motor principal que alimentan los cauces de planicie, y con ello verificar mediante técnicas GIS el cambio de uso de suelo y la relación con estos escurrimientos. De esa manera podría abordarse a partir de los años de operación si el cambio de régimen está influenciado por la sobre explotación de las cuencas altas.

REFERENCIAS

- 1.- **Aparico, F. J.** (2011). Fundamentos de Hidrología de superficies. 1 ed. México: Limusa.
- 2.- **Ashraf, Faisal Bin. Ali Torabi Haghghi, Hannu Marttila, Bjørn Kløve** (2016). Assessing impacts of climate change and river regulation on flow regimes in cold climate: A study of a pristine and a regulated river in the sub-arctic setting of Northern Europe. *Journal of Hydrology*. Volume 542, 410–422.
- 3.- **Fiol, M. Luisa, Josep M., Fortuny.** (1999). Proporcionalidad directa la forma y el número. 1ed. España. Editorial Síntesis.
- 4.- **Ibiate, A., Ollero, A., and Elena, D.** (2011). Influence of catchment processes on fluvial morphology and river habitats, 30(2), 169–182.
- 5.- **Knighton, A.D.** (1991). Channel bed adjustment along mine-affected rivers of northeast Tasmania. *Geomorphology* 4, 205 – 219.
- 6.- **Kondolf, M.G.** (1997). Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental Management* 21 (4), 533 – 551.
- 7.- **Leopold, L.B.** (1973). River channel change with time: an example. *Geological Society of America Bulletin* 84, 1845 – 1860.

4. ALTERACIÓN DE LA HIDRODINÁMICA EN CURVAS DE RÍOS POR ESTRUCTURAS DERIVADORAS: CASO DE ESTUDIO, RÍO BAJO GRIJALVA.

4.1. RESUMEN

La alteración del funcionamiento natural del río trae como consecuencia cambios en su morfología. Los ajustes en el cambio hidrodinámico y morfológico del cauce pueden deducirse a partir de la respuesta del propio cauce. Hay estructuras que no generan cambios tan drásticos si los gradientes inducidos hacia aguas abajo son de régimen lento o de tirante subcrítico con un régimen de froude cercano a cero. Se ha demostrado que las zonas en los ríos meándricos más susceptibles y donde se aprecian estos cambios son las curvas ya que en ellas el patrón y desarrollo de los flujos secundarios son el principal motor de migración. Por lo que para este análisis, se propuso como objetivo verificar la respuesta de los flujos secundarios en curvas naturales, afectadas por las derivaciones inducidas de estructuras laterales.

Para poder identificar esta variación geomorfológica e hidrodinámica, se realizó una campaña de medición sobre el río Bajo Grijalva en tres curvas, localizadas aguas abajo de las estructuras derivadoras conocidas como las acachapan. Mediante software especializado y utilizando técnicas de medición Doppler para el uso de ADCP, se recolectaron los datos de campo en tres secciones preestablecidas por estación; aguas arriba de la curva, en el ápice de la curva y aguas abajo de la curva. Una vez procesada la información y analizada, se identificó que en las curvas cargadas sobre la margen izquierda, la vorticidad generada de los flujos secundarios se encuentran más desarrollada, que en las cargadas sobre la margen derecha. Para el caso concreto, se analizaron los radios de curvaturas y fueron similares. Las variaciones más grandes de fondo se dieron en las curvas sobre la margen izquierda.

Palabras claves: Curvas, estructuras derivadoras, flujos secundarios e hidrodinámica.

4.2. INTRODUCCIÓN

Los problemas en la hidráulica fluvial causados por actividades humanas cada vez son más complejos, un caso de ello ocurre en ríos meándricos que experimentan cambios en su desplazamiento debido a que son confinados en zonas de población o próximas a ellas, además de considerar el factor meteorológico que a su vez causa inundaciones en las zonas de planicie. La abundancia de aprovechamientos hidráulicos ha modificado sustancialmente las características de los sistemas fluviales. La mayoría de los ríos en el mundo han sido modificados en su estructura y funcionamiento (Domínguez, *et al.* 2015). Y trae como consecuencia cambios en la morfología del río, mismos que pueden deducirse a partir de la respuesta del propio cauce. Dichos factores incluyen a su vez cambios naturales en los regímenes de caudales y sedimentos, y cambios antropogénicos tales como la estabilización de los márgenes, obras derivadoras, la regulación de la corriente. La respuesta geomorfológica de los ríos a estos factores se manifiesta a través de cambios en la geometría y el trazado en planta. Discriminar estas relaciones de causa-efecto es el paso inicial para comprobar si los impactos dominantes en un período de tiempo dado son naturales o antropogénicos. Los factores responsables de los cambios del cauce son numerosos y bien conocidos, e incluyen modificaciones en el régimen de caudal, erosionabilidad de los márgenes o aportes de sedimentos (Schumm y Lichty, 1965; Lane y Richards, 1997). Actualmente el interés sobre los efectos de las diversas estructuras en el régimen del río ha aumentado.

Un caso particular es el estado de Tabasco donde existe un gran número de ríos que han sido controlados por la intervención del hombre para salvaguardar su protección se ha dado a la tarea de realizar infraestructuras hidráulica que mitiguen los problemas causados en temporadas de lluvias con la realización de protecciones marginales que impiden que sufra un desplazamiento en sus laterales el río, otro caso es el desvío del gasto transitado sobre el río principal a zonas lagunares o donde no exista asentamientos de población. Tales obras de derivación lateral y los efectos que éstas ocasionan sobre los patrones del flujo de velocidades secundarias no han sido estudiadas a fondo.

Por ello el objetivo de este estudio fue determinar la afectación del flujo de velocidades secundarias que se presentan aguas abajo de donde se encuentran obras laterales derivadoras de flujo-sedimento.

4.3. LOCALIZACIÓN

En la zona de estudio se ubican tres estructuras de derivación lateral, la primer estructura de derivación Acachapan I se sitúa en las coordenadas 517871.88 m E y 1993275.53 m N, la estructura de derivación Acachapan II entre las coordenadas 524932.67 m E y 1998391.82 m N, y la estructura de derivación Acachapan III en la ubicación 526240.07 m E y 2000815.27 m N.

La zona de estudio se ubica entre las coordenadas 528537.59 m E y 2001269.55 m N, en el municipio Centro del estado de Tabasco (Figura 4.1.).



Figura 4.1. Ubicación de la zona de estudio en el río Bajo Grijalval.

4.4. METODOLOGIA

4.4.1. HIDRODINÁMICA MEDIANTE PERFILADORES ACÚSTICOS DOPPLER

La medición de la velocidad tridimensional en cuerpos de aguas tales como ríos y canales artificiales o naturales permite la caracterización de la dinámica fluvial y los procesos hidrodinámicos asociados (Tarrab, *et al.* 2010). Esta metodología está avalada por la comunidad científica y empresarial por la eficiencia y rapidez de las mediciones del flujo y velocidades (Barua y Rahman, 1998) (Figura 4.2).

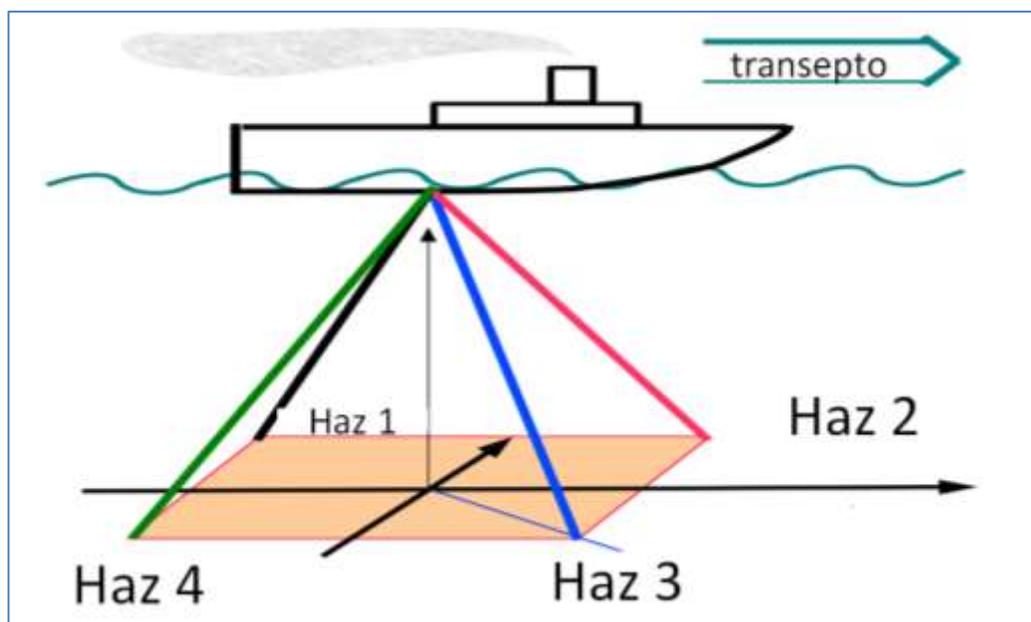


Figura 4.2. Perfilador Acústico Doppler y operación de la instrumentación del equipo (fuente propia).

4.4.2. CORRIENTES SECUNDARIAS

Las corrientes secundarias son las encargadas de redistribuir el campo de velocidades máximas y los esfuerzos de corte que modifican el proceso de erosión y por consecuencia la morfodinámica local, tales efectos se observan con más detalle en zona de curvas donde entra en juego la geometría del río (ver Figura 4.3.).

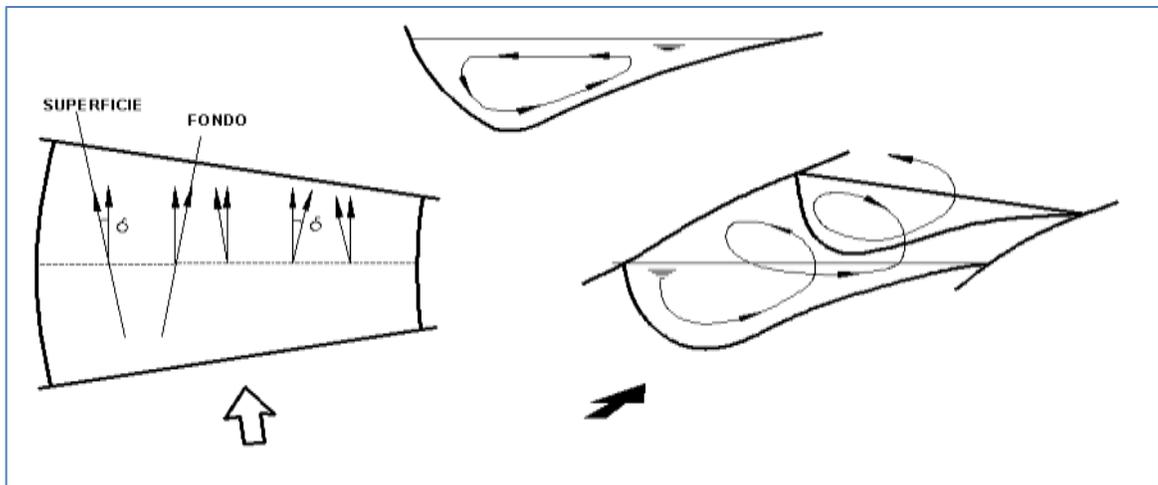


Figura 4.3. Flujo en espiral transmitido característico de las corrientes secundarias (Priego y Rivera, 2016)

4.4.3. ESTRUCTURAS DERIVADORAS LATERALES

Su principal función es desviar mediante un canal hacia el mar, una laguna, otro cauce, a zonas bajas o a depósitos artificiales que puedan ser inundados mientras se presenta la avenida (Figura 4.4). Debido a que las zonas afectadas son elegidas para este fin, los daños son menores (Sala, 1999).

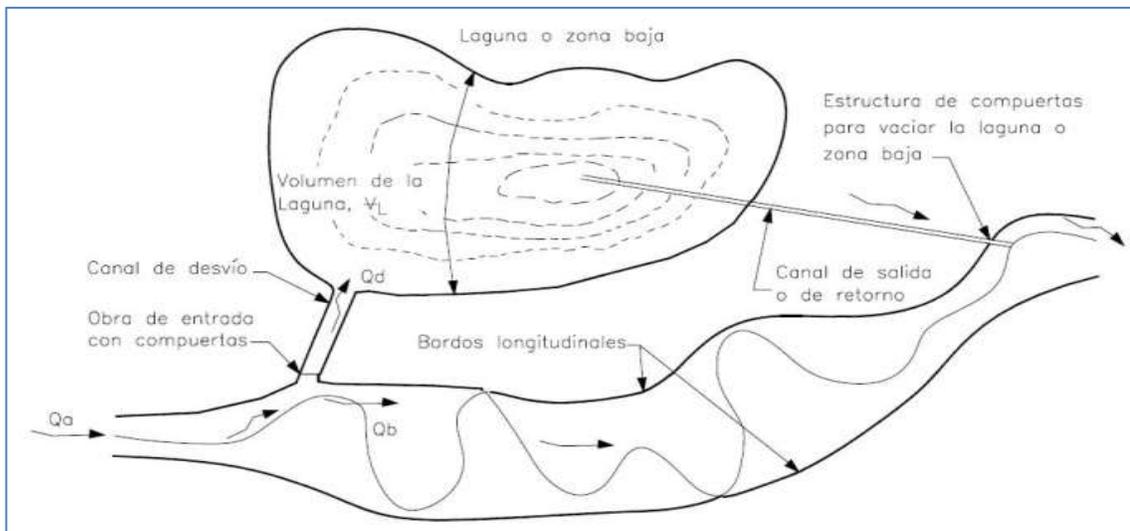


Figura 4.4. Arreglo general de un derivación lateral (Maza, 1993).

4.5. RESULTADOS

4.5.1. VELOCIDADES EN PLANTA

Las velocidades presentadas son promediadas en la transversal, graficadas en planta de la zona de estudio y se dividen en tres curvas. La primer grafica (Figura 4.5) representa la magnitud de las velocidades en la curva 1. En la entrada de la curva van de 0.5 m/s a 0.7 m/s, en la curva disminuyen de 0.10 m/s a 0.40 m/s, y en la **salida** las velocidades encontradas oscilan entre 0.30 m/s a 0.5 m/s.

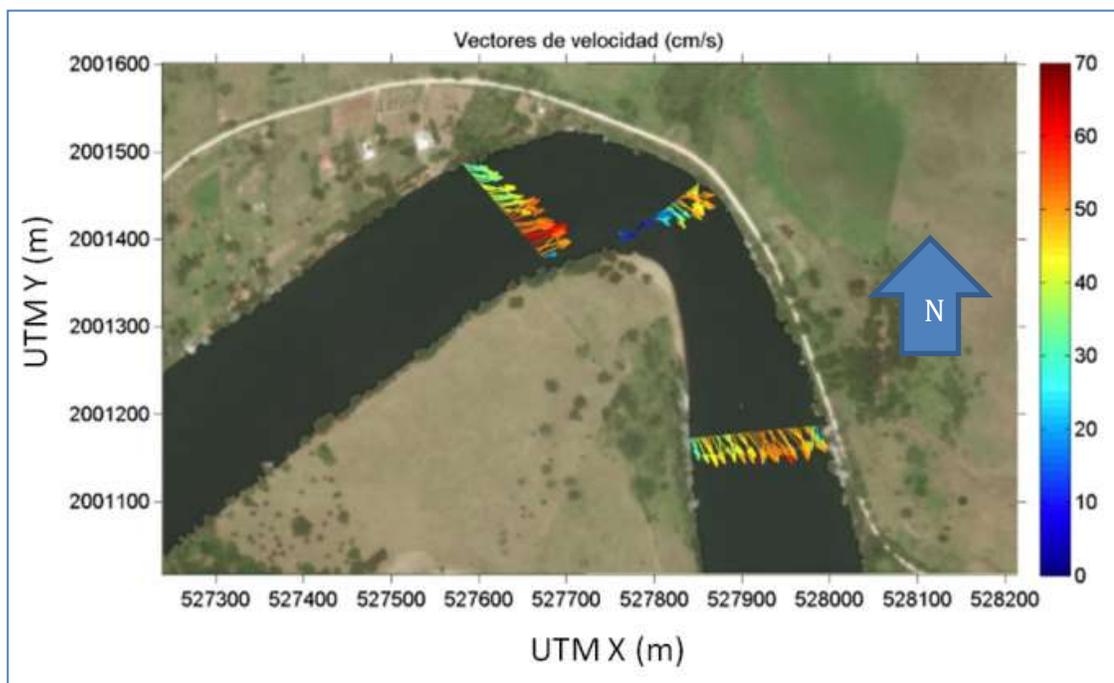


Figura 4.5. Magnitudes de la velocidad en la curva 1.

Las velocidades en la curva 2 (Figura 4.6) presentan el mismo comportamiento en la velocidad de entrada que las encontradas en la salida de la curva 1 (Figura 4.5) presentándose velocidades menores en intervalos de 0.10 m/s a 0.30 m/s y en la salida de la curva son estables en el orden de 0.40 m/s.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

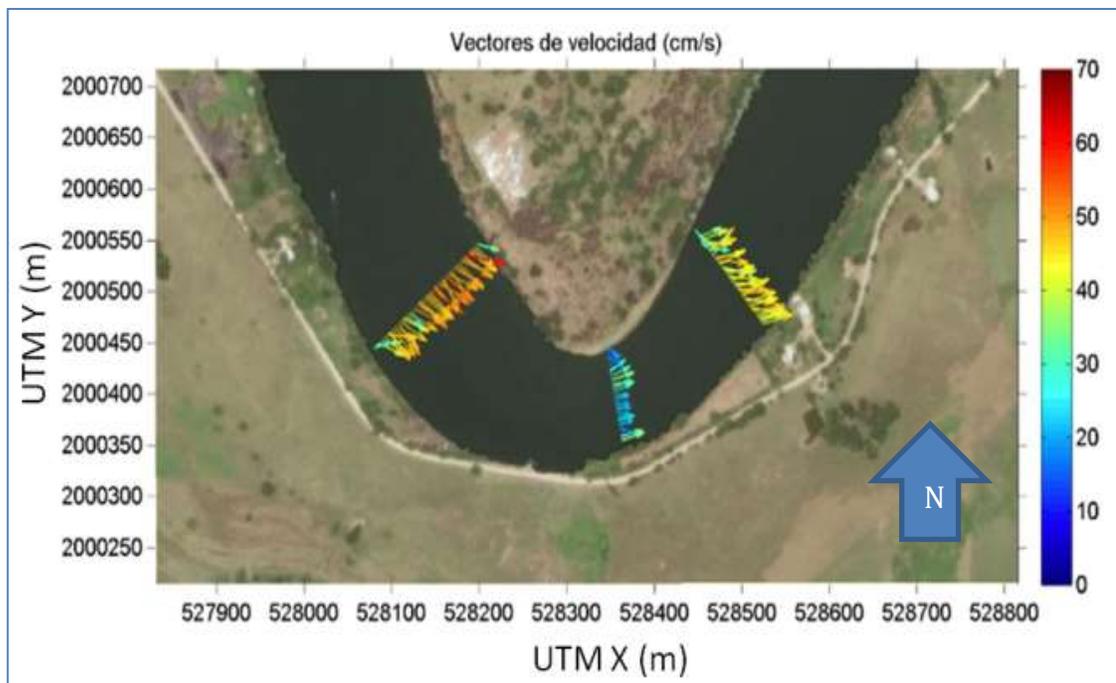


Figura 4.6. Magnitudes de la velocidad en la curva 2.

Las velocidades en la entrada de la curva 3 (Figura 4.7) varían de 0.40 m/s a 0.60 m/s, mientras que las velocidades en la curva y en la salida son del mismo orden 0.30 m/s a 0.50 m/s

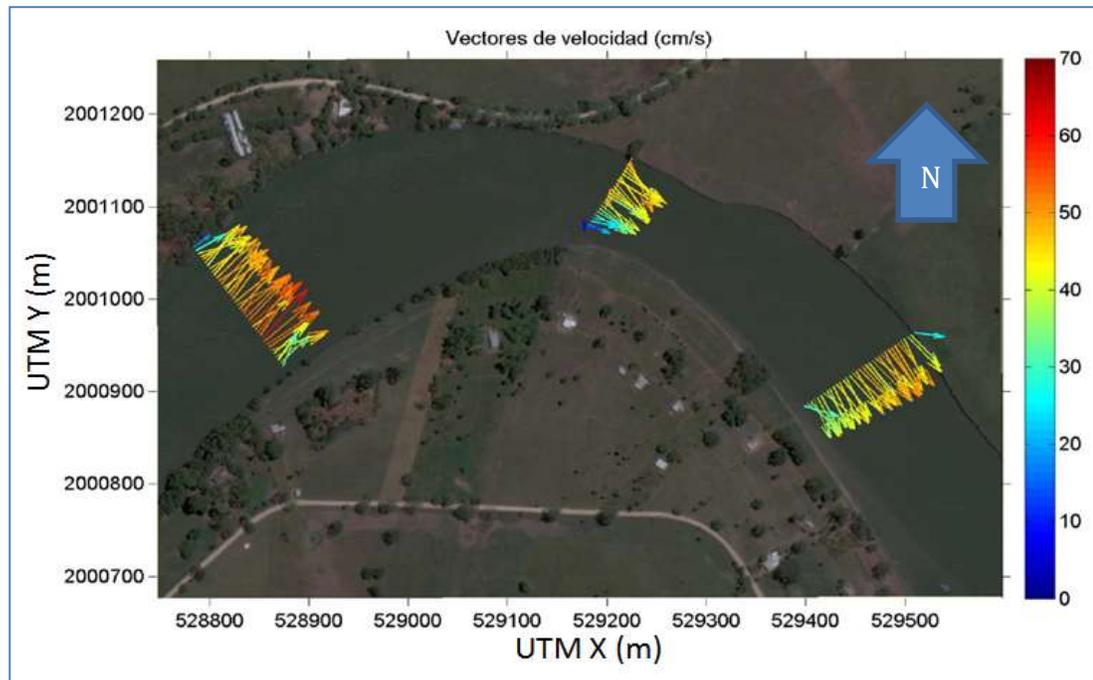


Figura 4.7. Magnitudes de la velocidad promediadas en la transversal en la curva 3.

4.5.2. MAGNITUD DE LA VELOCIDAD Y VECTORES DE FLUJOS SECUNDARIOS

Una vez procesada la información de las secciones transversales, se graficaron la magnitud de las velocidades (escala de colores) y la vorticidad de las corrientes secundarias en vectores. A continuación, se muestran las imágenes.

Las magnitudes de la velocidad y flujos secundarios de la curva 1 (Figura 4.8). Presenta un desarrollo de vorticidades en sentido antihorario en todas sus secciones.

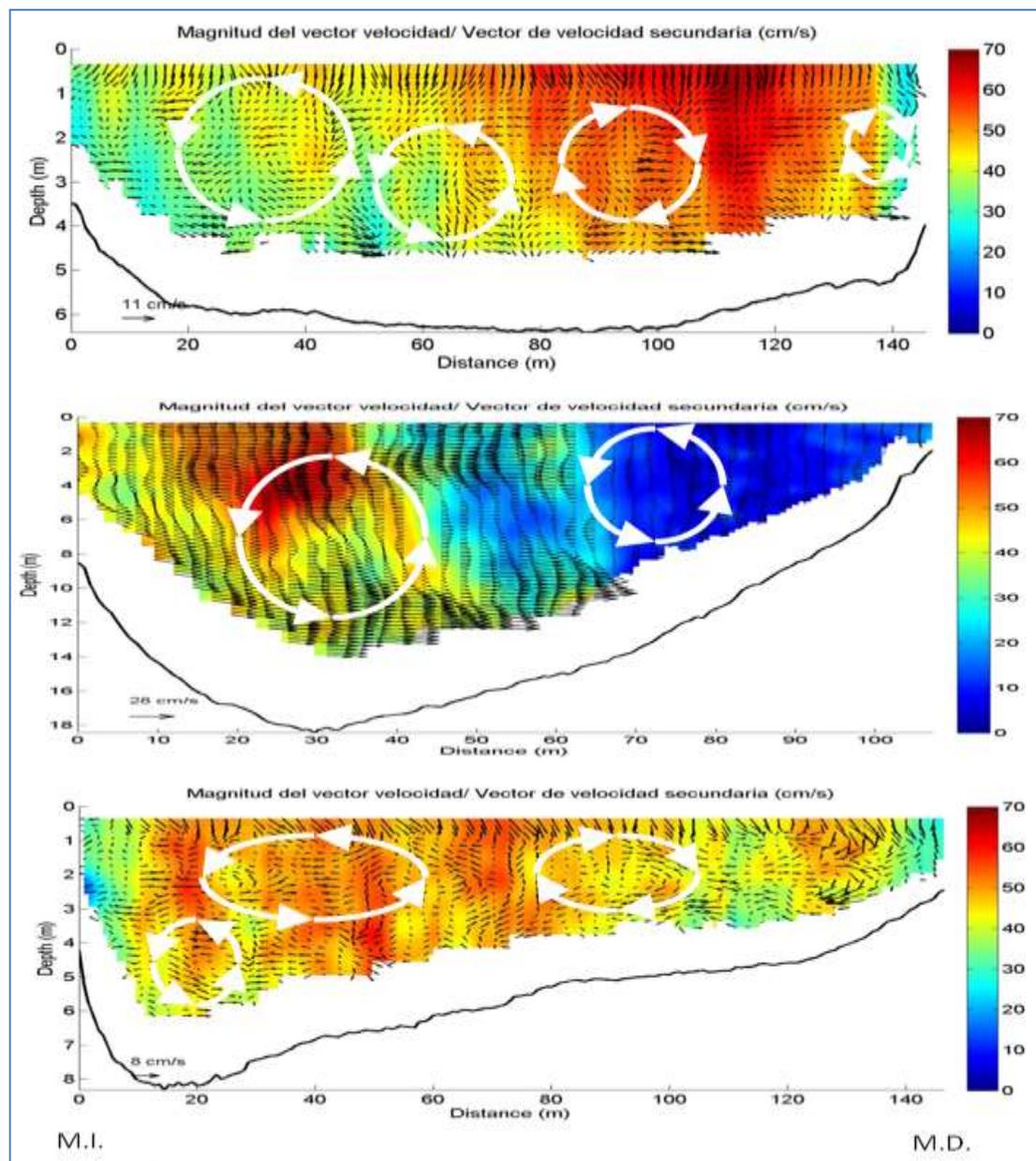


Figura 4.8. Magnitud de la velocidad y velocidades secundarias de la curva 1.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

Las magnitudes de la velocidad y flujos secundarios de la curva 2 (Figura 4.9). Presenta un patrón poco desarrollado antes, durante y después del ápice de la curva muy aleatorio con patrones más desarrollados y formados en sentido horario.

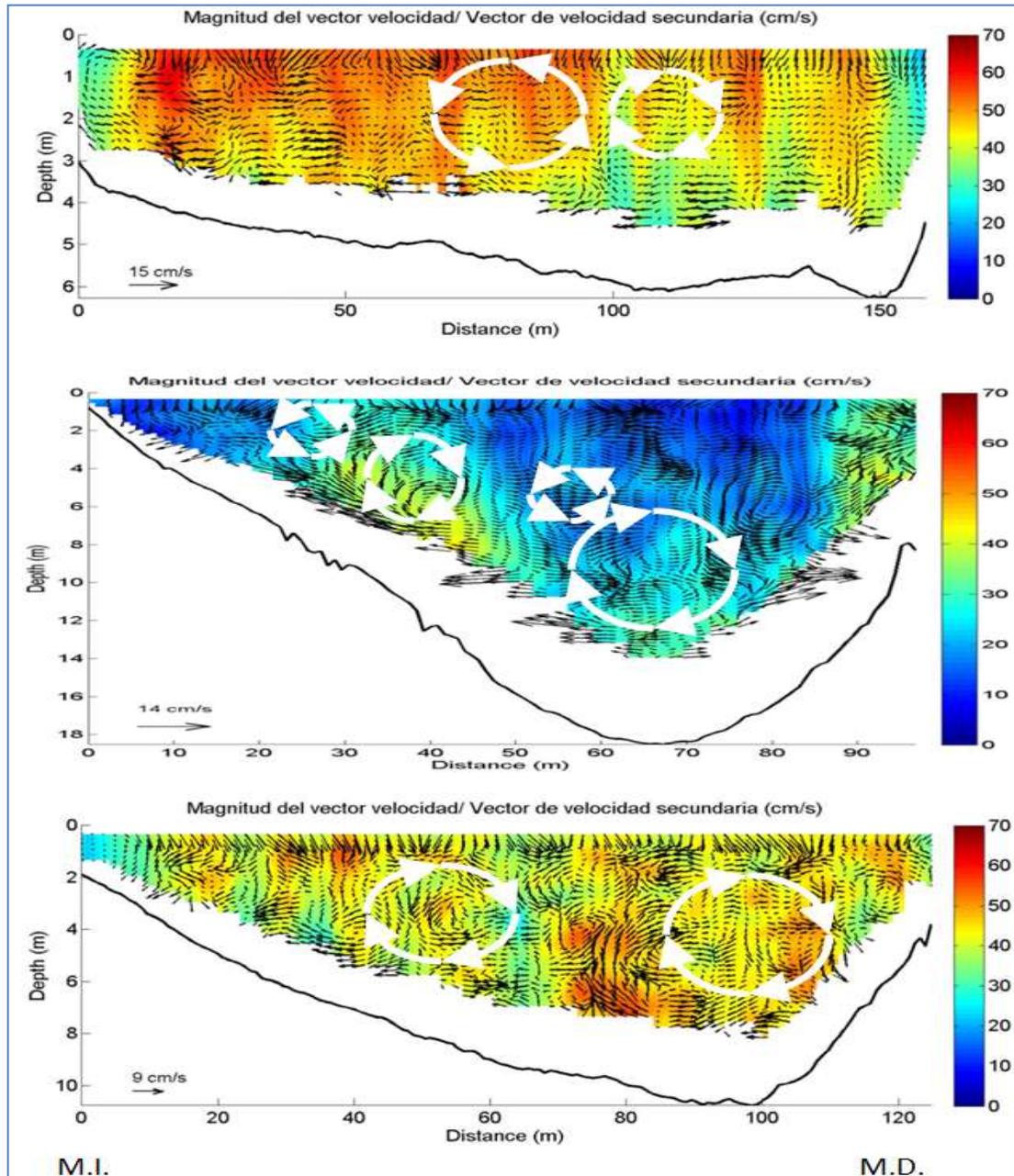


Figura 4.9. Magnitud de la velocidad y velocidades secundarias de la curva 2.

Las magnitudes de la velocidad y flujos secundarios de la curva 3 (Figura 4.10). Presenta un patrón de vorticidad horario antes del apice y antihorario después de él.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

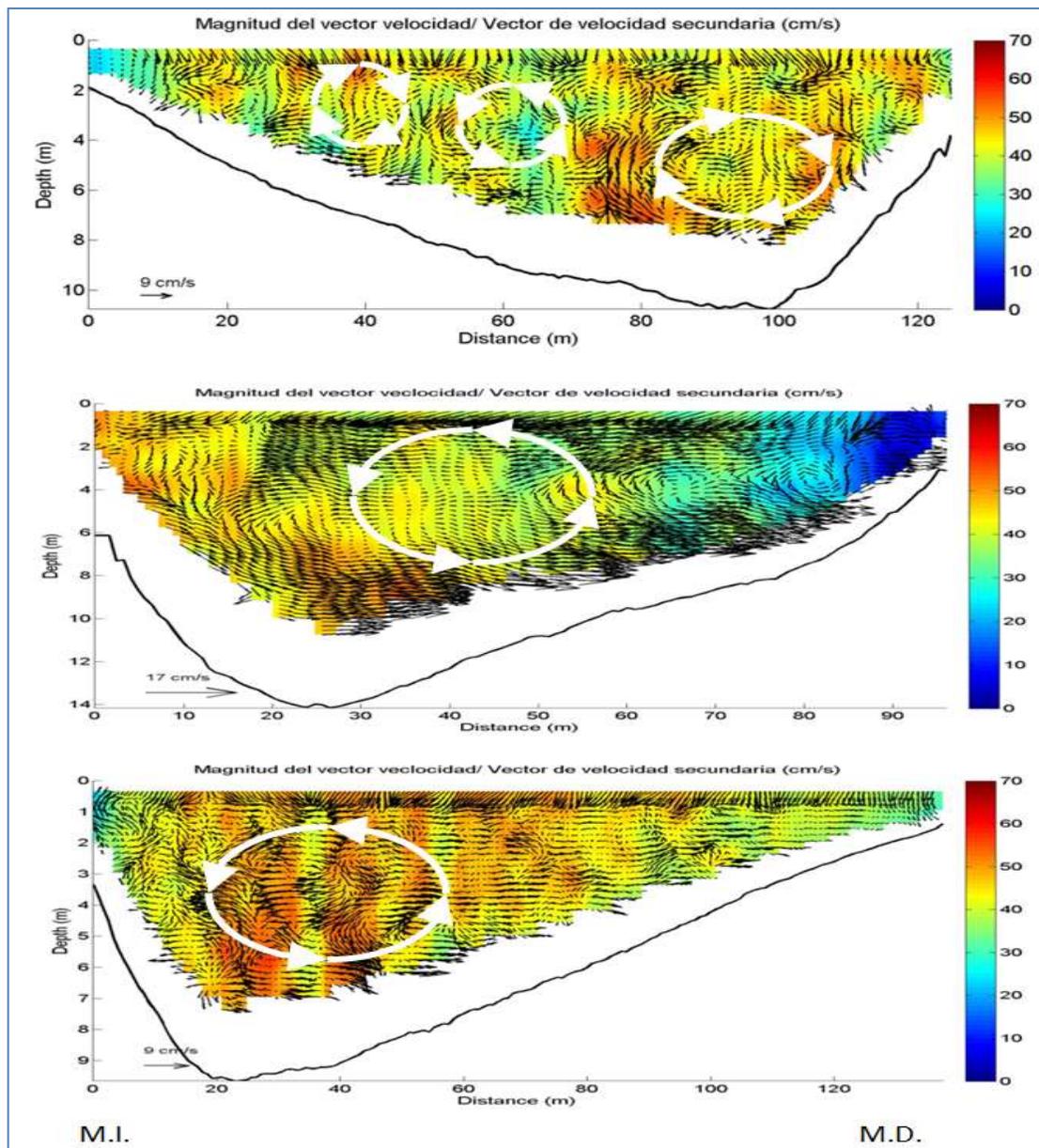


Figura 4.10. Magnitud de la velocidad y velocidades secundarias de la curva 3.

Del análisis realizado la curva dos presenta un patrón no desarrollado de flujos secundarios y una orientación del ápice hacia aguas arriba, caso contrario de las curvas con un patrón desarrollado de flujos secundarios pero con una orientación de las curvas hacia aguas abajo. Por lo que para estos análisis se pudo observar que las curvas 1 y 3 son las que mejor desarrollan los flujos helicoidales y están de acorde a lo que teóricamente expuso y reporto Rozovskii en 1957, no así la curva 2 quien no sigue dichos patrones hidrodinámicos.

4.6. CONCLUSIONES

De las magnitudes de velocidades presentadas en planta, se observó que las velocidades mayores se presentan en la entrada de las curvas, predominan en la curva externa y el centro del río. Las velocidades menores ubican en la curva en la parte interna y en la salida sobre toda la sección.

La distribución de las corrientes secundarias en las curvas de la margen derecha, tienen un sentido de rotación horario en su vorticidad y sin un desarrollo definido sobre la transversal. Esto podría explicar de forma general porque algunas curvas tienen un proceso más agresivo de erosión, ya que las de mayor erosión observadas en ortofotos y campo fueron las de la margen izquierda.

El proceso de migración por efecto de las estructuras observado fue más evidente en las curvas sobre la margen izquierda, ya que tanto el fondo como sus márgenes han sufrido alteraciones y menos evidente en la margen izquierda.

En los tres casos el patrón de las corrientes secundarias, aguas abajo y arriba de las curvas fue en sentido antihorario. Y las curvas con las vorticidades más grandes y sobre toda su sección transversal, fueron la de la margen izquierda con una orientación en el sentido del flujo hacia abajo y en la derecha hacia arriba.

REFERENCIAS

- 1.- Barua, D.K., Rahman, K.H.** (1998). Some Aspects of Turbulent Flow Structure in Large Alluvial Rivers, *J. Hydr. Res.* 36 (2), pp. 235–252.
- 2.- Domínguez-Sánchez, T. A., Lomelí-Meza, J., Ibáñez-Castillo, L. A., & Balandra, M. A. G.** (2015). Determinación de Caudal Ecológico del Río Mezcalapa en Base a la Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 con Consideraciones Hidrológicas e Hidráulicas. 1er Congreso.
- 3.- Gastón A. Priego-Hernández; Fabián Rivera-Trejo (2016).** “Secondary currents: Measurement and analysis”, *Atmósfera*, vol.29, no.1, p. 23-34
- 4.- Lane, S.N. y Richards, K.S.** (1997): “Linking River Channel Form and Process: Time, Space and Causality Revisited”, *Earth Surface Processes and Landforms* 22. pp. 249–260

5.- Maza, J. Y. (1993). "Manual de Ingeniería de ríos", Obras de Protección para el Control de Inundaciones , Cap. 16. México: Intituto de Ingeniería, UNAM.

6.- Sala, S. M. (1999). Obras de protección contra inundaciones. México: CENAPREP.

7.- Schumm, S.A. y Lichty, R.W. (1965): “Time, Space and Causality in Geomorphology”, American Journal of Science 263. pp. 110–119

8.- Tarrab, L., G., G. M., & M., G. C. (2010). Optimización de Estrategias de Muestre de Técnicas de Medición Hidroacústica a Partir del Uso de Simulaciones Numéricas Directas. Asociación Argentina de Mecánica Computacional , Buenos Aires, Argentina.

5. ALTERACION DE CORRIENTES SECUNDARIAS POR ESPIGONES, ESTIMADAS MEDIANTE TECNICAS DOPPLER EN EL RÍO CARRIZAL.

5.1. RESUMEN

Los corrientes secundarias más desarrolladas en los ríos se identifican en curvas, dándole forma al extradós e intradós de las mismas por lo que la evolución del meandro se da con más frecuencia en estos sitios (Rozovskii, 1957). En este caso de estudio el objetivo fue analizar la evolución y alteración de las corrientes secundarias del punto de vista hidrodinámico mediante técnicas Doppler en una zona de espigones. Éstas son necesarias ya que el flujo puede ser caracterizado tridimensionalmente sobre la transversal y de esa manera conocer las alteraciones producidas por estas infraestructuras. Para dicho análisis se realizó la planimetría con estación total, batimetría y medición de gastos con ADCP multihaz y software especializado para el proceso de la información. Una vez obtenidos los datos de las mediciones se observó que la nueva geometría de margen y fondo en la curva impuesta por espigones, alteran y dan forma a las corrientes secundarias, alejándolos de la parte más profunda y moviendo el efecto erosivo de la parte interna hacia la externa. De igual forma con la caracterización hidrodinámica en planta se pudo identificar que las nuevas trayectorias del vector velocidad impuestas por los espigones, se reflejan hacia aguas arriba y abajo de la zona estudiada, centrándose en el cauce y la margen contraria. Finalmente del análisis realizado podemos observar que a pesar de la alteración de las corrientes secundarias y las nuevas orientaciones de los vectores de velocidad, el criterio de diseño fue adecuado en la línea extrema de defensa, ángulos y separación de espigones utilizados, restituyendo y alejando el efecto erosivo de la margen erosionada.

Palabras claves: ADCP, Corrientes secundarias, topografía compleja y espigones

5.2. INTRODUCCIÓN

Los ríos meándricos experimentan desplazamientos laterales haciéndose más evidentes en las curvas de zonas aluviales donde la margen interior está sujeta a un proceso de erosión, mientras que la exterior, a uno de sedimentación. Por lo tanto el fenómeno de migración de cauces meándricos es de interés por tratarse de un fenómeno físico que afecta a los centros de poblaciones adosadas a ellos. Las justificantes que mueven estos estudios se centran en determinar las variables geométricas e hidráulicas que intervienen en ellas para poder controlarlas (Vide, 2003).

Una de las principales variables para la migración de estos cauces de planicie es debida en gran medida al efecto de las corrientes secundarias. Éstas actúan sobre las secciones transversales normales al flujo principal (Rozovskii, 1957). La migración de estos cauces se da principalmente en las curvas donde el efecto de las corrientes secundarias es más evidente. Sin embargo, en zonas rectas también existen (aunque en menor proporción), debido al esfuerzo cortante de fondo y a las estructuras y cavidades en las zonas transversal y longitudinal del cauce (Falcón, 1984).

El gasto de operación en estos cauces juega un papel importante en el desarrollo de las corrientes secundarias en donde la mayor parte del año predominan los gastos bajos y medios. Ahora bien, para gastos altos, éstas se desarrollan con mayor facilidad (Falcón *et al*, 1979). Sin embargo, se ha observado que el radio de curvatura juega un papel importante en la evolución de estos cauces meándricos, ya que en curvas cerradas el efecto es más representativo que en cauces con radios de curvaturas más abiertos. En consecuencia, el proceso de migración por efecto de las corrientes secundarias es más acelerado con gastos altos (Seo *et al*, 2008).

Estos desplazamientos tienen que ser controlados para evitar que el río afecte vías de comunicación, canales de riego o poblaciones, o cuando se desea que un río escurra a lo largo de un solo cauce en las zonas donde es muy meándrico y tiene islas. Para ello, se requiere de la construcción de obras que fijen las márgenes de forma permanente. Esto se logra mediante espigones, recubrimientos o muros marginales, así como diques marginales (Maza y García, 2012).

El propósito principal de las obras mencionadas es evitar el contacto directo entre el flujo con alta velocidad y el material que forma la orilla permitiendo con ello guiar el flujo en una dirección deseada y conveniente.

Los espigones son estructuras interpuestas a la corriente unidas a la margen por uno de sus extremos y orientadas con cierto ángulo. El objetivo principal es evitar la erosión y el transporte de los sedimentos conformando la nueva margen. El uso de espigones como medidas de solución al problema de la erosión generan interrogantes respecto a la correcta implementación de estas estructuras, originado con ello intensos análisis de campo y laboratorio con la finalidad de encontrar alteraciones generadas en las geometrías del cauce (Berezowsky y Vilchis, 2000).

Una herramienta de análisis para estos tipos de estructuras son los modelos físicos considerados como modelos de cajas negras por el factor de escala ya que dada una condición solo se conoce una respuesta, sin saber el motivo que la origina debido a que el sedimento no se puede escalar. El tiempo de mediciones del campo de velocidad es rápido sin embargo, por la magnitud de la escala, los equipos de mediciones generan turbulencia en el flujo causando incertidumbre en los datos medidos. Ahora bien, para el caso de medición realizada en campo, tradicionalmente los equipos utilizados para medir las velocidades del flujo eran molinetes y el factor de escala no representaba incertidumbre, pero el tiempo de medición era lento y el cambio de régimen del flujo variable (Yossef y Vriend, 2011). Debido al avance de la tecnología, en particular en los sistemas de posicionamiento global y de los velocímetros con tecnología acústica Doppler, se pueden generar a detalles el campo de velocidades tridimensionales para grandes sistemas fluviales y estructuras de espigones (Szupiany *et al*, 2012). Esto permite realizar mediciones in situ de las estructuras existentes en ríos. Actualmente existen metodologías bien definidas para estos equipos que permitan la obtención de datos confiables y precisos del campo de velocidad del flujo.

Un caso de interés actualmente es el río Carrizal; nace de una bifurcación en el río Samaria y se encuentra controlado desde el inicio por una estructura transversal y termina en una confluencia con el río Grijalva. Geográficamente se encuentra ubicado en una zona aluvial y tiene una longitud de 60 km, en donde 20 km transita por la capital del estado Tabasco (Rivera *et al*, 2006). Con el paso del tiempo ha tenido un incremento en sus

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

gastos debido a la inversión de flujo, que en su mayoría se transitaba por el río Samaria, gobernado por la operación del sistema de presas alto Grijalva y que tiene una interacción directa con la presa Peñitas (Velásquez, 1994). El río Carrizal tiene estructuras con espigones y ha logrado la estabilidad y permanencia de márgenes con corrimientos marginales en las zonas urbanas, sobre todo en sitios con radios de curvatura pequeños.

5.3. LOCALIZACIÓN

La zona de estudio se ubica entre las coordenadas 510849.00 m E y 1991543.00 m N, en el municipio Centro del estado de Tabasco, lugar donde se ubican seis espigones. (Figura 5.1).



Figura 5.1. Ubicación de la zona de estudio en el río Carrizal.

5.4. METODOLOGÍA

5.4.1. TOPOGRAFÍAS COMPLEJAS

La configuración del cauce se realizó mediante un perfilador acústico multihaz (ADCP) y la planimetría mediante estación total y GPS en la zona de estudio (figura 5.2.).



Figura 5.2. Configuración de fondo con ADCP multihaz.

5.4.2. HIDRODINÁMICA MEDIANTE PERFILADORES ACÚSTICOS DOPPLER

La medición de velocidades tridimensionales se basó en la metodología de (Barua y Rahman, 1998), en donde el uso de tecnología acústica con un ADCP facilita la recolección información (figura 5.3).

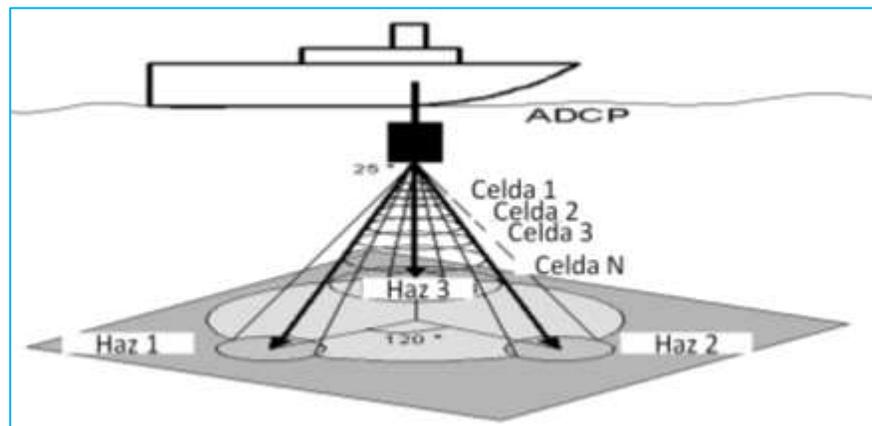


Figura 5.3. Perfilador Acústico Doppler y operación de la instrumentación del equipo (fuente propia).

5.4.3. CORRIENTES SECUNDARIAS

Las corrientes secundarias son las encargadas de redistribuir el campo de velocidades máximas y los esfuerzos de corte que modifican el proceso de erosión y por consecuencia la morfodinámica local. Tales efectos se observan con más detalles en zona de curvas donde entra en juego la geometría del río (ver figura 5.4).

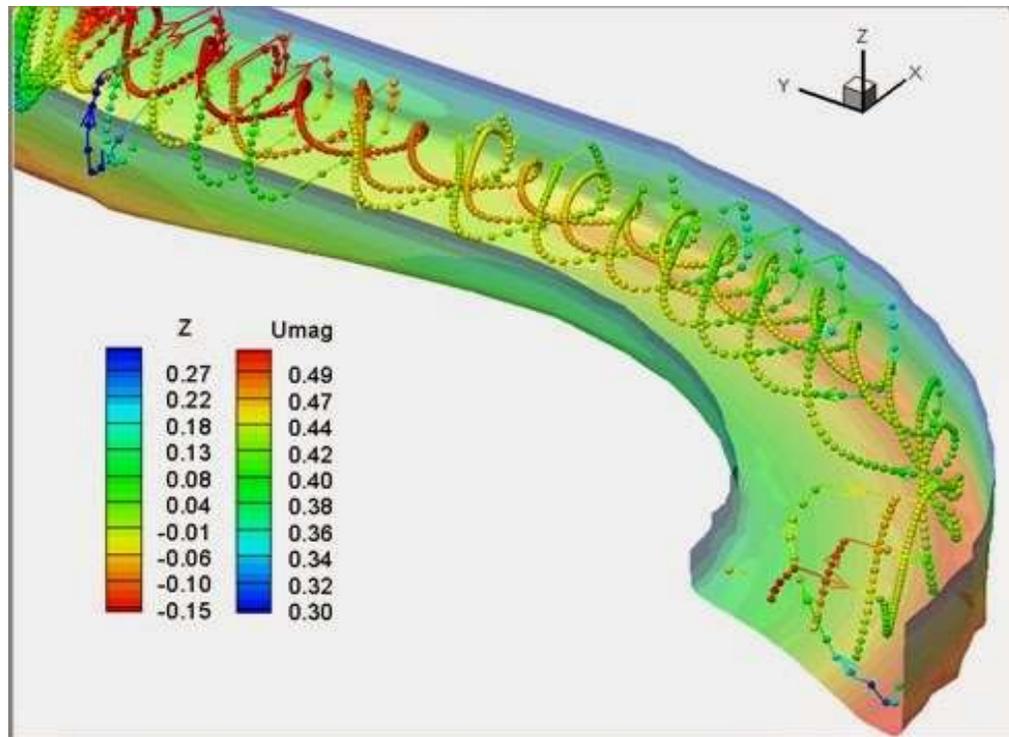


Figura 5.4. Flujo en espiral transmitido, característico de las corrientes secundarias (Crear, 2017).

5.4.4. ESTRUCTURAS DE ESPIGONES

Los espigones son estructuras interpuestas a la corriente, cuyo extremo se ubica en la margen (ver figura 5.5) El propósito de dichos espigones es evitar el contacto directo entre la velocidad del flujo y el material que forma la orilla. Esto sucede al guiar el flujo en una dirección deseada y conveniente (Maza y García, 2012), (ver figura 5.6).

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

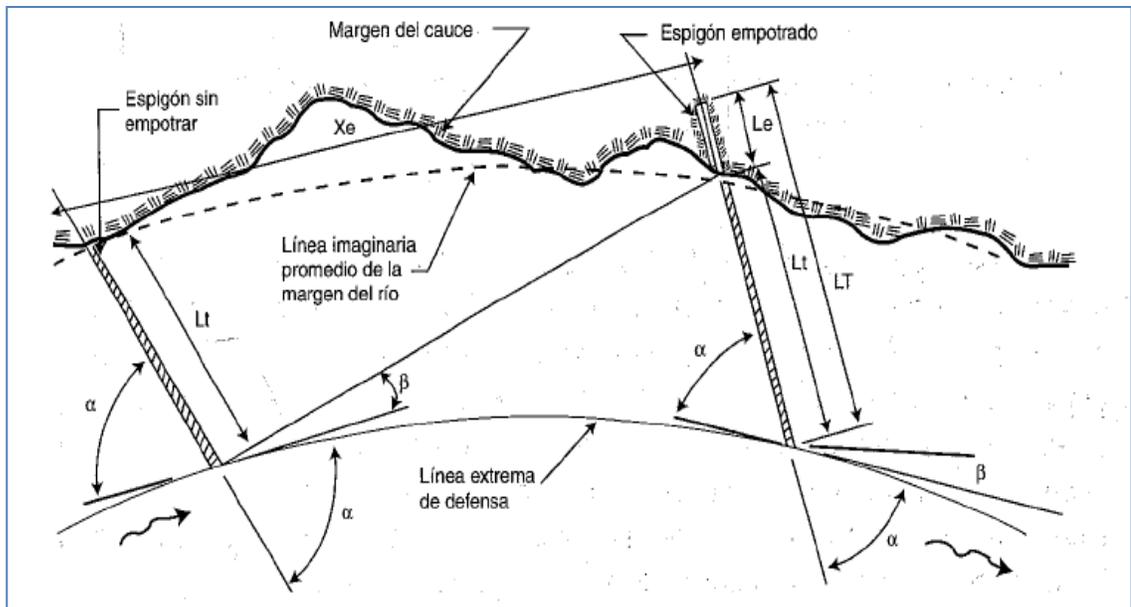


Figura 5.5. Configuración preferente de puesta en marcha de espigones (Maza y García, 2012).

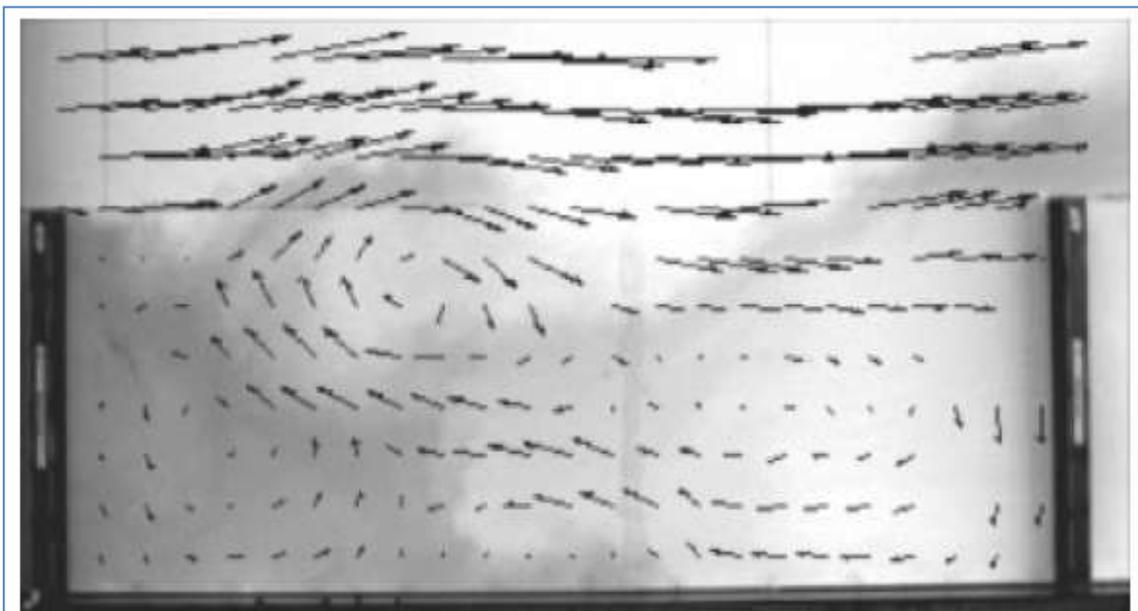


Figura 5.6. Desvió de líneas de corrientes en laboratorios (Mccoy et al, 2008).

5.5. RESULTADOS

5.5.1. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN

Se obtuvo el modelo digital de elevaciones de los datos obtenidos en la campaña topobatimetría (figura 5.7).

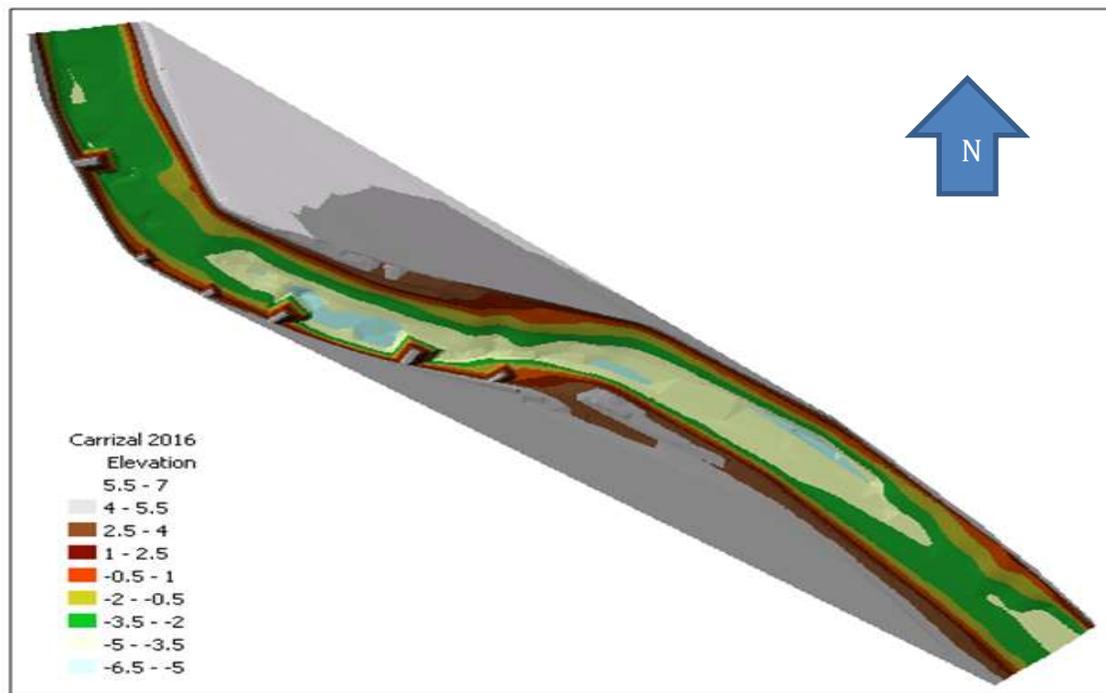


Figura 5.7. Levantamiento de topobatimetría del río Carrizal.

5.5.2. VELOCIDADES EN PLANTA

Se graficó la distribución de los vectores resultantes en planta y se observó que en la sección 1 antes de los espigones las velocidades oscilaron entre 0.05 y 0.25 m/s, mientras en las secciones sobre los espigones oscilaron entre 0.15 y 0.4 m/s. En las secciones aguas abajo de la influencia de los espigones se observa que el régimen se centra sobre el cauce con velocidades máximas 0.4 m/s, y sobre la margen derecha e izquierda las velocidades oscilan entre 0.05 y 0.35 m/s., (figura 5.8). La campaña de medición se realizó en octubre de 2016 y el gasto medido fue de 50 m³/s.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

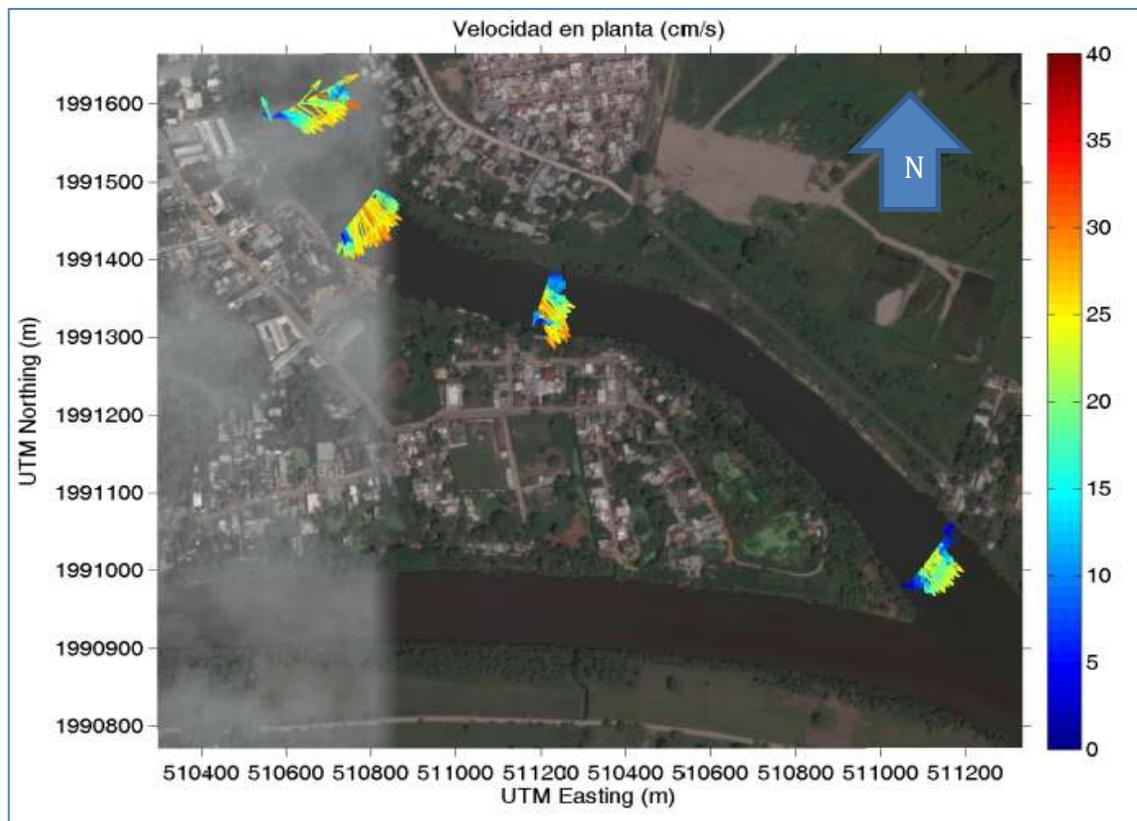


Figura 5.8. Velocidades en planta del río Carrizal.

5.5.3. MAGNITUD DE LA VELOCIDAD Y VECTORES DE FLUJOS SECUNDARIOS

Una vez graficada sobre las secciones transversales la magnitud de las velocidades y la vorticidad de las corrientes secundarias en vectores se observó que en la sección aguas arriba de los espigones la distribución de velocidades fue más uniforme y las corrientes secundarias se encuentran distribuidas de mejor manera sobre la margen izquierda (figura 5.9). Sobre la sección 2 (figura 5.10) y la sección 3 (figura 5.11) entre los espigones se observó que el desarrollo de las velocidades secundarias se aleja de la margen derecha y su desarrollo no fue homogéneo.

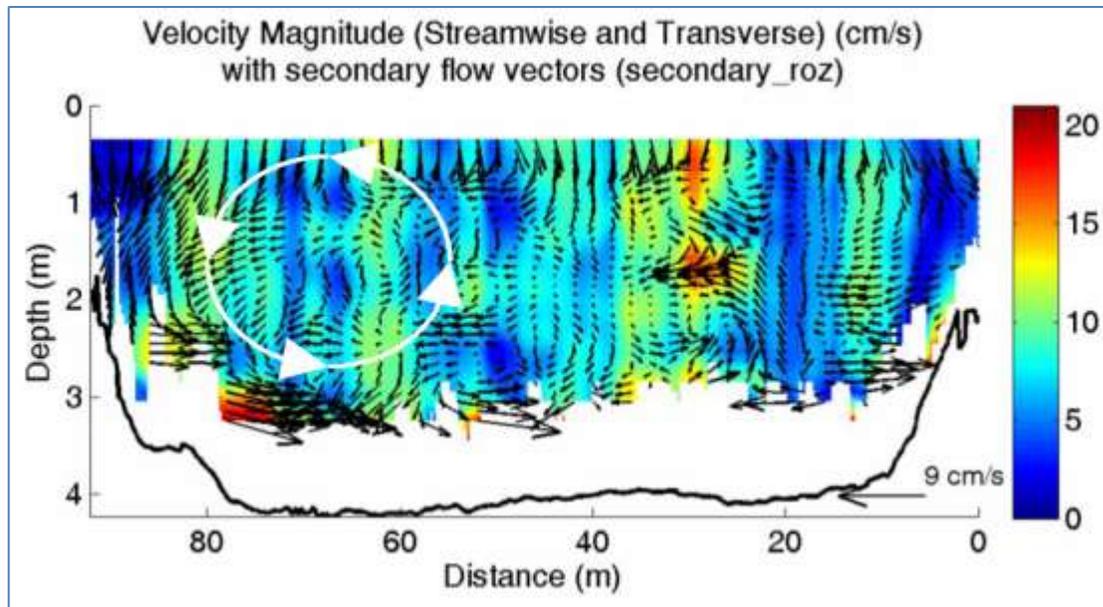


Figura 5.9. Velocidades y vectores transversales de la sección 1, en el río Carrizal.

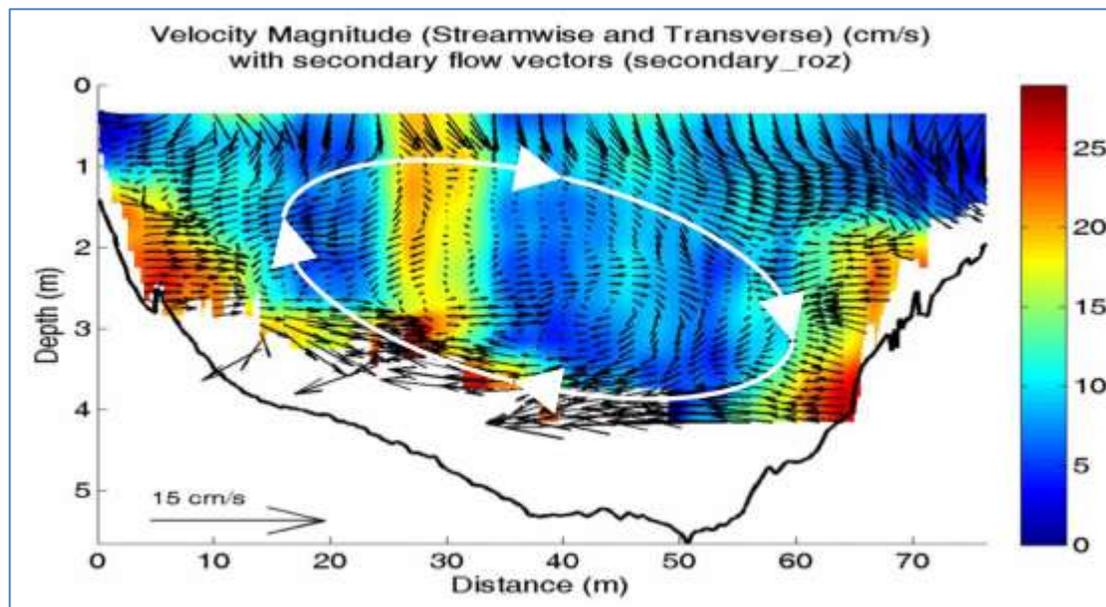


Figura 5.10. Velocidades y vectores transversales de la sección 2, en el río Carrizal.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

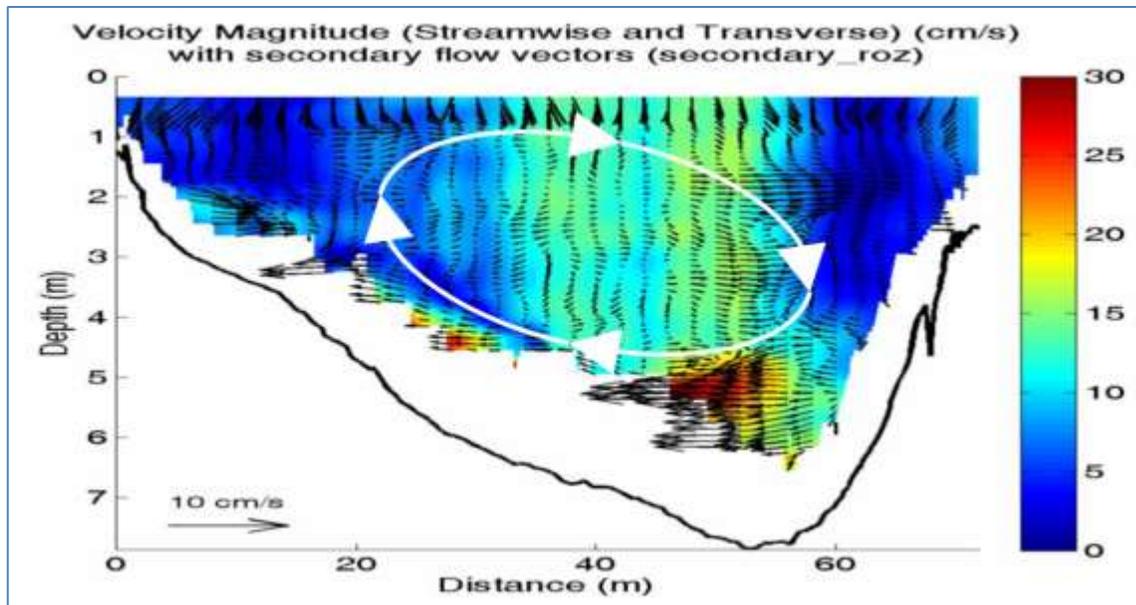


Figura 5.11. Velocidades y vectores transversales de la sección 3, en el río Carrizal.

Para este caso la influencia de los espigones genera un desequilibrio sobre la zona central del flujo generando una vorticidad con vectores de mayor magnitud sobre el fondo cargados hacia la margen izquierda. La sección aguas abajo fuera de la influencia de los espigones desarrolla un régimen de velocidades central pero con una vorticidad más definida en su parte más profunda (figura 5.12).

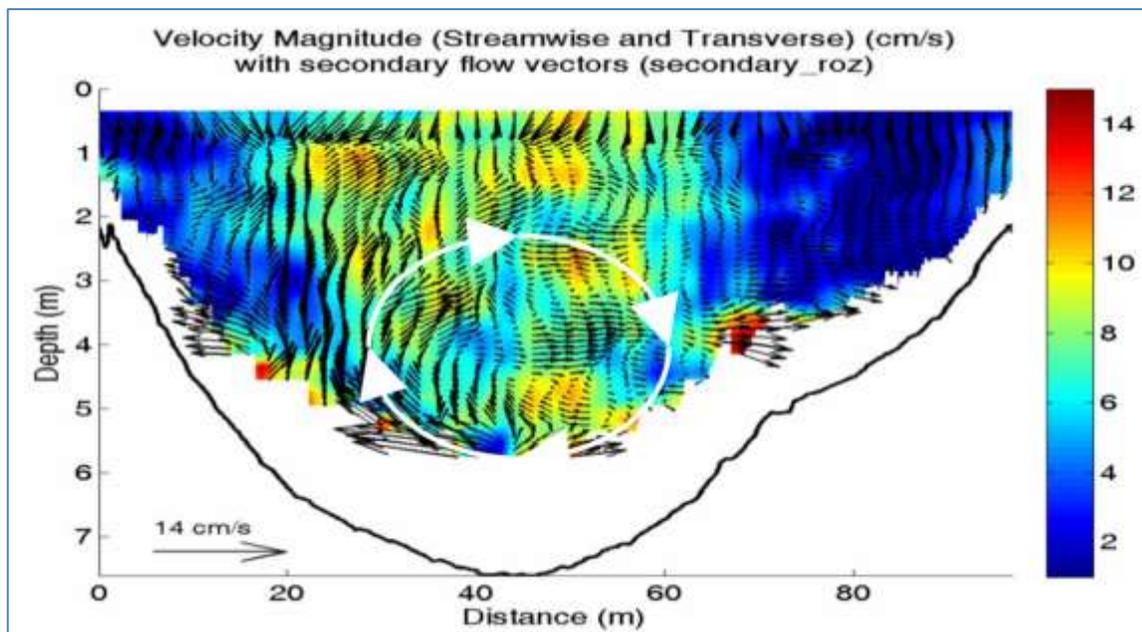


Figura 5.12. Velocidades y vectores transversales de la sección 4, en el río Carrizal.

5. 6. CONCLUSIONES

Las velocidades en planta, muestran un cambio en la dirección del flujo, por efecto de la geometría del cauce, sin embargo en las márgenes donde estas interaccionan con los espigones, disminuyen sus velocidades, creando zonas de recirculación, por lo que estas zonas incrementan su tasa de recuperación.

Debido a la operación en el ápice de la curva de los espigones, en la sección aguas arriba de los espigones la distribución de velocidades fue más uniforme y el sentido de rotación de la margen derecha, se mantuvo en el ápice y aguas abajo de la curva sobre la zona de los espigones; no así sobre la zona central del cauce donde el sentido de la vorticidad era contrario y en un área de influencia mayor sobre la sección transversal. Por lo que esto indica una mayor capacidad erosiva, resultante en una mayor profundidad en la zona central del cauce.

La influencia de los espigones genera un desequilibrio sobre la zona central del flujo generando una vorticidad con vectores más agresivos sobre el fondo, cargados hacia la margen izquierda y velocidades más bajas entre espigones. La sección aguas abajo fuera de la influencia de los espigones desarrolla un régimen de velocidades central pero con una vorticidad desarrollada en su parte más profunda. Aunque los espigones por ser estructuras transversales al cauce, en curvas reordenan los flujos secundarios y generan nuevas vorticidades, traducidas en zonas de depósitos entre espigones y profundas al centro del cauce.

REFERENCIAS

- 1.- **Barua, D.K., Rahman, K.H.** (1998). Some Aspects of Turbulent Flow Structure in Large Alluvial Rivers, *J. Hydr. Res.* 36 (2), pp. 235–252.
- 2.- **Berezowsky V. R. and Vilchis V. R.** (2000). Protección y Control de Cauces, CNA-IMTA pág. 1-694.
3. **Crear.** 2017 [En línea] Available at [http:// www.creamazonia.org/](http://www.creamazonia.org/) [Último acceso: mayo 2017].

4.- Falcón Bathurst, J. C., Thorne, C. R. and Hey, R. D. (1979). Secondary Flow and Shear Stress at River Bends. *J. Hydraul. Div. ASCE* 105: 1277-95.

Vide J. P. (2003). *Ingeniería de Ríos*. México: Alfaomega.

5.- Falcón, M. (1984). Secondary Flow in Curved Open Channels. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 16:179-93.

6.- Mccoy, A., Constantinescu, G. & Weber L.J. (2008). Numerical Investigation of Flow Hydrodynamics in a Channel With a Series of Groynes, *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(2) february 1, 2008. ©asce, issn 0733-9429/2008/2-157–172.

7.- Maza A. J. A. and García F. M. E. (2012). Estabilidad de Cauces, Actualización del Capítulo 12 del Manual de Ingeniería de Ríos. Series del Instituto de Ingeniería de la UNAM, pp. 10-11.

8.- Rivera Trejo J. G. F., López Vasconcelos M. E., Uhus F., Guillen O. (2006). Análisis de Información para la Identificación e Inventario de los Ríos y Cauces en el Estado de Tabasco. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, Tabasco.

9.- Rozovskii, I. L. (1957). *Dvizhenie Vody na Povorote Otkrytogo Rusla*. kiev: Izd. Akad. Nauk ukr. SSR. 188 pp. Transl., 1961, *Flow of Water in Bends of Open Channels*. Jerusalem: Israel Program sci. Transl. 234 pp.

10.- Seo, I.W., Lee, M. E., and Baek, K. O. (2008). 2d Modeling of Heterogeneous Dispersion in Meandering Channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 134, no. 2, pp. 196–204.

11.- Szupiany R. N., Amsler M. L., Parsons D. R., Best J. L., Haydel R. (2012). Estructura del Flujo y Morfología en Dos Confluencias Aguas Abajo de Islas en el Río Paraná, Proyecto Subsidiado por la Universidad Nacional del Litoral de Santa Fe. “Morfología y Cambios Hidráulicos en Puntos Nodales del Cauce Principal del Río Paraná”.

12.- Velásquez Villegas G. (1994). Los Recursos Hidráulicos del Estado de Tabasco. Ensayo Monográfico, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, Tabasco. pp. 19-21.

13.- Vide J. P. (2003). Ingeniería de Ríos. México: Alfaomega.

14.- Yossef, M. F. and Vriend. M. H. J. (2011). Flow Details Near River Groynes: Experimental Investigation Journal of Hydraulic Engineering, vol. 137, no. 5, may. 1, 2011. ©asce, issn 0733-9429/2011/5-504-51

6. ALTERACION DE LA DISTRIBUCION Y CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS POR ESPIGONES ESTIMADOS CON ADCP EN EL RÍO CARRIZAL

6.1. RESUMEN

La distribución y concentración de sedimentos es una de las variables que dan forma y orientación a los meandros, en gran medida la falta o el exceso generan cambios drásticos en los cauces de montaña y planicie. El objetivo del presente estudio fue utilizar el uso de técnicas Doppler en el río Carrizal para identificar la alteración en la distribución y concentración de sedimentos en zonas donde existen espigones y son controladas por una estructura de control transversal. Las técnicas propuestas utilizan la intensidad de medición de los equipos ADCP que correlacionadas con el muestreo de fondo y suspensión, nos muestran los tránsitos preferentes transversales y en planta. Los trabajos de campo necesarios para el estudio fueron la recolección de datos de intensidad por medio de mediciones ADCP, muestreos de sedimentos en suspensión con el muestreador dh-59 y draga para el material de fondo. Una vez realizada las pruebas de laboratorio y correlacionada la intensidad de medición con la concentración y distribución de sedimentos en la zona de los espigones, se identificó que la tasa de concentración generada hacia aguas arriba de los espigones es más homogénea y de la misma intensidad sobre las transversales, en la zona de los espigones sobre los morros, en el ápice de la curva sobre el extradós y en la zona aguas abajo de los espigones al centro del cauce. Finalmente podemos concluir que donde la falta de sedimentos es aparente, la influencia de los espigones estabiliza la distribución y concentración de sedimentos aguas arriba, la concentran en los morros-ápices y la centran sobre el cauce aguas abajo, demostrando que para este caso de estudio la alteración de la distribución y concentración de la carga sedimentológica es alterada por los espigones.

Palabras claves: ADCP, concentración de sedimentos, estructura de control transversal y radio de curvatura.

6.2. INTRODUCCIÓN

Los ríos aluviales en gran medida deben su desplazamiento a la distribución y concentración de sedimentos por lo que es de interés conocer y cuantificar en qué medida la mano del hombre, mediante estructuras, altera este desplazamiento (Vide, 2003).

Una de las estructuras de mayor uso por el hombre en la modificación del curso de los ríos son los espigones, éstos controlan de forma permanente la evolución de las márgenes.

Toda influencia que altere la hidrodinámica de los ríos también afecta la concentración y distribución de sedimentos (Mohammad *et al.* 2014).

Sin embargo en modelos numéricos y físicos se ha tratado de reproducir dicha alteración, pero por el factor de escala se genera incertidumbre en los resultados (Yossef y Vriend, 2011). Esto ha generado dudas e interrogantes en los resultados encontrados en los modelos, ya que una de las variables que teóricamente están demostradas son los efectos de las corrientes secundarias en la concentración y distribución de los sedimentos (Seo et al, 2008).

En este capítulo se hace un análisis cualitativo de las mediciones en campo con equipos acústicos, ya que identificando la hidrodinámica local y campos de velocidades en espigones se identificó la distribución y concentración de sedimento actual en esas zonas.

6.2.1. ZONAS HIDRODINÁMICAS EN ESPIGONES.

Los espigones son estructuras interpuestas a la corriente y facilitan que los sedimentos se depositen entre ellos, logrando una protección adicional de la orilla. Los espigones pueden estar unidos simplemente a la orilla en contacto con ella, o bien estar empotrados una cierta longitud dentro de la margen (ver Figura 6.1).

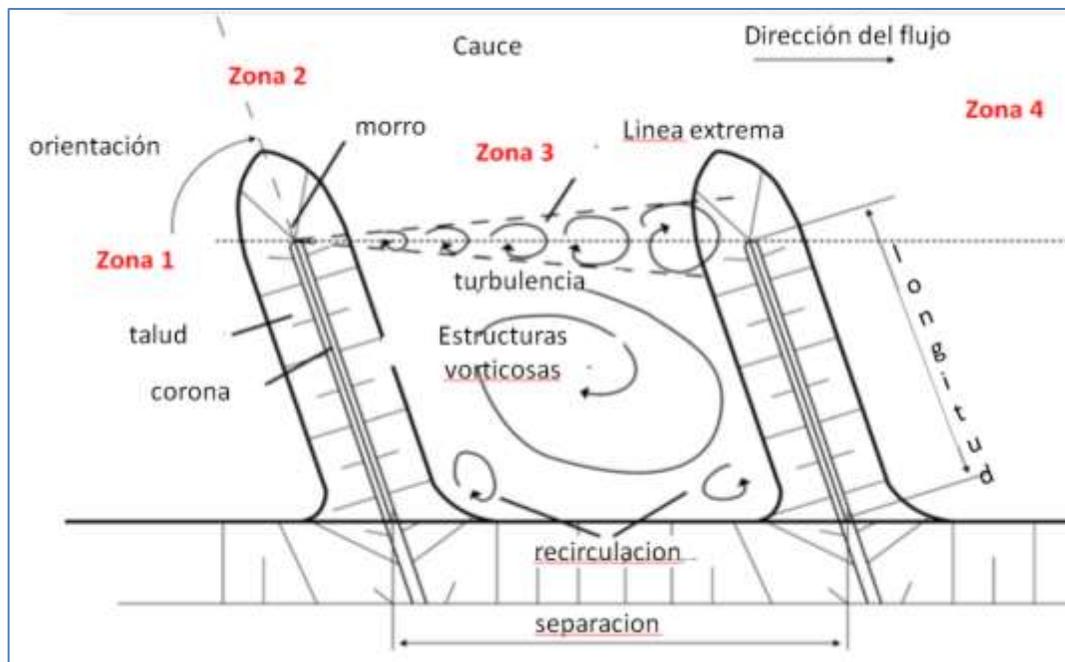


Figura 6.1. Zonas de operación de espigones(fuente propia).

Las zonas de operación de espigones en conjunto son cuatro (Martin y Bernd, 2013):

1. Zona de régimen inicial bajo. En esta zona se genera una sobreelevación del tirante aguas arriba del cuerpo del primer espigón, ya que por ser una estructura transversal al flujo, genera remansos y una disminución de sus velocidades en las secciones transversales al cauce.
2. Zona de régimen turbulento. Una vez que el flujo se contrae en la sección transversal impuesta por el morro del espigón y la margen contraria, se generan campos de velocidades altos y turbulencias por el cambio de régimen de flujo subcrítico a supercrítico con lo que este incremento de turbulencia local suspende material de fondo y por ende ocasiona erosiones locales.
3. Zona de transición y operación entre espigones. En esta zona el flujo reconoce la línea extrema impuesta por los espigones y el régimen establecido es nuevamente subcrítico con velocidades altas. Las líneas de flujo reconocen una nueva dirección de operación y se mueve el fondo hacia la margen contraria.
4. Zona de perturbación impuesta aguas abajo del conjunto de espigones. Finalmente, fuera de la influencia de la zona de espigones hacia aguas abajo se rectifican sobre

el centro del cauce las líneas de flujo alteradas y el régimen impuesto es subcrítico con velocidades bajas.

6.3. LOCALIZACIÓN

El río Carrizal se localiza en el centro-oeste del estado de Tabasco, dentro de las regiones Chontalpa y Centro en los Municipios de Cunduacán y Centro, entre las coordenadas 468561.22 m E y 1984897.96 m N. Nace de la bifurcación del río Mezcalapa en los ríos Carrizal y Samaria, en el Ejido Macayo de Cunduacán y pasa por varias comunidades de los municipios de Cunduacán y Centro, como Macayo 1ª y 3ª secciones, Plátano y Cacao 1ª, 2ª y 3ª secciones, Corregidora 3ª Sección, Buenavista 4ª y 2ª Secciones González 1ª, 2ª y 3ª Secciones, entre otras; con una longitud de aproximadamente 80 km, terminando en la confluencia con el río Grijalva aguas abajo de la Colonia INDECO de la Ciudad de Villahermosa Tabasco (INEGI, 2005), (ver Figura 6.2).

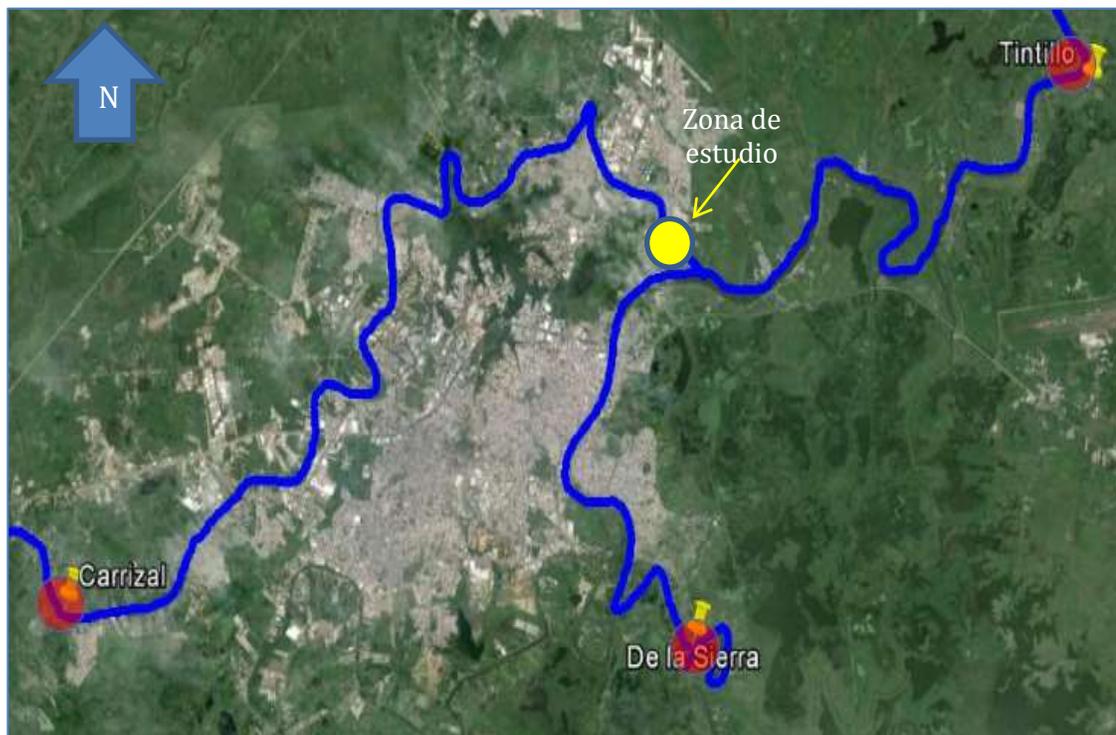


Figura 6.2. Localización general y ubicación de la zona de estudio en el río Carrizal.

6.4. METODOLOGÍA

6.4.1. TOPOGRAFÍAS COMPLEJAS

Desde el punto de vista hidrodinámico la complejidad topográfica tanto de los cauces naturales como de la llanura de inundación constituyen el factor más importante para definir la operación de las corrientes secundarias y en buena medida la representatividad de modelos numéricos (Casa et al, 2005). El uso de técnicas Doppler, manejo de estación total, GPS y herramientas Cad-GIS permitieron la obtención de la topobatimetría de márgenes, cauces y estructuras. En la Figura 6.3. Se muestran las secciones utilizadas para la obtención de información de campo.



Figura 6.3. Secciones de campo en el río Carrizal.

6.4.2. HIDRODINÁMICA MEDIANTE PERFILADORES ACÚSTICOS DOPPLER

La mayoría de las mediciones que se realizan por medio de ADCP en ríos se llevaron a cabo en embarcaciones en movimiento donde el dispositivo se remolca de orilla a orilla para obtener los gastos sobre una sección transversal y fueron generadas por investigadores como Barua y Rahman (1998), González et al (2002) y Schemper y Admiraal (2002). En la figura 6.4 se muestra el equipo Doppler river ray de 600 kHz, montado en una embarcación de la campaña de medición realizada en agosto 2016. Con esta información se obtuvo las velocidades en planta, velocidades secundarias y las intensidades de los sedimentos en suspensión.



Figura 6.4. Perfilador acústico Doppler River ray.

6.4.3. MUESTREO DE SEDIMENTOS EN CAMPO

Las recolecciones de los muestreos de sedimentos en suspensión se realizaron con el muestreador dh-59 y draga de muestreo de material de fondo (Figura 6.5).



Figura 6.5. Muestreo con draga de material de fondo río Carrizal.

6.5. RESULTADOS

6.5.1. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES

Se generó un modelo digital de elevación (MDE), de los datos obtenidos de las campañas de medición de fondo y márgenes de cauces (ver figura 6.6).

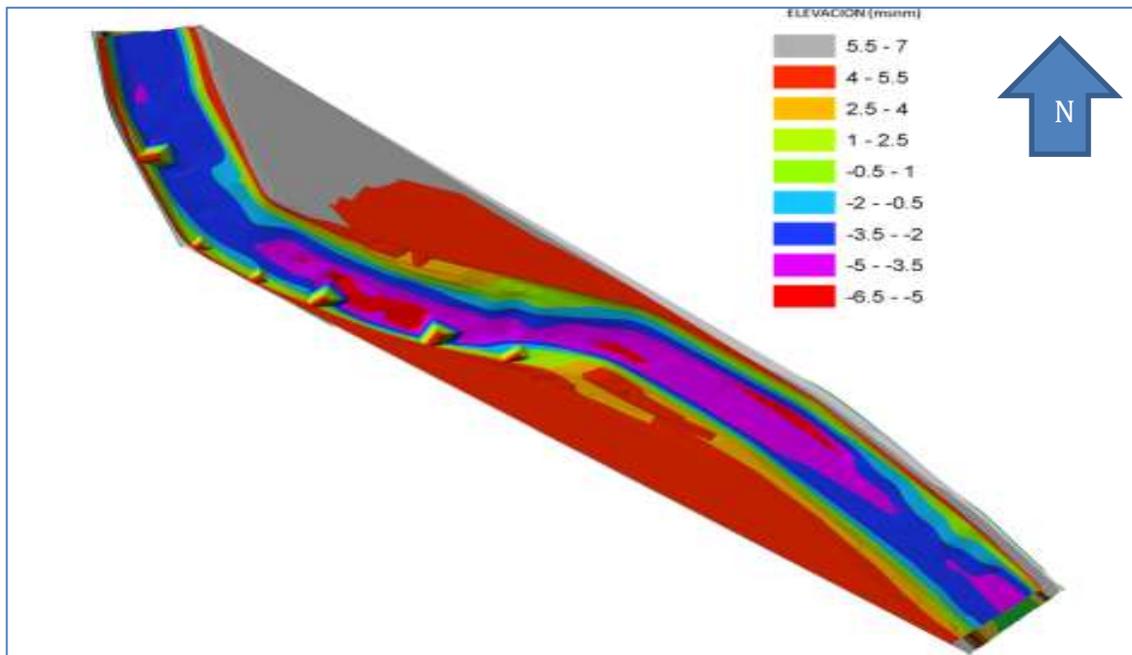


Figura 6.6. Modelo digital de elevaciones en zona de estudio Río Carrizal.

6.5.2. VELOCIDADES EN PLANTA

Una vez procesada la información de las tres secciones seleccionadas, se obtuvo en planta la distribución del campo de velocidades (ver Figura 6.7). El gasto obtenido en esta medición fue de $70 \text{ m}^3/\text{s}$. De lo observado se identificó que la distribución de velocidades en la sección aguas arriba, presentan la influencia de los espigones aguas abajo y el efecto de la geometría de la curva, cargando las velocidades sobre la margen derecha ya no es representativo. En la zona entre espigones sufre un cambio de dirección hacia la margen izquierda y finalmente en la zona sin influencia se centra sobre el centro del cauce.

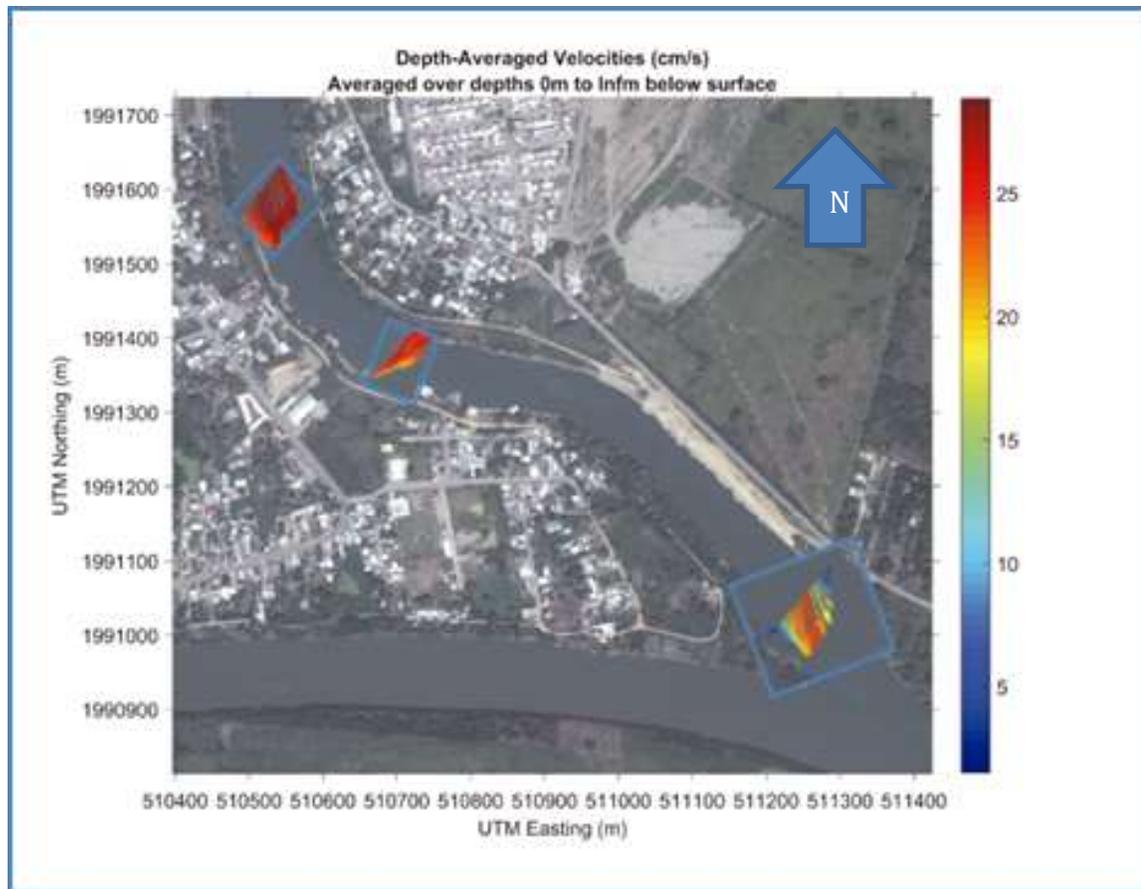


Figura 6.7. Velocidades en planta en zonas de espigones.

6.5.3. INTENSIDAD DE SEDIMENTOS E HIDRODINÁMICA

De la información obtenida del campo de velocidades actual se obtuvieron tres secciones transversales en la zona de espigones. La primera ubicada aguas arriba de los espigones (ver Figura 6.8), entre espigones (ver figura 6.9) y aguas abajo de los espigones (ver figura 6.10).

En ellas se observan las magnitudes del vector velocidad (zonas coloridas de las secciones) y las velocidades secundarias (vectores).

Se observa que en la sección aguas arriba no existe un flujo de velocidades secundarios desarrollados, en las secciones entre espigones se observa que la vorticidad de los flujos secundarios se desarrollan cargados hacia la margen izquierda, y la cercana a los espigones se aleja de la depresión vertical siete metros, indicando con ello estabilidad

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

sobre la margen derecha, ya que las profundidades más grandes se presentan en las vorticidades desarrolladas por los flujos secundarios en curvas.

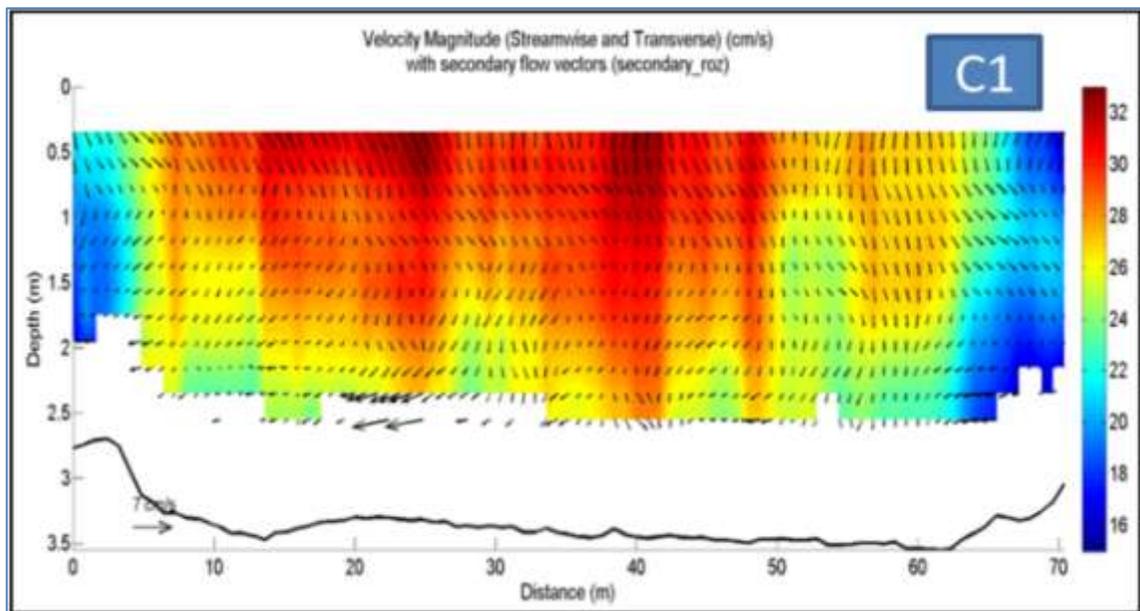


Figura 6.8. Velocidades transversales aguas arriba de los espigones (C1).

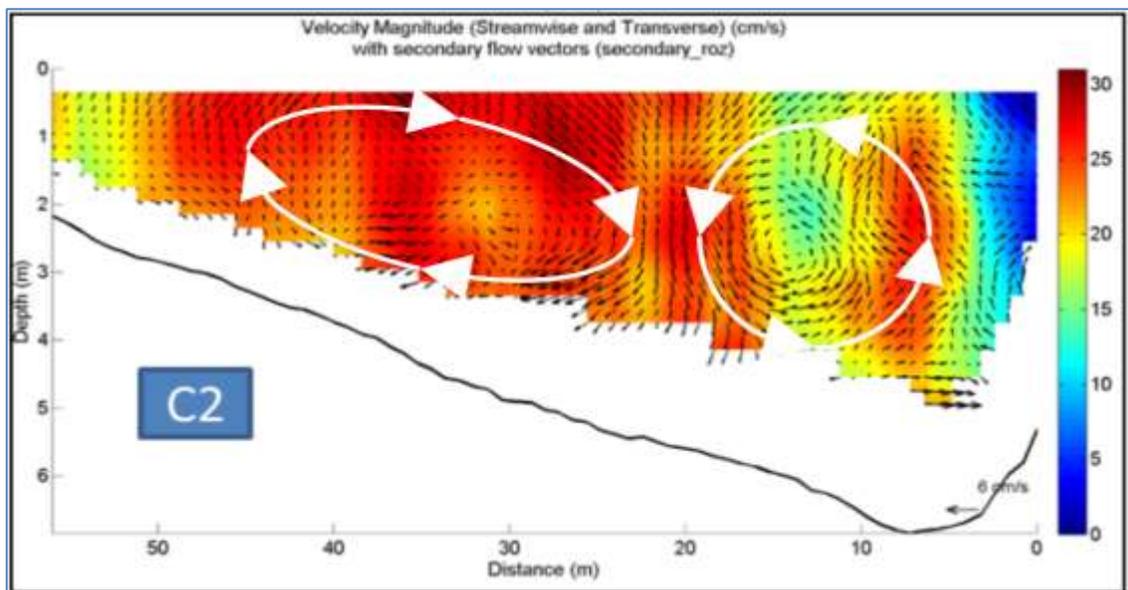


Figura 6.9. Velocidades trasversales entre espigones (C2).

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

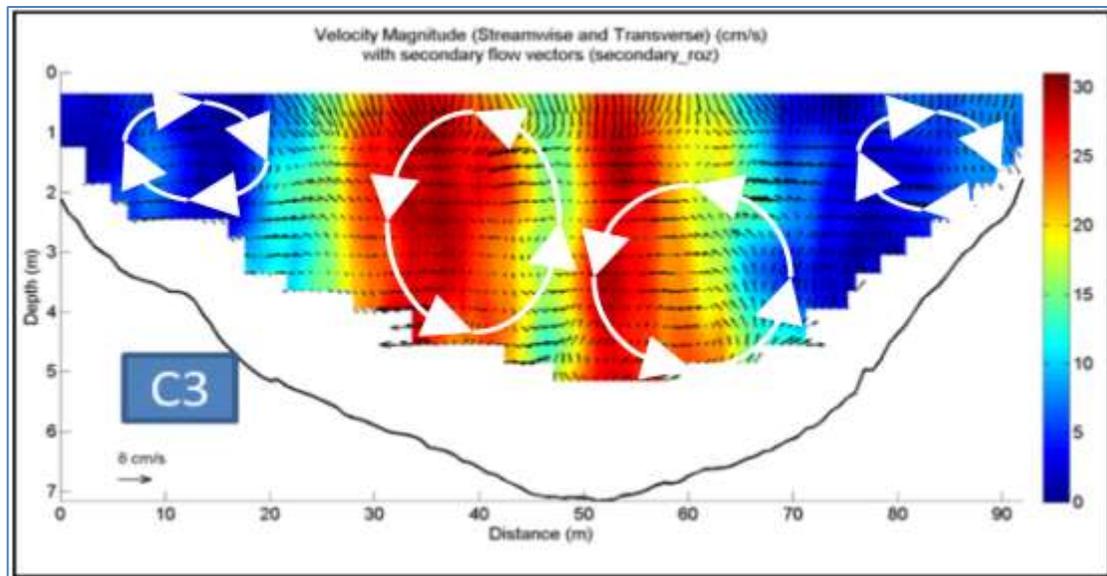


Figura 6.10. Velocidades transversales aguas debajo de los espigones (C3).

Sobre las secciones aguas abajo de los espigones, se identificó un flujo más centrado con una vorticidad del flujo en las zonas de mayor velocidad, ambas en sentido contrario a las manecillas del reloj.

De las secciones antes descritas se obtuvieron también las intensidades de los sedimentos Y se relacionaron con las velocidades secundarias (ver figura 6.11, figura 6.12, figura 6.13). Se observó que en la sección aguas arriba la mayor concentración de los sedimentos está cargada sobre el centro de cauce y la margen izquierda y aun sin un desarrollo pleno las vorticidades generadas están sobre esas zonas.

En la zona de espigones la mayor concentración de sedimentos es sobre la margen izquierda y derecha, y sobre el fondo del cauce al existir un déficit de sedimento se presentan las vorticidades más desarrolladas con mayores profundidades del cauce.

Finalmente en la secciones aguas abajo aunque las magnitudes están centradas en el cauce, la concentración es mayor sobre las márgenes y existen flujos secundarios con vorticidad en sentido antihorario.

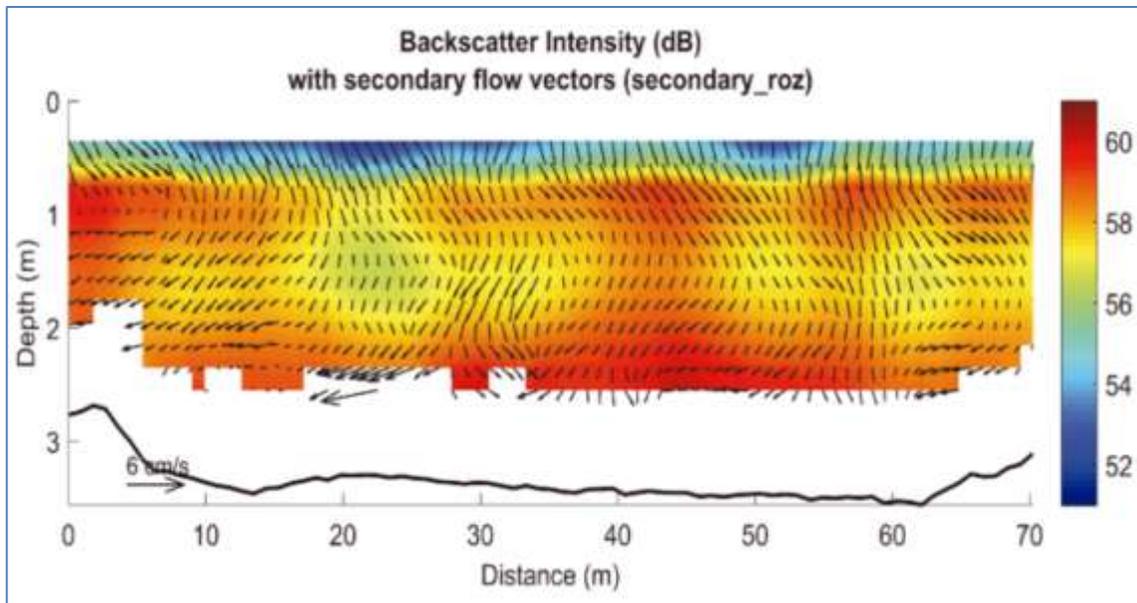


Figura 6.11. Intensidades transversales aguas arriba de los espigones (C1).

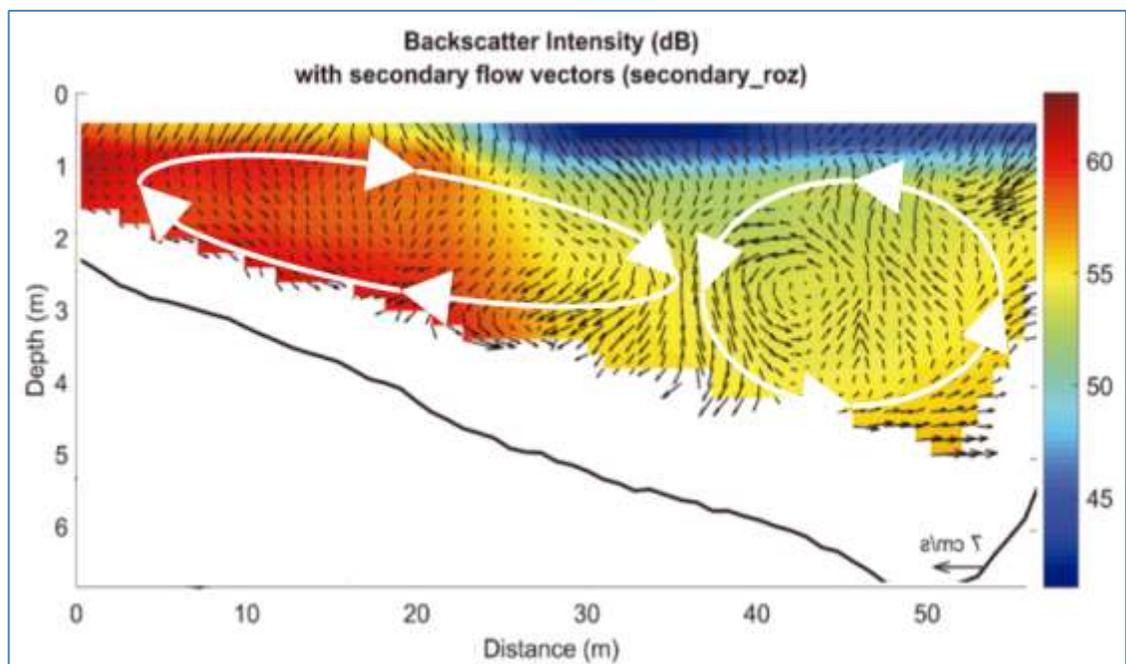


Figura 6.12. Intensidades transversales entre espigones (C2).

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

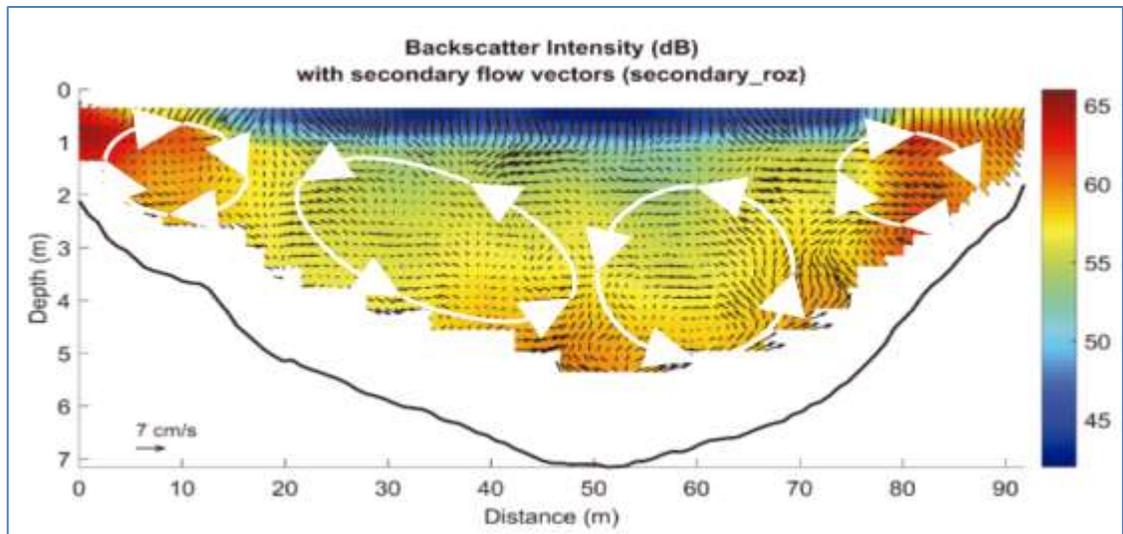


Figura 6.13. Intensidades transversales aguas debajo de los espigones (C3).

6.5.4. GRANULOMETRÍAS DEL MUESTRO EN LA ZONA DE ESTUDIO

Una vez realizados el muestreo las pruebas de laboratorio en la zona de estudio se identificó que el material predominante fue un 64% de arena y un 30% fino (ver figura 6.14) por lo que al ser controlado el río Carrizal aguas arriba por una estructura de control trasversal ha incrementado el porcentaje de material fino en el fondo del cauce.

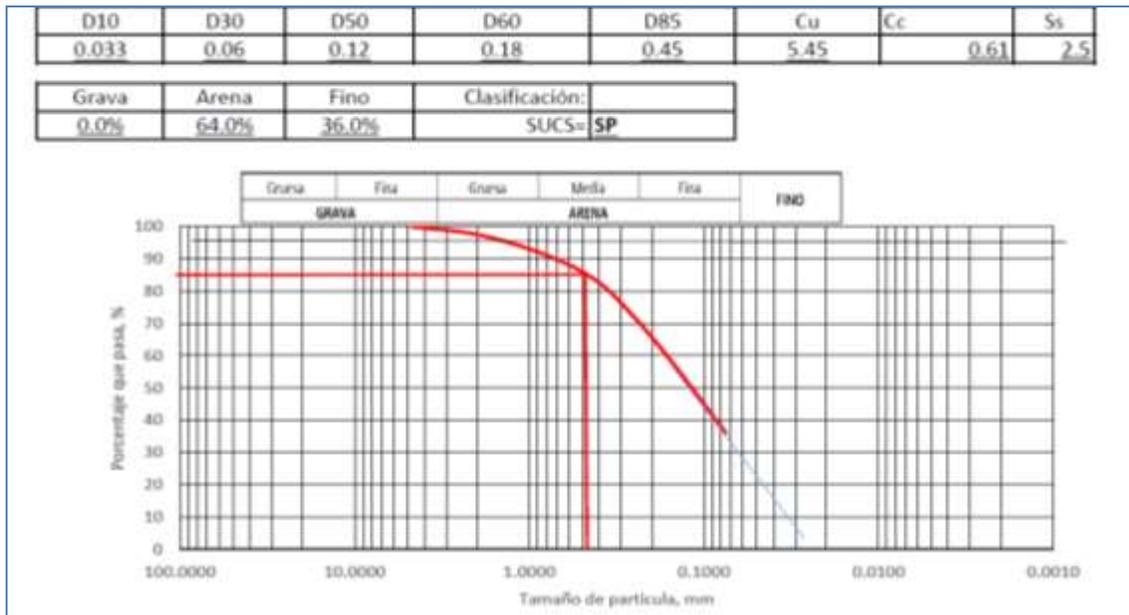


Figura 6.14. Granulometrías obtenidas de las zonas de estudios.

6.6. CONCLUSIONES

La distribución de las magnitudes de velocidad aguas arriba de los espigones se mantiene uniforme, que es característico de una zona recta del río y las recirculaciones secundarias no son tan evidentes. La distribución de las intensidades de los sedimentos en suspensión obtenidas por los equipos acústicos muestran zonas de gran intensidad (entre mayor intensidad más sedimentos en suspensión existe) en toda la sección transversal y con la distribución teórica conocida donde la concentración más grande debe ser sobre la parte menos profunda del ápice de la curva.

Las velocidades altas están situadas en la margen izquierda de la sección y sobre la margen derecha entre espigones las zonas más de bajas velocidades, esto comportamiento es característico de los espigones demostrado ya teóricamente y en laboratorio.

Finalmente se puede concluir que las intensidades muestran una distribución de los sedimentos en suspensión acorde con las velocidades obtenidas y estas son similares a lo teóricamente expuesto y encontrado en los modelos físicos en los laboratorios.

Para trabajos futuros, se buscará hacer más mediciones cercas de los espigones, para un entendimiento del comportamiento de la hidrodinámica del flujo.

REFERENCIAS

- 1. Barua, D.K., and Rahman K.H.** (1998). Some Aspects of Turbulent Flow Structure in Large Alluvial Rivers, *J. Hydr. Res.* 36 (2). pp 235–252.
- 2. Casa P.A., Benito. G., Thorndycraft .v. r. and Rico. M.** (2005). Efectos de las Fuentes Cartograficas en los Resultados de la Modelacion Hidraulica de Crecidas. *Ingenieria del Agua.* vol 12 n° 4.

- 3. González J. Ansar m. and Kellman O.** (2002). Comparison of Discharge Estimates From ADCP Transect Data With Estimates From Fixed ADCP Mean Velocity Data. *Hydraulic Measurements and Experimental Methods* 2002. pp. 1-10.
- 4. INEGI** (2005). Anuario Estadístico del Estado de Tabasco, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- 5. Martin H. and Bernd H.**(2013). Sedimentation and flow Patterns Induced by Regular and Modified Groynes on the River Elbe, Germany. *Ecohydrol.* 6, 598–610 (2013). Published online 27 June 2013 in Wiley.
- 6. Mohammad V. , Vali A. M.M. and Maryam A.** (2014). Numerical Investigation of Wing to Web Length Ratios Parameter of T-shaped Spur Dike in a 90 Degree Bend on Scour Pattern. *Journal of River Engineering.* Vol.2. No.3. 2014.
- 7. Schemper T. and Admiraal D.** (2002). An Examination of The Application of Acoustic Doppler Current Profiler Measurements in a Wide Channel of Uniform Depth for Turbulence Calculations. *Hydraulic Measurements and Experimental Methods* 2002. pp. 1-9.
- 8. Seo, I.W., Lee, M. E., and Baek, K. O.** (2008). 2d Modeling of Heterogeneous Dispersion in Meandering Channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 134, no. 2, pp. 196–204.
- 9. Vide J. P.** (2003). *Ingeniería de Ríos.* México: Alfaomega.
- 10. Yossef, M. F. and Vriend. M. H. J.** (2011). Flow Details Near River Groynes: Experimental Investigation *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 137, no. 5, may 1, 2011. ©asce, issn 0733-9429/2011/5-504–516.

7. CAMBIO HIDRODINAMICO Y EVOLUCION DE FONDO EN RÍOS DE PLANICIE POR ESPIGONES (EN ARBITRAJE)

7.1. RESUMEN.

Existe un gran interés en la optimización de la forma, espaciado y orientación de los espigones como medidas de recuperación y protección en ríos de planicie. El objetivo principal de esta sección (o capítulo si gustas) fue implementar una metodología numérica bidimensional, comparada contra métodos tradicionales, que evaluaran en tres zonas la variación hidrodinámica del campo de velocidades y evolución del fondo de ríos de planicie con la finalidad de estimar sobre las zonas evaluadas un cambio geomorfológico.

Esto se llevó a cabo usando un equipo Doppler ADCP y estación total, los cuales mediante secciones transversales, estimaron las geometrías complejas de las zonas evaluadas, que al ser correlacionadas con la información granulométrica característica, evaluación numérica y métodos tradicionales reflejaran que actualmente en las zonas implementadas con espigones, el régimen de velocidades establecidas no supera las velocidades permisibles para la evolución del fondo en los ríos de planicie evaluados. No así en zonas aledañas.

Palabras clave: espigones, Hidrodinámica, ADCP, evaluación numérica.

7.2. INTRODUCCIÓN

Los espigones son obras utilizadas mundialmente para la restauración de márgenes y zonas costeras. La optimización de su forma, espaciado y orientación, ha generado numerosos estudios. Estas investigaciones se han enfocado al efecto hidrodinámico (campo de velocidades) que provocan estas estructuras antes de operar y después de su construcción (Mccoy *et al*, 2008), (UNAM, 2012).

La finalidad de algunos estudios es aumentar la eficiencia de operación y conocer el efecto geomorfológico negativo, causados en los ríos (Vaghefi *et al*, 2012) ya que durante la operación de los primeros años estas estructuras cumplen el objetivo de protección, no así durante el proceso de operación y abandono (Gregory, 2004).

Se han realizado reproducciones de los efectos de la hidrodinámica en modelos físicos, al requerir el uso de espigones en protección de márgenes ante el efecto abrasivo de la erosión, presentado en curvas de cauces (Rashedipoor *et al*, 2012).

La desventaja de modelos físicos es la escasa representación por la escala. En algunos casos los aparatos de medición empleados para corroborar el efecto de la hidrodinámica del campo de velocidades se ven afectados por el propio equipo (Papanicolaou *et al*, 2011). Surge interés de emigrar a nuevas técnicas de recolección de información in situ, sobre obras existentes mediante mediciones en campo por el factor de escala, ya que éste se pierde en los modelos físicos realizados en laboratorio.

La medición en campo requiere de equipos más sofisticados para determinar el campo de velocidades en tres dimensiones; por ello, es necesaria la implementación de modelos numéricos (Ercan y Younis, 2009).

Ya que el proceso de calibración requiere de mediciones en campo (Kang *et al*. 2012), la principal herramienta debida al desfase de la medición en escala temporal han sido los modelos numéricos 2D y 3D, conocidos como modelos híbridos.

Los modelos numéricos bidimensionales proveen de una buena representación del efecto que producen los espigones al campo de velocidades en 2D. Se ha optado por seleccionar este tipo de modelos, esencialmente por el menor tiempo de cómputo simulado en su ejecución (Abbasi *et al*. 2011).

De acuerdo con las características usadas para generar modelos físicos en los laboratorios, debe controlarse la mayor cantidad de variables independientes posibles; una de ellas es el gasto líquido. Un caso propicio de estudio son los Ríos de la Sierra y el Tintillo, donde uno de los afluentes de interacción con ellos, mantiene controlada la variable de gasto líquido. Localizados en Villahermosa, Tabasco, México (Rivera *et al*, 2006).

De lo anterior podemos ver que actualmente no existe una comprensión clara del efecto que causan los espigones a la hidrodinámica del campo de velocidades en cauces naturales ya que son complejos y no tienen variables controladas. Debido a esto se han hecho esfuerzos por reproducir estos fenómenos en laboratorio mediante modelos físicos. Por lo tanto es necesaria la medición en campo y el uso de modelos numéricos en 2D

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

con la finalidad de reproducir situaciones más reales con lo que el modelado de las variables del campo de velocidad y la evolución de fondo toman un papel importante.

La zona de estudio evaluada, comprendida entre los ríos de la Sierra y el Tintillo, guardan una relación directa con el río Carrizal y éste a su vez mantiene el gasto líquido controlado en las inmediaciones de la ciudad de Villahermosa.

7.3. LOCALIZACIÓN

Las zonas de estudio del río de la Sierra se localiza en las coordenadas 510814.47 m E y 1984998.74 m N, del río el Tintillo se localiza en las coordenadas 517959.90 m E y 1992453.27 m N. (Figura 7.1).



Figura 7.1. Localización y Ubicación de las zonas de estudio Río tintillo y la Sierra.

7.4. METODOLOGÍA

7.4.1. MEDICIONES DE CAMPO (ADCP Y ESTACIÓN TOTAL)

Para determinar la configuración del fondo del cauce se empleó un equipo medidor acústico de efecto Doppler (ADCP, por sus siglas en inglés) de la marca Sontek con una frecuencia de trabajo de 1500 KHz.

Puesto que la obtención de la información está limitada sobre la lámina de agua, los márgenes se configuraron con estación total empleando un equipo Leica Ts06plus con una precisión de 2 mm. La metodología empleada fue mediante seccionamiento transversal del cauce del río (Figura 7.2).



Figura 7.2. Levantamiento de geometrías complejas, con equipo estación total (Leica Ts06 Plus) y ADCP (Riverray).

7.4.2. MÉTODOS TRADICIONALES

7.4.2.1. PREDICCIÓN Y MITIGACIÓN CON ESPIGONES

El propósito de los espigones es evitar el contacto directo entre las líneas de corriente del flujo y el material que forma la orilla evitando la erosión, y guiar el flujo en una dirección deseada y conveniente.

La determinación del valor de la socavación general se calcula al aplicar el método empírico propuesto por Lischtván y Lebdiév al determinar las profundidades de erosión general y establece que el mecanismo de erosión se detiene cuando la velocidad media de

la corriente (U_r) se iguale con la velocidad media del flujo necesaria para erosionar el material que forma el cauce (U_e) (II-UNAM, 2012). (Ecuación 1):

$$U_r = U_e \quad (1)$$

La velocidad media de la corriente (U_r) está en función de la profundidad. Cada punto de la sección se considera por esta teoría a partir de la ecuación de Manning (Ecuación 2):

$$U_r = \alpha * [(d_0^{5/3})/d_s] \quad ; \quad \alpha = Q_d / (d_m^{5/3} * B_e * \mu) \quad (2)$$

Dónde:

U_r = Velocidad media de la corriente luego de la erosión en la vertical de la sección (m).

d_0 = Profundidad antes de la erosión en la vertical de la sección (m).

d_s = Profundidad luego de la erosión en la vertical de la sección (m).

Q_d = Caudal de diseño total (m³/s).

d_m = Profundidad media de la sección antes de la erosión (m).

B_e = Ancho superficial efectivo asociado con Q_d (m).

μ = Coeficiente que considera el efecto por contracción producido por las pilas en caso de ser un puente. Para el caso en estudio este valor se consideró 1.

En la estimación de la erosión del fondo adyacente al extremo de la obra de protección se aplica la ecuación obtenida por Maza con base en los datos y criterio inicial de Latuschenkov. Dicha relación establece (Ecuación 3):

$$d_e = 0.85d_0 \left[4.17 + \ln \frac{Q_1}{Q} \right] e^{(0.0028\alpha_1 - 0.24\kappa)} \quad (3)$$

Dónde:

d_e : Profundidad máxima en la zona erosionada al final del espigón, medida desde la superficie, asociada al gasto de diseño.

d_0 : Profundidad del flujo en una zona cercana al extremo del espigón no afectada por la erosión, asociada al gasto de diseño.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

α_1 : Ángulo entre el eje longitudinal del espigón y la dirección del flujo, medido hacia aguas abajo.

k: Talud del extremo del espigón.

Q_1 : Gasto teórico que podría pasar por la zona ocupada por el espigón.

Q: Gasto total en el río asociado al periodo de retorno de diseño.

El sustento teórico de los espigones manejado en México está basado en modelos físicos realizados por Maza en los laboratorios del instituto de ingeniería de Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM, 2012)

7.4.2.2. CARACTERIZACIÓN DEL SEDIMENTO Y GRANULOMETRÍA DEL RÍO DE LA SIERRA.

Para conocer la descripción del suelo y parámetros de predicción (socavación general y local) fue necesario tener en cuenta la granulometría (Figura 7.3) del río de la Sierra.

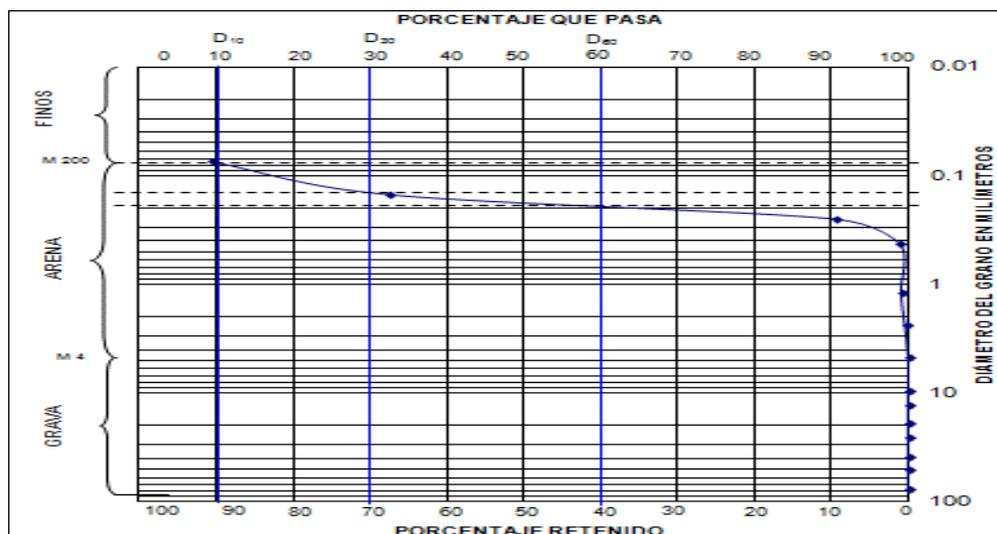


Figura 7.3. Análisis granulométrico del río de la Sierra.

7.4.2.3. CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DE LA ZONA DEL RÍO EL TINTILLO.

La información de la zona es imperante en la realización del estudio de velocidades permisibles, al tomar los datos del sondeo mixto realizado dando como resultado el peso específico de 2700 kg/m^3 con un $D_{84}=0.0004 \text{ m}$ (Figura 7.4).

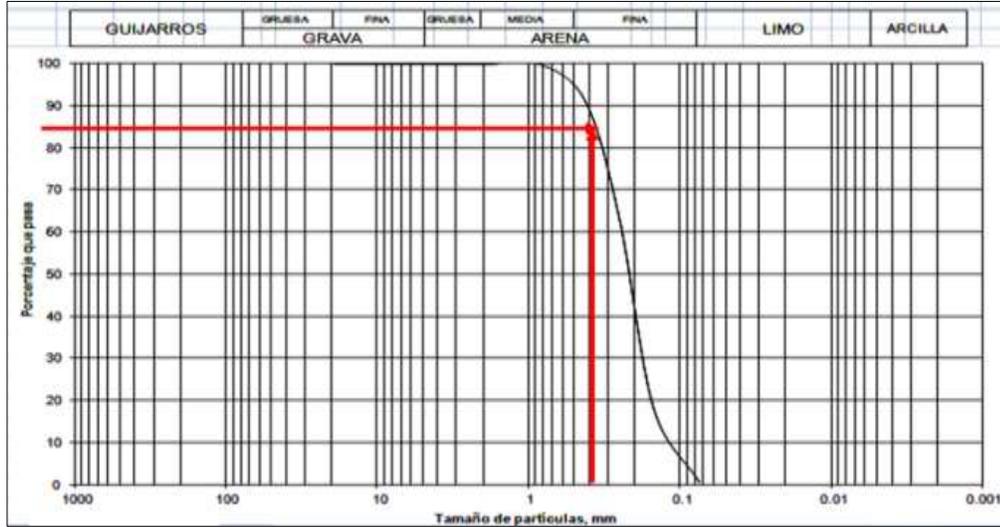


Figura 7.4. Análisis Granulométrico del río Tintillo.

7.4.3. SIMULACIÓN NUMÉRICA

7.4.3.1. ESTIMACIÓN DE HIDRODINÁMICA 2D EN IBER 2.1.2.

El modelo Iber 2.1.2. Trabaja sobre un dominio bidimensional con 3 variables definidas en cada punto del dominio: el calado (h) y las dos componentes de la velocidad horizontal (U_x y U_y). Las ecuaciones que rigen la evolución de dichas variables se conocen como ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad o ecuaciones de St. Venant bidimensionales, y se expresa como (Ecuaciones 4, 5 y 6):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) \tag{5}$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) \quad (6)$$

La deducción matemática de las ecuaciones de aguas poco profundas 2D se realiza promediando en profundidad las ecuaciones de Reynolds tridimensionales (Cea *et al.* 2012).

Concretamente se asume una escala espacial vertical (profundidad) mucho menor que la escala horizontal, lo cual permite asumir una distribución de presión hidrostática.

La resolución de las ecuaciones de aguas someras en 2D emplea métodos numéricos. Es decir, en la solución numérica de las ecuaciones de flujo es necesario discretizar la malla. Las mallas discretizan las ecuaciones y se clasifican en malla estructurada y malla no estructurada (Figura 7.5) (Bladé *et al.* 2014), (IBER, 2012).

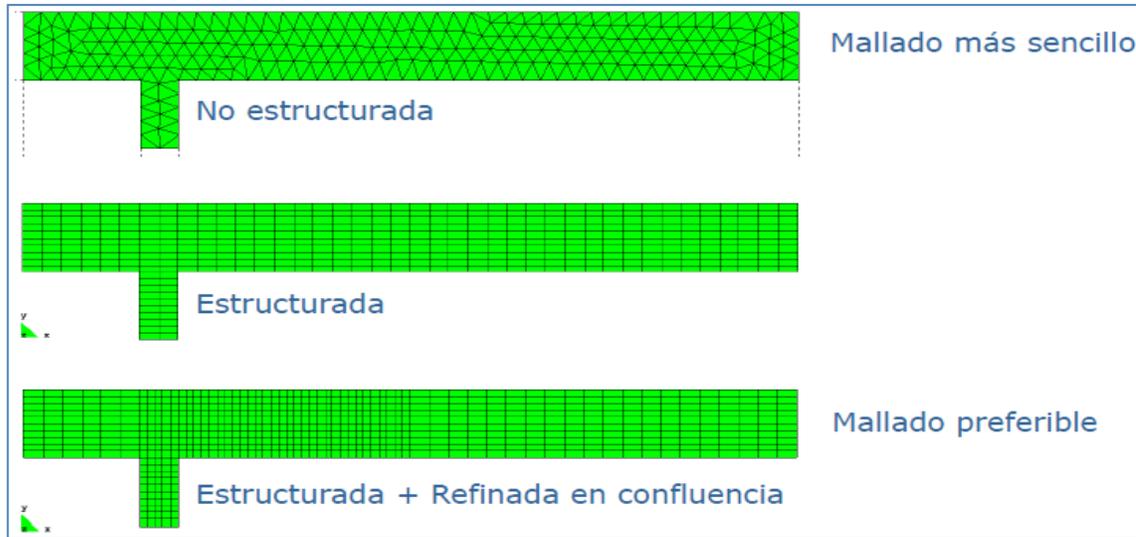


Figura 7.5. Estructuración del mallado en el módulo de Iber (IBER,2012).

7.4.3.2. IMPLEMENTACIÓN DE FONDO EN LA MODELACIÓN 2D IBER

2.1.2.

Flujo turbulento (Ecuación 7 y 8)

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{\partial}{\partial x} (h u'_x u'_x) - \frac{\partial}{\partial y} (h u'_x u'_y) \quad (7)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{\partial}{\partial x} (hu'_x u'_y) - \frac{\partial}{\partial y} (hu'_y u'_y) \quad (8)$$

Modelo $k - \varepsilon$ (Ecuación 9 y 10)

$$\frac{Dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2v_t S_{ij} S_{ij} + c_k \frac{u_f^3}{h} - \varepsilon \quad (9)$$

$$\frac{D\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_{l\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2v_t S_{ij} S_{ij} + c_k \frac{u_f^3}{h^2} - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (10)$$

7.4.3.3. IMPLEMENTACIÓN DE HERRAMIENTA NUMÉRICA IBER

Se generó la malla del terreno natural de curvas de nivel, generando triángulos regulares al usar la técnica de error cordal (figura 7.6) creando una superficie NURBS (Non Uniform Rational B-Splines) (IBER, 2012).

Sirviéndose de la calidad de malla y entre más próximos los elementos generados están de la unidad más confiable es la representación geométrica levantada de campo (Figura 7.7). Por lo tanto representará mejores resultados y el cómputo acelera la compilación del proceso.

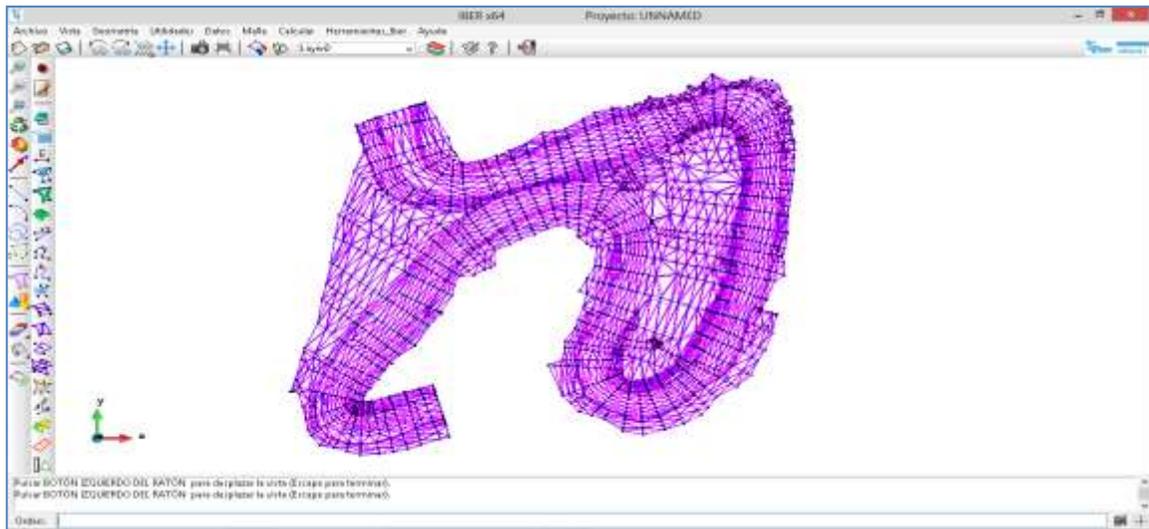


Figura 7.6. Superficie creada con técnica de error cordal.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

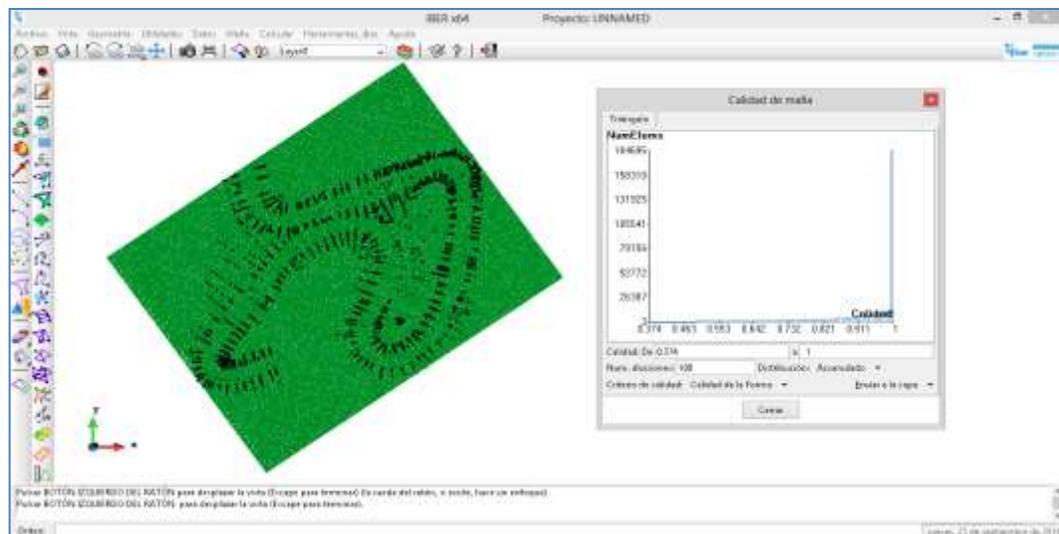


Figura 7.7. Mallado y calidad de la forma.

Se asignan las condiciones de contorno iniciales del modelo numérico y dentro de los parámetros asignados, se ingresa el valor del número de Manning (n), cota de agua y un gasto de entrada para un tiempo de simulación establecido y un intervalo de resultados discretizado (Figura 7.8).

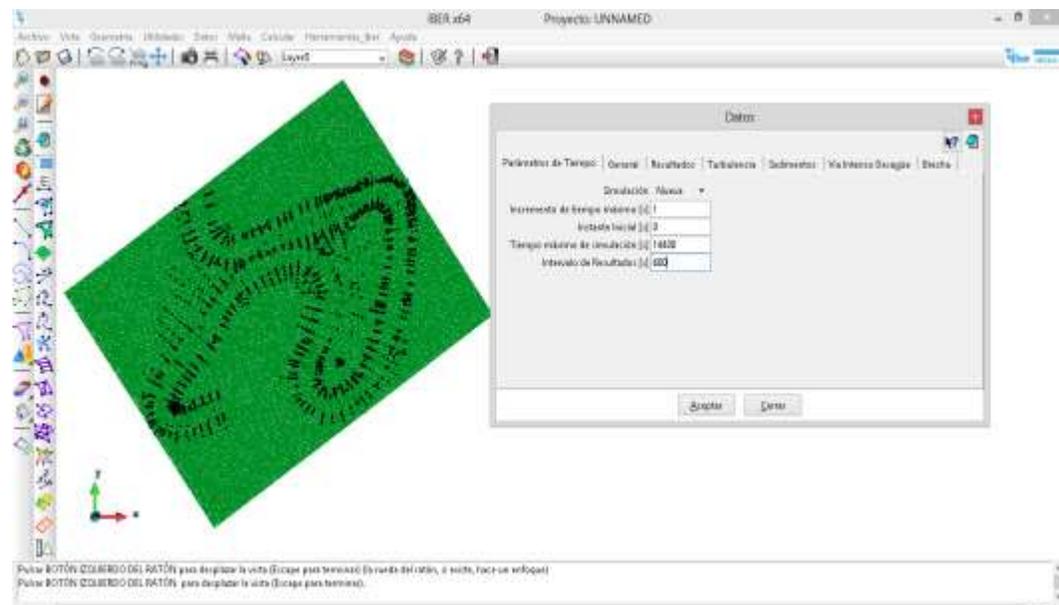


Figura 7.8. Asignación de valores de tiempo de simulación e intervalos de resultados.

7.4.3.4. CONDICIONES DE CONTORNO E INICIALES

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

El análisis hidráulico se realizó en condiciones supuestas de flujo permanente; que consiste en las propiedades constantes respecto al tiempo del flujo tal como velocidad, caudal y calado y régimen fluvial subcrítico, determinado por el número de Froude (Fr), al ser un número adimensional informa el estado del flujo y se define por la ecuación 11:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot D_h}} = \frac{\text{Fuerzas inercia}}{\text{Fuerzas gravitatorias}} \quad (11)$$

Siendo v la velocidad de la sección (m/s), g la aceleración de la gravedad (m/s^2) y D_h la profundidad hidráulica (m).

De acuerdo, a esto si el número de Froude es menor a la unidad, las fuerzas gravitatorias tienen mayor importancia que las de inercia (Calzas, 2013).

Debido a que este tipo de protecciones debe ser diseñado con el gasto máximo que transita el cauce se usaron dos criterios: el primero fue el gasto formativo, el cual es el gasto máximo que conduce el río sin desbordar hacia sus márgenes del manual de Estabilización y Rectificación de Ríos, 2012; para zonas donde no existe información hidrométrica.

El segundo criterio el gasto formativo está asociado a un período de retorno de 1.4 años del Manual de Gaviones (II-UNAM, 2001).

Para el caso del río de la Sierra, para determinar el gasto de diseño o gasto formativo del cauce se utilizó el primer criterio, proponiendo la distribución de gastos siguientes (Tabla 7.1):

Tabla 7.1. Gatos de diseño o formativos evaluados en el río de la Sierra

Corriente	PF1 ($Q \text{ m}^3/\text{s}$)	PF2 ($Q \text{ m}^3/\text{s}$)	PF3 ($Q \text{ m}^3/\text{s}$)
Río Sierra	450	500	550

Para el caso del río Tintillo, el modelo se alimentó con la curva gasto. Elevación de la sección de control aguas abajo de la escotadura Acachapan (Tabla 7.2), modelando todos los gastos y las elevaciones para determinar el gasto formativo, en régimen subcrítico, tomando como base el segundo criterio.

Tabla 7.2. Gasto-elevación evaluados en el río Tintillo.

Gasto	Elevación
1467.01	2.5
1757.84	3.37
1806.03	3.52
1922.64	3.87
1965.88	4.00
2142.85	4.61
2257.15	4.93

7.5. RESULTADOS

Los resultados obtenidos de las modelaciones numéricas bidimensionales de las zonas estudiadas, que conforman los ríos de la Sierra, y el Tintillo, donde se localizan obras de protección marginal de recubrimiento a base de espigones se mencionan a continuación. Sobre la zona estudiada del río de la Sierra, antes de la existencia de los espigones existía un régimen establecido de velocidades que oscilaba entre 0.96 y 2.4 m/s y con espigones entre 1.23 y 3.07 m/s (Figura 7.9).

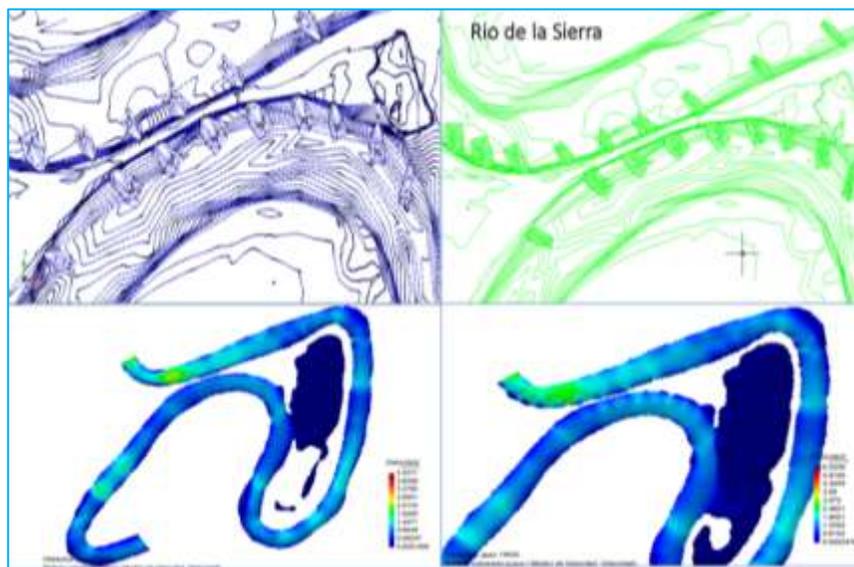


Figura 7.9. Cambio de régimen por acción de 16 espigones, Río la Sierra

Este cambio de régimen está generando una evolución del fondo y márgenes, ya que el régimen admisible fue de 0.91m/s y de acuerdo a la modelación los estimados fueron mayores. Para este caso la predicción de migración del fondo modelado máxima fue 2.22

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

m. Y mediante los procedimientos empíricos de laboratorio, y una vez operando los espigones las erosiones oscilaron entre 3.72 a 5.52 m.

Con ello se demuestra que el régimen impuesto por mucho supera el admisible. Ahora bien, en la zona estudiada del río el Tintillo, antes de la existencia de los espigones había un régimen establecido de velocidades que oscilaba entre 1.19 y 1.76 m/s y con los espigones osciló entre 1.5 y 2.25 m/s, (figura 7.10).

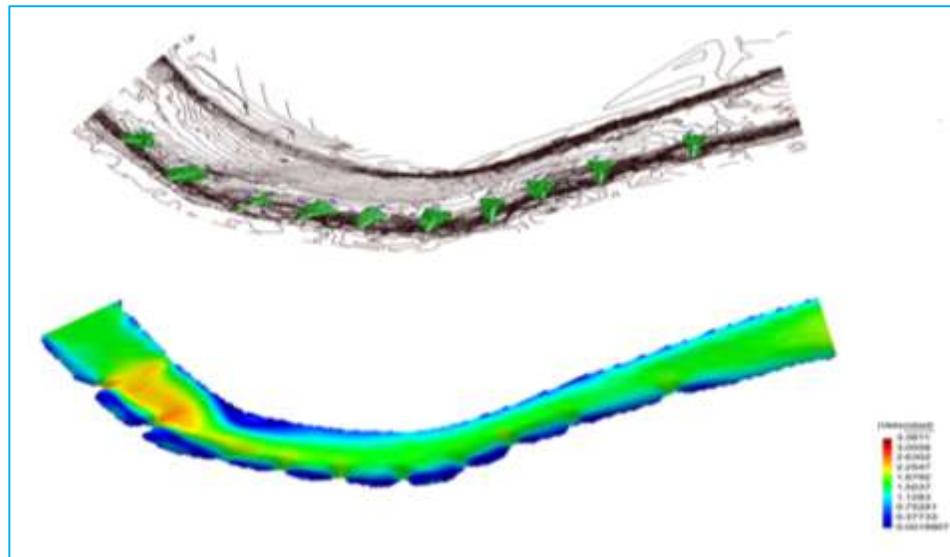


Figura 7.10. Cambio de régimen por acción de 10 espigones, Río Tintillo.

Utilizando el criterio de las ecuaciones de Shields, que determinan la relación de la tasa de transporte de sedimentos con la tensión de corte sobre el fondo (Basile, 2003), se determinó que el umbral de velocidades admisibles para suelos de arenas limo arcillosas era de 0.56 m/s, dando inicio al movimiento de las partículas cuando se presentaran velocidades superiores a ésta. Con ello se estima que el promedio de socavaciones generales sobre la zona de estudio fue de 3.68 m, y operando los espigones de 2.1 a 4.47m.

Finalmente, se observó que los espigones marcan una tendencia a la recuperación de márgenes y en sitios donde existen un buen diseño y una perturbación inicial se aprecia un régimen más estable sobre el cauce y una recuperación acelerada de ella. Por esta razón, mantener un régimen estable de velocidades hace que el gradiente de variación de la cota de fondo respecto a su longitud sea invariante y se establezca una recuperación acelerada en ambos cauces.

7.6. CONCLUSIONES

Río de la Sierra

En la zona de estudio del río de la Sierra, se obtuvieron velocidades que oscilaron entre 0.96 y 2.4 m/s. Ya operando los espigones de 1.23 a 3.07 m/s. Obteniendo con ellos socavaciones generales promedios de 2.22 m, Y con espigones de 3.72 a 5.52 m, en el cauce. Por lo que el régimen tanto de velocidades y de evolución de fondo se vio alterado al momento de la operación de los espigones. Cabe destacar que dicha evolución de forma natural seguiría presentándose ya que el régimen admisible estimado fue de 0.91m/s, para el tipo de fondo de la zona de estudio, Impuesto y modelado por el régimen de gasto formativo.

Río el Tintillo

En la zona de estudio del río Tintillo, se obtuvieron velocidades que oscilaron entre 1.19 y 1.76 m/s. Ya operando los espigones de 1.5 y 2.25 m/s. Obteniendo con ellos socavaciones generales promedios de 3.68 m. Y con espigones de 2.1 a 4.47 m, en el cauce. Por lo que de igual forma el régimen tanto de velocidades y de evolución de fondo se vio alterado al momento de la operación de los espigones. Para este caso la evolución del fondo, de forma natural, seguiría presentándose, ya que el régimen admisible estimado fue de 0.56 m/s, en la zona de estudio, Impuesto y modelado por el régimen hidrométrico evaluado.

Puesto que durante las evaluaciones realizadas, se demostró que los espigones generan una alteración sobre las zonas aledañas donde operan. Por lo tanto deberían considerarse otras soluciones, que garanticen un efecto positivo, no acrecentando la alteración del campo de velocidades y la evolución del fondo y márgenes en cauces de planicie.

Finalmente de acuerdo a los resultados de las evaluaciones generadas, se concluye que es necesario investigar más sitios, debido a que cada sitio guarda una relación directa con la forma geomorfológica, el tipo de estratigrafía y la hidrodinámica que permite la captación de escurrimientos. Otro factor importante son los procesos antropogénicos que han provocado el aceleramiento y cambio de regímenes, tanto en la evolución del campo de velocidades y el acelerado proceso de migración de meandros (escotaduras, estructuras de control, puentes).

REFERENCIAS

1. **Abbasi S., Kamanbedast A. and Ahadian J.** (2011). “Numerical Investigation Of Angle And Geometric Of L-Shape Groin On The Flow And Erosion Regime At River Bends,” *World Appl. Sci. J.*, vol. 15, pp. 279-284, 2011.
2. **Basile P. A.** (2003). “Geomorfología e Hidráulica Fluvial Movimiento Incipiente de Sedimentos,” 2003. Centro Universitario Rosario de Investigaciones HidroAmbientales. [Online]. Available: Url: http://www.fceia.unr.edu.ar/curiham/Secciones/Publicaciones/Geomorfologia_Erosion_etc/GHF.
3. **Bladé E., Cea L., Corestein G., Escolano E., Puertas J., Vázquez-Cendón E., Dolz J. y Coll A.** (2014). “Iber: Herramienta De Simulación Numérica Del Flujo En Ríos,” *Rev. Int. Métodos Numér. Cál. Diseño Ing.* vol. 30, pag. 1–10, 2014.
4. **Calzas P. M.** (2013). Modelización del canal de la planta TEL en la U.P.T de As Pontes. Máster Tesis. Departamento de Ingeniería Matemática, Universidad Da Coruña, Coruña, España, 2013.
5. **Cea L., Puertas J. A. Y Vázquez M.E.** (2012). “Evaluación de corrientes litorales y frentes de marea mediante modelación bidimensional en ríos y desembocaduras de ríos,” *Rev. Ing. Agua.*, vol.16, pag.13-26, 2009.
6. **Ercan B. and Younis B.A.** (2009). “Prediction of bank erosion in a reach of the Sacramento river and its mitigation with groynes,” *Water Resour Manage.*, vol. 23, pp. 3121–3147, 2009.
7. **Gregory W.H.** (2004). “Indirect Environmental Effects Of Dikes On Estuarine Tidal Channels: Thinking Outside Of The Dike For Habitat Restoration And Monitoring,” *J. Coast Estuaries*, Vol. 27, pp. 273–282, 2004.
8. **IBER** (2012). Manual Iber, Herramienta de Simulación Numérica del Flujo en Ríos. [Universidad](http://www.upc.edu) politécnica de Cataluña. 2012.
9. **II-UNAM** (2001). Manual de Gaviones. Series del Instituto de Ingeniería de la UNAM, 2001.
10. **II-UNAM** (2012). Manual de Estabilización y Rectificación de Ríos. Series del Instituto de Ingeniería de la UNAM, 2012.
11. **Kang J., Yeo H. and Kim C.** (2012). “An Experimental Study on a Characteristics of Flow around Groyne Area by Install Conditions,” *J. Eng.*, Vol. 4 , pp. 636-645, 2012.

12. **Mccoy M., Constantinescu G. and Weber L.J.** (2008). “Numerical investigation of flow hydrodynamics in a channel with a series of groynes,” *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 134, pp.157–172, 2008.
13. **Rivera J.G., López M.E., Uh F. Y Guillen O.** (2006). “Análisis de información para la identificación e inventario de los ríos y cauces en el estado de Tabasco,” Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Mexico, Reporte de actividades, 2006.
14. **Papanicolaou A. N., Elhakeem M. and Wardman B.** (2011). “Calibration and verification of a 2d hydrodynamic model for simulating flow around emergent bend way weir structures,” *J. Hydraul. Eng.*, vol. 137, pp. 75–89, 2011.
15. **Rashedipoor A., Masjedi A. and Shojaenjad R.** (2012). “Investigation on scour hole around spur dike in a 180 degree flume bend,” *World Appl. Sci. J.*, vol.19, pp. 924-928, 2012.
16. **UNAM** (2012). Manual de Ingeniería de Ríos. Series del Instituto de Ingeniería de la UNAM, 2012.
17. **Vaghefi M., Ghodsian M., and Neyshabouri S.** (2012). “Experimental study on scour around a T-shaped spur dike in a channel bend,” *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 138, pp. 471–474, 2012.

8. HIDRODINAMICA, CONCENTRACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE SEDIMENTOS DE BIFURCACIÓN CON ESPIGONES, ESTIMADOS MEDIANTE ADCP

8.1. RESUMEN

La distribución de gastos sólidos y líquidos es sometida en gran manera al gradiente que le impone la geometría local de la bifurcación y al efecto antropogénico sobre ella. El caso de estudio se centra en la bifurcación de los ríos Samaria-Carrizal, ya que actualmente aguas arriba y abajo de la bifurcación existen espigones en la margen izquierda, y en el río Carrizal una estructura de control transversal. El objetivo del presente capítulo fue conocer mediante técnicas Doppler y campañas de medición la evolución de la hidrodinámica, concentración y distribución de sedimentos, transversales y en planta.

En estudios pasados se han realizado aproximaciones mediante medición de sedimentos con las técnicas convencionales y modelación numérica en 1D y 2D. Para el caso de estudio se estimó la hidrodinámica mediante ADCP ya que provee el campo vectorial de velocidades del flujo en 3D y con las intensidades medidas la concentración del sedimento. Para esto fue necesaria la obtención de la topobatimetría actual con el ADCP y los muestreos de sedimentos en suspensión y fondo fueron tomados de estudios pasados. Una vez procesada la información se identificó que cien metros aguas abajo de la bifurcación sobre los ríos Samaria y Carrizal, la concentración y distribución de sedimentos es similar y el efecto de la estructura de control sobre el río Carrizal aún no es apreciable. Los espigones sobre la margen izquierda aguas abajo de la bifurcación no causan efecto alguno para los gastos medidos. Sin embargo los espigones 500 metros aguas arriba de la bifurcación generan un efecto en la hidrodinámica que desvían las líneas de corriente del flujo sobre la bifurcación, adosándose estas con velocidades altas sobre la margen derecha antes de la bifurcación.

En la zona 300 metros aguas abajo de la bifurcación sobre el río Carrizal se identificó la influencia de la estructura de control ya que las velocidades e intensidades disminuyeron drásticamente, siendo esto una característica de la poca turbulencia generada en los remansos característicos de zonas controladas, disminuyendo el transporte de la carga sedimentológica y acelerando el proceso de sedimentación. Finalmente como un indicador

de la futura evolución de la sección transversal, se estimaron los esfuerzos de corte aguas arriba de la bifurcación y abajo del río Carrizal y Samaria, utilizando los datos del campo vectorial de las velocidades promediados en la trasversal, mismos que se compararon con las zonas de mayor concentración de la carga sedimentológica, en donde se observó que lo calculado por formula es consistente a lo medido de la zonas de mayor concentración y velocidad.

Palabras claves: ADCP, bifurcación, espigones y flujos secundarios.

8.2. INTRODUCCIÓN

Las bifurcaciones son encargadas de distribuir en los ríos los gastos sólidos y líquidos. Se ha encontrado que la distribución de la carga líquida y sedimentológica no es proporcional en sus bifurcados (Wout et al, 2014). Este fenómeno de distribución genera formas de fondo diferentes y es el indicador de forma global de la estabilidad en una bifurcación. Ahora bien la estabilidad en los bifurcados se debe en gran medida, a la concentración y distribución de los sedimentos, los ángulos entre ríos bifurcados, formaciones de islas y alta vegetación (Leif, 2006).

Se ha observado que la distribución de la carga sedimentológica en una bifurcación puede ser afectada, si aguas arriba de ella existen curvas sin alteración demostrando que la distribución preferencial del gasto sólido más pesado, es sobre la parte externa de la curva y la líquida sobre la interna. De esta manera uno de los bifurcados transporta más sedimentos (Kleinhans et al, 2007). Entender estos procesos de flujos en tres dimensiones ha sido motivo de diversos estudios.

Recientemente se ha observado que la dinámica compleja de las bifurcaciones puede ser alterada por la mano del hombre.

Ya que el uso de estructuras que fijan permanentemente los ríos en las bifurcaciones, generan aguas abajo inestabilidad en las márgenes de los bifurcados (Schuurman, 2015). También se menciona que si el uso es adecuado, estas estructuras pueden generar estabilidad hacia aguas abajo de ambos bifurcados, seleccionando adecuadamente los sitios de puesta en marcha.

Esto se ha demostrado mediante modelación y mediciones en campo (Nayan, 2017). Una de las estructuras principales de uso en las bifurcaciones son los espigones, y las

variables principales que sufren cambios son; la distribución y concentración de la tasa sedimentológica, la distribución del campo de velocidades y la geometría en la zona de la bifurcación (Gonzalo et al, 2016).

Se ha demostrado que los espigones en curvas, antes de las bifurcaciones alteran las variables principales de una bifurcación (Schielen *et al*, 2008). Sin embargo en la literatura no está documentado que en uno de sus bifurcados exista una estructura de control transversal. Siendo las variables afectadas; el fondo del cauce, la hidrodinámica, concentración y distribución de la tasa sedimentológica. Las técnicas de análisis utilizadas para estimar las alteraciones a las bifurcaciones han sido fotogrametría, modelos físicos y numéricos (Frias et al, 2015). Recientemente han surgido metodologías y técnicas acústicas con equipos ADCP que pueden estimar las variables características de las bifurcaciones, encontrando que en curvas antes de las bifurcaciones, la hidrodinámica, geometría local, concentración y distribución de las tasas sedimentológicas pueden explicarse mediante el comportamiento de las corrientes secundarias (Sassi et al, 2013).

Una vez identificadas las variables presentes en una bifurcación, se propuso como objetivo analizar la hidrodinámica, concentración y distribución de sedimentos en una bifurcación con espigones y una estructura de control en los ríos Samaria y Carrizal, ubicados en Tabasco México.

Encontrando que las características actuales geométricas de la bifurcación fueron:

- Inicia la bifurcación aguas arriba con una curva y la parte interna de la misma se encuentra sobre la margen derecha.
- La curva en su parte externa antes de la bifurcación tiene espigones en su margen izquierda.
- El río Carrizal como bifurcado derecho tiene una estructura de control transversal.
- El río Samaria como bifurcado izquierdo inestabilidad en su margen izquierda, y excesiva vegetación sobre su margen derecha.
- El río Carrizal entre la bifurcación y la estructura de control ha decreció su pendiente e incrementado la tasa de sedimentación.
- El río Samaria de la bifurcación hacia aguas abajo ha incrementado su pendiente y disminuido la tasa de sedimentación.
- En los bifurcados hubo una inversión de gastos.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

Las características hidrodinámicas y sedimentológicas se obtuvieron de dos campañas de medición con el ADCP en gastos medios. Usando la metodología de (Gallego et al, 2009). Se realizaron transeptos trasversales preestablecidos de margen a margen. Obteniendo con ello la hidrodinámica, concentración y distribución actual.

8.3. LOCALIZACIÓN

Se realizó el análisis de la bifurcación de los Ríos Samaria-Carrizal, el primer bifurcado termina en el Golfo de México y el segundo en la confluencia con el río Grijalva bajo. El sistema fluvial de la bifurcación de estos ríos se localiza geográficamente en las coordenadas 468561.22 m E y 1984897.96 m N. El bifurcado derecho actualmente tiene espigones y el izquierdo una estructura de control de transversal con un gasto máximo regulado de 850 m³/seg (Téllez, 2015). En la figura 8.1. Se muestra la ubicación específica de las estructuras y la zona de estudio

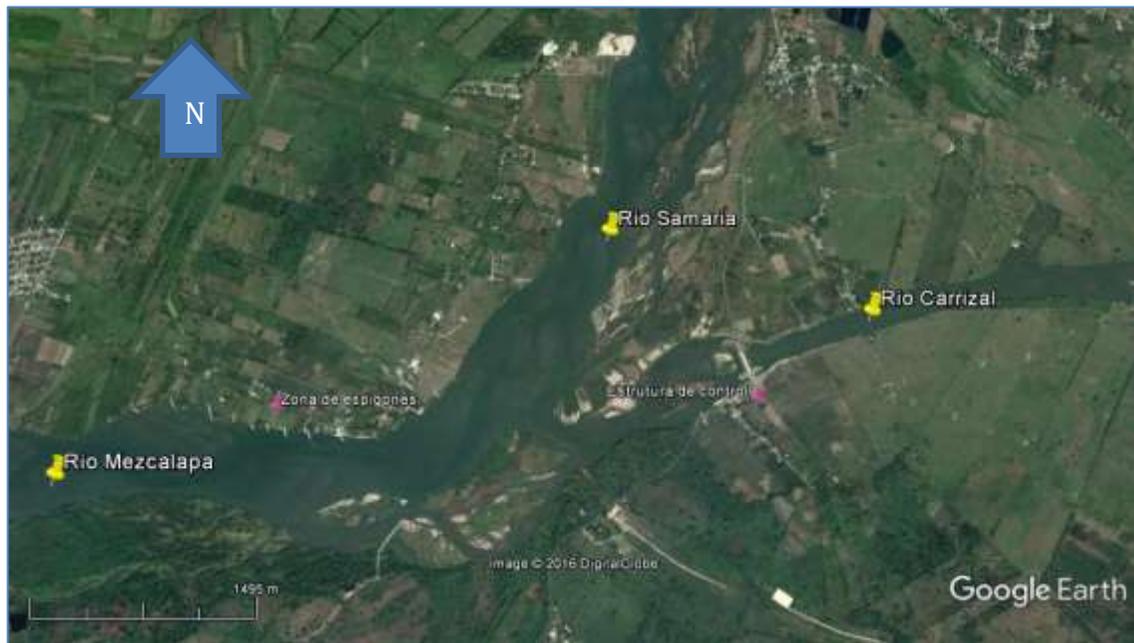


Figura 8.1. Bifurcación de ríos Samaria-Carrizal y Estructuras actuales.

8.4. METODOLOGÍA

Se manejaron tres etapas para el análisis:

1. Topografías complejas de fondo y márgenes: Esta etapa consistió en la obtención de la configuración actual de fondos y márgenes. El fondo se configuro con ADCP en la modalidad de ecosonda Multi-Haz, las márgenes mediante una estación total y la referencia ligada de la información fue de un banco de nivel de la comisión nacional del agua, en la estructura de control(ver figura 8.2).

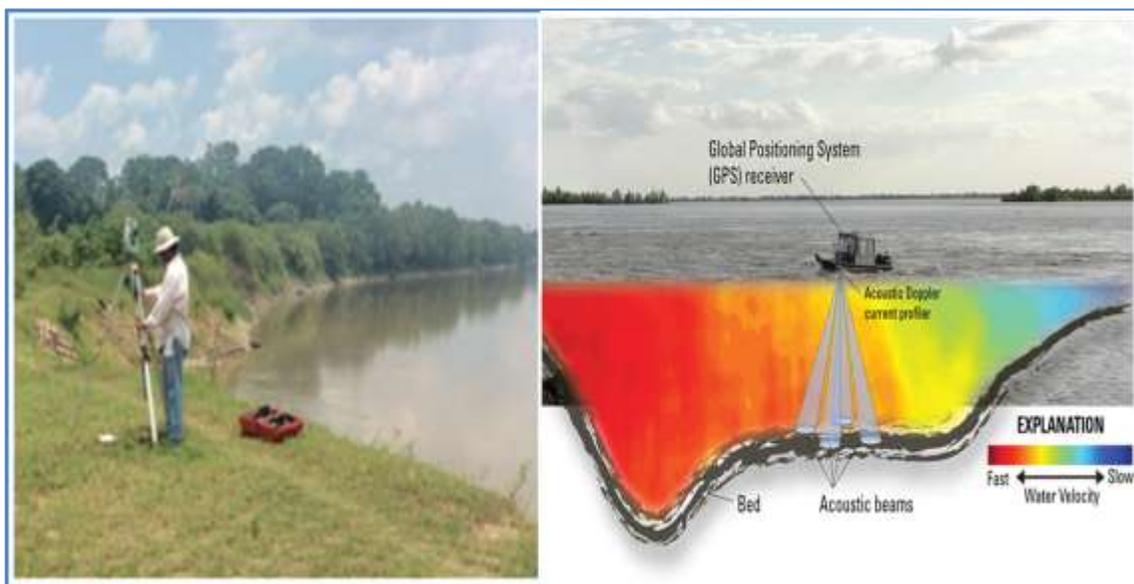


Figura 8.2. Estación total y forma de obtención de batimetrías de cauces con ADCP

2. Hidrodinámica, concentración y distribución de sedimentos: Esta etapa fue dedicada a la medición de la hidrodinámica mediante transeptos preestablecidos sobre los ríos Mezcalapa, Samaria y Carrizal (ver figura 8.3) de dos campañas de medición en septiembre y noviembre 2016 y una vez analizada la intensidad de medición se obtuvo la concentración y distribución de sedimentos. La obtención de los datos fue mediante ADCP y los métodos utilizados por los propuestos en (Kim y Kang, 2011).

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”



Figura 8.3. Ubicación y campañas de mediciones realizadas.

3. Medición de sedimentos y esfuerzos cortantes: En la zona de estudio se han realizado campañas de mediciones para conocer la distribución de gastos sólidos y líquidos (ver figura 8.4). De los datos de las campañas de mediciones hechas por (CONAGUA, 2014). Y de las curvas granulométricas obtenidas, se utilizaron los D_{50} , D_{84} , S_s (densidad de sólidos) y pesos volumétricos secos característicos de los ríos Mezcalapa, Carrizal y Samaria (ver figura 8.5 y 8.6).

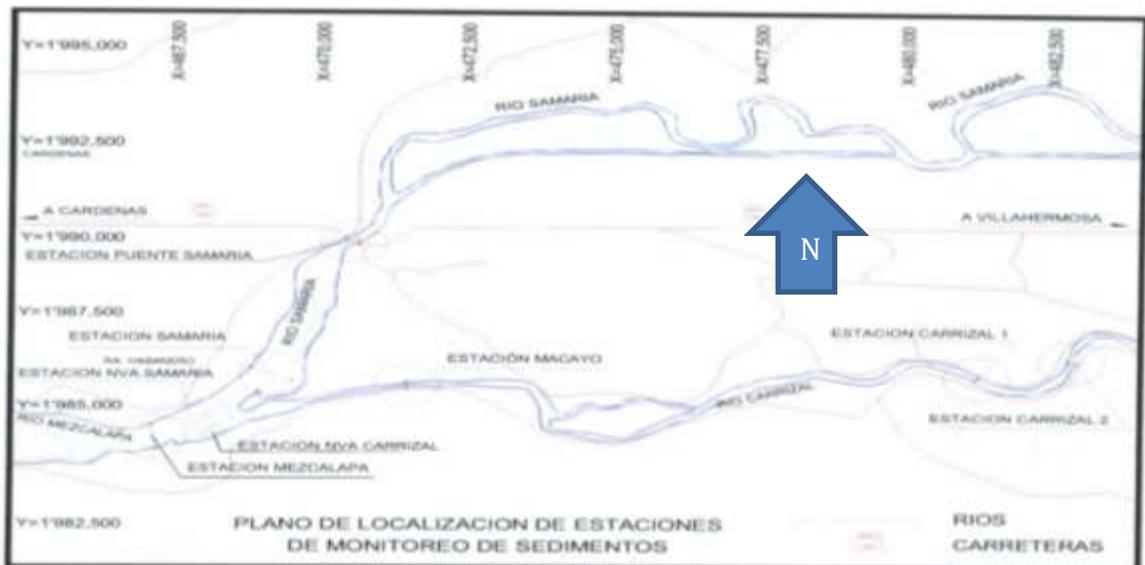


Figura 8.4. Monitoreo en la bifurcación 2002-2005 por la universidad Juárez Autónoma de Tabasco (Fuente UJAT)

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

ESTACIÓN	HORA DE INICIO DEL AFORO	HORA FINAL DEL AFORO	ESCALA INICIAL (msnm)	ESCALA FINAL (msnm)	$n_{(mnsnm)}$	CAUDAL (m^3/s)	CAUDAL SÓLIDO DE FONDO ESTACIÓN (m^3/d)	GASTO SÓLIDO DE SUSPENSIÓN POR ESTACIÓN (m^3/d)
Mezcalapa	9:00	16:05	16.705	16.695	16.700	489.75	1,528.532	9,276.413
Mezcalapa	9:35	16:30	16.685	16.665	16.675	431.06	2,585.427	8,853.734
Carrizal 02	10:20	16:40	16.505	16.495	16.500	93.61	456.171	2,461.277
Carrizal 01 y 02	8:30	16:10	16.535	16.535	16.535	112.46	831.429	4,166.043
Carrizal 03			16.535	16.535	16.535	1.86		
Carrizal 04			16.535	16.535	16.535	29.71		
Carrizal 05			16.535	16.535	16.535	18.6		
Samaria 01			10:20	16:40	16.505	16.495		
Samaria Bifurcación	10:20	16:40	16.505	16.485	16.495	399.45	S/M	S/M
Samaria (01,02,03,04,05)	8:40	15:30	16.505	16.485	16.495	314.4	1,220.473	8,480.681

Figura 8.5. Monitoreos de estaciones actuales de gastos líquidos y sólidos. (Fuente UNAM)

MID	DIRECCIÓN	ESTACION	PUNTO DE MUESTREO	VELOCIDAD (cm/s)	DENSIDAD (g/cm ³)	D50															
						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10						
006	N	006	006	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
			006	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			006	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
007	N	007	007	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
			007	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			007	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
008	N	008	008	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
			008	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			008	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
009	N	009	009	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
			009	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			009	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
010	N	010	010	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
			010	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			010	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
011	N	011	011	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
			011	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			011	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
012	N	012	012	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
			012	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			012	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
013	N	013	013	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
			013	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			013	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
014	N	014	014	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
			014	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
			014	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Figura 8.6. Datos granulométricos de campañas actuales de medición en la bifurcación (Fuente UNAM)

Los esfuerzos cortantes fueron obtenidos de lo mostrado por (Jonathan et al, 2011). Esta metodología correlaciona los esfuerzos transmitidos del flujo y toma como parámetro el número de Reynolds en sus ecuaciones y las contrasta contra las admisibles del material del fondo. Puesto que la distribución de velocidades considerada es global, con el uso de las mediciones con ADCP, se puede hacer un promedio sobre la sección transversal del tamaño de celda preestablecido. Para el caso de estudio se consideró un tamaño de celda de 10x10 cm (ver figura 8.7 y 8.8).

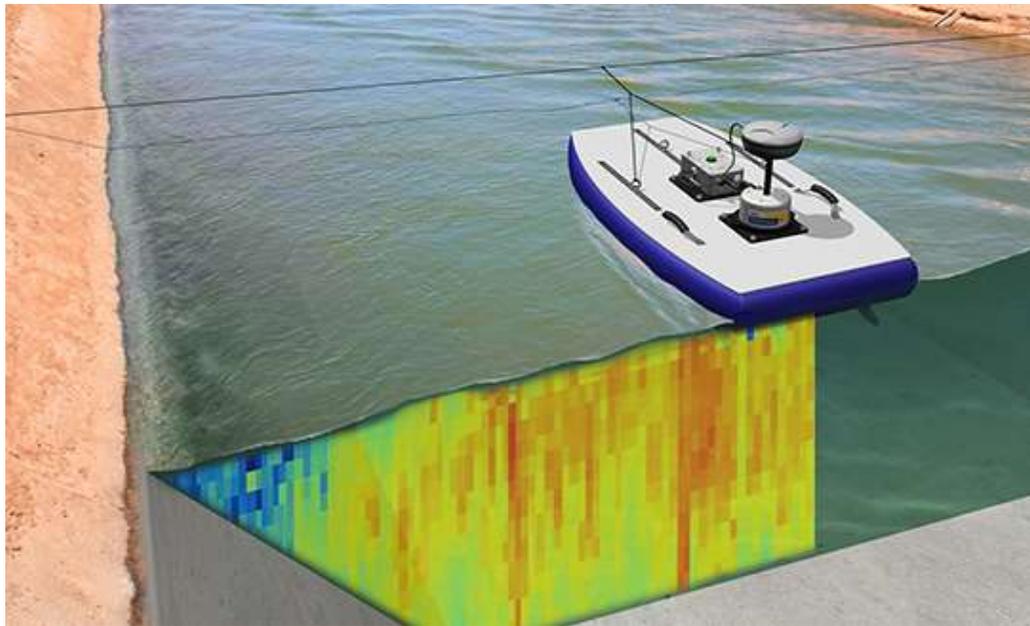


Figura 8.7. Distribución de velocidades sobre la transversal con ADCP (Hunter,2017).

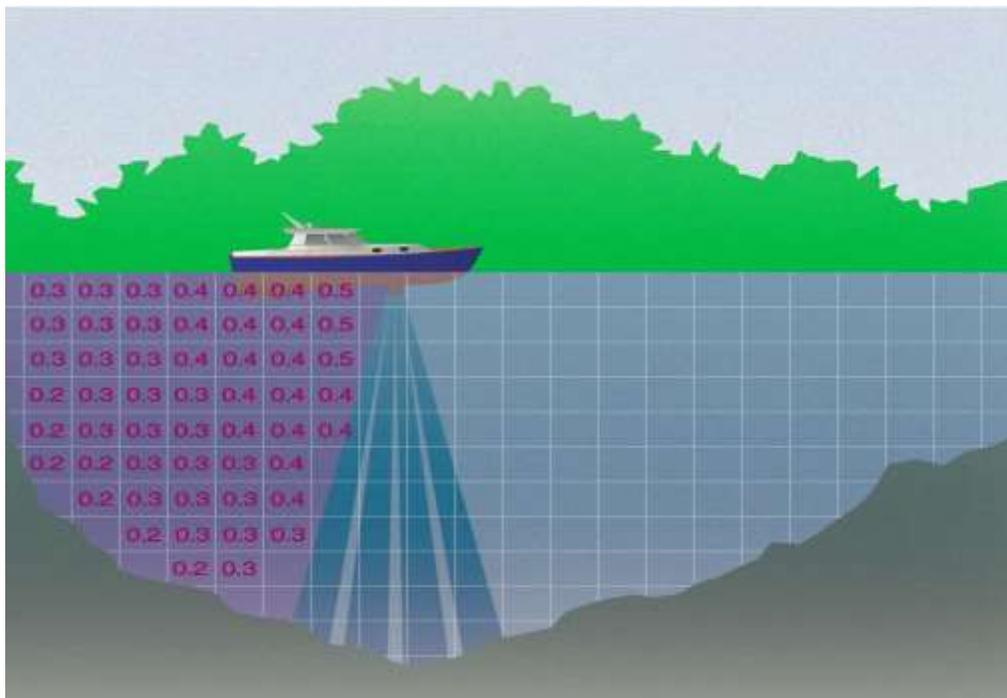


Figura 8.8. Distribución de celdas preestablecidas sobre la transversal con ADCP (Akarsulardadebi.2017).

8.5. RESULTADOS

Se presentan los resultados de las tres etapas de recolección y análisis de la información:

8.5.1. TOPOGRAFÍAS COMPLEJAS DE FONDO Y MÁRGENES.

Con la información obtenida de márgenes y cauces de la bifurcación se creó un modelo digital del terreno, mediante el software Iber de licencia libre (ver figura 8.9).

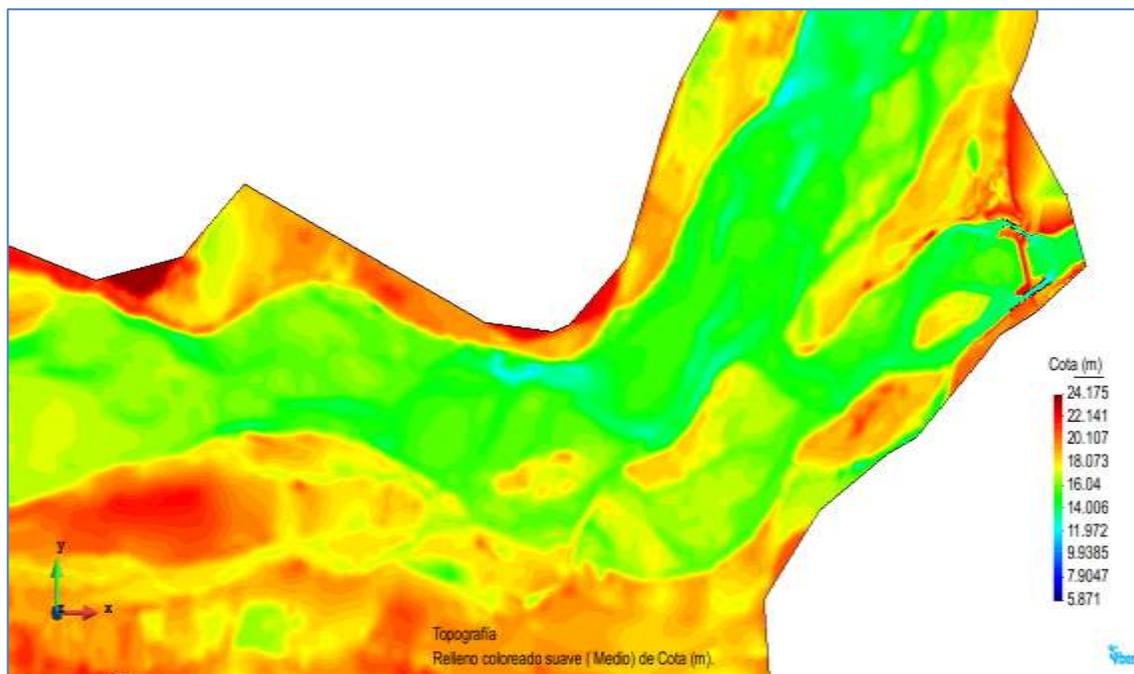


Figura 8.9. Topobatimetría de la bifurcación de los Ríos Samaria-Carrizal con ADCP y estación total.

8.5.2. HIDRODINÁMICA, CONCENTRACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE SEDIMENTOS.

De las dos campañas de medición se obtuvieron la distribución de velocidades en planta e intensidades de las secciones transversales medidas. En la figura 6.10 se muestran la distribución de velocidades de la medición realizada en septiembre. En ella se observa una tendencia general de los vectores de velocidades y del flujo del río mezcalapa sobre el río Samaria. Los gastos medidos en mezcalapa fueron de 499 m³/s, Samaria de 410 m³/s, y 89 m³/s, en el río Carrizal. Para este caso, medido en planta y con estos gastos, la influencia de los espigones no es muy representativa. Las velocidades presentes sobre el río Samaria fueron como máximas 1.2 m/s, mientras que en el río Carrizal de 0.8 m/s. Se observaron dos tránsitos preferentes sobre el río Samaria observándose una división del flujo con velocidades altas. En el río Carrizal no hubo división del flujo, sin embargo el

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

50% de su sección presento un régimen alto cargado sobre la margen izquierda y uno bajo sobre la margen derecha.

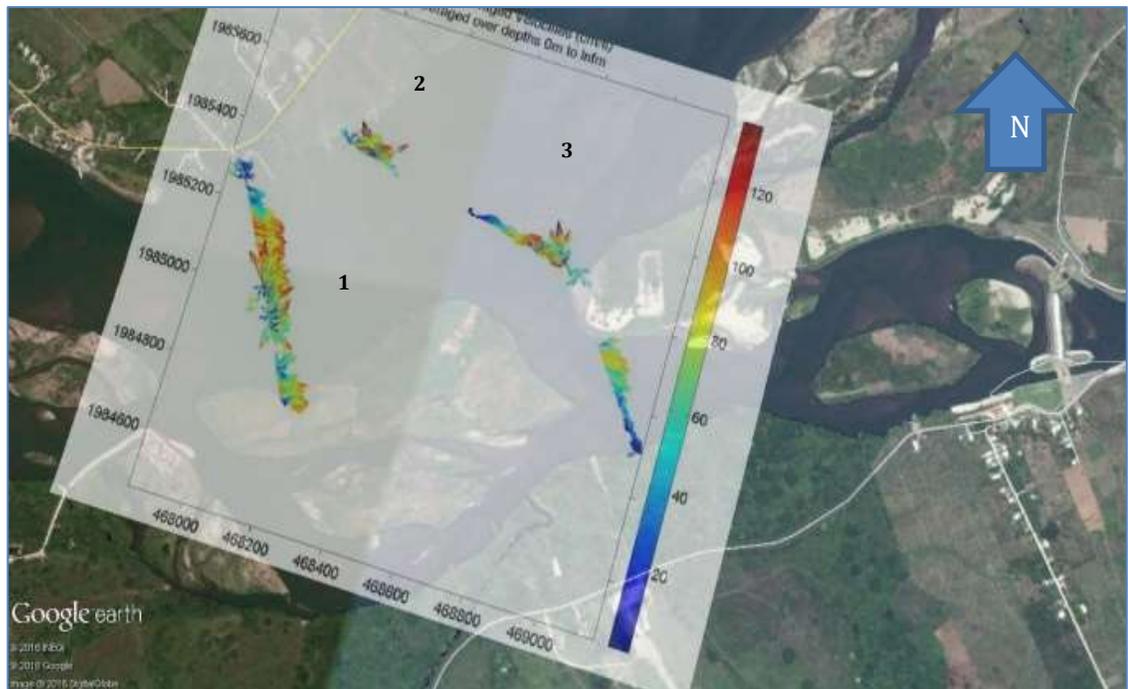


Figura 8.10. Distribución de velocidades en planta medidas en septiembre de 2016.

En la figura 8.11 se presenta la medición realizada en noviembre, se puede observar que para esta medición los vectores de velocidades en planta se encuentran más desarrollados y es más evidente los dos caminos preferentes del flujo. Observando que sobre el río Mezcalapa y Samaria, el flujo es influenciado por los espigones. Se vuelven apreciar los dos tránsitos preferentes sobre el río Samaria, donde el régimen de velocidades es más desarrollado oscilando en la sección de 1 a 1.40 m/s. Para las secciones transversales medidas sobre el río Carrizal, se puede observar que aguas abajo de la bifurcación el régimen de velocidades incrementa oscilando entre 0.6 y 1.20 m/s, sin embargo el patrón de distribución del flujo aun es sobre la margen izquierda. En la segunda sección medida sobre el Carrizal, el patrón sobre la margen izquierda disminuyo y se centraron los vectores. Sin embargo las velocidades oscilaron entre 0.8 y 0.9 m/s. Por lo que en esta sección se empieza a reflejar la influencia de la geometría local y la estructura de control. Los gastos medidos para esta condición fueron de 870 m³/s, en el río Mezcalapa, 682m³/s, en el río Samaria y 188 m³/s, en el río Carrizal.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

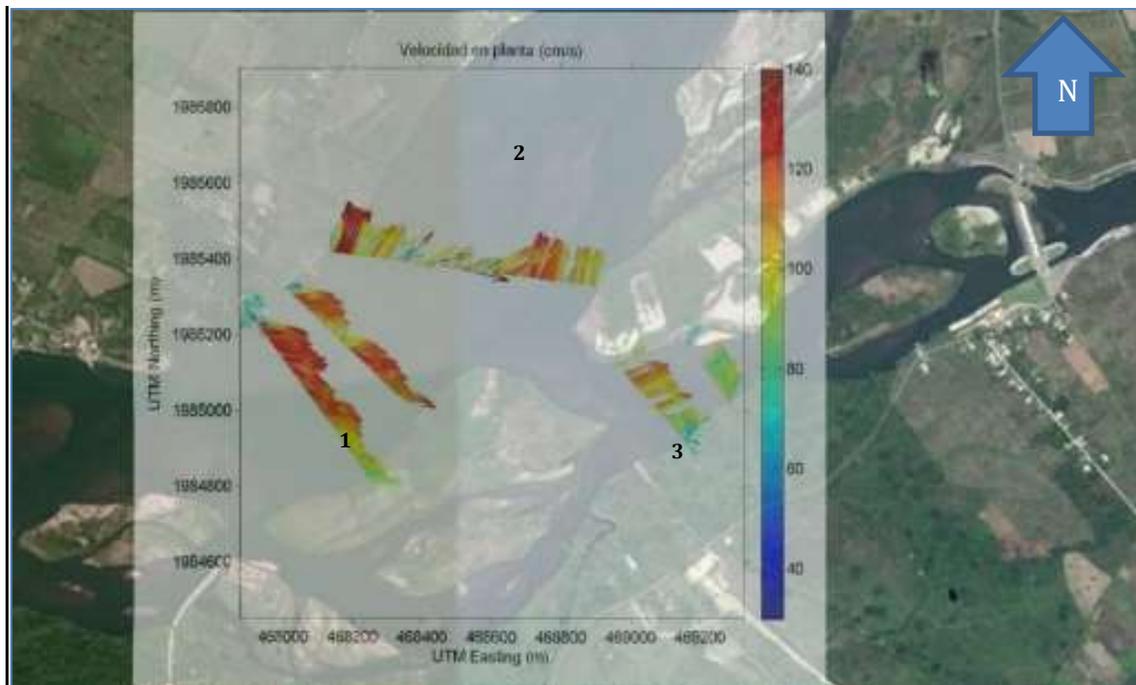


Figura 8.11. Distribución de velocidades en planta medidas en noviembre de 2016.

Del análisis realizado a las secciones trasversales, se pudo observar lo siguiente:

- Para septiembre en la Sección 1, sobre la margen izquierda entre espigones, aguas arriba de la bifurcación (ver figura 8.12). Se observó que la primera depresión vertical estaba a 100 metros sobre el cauce, el régimen dominante de velocidades osciló entre 0.4 y 0.6 m/s y las corrientes secundarias estuvieron orientadas en sentido horario de las manecillas del reloj (SHM). La segunda depresión encontrada estuvo a 150 metros sobre el cauce, el régimen de velocidades osciló entre 0.6 y 1.2 m/s y las corrientes secundarias estuvieron orientadas en sentido contrario de las manecillas del reloj (SCM). La tercera y más grande depresión a 600 metros sobre el cauce, el régimen de velocidades osciló entre 0.4 y 1.2 m/s, las corrientes secundarias estuvieron orientadas en SHM.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

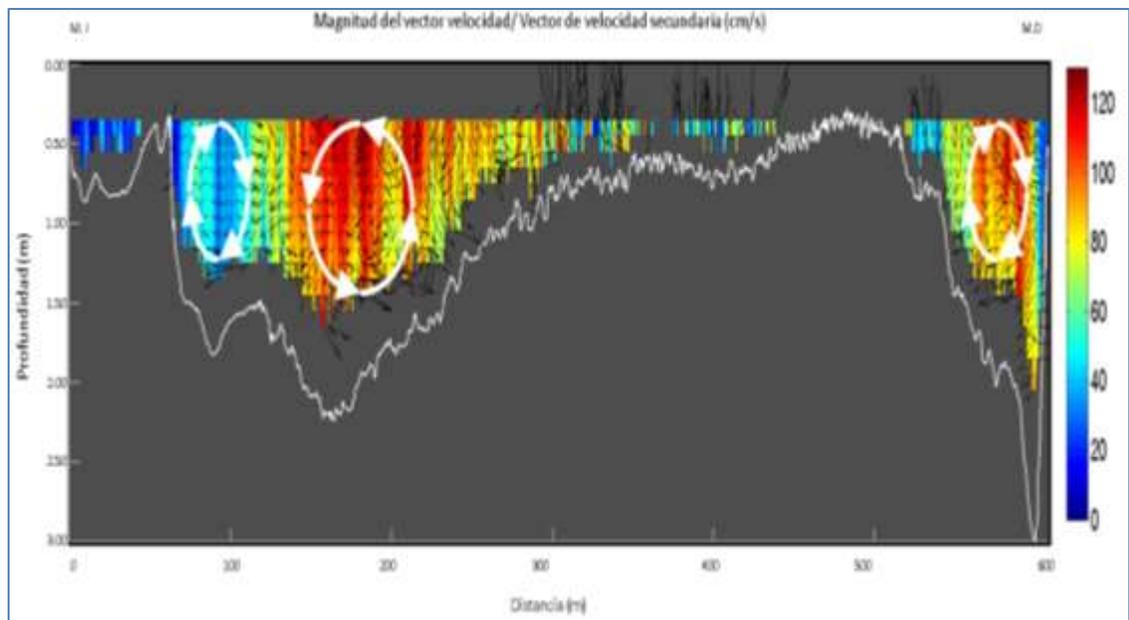


Figura 8.12. Distribución de corrientes secundarias sección 1 (septiembre).

- Para noviembre en la Sección 1, sobre la margen izquierda entre espigones, aguas arriba de la bifurcación (ver figura 8.13). Se observó que en los primeros 50 metros sobre el cauce, empiezan a desarrollarse corrientes secundarias en SCM, las velocidades presentes oscilaron entre 0.2 y 0.4 m/s, y el fondo del cauce no tiene una variación aparente. De 50 a 100 metros se formaron corrientes secundarias en SHM, las velocidades presentes oscilaron 0.4 y 0.8 m/s, y en esta zona no hubo variación de fondo. De 100 a 250 metros se generó una distribución de corrientes secundarias muy grande, oscilando la velocidad entre 0.6 y 1.2 m/s. En este punto se observó una variación del fondo drástico y el canal preferente encontrado en septiembre se movió 100 metros hacia la margen derecha. En la zona 250 a 300 metros se observó una recirculación de vectores de flujos secundarios sobre la depresión vertical alargada sometida por las recirculaciones más grandes sobre la sección transversal. De 300 a 550 metros sobre el cauce se generó una vorticidad con velocidades entre 0.2 y 0.8m/s, con vectores de flujos secundarios grandes en el fondo del cauce.

De 550 a 600 metros se encontró la zona de menor velocidad con una vorticidad más alargada y los vectores del flujo secundario cargados en el fondo.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

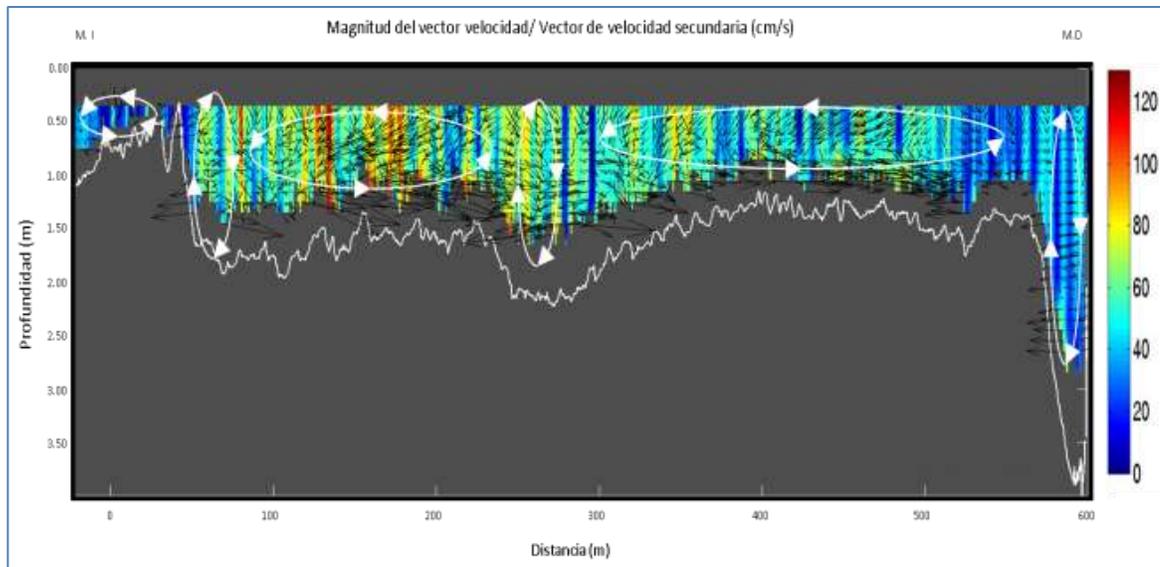


Figura 8.13. Distribución de corrientes secundarias sección 1 (noviembre).

Sobre el río Samaria en septiembre se pudo observar que para los tránsitos preferentes del flujo, en el de mayor profundidad se formaron dos vorticidades y una en el de menor profundidad. Sin embargo para noviembre en ambos canales verticales se desarrolló una sola vorticidad y nuevas recirculación adosadas a ellos. El canal menos profundo conservó su sentido de giro, y el más profundo conservó el del sentido de las manecillas del reloj (ver figura 8.14 y 8.15). El río sufrió variaciones de fondo disminuyendo en las zonas menos profundas y creciendo en las más profundas.

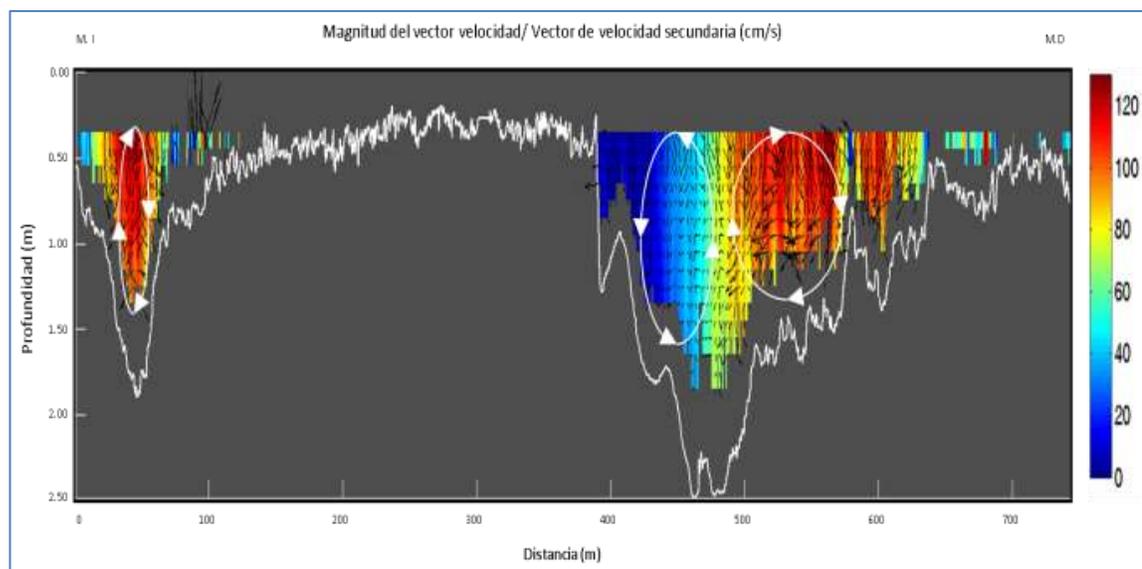


Figura 8.14. Distribución de corrientes secundarias sección 2 (septiembre).

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

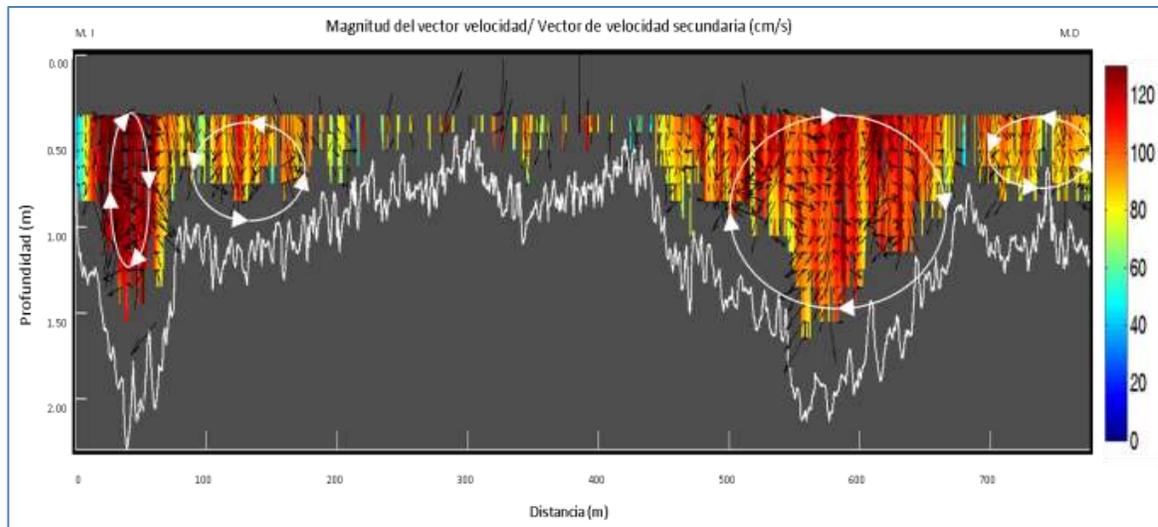


Figura 8.15. Distribución de corrientes secundarias sección 2 (noviembre).

Para el río Carrizal el principal cambio observado fue la variación del fondo ya que de septiembre a noviembre hubo una disminución del fondo en la zona central del cauce. Lo observado en planta sobre el régimen distribuido fue por la existencia de una isla que particiona el flujo, misma que desapareció en noviembre. Las corrientes secundarias presentes en ambos casos para septiembre presentan dos vorticidades encontradas y se observó que los vectores se desarrollaban con mayor velocidad sobre las islas. Para noviembre sólo se apreciaron dos vorticidades y se dieron en ambos sentidos mismos que fueron los flujos predominantes durante septiembre (ver figura 8.16 y 8.17).

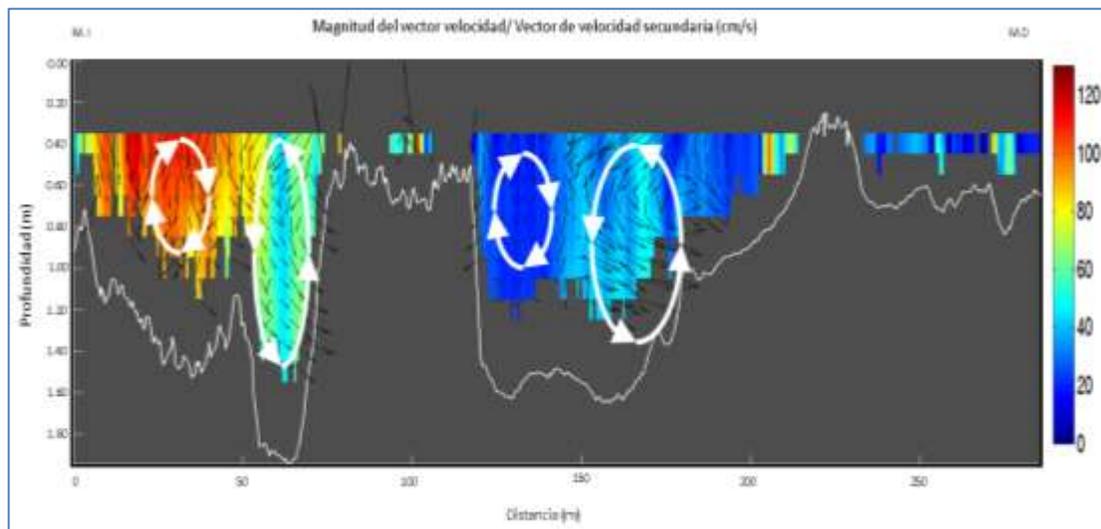


Figura 8.16. Distribución de corrientes secundarias sección 3 (septiembre).

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

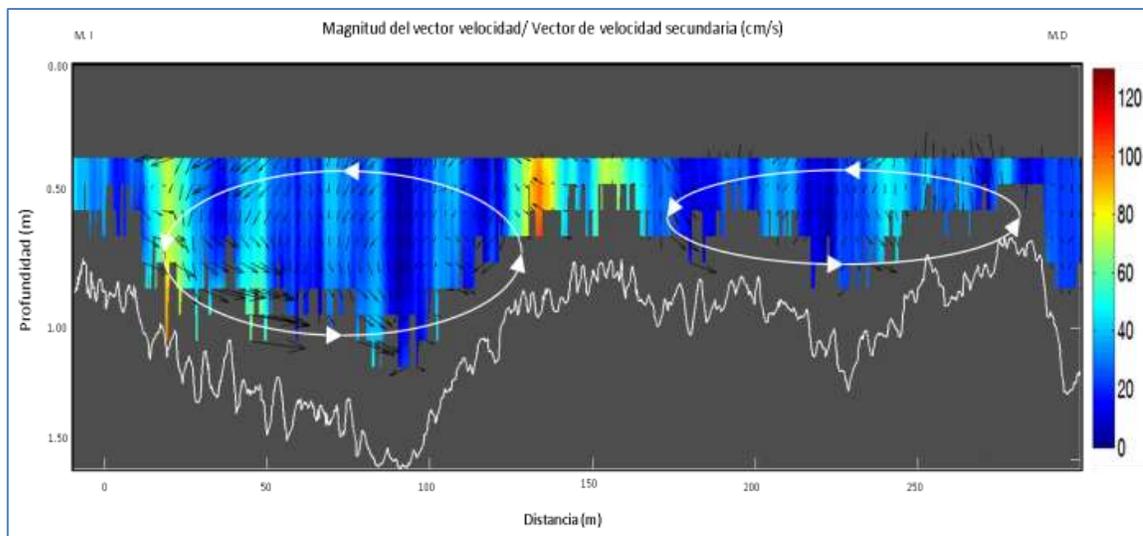


Figura 8.17. Distribución de corrientes secundarias sección 3 (noviembre).

Del análisis realizado a la distribución y concentración de sedimentos se observó que en la sección 1 sobre el río Mezcalapa en el mes de septiembre la mayor intensidad estaba distribuida sobre el fondo del cauce y para el mes de noviembre sobre la margen izquierda, acrecentando con ello la tasa de recuperación del fondo. Caso contrario del centro del cauce hacia la margen derecha, donde decreció el fondo del cauce (ver figura 8.18 y 8.19).

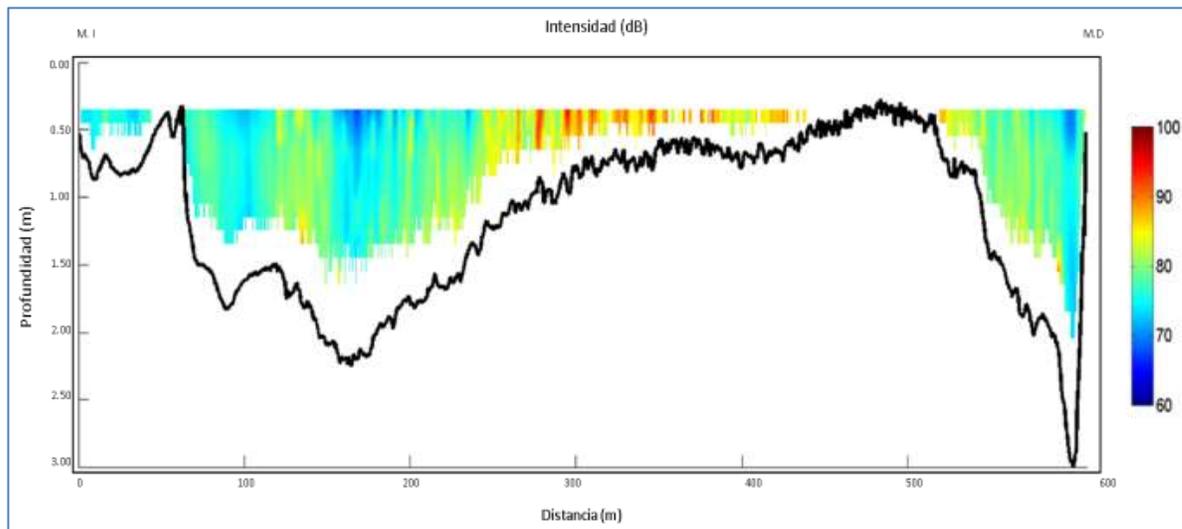


Figura 8.18. Concentración de sedimentos en la sección 1 (septiembre).

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

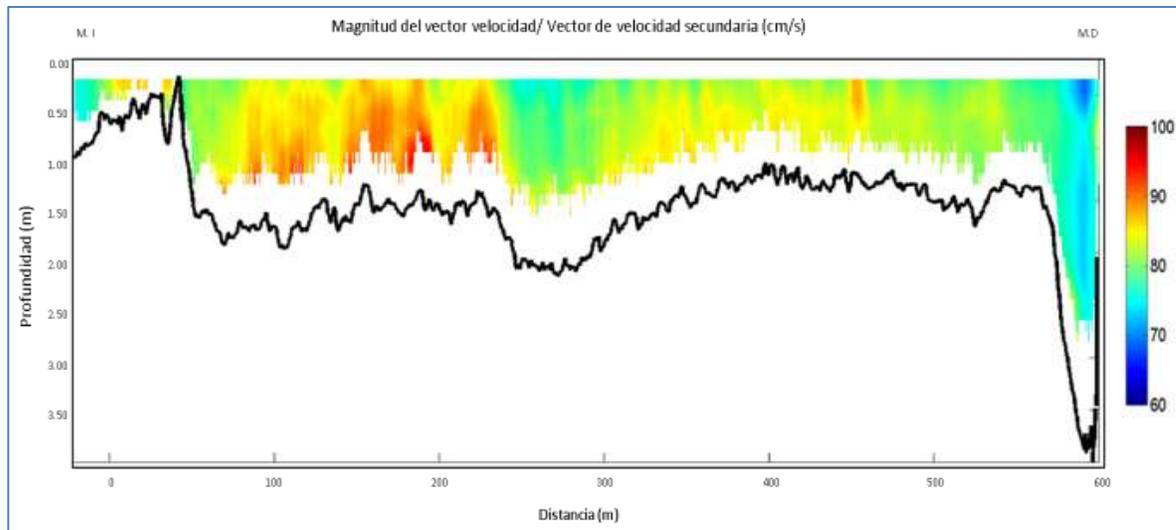


Figura 8.19. Concentración de sedimentos en la sección 1 (noviembre).

Del análisis realizado en septiembre, la distribución y concentración de sedimentos en el río Samaria la mayor intensidad estuvo en los canales preferentes sobre las márgenes izquierda y derecha.

En noviembre fue más uniforme el transporte sobre toda la sección transversal, sin embargo hubo una disminución del centro del cauce hacia la margen izquierda en el fondo, caso contrario del centro del cauce hacia la margen derecha (ver figura 8.20 y 8.21).

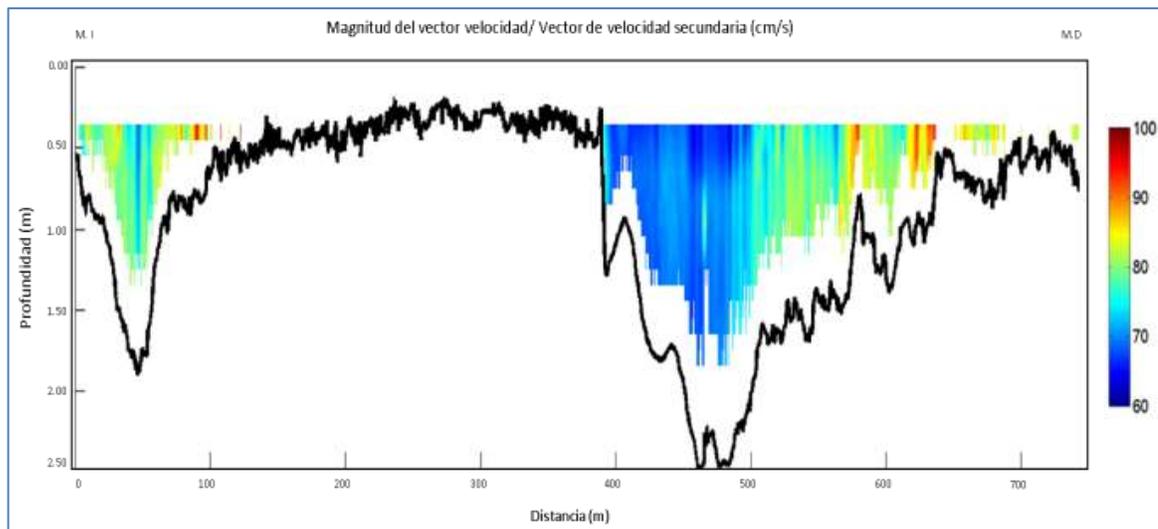


Figura 8.20. Concentración de sedimentos en la sección 2 (septiembre).

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

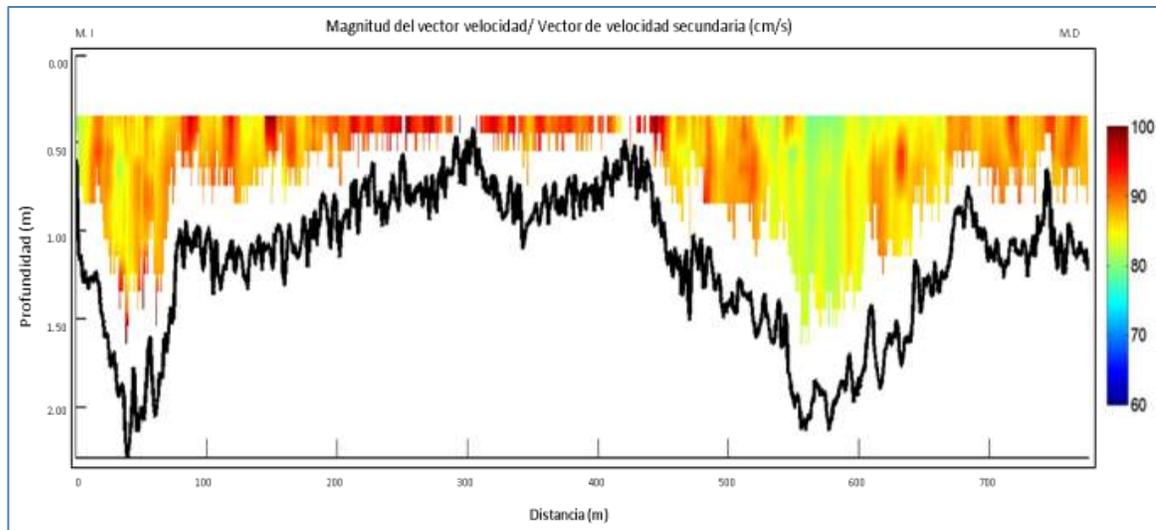


Figura 8.21. Concentración de sedimentos en la sección 2 (noviembre).

Del análisis realizado en septiembre, se encontró que la distribución y concentración de sedimentos en el río Carrizal, se distribuyó de forma casi homogénea sobre la sección transversal y este comportamiento se volvió apreciar en noviembre (ver figura 8.22 y 8.23). Sin embargo hubo una variación del fondo apreciada de ambas campañas medidas.

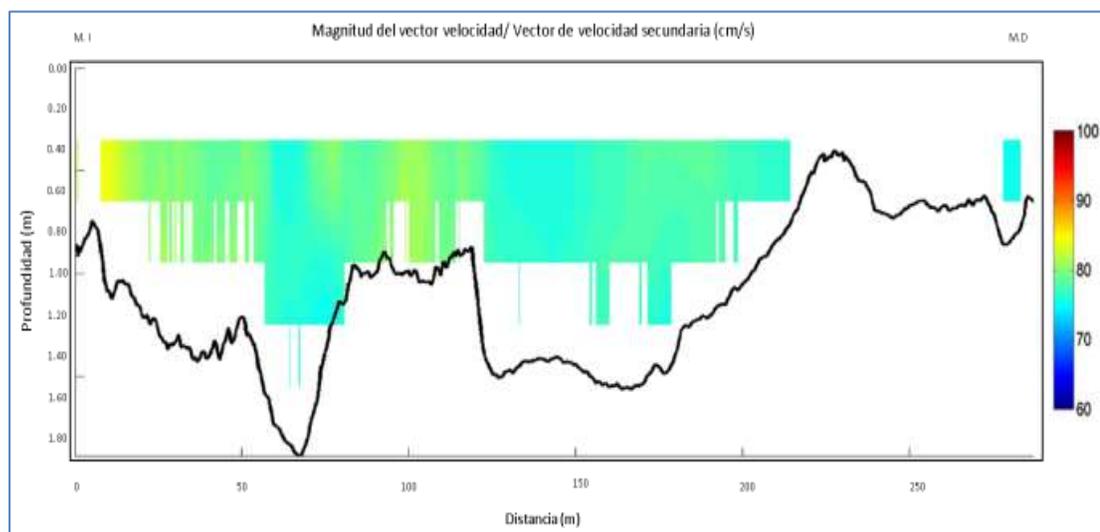


Figura 8.22. Concentración de sedimentos en la sección 3 (septiembre).

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

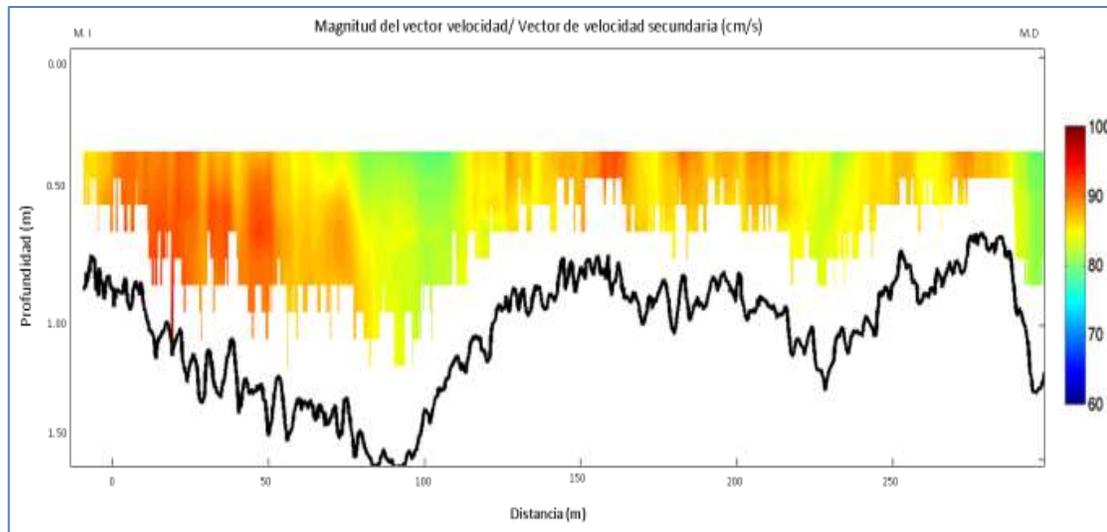


Figura 8.23. Concentración de sedimentos en la sección 3 (noviembre).

8.5.3. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS CORTANTES EN LAS SECCIONES TRANSVERSALES

Del análisis realizado a los esfuerzos se observó que en la sección 1 sobre el río Mezcalapa en el mes de septiembre, los esfuerzos admisibles fueron superados en mayor cantidad en la zona céntrica de la sección hacia la margen izquierda, para el mes de noviembre se tuvo el mismo efecto pero en menor proporción (ver figura 8.24 y 8.25).

Esta evaluación contrasta con los resultados de las mediciones de los equipos, localizando y prediciendo las mismas zonas que son susceptibles a depositarse y erosionarse.

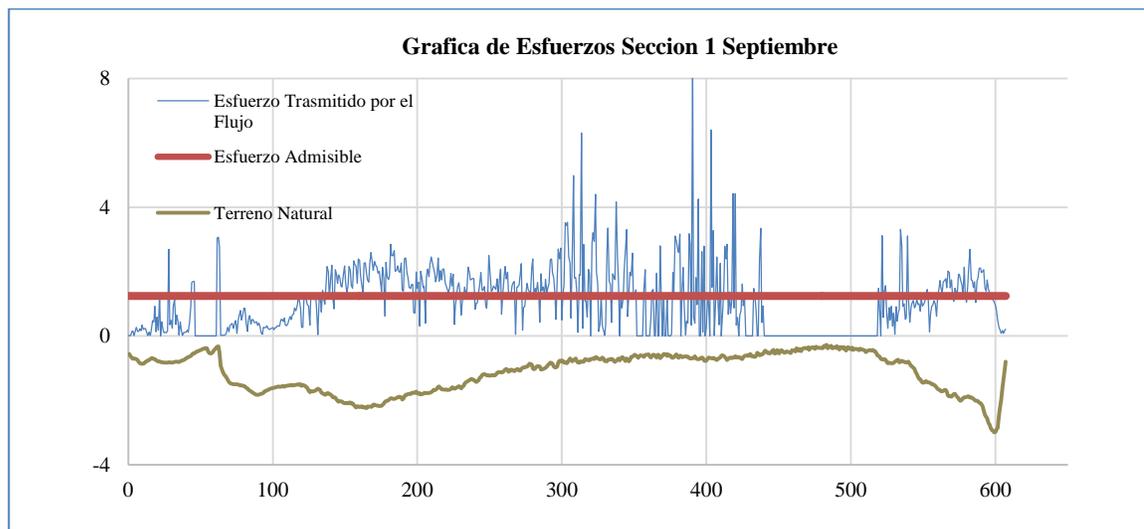
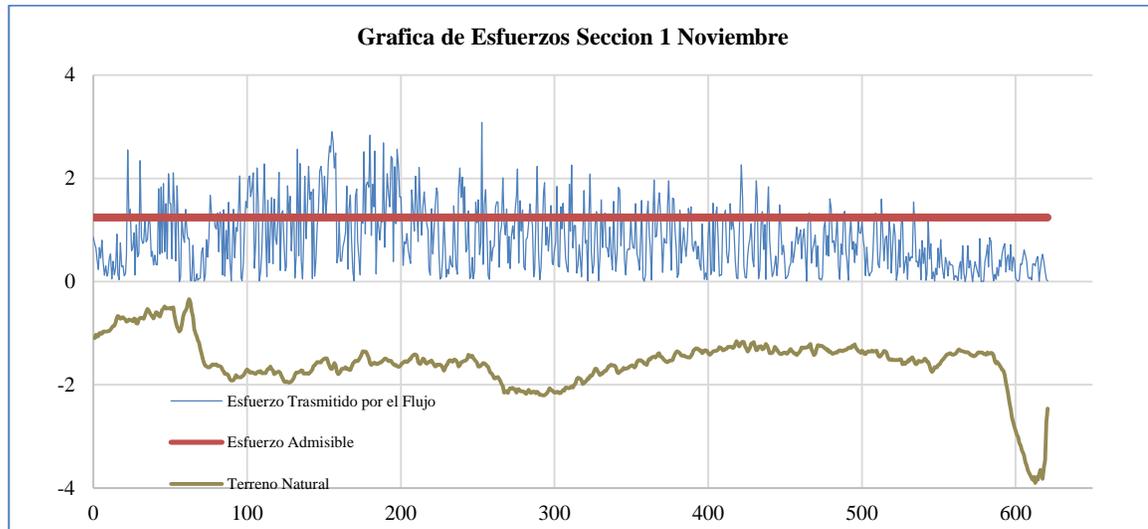
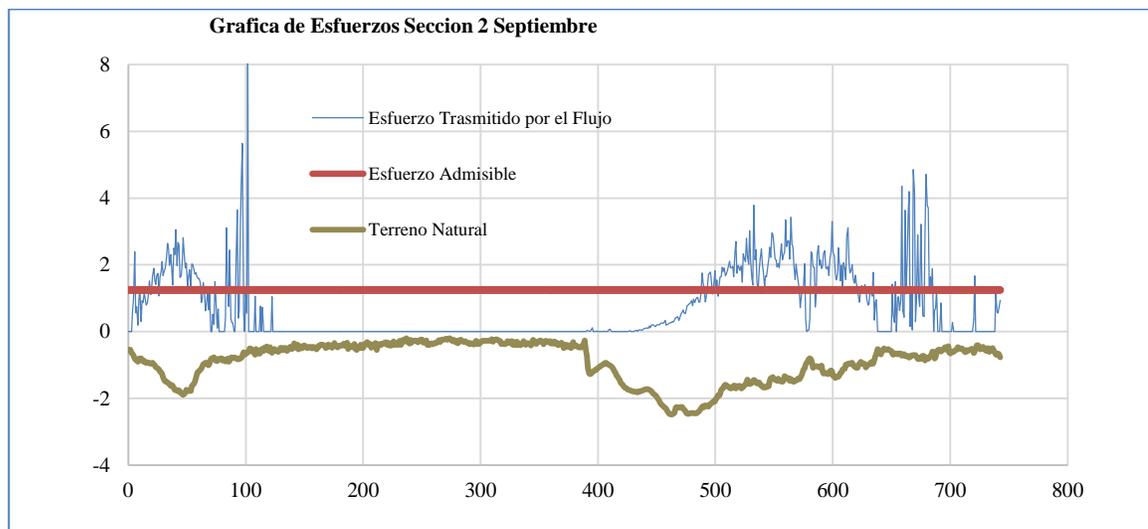


Figura 8.24. Esfuerzos Sección 1 (Septiembre).

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”



Del análisis realizado a los esfuerzos se observó que en la sección 2 sobre el río Samaria en el mes de septiembre, los esfuerzos admisibles fueron superados en mayor cantidad en ambas márgenes caso contrario a mes de noviembre donde los esfuerzos fueron superados en el centro de la sección (ver figura 8.26 y 8.27).



“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

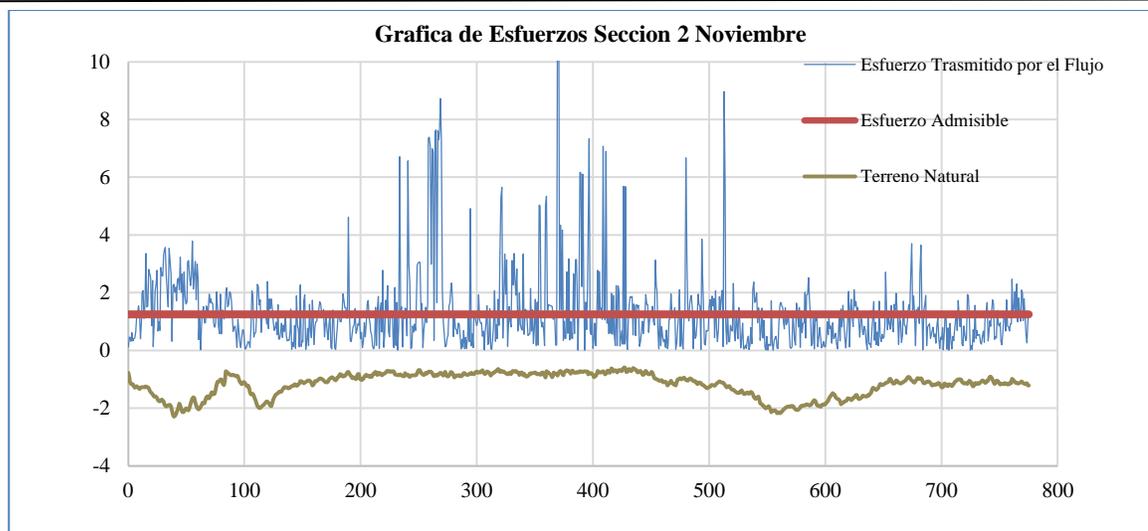


Figura 8.27. Esfuerzos Sección 2 (noviembre).

Del análisis realizado a los esfuerzos se observó que en la sección 3 sobre el río Carrizal en el mes de septiembre, los esfuerzos admisibles fueron superados en la margen izquierda en una proporción muy pequeña, caso contrario al mes de noviembre donde los esfuerzos fueron superados en mayor cantidad en la zona céntrica de la sección (ver figura 8.28 y 8.29).

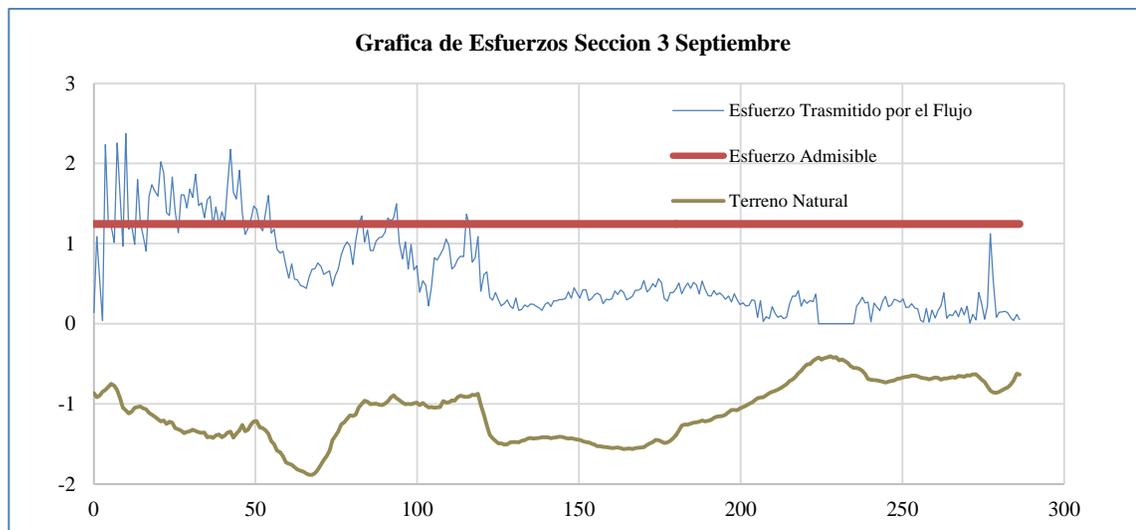


Figura 8.28. Esfuerzos Sección 3 (Septiembre).

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

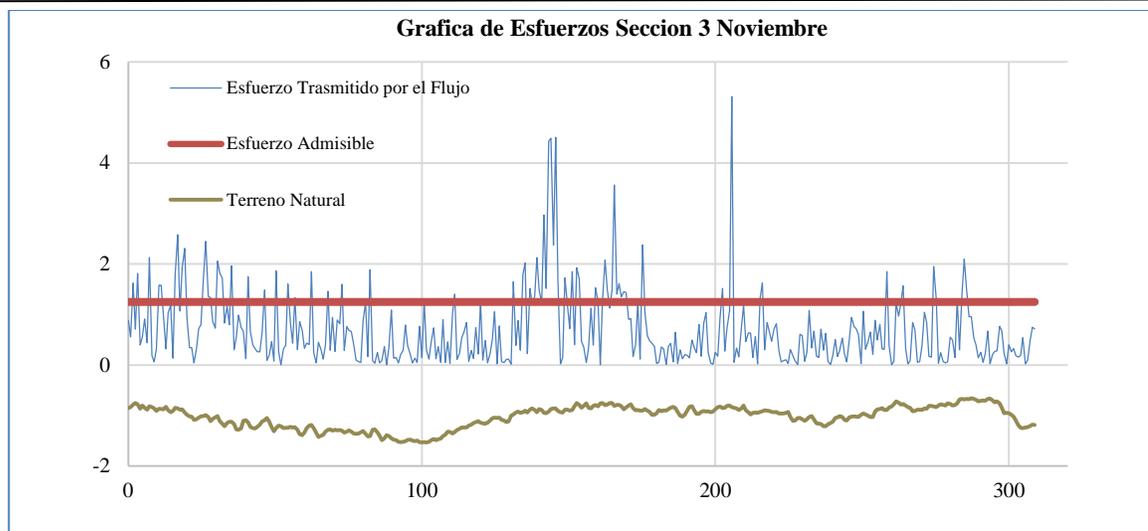


Figura 8.29. Esfuerzos Sección 3 (noviembre).

8.6. CONCLUSIONES

De las campañas de medición y del análisis realizado con anterioridad podemos observar que de forma global, la hidrodinámica de gastos medios está influenciada por la geometría local y los espigones aguas arriba. Los tránsitos preferentes y las fluctuaciones de gastos medios generan un desequilibrio en las velocidades en planta, magnitudes del vector velocidad y los flujos secundarios. Del análisis realizado en las secciones transversales podemos inferir que la vorticidad característica de los flujos secundarios no es homogénea en ninguna de las tres secciones analizadas y las intensidades de los sedimentos se concentran en las vorticidades con giro en sentido horario de las manecillas del reloj. De igual forma se encontró que en ambos casos sobre las secciones medidas, el fondo del cauce sufrió movilidad y zonas en donde la tasa de transporte fue alta se sedimentaron. Ahora bien se observó que si la vorticidad era en sentido contrario a las manecillas del reloj, esas zonas sufrieron erosión. De lo observado en planta y de las intensidades de los sedimentos, se encontró que el régimen de velocidades disminuye en las secciones cercanas a la estructura y la concentración de sedimentos se hace más homogénea sobre esa zona.

De la metodología implementada para estimar los esfuerzos de corte y de las ecuaciones utilizadas por Jonathan *et al*, 2011 y los datos tomados de las mediciones de CONAGUA, 2014 se pudieron predecir las mismas zonas que tendrían una tendencia a sedimentarse y erosionarse; observadas de las campañas y donde este proceso si se dio.

El parámetro fundamental utilizado fue el esfuerzo admisible del fondo y sobre la celda promediada, punto a punto contrastando contra el esfuerzo que transmitía el flujo-sedimento se encontraron las zonas que tenían una probabilidad alta de moverse o sedimentarse.

Finalmente, evaluadas y diagnosticadas las variables de estas mediciones se identificó que es necesaria la medición de gastos bajos y altos ya que en gastos medios la distribución de esfuerzos, magnitud velocidades y concentración de sedimentos generaron alteraciones significativas en las distribuciones trasversales de las corrientes secundarias y fondo de los cauces.

REFERENCIAS

- 1. Akarsulardadebi.** 2017. [En línea] Available at <http://akarsulardadebi.com/ríogrande> [Último acceso: mayo 2017].
- 2. CONAGUA** (2014). Estudio Para el Proyecto Hidrológico Para Proteger a la Población de Inundaciones y Aprovechar Mejor el Agua (PROTAB): Estudio de Caracterización Y Cuantificación de sedimentos (capítulo 12). Tabasco Mexico.
- 3. Frias, C. E. Abad, J. D. Mendoza, A. J. Paredes, and Ortals C.** (2015). Planform Evolution of Two Anabranching Structures in the Upper Peruvian Amazon River. *Water Resources Research* 51(4), pp. 2742-2759.
- 4. Gallego M. G., Morell M. I., Ocampo C. J., Tarrab I. and Vionnet C. A.** (2009). Medición del Fenómeno de Super-elevación en Coincidencia con Corrientes Secundarias Inducidas por Efectos Centrífugos, Cuarto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Salta, Argentina, 2009., Contrato de Investigación unL-CORIPA SA .505.310.
- 5. Gonzalo D., Alessandra C. and Pablo T.** (2016). Numerical study on river bar response to spatial variations of channel width. *Advances in Water Resources* Volume 93, Part A, July 2016, Pages 21–38.
- 6. Hunter.** 2017. [En línea] Available at <http://www.huntercaprez.com/> [Último acceso: 20 mayo 2017].
- 7. Jonathan A. C., James L. B., Kevin A. O, Daniel R. P., Marcelo H. G., Peter A.**

- and Ryan J. P.** (2011). Bed morphology, flow structure, and sediment transport at the outlet of Lake Huron and in the upper St. Clair River. *Journal of Great Lakes Research* 37 (2011) 480–493.
- 8. Kim D. and Kang B.** (2011). Validation of Assessment for Mean Flow Field Using Spatial Averaging of Instantaneous ADCP Velocity Measurements, *Journal of the Environmental Sciences*, pag (107-118), 2011; doi: 10.5322/jes.2011.20.1.107.
- 9. Kleinhans M.G., Wilbers A.W.E., and Brinke W.B.M.** (2007). Opposite hysteresis of sand and gravel transport upstream and downstream of a bifurcation during a flood in the River Rhine, the Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences — Geologie en Mijnbouw* | 86 – 3 | 273 - 285 | 2007.
- 10. Leif M. B.**(2006). Stability, morphology and surface grain size patterns of channel bifurcation in gravel–cobble bedded anabranching rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*.*Earth Surf. Process. Landforms* 31, 1211–1226 (2006).
- 11. Nayan S.** (2017). *River System Analysis and Management*. Springer Science+Business Media Singapore 2017. ISBN 978-981-10-1471-0. DOI 10.1007/978-981-10-1472-7.
- 12. Sassi M. G., Hoitink A. J. F., Vermeulen B., and Hidayat H.** (2013). Sediment discharge division at two tidally influenced river Bifurcations. *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 49, 2119–2134, doi:10.1002/wrcr.20216, 2013.
- 13. Schielen R.M.J. Havinga H. And Lemans M.**(2008). Dynamic control of the discharge distributions of the Rhine River in the Netherlands, in: *Proceedings of 4th IAHR-River Flow conference*, Cesme, Turkey, September.
- 14. Schuurman F.** (2015). Domino Effect of River Training in Large Sand-Bed Braiding Rivers . 6 *International Conference on Structural Engineering and Construction Management 2015*, Kandy, Sri Lanka, December 2015.
- 15. Tellez J. A.** (2015). *Hidrodinámica y Comportamiento del Sedimento en una Bifurcación de un Río*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería Civil – Hidráulica.
- 16. Wout M.V.D., Filip S., Wietse I.V.L., and Maarten G. K.** (2014). Bifurcation instability and chute cutoff development in meandering gravel-bed rivers. *Geomorphology*. 213 (2014) 277–291.

9. DISTRIBUCION DE GASTOS SÓLIDOS Y LIQUIDOS EN UNA CONFLUENCIA, ESTIMADOS EN PLANTA Y TRANSVERSALMENTE CON ADCP: CASO DE ESTUDIO RÍOS SIERRA Y PICHUCALCO

9.1. RESUMEN

Los mecanismos de distribución de gastos sólidos y líquidos en confluencias de ríos son procesos complejos y las variables que intervienen, aunque están bien identificadas aún requieren de más trabajo de campo para un entendimiento y amplio conocimiento en sus mecanismos de operación. El estado de Tabasco es una región de cauces aluviales y en ellas existen una bifurcación formada por los ríos Samaria-Carrizal, y dos confluencias formadas por los ríos Carrizal-Grijalva Bajo y Sierra- Grijalva Alto. Este estudio se centró en explicar los procesos que rigen la operación de la confluencia Sierra-Grijalva Alto. En ella también interactúa sobre el cauce Grijalva alto el puente Majahua II, al cual se le dedicó un interés notorio sobre los efectos en la dinámica de la confluencia, puesto que no se tiene reportado en la literatura este tipo de influencia antropogénica.

Las herramientas utilizadas fueron la recolección de datos topobatimétricos e hidrodinámica de la zona de estudio, mediante técnicas acústicas con un equipo ADCP y muestreo de sedimentos en la zona de estudio con lo que una vez analizada la información recopilada se identificó que actualmente para gastos bajos, la influencia del río de la Sierra es mayor en la distribución de gastos sólidos y líquidos, no así cuando la distribución de gastos en el río Grijalva alto es la mitad del de la Sierra. El efecto es mucho mayor y las líneas de flujo abarcan parte del río de la Sierra.

Aunado a esto se identificó que El efecto local de las pilas genera una obstrucción en la descarga del río Grijalva alto, por lo que con el paso de los años el ángulo de confluencia ha cambiado en su orientación ya que la margen derecha del río de la sierra se erosiona..

Palabras claves: confluencia, flujos secundarios, sedimentos y ADCP.

9.2. INTRODUCCIÓN

Los ríos de planicie son alterados frecuentemente por grandes inundaciones, ocasionadas tanto por la lluvia local y el desbordamiento de los ríos. Este proceso y las características fisiográficas, hidrológicas y sedimentológicas en las que se mueven, ocasionan que aquéllos formen distintas estructuras geométricas; entre éstas se encuentran las confluencias y las bifurcaciones. Las confluencias son sitios en los que dos o más corrientes naturales se combinan y dan lugar a una sola, mientras que las bifurcaciones son una división del cauce del río en dos o más canales pequeños. Ambas estructuras son un fenómeno común en los sistemas fluviales.

Tanto las confluencias como las bifurcaciones marcan cambios significativos en la geometría hidráulica del canal, el flujo y la carga de sedimentos; además, se destacan por tener un campo de velocidades tridimensional complejo y una geometría variable del cauce.

De manera particular las confluencias, según su geometría y los campos de velocidades (hidrodinámica), muestran diferentes comportamientos, tales como las zonas de estancamiento del flujo, el límite de los esfuerzos cortantes, la zona de recuperación del flujo y los flujos helicoidales (ver figura 9.1)

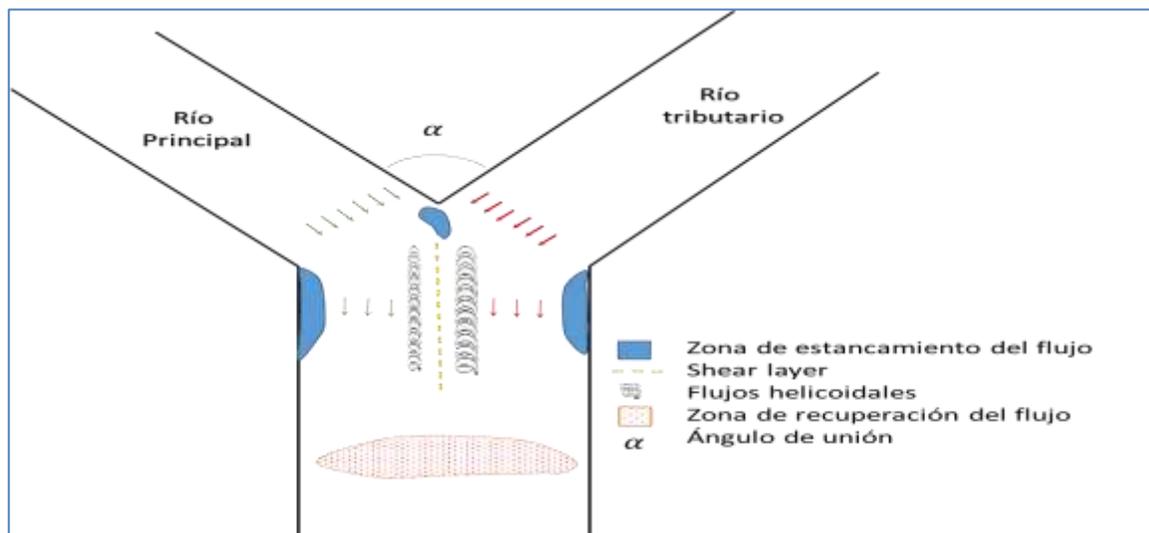


Figura 9.1. Zonas hidrodinámicas en confluencias (Priego et al.2017).

9.2.1. CARACTERÍSTICAS DE CONFLUENCIAS DE RÍOS

Las confluencias son elementos presentes en las redes fluviales que tienen un papel importante en su hidrodinámica. éstas proporcionan diversas condiciones de flujo que influyen en los procesos físicos y biológicos del sistema fluvial (Benda *et al.* 2004), ya que la convergencia de dos o más flujos producen complejos patrones de movimiento de fluidos.

A pesar de su gran importancia, la investigación sobre la dinámica de confluencias recibió poca atención hasta finales del siglo pasado (Rice *et al.* 2008). A partir de los trabajos de Mosley (1976) y Best (1986, 1987, 1988), la investigación se ha ampliado y ha abarcado desde experimentos de laboratorio (Best 1988, Leite *et al.* 2012) hasta estudios de campo (Rhoads y Kenworthy 1998, Rhoads y Sukhodolov 2001, Sukhodolov y Rhoads 2008, Biron *et al.* 1993, 2002) y modelaciones numéricas (Bradbrook *et al.* 2000, Constantinescu *et al.* 2011, 2012). Si bien estos estudios y otros constituyen la base de nuestra comprensión de la dinámica de confluencias, la gran mayoría de las investigaciones consideran confluencias de ríos pequeños (ancho de canal de menos de 10 m).

Recientemente se han hecho estudios en confluencias de grandes ríos (ancho de canal mayor a 100 m), como los ríos Snake y Clearwater, que han sido objeto de investigaciones detalladas (Lane *et al.* 2008, Szupiany *et al.* 2009).

Estos estudios sugieren diferencias importantes entre los ríos pequeños y los grandes. Por ello para tener una mejor comprensión de la dinámica de confluencias, se requieren significativamente más investigaciones sobre ríos grandes (Parsons *et al.* 2008).

La dinámica de la confluencia está influida por la geometría de los ríos que se unen, las diferencias en el flujo y la carga de sedimentos.

Una característica hidrodinámica relevante de las confluencias fluviales es la formación de una interfase de mezcla entre los flujos convergentes y el desarrollo de estructuras coherentes de escalas mayores a la profundidad del flujo dentro de esta interfaz (Constantinescu *et al.* 2011). Estos procesos hidrodinámicos que se desarrollan en las interfaces de mezcla están gobernados por diferentes parámetros geométricos y del flujo, siendo los principales parámetros las relaciones de cantidad de movimiento y de velocidad

entre los dos flujos convergentes, la magnitud de los ángulos entre los flujos de entrada y el canal aguas abajo, la densidad de las masas de fluidos de aproximación y los cambios en la batimetría en la entrada a la confluencia graduales (fondo concordantes) o bruscos (fondo no concordante).

Debido a la gran cantidad de parámetros interactuando de manera conjunta, resulta complicado realizar de manera adecuada una correcta caracterización de la hidrodinámica en estos ambientes.

Los principales parámetros que gobiernan los procesos hidrodinámicos en las interfases de mezcla en confluencias fluviales y que definen la posición y la alineación de esa interfase son las relaciones de caudales (Hsu *et al.* 1998), cantidad de movimiento y de velocidad entre los dos flujos convergentes (Rhoads y Sukhodolov, 2008), la magnitud de los ángulos entre los flujos de entrada y el canal aguas abajo (Rhoads y Sukhodolov, 2001), y los cambios en la morfología en la entrada a la confluencia si son graduales (fondo concordantes) o bruscos (fondo no concordante) (Biron *et al.* 1996).

La estructura del flujo en las interfases de mezcla en confluencias naturales es aún más complicada por los efectos topográficos sobre el flujo inducidos por las formas de fondo en el lecho del canal, por la rugosidades de fondo de gran escala y por las irregularidades a gran escala en las márgenes de los cursos fluviales. Además, las diferencias de densidades de los flujos de aproximación (definidos por la temperatura, concentraciones de sedimentos y contaminantes, etc.) afectan en gran medida los procesos en la interfase de mezcla.

9.3. LOCALIZACIÓN

La zona de estudio se encuentra en el municipio del centro, estado de Tabasco específicamente en el puente de la Majahua que se ubica en la Carretera Villahermosa-Teapa Cuerpo “B”, K.M. 1.5. Geográficamente está ubicado en las coordenadas 509146.33 m E y 1985611.90 m N, ver figura 9.2.

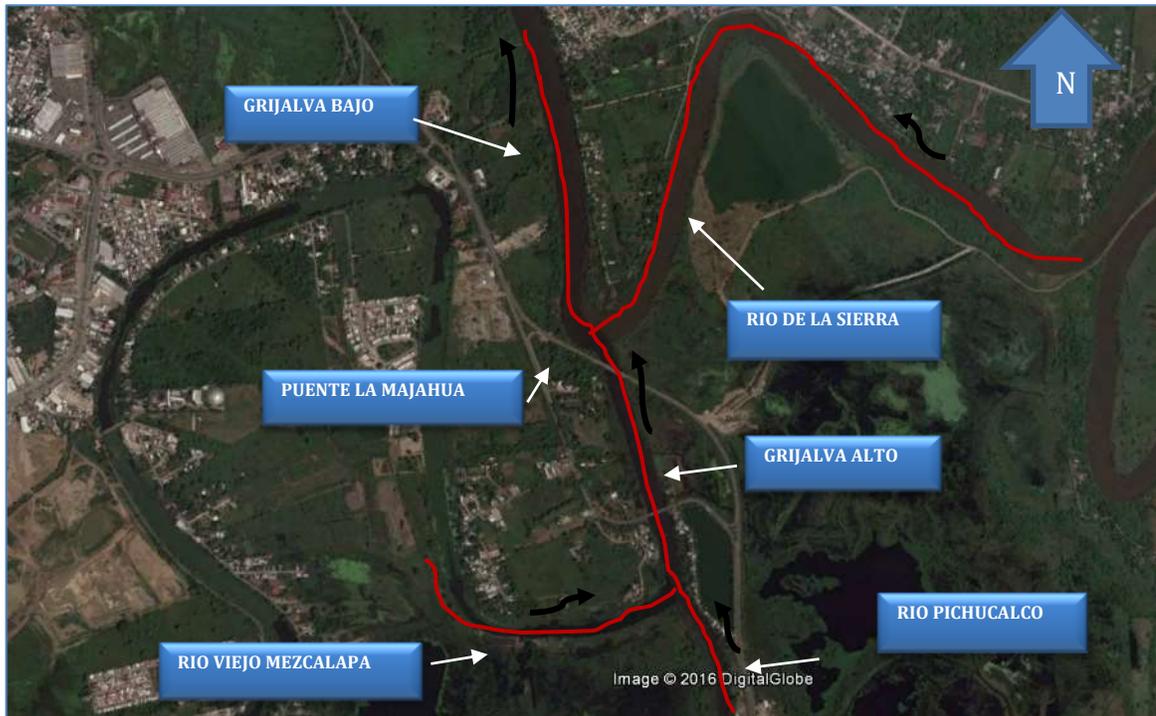


Figura 9.2. Localización de la zona de estudio.

9.4. METODOLOGÍA

Desde el punto de vista hidrodinámico, la complejidad topográfica de los cauces naturales como de la llanura de inundación, constituyen el factor más importante para definir la operación de las corrientes secundarias y en buena medida la representatividad de modelos numéricos. Para la recopilación de la información topografía se utilizó una estación LEICA. Para batimetría y la obtención del campo de velocidades tridimensionales presentadas en la zona de estudio, se utilizó un equipo acústico Doppler. Se describen las metodologías empleadas en el levantamiento y procesamiento de la información obtenida. Los resultados obtenidos de la hidrodinámica, son presentados y detallados para una mayor comprensión en Figuras

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

El uso de técnicas Doppler, manejo de estación total, GPS y herramientas Cad-Gis permitieron la obtención de la topobatimetría de márgenes, cauces y estructuras.

En la actualidad hay una gran cantidad de instrumentos acústicos y ópticos que han aumentado la capacidad para adquirir datos en los ríos. Entre ellos, los perfiladores acústicos de corriente Doppler miden instantáneamente las componentes verticales de velocidad tridimensional junto con la geometría de sección transversal de un río a partir de varios transectos (Kim et al., 2014) (Figura 9.3).



Figura 9.3. Perfilador acústico Doppler

En consecuencia, los ADCP están emergiendo rápidamente como herramientas de elección para monitorear, explorar y comprender las características de los ríos a través de mediciones in situ (Rennie, 2002, Kostaschuk et al., 2004, Dinehart y Burau, 2005; Nystrom et al., 2007, Szupiany et al., 2007, Sime et al., 2007, Kim y Muste, 2012).

9.4.1. LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO MEDIANTE PERFILADORES ACÚSTICOS DOPPLER

En general, el estudio batimétrico realizado corresponde a la representación gráfica de la superficie del tramo de proyecto con sus formas y detalles; tanto naturales como

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

artificiales. Para lograr esta configuración se utiliza un sistema coordinado tridimensional, siendo “X” y “Y” componentes de la planimetría, y la componente “Z” de la altimetría. Para este caso son referidos a los puntos de control de los puntos GPS, (Sistema de Posicionamiento Global), ligados al sistema del INEGI. El proceso de seccionamiento consiste en detallar el terreno natural hasta la lámina de agua. Una vez obtenidos todos los registros de campo, son importados con ayuda del software CivilCad el cual grafica los puntos del terreno.

Para llevar a cabo la batimetría se utilizó una lancha de motor fuera de borda para establecer secciones distribuidas a lo largo del cauce a una distancia de aproximadamente 20 m; entre cada sección, aproximadamente 3 km de la confluencia con la ayuda del perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP) (figura 9.4.).



Figura 9.4. Recorrido del levantamiento batimétrico.

Este equipo emite 4 haces acústicos cada uno por cada metro medido para obtener un promedio del fondo del cauce. El principio fundamental de la obtención de los datos es por el efecto Doppler el cual emite un haz de sonido a través de la columna de agua que al entrar en contacto con el fondo, retorna una porción del haz emitido el cual es recibido por el ADCP y es almacenado los datos en un computador (figura 9.5)

Posteriormente los datos recolectados son depurados y procesados para la realización de la topografía del fondo.

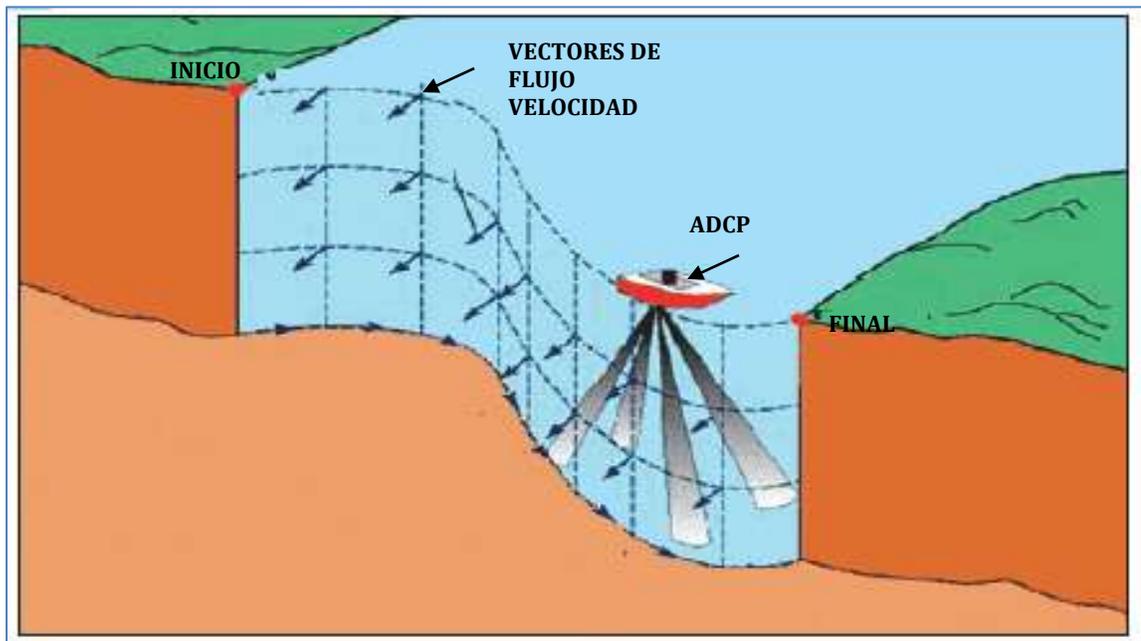


Figura 9.5. Funcionamiento Perfilador acústico Doppler (USGS, 2013)

9.4.2. HIDRODINÁMICA MEDIANTE PERFILADORES ACÚSTICOS DOPPLER

9.4.2.1. ESTUDIOS PRELIMINARES. LEVANTAMIENTO DEL CAMPO DE VELOCIDADES

Para el caso de estudio de la hidrodinámica, se realizaron dos campañas de medición. La primera se realizó el día 12 de enero del presente año, donde se midió en 51 secciones transversales a la zona de estudio (figura 9.6). El gasto obtenido para esta condición fue de $83 \text{ m}^3/\text{s}$ para el río Grijalva Alto, $291 \text{ m}^3/\text{s}$ para el río de La Sierra y un gasto de $374 \text{ m}^3/\text{s}$ para el río Grijalva Bajo.

La mayoría de las mediciones fue mediante lo expuesto por Barua y Rahman (1998) y Schemper y Admiraal (2002).

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”



Figura 9.6. Secciones levantadas el día 12 de enero de 2017.

En la figura 9.7. se muestra el equipo Doppler River Ray de 600 kHz, montado en una embarcación de la campaña de medición realizada. Con esta información se obtuvo las velocidades en planta, velocidades secundarias y las intensidades de los sedimentos en suspensión.



Figura 9.7. Uso del Perfilador acústico Doppler River ray.

La segunda campaña se realizó el día 15 de enero del 2017, con un total de 29 secciones transversales en la zona de estudio (figura 9.8). Los gastos presentados en esta campaña

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

son: para el río Grijalva Alto un gasto de $94 \text{ m}^3/\text{s}$, para el río de La Sierra un gasto de $207 \text{ m}^3/\text{s}$ y para el río Grijalva Bajo el gasto que presente fue de $301 \text{ m}^3/\text{s}$.

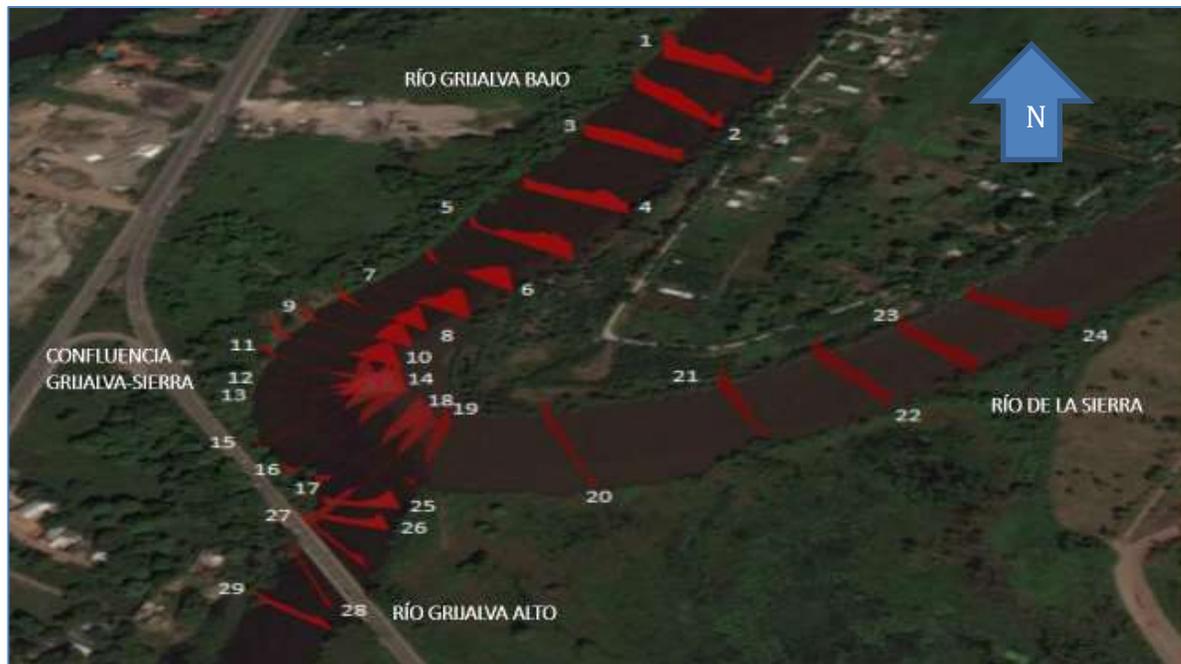


Figura 9.8. Secciones levantadas el día 15 de enero de 2017.

Para ambas condiciones de gastos, se empleó un perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP) en la obtención de la hidrodinámica. El principio físico del funcionamiento de los equipos empleados es el efecto Doppler, el cual consiste en la emisión de un haz acústico que viaja a través de la columna de agua que al entrar en contacto con las partículas en suspensión (sedimento) este retorna al transductor del ADCP y se registra en una computadora para su posterior análisis. Cada pulso emitido por los transductores, es referenciado con ayuda de un GPS integrado al ADCP y posteriormente es vinculado y ajustado con un banco de nivel existente en la zona.

Antes de realizar una medición se debe de seguir una serie de pasos y configuraciones para la obtención de datos confiables y precisos.

Como primer paso, es necesario realizar un recorrido preliminar del sitio, con el fin de determinar el sentido del flujo presente en la zona, una vez identificado se dispone a colocar el equipo ADCP en contacto con el agua para realizar una serie de calibración y de esa forma disminuir en lo posible los errores que se puedan presentar en el momento de

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

la medición. Es necesario que el equipo en todo momento se encuentre en contacto con el agua para registrar los datos batimétricos y de velocidades (figura 9.9).



Figura 9.9. Recolección de la información en una computadora portátil y recorrido con el ADCP.

Una vez obtenido los datos de campo, se procede a realizar el trabajo de gabinete, el cual consiste en extraer la información del equipo ADCP, posteriormente se procesa la información donde se crean libros de Excel que contienen toda la información de campo.

Dentro de estos archivos se obtienen los datos de GPS, las componentes de las velocidades en “X” y “Y”, la magnitud de la velocidad y las intensidades de la concentración de sedimento en suspensión.

Una vez obtenidos estos datos se procede al vaciado de la información en los softwares de graficador permitiendo la visualización de los campos de velocidades en secciones transversales, la intensidad de sedimentos en suspensión, así como la visualización en planta del campo de velocidades y de la intensidad de concentración de sedimento en suspensión.

9.4.3. MUESTREO DE SEDIMENTOS EN CAMPO

Las recolecciones de los muestreos se realizaron con una draga de muestreo de material de fondo (figura 9.10).



Figura 9.10. Muestreo con draga de material de fondo río Carrizal.

Una adecuada caracterización de los materiales del lecho de un cauce permite obtener y estimar información muy valiosa para los diferentes estudios que se puedan desarrollar (hidráulicos, sedimentológicos, morfológicos y ambientales).

Factores como la rugosidad del cauce, el transporte de sedimentos y los procesos de erosión y sedimentación dependen de las características y distribución de los tamaños de los materiales del fondo (Ramírez *et al.*2004).

Por ello se realizaron muestreos en la zona de la confluencia del río Grijalva con el río de la Sierra, donde obtuvieron un total de 10 muestras representativas del suelo presente en dicho lugar. En la figura 9.11. se ubican los puntos donde se realizaron los sondeos.

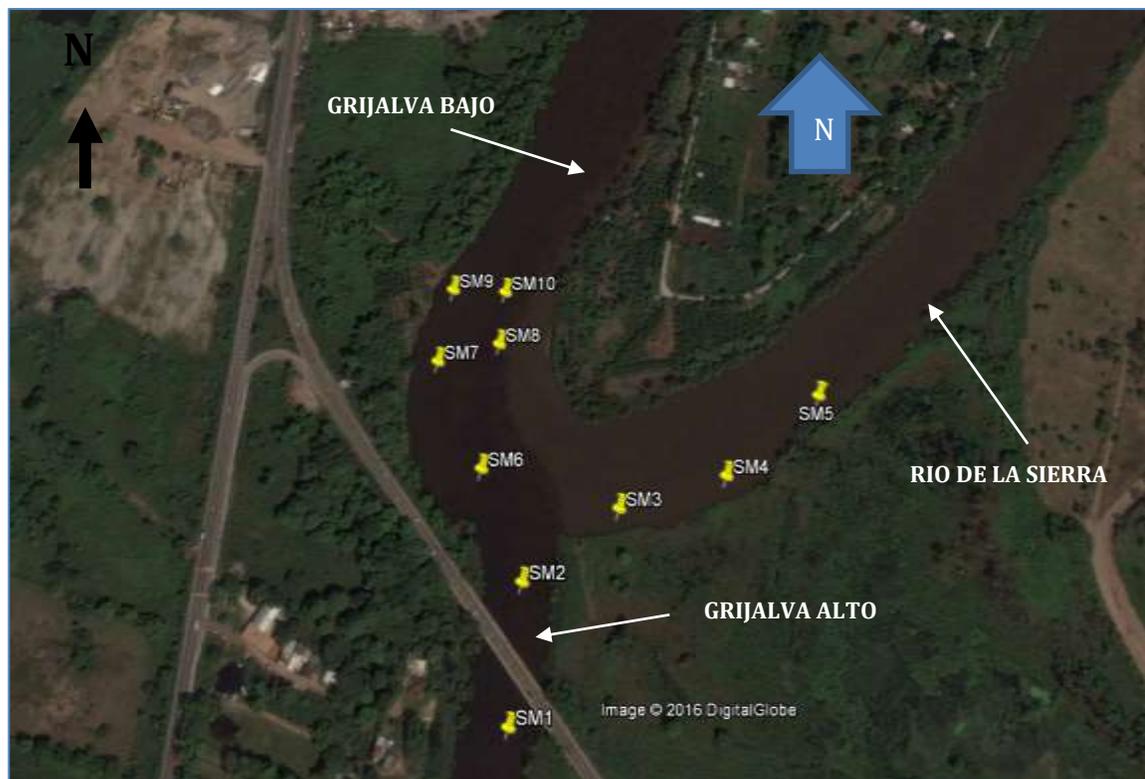


Figura 9.11. Puntos de los sondeos realizados.

Las muestras fueron llevadas a laboratorio para conocer las principales características del material que conforma el cauce. Esta información obtenida fue necesaria para la realización del análisis de velocidades permisibles y de socavación general realizado a la confluencia, con el propósito de conocer el comportamiento morfo dinámico de esta.

9.5. RESULTADOS

9.5.1. VELOCIDAD EN PLANTA DE LA ZONA DE LA CONFLUENCIA GRIJALVA-SIERRA DEL 12 DE ENERO DE 2017

Una vez obtenidos los datos de campo ya procesados, el siguiente paso fue obtener el campo de velocidades en dos dimensiones. Estas velocidades son promediadas sobre la columna de agua de la sección transversal del río y al graficarlas permitió visualizar la trayectoria de las líneas del flujo. Para el caso de los vectores de velocidad en planta obtenidos el día 12 de enero de 2017, las velocidades oscilaban entre 0.20 m/s y 1.60 m/s en la zona de estudio, el río Grijalva alto presento velocidad promedio de 0.60 m/s, el río de La Sierra con velocidad promedio de 1.00 m/s y en la zona de la confluencia Grijalva-Sierra con variaciones de entre 0.60 m/s a 1.00 m/s y en el río Grijalva Bajo varía entre 0.80 m/s y 1.60 m/s (figura 9.12).

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

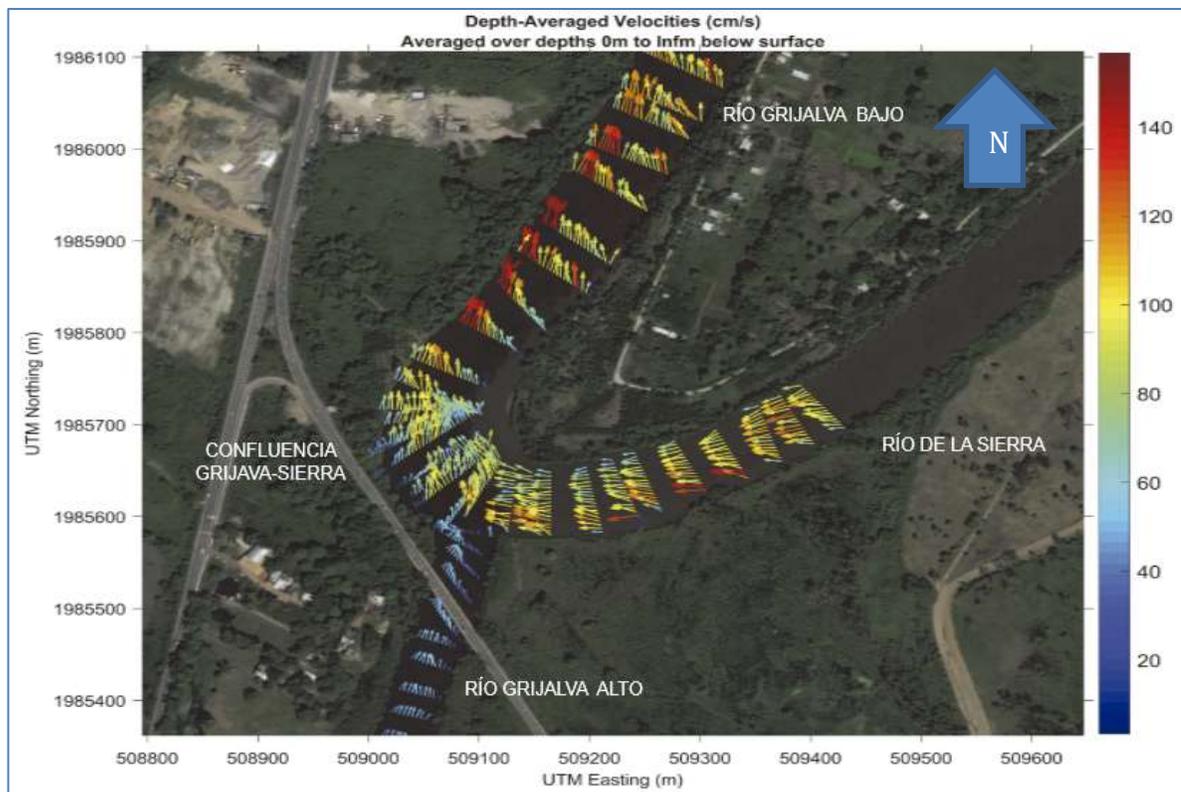


Figura 9.12. Velocidad en planta del 12 de enero de 2017.

Con los vectores de velocidad en planta obtenidos se realizó una línea de tendencia que permite conocer la influencia de ambos ríos sobre la confluencia.

Se observó que las velocidades altas que presentaba el río de La Sierra generaron una desviación en las líneas de corrientes del río Grijalva alto, manteniendo la tendencia de estas hacia la margen izquierda de la confluencia Grijalva–Sierra y hasta el punto donde se unen ambas corrientes (zona de recuperación del flujo), para formar lo que se conoce como el río Grijalva bajo (figura 9.13).

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

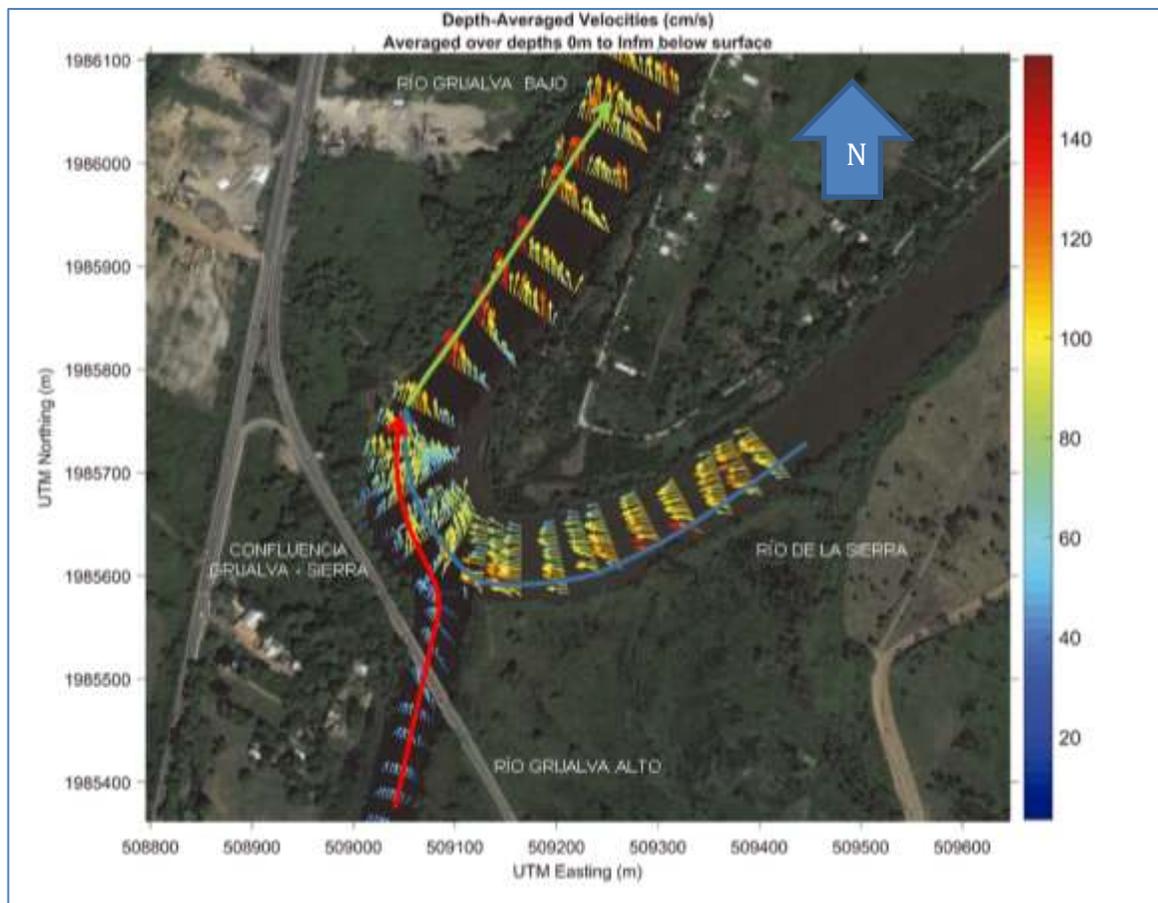


Figura 9.13. Línea de influencia de las velocidades encontradas en la zona de la confluencia Grijalva-Sierra del día 12 de enero de 2017.

Con los datos anteriores se creó una malla de las magnitudes de los vectores de velocidad promedio existentes en la zona (figura 9.14). Esta malla es de gran importancia para calibrar los modelos numéricos de la zona de estudio.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

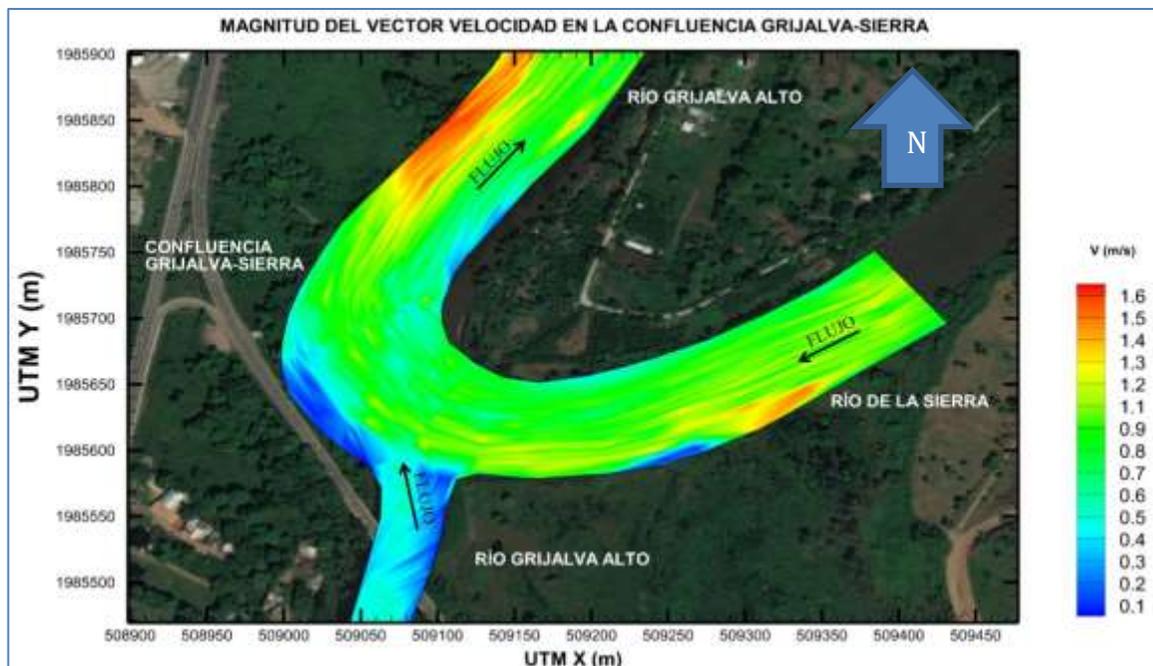


Figura 9.14. Magnitud de la velocidad en planta obtenida del día 12 de enero de 2017.

9.5.2. CONCENTRACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE SEDIMENTOS DEL DÍA 12 DE ENERO DE 2017

Las concentraciones de sedimentos en suspensión (intensidades) que interactuaban en ese instante en el río Grijalva Alto presentaba un valor promedio de 75 dB (entre mayor decibeles, mayor concentración de sedimentos en suspensión) está concentración de sedimentos muestran una tendencia hacia el margen izquierda de la confluencia, esto debido a la menor resistencia que presenta la partícula al desplazamiento por efecto de la velocidad encontrada descrita en el apartado anterior por lo que origina que en esta zona sea susceptible a la erosión.

Para el caso del río de La Sierra el aporte de sedimento en suspensión es del orden de 80 dB en la margen izquierda y el centro del cauce respecto al sentido del flujo, mientras que en la margen derecha del río de La Sierra y de la confluencia se encontró un material más denso que al tener una mayor resistencia al flujo este tiende a depositarse a través de la margen derecha y aumenta la zona de depósito sobre el interior de la curva de la confluencia (figura 9.15).

Esto ocurre por la concentración del transporte de sedimentos en suspensión, que guarda una relación con la velocidad encontrada y el gasto líquido, además, donde se encuentran mayores velocidades, el sedimento en suspensión no tiene oportunidad de depositarse en

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

el fondo del cauce, mientras que si se presentan velocidades menores existe las mejores condiciones para que el material en suspensión se deposite.

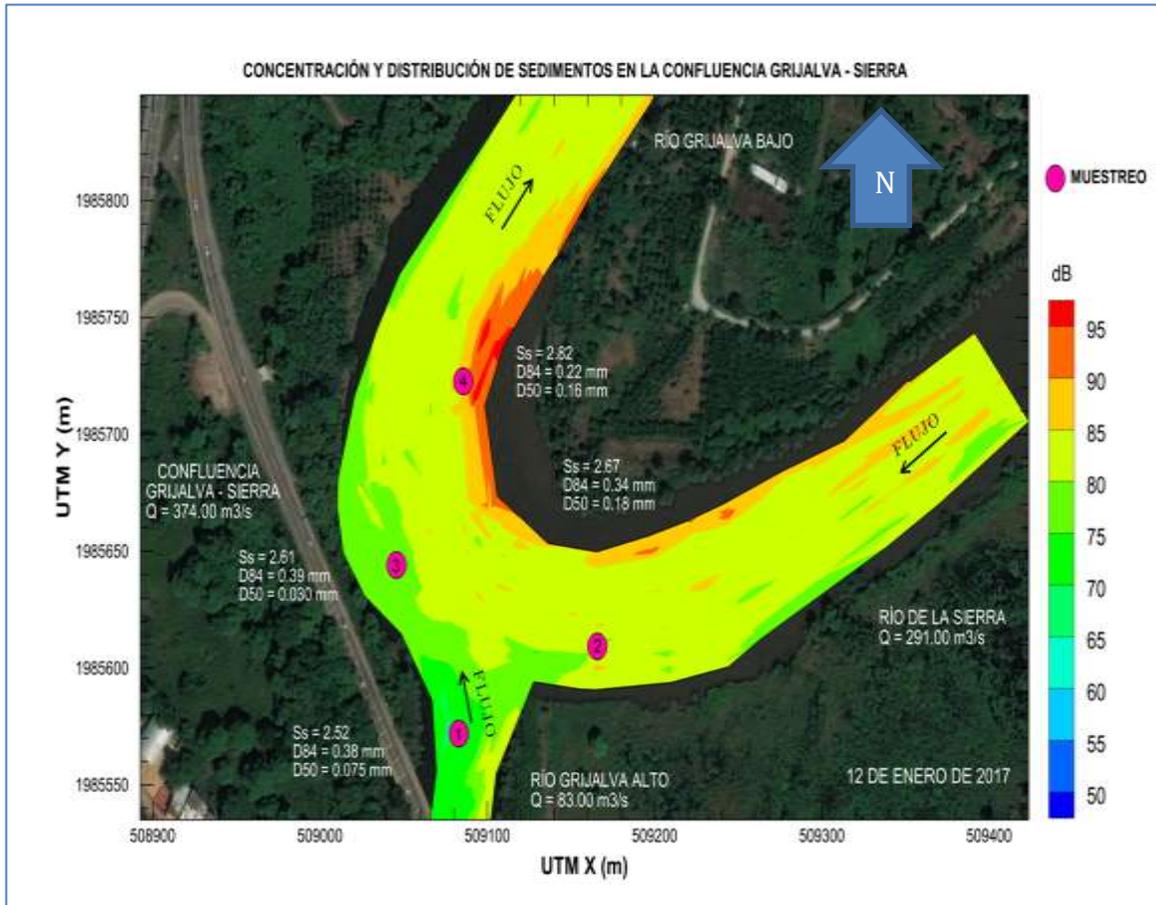


Figura 9.15. Distribución del sedimento en suspensión del día 12 de enero de 2017.

9.5.3. VELOCIDAD EN PLANTA DE LA ZONA DE LA CONFLUENCIA GRIJALVA-SIERRA DEL 15 DE ENERO DE 2017

El análisis de los vectores de velocidad en planta del día 15 de enero de 2017 oscilaban entre 0.40 m/s y 1.30 m/s en la zona de estudio,

Se detallan los vectores de velocidad para cada río: en el Grijalva Alto la velocidad promedio era 0.60 m/s, el río de La Sierra la velocidad promedio es de 1.00 m/s, en la zona de la confluencia Grijalva-Sierra el promedio es de 0.60 m/s, y el río Grijalva Bajo entre 0.60 m/s y 1.20 m/s (figura 9.16).

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

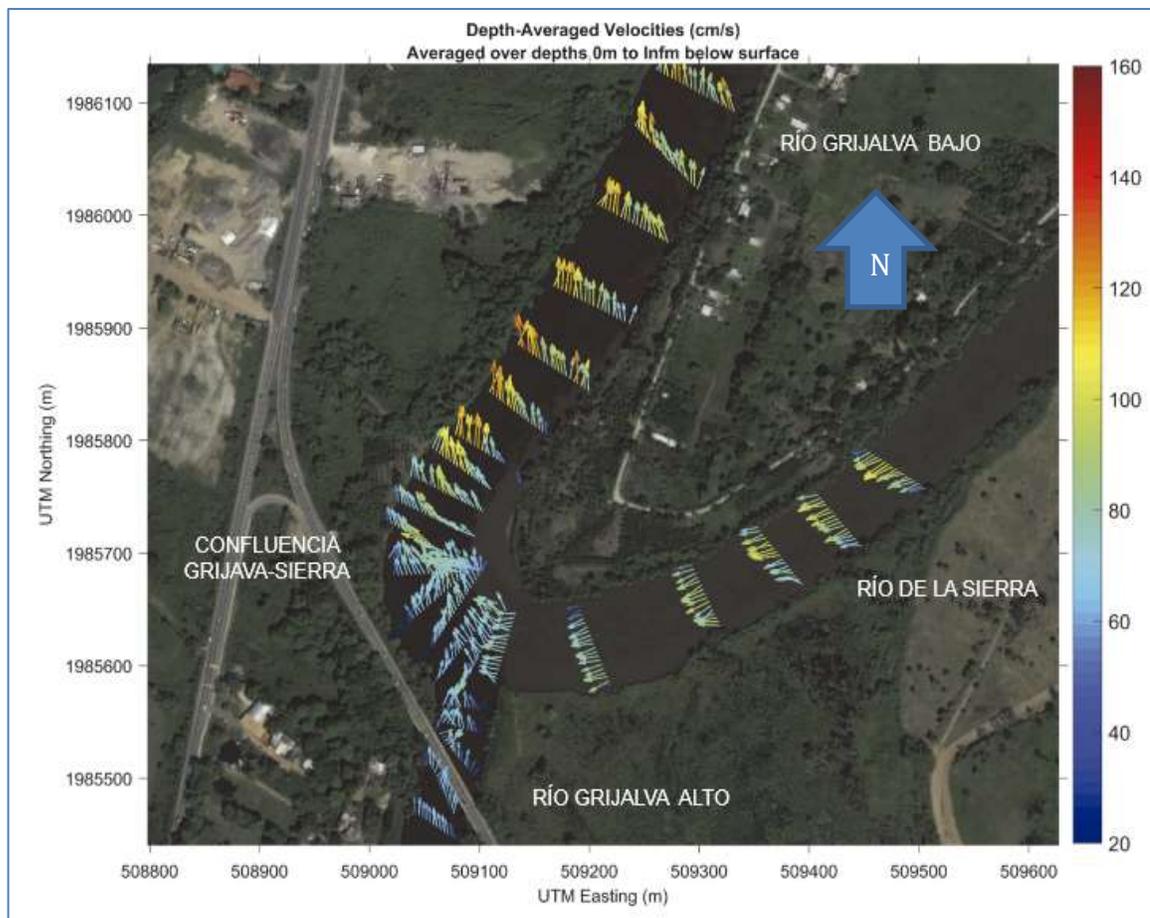


Figura 9.16. Velocidad en planta del 15 de enero de 2017.

Se realizó la línea de tendencia de los vectores de velocidades obtenidas el día 15 de enero, el cual muestra que el campo de velocidades se concentra en la curva externa de la confluencia, esto a pesar que ambos ríos presentaban un transporte de gasto líquido menor, además de que la línea de tendencia hacia aguas abajo se mantiene sin variación respecto a la obtenida del día 12 de enero y se prolonga aguas abajo en la margen izquierda del río Grijalva Bajo (figura 9.17).

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

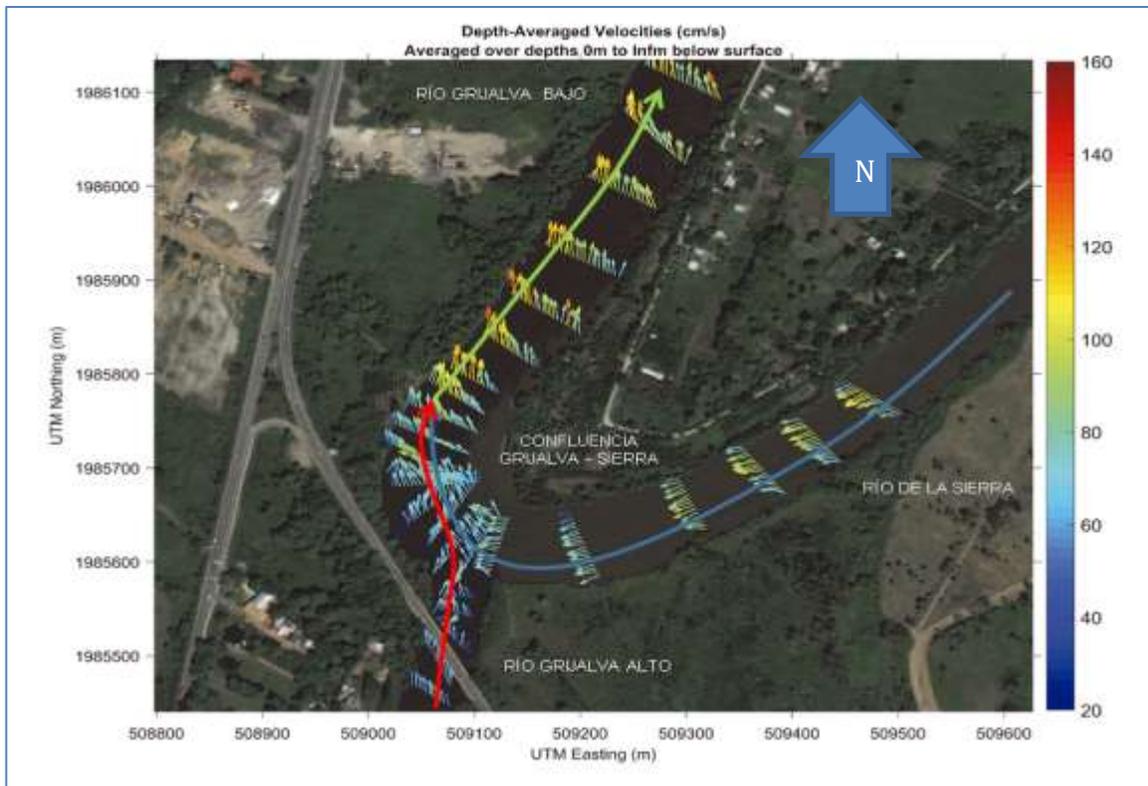


Figura 9.17. Línea de influencia de las velocidades encontradas en la zona de la confluencia Grijalva-Sierra el día 15 de enero de 2017.

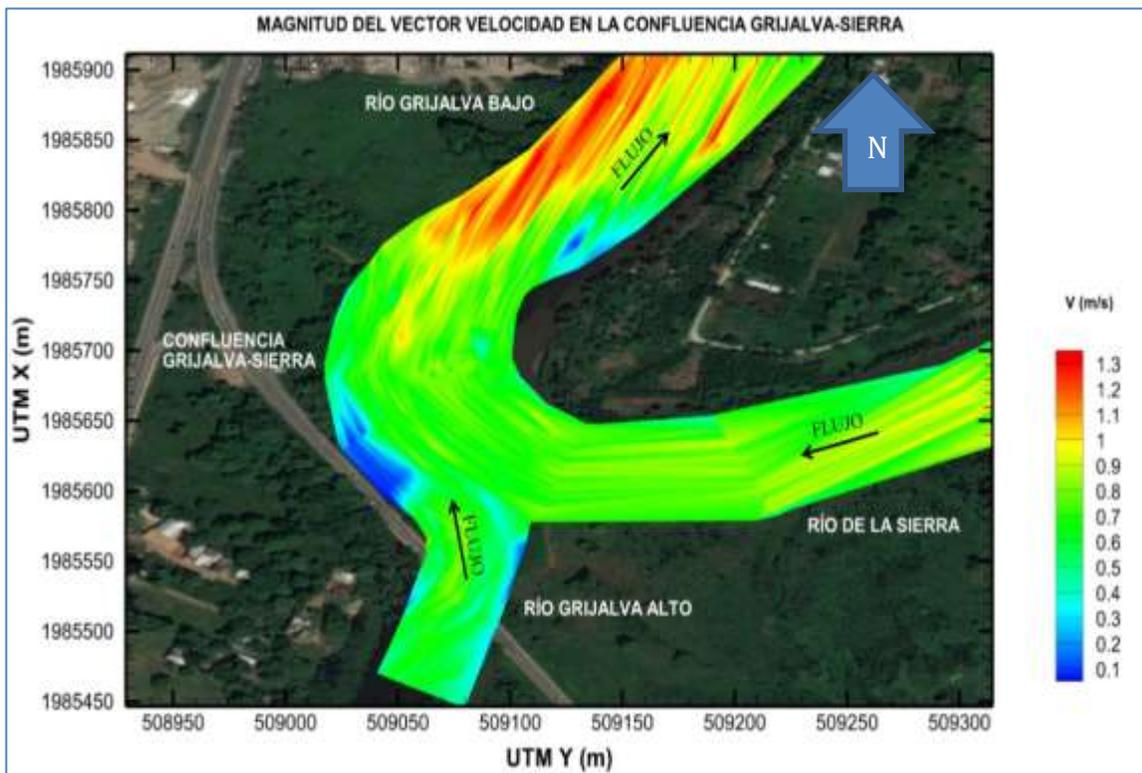


Figura 9.18 Magnitud de la velocidad en planta obtenida del día 15 de enero de 2017.

9.5.4. CONCENTRACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE SEDIMENTOS DEL DÍA 15 DE ENERO DE 2017

Las concentraciones de sedimentos en suspensión (intensidades) que interactuaban en el río Grijalva Alto presentaba un valor promedio de 75 dB, esta concentración de sedimentos muestra una tendencia a la margen izquierda de la confluencia, debido a la menor resistencia que presenta la partícula al desplazamiento por efecto de la velocidad encontrada descrita en el apartado anterior, que en esta zona sea susceptible a la erosión. Para el caso del río de La Sierra el aporte de sedimento en suspensión es del orden de 80 dB en la margen izquierda y el centro del cauce respecto al sentido del flujo, mientras que en la margen derecha se encontraron en el orden de 70 dB y en confluencia se encontró un material más denso que al tener una mayor resistencia al flujo este tiende a depositarse a través de la margen derecha y aumenta la zona de depósito sobre el interior de la curva de la confluencia (figura 9.19).

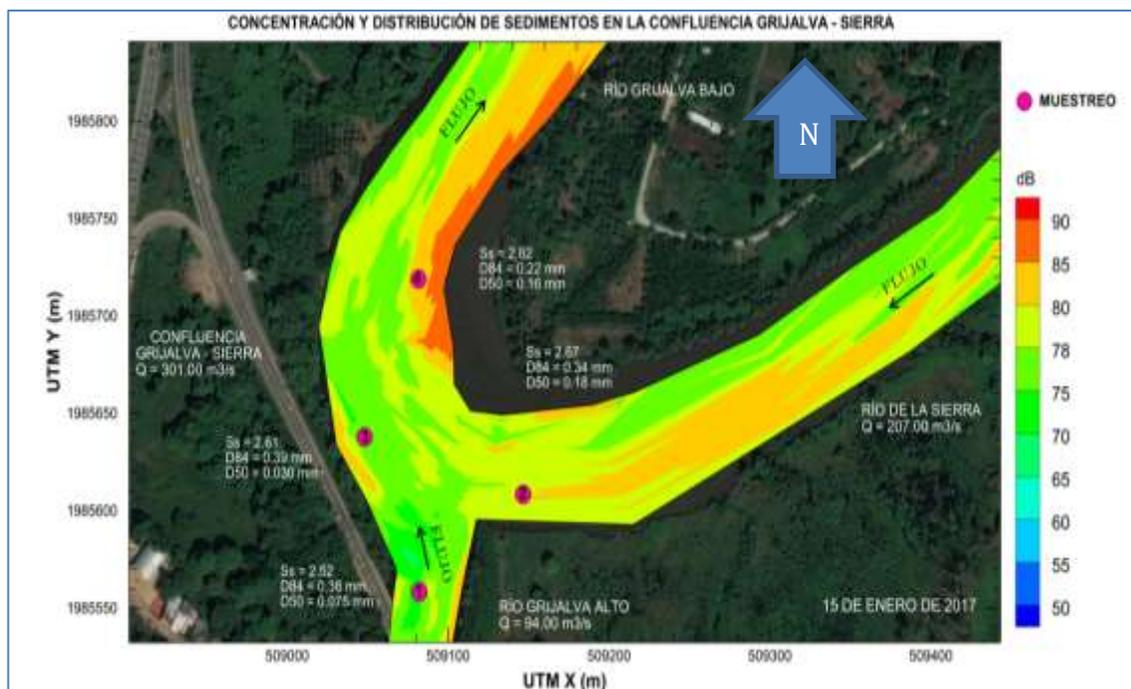


Figura 9.19. Distribución del sedimento en suspensión del día 15 de enero de 2017.

9.5.5. COMPARACIÓN DE SECCIONES TRASVERSALES DE VELOCIDADES Y DE INTENSIDADES

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

Se compararon cinco secciones transversales divididas en cuatro zonas: Río Grijalva Bajo, Confluencia Grijalva-Sierra, Río de La Sierra y Grijalva Alto en puente Majahua II (figura 9.20).

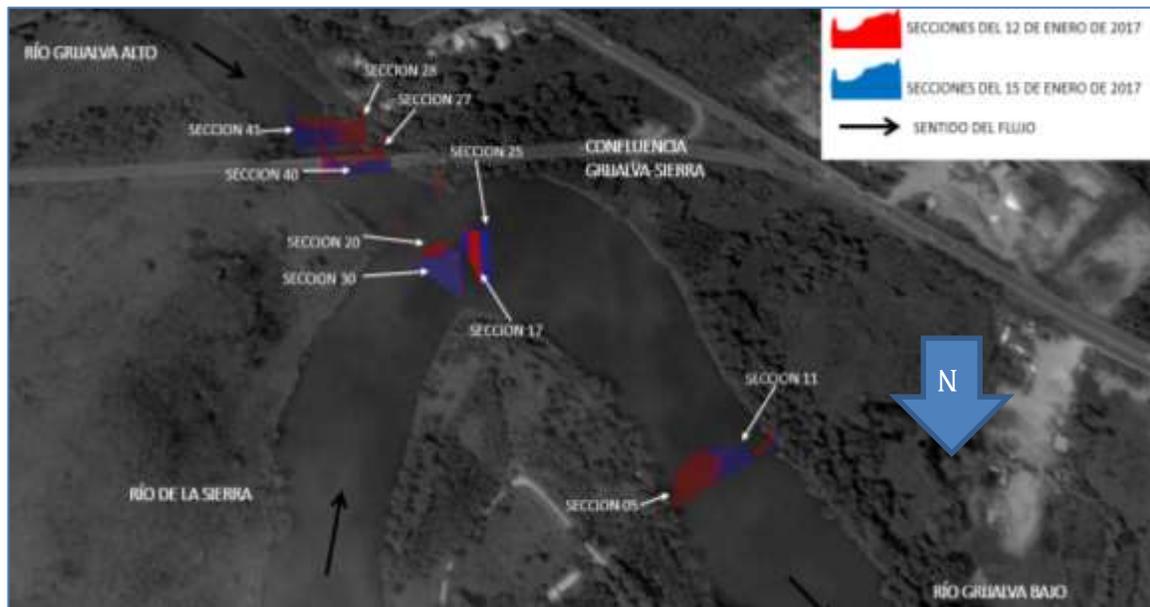


Figura 9.20. Secciones comparadas.

Río Grijalva Bajo

De las secciones comparadas del río Grijalva Bajo, se realizó el análisis del comportamiento del campo vectorial, las magnitudes del vector velocidad y las intensidades de los sedimentos en suspensión que se presentaron en la zona. En la figura 9.21, se muestran las secciones transversales obtenidas del día 12 de enero, observando que las magnitudes de velocidad que predominan en la margen izquierda son del orden de 1.20 m/s a 1.5 m/s. Los vectores graficados representan las velocidades secundarias (o velocidades transversales) observándose recirculaciones más definidas, entre las longitudes de 10 m a 30 m en la margen izquierda. La figura 9.21b, del 15 de enero, muestran magnitudes del 0.90 m/s a 1.20 m/s. Se observaron pequeñas recirculaciones en la zona central de la sección (entre las longitudes de 30 m a 50 m).

Por otro lado, en la figura 9.21c, del 12 de enero, se observó a 20 m, de la margen izquierda y sobre la margen derecha, la concentración de sedimentos en suspensión más alta (78 a 90 dB) y sobre el canal más profundo una concentración baja (70 a 78 dB)

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

Las intensidades medidas del 15 de enero (figura 9.21d) mostraron una disminución en esas zonas, sin embargo la distribución del gasto líquido y sólido siguen los mismos tránsitos preferentes.

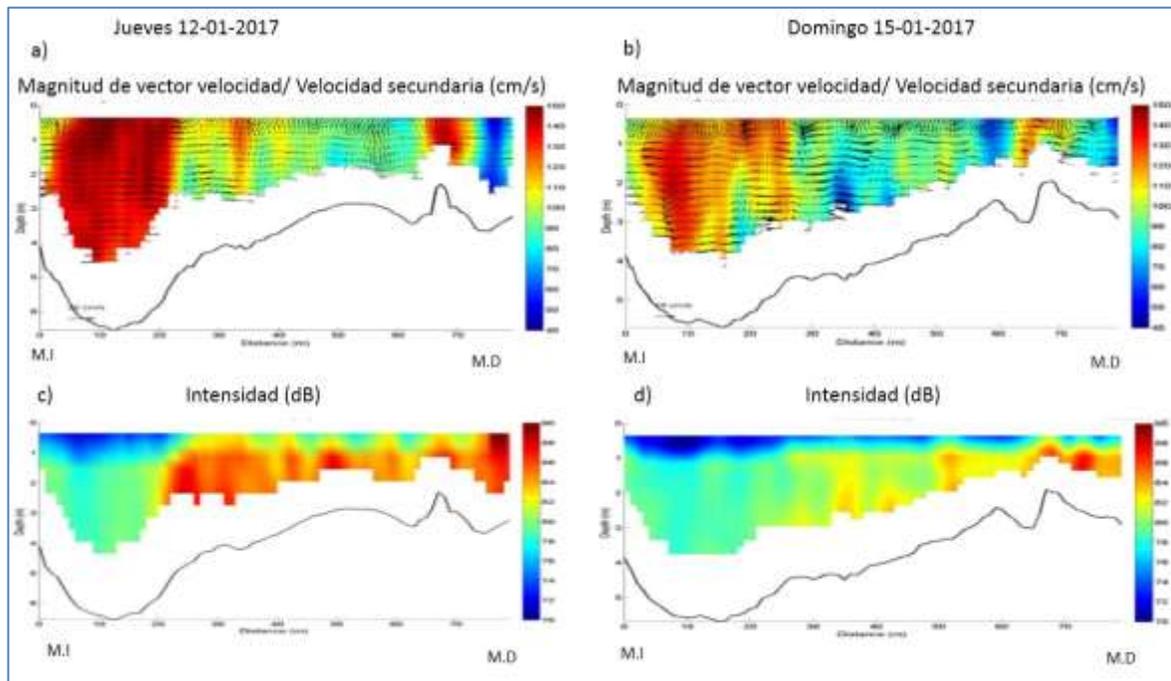


Figura 9.21. Secciones transversales comparadas del río Grijalva Bajo.

Confluencia Grijalva-Sierra

En la zona de la confluencia Grijalva-Sierra se compararon dos secciones transversales. Del día 12 de enero, las velocidades en la figura 9.22a, oscilaron entre 0.6 m/s a 1.1 m/s, ubicadas en el centro de la sección. Para las velocidades secundarias se observaron dos zonas de recirculación y la central en la sección transversal (entre 30 m a 40 m de la margen izquierda), se identificó como la zona de cizalladura, en donde las recirculaciones tienen vorticidades en diferentes direcciones. Para el día 15 de enero las magnitudes de velocidad altas estuvieron del orden de 0.8 m/s a 0.9 m/s, orientadas sobre la margen derecha (figura 9.22b). Las magnitudes más bajas oscilaron entre 0.5 m/s a 0.7 m/s, y estuvieron distribuidas en toda la sección transversal. Se observó que la recirculación del río Grijalva se adiciona al momento de confluir con el río de La Sierra y esto debido al efecto de las pilas del puente La Majahua II a los flujos secundarios, detalladas en la comparación de las secciones del río Grijalva alto y la Sierra.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

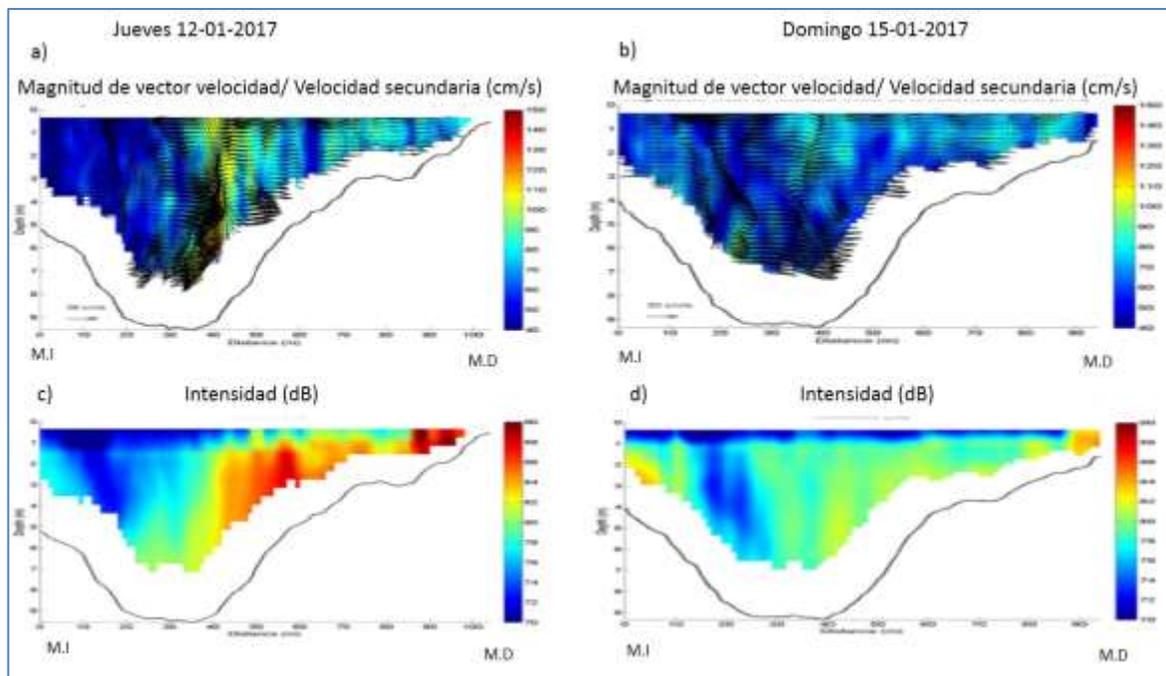


Figura 9.22. Secciones transversales comparadas de la confluencia Grijalva-Sierra.

Las intensidades del gasto sólido se distribuyen sobre la zona más profunda y la del líquido sobre la más profunda demostrando lo que teóricamente se ha expuesto en zonas curvas, ahora demostradas en una confluencia con este estudio (ver figura 9.22c y 9.2d).

Río de la Sierra

Para el río La Sierra el día 12 de enero (figura 9.23a) las velocidades oscilaron entre 0.60 m/s y 1.10 m/s, se observó que las velocidades secundarias se mantuvieron en 15 m sobre la margen izquierda, difuminando hacia la margen derecha del río. Las intensidades de sedimentos en suspensión en la figura 9.23c, muestran una distribución más representativa sobre todo el canal, mientras que en la longitud de 10 m de la margen izquierda se muestra una zona de intensidad baja. De la figura 9.23b, del día 15 de enero. Las velocidades más representativas de la sección fueron del orden de 0.70 m/s a 1.70 m/s situadas en el centro del cauce y margen izquierda. Se observó una zona de recirculación bien definida por efecto de la curvatura del canal del río, esta recirculación se encuentra a 20 m de la margen izquierda. Las intensidades de la concentración de sedimentos en suspensión más representativa se encuentra en la zona central de la sección transversal y oscilan en del orden de 82 dB a 86 dB (figura 9.23d). En la margen derecha de la sección,

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

pueden observarse intensidades de mayor magnitud que oscilan entre los 84 dB a 88 dB, encontrándose en la zona extradós del canal (zona de baja velocidad en el meandro del canal).

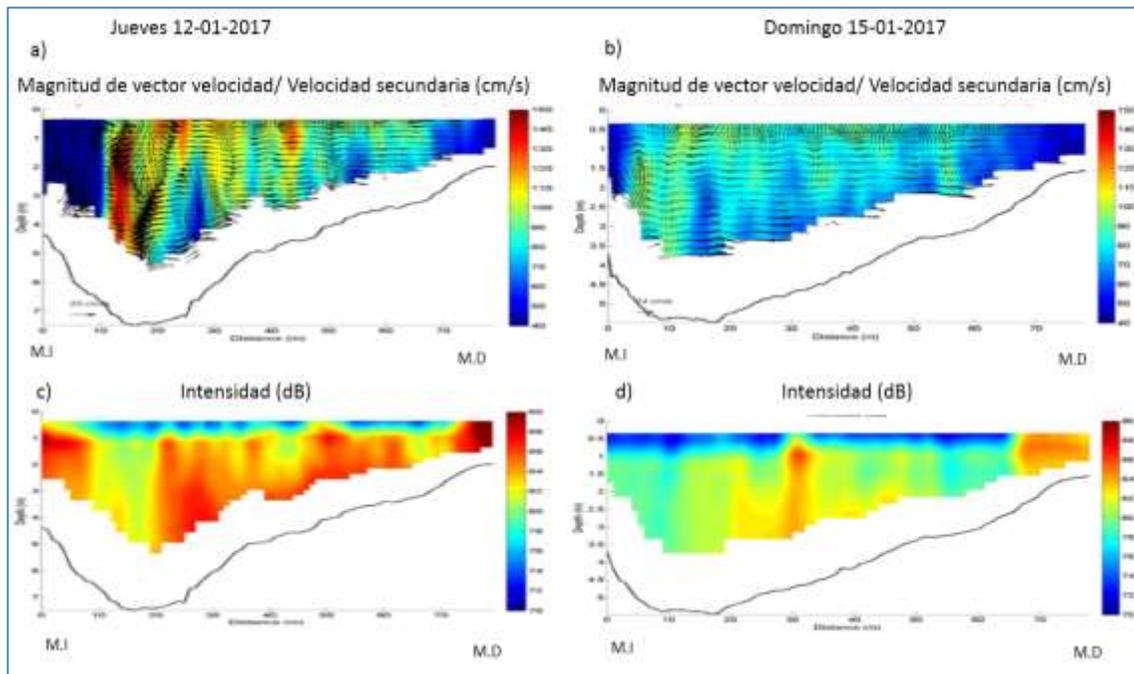


Figura 9.23. Secciones transversales comparadas del río de La Sierra.

Grijalva alto en puente Majahua II

Se comparó dos secciones transversales del río Grijalva Alto, una antes del puente Majahua II y otra después. Se determinó el comportamiento de las magnitudes del vector velocidad, la interacción de las velocidades secundarias y de las intensidades de la concentración de sedimentos en suspensión. Para la sección del día 12 de enero antes del puente La Majahua II, el comportamiento de las magnitudes de la velocidad se remarca más sobre el centro del cauce donde las velocidades se ubican entre 0.30 m/s y 0.50 m/s (figura 9.24a), se observaron zonas de recirculación no concretadas, ya que las magnitudes de las velocidades secundarias son menores y no logran formar estas recirculaciones, este fenómeno es característico por encontrarse en una zona recta del río. La poca recirculación que se forma es por el efecto de los esfuerzos cortantes, cavidades transversales y longitudinales y por la infraestructura.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

Las magnitudes del vector velocidad de la sección transversal del día 15 de enero mostradas en la figura 9.24b, se observa que las magnitudes más representativas se encuentran en el centro de la sección y oscilan entre 0.60 m/s y 0.70 m/s. Zonas de bajas magnitudes se observan en ambas márgenes de la sección transversal que rondan entre 0.3 m/s a 0.5 m/s. De igual forma que en la sección correspondiente al 12 de enero, zonas de recirculación no concretadas aparecen por las bajas magnitudes de las velocidades secundarias. Las intensidades de la concentración de los sedimentos en suspensión correspondiente al 15 de enero se presentan en la figura 9.24c. Se observa que las intensidades de los sedimentos en esta sección, se encuentran distribuidas en un rango de entre 75 dB a 85 dB y que la zona de mayor intensidad (entre 80 dB a 90 dB) se ubica en la margen derecha de la sección. Las intensidades correspondientes al 15 de enero, muestran intensidades del orden de 80 dB a 90 dB en la concentración de sedimentos en suspensión en las zonas de bajas velocidades e intensidades del orden de 75 dB a 85 dB en el resto de la sección transversal.

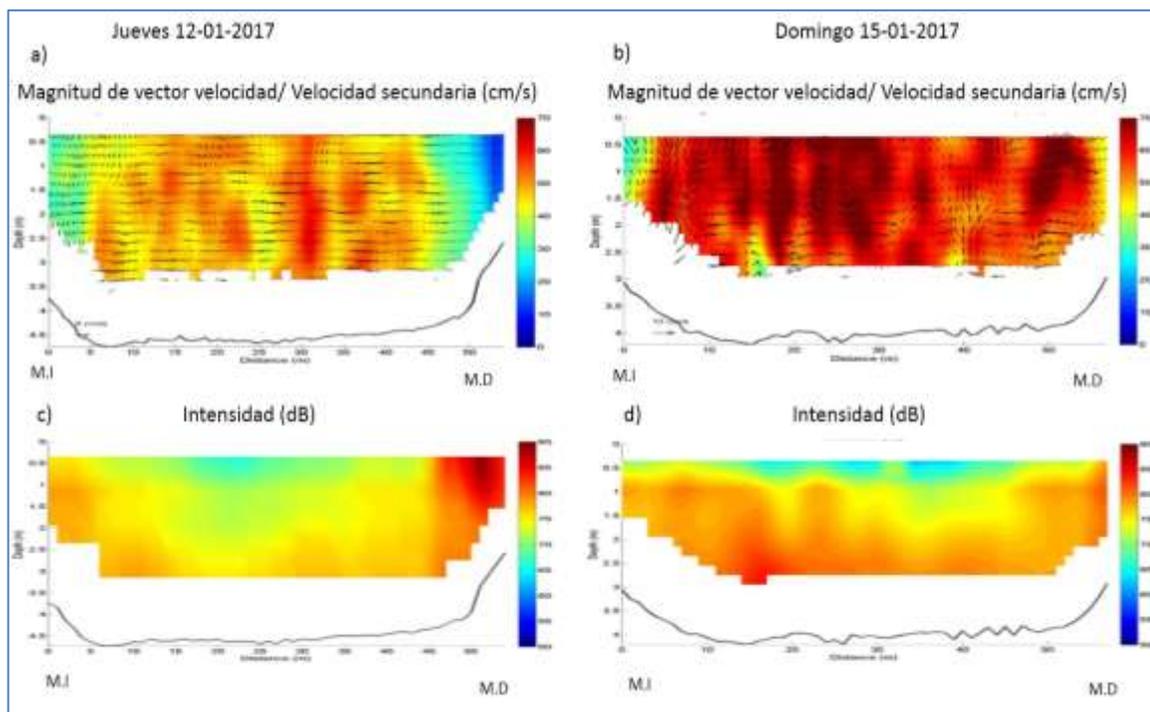


Figura 9.24. Secciones transversales comparadas antes del puente ubicado en el río Grijalva Alto.

La sección del día 15 de enero después del puente La Majahua II, el comportamiento de las magnitudes de la velocidad se muestra en la figura 9.24d. Se observan dos zonas definidas de las velocidades de mayor y menor magnitud, para las mayores magnitudes,

oscilan velocidades de 4.5 m/s a 5.0 m/s y se ubica de la margen izquierda hasta una distancia de 30 m. Las velocidades de menor magnitud se ubican de la margen derecha a una distancia de 15 m de la sección. Este comportamiento de las magnitudes en la zona se debe a la presencia de las pilas del puente La Majahua II.

Las velocidades secundarias en esta condición de gasto muestran un recirculación, donde se ubican las mayores magnitudes de velocidad ocurrida por la turbulencia generada en las pilas del puente La Majahua II.

Las magnitudes del vector velocidad correspondiente al 15 de enero mostrada en la figura 9.25b y del día 12 de enero (figura 9.25a), existen dos zonas de magnitudes de las velocidades formadas en la sección transversal, sin embargo a diferencia de la fecha anterior, las magnitudes aumentaron considerablemente por las condiciones de gasto y por los efectos de las pilas del puente. Teniendo magnitudes de 0.6 m/s a 0.7 m/s entre la distancia de 5 m a 30 m de la margen izquierda y magnitudes de 0.5 m/s a 0.6 m/s entre la distancia de 35 m a 45 m de la margen izquierda. Las velocidades secundarias para esta condición de gasto, muestran una formación más clara de la recirculación, además esta va en la misma dirección de la presentada en la sección transversal del río de La Sierra (figura 9.23 a y b) y como se puede apreciar también en la sección transversal de la confluencia Grijalva – Sierra (figura 9.22). Las intensidades de la concentración de los sedimentos en suspensión correspondiente al 12 de enero se presentan en la figura 9.25c. Se observa que las intensidades de los sedimentos, encontradas en la margen izquierda son del rango de 75 dB a 85 dB y la zona de mayor intensidad (entre 80 dB a 90 dB) ubicado en la margen derecha de la sección. Las intensidades correspondientes al 15 de enero (figura 9.25d) son del orden de 75 dB hasta 85 dB a través de la sección transversal.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

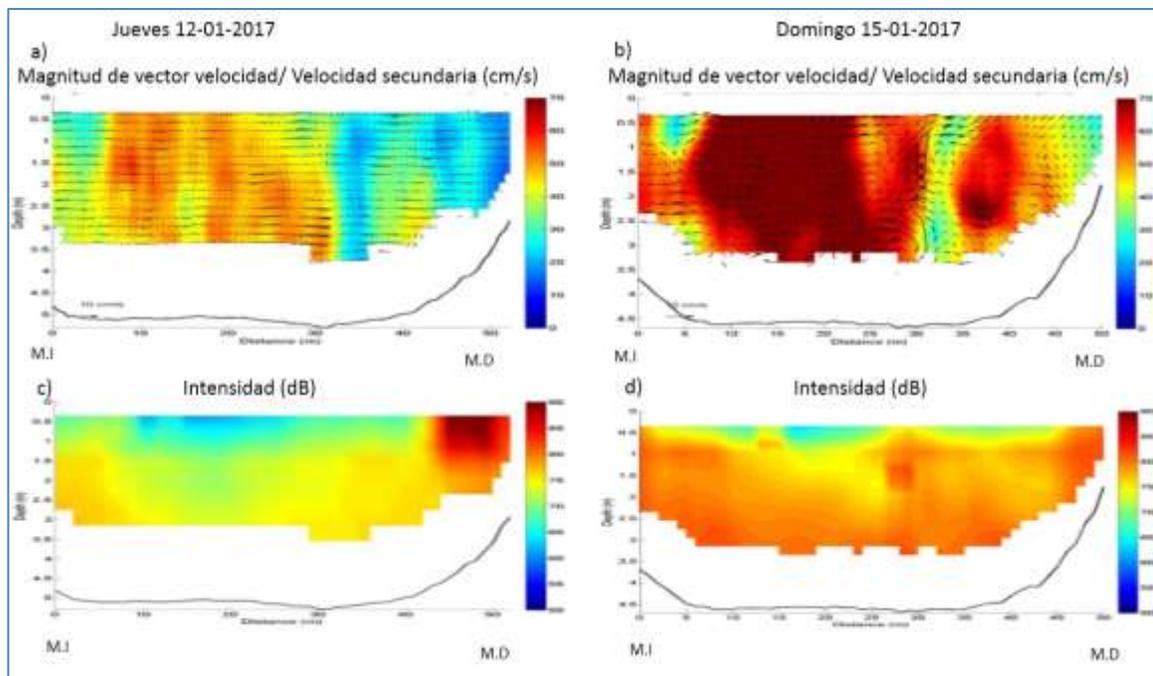


Figura 9.25. Secciones transversales comparadas después del puente ubicado en el río Grijalva Alto.

9.5.6. ANÁLISIS DE GASTOS OBTENIDOS

A partir de las mediciones realizadas en los dos días de campaña, se obtuvieron diferentes gastos en la zona de estudio. Para el caso del río de La Sierra el día 12 de enero presento un gasto de 291 m³/s, mientras que el río Grijalva Alto presento un gasto de 83 m³/s con lo cual dio un gasto de aportación al río Grijalva Bajo de 374 m³/s (tabla 1). Para la condición de gasto presentado el día 15 de enero, el río de La Sierra obtuvo un gasto de 207 m³/s, mientras que el río Grijalva Alto presento un gasto de 94 m³/s con lo cual dio un gasto de aportación al río Grijalva Bajo de 301 m³/s.

Tabla 9.1. Gastos obtenidos de las campañas de medición.

Río	12 de enero de 2017	15 de enero de 2017
	Q (m³/s)	Q (m³/s)
Río de La Sierra	291.00	207.00
Río Grijalva Alto	83.00	94.00
Río Grijalva Bajo	374.00	301.00

9.6. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos de las campañas de medición, se identificaron las relaciones que guardan las magnitudes de los vectores de velocidad, así como el comportamiento de las corrientes secundarias y la intensidad de la concentración del sedimento en suspensión.

Se realizaron los análisis de los vectores y magnitudes de velocidad en planta de los días 12 y 15 de enero de 2017 identificándose que los valores de velocidad del río Grijalva Alto no superan magnitudes de 0.70 m/s, mientras que el río de La Sierra mantiene valores medios de 1.00 m/s. En la zona de la confluencia las velocidades de ambos ríos están bien definidas, las de menor magnitud se encuentran en la margen izquierda que son aportadas por el río Grijalva Alto que en conjunto con el transporte de sedimento en suspensión y por ser estas la de menor densidad, el material que pasa en está margen no alcanza a depositarse, aunado a la presencia de las velocidades secundarias que dan forma al fondo. Caso contrario ocurren en la margen derecha de la confluencia donde la interacción de las velocidades es menor y la presencia de las velocidades secundarias no crea zonas de recirculación permitiendo que el material en suspensión se deposite. En esta zona se encuentra el material de mayor densidad.

REFERENCIAS

- 1.Barua, D. K., and K. H. Rahman** (1998), Some aspects of turbulent flow structure in large alluvial rivers, *J. Hydraul. Res.*, 36(2), 235–252.
- 2.Benda, L., N. L. Poff, D. Miller, T. Dunne, G. Reeves, G. Pess and M. Pollock** (2004), The Network dynamics hypothesis: how channel networks structure riverine habitats, *BioScience*, 54, 413-427.
- 3.Best, J. L.** (1986), The morphology of river channel confluences, *Progress in Physical Geography*, 10, 157–174.
- 4.Best, J. L.** (1987), Flow dynamics at river channel confluences: Implications for sediment transport and bed morphology, in *Recent Developments in Fluvial Sedimentology*, edited by F. G. Ethridge, R. M. Flores, M. D. Harvey, SEPM Special Publication 39. SEPM: Tulsa, 27–35, doi:10.2110/pec.87.39.0027.

- 5. Best, J. L.** (1988), Sediment transport and bed morphology at river channel confluences, *Sedimentology*, 35, 481–498.
- 6. Biron, P., A. G. Roy, J. L. Best, and C. J. Boyer** (1993), Bed morphology and sedimentology at the confluence of unequal depth channels, *Geomorphology*, 8, 115–129.
- 7. Biron, P. M., A. Richer, A. D. Kirkbride, A. G. Roy, and S. Han** (2002), Spatial patterns of water surface topography at a river confluence, *Earth Surface Processes Landforms*, 27, 913–928.
- 8. Bradbrook, K. F., S. N. Lane, and K. S. Richards** (2000), Numerical simulation of threedimensional time-averaged flow at river channel confluences, *Water Resources Research*, 36, 2731–2746.
- 9. Constantinescu, G., S. Miyawaki, B. Rhoads, A. Sukhodolov, and G. Kirkil** (2011). Structure of turbulent flow at a river confluence with momentum and velocity ratios close to 1: Insight provided by an eddy resolving numerical simulation, *Water Resour. Res.*, 47, W05507.
- 10. Constantinescu, G., S. Miyawaki, B. Rhoads, and A. Sukhodolov** (2012). Numerical analysis of the effect of momentum ratio on the dynamics and sediment-entrainment capacity of coherent flow structures at a stream confluence, *Journal of Geophysical Research*, 117, F04028
- Dinehart, R.L., Burau, J.R.** (2005). Repeated surveys by acoustic Doppler current profiler for flow and sediment dynamics in a tidal river. *J Hydrol.* 1e21.
- 11. Hsu, C. C., Wu, F. S. y Lee, W. J.** (1998). “Flow at 90° equal-width open-channel junction” *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(2), 186–191.
- 12. Kostaschuk, R., Villard, P., Best, J.** (2004). Measuring velocity and shear stress over- Dunes with acoustic doppler profiler. *J. Hydraulic Eng.* 130 (9), 932e936.
- 13. Kim, D., Muste, M.** (2012). Multi-dimensional representation of river hydrodynamics using ADCP data processing software. *Environ. Model. Softw.* 38 (12), 158e166.
- 14. Kim, D., Muste, M., & Merwade, V.** (2015). A GIS-based relational data model for multi-dimensional representation of river hydrodynamics and morphodynamics. *Environmental Modelling & Software*, 65, 79-93.
- 15. Mosley, M. P.** (1976). An experimental study of channel confluences, *Journal of Geology*, 84, 535–562.

- 16.Nystrom, E.A., Rehman, C.R., Oberg, K.A.** (2007). Evaluation of mean velocity and turbulence measurements with ADCPs. *J. Hydraul. Eng.* 133 (12), 1310e1318.
- 17.Lane, S. N., D. R. Parsons, J. L. Best, O. Orfeo, R. A. Kostaschuk, and R. J. Hardy.** (2008). Causes of rapid mixing at a junction of two large rivers: Río Paraná and Río Paraguay, Argentina, *Journal of Geophysical Research*, 113, F02024.
- 18.Leite Ribeiro, M., K. Blanckaert, A. G. Roy, and A. J. Schleiss.** (2012), Flow and sediment dynamics in channel confluences, *Journal of Geophysical Research*, 117, F01035.
- 19.Parsons, D. R., J. L. Best, S. N. Lane, R. A. Kostaschuk, R. J. Hardy, O. Orfeo, M. L. Amsler, and R. N. Szupiany** (2008), Large River Channel Confluences, in *River Confluences, Tributaries and the Fluvial Network* (eds S. P. Rice, A. G. Roy and B. L. Rhoads), John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK.
- 20. Priego,H.G., Leon,J.E. and Rivera,T.F. (2017).**Corrientes Secundarias en una Confluencia. XXIV congreso nacional de hidraulica. Asociacion Mexicana de Hidraulica. Marzo 2017.Acapulco Guerrero, Mexico
- 21.Ramírez, C., García, J. L., Ramirez, C. A., & Bocanegra, R. A.** (2011). Caracterización de los materiales del lecho del río Cauca. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 1(1), 10-17.
- 22.Rennie, C.D.** (2002). Measurement of bed load velocity using an acoustic DopplerCurrent profiler. *J. Hydraulic Res.* 128 (5), 473e483.
- 23.Rhoads B. y Sukhodolov A.** (2008). “Lateral momentum flux and the spatial evolution of flow within a confluence mixing interface”, *Water Resources Research*, vol.44, w08440.
- 24.Rhoads, B. L., and S. T. Kenworthy** (1998), Time-averaged flow structure in the central región of a stream confluence, *Earth Surface Processes Landforms*, 23, 171–191.
- 25.Rhoads, B. L., and A. N. Sukhodolov** (2001), Field investigation of three-dimensional flow structure at stream confluences: 1. Thermal mixing and time-averaged velocities, *Water Resources Research*, 37, 2393–2410.
- 26.Rice, S. P., B. L. Rhoads, and A. G. Roy** (2008), Introduction: River Confluences, Tributaries and the Fluvial Network, in *River Confluences, Tributaries and the Fluvial Network* (eds S. P. Rice, A. G. Roy and B. L. Rhoads), John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK.
- 27.Schemper, T. J., & Admiraal, D. M.** (2002). An examination of the application of acoustic Doppler current profiler measurements in a wide channel of uniform depth for

turbulence calculations. In *Hydraulic Measurements and Experimental Methods 2002* (pp. 1-9).

28.Sime, L.C., Ferguson, R.I., Church, M. (2007). Estimating shear stress from movingboat acoustic Doppler velocity measurements in a large gravel bed river. *Water Res. Res.* 43, W03418.

29.SonTek (2000). *Doppler Velocity Log for ROV/AUV Applications*. SonTek, San Diego, CA.

30.Szupiany, R.N., Amsler, M.L., Best, J.L., Parsons, D.R. (2007). A Comparison of fixed and moving-vessel flow measurements with an acoustic Doppler profiler (aDp) in a large river. *J. Hydraul. Eng.* 133 (12), 1299e1309.

31. Szupiany, R. N., M. L. Amsler, D. R. Parsons, and J. L. Best (2009), Morphology, flow structure, and suspended bed sediment transport at two large braid-bar confluences, *Water Resources Research*, 45, W05415.

10. CAMBIO EN LA HIDRODINAMICA E INTENSIDAD DE SEDIMENTOS POR PILAS DE PUENTES, ANTES Y DESPUES DE UNA CONFLUENCIA: CASO DE ESTUDIO RÍOS GRIJALVA ALTO Y SIERRA

10.1. RESUMEN

Los ríos han sido utilizados de manera intensa por el hombre para diferentes fines, ocasionando conflictos con las funciones naturales de los ríos en su escurrimiento y transporte de sedimentos. Estos aprovechamientos en muchas ocasiones generan desequilibrio en los ríos, lo que se traduce en problemas con consecuencias económicas, ambientales y sociales; sobre todo a las poblaciones ubicadas en la proximidad de los ríos. Un caso particular es atravesar la corriente de un cauce, ya que un objeto extraño al mismo, como son las pilas y estribos de los puentes, generan efectos negativos en el sistema. Un puente modifica y altera el equilibrio de un río. Estos fenómenos a su vez actúan produciendo deterioros en ellos y la integridad del mismo. Por lo que para este caso de estudio se analizaron dos puentes antes y después de confluencias, usando equipos acústicos en dos períodos diferentes de gastos. Para poder identificar esta variación geomorfológica e hidrodinámica, las campañas de mediciones realizadas fueron, sobre los puentes La Majahua I y II, localizados en el río Alto Grijalva, antes de la confluencia con el Río de la Sierra. Mediante software especializado y utilizando técnicas de medición Doppler para el uso de ADCP, se recolectó datos de campo para conocer las alteraciones en la hidrodinámica que provocan las pilas de estos puentes. Con lo que finalmente se observó que los puentes en sus pilas sobre el cauce, cambian la vorticidad de las velocidades secundarias y la distribución y concentración de sedimentos.

Palabras claves: ADCP, confluencias, hidrodinámica, pilas de puentes y sedimentos,

10.2. INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de los recursos fluviales ha jugado un papel importante en el desarrollo de ciertas regiones, por ello el hombre ha tenido que construir grandes y pequeñas obras hidráulicas. Dentro de estas se encuentran los puentes, que son elementos fundamentales para el buen funcionamiento social y económico de la sociedad. Se trata de obras singulares, costosas y vitales para mantener el transporte. En el caso de construcciones de obras de vialidad, unos de los principales retos a vencer, han sido los diferentes problemas que ocasionan atravesar la corriente de un cauce, un objeto extraño al mismo, como lo son las pilas y estribos de un puente, los cuales generan efectos de socavación y de reacomodo de sedimentos en el fondo del canal, que afectan la seguridad del tránsito sobre el mismo, y a su vez, la propia estabilidad del puente.

Por la amplia interacción existente entre el río y el puente, en la que uno trata de influir sobre el otro, el puente necesita la estabilidad y permanencia en el tiempo, mientras el río, en cambio, por su propia naturaleza, es esencialmente dinámico (Rocha, 2010). La mayoría de los estudios hidráulicos de puentes se realizan suponiendo que el fondo permanece constante durante el evento, situación que pudiese ser lógica si se tienen ríos estables, y el estudio se concentraría en la socavación local, sin embargo, en los ríos que son altamente dinámicos (régimen mixto), se evidencian no solo cambios en la superficie del agua sino también en el fondo del cauce en una gran extensión del río, razón por la cual el fenómeno es más complejo (Restrepo *et al.* 2007). Cualquier tipo de estructura en un río induce una interacción forzada entre la propia estructura y el flujo natural del río. En general, un puente de cruce con pilas en el lecho y márgenes del río representa una alteración de la geometría natural de la sección del mismo y por lo tanto, crea un obstáculo para el flujo que, al acercarse al puente, tiene que cambiar su propio patrón natural.

La colocación de las pilas de los puentes representa una obstrucción tanto para el flujo de agua, como al flujo de material de arrastre del río proveniente de aguas arriba. Esta interacción de pila-flujo causa un reacomodo en la configuración del fondo debido a la turbulencia, mientras que al disminuir el área hidráulica del cauce, las velocidades del flujo se incrementan entre pilas (González *et al.* 2014).

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

Además, debido a las condiciones de flujo modificadas en el cruce del puente, la corriente adquiere una fuerte potencia erosiva. Como consecuencia, en las condiciones de flujo subcrítico que normalmente se encuentran en el río, el aumento resultante en la velocidad del flujo y la potencia erosiva del caudal crea condiciones que ponen en peligro la estabilidad de las fundaciones de puentes (Brandimarte *et al.* 2012).

Una condición actual de estas condiciones, se dan sobre los puentes La Majahua I y II, en el río Alto Grijalva, antes de la confluencia con el Río de la Sierra, en Tabasco México. Y Mediante técnicas Doppler se estimaron los efectos de las pilas a las corrientes secundarias e intensidad de sedimentos

10.3. LOCALIZACIÓN

Las zonas de estudios son dos:

El puente La Majahua I en las coordenadas 508937.88 m E y 1985010.62 m N, y el puente La Majahua II en las coordenadas 509086.45 m E y 1985485.26 m N (figura 10.1).



Figura 10.1. Localización de las zonas de estudios.

10.4. METODOLOGÍA

La realización del trabajo puede ser descrita en dos etapas: En la primera se realizó la topobatimetría de la zona de estudio, y en la segunda el estudio de hidrodinámica en los dos puentes.

10.4.1. TOPOBATIMETRÍA

Esta etapa consistió en la obtención de la configuración actual de la topografía del fondo y las márgenes de la zona de estudio. El fondo se configuro con ADCP en la modalidad de ecosonda Multi-Haz, y las márgenes y ubicación de las pilas del puente, mediante una estación total la cual se ligó vía GPS en el puente. Esta metodología se usó para las dos campañas de medición que se realizaron el día 12 y 15 de enero del 2017 (Figura 10.2).

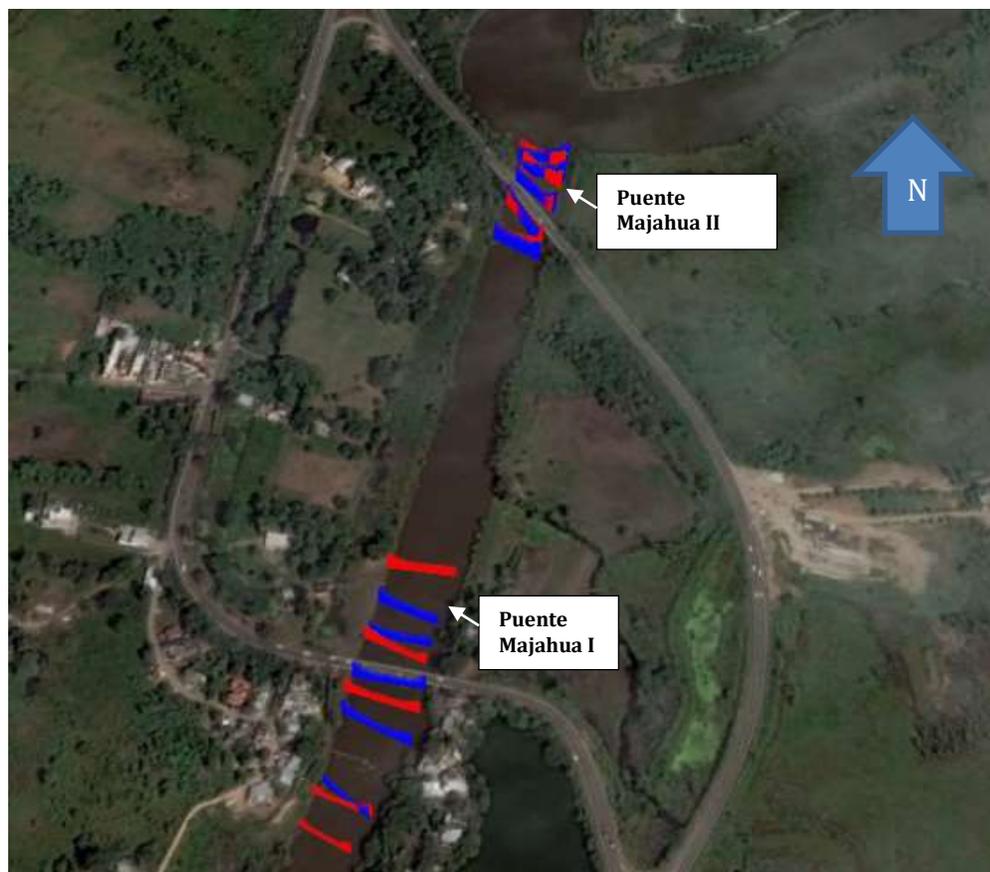


Figura 10.2. Secciones de control sobre los puentes La Majahua I y II.

10.4.2. HIDRODINÁMICA MEDIANTE PERFILADORES ACÚSTICOS DOPPLER

Esta etapa se dividió en dos partes, el estudio de velocidades secundarias y el de intensidad de sedimentos mediante transeptos preestablecidos sobre la zona de las infraestructuras (ver Figura 10.3), esto para ambas mediciones. La obtención de los datos fue mediante ADCP y los métodos utilizados los propuestos en (Kim y Kang, 2011).

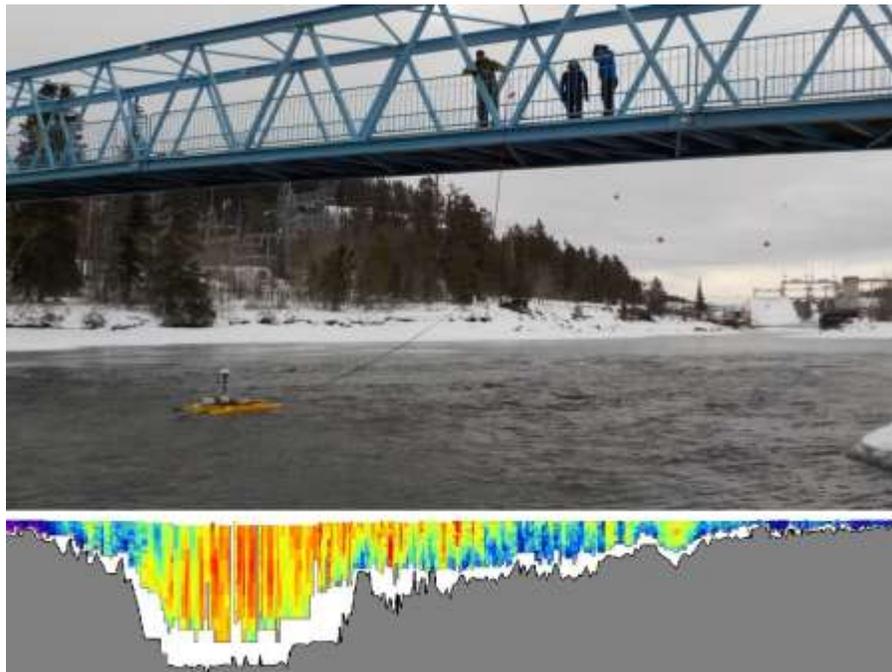


Figura 10.3. Forma de estimar el fondo e hidrodinámica con ADCP, (Canadá, 2016)

10.4.3. VELOCIDADES SECUNDARIAS E INTENSIDAD DE SEDIMENTOS

Para conocer el efecto que ejercen las pilas sobre las velocidades secundarias se plantearon transectas de control antes y después de estas pilas. Para esto se utilizó la metodología ya establecida que consiste en recorrer cuatro veces, de margen a margen, una transecta del cauce (Szupiany *et al.* 2007). Las velocidades secundarias son las encargadas de redistribuir el campo de velocidades máximas y los esfuerzos de corte (ver Figura 10.4), las cuales se forman por la existencia de fuerzas desiguales entre el gradiente de presión hidrostático y las fuerzas centrífugas (Priego y Rivera, 2015), debido a esto modifican el proceso de erosión y por consecuencia la topografía del Cauce.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

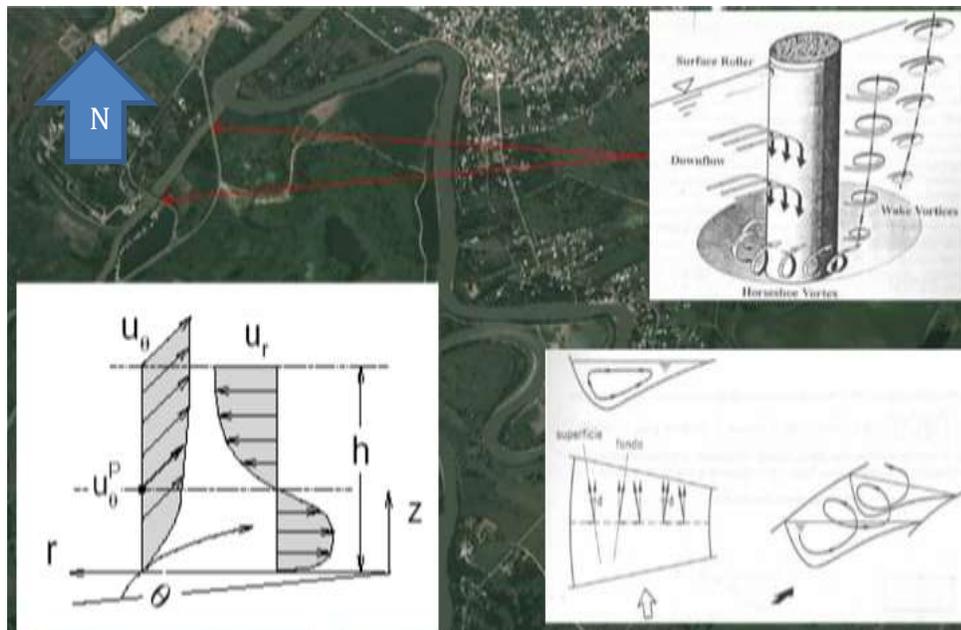


Figura 10.4. Flujo en espiral característico de las velocidades secundarias (Priego y Rivera, 2016).

Luego, por celda se promedian estas cuatro transectas y de allí se obtiene la concentración de sedimento de fondo en suspensión (ver figura 10.5).

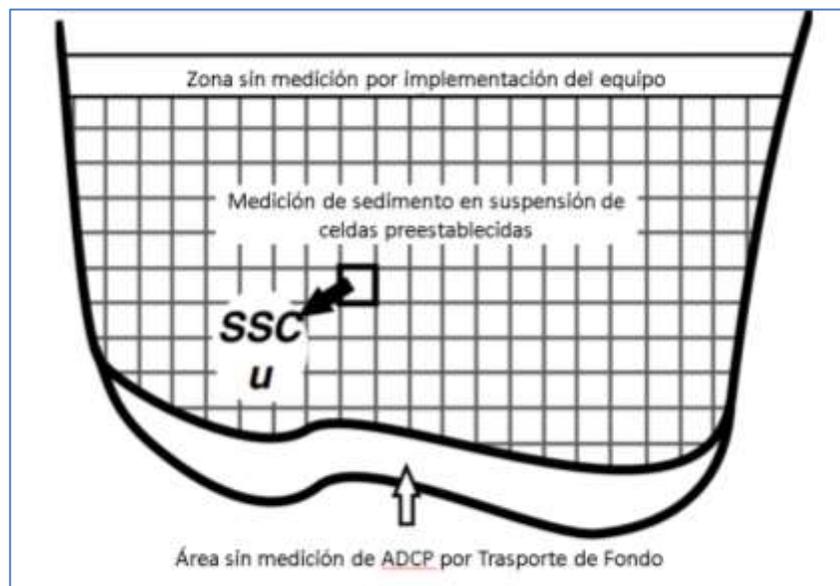


Figura 10.5. Sección y celda tipo de los resultados estimados mediante ADCP. (Latosinski et al ,2014).

10.5. RESULTADOS

10.5.1. COMPARACIÓN DE TOPOBATIMETRÍAS

De la topobatimetría se obtuvo un modelo digital de elevaciones de cada campaña y se comparó contra una topografía del 2010 (figura 10.6).

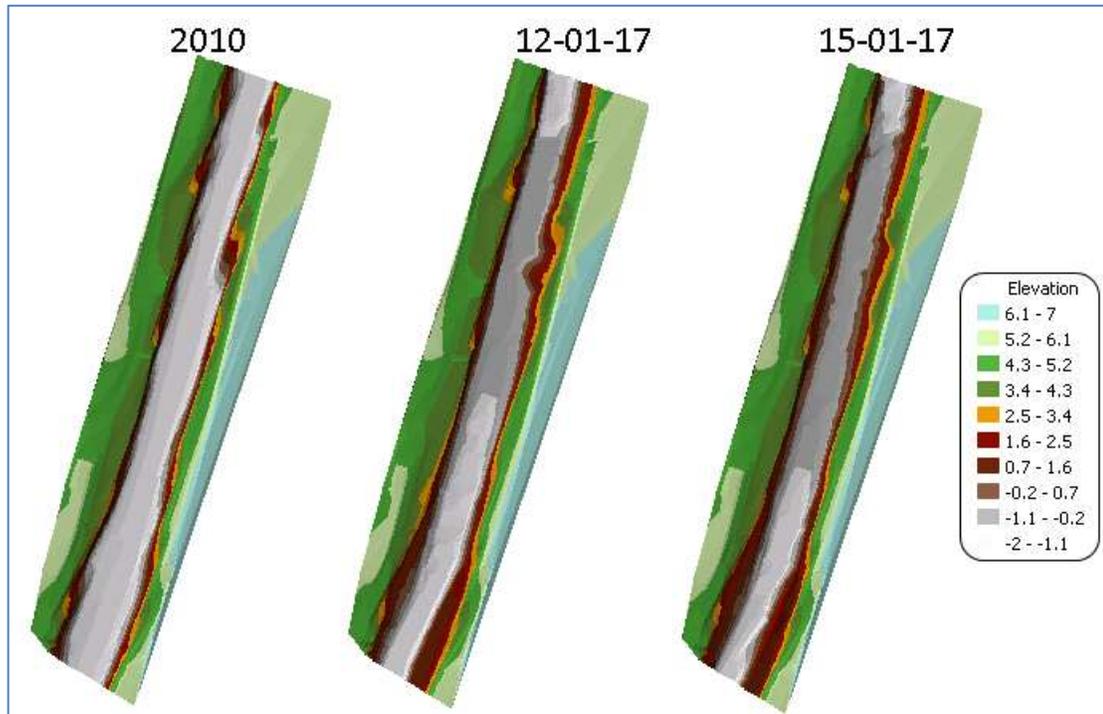


Figura10.6. Comparación batimetrías.

Se observa que de 2010 a 2017, ha existido un variación del fondo y esta se acrecenta cuando los gastos son más altos.

10.5.2. VELOCIDADES EN PLANTA, SECUNDARIAS E INTENSIDAD DE SEDIMENTOS EN PUENTE MAJAHUA I

De las campañas realizadas se graficaron en planta las magnitudes de los vectores velocidad observando que estaban poco desarrolladas el día 12 respecto al 15 y se aprecian dos tránsitos preferentes, antes de los puentes poco desarrollados y después de los puentes desarrollados. Esto hace ver que el efecto de las pilas redistribuye las líneas de corriente (ver figura 10.7).

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

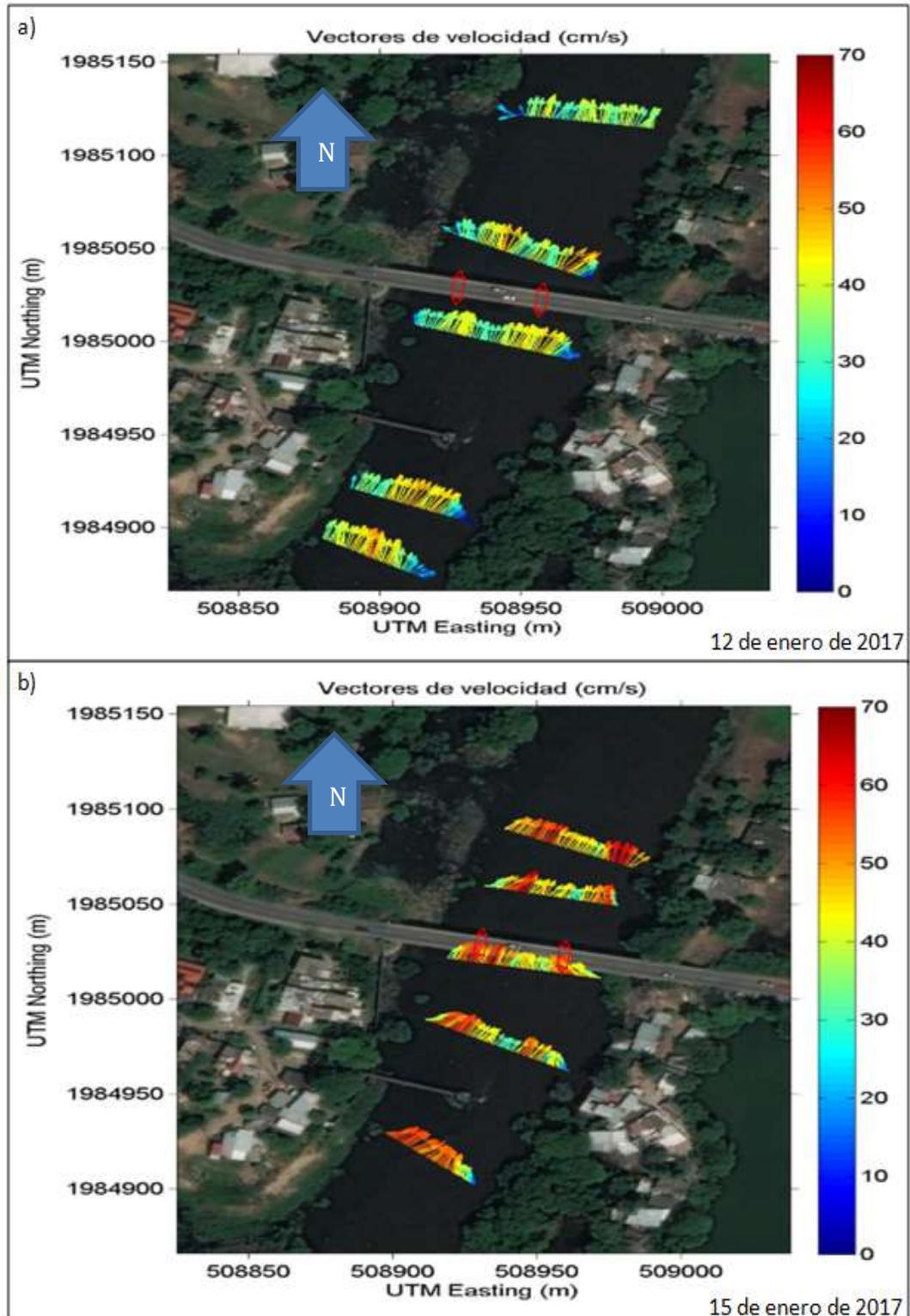


Figura 10.7. Vectores de velocidad en planta a) del 12 de enero de 2017 y b) 15 de enero de 2017.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

Se identificó que las velocidades secundarias del día 12 mostradas en la figura 10.8a, siguen el tránsito preferente de las velocidades en planta, con un mejor desarrollo después del puente sobre la margen derecha. Para el día 15 en la figura 10.8b las velocidades aún siguen el tránsito presente sobre la margen derecha, sin embargo ya se desarrollan mejor sobre la margen izquierda por lo que para ambos casos el efecto de las pilas es más notorio sobre la margen derecha, que respecto a la comparación de topografía del 2010 al 2017, han evolucionado más las zonas profundas cercanas a la margen derecha.

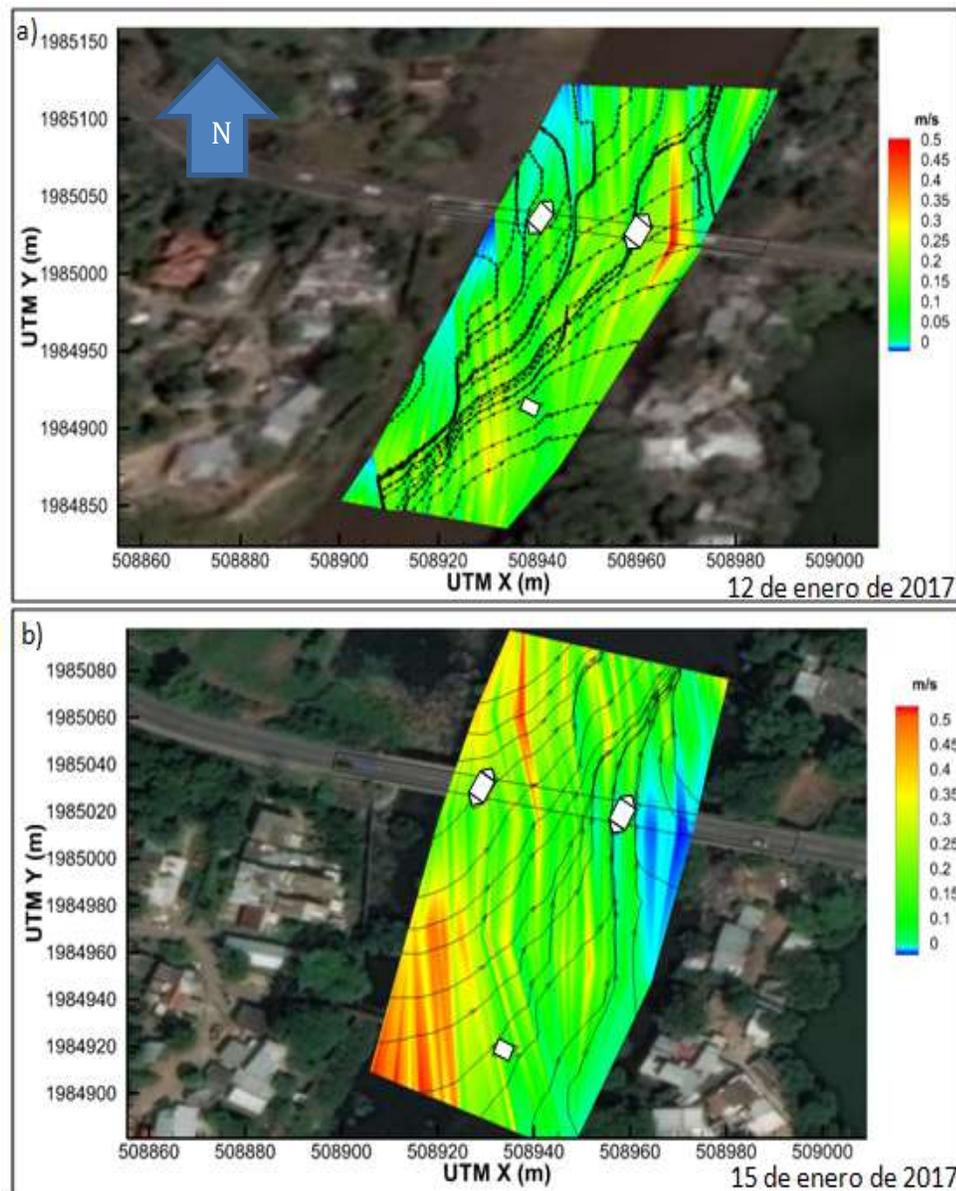


Figura 10.8. Velocidades secundarias de los días a) 12 de enero de 2017 y b) 15 de enero de 2017.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

La concentración de sedimentos medidas actualmente, indican que para gastos bajos la distribución de la carga sedimentológica se distribuye sobre la margen izquierda (ver figura 10.9a) y para altos (ver figura 10.9b) la mayor concentración se observó en ambas márgenes.

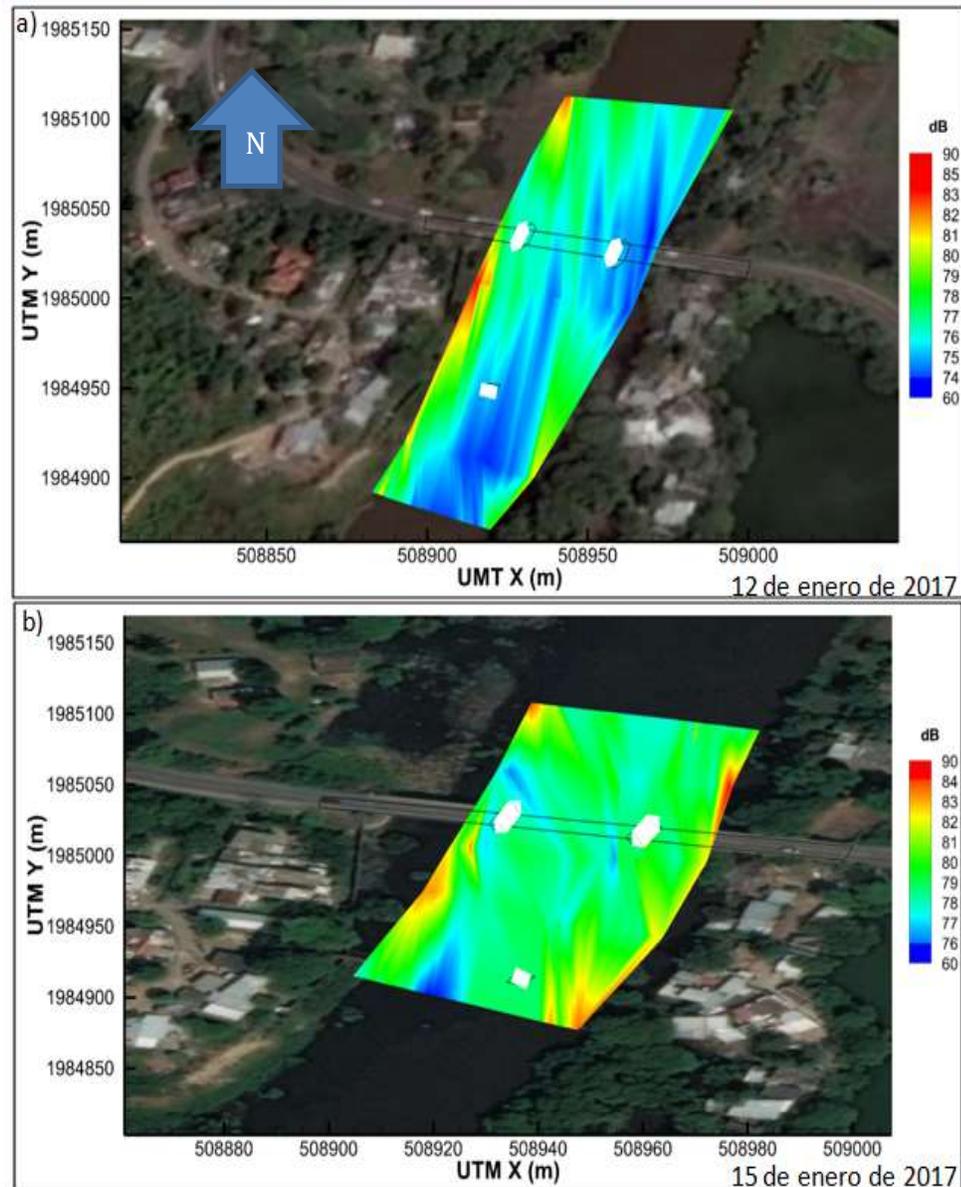


Figura 10.9. Intensidad de sedimento en suspensión en planta de los días a) 12 de enero de 2017 y b) 15 de enero de 2017.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

En las figura 10.10a y figura 10.10b se observó, que para gastos bajos y altos aguas arriba del puente, las velocidades venían distribuidas sobre el centro del cauce y cargadas hacia la margen derecha. Antes y después de las pilas se genera una orientación de las velocidades hacia margen derecha e izquierda quedandodo la inercia y el cambio por el efecto de las pilas aguas abajo.

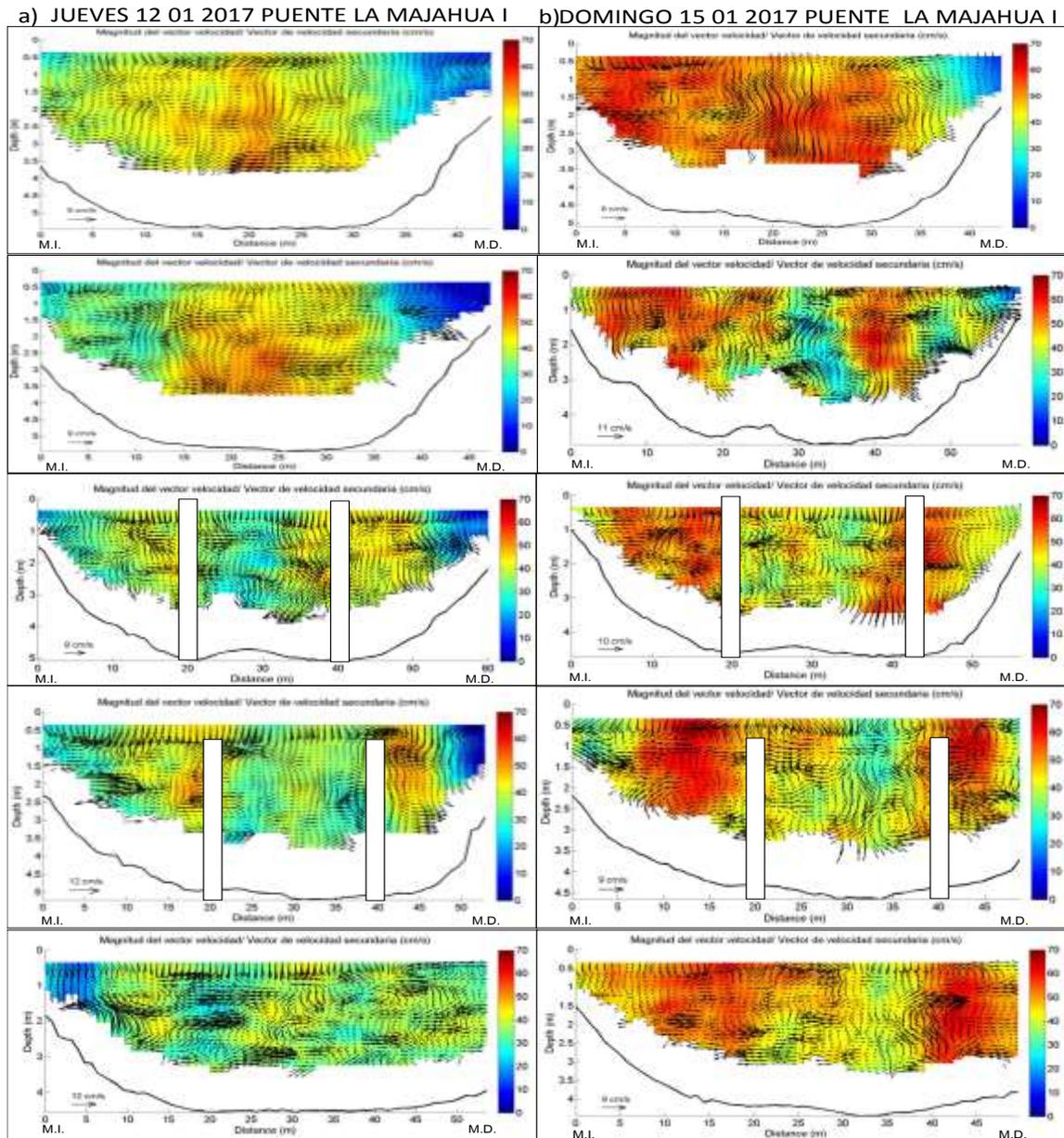


Figura 10.10. Magnitud de la velocidad vs velocidad secundaria a) secciones del 12 de enero de 2017 y b) secciones del 15 de enero de 2017 (ordenadas de aguas arriba a aguas abajo).

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

En las figura 10.11a y figura 10.11b se observó que en las secciones aguas arriba de los puentes el transporte en suspensión se distribuía sobre las márgenes. Este efecto cambia cuando entra en la zona de las pilas, donde la distribución es más homogénea sobre la sección transversal, sin embargo la mayor concentración aun es sobre la márgenes. En la salida en las secciones aguas abajo la inercia del efecto de las pilas es sobre la margen izquierda.

a) JUEVES 12 01 2017 PUENTE LA MAJAHUA I b) DOMINGO 15 01 2017 PUENTE LA MAJAHUA I

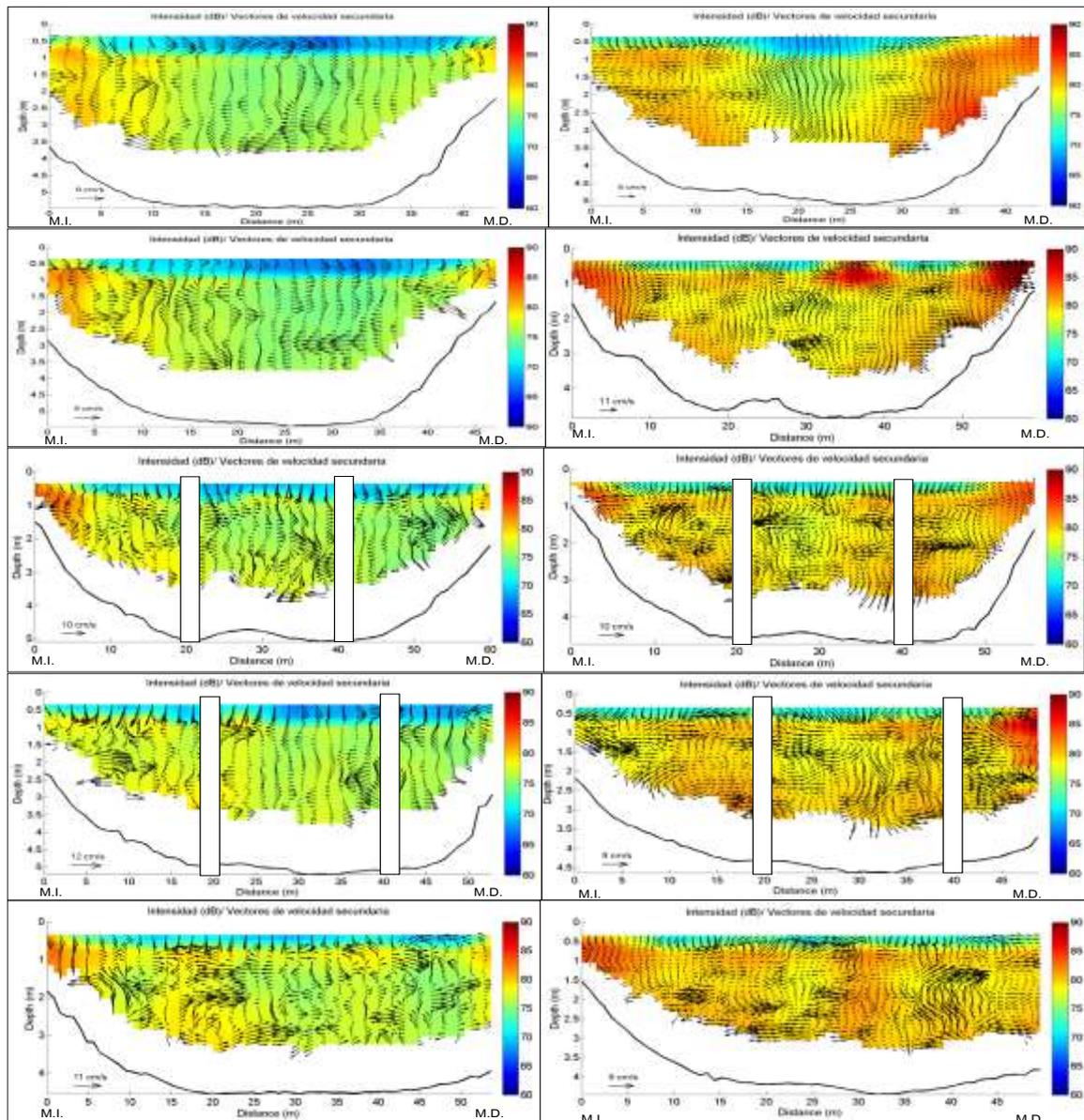


Figura 10.11. Intensidad vs velocidad secundaria a) secciones del 12 de enero de 2017 y b) secciones del 15 de enero de 2017 (ordenadas de aguas arriba a aguas abajo).

10.5.2. VELOCIDADES EN PLANTA, SECUNDARIAS E INTENSIDAD DE SEDIMENTOS EN PUENTE MAJAHUA II

De las campañas de medición realizadas en el puente Majahua II, en las secciones aguas arriba, la distribución de velocidades es homogénea y sobre toda la sección transversal. Sin embargo aguas abajo y hacia la confluencia las líneas de flujo se cargan hacia la margen izquierda. Se observó dos tránsitos preferentes uno de bajo régimen sobre la margen derecha y uno alto cercano a la margen izquierda (ver figura 10.12).

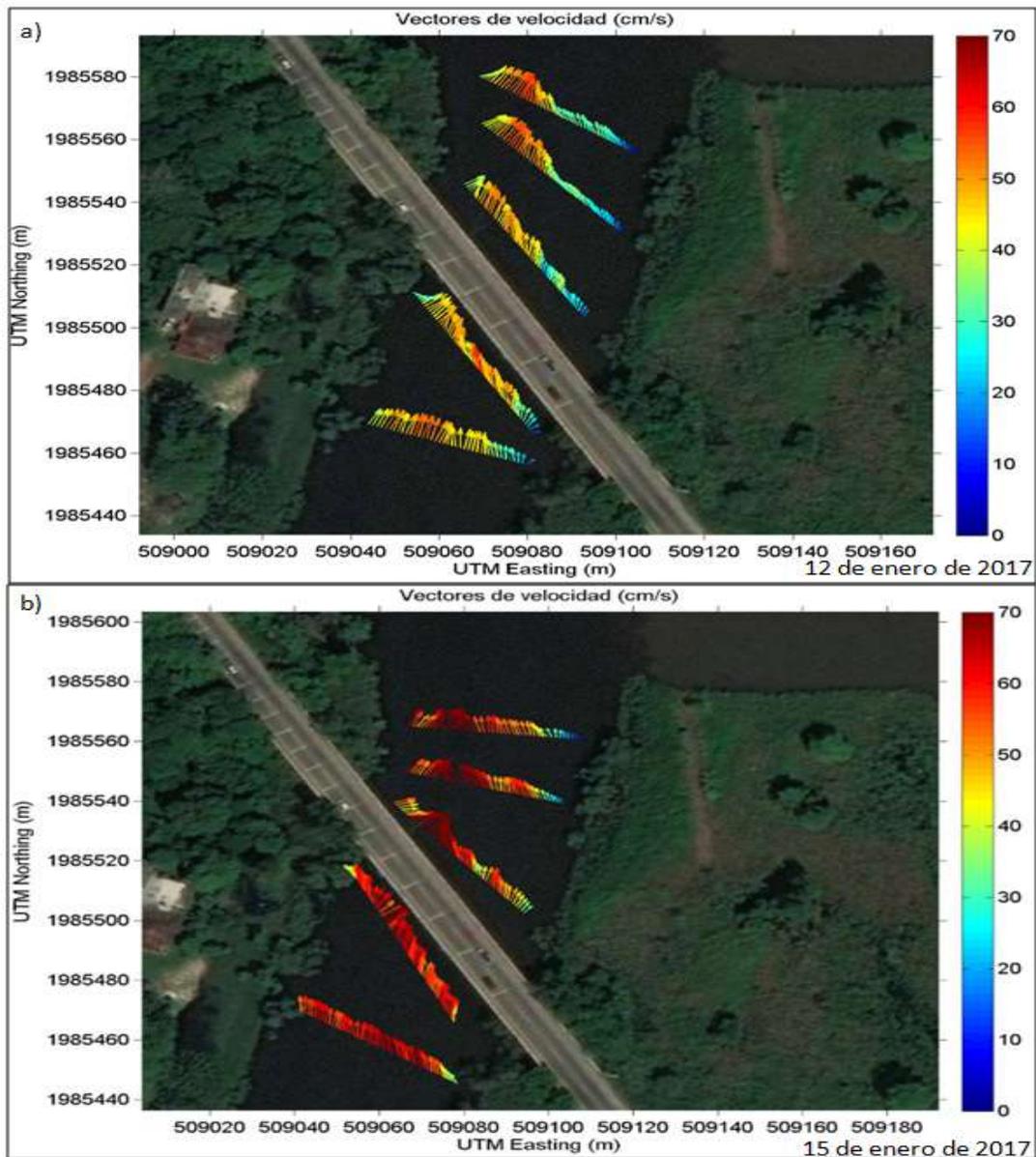


Figura 10.12. Vectores de velocidad en planta a) del 12 de enero de 2017 y b) 15 de enero de 2017.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

La distribución de las líneas de flujo secundarios, en ambos casos es afectada por las pilas. Observándose que el día 12 con un gasto bajo, al transitar por las pilas, las estelas convergen en un solo punto y el efecto del río de la Sierra sobre ellas es notorio, ya que la distribución de gastos era un tercio del mismo. No así el día 15, donde el efecto de las pilas sobre las estelas genera una división de los flujos secundarios, para este caso la distribución de gastos era la mitad del río de la Sierra (ver figura 10.13).

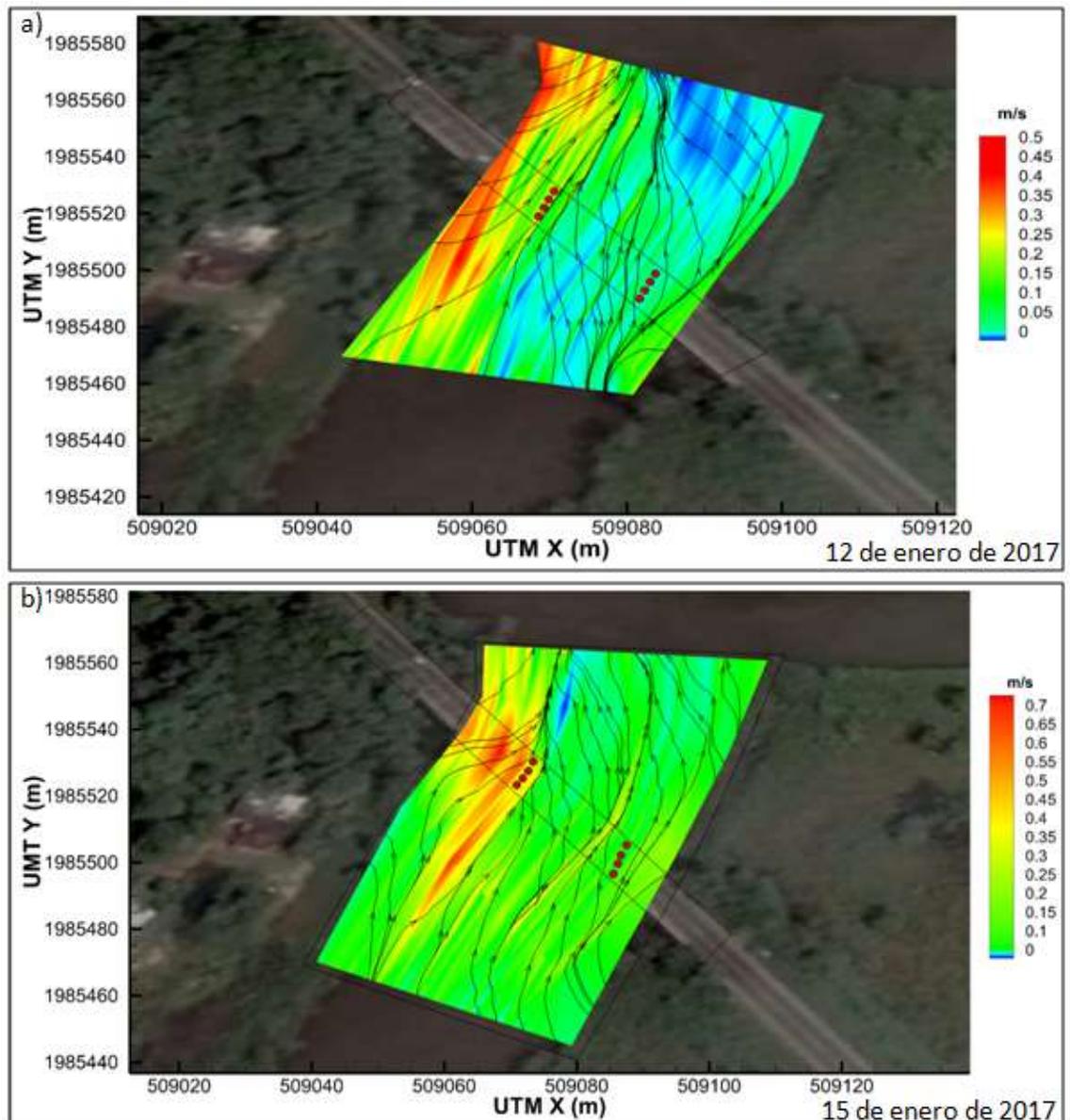


Figura 10.13. Velocidades secundarias de los días a) 12 de enero de 2017 y b) 15 de enero de 2017.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

A pesar de que en las campañas de medición la distribución de gastos indica un tercio y la mitad del río de la Sierra, el gasto sólido es más concentrado en la margen derecha en ambos casos. Sin embargo en una distribución de gastos mayores, el efecto de las pilas es menor y se redistribuye de forma más homogénea la concentración de los sedimentos. De igual forma se apreció en la distribución de los gastos sólidos dos tránsitos preferentes, similares a los flujos secundarios (ver figura 10.14).

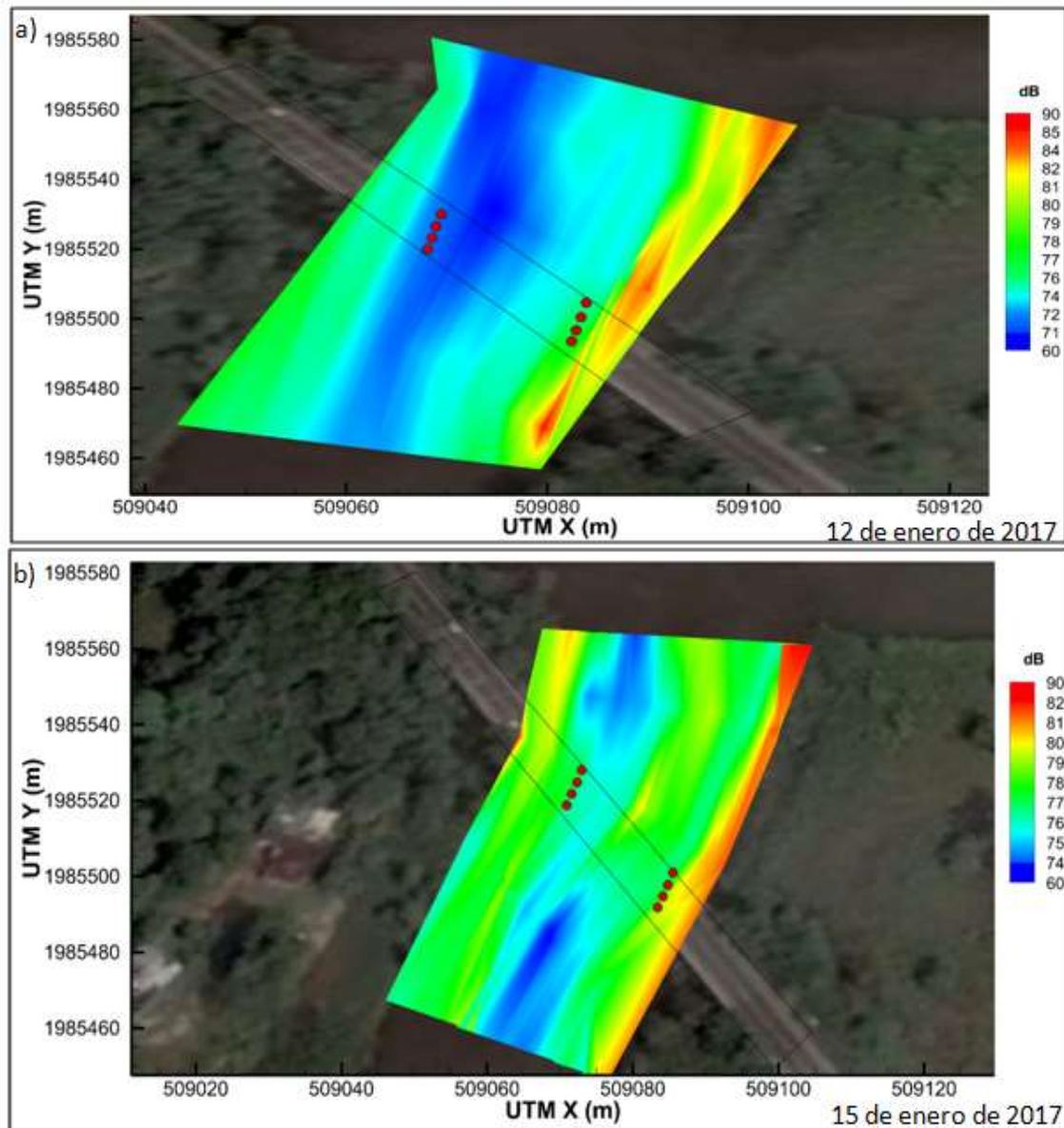


Figura 10.14. Intensidad de sedimento en suspensión en planta de los días a) 12 de enero de 2017 y b) 15 de enero de 2017.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

El proceso de distribución de las velocidades en las secciones transversales aguas arriba el día 12, tienen una tendencia hacia la margen izquierda y el 15 una distribución más uniforme en toda la transversal. El efecto de las pilas muestra en ambos casos, una redistribución más homogénea de las magnitudes y tres vorticidades desarrolladas en la margen derecha e izquierda y el centro de las pilas. Conservando la rotación antihorario cercana a la confluencia en ambos casos y horaria más desarrollada el día 15 en la margen izquierda (ver figura 10.15).

JUEVES 12 01 2017 PUENTE LA MAJAHUA II

DOMINGO 15 01 2017 PUENTE LA MAJAHUA II

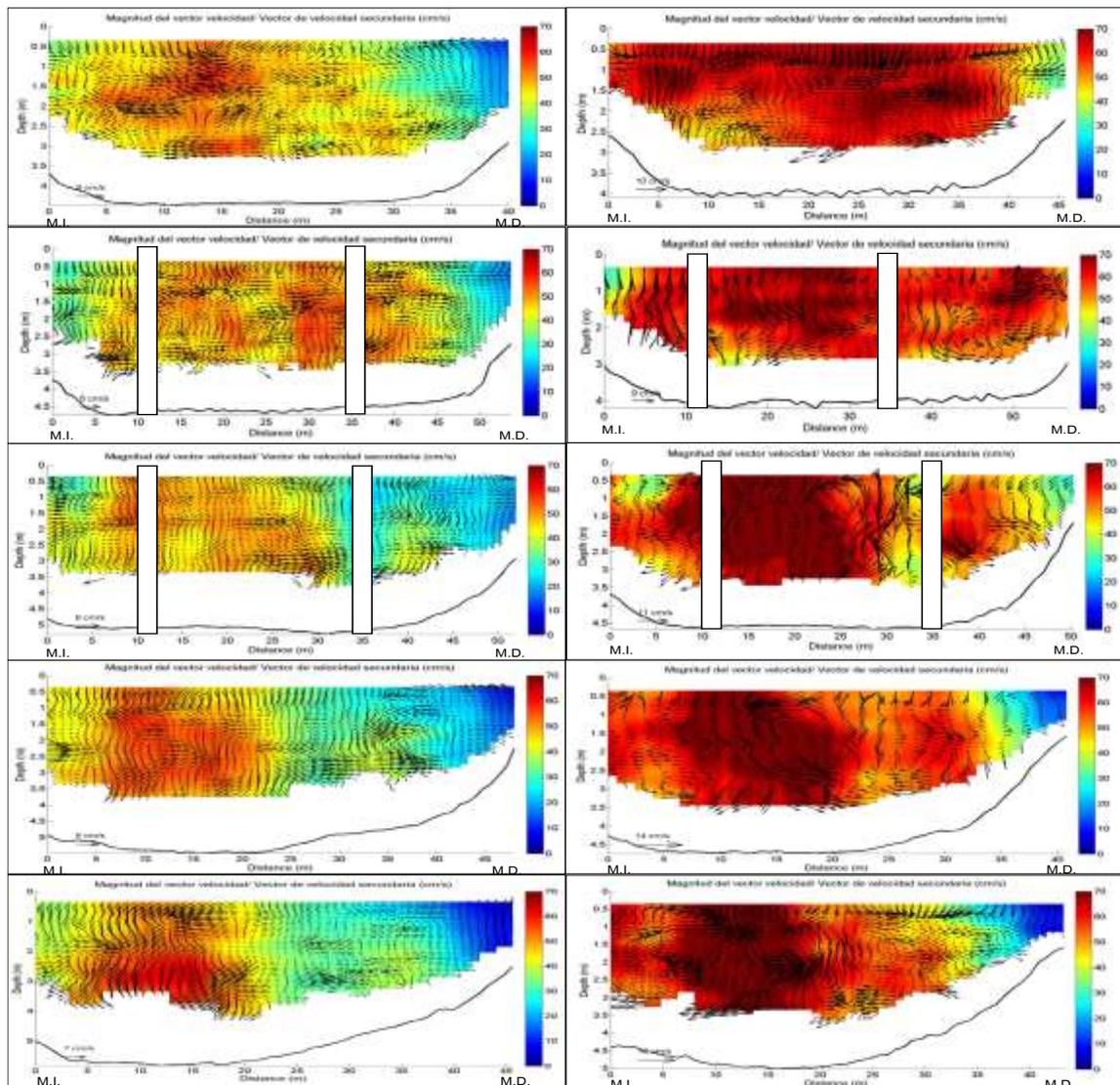


Figura 10.15. Magnitud de la velocidad vs velocidad secundaria a) secciones del 12 de enero de 2017 y b) secciones del 15 de enero de 2017 (ordenadas de aguas arriba a aguas abajo).

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

El transporte de sedimentos fue más concentrado en la margen derecha en ambos casos, siendo más notorio el efecto el día 12, se observó que el efecto de las pilas en la distribución de los sedimentos es menor el día 15 ya que la distribución en las secciones transversales es más homogénea y la influencia sobre el río de la Sierra es mayor (ver figura 10.16).

JUEVES 12 01 2017 PUENTE LA MAJAHUA II

DOMINGO 15 01 2017 PUENTE LA MAJAHUA II

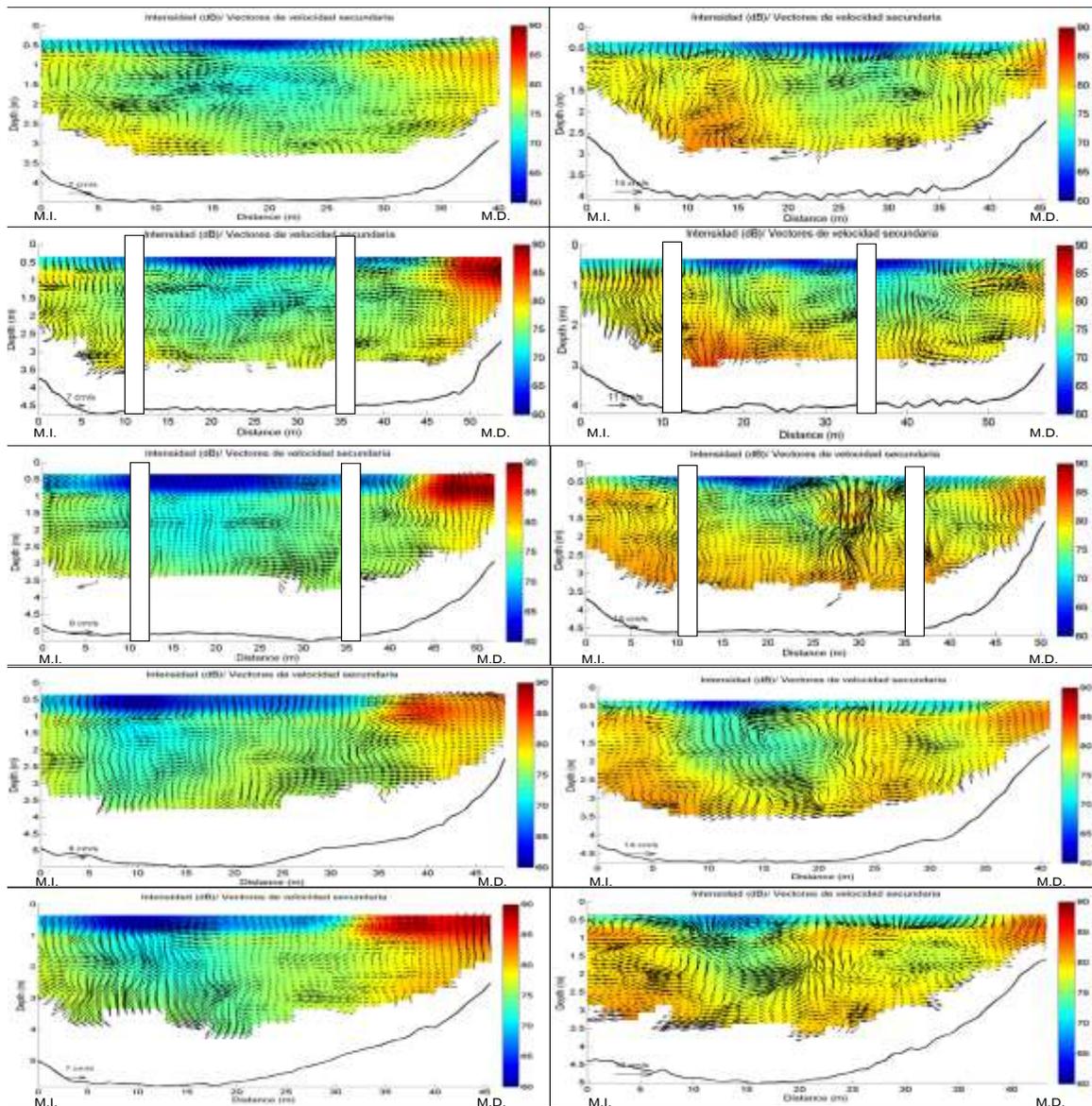


Figura 10.16. Intensidad vs velocidad secundaria a) secciones del 12 de enero de 2017 y b) secciones del 15 de enero de 2017 (ordenadas de aguas arriba a aguas abajo).

Del análisis realizado en las secciones Río Sierra Y Grijalva alto (ver figura 17), se encontró que el efecto del cambio de rotación de las pilas sobre las vorticidades del flujo

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

secundario, hacen que se adicionen en gastos bajos y altos a las del río de la Sierra pero el efecto es más notorio en alto, ya que el desarrollo es más notable en el sentido de antihorario (ver figura 10.18).



Figura 10.17. Secciones de confluencia e interacción Ríos Sierra Y Grijalva Alto.

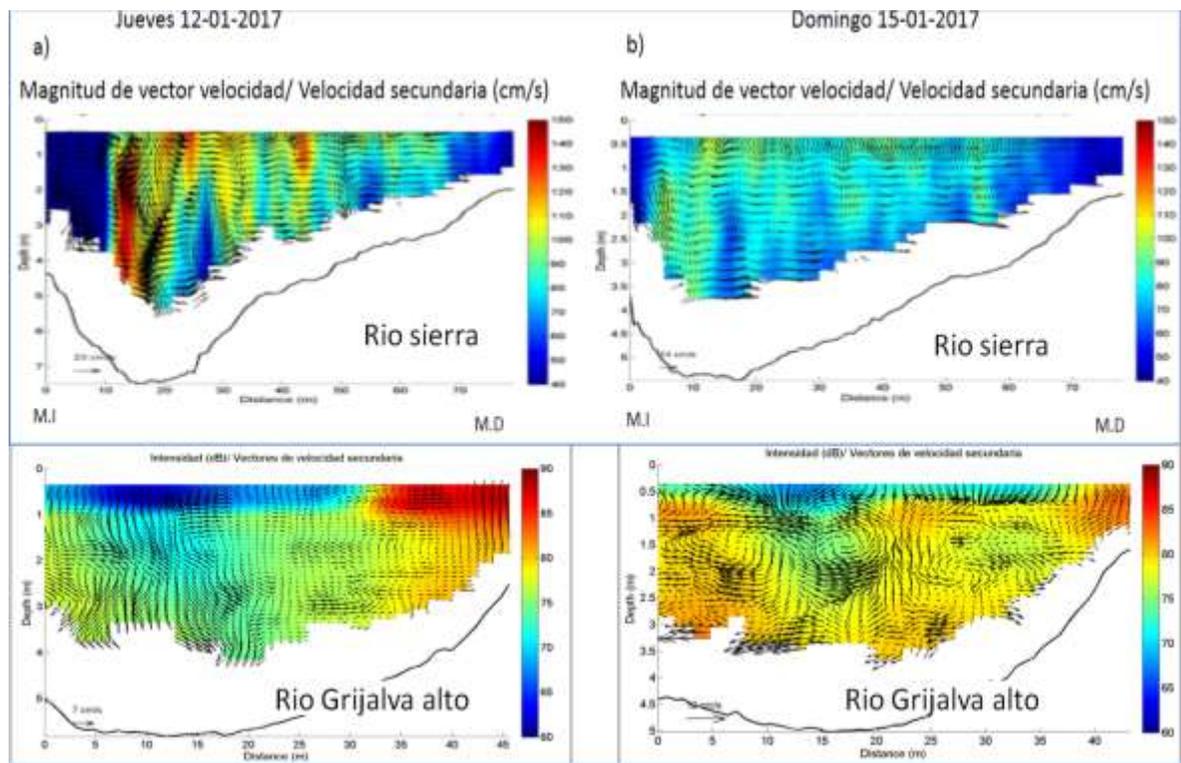


Figura 10.18. Intensidad, vectores de velocidad secundaria y rotación antihorario de Río Sierra y Grijalva Alto.

10.6. CONCLUSIONES

Sobre el análisis del puente La Majahua I y II se puede concluir, que en ambos casos la distribución de gastos sólidos y líquidos se ve alterada por el efecto de las pilas. Sin embargo este cambio es más notorio cuando la distribución de gastos es menor respecto al principal y están en confluencias. Se identificó que en ambos casos existe un tránsito preferente sobre las márgenes izquierda y derecha, siendo más notorio en el puente la Majahua I. De igual forma existe un cambio en las vorticidades de los flujos secundarios, una vez que atraviesan las pilas y este se mantiene hacia aguas abajo. Para el caso de las pilas en una confluencia este cambio en la vorticidad genera una adición a las vorticidades del río de la Sierra en sentido antihorario, por lo que el efecto erosivo es mayor en esa zona.

Finalmente se demostró que el efecto de las pilas en la distribución de gastos sólidos y líquidos es más notorio en sitios antes de una confluencia que después de una confluencia. Ya que se ven más alteradas las vorticidades de los flujos secundarios.

REFERENCIAS

- 1. Brandimarte, L., Paron, P., & Di Baldassarre, G. (2012).** Bridge pier scour: a review of processes, measurements and estimates. *Environmental Engineering and Management Journal*, 11(5), 975-989.
- 2. Canadá (2016).** Yukon State of the Environment. Reporting 2016. Extraído de: http://www.env.gov.yk.ca/publications-maps/documents/SOE_2016.pdf
- 3. González, F., Carrillo, J.J., Morales, J.D., & Patiño, J.A. (2014).** Influencia de las pilas de un puente en la configuración del fondo del cauce de un río: Caso Samaria. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica Puerto Vallarta, Jalisco, México, Octubre 2014.
- 4. Latosinski, F. G., R. N. Szupiany., García, C.M., Guerrero, M., & Amsler M.L. (2014).** Estimation of Concentration and Load of Suspended Bed Sediment in a Large River by Means of Acoustic Doppler Technology. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(7), 1-7pp.
- 5. Priego, H.G. y Rivera-T.F. (2016).** “Secondary currents: Measurement and analysis”, *Atmósfera*, vol.29, no.1, p. 23-34

- 6. Restrepo I., Sánchez L., Galvis A., Rojas J. y Sanabria I. (2007).** “Avances en investigación y desarrollo en agua y saneamiento para el cumplimiento de las metas del milenio”. Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- 7. Rocha A. (2010).** “Introducción a la hidráulica de las obras viales”. Instituto de la Construcción y Gerencia, Lima, Perú, extraído de: <http://apiperu.com/Articulos/pilares.pdf> en julio 2012.
- 8. Szupiany, R. N.; Amsler M. L.; Best J.L. y Parsons, D. R. (2007).** “Comparison of Fixed- and Moving Vessel Measurements with an ADP in a Large River”, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 133, No. 12, p. 1299.

11. CONCLUSIONES Y LINEAS DE INVESTIGACION FUTURA

Se describen a continuación por capítulo las conclusiones de cada trabajo, de los ríos bifurcados Samaria- Carrizal con espigones y estructura transversal; de los afluentes Carrizal-Grijalva2 con sus espigones, estructura transversal y laterales; y de los afluentes Sierra-Grijalva1 este último influenciado por el río Pichucalco con sus estructuras laterales y pilas de puentes en su confluencia.

Capítulo 2. Con la metodología empleada se demostró que el cambio de régimen actual de los gastos en los ríos Pichucalco y Sierra se alteró y la inestabilidad presente es similar a ríos jóvenes, mientras que los ríos Grijalva y Carrizal presentan el comportamiento de un río completamente estabilizado. Ambos casos son ríos que confluyen y en ortofotos el primer caso muestra una desestabilización en su confluencia caso contrario de la segunda. Con esta reducción de gastos por efecto de las estructuras, los procesos hidrológicos y geomorfológicos se alteraron, y el caudal dominante, principal motor de las erosiones verticales y horizontales ya no se define. Tal es el caso del río Carrizal, con un régimen muy lento y una misma elevación antes de las estructuras manejaba un gasto más alto.

Capítulo 3. De lo analizado en la bifurcación Samaria-Carrizal, se observó que antes de 2010, los ríos Carrizal y Samaria alternaban sus gastos y la distribución de éstos era similar. Sin embargo del 2010 a la actualidad, el río Samaria conduce más del 70 % del gasto total. Este comportamiento de la bifurcación alteró el régimen en la zona de la confluencia Grijalva2- Carrizal y a su vez la confluencia Grijalva1-Sierra ya que a partir de 2010 la inversión de gastos en la bifurcación Samaria-Carrizal, generó sobre esa confluencia una descarga acelerada del río Grijalva2 y al no existir la obstrucción provocada por los gastos del río Carrizal, el efecto rotario que tenían el río Grijalva1 y La Sierra dejó de existir por lo que el gradiente de descarga del río de la Sierra ha tratado de compensar de forma global el control de los gastos sobre el río Carrizal.

Capítulo 4. Una vez realizadas las campañas de medición se observó que las velocidades en planta son mayores en la entrada de las curvas, éstas predominan en la curva externa y el centro del río, en las curvas son menores en la parte interna y mayores en la externa y en la salida de las curvas sobre toda la sección son bajas. Este comportamiento observado

está demostrado teóricamente en la literatura y laboratorios. Sin embargo la distribución de las corrientes secundarias en las curvas de la margen derecha, tienen un sentido de rotación antihorario en su vorticidad y las de la margen izquierda aunque no se ven desarrolladas están en sentido horario. Esto podría explicar de forma general porque algunos curvas tienen un proceso más agresivo de erosión, ya que las de mayor erosión observadas en ortofotos y campo fueron las de la margen izquierda. El proceso de migración por efecto de las estructuras observado fue más evidente en las curvas sobre la margen izquierda, ya que tanto el fondo como sus márgenes han sufrido alteraciones y menos evidente en la margen izquierda. En los tres casos el patrón de las corrientes secundarias, aguas abajo y arriba de las curvas fue en sentido antihorario. Y las curvas con las vorticidades más grandes y sobre toda su sección transversal fueron la de la margen izquierda con una orientación en el sentido del flujo hacia abajo y en la derecha hacia arriba.

Capítulo 5. Se encontró que las velocidades en planta, muestran un cambio en la dirección del flujo por efecto de la geometría del cauce, sin embargo en las márgenes donde estas interaccionan con los espigones disminuyen sus velocidades creando zonas de recirculación. Se encontró que en la sección aguas arriba de los espigones la distribución de velocidades fue más uniforme y las corrientes secundarias distribuidas de mejor manera en la margen izquierda. Sobre las secciones entre y después de los espigones se genera un desequilibrio sobre la zona central del flujo, generando una vorticidad con vectores más agresivos sobre el fondo, cargados hacia la margen izquierda y velocidades más bajas entre espigones. La sección aguas abajo fuera de la influencia de los espigones desarrolla un régimen de velocidades central pero con una vorticidad desarrollada en su parte más profunda.

Capítulo 6. Se observó que la distribución de las magnitudes de velocidad aguas arriba de los espigones se mantienen uniformes, características de una zona recta en el río y las recirculaciones secundarias no son tan evidentes. La distribución de las intensidades de los sedimentos en suspensión obtenidas por los equipos acústicos muestran zonas de gran intensidad (entre mayor intensidad más sedimentos en suspensión existe) en toda la

sección transversal. Se muestran velocidades altas en la margen izquierda de la sección, mientras que en la margen derecha existen zonas de bajas velocidades y esto debido a la presencia de los espigones. Para las intensidades de los sedimentos en suspensión, se identificó que eran más altas sobre la margen izquierda y bajas sobre la margen derecha. Observando que las curvas externas son preferentes al transporte sólido y las internas al flujo líquido. Esta configuración de espigones permitió el paso de sedimentos en suspensión y las velocidades secundarias muestran zonas de recirculación entre los espigones que desde el punto de vista de corrientes secundarias están impulsando los sedimentos hacia fuera del área donde el espigón debería mantener una sedimentación.

Capítulo 7. En la zona de estudio del río de la Sierra se obtuvieron velocidades que oscilaron entre 0.96 y 2.4 m/s ya operando los espigones de 1.23 a 3.07 m/s obteniendo con ellos socavaciones generales promedio de 2.22 m y por espigones de 3.72 a 5.52 m en el cauce. Ello indicaría que el régimen tanto de velocidades y de evolución de fondo se vio alterado al momento de la operación de los espigones. Cabe destacar que dicha evolución de forma natural seguiría presentándose ya que el régimen admisible estimado fue de 0.91m/s, para el tipo de fondo de la zona de estudio, impuesto y modelado por el régimen de gasto formativo.

En la zona de estudio del río Tintillo se obtuvieron velocidades que oscilaron entre 1.19 y 1.76 m/s. ya operando los espigones de 1.5 y 2.25 m/s. obteniendo con ellos socavaciones generales promedios de 3.68 m y con espigones de 2.1 a 4.47 m en el cauce. De igual forma el régimen tanto de velocidades y de evolución de fondo se vio alterado al momento de la operación de los espigones.

Para este caso la evolución del fondo de forma natural, seguiría presentándose, ya que el régimen admisible estimado fue de 0.56 m/s en la zona de estudio impuesto y modelado por el régimen hidrométrico evaluado puesto que durante las evaluaciones realizadas, se demostró que los espigones generan una alteración sobre las zonas aledañas. Por lo tanto deberían considerarse otras soluciones que garanticen un efecto positivo no acrecentando la alteración del campo de velocidades y la evolución del fondo y márgenes en cauces de planicie.

Capítulo 8. De las campañas de medición y del análisis realizado a la dos campañas de medición en la bifurcación podemos observar que de forma global, la hidrodinámica de gastos medios está influenciada por la geometría local y los espigones aguas arriba. Los tránsitos preferentes y las fluctuaciones de gastos medios generan un desequilibrio en las velocidades en planta magnitudes del vector velocidad y los flujos secundarios.

Del análisis realizado en las secciones transversales podemos inferir que la vorticidad característica de los flujos secundarios no es homogénea en ninguna de las tres secciones analizadas y las intensidades de los sedimentos se concentran en las vorticidades, con giro en sentido horario de las manecillas del reloj. De igual forma se encontró que en ambos casos sobre las secciones medidas, el fondo del cauce sufrió movilidad y zonas en donde la tasa de transporte fue alta se sedimentaron. Ahora bien se observó que si la vorticidad era en sentido contrario a las manecillas del reloj, esas zonas sufrieron erosión. De lo observado en planta y de las intensidades de los sedimentos se encontró que el régimen de velocidades disminuye en las secciones cercanas a la estructura y la concentración de sedimentos se hace más homogénea sobre esa zona.

De la metodología implementada para estimar los esfuerzos de corte y de las ecuaciones utilizadas por Jonathan *et al*, 2011 y los datos tomados de las mediciones de CONAGUA, 2014 se pudieron predecir las mismas zonas que tendrían una tendencia a sedimentarse y erosionarse observadas de las campañas, y donde este proceso sí se dio. El parámetro fundamental utilizado fue el esfuerzo admisible del fondo y sobre la celda promediada, punto a punto contrastando contra el esfuerzo que transmitía el flujo-sedimento se encontraron las zonas que tenían una probabilidad alta de moverse o sedimentarse.

Capítulo 9. A partir de los resultados obtenidos de las campañas de medición, se identificaron las relaciones que guardan las magnitudes de los vectores de velocidad, así como el comportamiento de las corrientes secundarias y la intensidad de la concentración del sedimento en suspensión. Se realizaron los análisis de los vectores y magnitudes de velocidad en planta de los días 12 y 15 de enero de 2017. Identificándose que los valores de velocidad del río Grijalva Alto no superan magnitudes de 0.70 m/s, mientras que el río de La Sierra mantiene valores medios de 1.00 m/s. En la zona de la confluencia las

velocidades de ambos ríos están bien definidas las de menor magnitud se encuentran en la margen izquierda que son aportadas por el río Grijalva Alto que en conjunto con el transporte de sedimento en suspensión y por ser la de menor densidad, el material que pasa en está margen no alcanza a depositarse, aunado a la presencia de las velocidades secundarias que dan forma al fondo y que en gastos altos se suman de Grijalva alto al río de la Sierra y el efecto de las pilas de los puentes es el causante.

Caso contrario ocurren en la margen derecha de la confluencia donde la interacción de las velocidades es menor y la presencia de las velocidades secundarias no crea zonas de recirculación permitiendo que el material en suspensión se deposite. En esta zona se encuentra el material de mayor densidad. Los resultados de los análisis de velocidades permisibles y socavación general muestran que la zona es inestable, debido al tipo de material que conforma el cauce el cual tiende a erosionarse durante eventos extraordinarios, quedando demostrado con las mediciones realizadas de hidrodinámica e intensidad de sedimentos.

Capítulo 10. Sobre el análisis del puente La Majahua I y II, y la alteración de pilas a la distribución de gastos sólidos y líquidos se encontró que antes de un confluencia el cambio en las vorticidades de las corriente secundarias pueden adicionarse a las del río principal y el efecto erosivo se acrecienta. De igual forma se observó que por el efecto de las pilas, el tránsito preferente de los sedimentos es sobre las márgenes. Para el caso de la distribución de las líneas de flujo secundarias en el puente la Majahua I y II existen dos tránsitos preferentes, pero éstos están más desarrollados a gastos altos.

De acuerdo a las mediciones realizadas, los efectos más notorios se dan cuando la distribución de gastos es menor en un 50% del cauce principal el río de la Sierra.

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

En la tesis se describen los análisis globales y locales de las estructuras, que han alterado el régimen de los cauces de planicie. Puesto que la cuenca hidrográfica está conformada por tres zonas: alta, media y baja es necesario ver los efectos primarios, que son los escurrimientos de gasto líquido y sólido en las cuencas altas. Sin embargo muchas de ellas carecen de aforos en sus tributarios de precipitación e hidrometría.

Se plantea en el anexo A una forma de estimar el cambio de régimen global y el papel que juega la alteración del uso de suelo. Se utilizan herramientas GIS para identificar zonas que han variado su uso de suelo y mediante hidrometría aguas abajo, en una sola estación hidrométrica global de la cuenca, estimar la variación de los escurrimientos utilizando como períodos de evaluación los años del raster de INEGI de las mediciones lidares tomadas en la zona, en los años 2009 y 2013.

De igual forma en anexo B, para estimar los escurrimientos en los tributarios sin aforo de cuencas altas se propone una metodología en donde los recorridos de campo, elevaciones identificadas de avenidas presentadas, precipitaciones de la estación de mayor influencia modelación numérica bidimensional se estimen y correlacionen los gastos asociados a esas elevaciones, con la finalidad de una vez calibrados los parámetros del modelo poder extrapolar, eventos distintos de uso de suelo y precipitación en la cuenca.

Ambos estudios van encaminados a conocer en sitios sin aforos y una sola estación global en la cuenca el cambio de régimen hidrodinámico y sedimentológico al que han sido sometidas estas cuencas. Y con ello verificar si el comportamiento de las cuencas altas altera el de las bajas demostrando con ello de forma global el cambio que generan las estructuras aun sistema de planicie con cauces aluviales.

ANEXOS

ANEXO A: CAMBIO DE REGIMEN EN CUENCAS ALTAS NO AFORADAS.

CAMBIO DE USO DE SUELO EN CUENCAS ALTAS NO AFORADAS Y SU REPERCUSIÓN EN EL CAMBIO DE RÉGIMEN DE LOS ESCURRIMIENTOS MEDIANTE UN SIG.

Resumen

La alteración del uso de suelo, altera el régimen de escurrimiento. En este trabajo se estimó la pérdida de suelo por erosión hídrica, aplicando la ecuación universal de pérdida de suelo USLE. Y por medio de un análisis espacial realizado en un SIG, de la subcuenca del río Puxcatán en el municipio de Tacotalpa, Tabasco. Se elaboraron raster de cada uno de los factores que componen la USLE y se obtuvo la erosión hídrica 2009 y 2013. Identificando zonas nuevas con un potencial a erosionar en 2013 y de recuperadas.

Para identificar el cambio de régimen del escurrimiento se evaluaron los gastos y elevaciones de la estación hidrométrica Puxcatán y mediante gráficos se generaron tres análisis antes del 2009, del 2009 a 2013 y después de 2013. Con ellos se identificó la variación del cambio de régimen del escurrimiento.

Palabras claves: Erosion hídrica, USLE, pérdida de suelo, Sistema de información geográfica

Introducción

La erosión es un proceso natural que conlleva a la degradación del suelo de un área determinada, y los sitios más afectados por este fenómeno son los que están expuestos a la acción de la lluvia y/o el viento. La erosión hídrica causada por lluvias o escurrimientos, es un fenómeno significativo, porque genera perturbaciones físicas en el ambiente, como son la disminución en la producción de zonas agrícolas, la degradación del suelo y la cobertura vegetal, y la reducción de la vida útil y funcionamiento de obras hidráulicas debido al aumento del transporte de sedimento en los cauces (Restrepo & Alviar 2013; Mendoza *et al.*, 2015).

La erosión hídrica es un agente agresivo en el proceso de erosión de la tierra (Santacruz, 2011). Este tiene inicio desde el momento en que las gotas de lluvia impactan el suelo, produciendo el fenómeno conocido como splash erosion (erosión por salpicadura) o cuando el suelo no es capaz de absorber toda el agua proveniente de una tormenta y ésta comienza a escurrir. Estos factores juntos hacen posible que, del volumen total de masa desplazada por la erosión, más del 92 % sea a causa de la erosión hídrica (FAO, 2000).

Los procesos erosivos se agudizan por la explotación de los recursos naturales, entre los que destacan la reducción y destrucción de la cubierta vegetal, a través de la tala de árboles, introducción de cultivos o sobre pastoreo, el suelo queda expuesto a la acción de procesos de desertificación, siendo la erosión hídrica uno de esos procesos. También en zonas altas o de topografía abrupta, donde se presentan pendientes de terreno escarpadas, ya que el potencial de erosión incrementa con la pendiente.

Para solucionar los problemas ocasionados por la erosión hídrica, se han desarrollado ecuaciones empíricas que permiten estimar la pérdida del suelo, destacando por su amplia utilización, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo USLE (por sus siglas en inglés) (Wischmeier y Smith 1978). Esta ecuación permite predecir las pérdidas de suelo por hectárea anuales.

Alrededor del mundo se han realizado diversos estudios aplicando la metodología expuesta por la USLE (Cléric & Garcia, 2001; Oñate, 2004), en países como Grecia (Dimitríos *et al.*, 2013) e Italia (Diodato, 2004) sin mencionar otros, se hicieron estudios donde se han identificado zonas susceptibles o con alto grado de erosión, México no se ha

quedado atrás en estos estudios, estados como Guerrero (Cervantes *et al.*, 2014) y Michoacán (Bravo *et al.*, 2008) se han propuesto medidas de reforestación del área afectada .

En los últimos años, para realizar una estimación efectiva de la pérdida de suelo se ha implementado el uso de sistemas de información geográfica (SIG) (Conesa, 1996; Barríos & Quiñonez, 2000; Flores *et al.*, 2003; Röder *et al.*, 2006; Romero *et al.*, 2010), aprovechando su gran potencial en el manejo de información digital georreferenciada.

El objetivo de esta investigación fue estimar la pérdida de suelo debido a la erosión hídrica mediante aplicación conjunta de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo en un Sistema de Información Geográfica, para identificar las zonas susceptibles , para la construcción de obras de hidrotecnia y biotecnia para la restauración de la subcuenca del río Puxcatán.

Localización

La zona de estudio se encuentra ubicada en la Región Hidrológica 30 que abarca los estados de Tabasco y Chiapas, en el sureste de México. En esta región hidrológica se encuentra la cuenca R. Grijalva-Usumacinta, conformada parcialmente por la sub-cuenca RH30Dn, también conocida como sub-cuenca del río Puxcatán. El estudio se centra principalmente en el área de la subcuenca que pertenece al estado de Tabasco (Figura 1), ya que un estudio sobre evaluación de la degradación de la tierra causada por el hombre en la República mexicana (SEMARNAT-CP-2022), se señala que Tabasco es uno de los tres estados más afectados por procesos de degradación.

A lo largo del cauce del río Puxcatán, una vez que llega a la planicie, lugar donde se localiza la ciudad y municipio de Macuspana, se registran año con año la ocurrencia de grandes volúmenes de agua que generalmente llegan a inundar las zonas de productivas agrícola y ganadero, esto ocasionado por la acumulación de la lluvia que se genera en las parte alta de la cuenca, que al llegar a la planicie llega a producir desbordamiento hacia la zona de producción, y en eventos extremos a inundar zonas urbanas, como los eventos del 2007 al 2010. Esta situación ha frenado el desarrollo económico de la región y es un obstáculo para la plena utilización de su potencial agrícola e industrial.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

Debido a su extensión, su pendiente pequeña a la salida de la zona montañosa, su localización geográfica cercana (aproximadamente 60 km) a la zona costera, es afectada por ciclones tropicales de agosto a noviembre y por frentes fríos de diciembre a marzo, que producen lluvias acumuladas anuales superiores a 3000 mm, casi cinco veces más de lo que llueve en el valle de México. El volumen de escurrimiento medio anual es de 7,221.8 mm³, con una longitud aproximada del cauce de 160 km desde su origen hasta su confluencia con el río Tulijá.

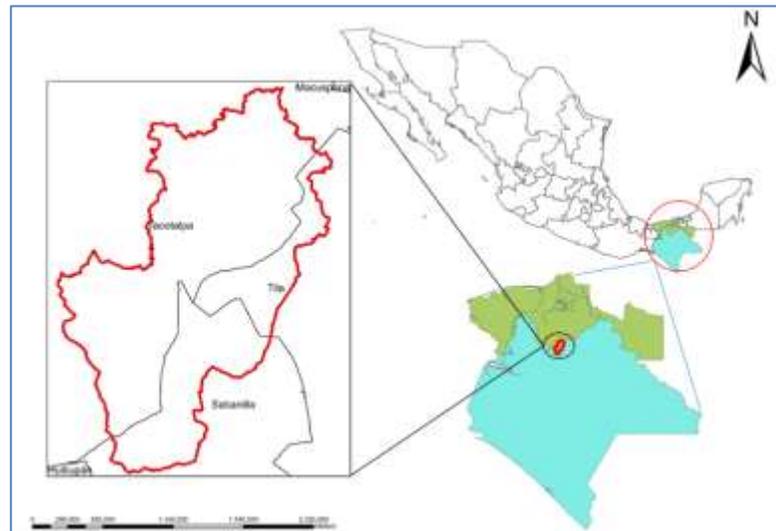


Figura 1. Delimitación de la zona de estudio.

Metodología

Recorridos de campo

Dentro de esta zona se realizaron recorridos preliminares para la caracterización e identificación de la situación actual de la subcuenca del río Puxcatán, apoyada por especialistas en hidráulica, geotecnia, estructuras, ecología, donde se definieron las zonas dañadas por la erosión. En la figura 2 se muestran los sitios recorridos:



Figura 2. Recorridos realizados en la zona de estudio.

Información climatológica y cartográfica

En esta investigación se utilizaron series de datos de precipitación máxima anual para el período 1984 – 2014 de la base de datos de CLICOM (Conagua, 2014) de seis estaciones climatológicas cerca del área de estudio (Figura 3). En la Tabla 1 se presentan las características de las estaciones climatológicas utilizadas en esta investigación. Se utilizó información cartográfica de topografía de un modelo digital de elevaciones (MDE) escala 1:10000 de alta resolución LIDAR tipo terreno, con una resolución de 5 m (INEGI, 2015). Así mismo, se utilizó información cartográfica edafológica, de uso de suelo y vegetación (INEGI, 2011; CONAFOR, 2015).

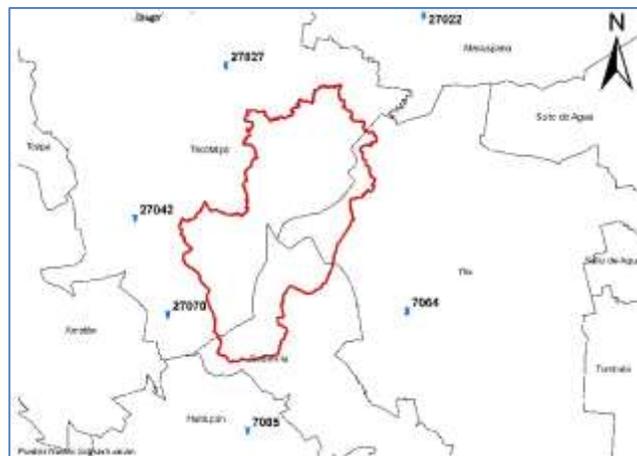


Figura 3. Ubicación e estaciones climatológicas utilizadas.

Tabla 1. Estaciones climatológicas seleccionadas para este estudio.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

Clave	Nombre	Longitud	Latitud	Altitud (msnm)	Precipitación
27070	Oxolotán	-92.75	17.3806	63	317
27042	Tapijulapa	-92.7775	17.4611	49	343.9
7064	Finca Morelia	-92.55	17.3833	1307	218
7005	Almandro	-92.6833	17.2833	148	159
27027	Lomas Alegres	-92.7014	17.5889	23	265.2
27022	Macuspana	-92.5361	17.6306	22	336

Determinación de los factores de la USLE

La erosión hídrica presente en la zona se estimó con la Ecuación Universal de Pérdida del Suelo, que representa un modelo para predecir la cantidad de pérdida de suelo por escurrimiento en áreas específicas bajo determinados sistemas de manejo y cultivos. La USLE se expresa en el sistema métrico internacional mediante la ecuación (1).

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (1)$$

Dónde: *A* es la pérdida de suelo (t/ha/año); *R* el factor erosividad de la lluvia (MJmm/ha.h); *K* el factor erosionabilidad del suelo (ton.h/MJ.mm); *L* el factor longitud del terreno (adimensional); *S* el factor pendiente del terreno (adimensional); *C* el factor cobertura y manejo de la vegetación (adimensional); y *P* el factor prácticas de conservación (adimensional). El modelo de la USLE puede usarse en cualquier región geográfica simplemente modificando sus variables de acuerdo a las características propias de la región de estudio (Colín y Ibáñez, 2013). La pérdida de suelo por erosión hídrica se calculó mediante ArcGis, usando el modulo álgebra de mapas para generar mapas tipo raster independientes para cada variable del modelo de la USLE.

Factor de erosividad de la lluvia

Es la capacidad potencial de la lluvia para producir erosión y está estrechamente relacionado con las características climáticas del sitio (precipitación). Se obtiene a partir del producto de la energía cinética liberada por la lluvia (*E*) y la máxima intensidad de precipitación durante un intervalo de 30 minutos (*I₃₀*) en mm/h; esto significa que para el cálculo de dicho índice es necesario contar hietogramas de tormentas registradas por pluviógrafos o actualmente por una Estación Meteorológica Automática (EMA), la cual no siempre es posible, como es el caso de la zona de estudio. En esta investigación para obtener el factor de erosividad *R* se aplicaron ecuaciones matemáticas de erosividad

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

determinadas por Cortés (Becerra, 1997), las cuales están asociadas a 14 diferentes regiones de la república mexicana (Figura 4 y Tabla 2). La zona de estudio se encuentra ubicada en la región 12. Las ecuaciones de erosividad regionalizadas dependen de P que representan la precipitación media anual. Una vez obtenido el factor de erosividad R para cada una de las estaciones climatológicas, se generó un raster de dicho factor mediante el toolbox *Spatial Analyst tool* de ArcGis, utilizando el método de Spline.



Figura 4. Regionalización del factor R (adaptada de Becerra 1997; Montes, 2011)

Tabla 2. Ecuaciones para calcular el factor R (Becerra 1997).

Región	Ecuación	R ²
1	$1.2078 * P + 0.002276 * P^2$	0.92
2	$3.4555 * P + 0.006470 * P^2$	0.93
3	$3.6752 * P - 0.001720 * P^2$	0.94
4	$2.8959 * P + 0.002983 * P^2$	0.92
5	$3.4880 * P + 0.000188 * P^2$	0.94
6	$6.6847 * P + 0.001680 * P^2$	0.90
7	$-0.0334 * P + 0.0061 * P^2$	0.98
8	$1.9967 * P + 0.003270 * P^2$	0.98
9	$7.0458 * P - 0.002096 * P^2$	0.97
10	$6.8938 * P + 0.000442 * P^2$	0.95
11	$3.7745 * P + 0.004540 * P^2$	0.98
12	$2.4619 * P + 0.006067 * P^2$	0.96
13	$10.7427 * P - 0.001008 * P^2$	0.97
14	$1.5005 * P + 0.002640 * P^2$	0.95

Factor de erodabilidad del suelo K

Este factor representa la respuesta del suelo a una determinada fuerza o mecanismo erosivo, es decir, representa la susceptibilidad del suelo a ser erosionado. Por tanto, el factor K depende de las características edáficas tales como textura, estructura, estabilidad de agregados, pedregosidad superficial, entre otros. Para determinar este factor se utilizó la información edafológica del INEGI, utilizando las unidades de suelo de la clasificación FAO-UNESCO (1968), y se generó un raster de dicho factor mediante herramientas de ArcGIS.

Factor de longitud y grado de la pendiente LS

El factor LS relaciona la distancia que recorre el agua sobre el terreno antes de cambiar de dirección y la pendiente del terreno en la que se estiman las pérdidas de suelo. Esta relación determina la velocidad del flujo. Las pendientes pronunciadas producen velocidades altas del flujo superficial, lo cual conlleva a un incremento potencial de la erosión. En esta investigación para calcular el factor de longitud de la pendiente L se utilizó la ecuación 2 (Foster et al. 1977):

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (2)$$

Dónde: λ es la longitud de la pendiente en metros; y m es un exponente calculado con la ecuación 3, propuesta por Foster et al. (1977):

$$m = \frac{B}{(B+1)} \quad (3)$$

Los valores del coeficiente B para suelos moderadamente susceptibles a la erosión se estimaron con la ecuación 4 (McCool et al., 1989):

$$B = \frac{\frac{\sin \theta}{0.0896}}{3.0 (\sin \theta)^{0.8} + 0.56} \quad (4)$$

Dónde: θ es la pendiente del terreno en grados.

El valor de λ se obtuvo a partir de la ecuación 5 propuesta por flores López et al.

(2003):

$$\lambda = \frac{15}{\cos \theta} \quad (5)$$

Para determinar la pendiente del terreno se utilizó un modelo digital de elevación LIDAR con una resolución de 5 m, mediante la generación de un raster de pendiente en grados utilizando ArcGIS. El factor inclinación de la pendiente (S), se calculó mediante las ecuaciones 6a y 6b propuestas por:

$$S = 13.8 \text{ Sen } \theta + 0.03, \text{ para } S < 9\% \quad (6a)$$

$$S = 16.8 \text{ Sen } \theta - 0.50, \text{ si } S \geq 9\%$$

(6b)

Factor de cobertura y uso de suelo

El factor de cultivo C es un índice que representa el grado de cobertura y protección que presenta la vegetación frente al impacto de las gotas de lluvia y la fuerza del flujo superficial. Wischmeier y Smith (AÑO) propusieron un modelo para calcular los valores de C , con valores que varían entre 0 y 1, los cuales dependen del tipo de vegetación existente y de su grado de cobertura, mientras la cobertura vegetal sea mayor, el valor de C es cada vez menor y cuando el terreno no tiene ninguna protección el valor tiende a 1.0. Este es un factor importante en la ecuación USLE, que por muy abrupto que sea el terreno, si éste tiene abundante vegetación, la erosión será leve. Los valores del factor C se determinaron a partir de información cartográfica de uso de suelo y vegetación del INEGI serie IV y V de los años 2009 y 2013, respectivamente las cuales contienen la ubicación, distribución y extensión de diferentes comunidades vegetales, usos agrícolas

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

con sus respectivas variantes en tipos de vegetación. A partir de esta distribución espacial de la cobertura vegetal, se asignó un valor de acuerdo con diversas bibliografías (Becerra 1997, Montes, 2002), algunos de estos valores se encuentran en la tabla 3.

Tabla 3. Factor C de uso de suelo y vegetación

Vegetación y/o uso de suelo C	Factor C	Vegetación y/o uso de suelo C	Factor C
Bosque de pino-encino	0.01	Sabana	0.54
Bosque de tascate	0.01	Selva alta perennifolia	0.45
Bosque de Mesófilo de montaña	0.01	Selva alta subperennifolia	0.45
Chaparral	0.65	Selva baja caducifolia	0.50
Manglar	0.10	Selva baja espinosa caducifolia	0.50
Matorral crasicaule	0.65	Selva baja espinosa subperennifolia	0.50
Matorral de coníferas	0.20	Selva mediana caducifolia	0.45
Matorral desértico microfilo	0.25	Selva mediana perennifolia	0.45
Matorral desértico roetofilo	0.25	Selva mediana subcaducifolia	0.45
Matorral espinoso tamaulipeco	0.45	Tular	0.10
Mezquital	0.65	Vegetación de desiertos arenosos	0.85
Palmar inducido	0.75	Vegetación de dunas costeras	0.85
Palmar natural	0.75	Vegetación de galería	0.85
Pastizal gipsofilo	0.25	Vegetación halófila	0.85
Pastizal halofilo	0.25	Zona urbana	0.01
Pastizal inducido	0.02	Cuerpos de agua	1.00
Pastizal natural	0.07	Agricultura en riego	0.55
Popal	0.85	Agricultura de temporal	0.75
Pradera de alta montaña	0.05	Agricultura de humedad	0.25

Factor de prácticas de protección del suelo

El factor *P* cuantifica el impacto de las prácticas de protección contra la erosión, como pueden ser el laboreo a nivel, el cultivo en fajas alternantes y el aterrazado, entre otras.

Para el control de la erosión se debe mantener un buen nivel de materia orgánica, asegurando una buena estructura y aumentando la resistencia del suelo a dicha erosión. El

suelo debe estar protegido por una cubierta vegetal que impida el impacto de la lluvia y que controle el escurrimiento del agua. Existen metodologías como el cultivo en contorno, cortando la dirección de la pendiente y construyendo pequeñas terrazas de tierra, que frenan la velocidad del agua, permitiendo que esta se infiltre en el suelo. Cuando la erosión alcanza niveles de gravedad con la formación de zanjas o "cárcavas", éstas pueden controlarse con estructuras transversales (diques) construidas con piedras, troncos y ramas o mampostería. Estos diques se construyen en forma escalonada dentro de la cárcava, con el objeto de disminuir la velocidad de escurrimiento del agua y retener los sedimentos que transporta. Mediante terrazas o canales de derivación construidos en la zona superior de la cárcava, se controlan los escurrimientos de agua provenientes de las tierras más altas y se los desvía, protegiendo la cárcava.

Para el control de la erosión se debe mantener un buen nivel de materia orgánica, asegurando una buena estructura y aumentando la resistencia del suelo a dicha erosión. El suelo debe estar protegido por una cubierta vegetal que impida el impacto de la lluvia y que controle el escurrimiento del agua. Existen metodologías como el cultivo en contorno, cortando la dirección de la pendiente y construyendo pequeñas terrazas de tierra, que frenan la velocidad del agua, permitiendo que esta se infiltre en el suelo. Cuando la erosión alcanza niveles de gravedad con la formación de zanjas o "cárcavas", éstas pueden controlarse con estructuras transversales (diques) construidas con piedras, troncos y ramas o mampostería. Estos diques se construyen en forma escalonada dentro de la cárcava, con el objeto de disminuir la velocidad de escurrimiento del agua y retener los sedimentos que transporta. Mediante terrazas o canales de derivación construidos en la zona superior de la cárcava, se controlan los escurrimientos de agua provenientes de las tierras más altas y se los desvía, protegiendo la cárcava.

Comparativa de escurrimientos de estación de aforo Macuspana y sus usos de suelo

Para conocer la alteración del cambio de uso de suelo de la cuenca Puxcatan sobre los escurrimientos, se generaron tres estratos de análisis una del año 2006 al 2009 primer período de INEGI de las capas de uso de suelo 2009; 2010 al 2013 como segundo período capa de uso de suelo 2013 y finalmente escurrimientos recientes registrados 2014 (ver figura 5).

De igual forma para hacer un contraste global de la zona, se seleccionaron en el análisis la estación Tapijulapa y oxolotan, clasificadas como cuencas altas adosadas a la de Puxcatan.

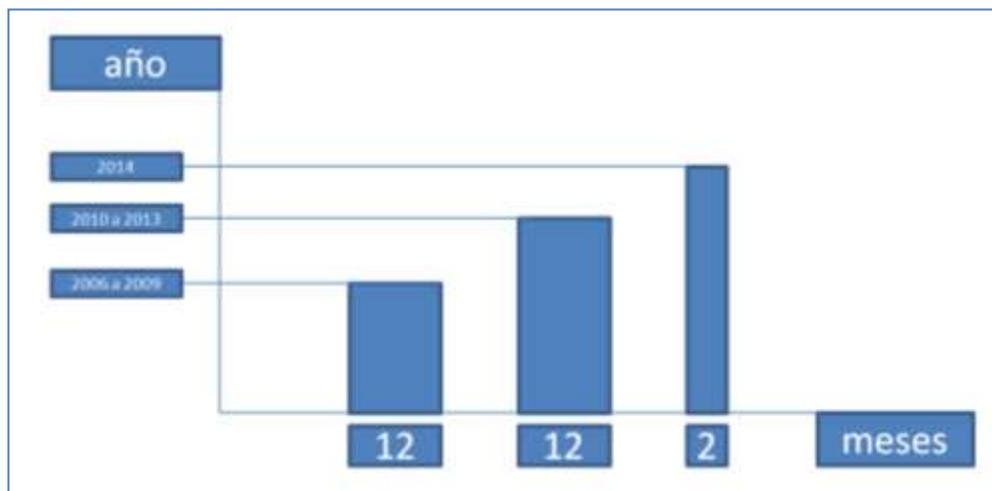


Figura 5. Estratos de datos usados para comparativa Cuenca Puxcatan

Resultados

En la tabla 4 se muestran las características morfométricas de la microcuenca.

Tabla 4.. Características morfométricas de la microcuenca del río Puxcatán

Parámetro	Unidades	Valor
Área de la cuenca	km	232.26
Perímetro del parteaguas	km	134.53
Elevación cota máxima	msnm	1518.67
Elevación cota mínima	msnm	14.39
Índice de Gravelius	Adimensional	2.47

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

Pendiente media de la cuenca	%	32.02
Total de corrientes	Adimensional	447
Longitud de corrientes	km	352.36
Densidad de drenaje	km·km	1.52
Densidad de corrientes	Adimensional	1.92
Orden	Adimensional	5
Longitud de la corriente principal	km	37.7
Pendiente media del cauce	%	0.34
Factor de forma	Adimensional	0.16

Para la microcuenca del río Puxcatán se obtuvieron los factores R , LS , C , K y P , y después se elaboraron mapas espaciales o raster de cada uno de estos factores.

Variación espacial del factor de erosividad de la lluvia R

El área de estudio se encuentra ubicada en la zona número 12 de la clasificación propuesta por Becerra (1997) para determinar el factor R . En la Tabla 5 se muestran los factores R calculados para cada una de las estaciones climatológicas utilizadas en esta investigación. El factor de erosividad de la lluvia varió entre 544.82-1512.14 Mj mm/ha h.

Tabla5. *Factor de erosividad de la lluvia R en la subcuenca del río Puxcatán.*

Estación	Longitud	Latitud	Precipitación	Factor R
27070	-92.75	17.3806	317	1390.09
27042	-92.7775	17.4611	343.9	1564.17
7064	-92.55	17.3833	218	825.02
7005	-92.6833	17.2833	159	544.82
27027	-92.7014	17.5889	265.2	1079.59
27022	-92.5361	17.6306	336	1512.14

En la Figura 6 se muestra la variación espacial del factor R en la subcuenca del río Puxcatán.

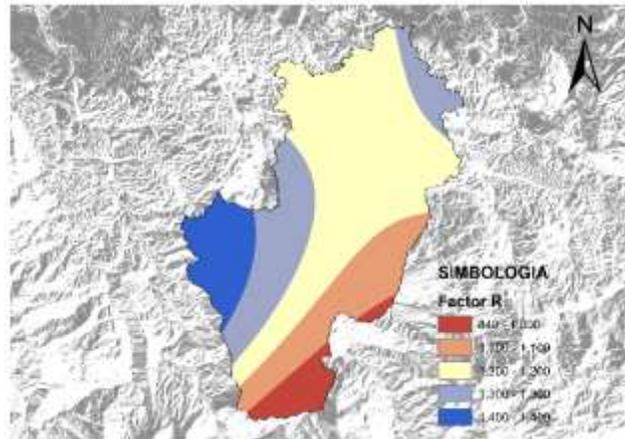


Figura 6. Variación espacial del factor de erosividad de la lluvia R en la subcuenca del río Puxcatán.

Variación espacial del Factor de erodabilidad del suelo K

De acuerdo a la información edafológica de INEGI, en la subcuenca del río Puxcatán existen cinco tipos de suelo, predominando X, Y, o Z. De acuerdo a la clasificación de la FAO- UNESCO (1968) de las unidades del suelo, en la Tabla 6 se presentan los factores de erodabilidad *K* y en la Figura 7 su representación espacial. El factor de erodabilidad del suelo tuvo una variación de 0.5-2.0.

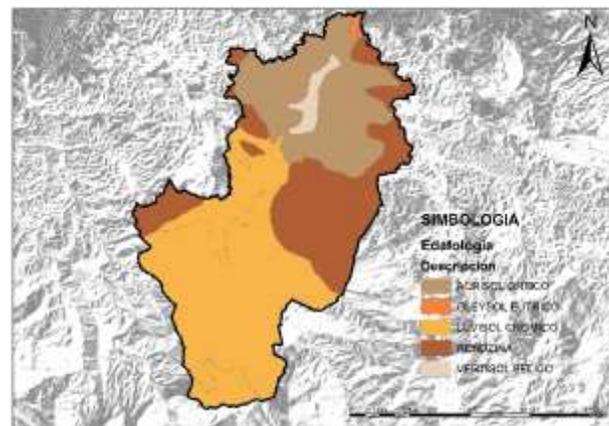


Figura 1. Tipo de suelo predominante en la zona de estudio.

Tabla 6. Valores estimados del factor de erodabilidad K por tipo de suelo.

Tipo de suelo	Textura	Área (km ²)	%	Factor K
Acrisol	Fina	56.44	24.30	0.013

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

Gleysol	Fina	0.74	0.32	0.013
Luvisol	Media	109.34	47.08	0.04
Rendzina	Media	61.06	26.29	0.020
Vertisol	Fina	4.68	2.01	0.026

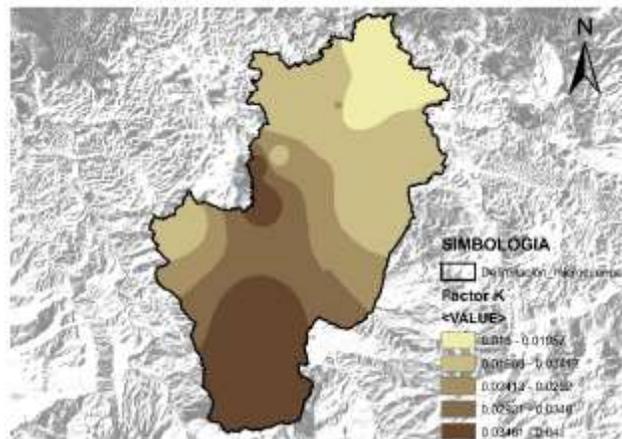


Figura 2. Variación espacial del factor de erodabilidad K en la subcuenca del río Puxcatán

Variación espacial del factor de longitud y grado de la pendiente LS

Con el modelo digital de elevaciones LIDAR se clasificaron las pendientes de la cuenca de estudio, generándose un mapa de pendientes (Figura 9). La pendiente media de la microcuenca fue del 32.02 %.

La mayor parte de la superficie de la microcuenca (79.98 %) tiene una pendiente superior al 10%. Los factores de topografía *L* y *S* varían entre 0.03-5.40, encontrándose los valores más altos en las partes alta de la microcuenca y los valores más bajos en las zonas de planicie. En la Figura 9 se muestra su distribución espacial.

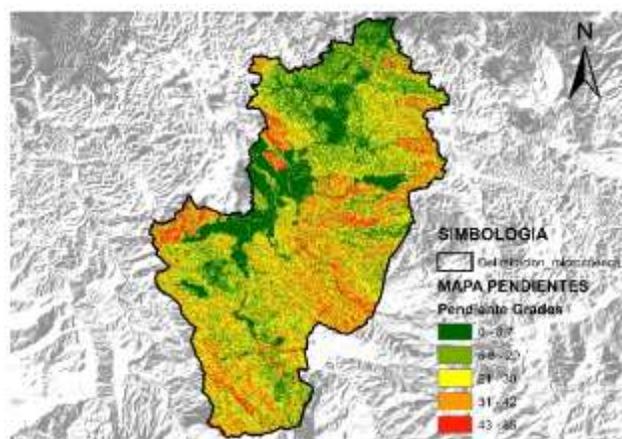


Figura 3. Rango de pendientes de la subcuenca del río Puxcatán.

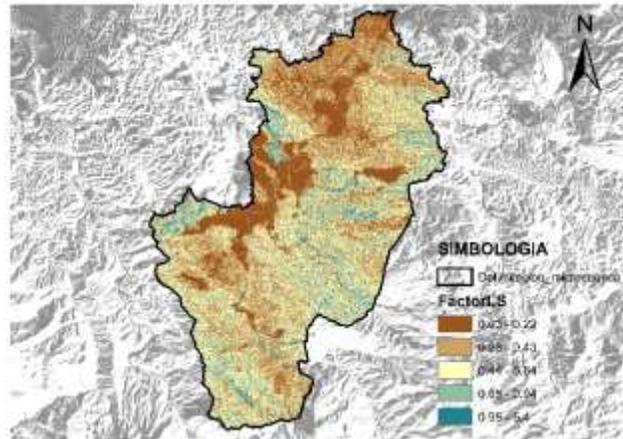


Figura 4. Variación espacial del factor de longitud y grado de la pendiente LS en la subcuenca del río Puxcatán.

Variación espacial del factor de cobertura y uso de suelo C

Utilizando la información de cobertura y uso de suelo de los años 2009 y 2013 en la microcuenca del río Puxcatán, se comparó la variación que hubo en la cobertura vegetal en esos años, para estimar el impacto potencial de la erosión en zona de estudio. En la Figura 11 se muestran las coberturas vegetales para los años 2009 y 2013.

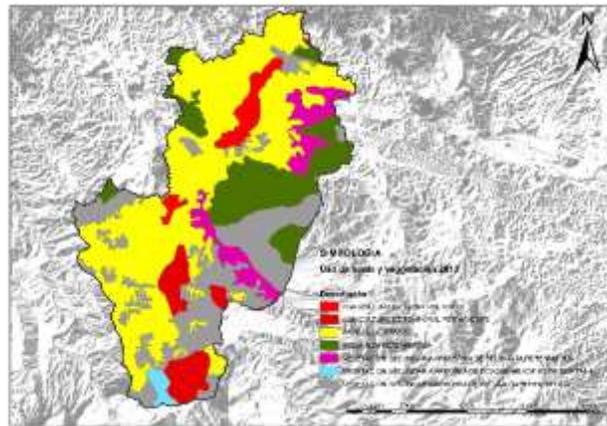
Se puede observar que ha habido un aumento del 8.52 % al 9.63 % de las áreas ocupadas principalmente para agricultura temporal, ocasionando una disminución de 91.48% a 90.37% de las demás coberturas vegetales con respecto al área de la microcuenca.

De acuerdo al uso de suelo de la microcuenca se asignaron los valores del factor C, los cuales se muestran en la tabla 7.

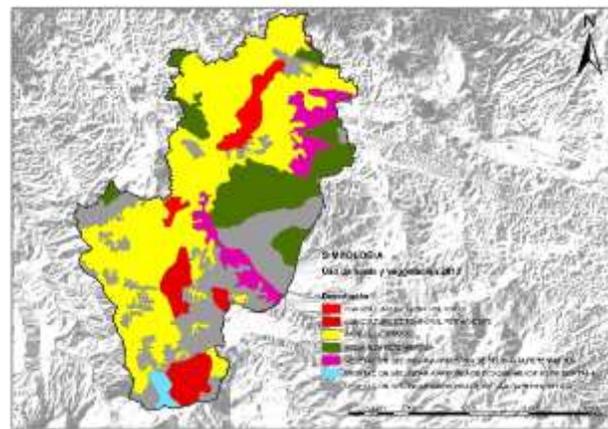
Tabla 7. Valores del factor de cobertura vegetal y uso de suelo C.

Uso de suelo y cobertura vegetal	Área (km2) - 2009	Área (km2) - 2013	Diferencia (km2)	Factor C
Agricultura de temporal	19.80	22.37	2.57	0.75
Pastizal cultivado	107.06	107.60	0.54	0.02
Selva alta perennifolia	34.64	33.05	-1.59	0.45
Vegetación secundaria arbustiva de selva alta	70.77	69.25	-1.52	0.45

La distribución espacial del factor de cobertura de vegetal C del año 2009 y 2013 se muestran en la figuras 10a y 10b, respectivamente.



a)



b)

Figura 5. (a) Uso de suelo y vegetación 2009 y (b) uso de suelo 2015

Factor de prácticas de protección del suelo

Dado que dentro de la zona de estudio no se han realizado medidas de protección contra la erosión (ausencia de prácticas conservación), se asignó un valor de 1 al parámetro P para toda la microcuenca.

Estimación de la erosión en la subcuenca del río Puxcatán

Una vez obtenido el comportamiento espacial de cada una de las variables que intervienen en la ecuación universal de pérdida de suelo, se procedió a realizar un álgebra de mapas de dichas variables y obtener la pérdida de suelo, debido a la erosión hídrica. Obteniéndose mapas raster que representan la variación espacial de la erosión hídrica, para las distintas cartografías de usos de cobertura analizados, 2009 y 2013 (Figura 11).

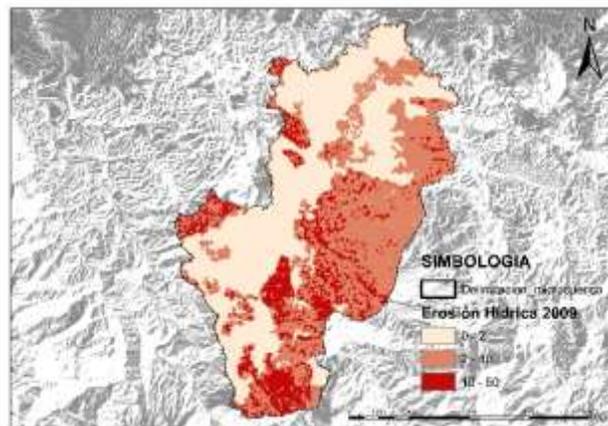
“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

En las Figuras 12 se muestra la distribución espacial de la erosión y en la tabla 8 el porcentaje de áreas de acuerdo a la clasificación de la FAO. Donde se observa que hubo un aumento en la erosión muy pequeña en ligera, moderada y alta. Por lo que el uso de cambio de suelo en toda la cuenca no es representativo.

En porcentajes en el 2009 el 48.82% de la cuenca presentaba erosión nula, disminuyendo este porcentaje en el 2013 a 48.08%. Con ello hubo un aumento en la erosión ligera y moderada, 0.71 % y 0.03 %, respectivamente.

Tabla 8. Clasificación de la erosión de la FAO.

Clase	Rango	Superficie afectada		Superficie afectada	
		2009		2013	
		Ha	%	km2	%
NULA	<2	11338.48	48.82	11166.44	48.08
LIGERA	2-10	9134.13	39.33	9298.96	40.04
MODERADA	10-50	2753.20	11.85	2760.39	11.88
ALTA	50-200	0.39	0.0016	0.42	0.0017
MUY ALTA	200>	0	0	0	0.00



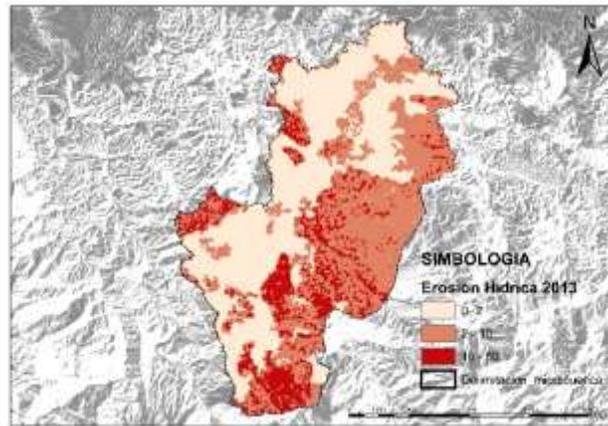


Figura 6. Distribución de la erosión hídrica potencial en la subcuenca del río Puxcatán 2009 y 2013 para un período de 100 años.

Los valores de la erosión hídrica en la subcuenca pueden aumentarse o reducirse dependiendo de los factores que la integran (R, K y LS), debido a las diferentes metodología que se encuentran en la literatura, siendo el factor C de uso de suelo y cobertura vegetal uno de los que más influyen.

Actualmente con el gran auge que ha habido en el ámbito de la computación y el desarrollo de los sistemas de información geográfica así como la integración de información digital, se facilita analizar diferentes fenómenos naturales, entre ellos el de la pérdida de suelo por erosión hídrica, detectando las áreas susceptibles a erosión. En el caso de estudio, de acuerdo a los resultados obtenidos, se realizaron algunos recorridos de campo con el fin de confirmar si estos sitios presentaban problemas de erosión (Figura 13). Se pudo confirmar, que dichos lugar si presentaban afectaciones, pero no de la magnitud que teóricamente se obtuvieron.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

2009 y similar después del 2014. Por lo que para este caso en concreto no altera el régimen de escurrimientos (ver figura 15).

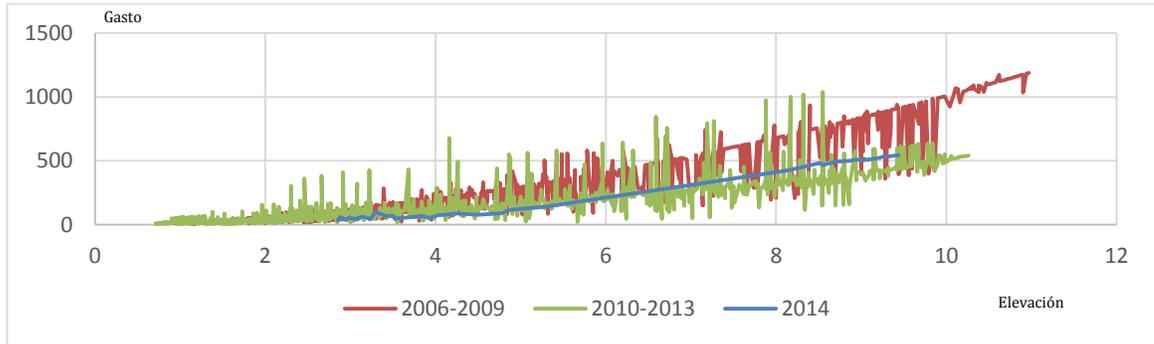


Figura 15. Comparativa Gasto- elevación cuenca Puxcatan en sus estratos

Para el caso de análisis de la estación Oxolotan y Tapijulapa, fue el caso contrario ya que en ellas hubo un incremento del régimen de escurrimiento, a partir de 2009.(ver figuras 16 y 17).

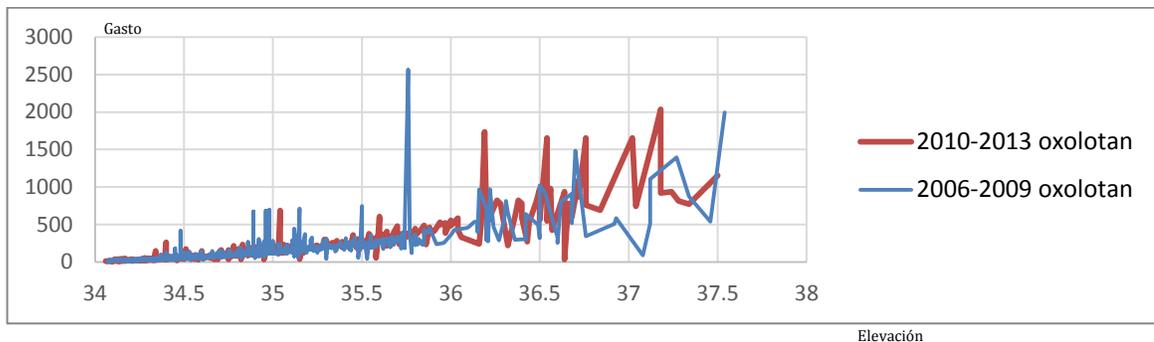


Figura 16. Comparativa Gasto- elevación cuenca Oxolotan en sus estratos

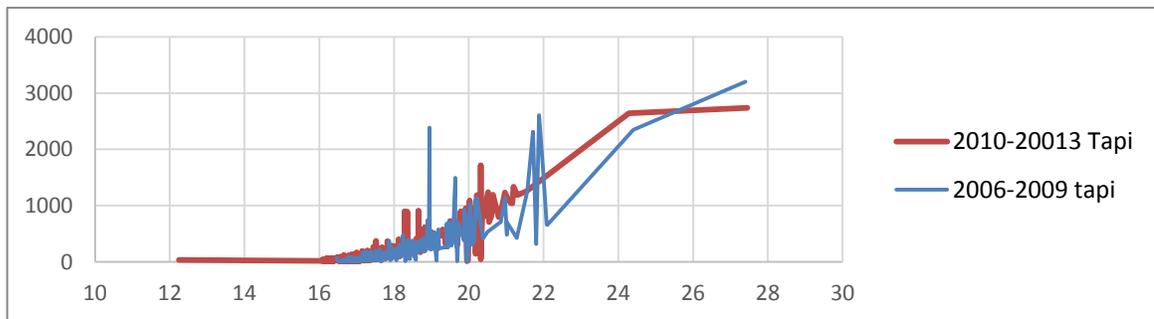


Figura 17. Comparativa Gasto- elevación cuenca Tapijulapa en sus estratos

Conclusión

Los resultados de la USLE de pérdida potencial del suelo obtenidos en esta investigación no deben considerarse como valores absolutos de la erosión hídrica, sin embargo,

permiten ir definiendo políticas de conservación de la cuenca de estudio. El mapa tipo raster resultante del algebra de mapas realizado en un sistema de información geográfica permite analizar y evaluar de mejor manera la distribución espacial de la pérdida de suelo ocasionada por la erosión hídrica, permitiendo localizar las áreas más dañadas, en donde es necesario aplicar acciones de protección o restauración.

La veracidad y calidad de los resultados en una investigación como la realizada aquí, dependen en gran medida de la calidad y cantidad de información disponible.

En México, el uso de datos espaciales gratuitos (LIDAR, DEM, cartas edafológicas, uso de suelo, etc.) de dependencias gubernamentales tiene como limitante la falta de información actualizada disponible. No obstante, los resultados obtenidos con la información actualmente disponible puede resultar de gran utilidad.

Del análisis comparativo de usos de suelo se verificó en campo que las zonas predichas por la USLE efectivamente habían modificado el uso de suelo. Y una vez contrastadas contra los escurrimientos de las estaciones hidrométricas, se demostró que la predicción realizada era congruente contra los escurrimientos de esos estratos, identificando que después del 2009 en la cuenca Puxcatan ha existido una disminución del régimen de escurrimientos. Caso contrario de lo identificado en las estaciones Tapijulapa y Oxolotan por lo que se recomienda un análisis más amplio de esas cuencas.

Finalmente esta metodología sirve de indicador mediante los escurrimientos de la evolución de cuencas no aforadas, predispuestas aun uso excesivo de sus recursos. Si lo predicho por los métodos de pérdidas potenciales de uso de suelo, es consistente con la realidad.

Referencias

- 1. Becerra, M.A.** (1997). Erosión de suelos. México, D.F. Universidad Autónoma de Chapingo.
- 2. Barríos, A., & Esneira, Q.** (2000). Evaluación de la erosión utilizando el modelo (R)USLE, con apoyo de SIG. Aplicación en una microcuenca de los andes venezolanos. Revista F .

- 3.Bravo, M., Mendoza, M. E., Medina, L.E.** (2008). Escenarios de erosión bajo diferentes manejos agrícolas en la cuenca del lago de Zirahuén, Michoacán, México, *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, Núm. 68, 2009, pp. 73-84
- 4.Cervantes, V., Gama J. E., Roldán I. E., Hernández G.** (2014), Basis for implementing restoration strategies: san nicolás zoyatlan social-ecological system (guerrero, mexico), *Terra latinoamericana volumen 32 número 2*, 143-159.
- 5. Colín-García, G., Ibáñez-Castillo, L. A., Reyes-Sánchez, J., & Arteaga-Ramírez, R.** (2013). Diagnóstico de la erosión hídrica de la cuenca del río Pichucalco. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 5(1), 23–31.
- 6. Conesa, C.** (1996). Áreas de aplicación medioambiental de los “SIG”. *Modelización y Avances Recientes. Papeles de Geografía*, 23-24, 101–115.
- 7. Cléric, C., G. P. F.** (2001). Aplicaciones del modelo USLE/RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región sur de la cuenca del Río de la Plata. *Agrociencia*, 92–103.
- 8.Dimitríos Rozos, Hariklia D. Skilodimou, Constantinos Loupasakis, George D. Bathrellos** (2013). Application of the revised universal soil loss equation model on landslide prevention. An example from N. Euboea (Evia) Island, Greece, *Environ Earth Sci*, 70:3255–3266.
- 9. FAO.** 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma, Italia. 86 p.
- 10. Flores López, H. E.; Martínez Menes, M.; Oropeza Mota, J. L.; Mejía Sáenz E.; López Carrillo R.** (2003). Integración de la EUPS a un SIG para estimar la erosión hídrica del suelo en una cuenca hidrográfica de Tepatitlán, Jalisco, México. *Terra* 21: 233-244.
- 11. Foster, G. R.; Meyer, L. D., Onstad, C. A.** (1977). A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates. *Trans. ASAE*. 20 (4): 683-687.
- 12. Mendoza, F.A., García, J.A., Salinas, H.** (2015). Relación entre erosión media y transporte de sedimentos en una cuenca. Centro Interamericano de Recursos del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México, Carretera Toluca-Ixtlahuaca km 14.5,

Unidad San Cayetano, Toluca, Estado de México, México21–24.

13. McCool, D. K.; Foster, G. R.; Mutchler, C. K.; Meyer L. D. (1989). Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. *Trans. ASAE*. 32 (5): 1571-1576.

14. N. Diodato (2004). Estimating RUSLE's rainfall factor in the part of Italy with a Mediterranean rainfall regime. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, European Geosciences Union, 8 (1), pp.103-107.

15. Oñate, F. (2004). Metodología para la evaluación del riesgo de erosión hídrica en zonas áridas y su aplicación en el manejo y protección de proyectos hidráulicos. *Revista Electrónica de La REDLACH*, 1(1), 27–32.

16. Restrepo, E., & Ramírez, M. A. (2013). Usos óptimos del suelo bajo enfoques ambientales y económicos. *Revista Facultad de Ingeniería*, (69), 229–243.

17. Röder, J., Villavicencio, R., Zarazúa, P. (2006). Aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelo “usle” en sig para estimar riesgo potencial de erosión en el área protegida “Sierra de quila” *Avances en la Investigación Científica en el CUCBA. Medicina*, (33), 716–721.

18. Romero Díaz, A., Quiñonero Rubio, J. M., López Martínez, M., & Ruiz Sinoga, J. D. (2010). Aplicación de técnicas SIG en el estudio de evaluación de degradación de suelos. Mazarrón (Murcia). *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad De Sevilla., 1074–1089.

19. Santacruz, G. (2011). Estimación de la erosión hídrica y su relación con el uso de suelo en la cuenca del río Cahoacán, Chiapas, México. *Aqua-LAC*, 3(444), 45–54.

20. Wischmeier, W. H.; Smith, D. D.; (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. *Agriculture Handbook*, 537. U.S. Dept. Agr. Washington, D.C.

ANEXO B: MODELACION DEL ESCURRIMIENTO EN CUENCAS ALTAS NO AFORADAS (EN ARBITRAJE).

MODELACIÓN BIDIMENSIONAL DE LLUVIA-ESCURRIMIENTO EN MICROCUENCAS NO AFORADAS: APLICACIÓN CUENCA PUXCATÁN.

Resumen

Estimar procesos lluvia-escorrimento en cuencas de altas pendientes no aforadas, que reproduzcan el comportamiento durante avenidas extremas, es de suma importancia por las afectaciones debido a inundaciones y evoluciones drásticas en meandros. El objetivo principal del estudio fue estimar mediante tres modelos bidimensionales el proceso lluvia-escorrimento distribuido sobre las localidades Guayal, Madero y Zaragoza, en la cuenca Puxcatán, México. La obtención de huellas de avenidas pasadas fue registrada topográficamente y georeferenciadas con una estación total en los recorridos de campo. Estas huellas se utilizaron para establecer el nivel del agua durante las avenidas. Y los modelos numéricos para reproducir los niveles de agua medidos. La información climatológica usada fue de la base de datos SMN y un Modelo Digital de Elevaciones de INEGI. Obteniendo como resultados calibraciones adecuadas y validadas de las láminas tomadas en campo, generando con ello una metodología útil para la calibración de modelos lluvia-escorrimento a partir de láminas de agua.

Palabras clave: Lluvia-escorrimento, modelación bidimensional, láminas de agua.

Introducción

La cuenca hidrográfica es un sistema de drenaje natural, y es la base para el manejo integrado del recurso hídrico [1]. Del sistema hidrológico, se evalúa el potencial del

recurso hídrico, se define el desarrollo hidráulico y se establece medidas de alerta y prevención contra inundaciones [2]. La estimación de avenidas de diseño en cuencas hidrográficas es un problema fundamental [3], donde, intervienen factores definidos como: magnitud y localización de poblaciones, obras y actividad antropogénica en la zona de estudio, características fisiográficas y morfométricas de la cuenca, incluyendo el sistema fluvial [1]. Los modelos lluvia – escurrimiento son una herramienta muy útil en la previsión de avenidas [4]. Contar con ellos es necesario, ya que son repercutidos con frecuencia por lluvias extremas, que a su provocan inundaciones en tiempo relativamente cortos [5], que traen como consecuencia daños sociales y económicos. En años anteriores el estudio de modelos de transformación de lluvia en escurrimientos, empleaban modelos de parámetros concentrados, alimentados con valores medios sin considerar las variaciones espaciales en el interior de la cuenca tal como: Precipitación, tipo y uso de suelo [6]. Recientemente el interés de estos modelos y la correlación de avenidas en los sitios donde no existe aforo, han hecho surgir metodologías que retroalimientan estos modelos lluvia-escurrimiento, basados en observaciones directas de campo [7]. Por lo tanto, Surge el interés y necesidad de un modelo calibrado de transformación de la lluvia en escurrimiento a partir de la caracterización física y observación del comportamiento hidrológico. En fechas recientes el Instituto Flumen de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) de Barcelona desarrolló el modelo hidráulico de flujo bidimensional basado en volúmenes finitos IBER [8], el cual tiene implementado un módulo hidrológico que pretende simular el proceso de transformación de lluvia en escurrimiento. En base a esto, se trazó como objetivo una modelación hidráulica bidimensional en volúmenes finitos, aplicado en las localidades de Madero, Guayal y Zaragoza ubicadas las tres en el municipio Tacotalpa estado de Tabasco, México.

Localización

La zona de estudio se encuentra ubicada dentro de la Región Hidrológica 30, en el estado de Tabasco y Chiapas, en esta región se encuentra la cuenca R. Grijalva-Usumacinta; dentro de ella se encuentra la sub-cuenca RH30Dn, también denominada sub-cuenca del río Puxcatán, con nombre de la corriente principal de dicha sub-cuenca. El estudio se centra principalmente en las localidades de a) Madero, b) Guayal y c) Zaragoza ubicadas las tres en el municipio Tacotalpa estado de Tabasco, México [9] (figura 1).

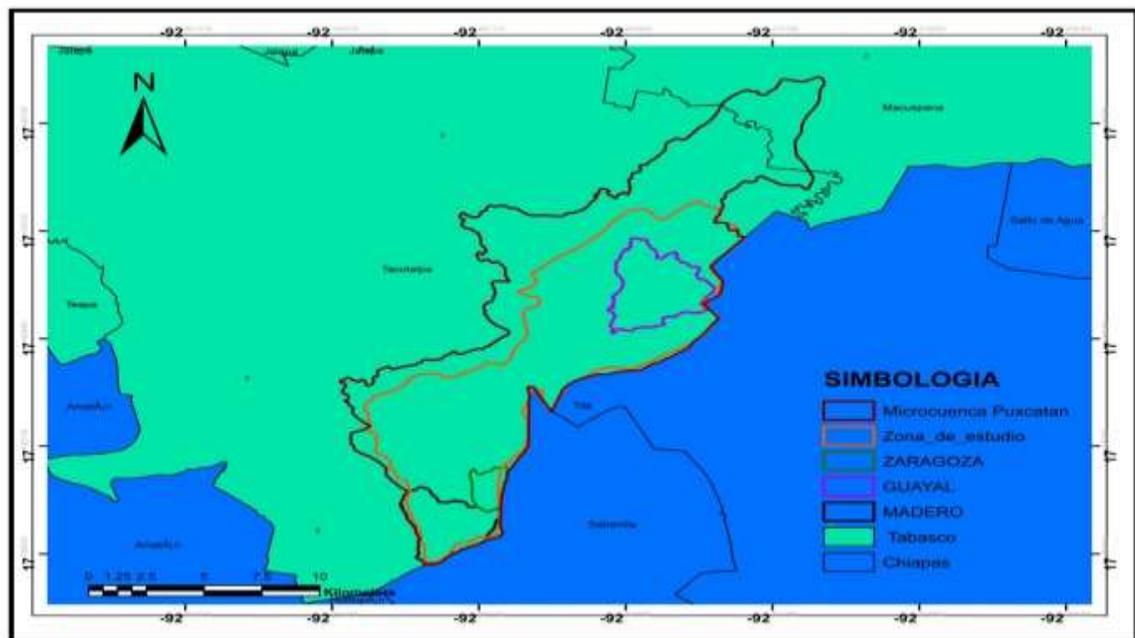


Figura 1. Localización General de las zonas de estudio (Fuente Propia).

Metodología

Raster de elevación

Para generar la geometría y delimitar la zona previamente se procesó un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) 1:10000 de alta resolución (5m) LIDAR tipo terreno, obtenido del

Instituto Nacional de Estadísticas Geográficas (INEGI). Las informaciones de precipitaciones se obtuvieron de la base de datos del registro histórico de las estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) cercanas al área de estudio.

Modelación numérica con Iber

Se implementó un modelo numérico de simulación 2D (Iber), de flujo turbulento a superficie libre en régimen no permanente, con procesos medioambientales ; donde el rango de aplicación abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos, el flujo de mareas en estuarios y modelos lluvia-escurrimiento. Los módulos de cálculo principales son: el módulo hidrodinámico, turbulencia, transporte de sedimentos e hidrológico. Todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares o cuadriláteros. Iber representa los fenómenos hidráulicos a partir de abstracciones matemáticas [8]. Al igual que en los modelos hidrológicos, estos modelos se pueden dividir por la complejidad de las ecuaciones a utilizar [10].

Modulo Hidrodinámico

El módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de St. Venant bidimensionales. Las cuales suponen una distribución de presión hidrostática y una distribución uniforme de la velocidad en profundidad. En el módulo hidrodinámico se resuelven las ecuaciones de la masa y de momento en las dos direcciones horizontales: (Ecuación 1,2 y 3):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = M\varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{gh^2 \partial \rho}{\rho 2 \partial X} + 2\Omega \sin \lambda U_y + \frac{\partial h \tau_{xx}^c}{\partial X} + \frac{\partial h \tau_{xy}^c}{\partial y} + Mx \quad (2)$$

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{gh^2 \partial \rho}{\rho 2 \partial y} + 2\Omega \sin \lambda U_x + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial X} + \frac{\partial h \tau_{yy}^e}{\partial y} + My \quad (3)$$

Dónde: h Es el tirante, U_x , U_y Son las velocidades horizontales promediadas en profundidad, g Es la aceleración de la gravedad, Z_s Es la elevación de la lámina libre, τ_s Es la fricción de la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento, τ_b Es la fricción debido al rozamiento del fondo ρ Es la densidad del agua, Ω Es la velocidad angular de rotación de la tierra, λ Es la latitud del punto, τ_{xx} e τ_{xy} $\square \square \square \square$ Son las tensiones efectivas horizontales, $\square \square$, $\square \square$, $\square \square$ Son los términos de masa y momento, mediante los cuales se realiza la modelación de precipitación, infiltración y sumideros.

Infiltración en IBER

En la simulación de procesos de precipitación es necesario considerar la infiltración de agua en el terreno no saturado para el cálculo del escurrimiento superficial. El modelado de la infiltración de agua superficial en el terreno es especialmente importante en la simulación de la transformación de lluvia-escurrimiento. La infiltración se considera en el modelo mediante un término fuente negativo en la ecuación de conservación de masa (Ecuación 4):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = -i \quad (4)$$

Donde $-i$ es la tasa de infiltración real, calculada como el mínimo entre la tasa de infiltración potencial f (capacidad de infiltración del terreno en cada instante, que depende tipo y uso de suelo), y la cantidad de agua superficial disponible para infiltrarse (Ecuación 5):

$$i = \min \left(f, \frac{h}{\Delta t} \right) \quad (5)$$

Para calcular la infiltración potencial se implementan 4 modelos de infiltración comúnmente utilizados, Green&Ampt, Horton, Lineal y SCS (Soil Conservation Service). Para fines del estudio se utilizó el método SCS.

Método de Numero de Curva SCS

El método de Número de Curva del Soil Conservation Service (SCS-CN) establece una relación entre la precipitación total y la altura de la lluvia en exceso teniendo dos hipótesis fundamentales. La primera establece que la razón entre el volumen de escurrimiento directo y el escurrimiento potencial máximo es igual a la razón entre la infiltración real y la infiltración potencial máxima. La segunda hipótesis establece que la infiltración inicial es una fracción de la retención potencial. Con este criterio la precipitación total y la precipitación efectiva, se relacionan (Ecuación 6):

$$P_e = \frac{\left(P \frac{508}{CN} + 5.08 \right)^2}{P + \frac{2032}{CN} + 20.32} \quad (6)$$

$$CN = \frac{2540}{24.5 + 5P - 10P_e - 5\sqrt{P_e(4P_e - 5P)}} \quad (7)$$

Dónde: CN es el número de curva, determinando a partir de uso y tipo de suelo, o calculado al tomar en cuenta P (precipitación total en cm) y P_e precipitación efectiva (cm) si se dispone de la información de varias tormentas (Ecuación 7):

Recorridos de campo

Dentro de las zonas de estudio se realizaron recorridos preliminares para la caracterización e identificación de la situación actual de cada zona, apoyada por

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

especialistas en hidráulica, geotécnica, ecología, donde se definieron morfología, zonificaciones y huellas de inundación. (Figura 2).



Figura 2. Recorridos de campo (Fuente Propia).

Resultados

De la comparación de los recorridos de campo y de los SIG generados en QGIS se obtuvieron la delimitación y morfología de las zonas de estudio (Figura 3, 4, 5 y Tabla 1).

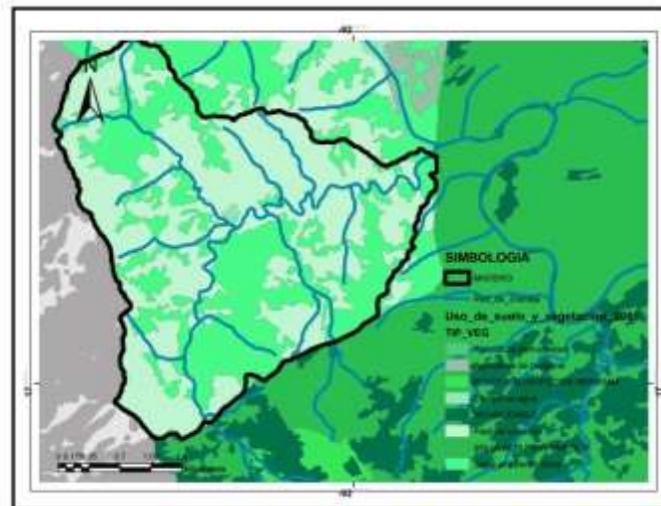


Figura 3. Red hidrológica Madero (Fuente Propia).

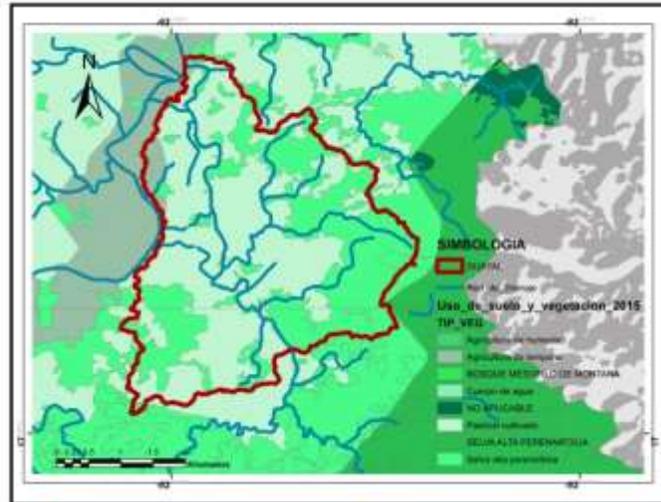


Figura 4. Red hidrológica Guayal (Fuente Propia).

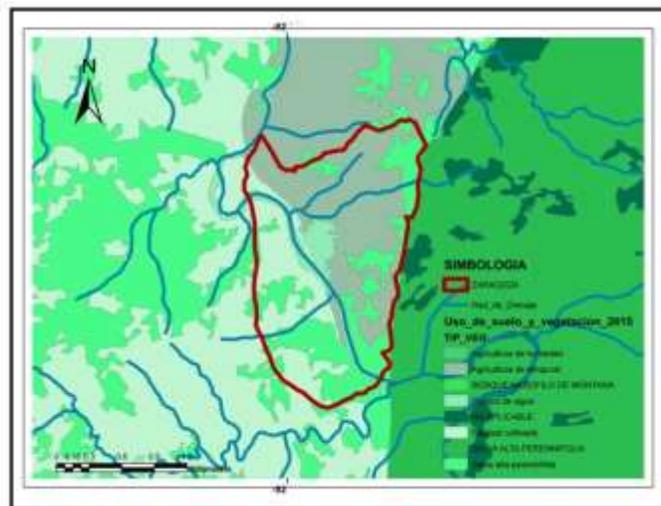


Figura 5. Red hidrológica Zaragoza (Fuente Propia).

Tabla 1. Morfología Madero (Fuente Propia).

Características morfométricas	Zonas de estudio		
	Madero	Guayal	Zaragoza
Área	10526650	14543275	2919283
Perímetro	20100	27720	7798
Índice de forma	1.73	2.04	1.28
Perfil longitudinal	4433.03	5167.81	2095.66
Pendiente media del cauce principal	0.0142	0.0094	0.085
Patrón de drenaje	Subdetrítico	Subdetrítico	Subdetrítico

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

Orden de corrientes	3	2	1
Relación de bifurcación	3.18	3.14	3.4
Densidad de drenaje	1.31	1.34	1.52
Densidad de corrientes	1.27	1.32	1.65
Longitud de corrientes	539.84	404.67	105.16

Del recorrido en campo, el valor del CN del Tipo y Uso del Suelo fue D (Tabla 2).

Tabla 2. CN Observados en campo (Fuente Propia).

Vegetación	Condición Hidrológica	Tipo de suelo			
		A	B	C	D
Barbecho	-	77	86	91	94
	Pobre	76	85	90	93
	Buena	74	83	88	90
Cultivos alineados (zona platanar)	Pobre	72	81	88	91
	Buena	67	78	85	89
	Pobre	71	80	87	90
	Buena	64	75	82	85
	Pobre	70	79	84	88
	Buena	65	75	82	86
	Pobre	69	78	83	87
	Buena	64	74	81	85
	Pobre	66	74	80	82
	Buena	62	71	78	81
	Pobre	65	73	79	81
	Buena	61	70	77	80
Pastizales	Pobre	47	67	81	88
	Regular	25	59	75	83
	Buena	6	35	70	79
Selva	Pobre	57	73	82	86
	Regular	43	65	76	82
	Buena	32	58	72	79
Caminos con firme	-	74	84	90	100
impermeables	-	74	84	90	100

De igual forma de los recorridos de campo se obtuvo información de las huellas de inundación o láminas de agua esto con el fin de poder calibrar los modelos a partir de dichas láminas ya que el escurrimiento es un factor cuyo valor no se conoce (Tabla 3).

Tabla 3. Láminas de agua tomadas en campo (Fuente Propia).

Zona	UTM			Lámina de agua en campo	
	X	Y	Z	M	(MSNM)
Guayal	540847.65	1934601.14	22.5	2.5	25.00
Guayal	540616.93	1934604.24	66.67	2.6	69.27
Guayal	541603.14	1936311.00	43.25	3.0	46.25
Guayal	540738.60	1936900.34	33.85	2.5	36.35
Guayal	540856.16	1936144.72	14.23	2.8	17.03
Guayal	540330.22	1935610.56	11.90	3.0	14.90
Madero	531857.58	1922015.93	140.93	3.0	143.93
Madero	531649.9	1921674.91	153.25	1.5	154.75
Madero	531674.54	1922423.75	115.98	3.0	118.98
Madero	531498.54	1922669.85	332.00	2.0	334.00
Madero	533925.58	1922885.36	81.20	2.5	83.70
Madero	533692.91	1922670.58	206.63	1.8	208.43
Zaragoza	533776.04	1923515.44	110.89	1.5	112.39
Zaragoza	533330.85	1923677.76	140.22	1.5	141.72
Zaragoza	533483.79	1924183.45	132.44	1.8	134.24
Zaragoza	533232.27	1924607.31	117.85	1.1	118.95
Zaragoza	534121.76	1924831.40	89.52	0.5	90.02
Zaragoza	533735.45	1925022.09	73.27	2.0	75.27

En la parte alta de la cuenca de estudio no existe medición alguna de los parámetros climatológicos e hidrométricos, solo a su paso por la planicie, existe la estación Hidrométrica Macuspana, ubicada en la cabecera municipal con el mismo nombre, en el mismo sitio se ubica una estación climatológica; que son los que tienen la mayor

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

influencia sobre las zonas de estudio, por otro lado existe la estación climatológica Aquiles Serdán, pero por estar en la zona de planicie más alejada ya no impacta en las zonas de estudio, por lo que para fines del estudio hidrológico se tomará en cuenta las precipitaciones observadas en la Estación Climatológica Macuspana del año 1961 al 2011, figura 6.

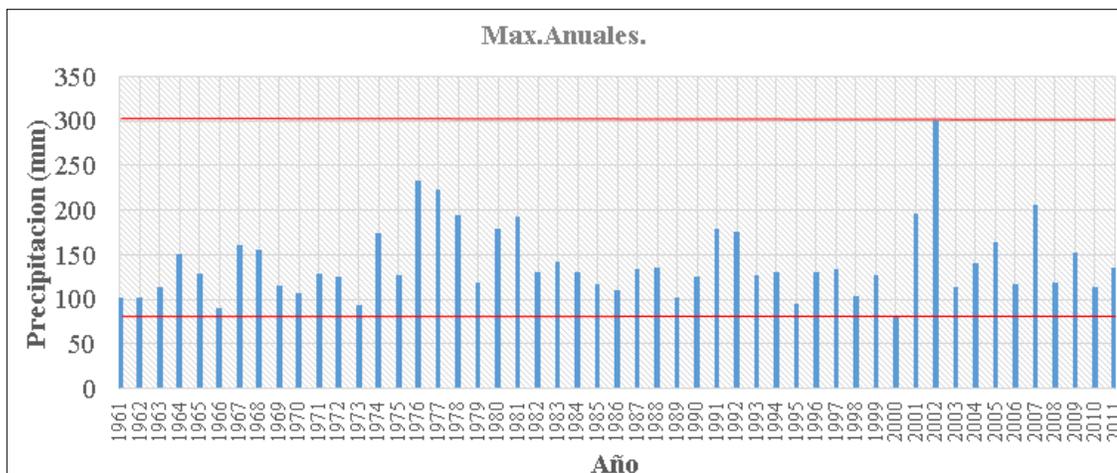


Figura 6. Precipitación Máxima Anual de la Estación Hidrométrica Macuspana (Fuente Propia).

A la información climatológica se le aplicaron pruebas de cantidad y calidad de la información, con el fin de reducir la incertidumbre. Para asociar una lluvia a dichas láminas de agua encontradas en campo se utilizaron los datos de las Precipitaciones Máximas Anuales (PMA) para ello se establecieron los rangos mínimos y máximos de las PMA, Tabla 4.

Tabla 4. Rangos Min y Max de la PMA de la Estación Hidrométrica Macuspana (Fuente Propia).

Precipitación Máxima Anual (mm)	
Min	80.6
Max	299.5

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

Para la modelación se realizaron tres etapas de cálculo, cuyos resultados se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Tirantes Modelación 1, 2 y 3 (Fuente Propia).

Zona	UTM			Tirantes en campo		Tirantes modelos		
	X	Y	Z	M	(MSNM)	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Guayal	540847.7	1934601	22.5	2.5	25	26.4	25.3	25.17
Guayal	540616.9	1934604	66.67	2.6	69.27	71.27	68.97	69.12
Guayal	541603.1	1936311	43.25	3.0	46.25	46.85	46.46	46.43
Guayal	540738.6	1936900	33.85	2.5	36.35	37.95	36.25	36.31
Guayal	540856.2	1936145	14.23	2.8	17.03	19.13	17.18	16.88
Guayal	540330.2	1935611	11.9	3.0	14.9	17.1	15.08	14.79
Madero	531857.6	1922016	140.93	3.0	143.93	149.93	144.11	144.18
Madero	531649.9	1921675	153.25	1.5	154.75	157.75	154.85	154.57
Madero	531674.5	1922424	115.98	3.0	118.98	124.48	118.81	118.97
Madero	531498.5	1922670	332.00	2.0	334.00	341.5	333.95	334.10
Madero	533925.6	1922885	81.20	2.5	83.70	88.86	83.94	83.80
Madero	533692.9	1922671	206.63	1.8	208.43	211.95	208.59	208.38
Zaragoza	533776.0	1923515	110.89	1.5	112.39	115.44	112.21	112.32
Zaragoza	533330.9	1923678	140.22	1.5	141.72	146.45	141.86	141.59
Zaragoza	533483.8	1924183	132.44	1.8	134.24	140.64	134.19	134.30
Zaragoza	533232.3	1924607	117.85	1.1	118.95	124.06	118.83	119.10
Zaragoza	534121.8	1924831	89.52	0.5	90.02	96.72	89.87	90.37
Zaragoza	533735.5	1925022	73.27	2.0	75.27	82.38	74.91	75.12

En la primera etapa el programa corrió asociando a la PMA Max convirtiendo está en una lluvia homogénea completamente distribuida en las tres zonas de estudio, figura 7, 8 y 9. Se obtuvieron las láminas de aguas las cuales no eran las deseadas, por lo que se pasó a la segunda etapa.

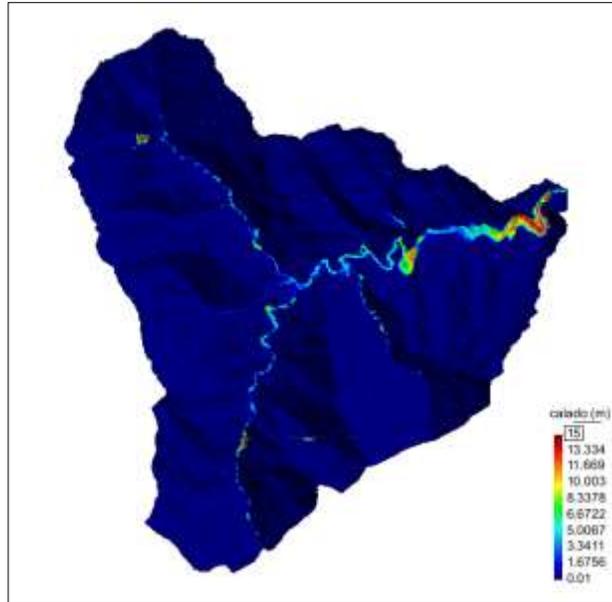


Figura 7. Madero Modelación 1 (Fuente Propia).

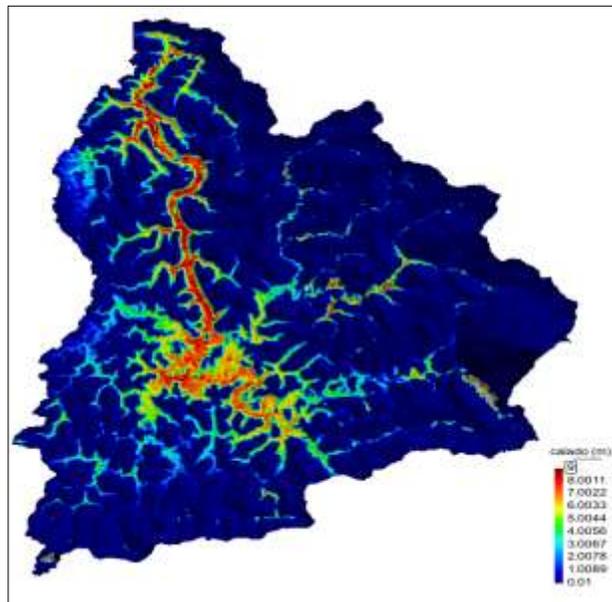


Figura 8. Guayal Modelación 1 (Fuente Propia).

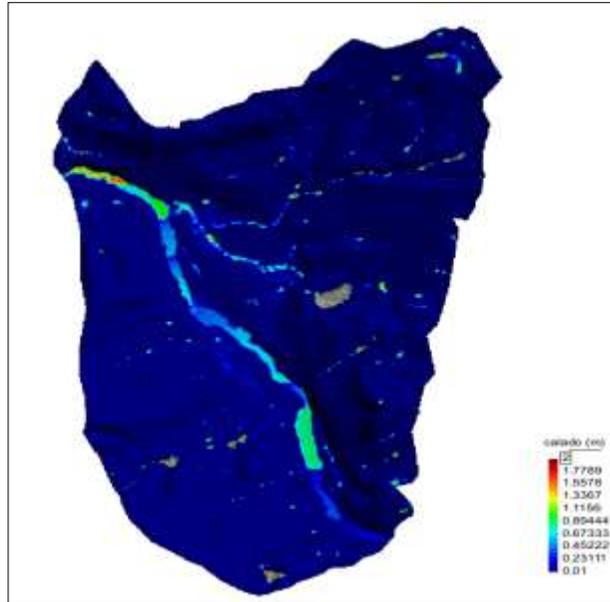


Figura 9. Zaragoza Modelación 1 (Fuente Propia).

En la segunda etapa se corrió el programa de igual forma que la primera solo que en lugar de tomar el PMA Max se tomó el PMA Min, figura 10, 11y 12.

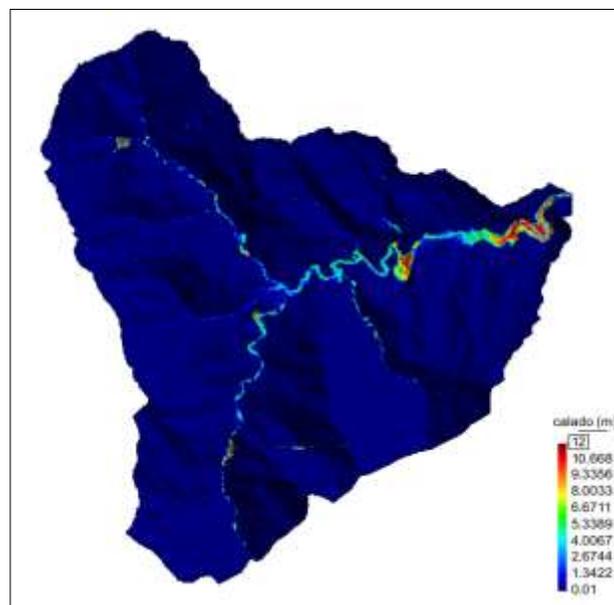


Figura 10. Madero Modelación 2 (Fuente Propia).

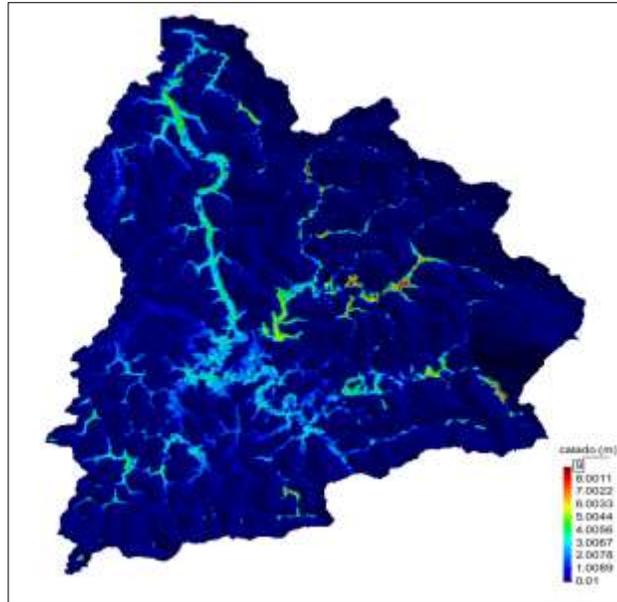


Figura 11. Guayal Modelo 2 (Fuente Propia).

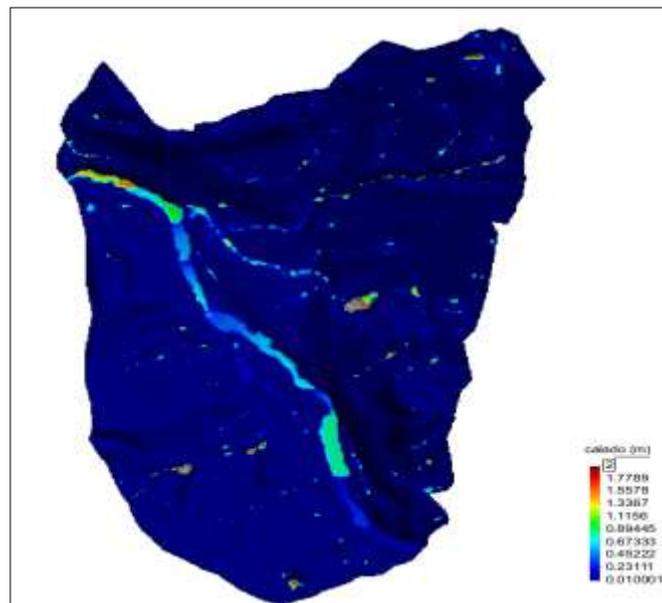


Figura 12. Zaragoza Modelación 2 (Fuente Propia)

Al ser estas láminas de agua cercanas a las encontradas en campo, se modelo la tercera etapa con los datos de la Precipitación Max Mensual del año con el PMA Min en este caso el año 2000, figura 13.

“Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México”

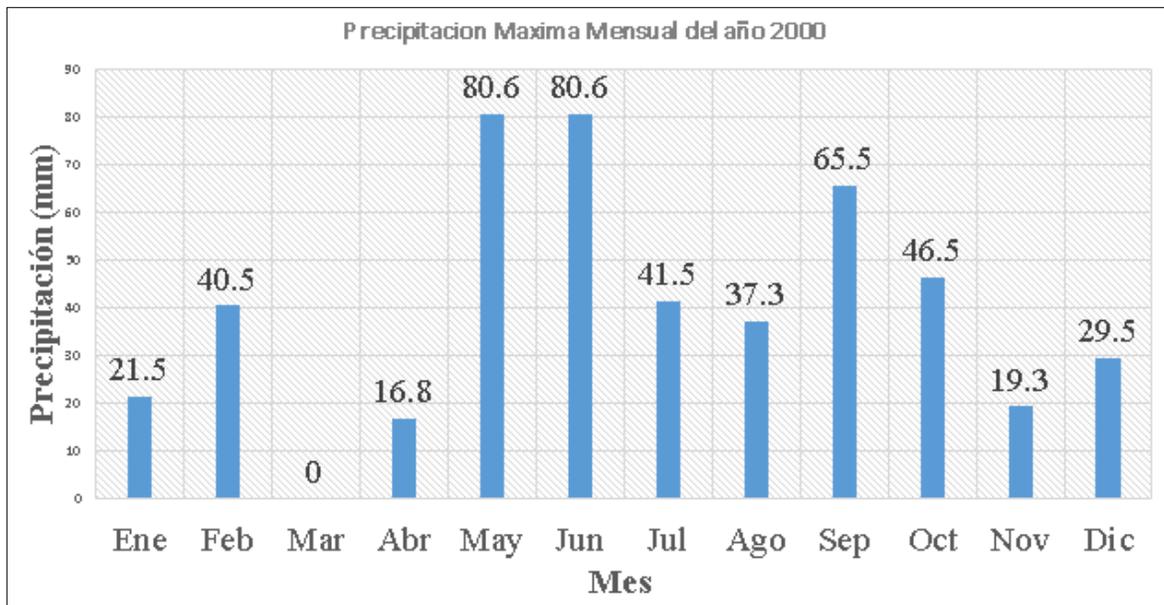


Figura 13. Precipitación Max Mensual del año 2000 de la Estación Climatológica Macuspana (Fuente Propia).

En la tercera etapa se corrió el programa con el histograma de las Precipitaciones Máximas Mensuales del año 2000 y con la condición de que era lluvia completamente distribuida en las tres zonas de estudio, figura 14, 15 y 16.

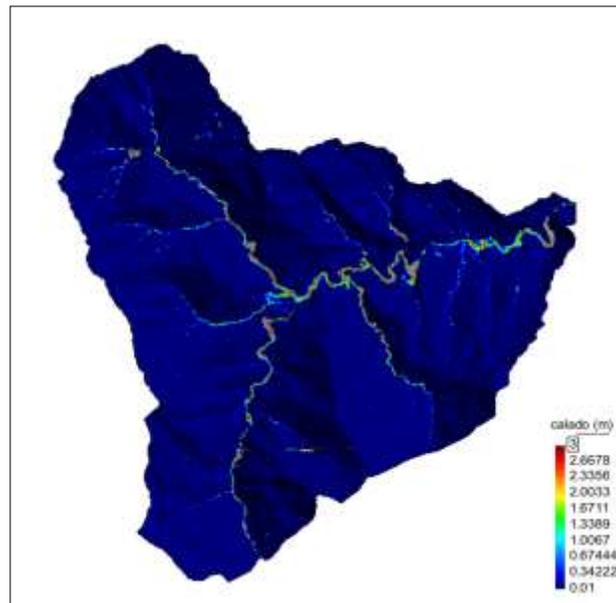


Figura 14. Madero Modelación 3 (Fuente Propia).

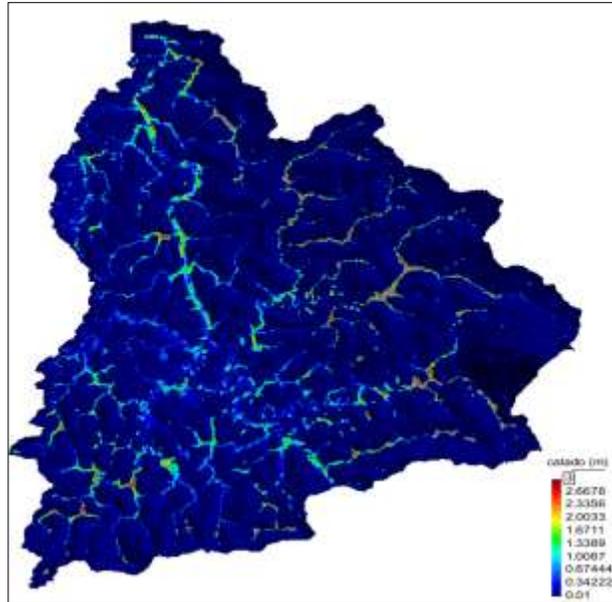


Figura 15. Guayal Modelo 3 (Fuente Propia).

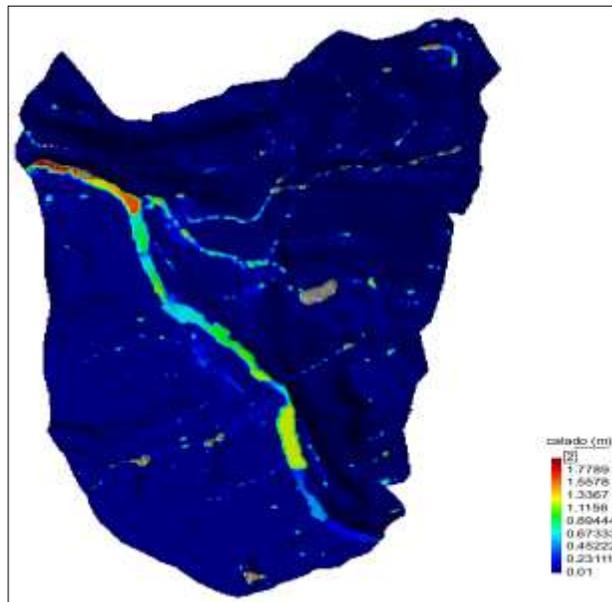


Figura 16. Zaragoza Modelación 3 (Fuente Propia).

Al final se comparo láminas de campo vs laminas de las modelaciones 3, tabla 6.

Tabla 6. Comparación de lámina de agua en campo y modelación 3 (Fuente Propia).

Lámina de agua en campo		Lámina de agua en modelo 3	
M	(MSNM)	M	(MSNM)
2.5	25.00	2.67	25.17
2.6	69.27	2.45	69.12
3.0	46.25	3.18	46.43
2.5	36.35	2.46	36.31
2.8	17.03	2.65	16.88
3.0	14.90	2.89	14.79
3.0	143.93	3.25	144.18
1.5	154.75	1.32	154.57
3.0	118.98	2.99	118.97
2.0	334.00	2.10	334.10
2.5	83.70	2.6	83.80
1.8	208.43	1.75	208.38
1.5	112.39	1.43	112.32
1.5	141.72	1.37	141.59
1.8	134.24	1.86	134.30
1.1	118.95	1.25	119.10
0.5	90.02	0.85	90.37
2.0	75.27	1.85	75.12

Conclusiones

Los resultados muestran que los niveles de lámina de agua obtenidos en campo y modelados muestran una buena correlación, dicho esto, el modelo esta calibrado y validado, por lo tanto, se cumple con el objetivo de tener un modelo bidimensional de elementos finitos en el que se puede conocer la variación espacial del escurrimiento en toda la cuenca y no solo en la salida como lo hacen los Modelos de Pronostico de Escurrimiento (MPE). También se ha desarrollado una metodología sencilla, versátil y poco exigente en datos, que permite una buena calibración en un Modelo de lluvia-escurrimiento en modelos bidimensionales de elementos finitos.

Referencias

- [1] **Y.Rodríguez, N. Marrero, y L. Gil** “Modelación de lluvia-escurrimiento para la cuenca del río Reno,” *Rev. Cie. Téc. Agr.* Vol.19, pag. 31-37, 2010.
- [2] **J. M. García**, “Experiencias cubanas en la institucionalización del manejo integrado de cuencas.” *Rev. Voluntad Hidraul.*, vol.2, pag.15-28, 2006.
- [3] **J.Juárez, M.Arganis, R. Domínguez, G. Esquivel, M. Bladé, J.Dolz, M. Sánchez, H. Sánchez Y G. Corestein**, “Comparación del hidrograma de salida de una cuenca con un modelo hidráulico y un modelo distribuido,” *en Cong. AMH’14*, Puerto Vallarta, México, 2014, pag.1-6.
- [4] **R. García Y C. Conesa**, “Estimación de caudales de avenidas y delimitación de áreas inundables mediante métodos hidrometeorológicos e hidráulicos y técnicas S.I.G., estudio aplicado al litoral sur de la región de Murcia,” *Rev. Papel. Geog.* Vol. 53, pag. 107-123, 2011.
- [5] **J. Wurl, C. Martínez, y M. Imaz**, “Caracterización del peligro por inundaciones en el oasis La Purísima, Baja California Sur, México,” *Invest. Geog* ,vol.87, pag.76-87, 2015.
- [6] **UNAM.**,Manual del Modelo para pronóstico de escurrimiento. Series del Instituto de Ingeniería de la UNAM, 2008.
- [7] **M. L. Orduña**, “Pronóstico probabilístico de caudales de avenida mediante redes bayesianas,” Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, España,2007.
- [8] **Manual Iber**, Herramienta de Simulación Numérica del Flujo en Ríos. Universidad politécnica de Cataluña. 2012.
- [9] **J.G. Rivera, M.E. López, F. Uh Y O. Guillen**. “Análisis de información para la identificación e inventario de los ríos y cauces en el estado de Tabasco,” Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Mexico, Reporte de actividades, 2006.
- [10] **S. B. Echavarría**, “Modelo de simulación del funcionamiento hidráulico del sistema de drenaje del área metropolitana del valle de México,”. Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autonoma de Mexico, México D. F, 2013.