



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Geomorfología de sistemas
fluviales. Evolución y desarrollo del
río Papaloapan.**

T E S I S

Que para obtener el título de:

Ingeniero Geomático

P R E S E N T A:

David Pineda García

DIRECTORA DE TESIS:

Dra. Judith Guadalupe Ramos Hernández



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/68/2014

Señor
DAVID PINEDA GARCIA
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora DRA. JUDITH GUADALUPE RAMOS HERNÁNDEZ que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted conforme a la opción I. "Titulación mediante tesis o tesina y examen profesional", para obtener su título en INGENIERIA GEOMATICA

**"GEOMORFOLOGÍA DE SISTEMAS FLUVIALES. EVOLUCIÓN Y DESARROLLO DEL RÍO
PAPALOAPAN."**

**INTRODUCCIÓN
I. ZONA DE ESTUDIO
II. METODOLOGÍA
III. RESULTADOS
IV. CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 31 de Julio de 2014
EL PRESIDENTE DEL COMITÉ

M. EN I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Judith Guadalupe Ramos Hernández

Por todo el apoyo que me brindo durante mi estancia en el Instituto de Ingeniería de la UNAM y por guiarme en esta etapa de mi desarrollo profesional.

A la Ing. Norma Isela Vega

Por compartir su conocimiento y ser parte de mi formación como ingeniero.

Al M.I. Adolfo Reyes Pizano

Por brindarme el apoyo en cada una de sus clases y haber sido parte de la revisión de este trabajo.

Al M.I Roberto Ascencio villagomez

Por el conocimiento compartido en sus clases y por su apoyo en la revisión de este trabajo.

Al Ing. Erik Marquez García

Por su apoyo dentro y fuera del salón de clases, por sus asesorías y por haberme permitido iniciar con mi experiencia en el campo laboral.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre Felisa García Ariza

Por todo su apoyo a lo largo de mi vida, por ser fuente de inspiración, motivación para salir adelante ante cada dificultad y por brindarme su amor en cada momento.

A mis tías Maribel y Patricia

Por ser parte importante en mi educación, por todo su apoyo y amor.

A mi hermano Hugo

Por brindarme su apoyo en cada momento.

A Lupita

Por brindarme todo su apoyo y su amor. Por llenar de alegría esta etapa de mi vida.

A mi prima Gaby

Por compartir esta etapa conmigo y ser mi compañera de aventuras.

ÍNDICE

Antecedentes.....	1
Objetivo	2
Hipótesis	2
1. Introducción	3
1.1 Definición de inundación	3
1.2 Características de inundación	3
1.2.1 Inundación de río	5
1.2.2 Planicie de inundación	5
1.3 Métodos para determinar la inundación	6
1.3.1 Percepción Remota	9
1.3.1.1 Adquisición de datos usando percepción remota	11
1.3.1.2 Mejoramiento visual R-G-B	15
1.3.1.3 Mejoramiento espacial- filtro paso alto	15
1.3.2 Sistema de Información geográfico	16
2. Zona de Estudio	18
2.1 Localización geográfica	18
2.2 Clima	19
2.3 Hidrología	19
2.4 Edafología	21
2.5 Vegetación	22
2.6 Economía	23
3. Metodología	24
3.1 Métodos	24
3.2 Datos	26
3.3 Datos Históricos	31
3.4 Aplicación de técnicas de percepción remota	32
3.4.1 Composición de falso color RGB	32
3.4.2 Filtro Non-directional Edge	36
3.5 Integración de información en un Sistema de Información Geográfica	36
4. Resultados	38
4.1 Zona 1	39

4.2 Zona 2	42
4.3 Zona 3	44
4.4 Zona 4	52
4.5 Zona 5	54
4.6 Zona 6	58
5. Discusión	64
6. Conclusiones	67
Bibliografía	69
Anexo	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Elemento que conforman un río.	4
Figura 2. Sistema fluvial meandrico.	6
Figura 3. Esquema de onda electromagnética	9
Figura 4. Espectro electromagnético.	11
Figura 5. Elementos para la adquisición de datos.	12
Figura 6. Delimitación de la cuenca del Río Papaloapan.	18
Figura 7. Trayectoria del río Papaloapan y sus afluentes.	20
Figura 8. Principales componentes seguidos en la metodología para determinar los cambios geomorfológicos del cauce del río y la planicie de inundación.	25
Figura 9. Trayectoria del Huracán Karl. Evento ocurrido entre los días 14- 18 de septiembre de 2010.....	28
Figura 10. Trayectoria de la tormenta tropical Matthew. Evento ocurrido entre los días 23 y 26 de septiembre de 2010.	29
Figura 11. Imágenes de la zona de estudio capturadas el 19 de julio (relacionada con la depresión tropical del 2-3 de julio) y 23 de octubre de 1999.	31
Figura 12. Ejemplo de la composición de falso color con las bandas 1, 2 y 3.	33
Figura 13. Ejemplo de composición de falso color aplicando las bandas 2, 3 y 4.....	34
Figura 14. Ejemplo de composición de falso color con las bandas 3, 4, y 5. ...	35
Figura 15. Ejemplo de RGB (1,2,3) de ortofoto 10k.	35
Figura 16. Comparación entre el resultado de la composición de falso color RGB (3, 4, 5) y del filtro Non-directional Edge.	36
Figura 17. Trayectoria del río Papaloapan, año 1980 y 2014.	37
Figura 18. Trazos del río Papaloapan de 1980 a 2014.	38
Figura 19. Comparación de los trazos de la zona uno para los años de 1980 y 1993, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEG.....	39

Figura 20. Sobreposición de los trazos obtenidos para las imágenes correspondientes a los años de 1999 y 2000 para la zona uno, empleando como mapa base ortofotos de servicio de mapeo de INEGI.....	40
Figura 21. Trazos de la zona uno correspondiente al periodo 2003-2014, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.	41
Figura 22. Cambios en la zona dos durante el periodo de 1980 y 1993, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.	42
Figura 23. Trazos de la zona dos correspondientes al periodo 1993-2014, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.	43
Figura 24. Mapa de Alvarado y Tlacotalpan, Veracruz, en 1830.	44
Figura 25. Posible ubicación del canal subsidiario de la isla donde se encuentra Tlacotalpan.....	45
Figura 26. Trazo de la zona tres correspondiente al periodo 1980-1993, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.	46
Figura 27. Trazos para la zona tres correspondientes al periodo 1999 a 2000, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.	48
Figura 28. Zona 3 el 23 de octubre de 1999. Imagen Landsat 5 TM.	49
Figura 29. Trazos en zona tres correspondientes al periodo 2010-2014, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.	50
Figura 30. Fotografías aéreas correspondientes a la inundación del municipio de Tlacotalpan ocurrida en el año de 1950.	51
Figura 31. Vista de Google Earth de Tlacotalpan en 2015, en amarillo los puntos donde fue tomada evidencia de niveles de agua alcanzados en la inundación de 2010.	52
Figura 32. Trazos del río para la zona cuatro correspondientes al periodo 1980 a 2014, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.....	53
Figura 33. Cambios morfológicos en la zona seis durante el periodo de 1980 a 1993, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.	55
Figura 34. Periodo de 1993 a 1998, donde se identifican cambios para la zona seis, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.	56

Figura 35. Comparación de los trazos obtenidos para la zona seis durante el periodo de 1998 a 2014, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.	57
Figura 36. Cambios en el cauce del río Papaloapan en el periodo de 2010 a 2015.....	58
Figura 37. Cambios morfológicos en la zona seis durante el periodo de 1980 a 1993, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.	59
Figura 38. Islas o Bancos flucivales formados en la corriente del río Papaloapan.....	60
Figura 39. Meandro activo en época de lluvias.	61
Figura 40. Trazos de la zona seis obtenidos del periodo entre los años 1999 y 2010, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.....	62
Figura 41. Comparación de los datos obtenidos en la zona seis correspondientes al periodo comprendido por los años 2010 y 2014, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ciclones que impactaron la cuenca del río Papaloapan en el periodo de estudio.	26
Tabla 2. Lista de información ráster (imágenes satelitales de los sensores Landsat, ortofotos y DEM) de la zona de estudio.	30



ANTECEDENTES

El sistema hidrográfico del río Papaloapan es, por su caudal, el segundo más grande del país, antecedido únicamente por el sistema Grijalva-Usumacinta. El sistema vierte sus aguas a la laguna de Alvarado con un promedio de 47,000 millones de m³ anuales. La cuenca del río Papaloapan se encuentra ubicada dentro de la vertiente del golfo de México, comprendiendo los estados de Puebla, Oaxaca y Veracruz (Consejo de Cuenca del Río Papaloapan, 2014).

Debido a la cercanía de la cuenca del río Papaloapan con el Golfo de México, está sujeta al impacto de fenómenos naturales (ej. huracanes) que han provocado el desbordamiento del río y, por tanto, la inundación de las comunidades que se encuentran dentro de dicha cuenca, destacando por su magnitud las ocurridas en 2010. La inundación de 2010 se generó por la presencia de dos eventos extraordinarios, el primero de ellos fue el huracán Karl, el cual registró una precipitación máxima de 335mm en Misantla, Veracruz, y provocó afectaciones directas a los estados de Quintana Roo, Campeche, Puebla y Veracruz (Hernández et al, 2010). Este huracán tocó tierra Mexicana en dos ocasiones, la primera de ellas como tormenta tropical el día 15 de septiembre a las 7:45 horas a 15 km al suroeste de Puerto Bravo, QRoo., con vientos máximos sostenidos de 100 km/h y rachas de 120 km/h (Hernández et al, 2010). El segundo impacto ocurrió a las 12 horas del 15 de Septiembre, ya como huracán de categoría III en la población de playa Chachalacas a 15 km al norte de la ciudad de Veracruz, con vientos sostenidos de 185km/h y rachas de 230km/h (Hernández et al, 2010). El segundo evento fue la tormenta tropical Matthew reportando precipitaciones máximas de 257.2 y 182mm en Tres picos, Chis. y El Raudal Ver., respectivamente. Matthew tocó tierra mexicana 20km al sur-suroeste de Altamira, Campeche, como depresión tropical el 25 de septiembre a las 19 horas con vientos de 55 km/h (Diaz, 2010). El 26 de Septiembre se ubicó al sur de Chiapas a 150km de Cd. del Carmen, Camp., desplazándose al oeste-noroeste y debilitándose sobre la sierra de Chiapas, sus bandas asociadas favorecieron lluvias intensas a torrenciales en Veracruz, Tabasco, Yucatán, Oaxaca y Chiapas (Diaz, 2010).

En la cuenca del río Papaloapan se ubican varias poblaciones de interés, entre las que destaca el municipio de Tlacotalpan, Ver., declarado patrimonio cultural de la humanidad por la UNESCO en 1998. Esta fue una de las poblaciones afectadas por los eventos Karl y Matthew, ya que al ubicarse en la ribera del río Papaloapan resultó inundada en dos ocasiones registrando niveles de 2.7 y 4 metros sobre el nivel medio del mar (mnmm), lo que provocó pérdidas humanas y económicas para esta comunidad.



OBJETIVO

Determinar el impacto de la inundación del río Papaloapan ocurrida en 2010 a partir del análisis espacio temporal identificando los cambios geomorfológicos en el cauce del río y su planicie de inundación, con base en estos proponer acciones para eliminar o mitigar este riesgo.

Objetivos particulares

- Delimitar el cauce del río y su planicie de inundación para un periodo de 20 años.
- Definir los cambios ocurridos en el periodo de estudio del río y su planicie
- Identificar los lugares en que se registraron cambios importantes que dieron lugar a desbordamientos.
- Determinar la magnitud de los cambios ocurridos y su efecto en la población de Tlacotalpan.
- Proponer acciones que permitan mitigar los daños por inundación, en especial, en zonas urbanas de gran interés.

HIPÓTESIS

Es posible identificar cambios geomorfológicos del cauce del río y su planicie de inundación mediante un análisis espacio temporal empleando imágenes satelitales y, de esta manera, determinar las causas que dieran origen a dichos cambios y a las inundaciones ocurridas en la zona de estudio.



1. INTRODUCCIÓN

1.1 Definición de Inundación

Las inundaciones se definen como una condición hidrológica donde el caudal de los ríos excede la capacidad de almacenamiento del canal mismo desbordando el exceso de agua e inundando parte del valle. La mayoría de las inundaciones son eventos naturales vitales para el río, la geomorfología de la planicie de inundación y los procesos del ecosistema. Las inundaciones pequeñas son comunes y modifican el canal manteniendo las características ecológicas de la planicie de inundación. Sin embargo, aquellas más grandes, que rara vez llegan a ser recurrentes, modifican tanto el canal como la planicie. La altura del desbordamiento y la extensión de la inundación dependen del tamaño de la inundación misma, que a su vez se relaciona con su frecuencia. Esto es, la probabilidad de que ocurra una inundación de un determinado tamaño, la cual se expresa en términos de su intervalo de recurrencia; período de tiempo de retorno (t_r) dentro del cual se espera que la inundación se produzca nuevamente (Gupta, 2010).

Dado que las inundaciones son un fenómeno normal y esperado de un río, no representan una amenaza al medio y al ser humano; sin embargo, se convierten en un peligro cuando se utiliza la parte plana del valle de un río para asentamientos o actividades económicas. Así, cuando las inundaciones y los asentamientos humanos compiten por el mismo lugar llega a ser desastroso; por ejemplo, los abanicos aluviales (Larsen, et al, 2001), valles de montaña (Stewart and LaMarch, 1967) o de baja altitud y llanuras aluviales (Sarker et al, 2003). Cuando se ven afectados los seres humanos, estos fenómenos se convierten en “desastres naturales”. De esta manera, las inundaciones son uno de los desastres naturales más comunes y graves en la tierra, en términos de pérdidas económicas y humanas.

1.2 Características de inundación

Las inundaciones suelen ser comunes en las zonas tropicales debido a la combinación de la disponibilidad de humedad, alta frecuencia de las tormentas y terreno montañoso. O'Connor y Costa (2003) identificaron tres factores clave para las grandes inundaciones: clima, topografía y tamaño de la cuenca. Lluvias persistentes en las partes altas de las grandes cuencas fluviales generan inundaciones frecuentes y peligrosas, aumentando significativamente el riesgo en aquellos lugares donde la pendiente es menor y, como las consecuencias,

disminuye la velocidad del agua. En las regiones costeras grandes inundaciones puede estar asociadas con eventos de mareas de tempestad.

Evaluar la inundación y sus impactos es fundamental para un manejo adecuado de la cuenca y se debe abarcar el antes, durante, y posterior al evento, para entender, prevenir y mitigar los riesgos y sus posibles efectos sobre los seres humanos y los ecosistemas y sus recursos naturales (Smith and Ward, 1998). La gestión del riesgo de inundación incluye las medidas de planificación desde la parte alta de la cuenca hasta la planicie de inundación considerando la modificación física al que son sujetos (Fig. 1). La evaluación y gestión del riesgo ante estos eventos han estado dominados por enfoques tradicionales de ingeniería, que en muchos casos han incrementado el problema. Esto es, la mayoría de los enfoques buscan minimizar la disipación de energía y aumentar el transporte de canales, pero una gestión eficaz de inundación también debe considerar mantener el funcionamiento geomorfológico "natural" de los cauces de los ríos y sus planicies de inundación para lograr la conectividad lateral y longitudinal de agua, sedimentos y nutrientes. Enfoques de ingeniería tradicionales utilizan procedimientos probabilísticos e hidráulicos estandarizados; sin embargo, debido a la falta de amplios conjuntos de datos instrumentales de inundación, los modelos hidráulicos e hidrológicos rigurosos modernos no pueden en realidad ser validados sin los datos de inundación de la línea base proporcionadas por enfoques sedimentarios y geomorfológicos (Baker et al., 2002; Lastra et al., 2008).

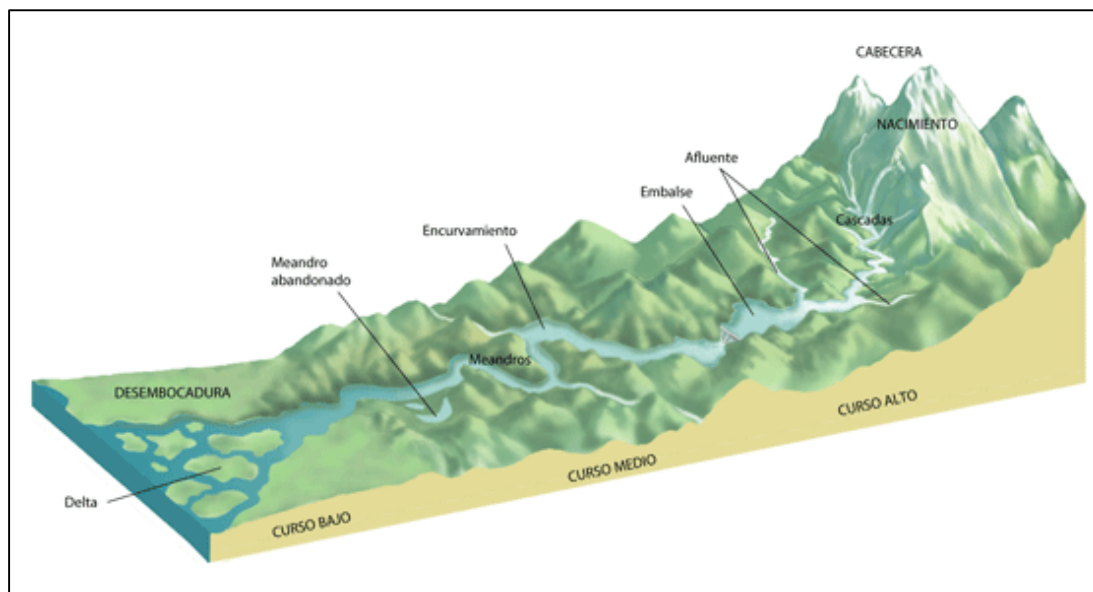


Figura 1. Elementos que conforman un río

En la actualidad, el potencial de amenaza de inundación es influenciado por el efecto del cambio climático en los flujos extremos experimentados a lo largo de un sistema fluvial casi instantáneamente. El impacto del cambio climático se refleja en



los cambios en la magnitud y frecuencia de las inundaciones; sin embargo, no es directamente proporcional a los aumentos o disminuciones de la precipitación, ya que incluso un pequeño cambio en el clima puede aumentar o disminuir significativamente los valores de este parámetro en un amplio intervalo de periodo de retorno. La magnitud de estos cambios es todavía difícil de modelar debido a que la mayoría de los ríos principales son estructuralmente modificados y el efecto de los cambios antropogénicos amortigua las señales de inundación originadas por el cambio climático (Blum, 2007).

1.2.1 *Inundación de río*

Los ríos como parte de su naturaleza se inundan, aunque la magnitud y frecuencia de estas inundaciones varían entre ellos, ya que depende de las características meteorológica y fisiográfica de la cuenca a la cual pertenecen. Por un lado, los ríos que fluyen a través de ambientes húmedos tienden a ser más propensos a las inundaciones, por ejemplo, aquellos que tienden a estar asociados con una cuenca de características fisiográficas que causan lluvias regionalizadas intensas y escurrimiento superficial rápido. Una descarga de inundación es capaz de ampliar el canal, transportar grandes cantidades de sedimento y transformar físicamente parte del valle (Gupta, 2010). Por otro lado, las formas fluviales en un clima árido dependen de las inundaciones, aunque estas pueden repetirse a intervalos de hasta cientos de años (Schick, 1988; Patton et al., 1993; Bourke and Pickup, 1999). En algunas partes de las zonas tropicales, la forma del canal depende tanto de grandes inundaciones, así como de los flujos de la estación húmeda (Gupta, 1975, 1995). Este efecto puede ser temporal, teniendo como resultado la forma del cauce aluvial inundable y la evolución puede no estar relacionada a los grandes eventos, pero sí a las descargas del cauce lleno con un intervalo de recurrencia entre 1 y 2 años (Leopold et al., 1964). Aunado a las causas meteorológicas, las grandes inundaciones también se asocian al colapso de infraestructuras como presas artificiales y barreras relacionadas con deslizamientos de tierra, entre otros.

1.2.2 *Planicie de inundación*

A lo largo de la mayoría de los sistemas fluviales varían los estilos de las planicies de inundación a través de un continuo de aguas arriba a aguas abajo, desde estrechas llanuras de inundación de alta energía a amplias llanuras de inundación de bajo consumo energético. En la planicie, el riesgo de inundación se caracteriza por tres principales perfiles de valle representados por los tramos: aguas arriba, intermedia y abajo de un sistema fluvial típico. Estas geometrías de valle tienen un significado en términos de relaciones de la etapa de descarga, disipación de la energía, procesos de inundación, área de inundación, y la ocurrencia misma de las

inundaciones, representando diferentes riesgos en relación con los asentamientos humanos y su actividad económica (Gupta, 2010). Aunque no todos los estilos de valle (llanuras o planicie) presentan las mismas características, a menudo existen similitudes en el tipo de canal y las unidades geomorfológicas (Gupta, 2010). Las llanuras inundables comúnmente se componen de forma horizontal por sedimentos de grano grueso que son cubiertos por sedimentos de grano fino (Brakenridge, 1988; Bridge, 2003). Por ejemplo, en una planicie aluvial inferior junto a los bancos de canales exteriores, la superficie inundable inferior se caracteriza por una topografía irregular, constituida por las frecuentes inundaciones que contiene accidentes geográficos formados por sedimentos y erosión con arena mediana a gruesa y grava ocasional. Esta planicie aluvial inferior suele estar cubierta por vegetación de ribera, lo que favorece significativamente la disipación de energía de inundación. A diferencia de una planicie de inundación distal la cual contiene evidencia morfológica de los antiguos meandros del río, episódicamente inundadas por inundaciones extraordinarias. Aquí, la sedimentología está compuesta por sedimento de grano fino que rellenan paleomeandros y lodazales de remanso detenidos a lo largo de los márgenes del valle. Por lo anterior, la morfología de la planicie de inundación exhibe diferentes frecuencias de inundación.

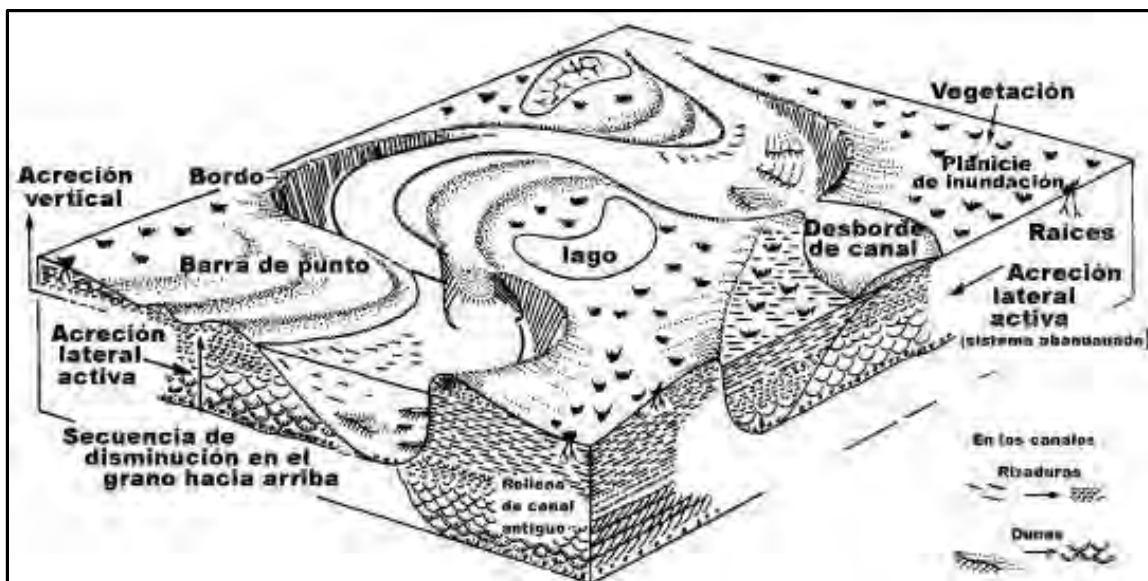


Figura 2. Sistema fluvial meándrico.
Fuente: Grijalva, 2005

1.3 Métodos para determinar la inundación

El manejo de inundaciones, con mayor frecuencia, involucra diversos enfoques coordinados a través de una variedad de sectores gubernamentales y grupos de interés teniendo como objetivo común la reducción en el área inundable para



aumentar las tierras habitables, la reducción en el nivel de inundación y la descarga máxima, y la reducción en la duración de la anegación. Diversas, estrategias incluyen la modificación física de la planicie de inundación y su canal. Algunas de estas modificaciones ingenieriles fundamentales en la planicie de inundación consideran diques para reducir el área de inundación, canales de drenaje y bombeo para eliminar el exceso de agua y cauces de alivio para reducir las etapas de inundación aguas abajo. Estos procedimientos de ingeniería de canales incluyen la remodelación del canal, canalización, y la ampliación, protección de márgenes para reducir la erosión, espigones para reducir la anchura del canal, y el dragado para el manejo de gradación del cauce del canal. Aunque estas técnicas se utilizan ampliamente en todo el mundo, su eficacia depende en gran medida de una comprensión detallada de los procesos hidrológicos y geomorfológicos modernos, así como el marco sedimentológico del sistema fluvial asociado (Winkely, 1994; Smith and Winkley, 1996; ASCE, 2007; Hudson et al., 2008).

Hoy en día, la geomorfología fluvial analiza las inundaciones desde varios puntos de vista, uno de ellos es el análisis de riesgo para lo cual se han establecido tres enfoques.

- A. Estimación de la respuesta hidrológica de las cuencas pequeñas (≤ 50 km²) utilizando modelos paramétricos relacionando características del hidrograma de crecida a la red de drenaje e índices de inundación (área de influencia, forma, densidad de drenaje, geometría de red de la corriente, etc.) (Horton, 1945; Strahler, 1957; Schumm, 1986).
- B. Delimitar las zonas de riesgo de inundación en amplios valles aluviales mediante la asignación de las formaciones relacionadas con las inundaciones y los depósitos, suelos y asociaciones vegetales, y las observaciones de las inundaciones pasadas (Gupta, 2010).
- C. Estimar la energía con base en modelos hidráulicos inversos de paleo-inundaciones discretas situados en escenarios como estanques y otros indicadores de paleo-etapas (Kochel and Baker, 1982; Baker, 2008).

Los tres puntos de vista se han beneficiado enormemente en las últimas décadas con los avances en la modelación numérica, metodologías geoespaciales como el sistema de posicionamiento global (GPS), fotogrametría digital, Percepción Remota (PR) y sistemas de información geográfica (SIG) (Benito et al., 2010). El uso de paleo-inundación se limita al lecho de roca y valles estrechos, pero proporciona estimaciones precisas de descarga de las inundaciones extraordinarias y análisis de la frecuencia de eventos posteriores, con numerosas aplicaciones para problemas de riesgo de inundaciones.



Los avances en metodologías espaciales han permitido el desarrollo de los mapas de riesgo de inundación, los cuales, son una herramienta fundamental para el reconocimiento de formas fluviales (valles, abanicos y meandros, entre otros) y la evaluación y gestión de la amenaza de estos eventos. Este tipo de mapas incluyen la extensión de la inundación de un intervalo de recurrencia de inundaciones dado y la información hidráulica básica como nivel del agua, velocidad e intensidad de las inundaciones. Asimismo, la cartografía ilustra el área inundable y el impacto potencial de daño, incluyendo el riesgo humano, el valor económico y los sistemas ambientales. En general, los mapas de inundación requieren de un análisis basado en el cálculo de la descarga máxima de inundación y los niveles de la etapa de inundación, correspondientes para eventos de diferentes frecuencias de ocurrencia o periodos de retorno, lo que permite asociar los daños a una probabilidad, y establecer zonas de inundación de probabilidad alta, media y baja. Otra forma de establecer las zonas inundables se basa en criterios múltiples, en los que se incluyen los registros de aforo de caudales, cartografía geomorfológica de accidentes geográficos relacionados con las inundaciones, evidencia histórica y eventos ocasionales. La evidencia histórica, especialmente aquella relacionada con eventos que tuvieron una influencia determinante en las prácticas culturales de una región, debe compartirse para entender los eventos presentes y predecir los futuros (Higgitt, 2010). La evidencia oral o mitológica debe acompañarse con estrategias de mitigación, las cuales por un lado atienden a medidas tradicionales para el manejo de desastres naturales y, por otro, consideran el desarrollo de reglas, políticas o sistemas de alertamiento.

Como se mencionó nuevas tecnologías como el uso de la percepción remota (PR) y de información espacial como imágenes de satélite permiten, entre otras cosas, caracterizar un evento extraordinario ya que al analizar la superficie terrestre se detectan aspectos relacionados con el desastre, se cuantifica el movimiento del agua (inundaciones, tsunamis y tormentas) y se hace un inventario de los elementos con riesgo potencial (ej. edificios, caminos, zonas agrícolas, etc.) (van Westen, 2010; Gillespie et al., 2007). Una de las principales ventajas de la PR es su resolución espectral, espacial y temporal, además permite hacer un análisis sinóptico de los datos sobre áreas extensas.

Actualmente, los datos espaciales son la primera etapa en la integración de la predicción de desastres ya que proveen información de eventos pasados, así como elementos empleados en el modelado de una inundación. Para cartografiar eventos pasados es crucial contar con una amplia cobertura temporal, de manera que se generen mapas de eventos con diferentes periodos de retorno. Las imágenes también pueden tenerse durante ó inmediatamente posterior a un evento. Sin embargo, es importante mencionar que si el pico de la inundación es pequeño o si el área está cubierta por nubes resulta difícil el uso de imágenes de tipo óptico, por lo que se recomienda el uso de imágenes de microondas.

Sensores pasivos de alta resolución son capaces de generar evaluaciones precisas del daño de inundaciones. Adicional al uso de PR, el uso de los SIG provee una herramienta para crear bases de datos y visualizarlos, al trabajar con diversas capas de información y tablas de atributos, y mediante la modelación numérica generar diferentes escenarios incluso en el momento que se presenta un evento extremo.

A continuación se presenta brevemente en que consiste la percepción remota y el SIG.

1.3.1 *Percepción remota*

La percepción remota es un conjunto de técnicas mediante las cuales se obtiene el registro y análisis de la energía electromagnética para analizar un objeto sin que haya contacto directo con él (Chuvienco, 2010). Las técnicas de percepción remota permiten obtener datos de la energía emitida o reflejada de la superficie terrestre, la cual se transforma a valores físicos los cuales pueden medirse en la realidad.

En percepción remota (PR), el flujo de energía es un proceso por el cual se transmite energía de un cuerpo a otro, que se encuentran a diferente temperatura. Las propiedades de la radiación electromagnética se explican por el modelo de ondas (enfoque de Huygens y Maxwell) y la teoría de las partículas (enfoque de Planck y Einstein). El primero, establece que la energía electromagnética se propaga a través del espacio en forma de ondas senoidales caracterizadas por campos eléctricos y magnéticos, perpendiculares entre sí y a una temperatura mayor al cero absoluto (0 K) (Fig. 3).

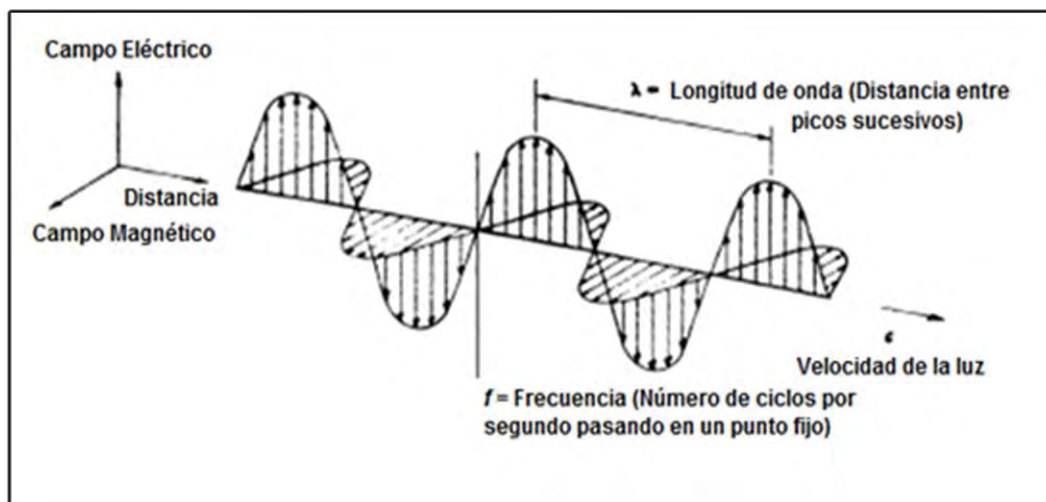


Figura 3. Esquema de onda electromagnética.
Fuente: FAO, 1990



En ambos campos, la propagación en el espacio se realiza a la velocidad de la luz:

$$c = \lambda \cdot \nu \quad \dots\dots\dots (1)$$

Donde

- λ : Longitud de onda es la distancia entre dos crestas sucesivas (μm)
- ν : Frecuencia de onda es el tiempo transcurrido entre el paso de dos crestas sucesivas (Hz, herzt equivalente a un ciclo por segundo.)
- c : Velocidad de la luz ($3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

La teoría de las partículas mide la energía electromagnética en función de unidades discretas llamadas fotones. La cantidad de energía transportada por cada fotón se define por:

$$Q = h \cdot \nu \quad \dots\dots\dots (2)$$

Donde

- Q : energía del fotón (J)
- h : constante de Planck ($6.6262 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)

Ambas teorías se pueden relacionar resolviendo la ecuación 1 para ν y sustituyéndola en 2

$$Q = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (3)$$

Por lo tanto, existirá una relación inversamente proporcional entre la longitud de onda y la cantidad de energía, es decir, al aumentar la longitud de onda la cantidad de energía será menor y viceversa.

Al conjunto de todas las longitudes de onda se le denomina espectro electromagnético (Fig. 4), el cual se divide en regiones y, estas regiones, en categorías, donde las longitudes presentan cierta homogeneidad.

- Región de rayos gama, rayos x y ultravioleta comprenden intervalos menores a $0.4 \mu\text{m}$;
- Región del visible que incluye el intervalo del azul (0.4 a $0.5 \mu\text{m}$), verde (0.5 a $0.6 \mu\text{m}$) y rojo (0.6 a $0.7 \mu\text{m}$);
- Región del infrarrojo, el cual se divide en cercano (0.7 a $1.3 \mu\text{m}$), medio (1.3 a $8 \mu\text{m}$) y térmico (8 a $14 \mu\text{m}$).

- Región del microondas, radar y ondas de radio y tv, las cuales son mayores a 8 μm .

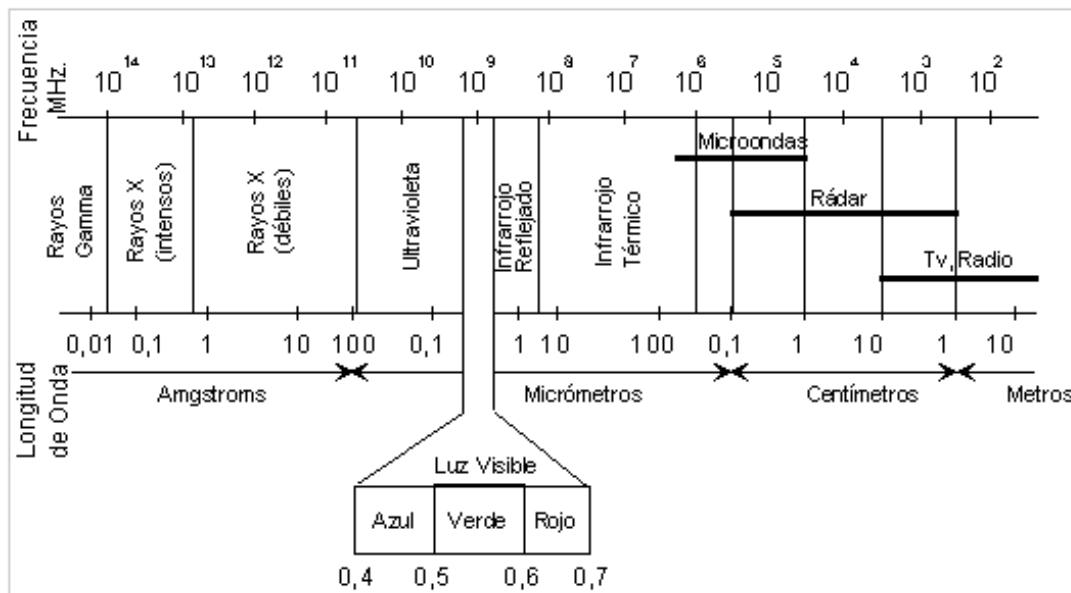


Figura 4. Espectro electromagnético.
Fuente: Chuvieco, 2010.

1.3.1.1 Adquisición de datos usando percepción remota

La adquisición de información de la superficie terrestre con percepción remota está compuesta por los elementos siguientes (Engman and Gurney (1991): (a) fuentes de energía, (b) flujo de energía, (c) objeto observado, (d) sensor, (e) envío de información adquirida, (f) estación receptora e (g) imágenes digitales (Fig. 5).

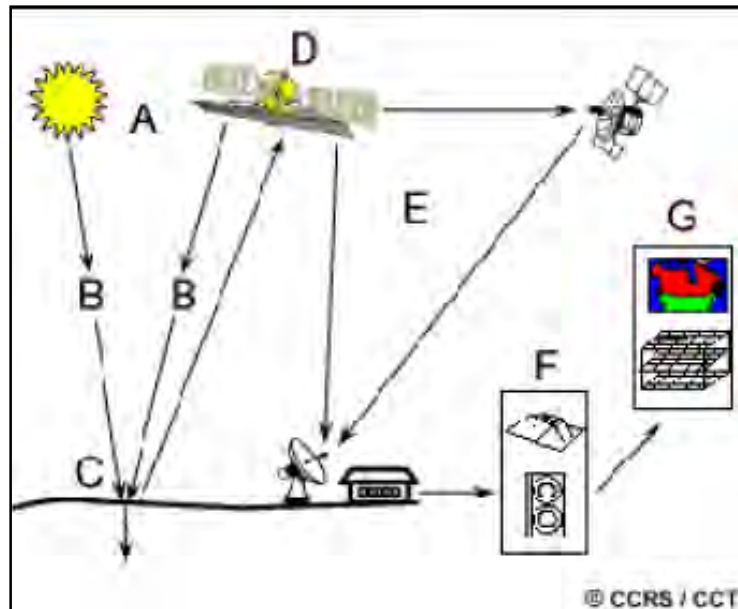


Figura 5. Elementos para la adquisición de datos. A y D= son las fuentes de emisión, B= es la trayectoria de la energía emitida, C= los objetos que recibe la energía, E= satélites envían la información a las estaciones receptoras, F= almacenamiento y procesamiento de la información G= imagen salida.

Fuente: CCRS/CCT, 2010

- A. La fuente de energía se basa en el origen de la energía, este puede ser natural o artificial, la primera de ellas es la más importante debido a que deriva directamente de la luz solar, mientras que el caso de una fuente artificial, por una parte, se encuentra la que es emitida por los mismos sensores y, por la otra, la generada por los objetos.
- B. El flujo de energía consiste en los campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que se propagan en un medio transportando energía de un sitio a otro (*trayectoria de paso*); siendo de gran importancia ya que permite la interacción del objeto observado con la fuente de energía y el sensor encargado de capturar la información. La trayectoria puede variar debido a las diferentes interacciones que tienen lugar en la atmósfera, como la presencia de algunos gases específicos de la atmósfera, los cuales afectan selectivamente la cantidad de energía que es transmitida denominándose *ventana atmosférica*. Engman and Gurney (1991) definen la ventana atmosférica como aquella longitud de onda donde la atmósfera tiene poco o ningún efecto en la intensidad de la radiación del Sol o en la radiación reflejada desde la Tierra. El efecto neto de la atmósfera varía con las diferencias en la trayectoria de paso y con la magnitud de la energía a ser detectada, las condiciones atmosféricas presentes y la longitud de onda capturada por lo que se deben tomar en cuenta los aspectos siguientes:



- Dispersión. Cambio en la dirección de la energía.
- Absorción. Implica la pérdida de energía debido a una sustancia o un cuerpo.
- Transmisión. Es el paso de la energía electromagnética a través de una ventana atmosférica.

Estos elementos generan pérdidas en la cantidad de energía transportada, provocando que la información de cada objeto capturada por el sensor disminuya.

- C. El objeto a ser observado es un cuerpo que recibe la energía emitida por la fuente, y que de acuerdo con sus características puede reflejar, absorber o transferir dicha energía. Algunos ejemplos son vegetación, zonas urbanas, cuerpos de agua, etc., cada uno con características distintas.
- D. El sensor es un instrumento que captura la radiación reflejada por la superficie terrestre. La mayoría de los sensores se basan en principios electro-ópticos y registran la energía reflejada en varios intervalos del espectro electromagnético generando curvas de reflectancia espectral de las diferentes cubiertas. Cada sensor tiene una resolución distinta, la cual se puede definir como la calidad que presenta el sistema para adquirir información, resultando importante para describir el tipo de datos que son enviados por dicho sensor, y la manera en que pueden ser empleados. Los tipos de resolución son los siguientes (Chuvieco, 2010):
- *Resolución espacial.* Se refiere al objeto más pequeño que se puede distinguir dentro de una imagen, es decir, trata del tamaño del píxel, mientras mayor sea la resolución espacial aumenta la capacidad para distinguir objetos más pequeños dentro de una imagen.
 - *Resolución espectral.* Se refiere al número y anchura de bandas del espectro electromagnético que componen un determinado sensor.
 - *Resolución radiométrica.* Se refiere a la capacidad de detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe el sensor, mientras mayor sea la resolución radiométrica mayor es la capacidad de interpretar una imagen.
 - *Resolución temporal.* Se refiere a la capacidad de un sensor de volver a obtener una imagen de la misma porción de la superficie terrestre, es decir, mientras mayor sea la resolución temporal menor será el tiempo requerido para obtener otra imagen de la misma zona. Esta resolución resulta de gran importancia para realizar análisis multi-temporales.



- E. Los sensores son portados en diversos sistemas incluyen aviones, helicópteros, globos, cometas, vehículos ligeros no tripulados, etc. La ventaja de estar en aeronaves, comparado con satélites, es la capacidad para producir imágenes con una resolución espacial alta (20 cm o menos). La desventaja es que cubren un área pequeña y el costo es alto, lo contrario de algunos sensores portados en satélites los cuales tienen una extensa cobertura y se pueden conseguir a un precio relativamente económico. Dependiendo de la plataforma y el sensor, las observaciones se pueden lograr a altitudes menores de 100 m y hasta 40 km.
- F. La información registrada por el sensor es enviada a una estación receptora, la cual se encarga de procesar dicha información, para obtener imágenes digitales que serán distribuidas a los usuarios.
- G. La información registrada por los sensores se puede proporcionar en formato análogo (fotografía aérea) y digital (imágenes de satélite). El término de imagen se asocia a datos en una fotografía, por lo que se cuenta con datos analógicos y digitales al mismo tiempo; sin embargo, las imágenes no siempre son fotografías, en especial cuando se trata de sensores infrarrojos. La calidad de la imagen estará determinada, en primer lugar, por las características del sistema sensor-plataforma. Estas imágenes serán empleadas por los usuarios dando diferentes enfoques, para lo cual se aplican técnicas de percepción remota que permitan obtener la información que se requiera de ellas.

Una imagen digital consiste en un arreglo de elementos 2D, esto es, de igual tamaño llamado píxel. El arreglo espacial de los registros define la imagen o espacio de la imagen, por lo que dependiendo del sensor, los datos se registran en n bandas. Así para un píxel, los valores en dos bandas pueden arreglarse como componentes en un vector 2D, conocido como vector característico. En el caso de tres bandas estas corresponderán a una gráfica tridimensional donde los valores de cada vector son llamados *espacio característico*. Este espacio permite generar nuevas imágenes aplicando transformaciones lineales a una o varias imágenes. Las nuevas imágenes representan una descripción alternativa de los datos, en la cual los números digitales (ND) de un píxel están relacionados con sus ND originales mediante esa transformación lineal. La imagen transformada puede destacar ciertas características que no era posible discernir en los datos originales o, alternativamente, preservar la información esencial contenida en la imagen en un número menor de dimensiones. Las transformaciones pueden llevarse a cabo para realizar un mejoramiento de la imagen (una simple mejora visual hasta la restitución por distorsiones geométricas, presencia de dispersión,



contaminación por píxeles o degradación ocasionada por cualquier otro factor) o un análisis previo a la aplicación de técnicas de clasificación (Ferrero et al., 2002).

A continuación se presentan el mejoramiento visual y espacial a través de filtros como ejemplos básicos de las transformaciones efectuadas a las imágenes.

Mejoramiento visual- RGB

La composición de falso color es una representación visual en la que se combinan los colores primarios rojo, verde y azul. Partiendo de este concepto se puede obtener una composición de color natural, es decir, empleando colores similares a los observados por el ojo humano se observaran los diferentes aspectos en una escena (vegetación, suelo, agua, zona urbana, etc.).

Debido a que el ojo humano es capaz de ver únicamente la región del espectro visible (0.4 a 0.7 μm), es necesario recurrir a las composiciones de falso color, RGB (R=Rojo, G=verde, B=azul), en las cuales también pueden ser empleadas bandas que cubren longitudes de onda más grandes, como lo es la región del infrarrojo cercano (0.7 a 1.3 μm). En las composiciones de falso color, la intensidad de un color será proporcional a la respuesta espectral que tengan los objetos en la banda asignada a ese color. Un ejemplo de ello se muestra con los cuerpos de agua, al ser observados en una composición utilizando las bandas de la región de los colores azul (0.4 a 0.5 μm), verde (0.5 a 0.6 μm) y rojo (0.6 a 0.7 μm), y asignando cada banda a su color correspondiente en la composición, el agua se muestran en tonalidades de color azul, mientras, si se emplearan únicamente bandas de la región del infrarrojo (0.7 a 14 μm), los cuerpos de agua se mostrarían en tonos de color negro, esto sucede debido a que en la región del visible los cuerpos de agua muestran una mayor respuesta espectral en la región del color azul (0.4 a 0.5 μm), mientras que aumentar la longitud de onda la respuesta espectral para este aspecto tiende a ser nula, lo cual provoca que la representación al utilizar bandas de la región del infrarrojo sea de color negro.

Mejoramiento espacial – Filtros de paso alto

El filtrado espacial, se aplica en el procesamiento digital de imágenes, para realzar o eliminar detalles espaciales o variaciones en la frecuencia de los valores de ND de los píxeles de la imagen y así lograr un mejoramiento en la interpretación visual. Los filtros se componen de una matriz móvil, denominada Kernel o máscara, con un tamaño variable. Por tanto, se aplica un kernel a una imagen donde cada elemento tiene un coeficiente o factor de ponderación generando otra imagen. Dado este coeficiente, la nueva imagen tendrá ND diferentes a la imagen



de origen. En general, se tienen dos tipos de filtros que se aplican en el dominio espacial: paso bajo y paso alto. Los primeros eliminan la información de frecuencia, dejando pasar las de baja frecuencia, lo que se observa como un suavizado en la imagen resultante (algunas veces se genera un desenfoque). Los filtros de paso alto eliminan frecuencias altas, dejando los de baja, normalmente observables por bodes o límites entre áreas de diferentes valores de ND. *En los filtros de paso alto se puede hacer un reforzamiento de bordes o una extracción de bordes. En el último caso, se les llama detectores de contornos, donde precisamente se genera una imagen que contenga solamente información sobre los bordes existentes en la imagen original. El trazado de los contornos es el resultado de representar los vectores direccionales cuyos módulos son las diferencias registradas en todas las direcciones que superen un denominado umbral. Estos filtros de paso alto hacen 0 (cero) los ND de las áreas de la imagen que no registren variaciones. Los más empleados son Sobel y Roberts (Pérez, 2007).*

1.3.2 Sistema de Información Geográfico

Folger (2009) define al SIG como un sistema a través del cual se puede capturar, almacenar, analizar (manejar, *procesar, integrar*) y *desplegar información geocientífica referida a un espacio.*

Aunque existen sistemas (software) que integran todas las funciones de un SIG, es necesario conocer la manera en que los datos son compilados, las rutinas necesarias para organizarlos y como se modifican los programas para satisfacer las necesidades de un proyecto. Así, la infraestructura (hardware) básica para un SIG deberá considerar que hospedará al software propio del SIG pero además deberá contar con la capacidad requerida para el almacenamiento y procesamiento de la información y los programas para ello.

Los datos geográficos se analizan en tres etapas:

- **Preparación y entrada.** Es la etapa inicial donde los datos para estudiar un fenómeno son colectados y preparados para ingresarlos al sistema
- **Análisis.** La etapa intermedia en la cual los datos colectados se revisan cuidadosamente y se cruzan para obtener información útil.
- **Presentación.** La etapa final en la cual los resultados iniciales son presentados en una manera apropiada según el fenómeno estudiado.

Datos espaciales o datos geoespaciales son aquellos que contienen valores posicionales relativos a la superficie de la Tierra o están georeferenciados. A diferencia de la información que refiere a la interpretación de los datos espaciales.



Al estar la descripción completa de un fenómeno en función de los elementos que se tienen para caracterizarlo, el espacio geográfico puede contener un fenómeno que tiene un valor en una región o bien una localidad. El espacio geográfico puede ser discreto y continuo. De hecho, se considera que un fenómeno natural se identifica en un campo geográfico, mientras que un fenómeno hecho por el hombre se distingue por objetos (carreteras, puentes, edificios, etc.)(ITC, 2004).

2. ZONA DE ESTUDIO

2.1 Localización geográfica

La cuenca del río Papaloapan geográficamente se ubica en las coordenadas extremas 17° y 19° de latitud norte y 95° y 97°40' de longitud oeste. Comprende los estados de Puebla (12% de la cuenca), Oaxaca (51% de la cuenca) y Veracruz (37% de la cuenca) (Fig. 6), con un área calculada de 46,517 km² abarcando total o parcialmente 244 municipios con una población de 3.3 millones de habitantes (Consejo de Cuenca del Río Papaloapan, 2014). El área total de influencia de la cuenca, considerando el total de la superficie de los municipios que tienen una porción mayor al 60%, incrementa a 49,335km², lo que representa 2.5% del territorio nacional (Consejo de Cuenca del Río Papaloapan, 2014; Merinol, 1975).

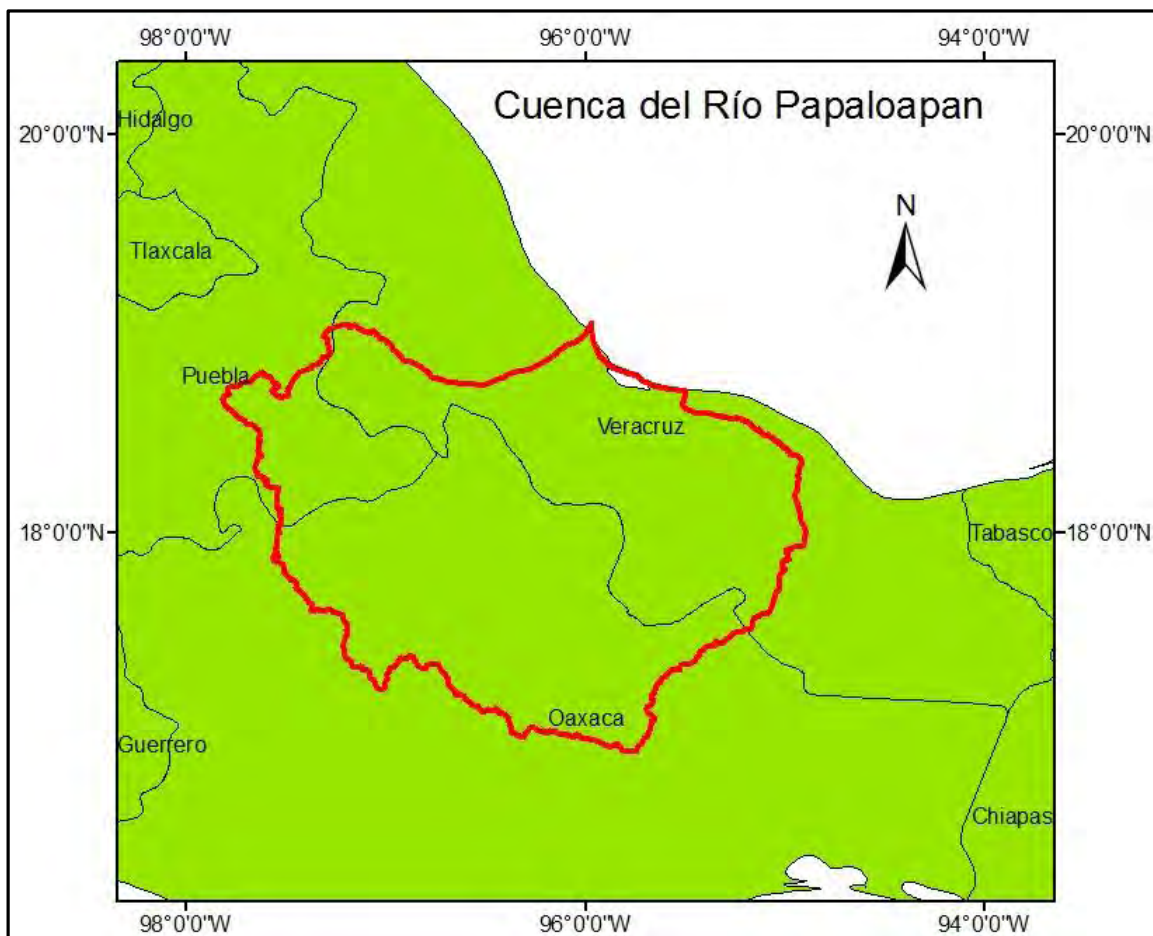


Figura 6. Delimitación de la cuenca del Río Papaloapan en color Rojo.

Esta región hidrológica colinda al norte con las cuencas cerradas oriental y la del río Atoyac de Veracruz, al sur con la cuenca de los ríos Atoyac Oaxaca y



Tehuantepec, al este con la del río Coatzacoalcos y al oeste con la del río Balsas. En ella, se consideran dos grandes regiones, el alto Papaloapan o Cuenca alta y el Bajo Papaloapan o Cuenca Baja, considerando en esta última aquellas zonas de la cuenca que se encuentran ubicadas debajo de los 100 msnm (López, 2008).

2.2 Clima

La clasificación de Köppen, define la zona de estudio con un clima cálido, el más húmedo de los que presentan lluvias en verano, del tipo Am y Aw2, la última refiere a una mayor humedad. La precipitación media anual varía de 1126.5 a 1957.7 mm en la zona noreste y una temperatura media anual de 25.2 °C (CONAGUA, 2002). En la zona de la costa presenta una temperatura promedio de 24°C, con temperaturas medias anuales de 18°C en los macizos montañosos de la sierra Madre Oriental y de la Sierra de la Mixteca (López, 2008).

La cercanía de la zona de estudio con el Golfo de México, tiene como consecuencia que las mayores precipitaciones del año sean producto de tormentas tropicales y huracanes, marcando la temporada de lluvias en verano y parte de otoño (López, 2008). Otro fenómeno importante que se presenta en este sitio, son las masas de aire frío “Nortes”, las cuales provocan considerables precipitaciones y el descenso de la temperatura en el área de impacto, en la temporada invernal y parte de la primavera (Vázquez, 1998).

2.3 Hidrología

El sistema hídrico del Papaloapan, comprende la región hidrológica No. 28-B y se ubica en la vertiente del Golfo de México. Este tiene escurrimientos anuales mínimos de 25,000 millones de m³ (Mm³) y máximos de 67,000 Mm³, lo que da como resultado una media anual de 47,000 Mm³ (Consejo de Cuenca del Río Papaloapan, 2014). Sus aguas son vertidas en la Laguna de Alvarado y representan el 12% del volumen escurrido anualmente a nivel nacional (Consejo de Cuenca del Río Papaloapan, 2014).

La cuenca del río Papaloapan se compone por diversos afluentes, de los cuales destacan los ríos Blanco, Tonto (controlado por la presa Presidente Miguel Alemán con capacidad de 9,000 (Mm³), Santo Domingo (controlado por la presa Presidente Miguel de la Madrid con capacidad de 3,547 (Mm³), Usila, Valle Nacional, Obispo, Tesechoacán, y San Juan (Consejo de Cuenca del Río Papaloapan, 2014; Merino, 1975).

El Río Papaloapan, debido a las inundaciones que ha presentado a lo largo de su historia, ha sido modificado para protección de su llanura de inundación. Para ello se han realizado cortes de rectificación teniendo como resultado la reducción de su recorrido por la planicie costera de más de 50 km, además de la construcción de bordes de protección en ambas márgenes del río (Consejo de Cuenca del Río Papaloapan, 2014).

Actualmente, el Papaloapan tiene una longitud de 240 km, desde la confluencia hasta su desembocadura con el Golfo de México (Fig. 7). Este río se clasifica como un río del tipo meandriforme, debido a su configuración sobre la planicie fluvial, es decir, tiene un índice de sinuosidad mayor a 1.5 (López, 2008), lo que indica la presencia de curvas (meandros) a lo largo del cauce, en las cuales la parte interna de la curva presenta acumulación de sedimentos (azolve) y la parte externa pérdida de material (erosión). Generalmente este tipo de ríos presentan pendientes longitudinales pequeñas y una abundante carga en suspensión o mixta (carga en suspensión y carga de fondo) (Pedraza, 1996).



Figura 7. Trayectoria del Río Papaloapan y sus afluentes.
Fuente: Wikipedia, 2014.

En la cuenca del río Papaloapan se ubican varias lagunas destacando por su magnitud, al oeste de la comunidad de Amatitlán la laguna de El Salado; al noroeste de la localidad de Acula se encuentran las lagunas Siluetas, Punta Lagarto, Mata de Palma y Rincón del Venado; al sur de Boca del Río se ubica la



laguna el Carrizo; al oeste de Tlacotalpan se encuentran las lagunas el Pájaro y el Embarcadero, al norte las lagunas María Elvira, Coyol, Macuile, Los Amantes, La Virgen, Los Manglares y Mate Mangle, mientras que al sureste se encuentran la laguna Lagartera y al noreste las lagunas Fresada, el Reloj y el Zapote; al oeste de Chacaltianguis se encuentra la laguna El Plan mientras que al suroeste de esta misma localidad se ubica la laguna Socorro, San Pablo y el Burro; al oeste de San José Papaloapan se sitúa la laguna Jolote; al oeste de San Miguel Xochitl se encuentra la laguna Martinela; y, finalmente, al sureste de la comunidad de Alvarado se encuentra la laguna de Alvarado, siendo esta la de mayor tamaño (López, 2008).

2.4 Edafología

La zona de la cuenca del río Papaloapan muestra ocho tipos de suelo, los cuales, de acuerdo con el INEGI (1994) son los siguientes: Acrisol, Litosol, Gleysol, Regosol, Feozem, Vertisol, Luvisol y Arenosol, de los cuales predomina el Gleysol.

El Acrisol, se caracteriza por ubicarse en zonas tropicales o templadas muy lluviosas. Se encuentra en zonas donde se unen los ríos Santo Domingo y Valle Nacional, posteriormente se extiende hacia el este (INEGI 1994). Se distribuye en la llanura alta de inundación y los lomeríos, en los cuales no hay presencia de inundaciones (López, 2008).

El tipo de suelo litosol se caracteriza por tener una profundidad menor a los 10 cm (INEGI, 1981). Dentro de la zona de estudio se ubica al oeste de la confluencia de los ríos Santo Domingo y Valle Nacional, y al norte de Piedra Quemada, sobre la margen izquierda del río Papaloapan, presentándose en ambos casos sobre lomeríos (López, 2008).

El tipo de suelo Gleysol, característico por ubicarse en lugares inundados por periodos prolongados, se encuentra en la confluencia del Río Tesechoacan y el Río Papaloapan. También se encuentra en algunos sitios de los márgenes del Río Papaloapan en las zonas de Cosamaloapan hasta la desembocadura del río para la margen izquierda y al sur de Ambrosio Alcalde hasta encontrar la elevación de las dunas costeras, con excepción a algunas áreas identificadas con suelos Luvisoles, para la margen derecha (INEGI, 1994).

El suelo Regosol se encuentran en los lomeríos eólicos y en la planicie costera, en los cuales se encuentran materiales no consolidados (López, 2008). Este tipo de



suelo se caracteriza por no presentar capas distintas, en general son claros y se parecen bastante a la roca que los subyacen (INEGI, 1994).

El tipo de suelo Feozem se caracteriza por presentar una capa superficial oscura, rica en materia orgánica. Este tipo de suelos se encuentran en los márgenes del río Papaloapan en las zonas de Carlos A. Carrillo y Acula, de igual forma se presentan sobre los márgenes del río Tonto en extensiones muy reducidas(INEGI, 1994)

El tipo de suelo Vertisol, se desarrolla en climas tropicales y subtropicales con una marcada diferencia entre las estaciones secas y húmedas, ya que tienen la propiedad de hincharse cuando están húmedas y encoger cuando están secas (INEGI, 1994). Este tipo de suelo se ubican en la zona de Paraíso Novillero hacia la localidad de Cosamaloapan y sus alrededores (INEGI, 1994).

El suelo Arenosol, se caracteriza por ubicarse en zonas tropicales o templadas, y tiene gran relación con la vegetación de selva, bosque y matorral. Este tipo de suelo se encuentra en zonas reducidas al sur de Guadalupe Victoria y , al sur y oeste de Mata de Caña (López, 2008).

Luvisol, es un tipo de suelo que se caracteriza por mantener un horizonte de acumulación de arcilla y por tener procesos de lixiviación (INEGI, 1981). La distribución de este tipo de suelo corresponde a las llanuras altas de inundación, en donde los proceso de inundación son escasos (López, 2008).

2.5 Vegetación

La zona del río Papaloapan cuenta con diferentes tipos de vegetación. En la zona de dunas costeras se encuentra pastizal inducido. La cuenca alta presenta bosque mesofilo de montaña, bosque de pino-encino y encino, los cuales cubren cerca del 50% de la superficie, en el resto se desarrolla la agricultura. En los sitios cercanos a la laguna de Alvarado se encuentra el manglar, el cual es caracterizado por crecer bajo altas concentraciones de salinidad; en este lugar también se encuentra vegetación de tular. Otras de las especies identificadas en la zona de estudio son el platanillo y lirio acuático. Sobre los márgenes del río se halla, en cantidad reducida, la selva alta perennifolia, la cual es caracterizada por alcanzar los 30 metros de altura y se desarrolla en climas cálido-húmedos y sub-húmedo (López, 2008).



2.6 Economía

En la cuenca del río Papaloapan se presentan tres actividades económicas principales. La primera de ellas se trata de la agricultura (caña de azúcar y maíz) ocupando el 57% del total del área, la ganadería utiliza el 40 % de la tierra y, finalmente, el resto se trata de ríos y lagunas, en los cuales se desarrolla la pesca (Bonilla, 2011). También cuentan con corrientes que benefician la irrigación e incluso tienen un aprovechamiento hidroeléctrico. En el subsuelo de esta zona se encuentran mantos petrolíferos y en la zona montañosa existen bancos de minerales metálicos y no metálicos (Bonilla, 2011).

El sector industrial genera el 61.1% de la producción bruta total del Papaloapan. La industria manufacturera contribuye con 96.0%, la construcción el 2.9%; la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, suministro de agua y de gas por ductos aporta el 1.1% y la minería el 0.1%. Dentro de la industria manufacturera se destaca que en su mayoría la producción se debe a la industria alimentaria, en especial por la elaboración de azúcares; así como la industria del papel (SEFIPLAN, 2013).

Los 244 municipios que contiene la cuenca del Río Papaloapan, desarrollan actividades económicas similares. Dentro de estos municipios se encuentra Tlacotalpan, el cual sobresale por ser considerado patrimonio cultural de la humanidad, en este municipio el porcentaje de uso de suelo es de 60% ganadero, 15% agricultura, 5% ocupación por viviendas y 20 % de aguas donde se aprovechan los productos pesqueros (SEMAR, 2012). Aunque, las principales actividades económicas en esta comunidad son la pesca y el turismo. La primera de ellas se realiza a escalas pequeñas, debido a que el río carece de dragado y por tal motivo únicamente pueden navegar embarcaciones pequeñas (SEMAR, 2012). Los principales productos pesqueros en esta zona son róbalo, chucumite, mojarra, jaiba, camarón y acamaya (SEMAR, 2012). El turismo es impulsado por las fiestas tradicionales y los monumentos históricos, la fiesta más importante es la realizada en honor a la Virgen de la Candelaria celebrada el 2 de febrero.



3. METODOLOGÍA

Este trabajo de tesis propone el empleo de la percepción remota y SIG, junto con información de la zona de estudio, para determinar los procesos geomorfológicos que han dado lugar a cambios en el cauce del río Papaloapan y su planicie de inundación tras eventos extremos que han generado inundaciones importantes en la zona de estudio, la cual fue considerada con 92 kilómetros a lo largo del río, de los cuales son 61 kilómetros aguas arriba y 31 km aguas abajo a partir del municipio de Tlacotalpan.

3.1 Métodos

Los estudios espacio-temporales se han beneficiado con el implemento de información espacial, la cual permite el análisis de diferentes aspectos de un problema, debido a que cuentan con una mayor cobertura espacial, además de requerir menor tiempo para obtener información de un mismo sitio (mejor resolución temporal). En este tipo de estudios es importante tomar en cuenta diferentes aspectos como el objetivo u objeto a ser estudiado, el tamaño del área de estudio, las partes involucradas, la escala de estudio, la información histórica de inundaciones, los nuevos datos disponibles y los métodos que se utilizarán (van Westen, 2010). Un enfoque para la evaluación del peligro de inundación, indica delimitar las zonas de riesgo de inundación por los accidentes geográficos y los depósitos, teniendo en cuenta características como el suelo, vegetación, topografía e inundaciones históricas (Benito y Hudson, 2010).

La metodología que se siguió consiste en tres pasos: registros históricos, análisis de las condiciones del sitio, y aplicación de técnicas de PR a imágenes de satélite y otra información ráster disponible (Fig. 8). El registro histórico fue empleado para conocer los eventos que se han presentado anteriormente en la zona de estudio y que han provocado cambios en la morfología del río y su planicie, siendo de gran importancia para adquirir la información del tipo ráster usada en este análisis. La zona de estudio se caracterizó con base en información obtenida a partir de cartas temáticas del INEGI (edafología, geomorfología, hidrología, uso de suelo, vegetación y topografía). Estos aspectos permitieron conocer las condiciones bajo las cuales se presentaron los eventos de inundación, siendo fundamental para interpretar la información ráster, ya que si se conocen las características de la zona de estudio es posible determinar las causas de las variaciones morfológicas, es decir, si estos cambios se deben al tipo de suelo que se presenta, a cambios en el cauce del río, cambios en el uso de suelo, modificaciones en la vegetación o variaciones en la topografía, y si esas modificaciones fueron naturales o forzadas. Otro factor de gran importancia en la caracterización de la zona de estudio son los

asentamientos humanos, debido a que estos representan un riesgo alto ante una inundación, debido a los daños sociales (muertes y heridos) y económicos que se generan. Las comunidades más cercanas a la ribera del río son: Tuxtepec, Chacaltianguis, Carlos A. Carrillo, Cosamaloapan, Alvarado y, en particular, el Municipio de Tlacotalpan.

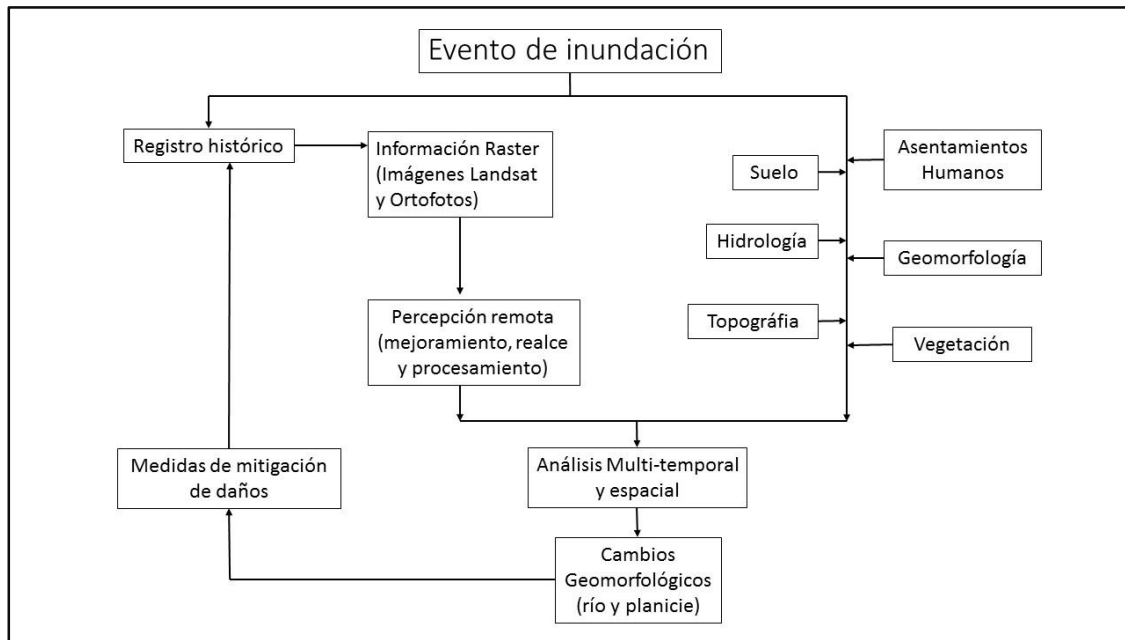


Figura 8. Principales componentes seguidos en la metodología para determinar los cambios geomorfológicos del cauce del río y la planicie de inundación.

La información ráster disponible consiste en imágenes satelitales y ortofotos. A las dos les fueron aplicadas técnicas de percepción remota con el fin de resaltar los aspectos de la superficie de estudio (ej. límite entre cuerpos de agua, en específico ríos, con suelos, vegetación o zonas urbanas), de tal manera que facilitará el trazo del cauce del río y su planicie. Las técnicas de percepción remota empleadas son: composición de falso color, la cual es aplicada a las imágenes satelitales y a ortofotos (10k), y filtro non-directional edge el cual le fue aplicado a las imágenes satelitales. El filtro *non directional Edge*, es un filtro paso bajo con el cual se resaltan los bordes dentro de una imagen, determinando los cambios abruptos o suaves en los píxeles y con ello se obtiene un vector que será representado mediante una línea, la cual indica el borde.

Una vez realizados los procesos anteriores, la información geospacial se alimentó, cruzó y analizó en un SIG empleando el programa ArcGIS. Los mapas obtenidos de la composición de falso color (RGB) y filtrado se emplearon como base en el trazo del cauce del río y su planicie de inundación. En el caso del cauce del río este se delimitó a partir su flujo base considerado igual al ancho del cauce,



mientras que para la planicie de inundación se observaron las huellas de agua en forma de anomalías generadas por la humedad del suelo, zonas embalsadas, vegetación perturbada, entre otros indicadores presentes después de una inundación. Para delimitar ambos aspectos fue necesario crear capas de polilíneas (información vectorial). Finalmente, la información vectorial fue empleada para comparar los cambios para cada año de análisis observando la anchura del canal y sinuosidad, cambios en islas y meandros, y extensión de la inundación sobre el valle.

3.2 Datos

La información espacial empleada para el estudio fue seleccionada en función de la fecha en que ocurrieron los eventos extraordinarios (huracanes, nortes y tormentas tropicales o frentes fríos) que impactaron la zona de estudio, para lo cual se consultó la base de datos de ciclones ocurridos en México de 1970 a 2011 del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (Tabla 1).

Tabla 1. Ciclones que impactaron la cuenca del río Papaloapan en el periodo de estudio.

Año	Nombre	Categoría	Lugar donde tocó tierra	Estados Afectados	Periodo	Vientos
1978	Bess	Tormenta Tropical	Tecolutla, Ver.	Ver.	5-8 Ago	75 km/hr
1980	Hermine	Tormenta tropical	Sacxan, Qroo	Qroo., Camp., Ver., Oax.	20-26 Sep	100 km/hr
1984	Eduard	Tormenta tropical	A 70 km al este de Nautla, Ver.	Ver.	14-15 Sep	65 km/hr
1988	Debby	Huracan C1	Tuxpan, Ver.	Ver., Hgo., D.f., Pue., Mich., Jal.	31 ago-8 sep	120km/hr
1990	Diana	Tormenta tropical	Chetumal, Qroo (Tuxpan, Ver.)	Qroo., Yuc., Cam., Ver., Hgo., SLP., Qro., Gto., Jal., Nay.	4-8 Ago	110 km/hr
1991	DT2	Depresion tropical	La pesca, Tam.	Tam., SLP., Ver.	5-7 Jul	55 km/hr
1993	Gert	Tormenta Tropical	Chetumal, Qroo (Tuxpan, Ver.)	Qroo., Camp., Ver., Slp., Hgo., Qro., Gto., Jal.	14-21 Sept	65 km/hr
1994	DT	Depresion tropical	Tampico, Tamp.	Tamp., Slp., Ver.	29-31 Ago	55 km/hr
1995	DT6	Depresion tropical	Tamiahua, Ver.	Ver., Hgo., Tamps., Slp.	5-7 Ago	55km/hr
1995	Roxanne	Huracan C3	Tulum, Qroo.	Qroo., Yuc., Camp., Tab., Ver.	8-20 Oct	185 km/hr
1996	Dolly	Huracan C1	F.C. Puerto, Qroo.	Qroo., Yuc., Camp., Ver., Tam., Slp., Zac.	19-24 Ago	110 km/hr
1999	DT2	Depresion tropical	Cazones-Tuxpan, Veracruz	Ver., Tam., Slp., Hgo.	2-3 Jul	55 km/hr
1999	DT7	Depresion tropical	Tpehuanes, Tamaulipas	Tam., Ver., NI.	5-7 Sep	55 km/hr
1999	DT11	Depresion tropical	90 km noreste Coatzacoalcos	Ver., Tab., Pue., Hgo.	4-6 Oct	55 km/hr
2000	Keith	Tormenta Tropical	Chetumal, Qroo (Tampico, Tamps.)	Qroo., Camp., Tamps., NI., Slp., Ver.	28 Sep-6 oct	75 km/hr



Año	Nombre	Categoría	Lugar donde tocó tierra	Estados Afectados	Periodo	Vientos
2003	Larry	Tormenta Tropical	El alacran, Tabasco	Ver., Tab., Chis., Camp.	1-6 Oct	95 km/hr
2005	Bret	Tormenta Tropical	15 km al sur de Tuxpan, Ver.	Ver., Tam., Slp., Hgo.	28-29 Jun	65 km/hr
2005	Gert	Tormenta Tropical	10 km al sureste de Panuco, Ver.	Ver., Slp., Tamps., Nl.	23-25 Jul	75 km/hr
2005	Jose	Tormenta Tropical	10 km al Sureste de Vega de Alatorre, Ver.	Ver., Pue., Tlax., Mex., D.f.	22-23 Ago	85 km/hr
2005	Stan	Tormenta Tropical	Felipe C. Pto., QR (San Andres Tuxtla, Ver.)	Qr., Yuc., Ver., Oax., Camp., Chis.	1-5 Oct	75 km/hr
2007	Dean	Huracan C5	Puerto Bravo, Qroo. (Tecolutla, Ver.)	Qroo., Camp., Ver., Pue., Hgo., Qro.	13-23 Ago	260 km/hr
2007	Lorenzo	Huracan C1	Tecolutla, Ver.	Ver., Pue., Hgo.	25-28 Sep	130 km/hr
2008	Marco	Tormenta Tropical	30 km al este de Misantla, Ver.	Ver., Slp., Hgo., Pue.	6-7 Oct	65 km/hr
2010	DT 11E	Depresion tropical	35 km al NW de Salinas Cruz, Oax	Oax., Ver	3-4 Sep	55 km/hr
2010	Karl	Huracan C3	15 km al NE de Chetumal, Qroo y (15 km al N de Pto. Ver.)	Qroo., Camp., Ver., Pue.	14-18 Sep	100 km/hr
2010	Matthew	Tormenta tropical	20 km SSW Altamira Camp	Camp., Ver.	23-26 Sep	55 km/hr
2011	Arlene	Tormenta Tropical	Cabo rojo, Ver.	Ver., Slp., Tamps., Hgo.	28-30 Jun	100 km/hr
2011	Harvey	Depresion tropical	42 km al E-SE de Villahermosa, Tab (15 km al WSW Alvarado, Ver.)	Chis., Tab., Ver., Oax.	18-22 Ago	55 km/hr
2011	Nate	Tormenta Tropical	25 km al NNW de Pto. De Veracruz, Ver.	Tab., Ver.	7-11 Sep	95 km/hr

Todos los eventos considerados en la tabla, provocaron afectaciones en el estado de Veracruz, algunos de ellos de menor categoría y otros que incluso llegaron a denominarse huracanes, como el caso de Dean ocurrido en 2007 con categoría 5. En otros casos, se muestran eventos de menor intensidad al ocurrido en 2007; sin embargo, debido a que se presentaron varios de ellos en un periodo corto, su impacto fue importante al causar afectaciones significantes. Esto ocurrido en el año 2010 con dos ciclones de diferentes categorías en menos de 15 días, Karl (Huracán) y Matthew (Tormenta tropical), ocasionando inundaciones severas en la zona de la cuenca del río Papaloapan, y en particular, en el municipio de Tlacotalpan.

El huracán Karl, desarrolló su trayectoria en 84 horas, tuvo un recorrido de 1,470 km, consolidándose como un huracán de categoría 3. Se formó en el noroeste del mar Caribe el 14 de septiembre del 2010, posteriormente inicio su movimiento hacia la Península de Yucatán, la cual recibió el día 15 de septiembre el impacto de este ciclón a 15 km al sur-suroeste de Puerto Bravo, QROO. Después de este

impacto, Karl continuó su trayectoria hacia el Golfo de México encontrándose nuevamente en el mar durante las primeras horas del día 16 de septiembre, ahí se intensificó hasta consolidarse como huracán categoría 3. El día 17 de septiembre tocó tierra nuevamente, esta vez en Playa Chachalacas, Veracruz, siguiendo sobre tierra un rumbo oeste-suroeste, provocando que se debilitara poco a poco hasta su disipación el día 18 de septiembre (Fig. 9).

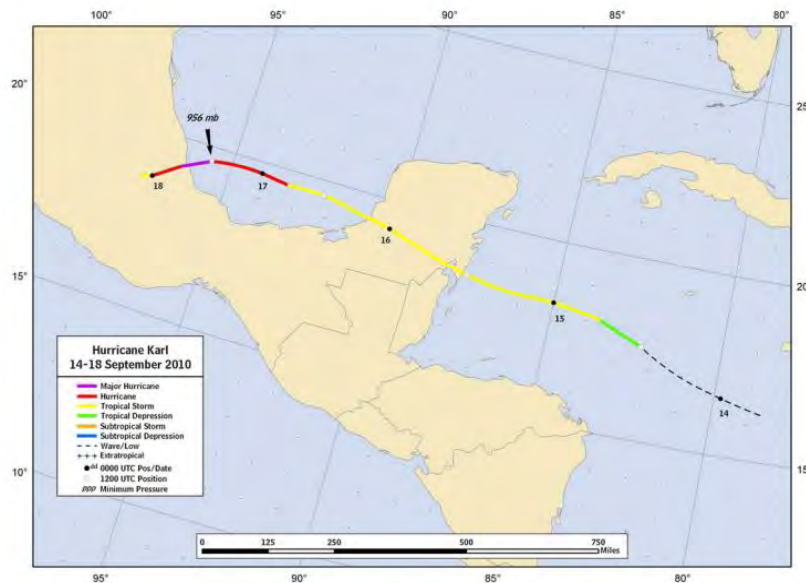


Figura 9. Trayectoria del Huracán Karl. Evento ocurrido entre los días 14-18 de septiembre de 2010.

Fuente: Stewart, 2011.

La tormenta tropical Matthew se presentó 5 días después de la disipación de la tormenta tropical Karl en 2010. Matthew tuvo una duración de 69 horas y su recorrido fue de 1970 km. La tormenta principió con la depresión tropical no.15 ocurrida el 23 de septiembre a 1,390 km al sureste de las costas de Chetumal, Q. Roo., mostrando un desplazamiento inicial hacia al oeste. A las 16:00 h de ese mismo día, se intensificó a tormenta tropical, recibiendo el nombre de Matthew y continuando con rumbo oeste. El 24 de septiembre tocó tierra cerca de la frontera entre Nicaragua y Honduras, ya al siguiente día tocó tierra nuevamente al sur de Belice debilitándose y, de esta manera, degradándose a depresión tropical con trayectoria hacia el oeste-noreste. El día 26 de septiembre, Matthew continuó al sur de Chiapas con rumbo oeste-noreste para debilitarse en la sierra. Matthew provocó lluvias de intensas a torrenciales en los estados de Veracruz, Tabasco, Yucatán, Oaxaca y Chiapas (Fig. 10).



Figura 10. Trayectoria de la tormenta tropical Matthew. Evento ocurrido entre los días 23 y 26 de septiembre de 2010.

Fuente: Brennan, 2010

A partir de la fecha en que tuvieron lugar dichos eventos, se inició la búsqueda de información ráster anterior y posterior al evento, y a otros eventos con los cuales se pudiese hacer una comparación de la morfología antes y después a cada evento. Se buscaron imágenes satelitales y ortofotos. Para las imágenes fue necesario identificar la zona de estudio en la cuadrícula Landsat que sirve para ubicarlas de manera vertical (path) y horizontal (row). Para el Satélite Landsat 3 se ubicó la zona de estudio en el path/row 25/47, mientras que para Lansat 5, 7 y 8 se ubicó en el path/row 24/47 (Tabla 2). Las características de estas plataformas se muestran en el Anexo 1.

Adicionalmente se buscaron imágenes actuales, con las cuales, además de analizar los eventos extraordinarios presentes en la zona de estudio, ayudaran a definir la situación actual de la zona de estudio, esto es, si se ha presentado cambio en el uso de suelo, si hay modificación en la geomorfología del cauce y su planicie de inundación como presencia de meandros, barras o islas, de manera que se pueda seguir observando la evolución de los cambios generados durante el impacto de los eventos que han tenido lugar y que pueden llegar a ocurrir.



Tabla 2. Lista de información ráster (imágenes satelitales de los sensores Landsat, ortofotos y DEM) de la zona de estudio.

Ráster	Fecha	Columna/fila	Ráster	Fecha	Columna/fila	
Landsat 3 MSS	1980/36	25/47	Ortofotos 10k	MARZO_2008	E15A61C1,C2, C3, C4	
	1980/54	25/47		MARZO_2008	E15A61F1, F2, F3, F4	
Landsat 5 TM	1993/071	24/47		MARZO_2008	E15A62A1, A2, A3	
	1993/087	24/47		MARZO_2008	E15A62D1	
	1993/151	24/47		MARZO_2008	E15A71B4	
	1993/199	24/47		MARZO_2008	E15A71C1,C2,C3,C4	
	1993/324	24/47		MARZO_2008	E15A71E2	
	1994/170	24/47		MARZO_2008	E15A71F1, F2, F3, F4	
	1998/021	24/47		Ortofotos 20k	MARZO_2001	E14B69C, F
	1999/008	24/47			MARZO_2001	E14B79C, F
	1999/200	24/47			MARZO_2001	E15A51D, E, F
	1999/216	24/47			MARZO_2001	E15A61A, B, C, D, E, F
1999/264	24/47	MARZO_2001			E15A62A, B, D, E	
1999/296	24/47	MARZO_2001			E15A71A, B, C, D, E, F	
2000/027	24/47	MARZO_2001	E15A72A, B, D, E			
2010/022	24/47	MARZO_2001	E15C13E			
Landsat 7 ETM	2003/75	24/47	MARZO_2001	E15C23B		
	2003/139	24/47				
	2006/308	24/47				
Landsat 8	2013/142	24/47				
	2014/081	24/47				

3.3 Datos históricos

El registro histórico empleado en este trabajo comprende el periodo entre los años 1980 a 2014, en el cual se identificaron 28 fenómenos de diferente categoría que ocasionaron afectaciones en la cuenca del río Papaloapan (ver Tabla 1). En este periodo se obtuvieron 21 imágenes capturadas por los satélites Landsat 3, Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8 y 22 ortofotos (10k) correspondientes a marzo del 2008 y 29 ortofotos (20k) correspondientes a marzo del 2001.

Algunas imágenes obtenidas con los sensores Landsat fueron excluidas del análisis, debido a la poca visualización de diferentes rasgos como agua, vegetación, zonas urbanas, etc., ocasionada por la nubosidad presente. Es importante recordar que una de las limitantes de las imágenes ópticas, como el caso de la plataforma Landsat, es la nubosidad ya que interfiere con el paso de la energía hacia la superficie. Algunas de las imágenes que salieron del estudio correspondieron a las fechas 16 de julio de 1993 (Landsat 5), 2 de septiembre de 1993 (Landsat 5), 17 de julio de 1999 (Landsat 5) y 19 de septiembre de 1999 (Landsat 5), en las cuales la presencia de nubes no permitía trazar el cauce del río y la planicie (Fig.11).

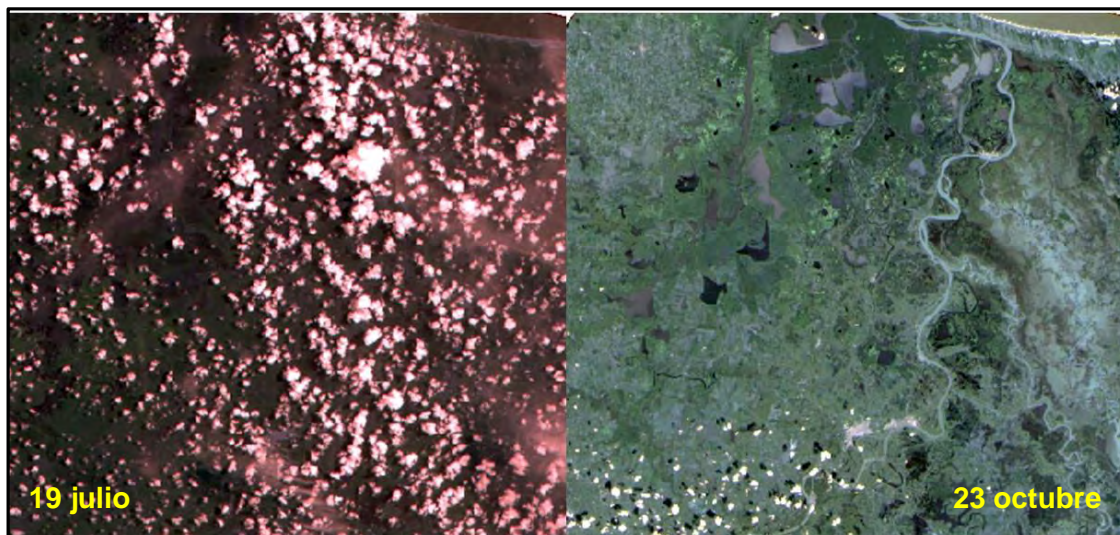


Figura 11. Imágenes de la zona de estudio capturadas el 19 de julio (relacionada con la depresión tropical del 2-3 de julio) y 23 de octubre de 1999.

Si bien se pudieron evitar adquirir estas imágenes; sin embargo, resulta importante mencionar que en algunos casos, las nubes pueden no cubrir las zonas de estudio o se tiene neblina que deja ver características del cauce y su planicie, por lo cual, son imágenes potencialmente útiles. En tal caso se requiere una inspección más detallada para resolver si en verdad son o no adecuadas para el estudio que se



realiza. En este caso, el objetivo es el análisis de las inundaciones y la presencia de nubes es recurrente al considerar fechas relacionadas con ciclones, tormentas tropicales o frentes fríos.

3.4 Aplicación de Técnicas de Percepción Remota

Una vez determinada la información ráster, se procedió a aplicar la composición de falso color (RGB) y el filtro, con el objetivo de resaltar los aspectos que permitieran trazar el cauce del río y su planicie en cada imagen.

3.4.1 Composición de falso color RGB

La composición de falso color fue empleada para resaltar rasgos en la imagen, de tal forma que se logrará identificar los límites entre cuerpos de agua con otros aspectos (vegetación, suelo, entre otros), para ello se usaron tres combinaciones empleando diferentes bandas.

- **Composición 1, RGB (3,2,1).** Muestra una representación a color natural, pues involucra a las tres bandas del visible y asigna a cada una de ellas su color verdadero, por lo que el resultado es una combinación que se aproxima a los colores naturales de la escena. La vegetación aparece en diversos tonos de verde y los suelos en colores marrones o tostados. Además, las bandas visibles tienen buena penetración (pocos centímetros) en los cuerpos de agua y esta combinación permite observar detalles en agua poco profunda: azul oscuro indica aguas profundas y azul claro indica aguas de media profundidad. Es posible apreciar la presencia de sedimentos. El suelo desnudo y la roca aparecen en tonos amarillentos y plateados (Fig. 12).



Figura 12. Ejemplo de la composición de falso color con las bandas 1, 2 y 3.

- **Composición 2, RGB (2,3,4).** Facilita la distinción de los cuerpos de agua, debido a que resaltan los límites entre cuerpos de agua y vegetación (Fig. 13). En esta composición la vegetación se muestra en tonalidades rojas. Es importante mencionar que la vegetación en la zona corresponde a humedales, los cuales crecen en zonas inundables. El agua presenta una tonalidad azul en función de la profundidad o la presencia de otros factores como vegetación. Así, el azul oscuro es para aguas profundas, azul claro para aguas someras y azul con blanco para agua con sedimentos.

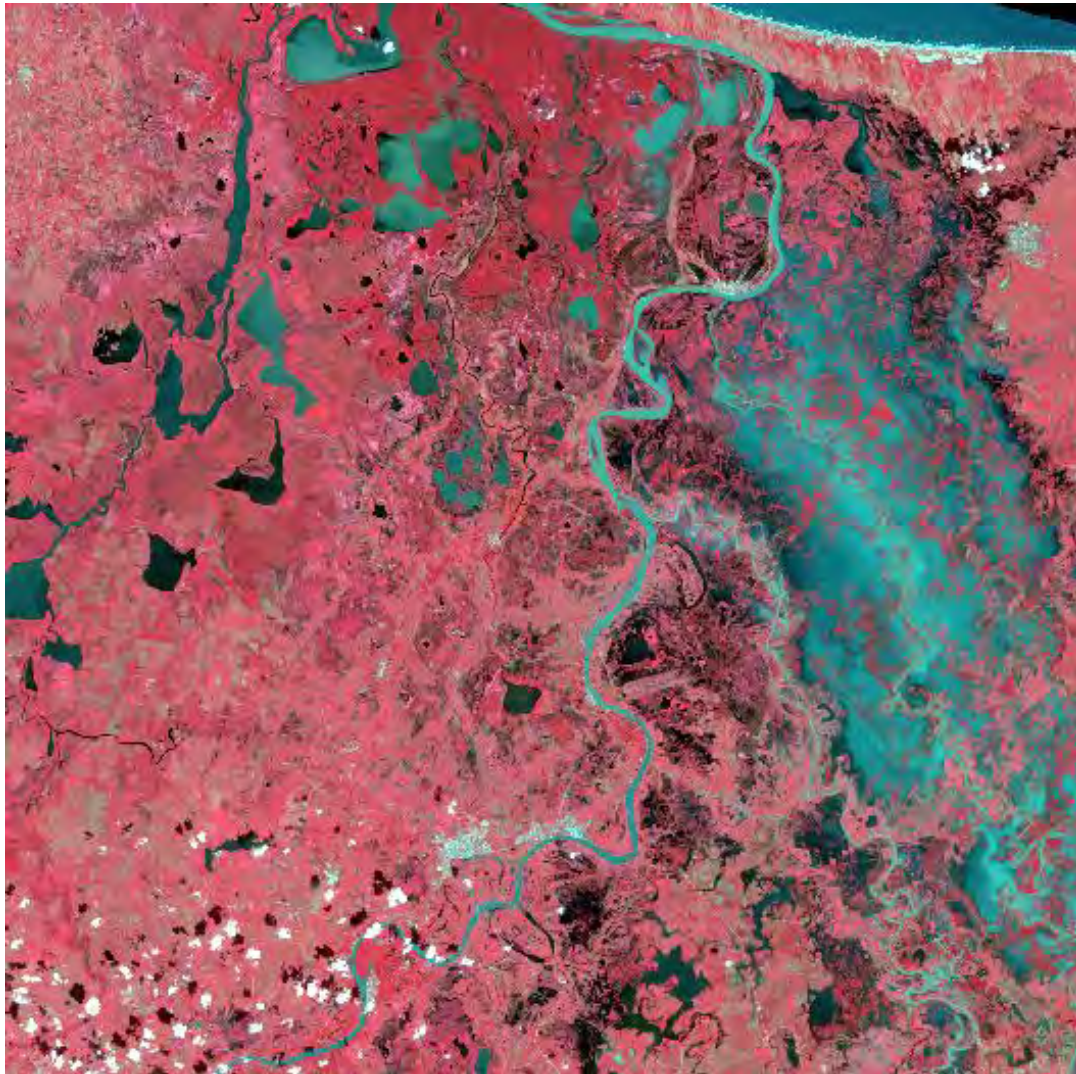


Figura 13. Ejemplo de composición de falso color aplicando las bandas 2, 3 y 4.

- **Composición 3, RGB (3,4,5).** Esta combinación con dos bandas en la región del infrarrojo muestra una mayor diferenciación entre el suelo y el agua. La vegetación se muestra en tonalidades de verde y el suelo en rosa, que varían en función del tipo y de las condiciones de ubicación. El agua aparece en negro, lo que facilita, para fines de este estudio, la delimitación de cuerpos de agua. (Fig. 14).

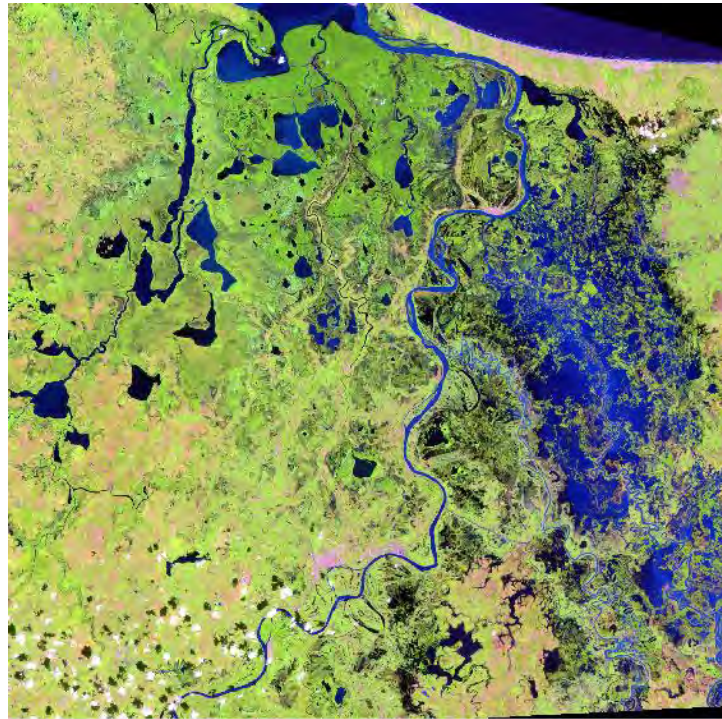


Figura 14. Ejemplo de composición de falso color con las bandas 3, 4 y 5.

Con la RGB (3,4,5) es posible determinar la extensión de la inundación y su asociación a los cambios geomorfológicos del río.

Para el caso de las Ortofotos sólo se realizó la combinación RGB con las bandas 1, 2 3, debido a que la región espectral que cubren es sólo la región del visible. Ver figura 15.



Figura 15. Ejemplo de RGB (1,2,3) de Ortofotos 10k.

3.4.2 Filtro Non-directional Edge

Una manera más precisa de realizar el trazo del cauce y de algunas características de la planicie que permitan estimar la extensión de una inundación, es mediante el uso de filtros. En este caso, el filtro de paso alto presenta ventajas al hacer más evidentes los bodes o límites entre áreas de diferentes valores de ND, esto es, detectan los contornos. De esta manera, se extraen los bordes de interés, los cuales se calibran con el RGB.

El filtro empleado fue *non-directional edge* del software Erdas, con el cual se resaltan los bordes en la imagen (Fig. 16), obteniendo un mapa que facilita la delimitación de las fronteras de los cuerpos de agua.

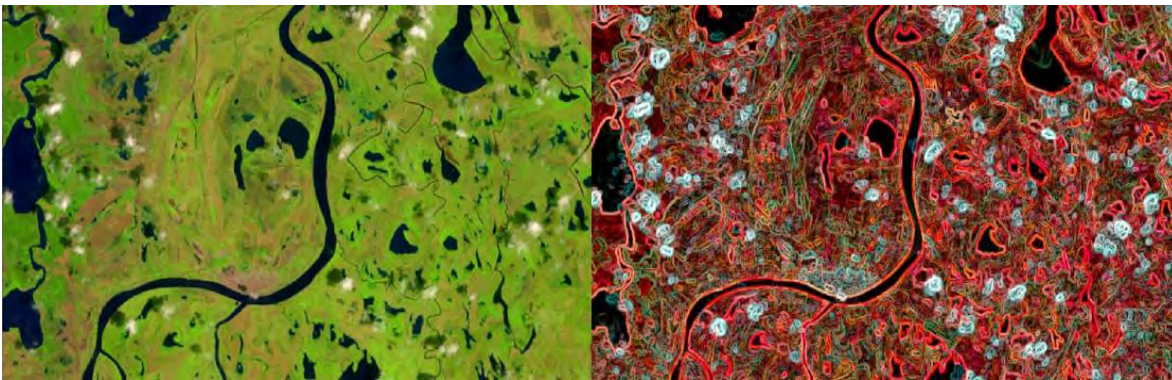


Figura 16. Comparación entre el resultado de la composición de falso color RGB (3,4,5), y del filtro Non-directional Edge.

El trazado de los contornos se realizó para todas las imágenes seleccionadas, lo que disminuyó considerablemente el tiempo de trazado. Pese a ser de gran ayuda para delimitar el flujo de agua, e identificar barras o islas, en el caso de la planicie, se muestran más objetos que no corresponden a lagos y lagunas por lo que requiere de una cuidadosa revisión de los bordes que genera el proceso. En particular, se debe siempre tener en cuenta el tipo de vegetación presente, esto es, humedales los cuales se desarrollan en suelos inundables.

3.5 Integración de la información en un Sistema de Información Geográfica

Una vez procesada la información ráster, las imágenes resultantes se integraron en un sistema de información geográfica (SIG), en este caso se empleó el software ArcMap 10.0, y se utilizaron como base para trazar el cauce del río final. Este proceso se llevó a cabo, utilizando para cada imagen Landsat y Ortofoto, la composición RGB que mejor información proporcione (ej. RGB 345) y el filtrado.



El resultado es una serie de mapas para cada año, donde es posible observar los cambios en la trayectoria del río y la planicie, además de las variaciones en zonas urbanas y así identificar las zonas vulnerables a inundación. La Figura 16 muestra el trazado del río Papaloapan para los años 1980 y 2014, empleando como base el resultado del filtro non-directional Edge y calibrando con la composición de falso color (Fig. 17).

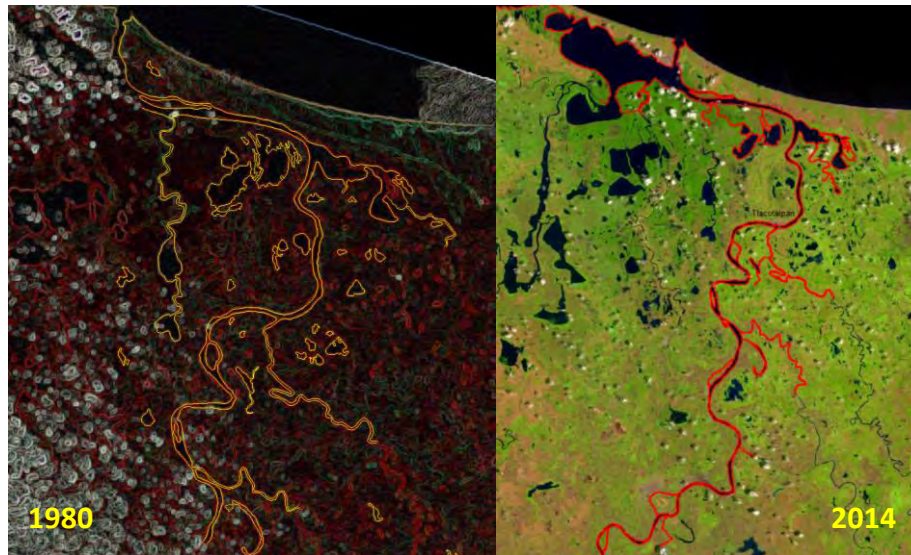


Figura 17. Trayectoria del Río Papaloapan, año 1980 y 2014.

4. Resultados

La información vectorial y ráster disponible se alimentó al software ArcGIS con lo cual se crearon capas que fueron manipuladas a fin de obtener información temporal de la zona y se superpusieron diferentes imágenes correspondientes a diversos años para así visualizar los cambios en la trayectoria del río y su planicie; en la Fig. 18 se muestran los trazos del río obtenidos para cada imagen analizada. Esto permitió identificar cambios geomorfológicos en la zona de estudio, de los cuales sobresalen seis zonas con modificaciones de mayor magnitud.

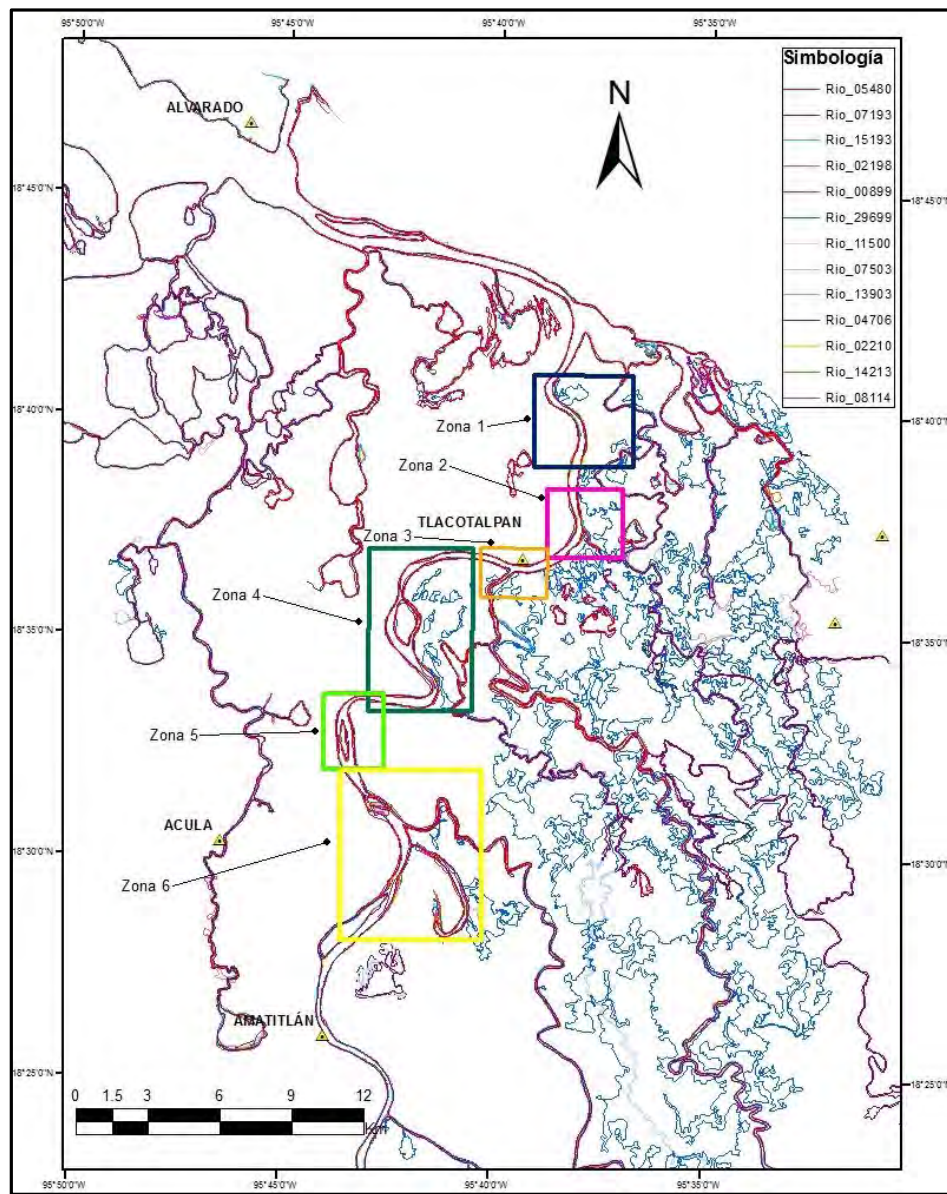


Figura 18. Trazos del Río Papaloapan de 1980 a 2014

4.1 Zona 1

En la zona 19 se presenta un río sinuoso con pocos meandros y un mayor número de playas inundables favoreciendo con su baja pendiente la presencia de zonas erosionables y sedimentación lateral (margen derecha de la curva aguas abajo). La Fig. 19 no muestra tributarios pero sí cuerpos de agua formados por depresiones, la mayoría, perennes. La sinuosidad de río en esta zona indica una tendencia a un desplazamiento hacia lecho mayor de inundación; esto genera depósitos de sedimentos en la margen contraria. Por lo general, las márgenes donde se ubican los lechos de inundación se han empleado para actividades agrícolas, lo que erosiona y baja la calidad de los suelos haciéndolos más susceptibles a erosión (meandro al norte de la zona).

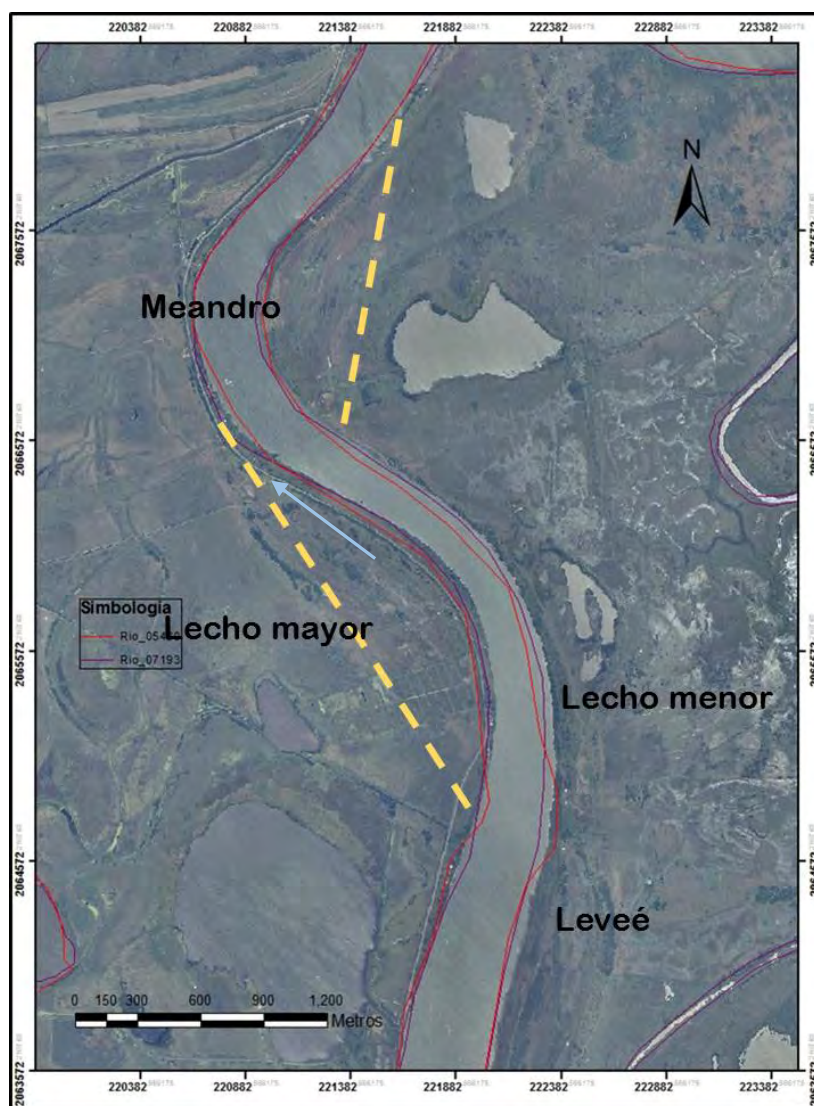


Figura 19. Comparación de los trazos de la zona uno para los años de 1980 y 1993, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.

Los cambios mayores se presentaron en 1980 y 1993, los cuales se pueden asociar a las tormentas tropicales Hermane y Gert, respectivamente. En los años siguientes, 1999 y 2000, se presentaron cambios de menor magnitud (Fig. 20): en 2000, la margen cóncava de la curva al sur de la zona, muestra la misma tendencia a empujar el cauce sobre la margen del lecho mayor toda vez que sobre la margen del lecho menor (leveé) se tiene un depósito de sedimento bien definido. Ésta tendencia resulta muy evidente en 1999 donde se detectó una mancha de inundación abarcando la llanura de inundación del meandro al norte de la zona. La inundación se debió al desbordamiento del río sobre la margen derecha con dirección hacia uno de las depresiones perennes.

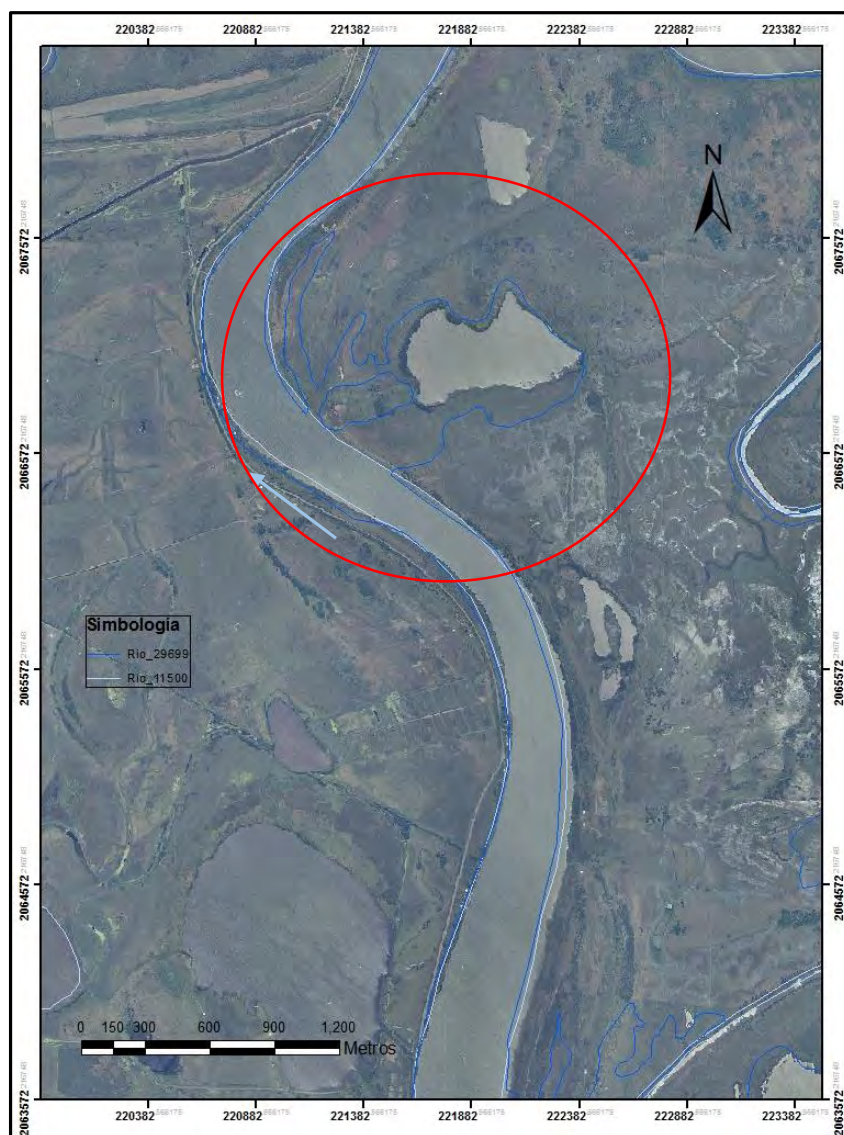


Figura 20. Sobreposición de los trazos obtenidos para las imágenes correspondientes a los años 1999 y 2000 para la zona uno, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.

En el resto de los años de análisis, se continuaron presentando cambios mínimos en la misma dirección este. Estos desplazamientos se presentaron principalmente en la curva (círculo amarillo) ubicada aguas abajo dentro de esta zona.

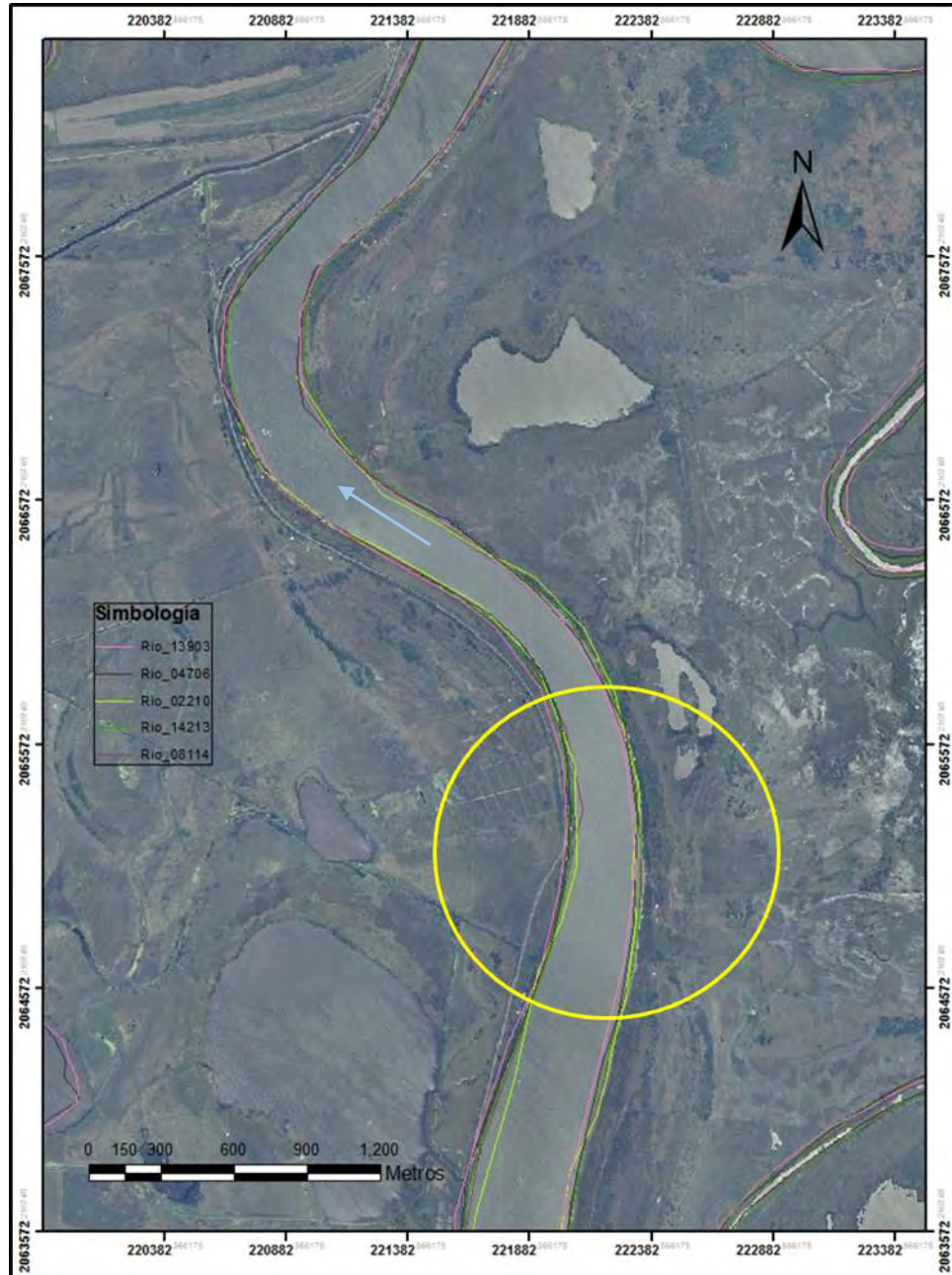


Figura 21. Trazos de la zona uno correspondiente al periodo 2003-2014, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.

4.2 Zona 2

La zona 2 muestra un cambio considerable en el periodo de análisis comprendido entre los años de 1980 y 1993 (Fig. 22), principalmente en la zona de confluencia de la corriente tributaria del Papaloapan. Las márgenes del cauce del Papaloapan se desplazan hacia el este aumentando el lecho mayor y acortándose la entrada del tributario. Sobre la margen derecha, aguas abajo de la entrada de la corriente, se ha favorecido el depósito de sedimento mientras que aguas arriba se tiene una zona erosiva y justo un poco más adelante un estrechamiento del cauce del Papaloapan (1993).

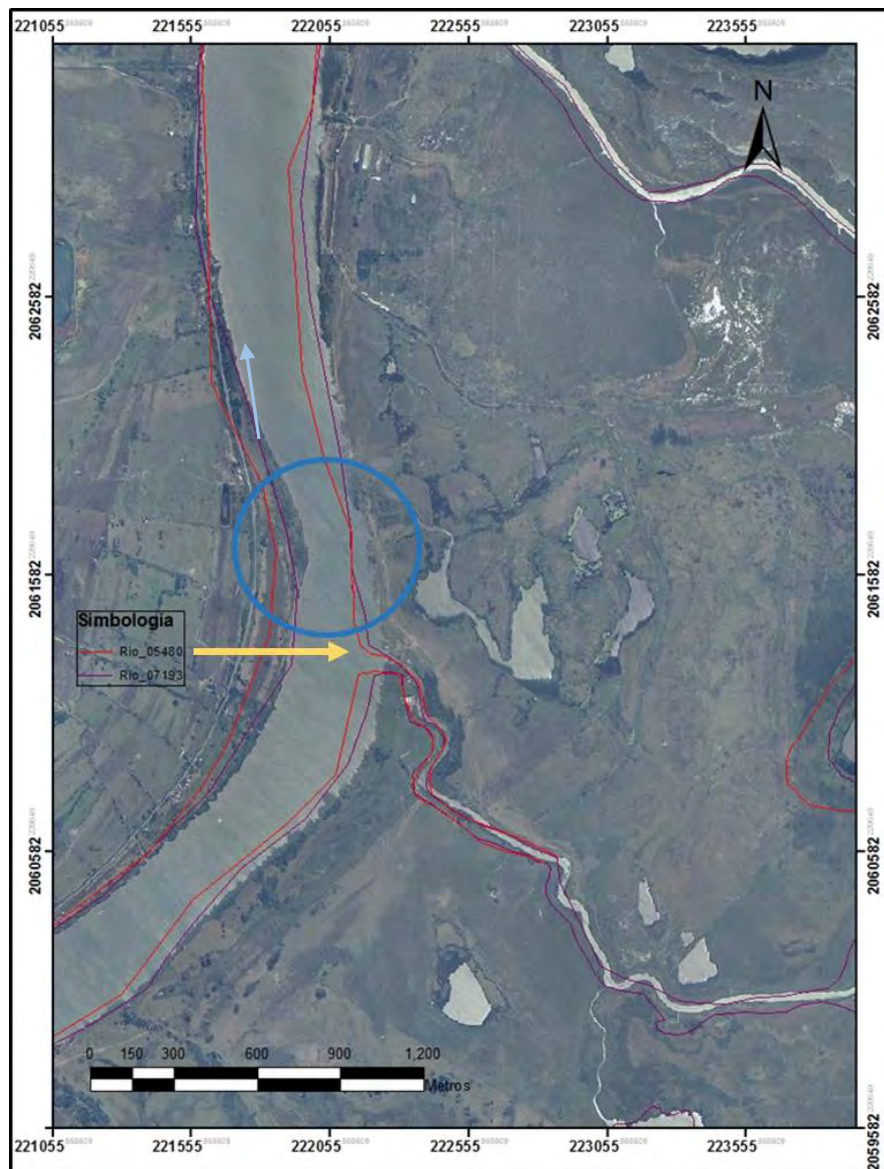


Figura 22. Cambios en la zona dos durante el periodo de 1980 y 1993, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.

Para el resto del periodo de estudio, que comprende los años 1993 a 2014 (Fig. 23), se encuentran cambios del eje del río con la misma tendencia en dirección este y con la reducción del cauce aguas arriba de la corriente tributaria. Es importante resaltar, la magnitud de la inundación sobre la planicie en la margen derecha en 1999, cubriendo la planicie donde se tiene el estrechamiento del cauce y el la erosión del tributario.

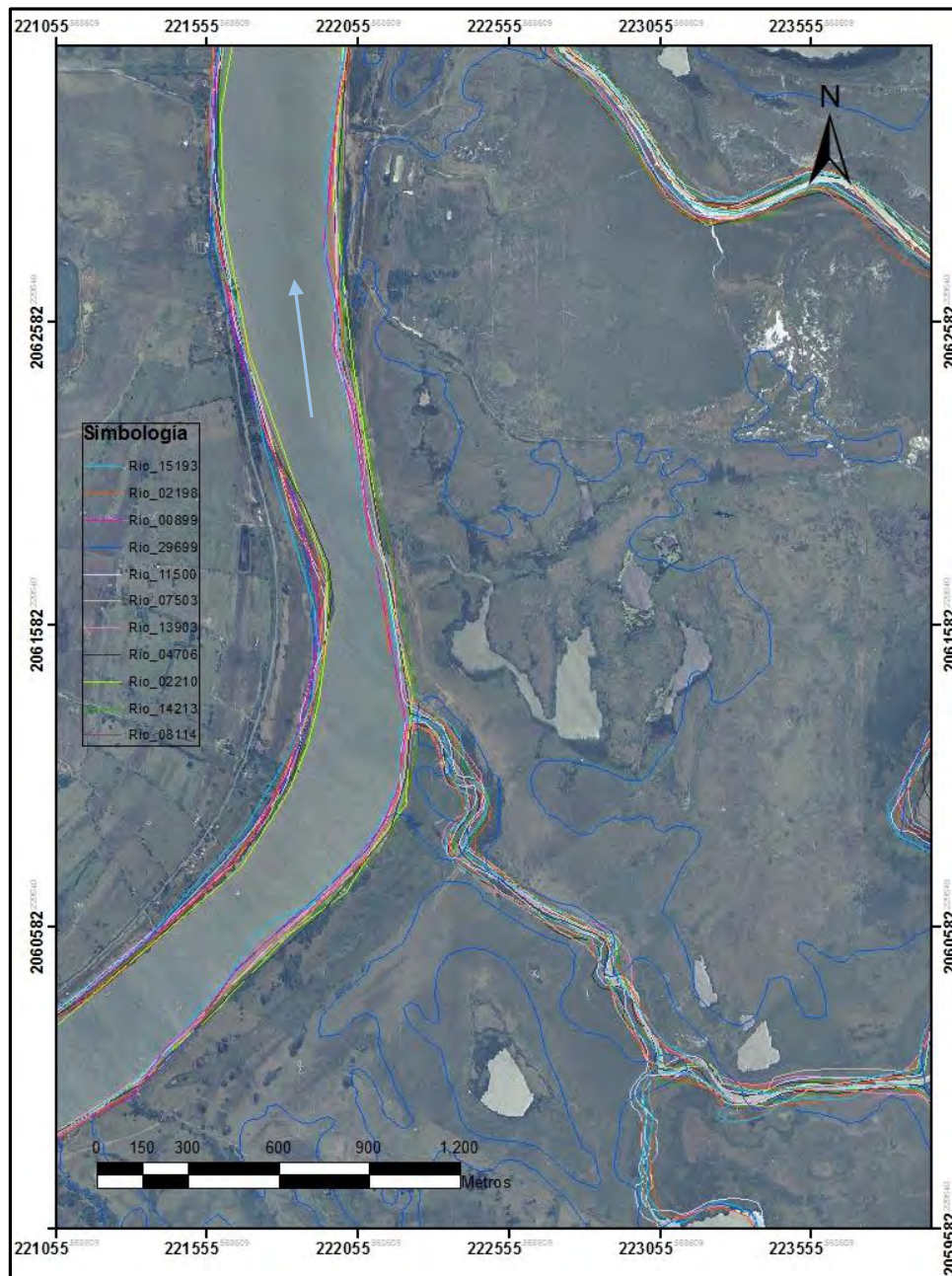


Figura 23. Trazos de la zona dos correspondientes al periodo 1993-2014. Empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.

4.3 Zona 3

La zona 3 resulta de gran importancia debido a que contiene la población del municipio de Tlacotalpan, el cual actualmente se ubica en la parte convexa del meandro y en su parte cóncava se tiene el río San Juan tributario del Papaloapan. Pese a ser está la actual ubicación de la población, es importante mencionar que de acuerdo con un mapa de 1830 (Fig. 24), Tlacotalpan se situó en la parte sur de un banco fluvial arenoso o isla, de ahí su significado “entre aguas”. Con el tiempo, el canal subsidiario, cauce izquierdo de la isla, se secó posiblemente debido a cambios climáticos predominando el depósito de sedimentos, lo que dio lugar a su geometría actual en la parte cóncava de un meandro (fig.25). En general, la zona cuenta con vegetación del tipo pastizal cultivado y vegetación inundable con tipo de suelo gleysol.



Figura 24. Mapa de Alvarado y Tlacotalpan, Veracruz, en 1830.

Fuente: Mapas interactivos, 2015



Figura 25. Posible ubicación del canal subsidiario de la isla donde se encuentra Tlacotalpan. La línea amarilla se trazó atendiendo a la geomorfología del valle.

Dado lo anterior, el riesgo de la ciudad de Tlacotalpan a sufrir inundaciones dada su ubicación en la parte interna de un meandro es alto. Adicionalmente, si se considera que la población continuó su desarrollo a lo largo del río y en las partes bajas de la isla a la misma altitud que la cota del cauce principal del río Papaloapan, este riesgo se incrementa en época de lluvias.

En el periodo delimitado por los años 1980 y 1993 (Fig. 26), se identifica un cambio considerable en la geometría del cauce del río San Juan, la cual es meandriforme, y en su confluencia con el río Papaloapan. Esta dinámica en el movimiento del río se debe a que no existe restricción alguna en las orillas del río que impida que las márgenes se desplacen hacia su planicie. Sobre el río Papaloapan, en la desembocadura del río San Juan, se presenta acumulación de sedimentos, provocando una disminución de 69 metros en la anchura del cuello, lo cual generó una reducción del cauce sobre el río San Juan. En la Fig. 26, aguas arriba de la desembocadura del río San Juan se muestra la alta dinámica del río ya que el primer meandro presenta un desplazamiento en sentido este, reduciendo su amplitud cerca de 28 metros, incluso el cauce en su totalidad se redefinió

trazando un nuevo trayecto. Los siguientes meandros aunque de menor radio, también muestran el desplazamiento observado aumentando la erosión en lecho mayor (zona cóncava).

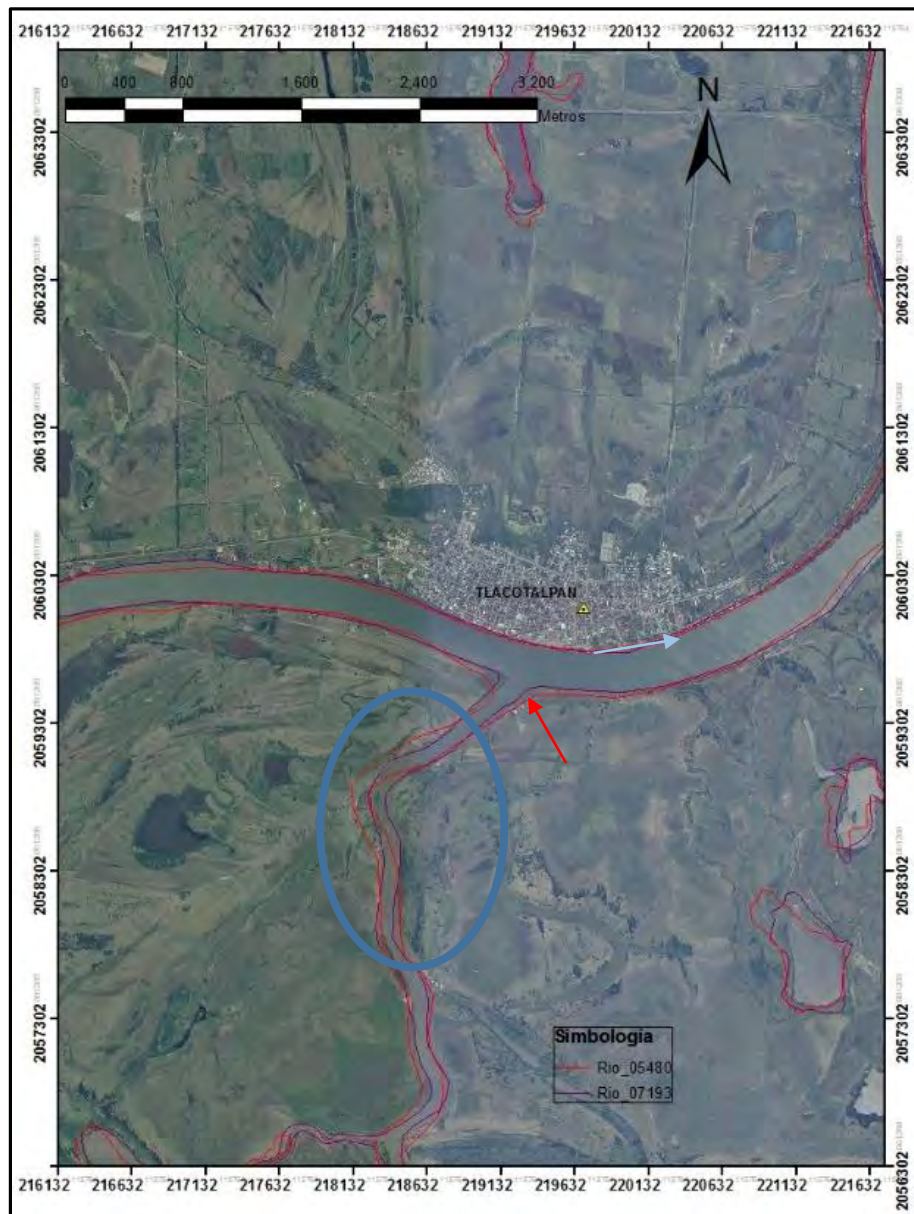


Figura 26. Trazo de la zona tres correspondientes al periodo 1980-1993, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.

El movimiento de los cuerpos de agua perennes es otro factor importante a considerar como se observa en la parte sureste de la fig. 26.



Cabe mencionar que sobre la margen izquierda del río donde se encuentra la población de Papaloapan hay cambios muy pequeños entre 1980 y 1993 como se muestra en la Fig. 26.

Si bien los mayores cambios se presentaron durante el periodo limitado por los años 1980 y 1993, también durante el periodo entre 1999 y 2000, se tuvieron movimientos importantes en el río Papaloapan y su tributario el río San Juan (fig. 27). En particular 1999, se presentó una inundación asociada a tres eventos que se dieron desde Julio con la Depresión Tropical Número 2 (DT2), la DT7 en septiembre y la DT11 del 4 al 6 de octubre. Estos eventos saturaron el suelo de manera que se dio lugar a la inundación en toda el área. Cabe mencionar que la imagen Landsat con la que se trabajó corresponde al 23 de octubre de 1999, lo que representa con precisión del 90%, la situación sobre el terreno.

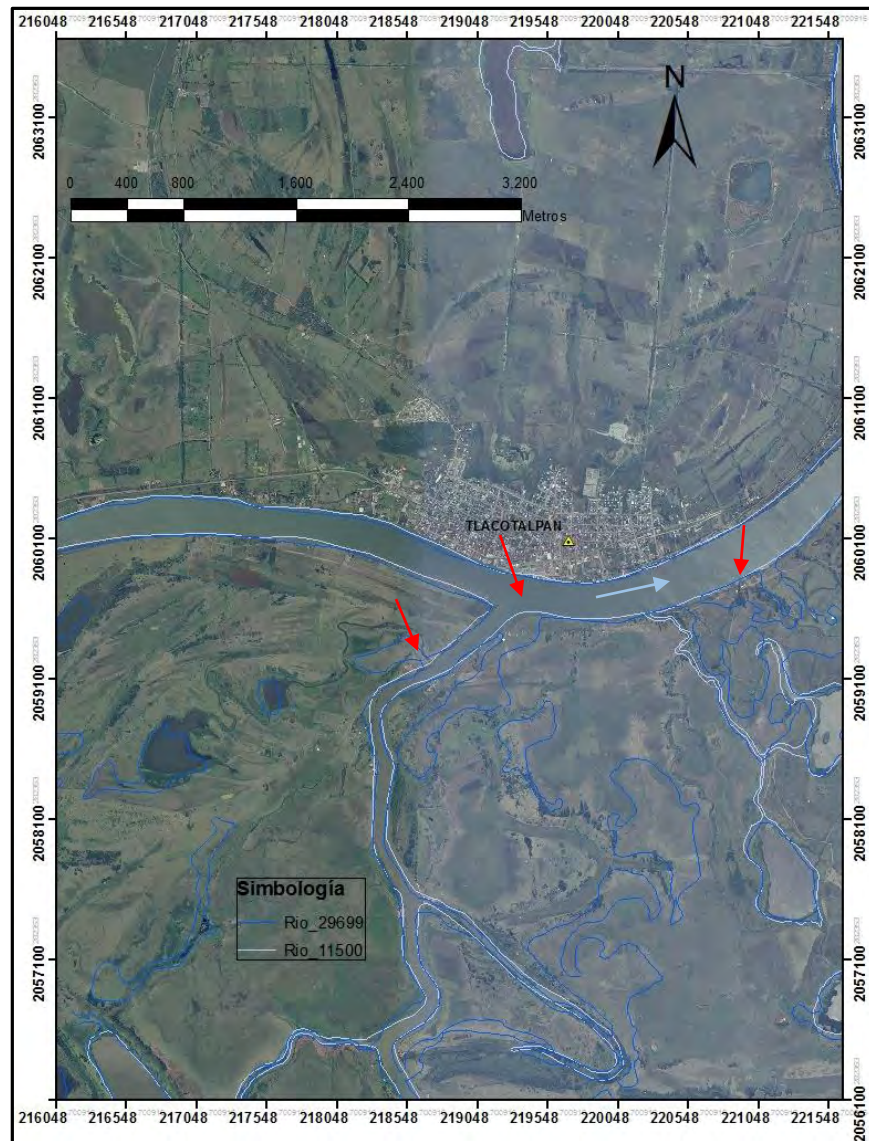


Figura 27. Trazos de la zona tres correspondientes al periodo 1999 a 2000, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.

En la figura 27 se observa que en algunos puntos de la margen derecha del río Papaloapan y en determinados puntos del río San Juan, se favorece la salida del agua y con ello la inundación en zonas cercanas. Si bien no se percibe que haya habido inundación en la ciudad de Tlacotalpan, es importante observar en la Fig.28 que toda la zona al norte de la ciudad presenta la formación de cuerpos agua y anegaciones algo extensas y profundas generados por las precipitaciones locales. Esto es de esperar debido al tipo de suelo (gleysol) y al tipo de formación original del área (isla), dejando un sitio con alta saturación de agua y poca permeabilidad. Aunado a lo anterior la poca pendiente con que cuenta el terreno, reduce el escurrimiento del líquido, de tal manera que se definen estas manchas de anegación.

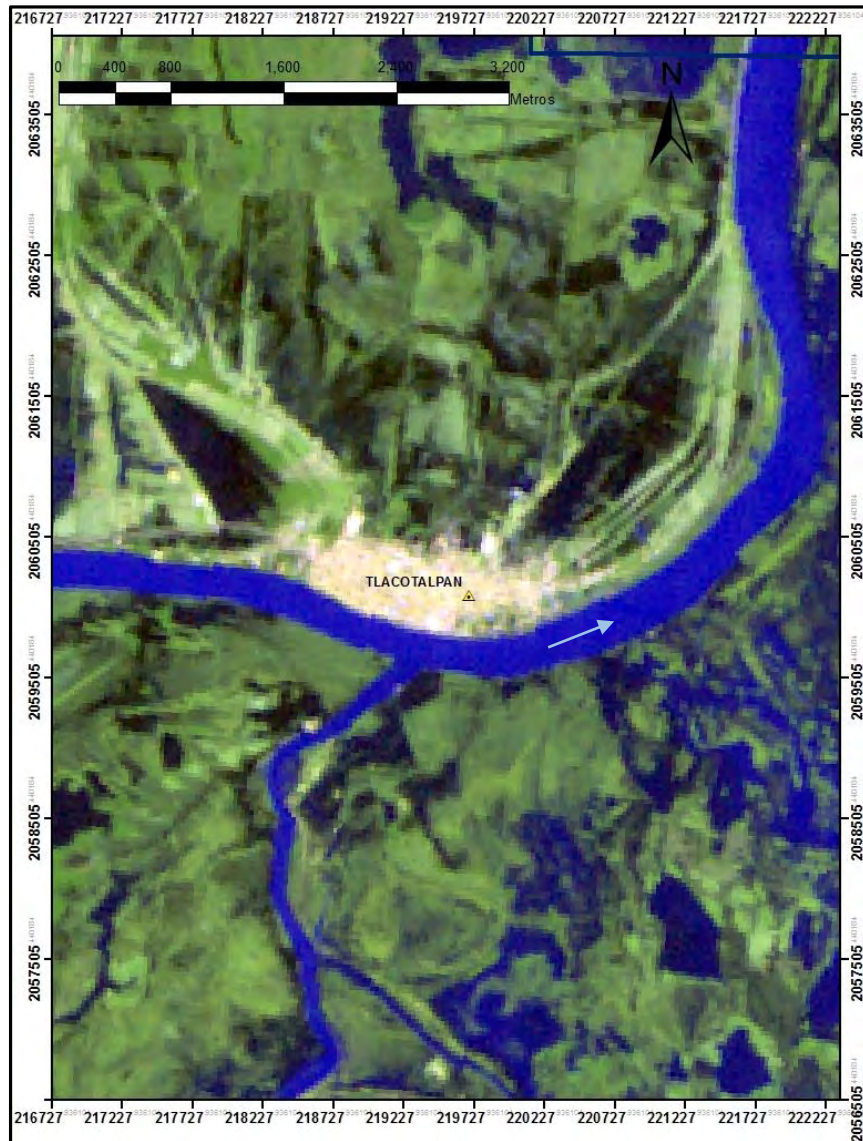


Figura 28. Zona 3 el 23 de octubre de 1999. Imagen Landsat 5 TM.

Durante el periodo comprendido por los años 2010 a 2014 (Fig. 29), se observa una menor sinuosidad sobre el río San Juan (Fig. 29), lo que reduce la forma meándrica del río. Sin embargo es notorio el estrechamiento de la desembocadura del río San Juan y, por consiguiente, el aumento en esta zona del río Papaloapan de aproximadamente 2 metros. Asimismo se observa una estructura en la desembocadura del río San Juan sobre su margen izquierda, la cual impide cualquier movimiento libre del río en este punto.

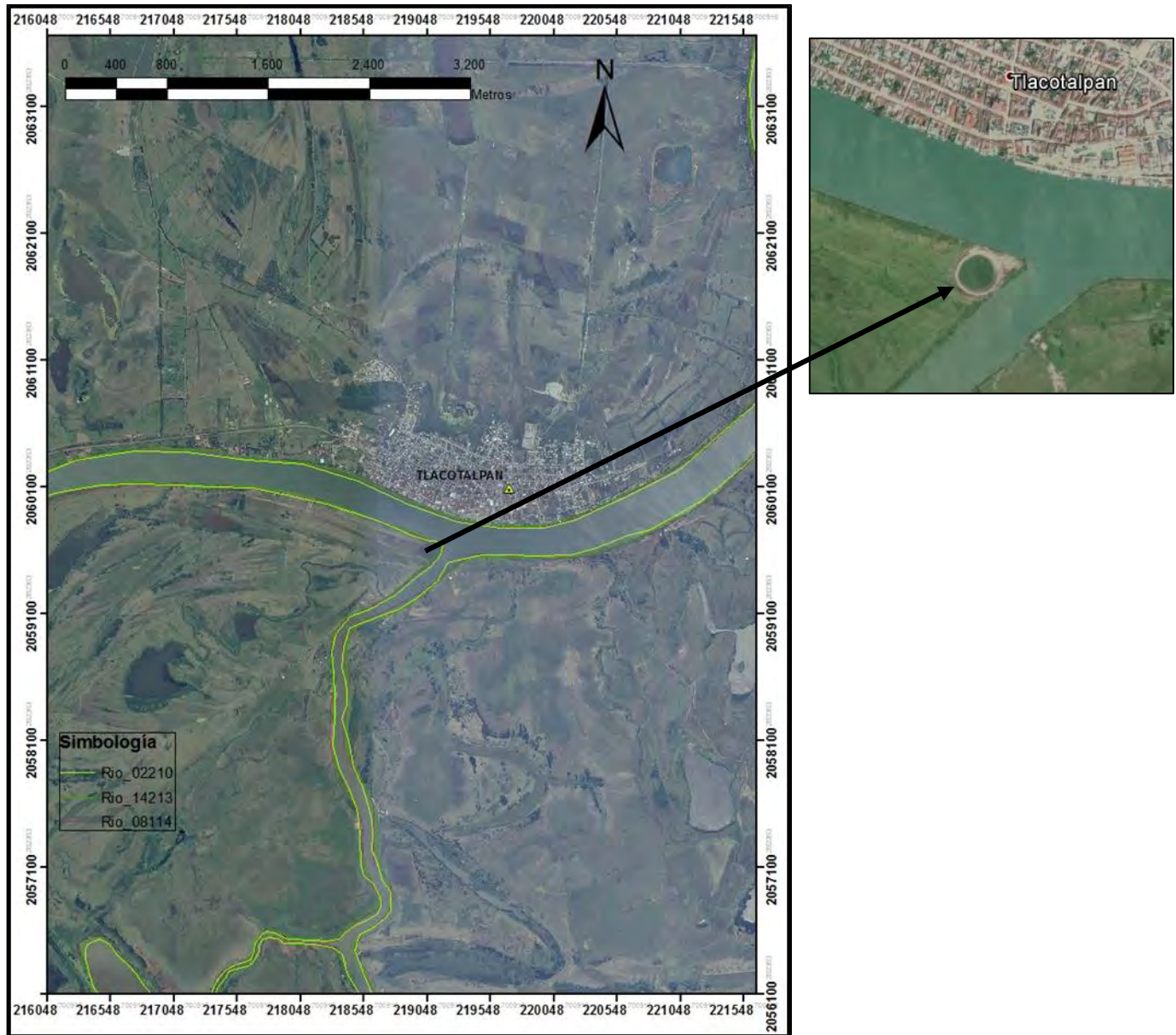


Figura 29. Trazos en zona tres correspondientes al periodo 2010-2014, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.

En 2010 se presentaron tres fenómenos con lluvias constantes lo que saturó el contenido de agua en el suelo en ambas márgenes del río Papaloapan provocando la inundación de la ciudad.

Aunque la imagen con la que se trabajó y la de Google Earth corresponden a enero de 2010 y la inundación de Tlacotalpan ocurrió en septiembre de 2010 tras presentarse la Depresión Tropical DT11E del 3-4, el huracán Karl de magnitud 3 del 14 al 18 de septiembre y la Tormenta Tropical Matthew del 23 al 26 es de esperar que la cantidad de agua precipitada localmente y la transportada por el río diera lugar a la inundación de Tlacotalpan.

A pesar de que no se contó con información previa y posterior al evento de 2010 que permitiera identificar la mancha de inundación que afectará el municipio de Tlacotalpan y que permitiera determinar con exactitud la zona de desbordamiento de la margen izquierda del río Papaloapan, se tiene evidencia fotográfica obtenida de una inundación ocurrida en 1950 tras el paso de un huracán "Sin Nombre" en octubre de ese mismo año (Fig. 30a) y del evento de 2010 (visita de campo), lo que permite establecer que la zona de mayor impacto fue aguas abajo de la confluencia del río San Juan sobre la margen izquierda del río Papaloapan, donde se tiene una cota de 1 m al igual que la cota normal del río la cual fue sobrepasada. Asimismo en la Fig. 30b se observan las zonas de anegación en la parte norte de la población, donde estaba la isla o banco fluvial arenoso que con el agua acumulada incremento el riesgo

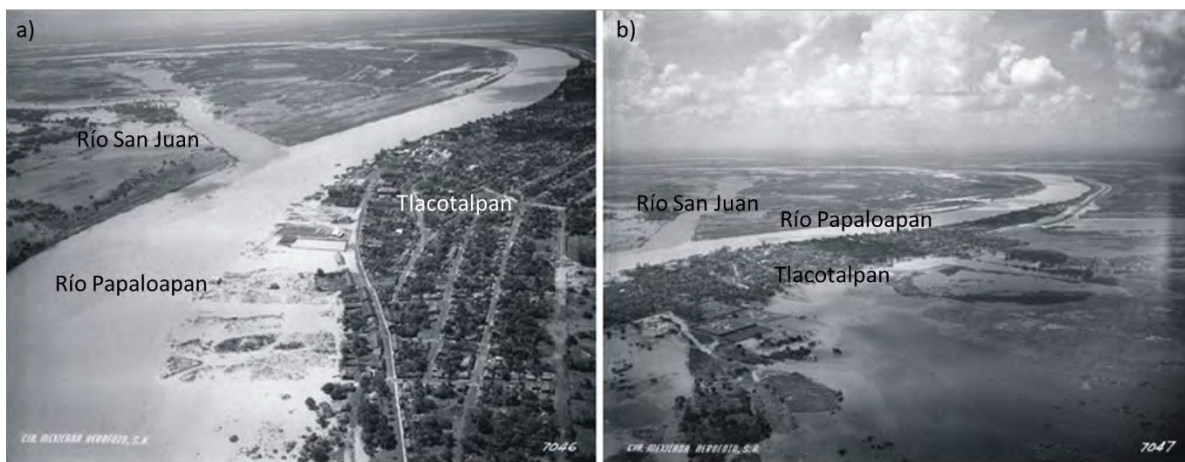


Figura 30. Fotografías aéreas correspondientes a la inundación del municipio de Tlacotalpan de 1950. Fuente: <https://aguapasada.wordpress.com/2011/08/31/tlacotalpan-fotos-de-la-inundacion-de-1950/>

En la fig. 31, se indican sobre la imagen de Google de 2014 evidencias fotográficas físicas de la inundación de 2010, asimismo es de mencionarse la evidencia de sedimentos en la desembocadura del río San Juan y aguas arriba del río Papaloapan. En la fotografía de lado izquierdo, se observan dos marcas en color rojo que muestran los niveles de agua alcanzados después de la depresión tropical y después de la Tormenta Tropical, ambas generaron inundaciones en la zona cercana al palacio municipal, alcanzando su máximo nivel de 1.50 metros. Mientras que del lado derecho se muestra el nivel que alcanzo el agua en la zona cercana a la capitanía del puerto de Tlacotalpan, a centímetros de alcanzar el techo de una construcción. Estas dos evidencias corresponden a sitios con una distancia aproximada de 600 metros, pero con cotas de 1 a 5 m.



Figura 31. Vista de Google Earth de Tlacotalpan en 2015, en amarillo los puntos donde fue tomada la evidencia de niveles de agua alcanzados en la inundación de 2010.

4.4 Zona 4

La zona 4 se dividió en dos subzonas; la zona 4a se muestra en la Fig. 32, donde se observa un desplazamiento del eje del río en dirección este; la línea roja marca los márgenes del río en 1980, las cuales se toman como base para explicar los desplazamientos a lo largo de 30 años. Este desplazamiento es muy evidente en el cuerpo de agua conocido como laguna El Pájaro y marcado con el círculo rojo

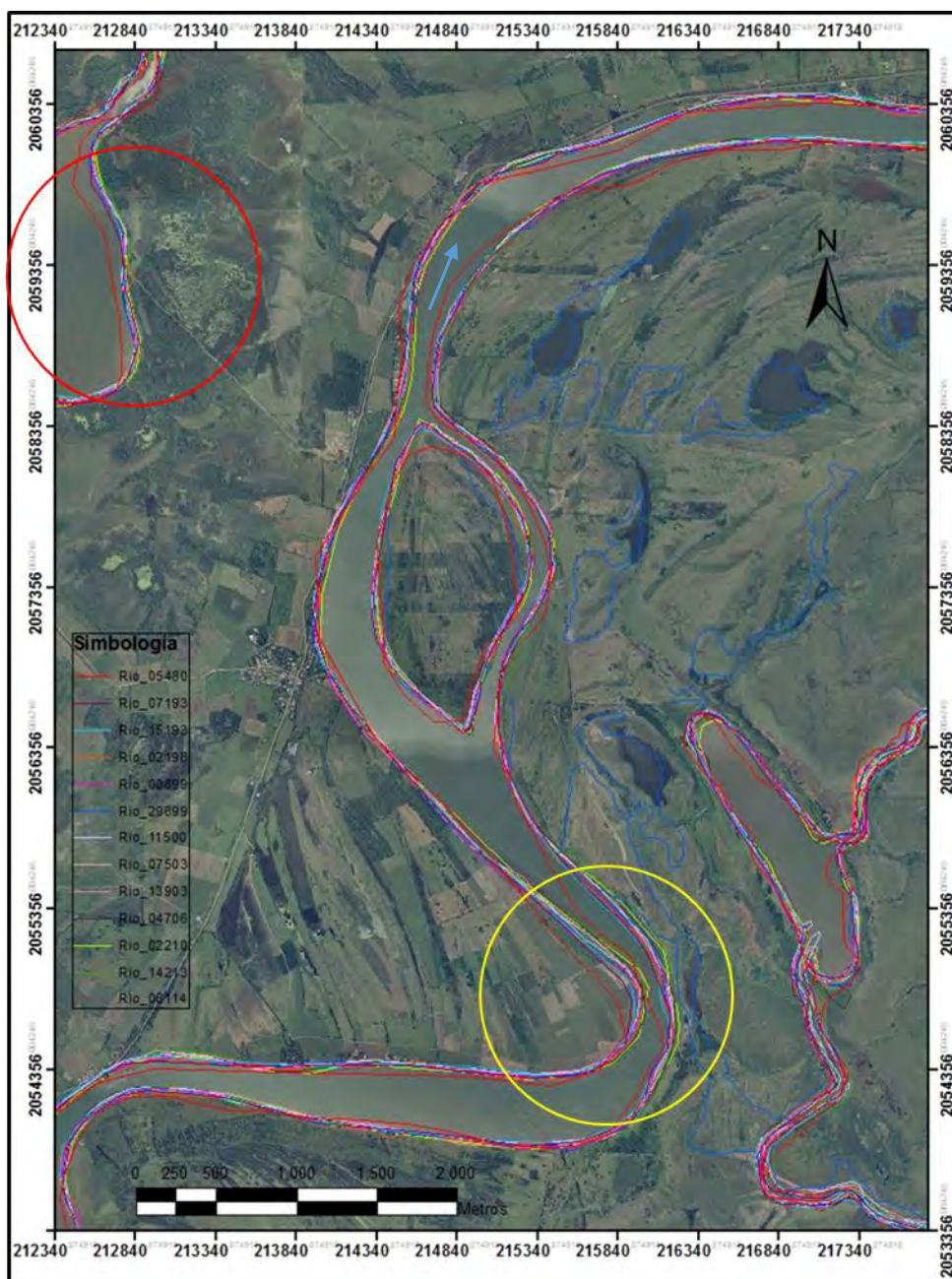


Figura 32. Trazos del río para la zona cuatro correspondientes al periodo 1980 a 2014, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.

La gran dinámica del río se muestra en procesos erosivos y de sedimentación, siendo más evidente la erosibilidad sobre la margen derecha el río, lo que coincide con llanuras aluviales muy susceptibles a inundación favoreciendo la presencia de vegetación tipo humedales y cuerpos de agua tanto estacionales como perennes.



En la parte central de la zona 4 (Fig. 32) se observa un banco fluvial arenoso con vegetación, de hecho se aprecia una zona agrícola de temporal bien definida. Este banco es resultado del transporte de sedimentos en las márgenes internas lo que da lugar canales subsidiarios.

La zona 4b, círculo amarillo, muestra para 1980 un cauce totalmente diferente al que se presenta años después, apreciándose de manera clara el desplazamiento de ambas márgenes del río en dirección este, influyendo principalmente en cambios del radio de curvatura. Sobre la margen izquierda se observa una zona de cultivo, en esta zona se ha mostrado una acumulación de material, mientras que sobre la margen derecha se observa erosión importante que ha provocado el movimiento de dicha margen. En este sitio se muestra, durante la inundación de 1999, una salida de agua prácticamente a lo largo de este meandro, que provoca la anegación de la planicie al este del cauce.

4.5 Zona 5

La zona 5 presenta un banco fluvial arenoso con zona agrícola que usa las aguas de inundación durante la época de lluvias. Al igual que en los casos anteriores destacan los cambios ocurridos en los periodos comprendidos por los años 1980-1993 y 1993-1998, a partir de este último año 1998 se presentan variaciones menores. En el periodo 1980 – 1993 se observa que los asentamientos sobre la margen izquierda, canal subsidiario, fueron resultado del desplazamiento del río hacia el este, lo que redujo el ancho del cauce. El transporte de sedimento de la margen izquierda hacia la isla incremento su largo en un 25% y su ancho en casi 20% (Fig. 33). Este incremento en el ancho de la isla llevo a desplazar el cauce principal sobre su margen derecha ocupando terreno con cotas de nivel variable (4 a 6 m).

Cambios similares se observan aguas abajo en el meandro, sólo que en este caso el desplazamiento es de la margen izquierda a la derecha lo que corresponde con el movimiento del lecho mayor al menor del meandro ocasionado por la erosión y sedimentación del cauce, respectivamente (Fig. 33, círculo amarillo). El resultado es un meandro con mayor radio.

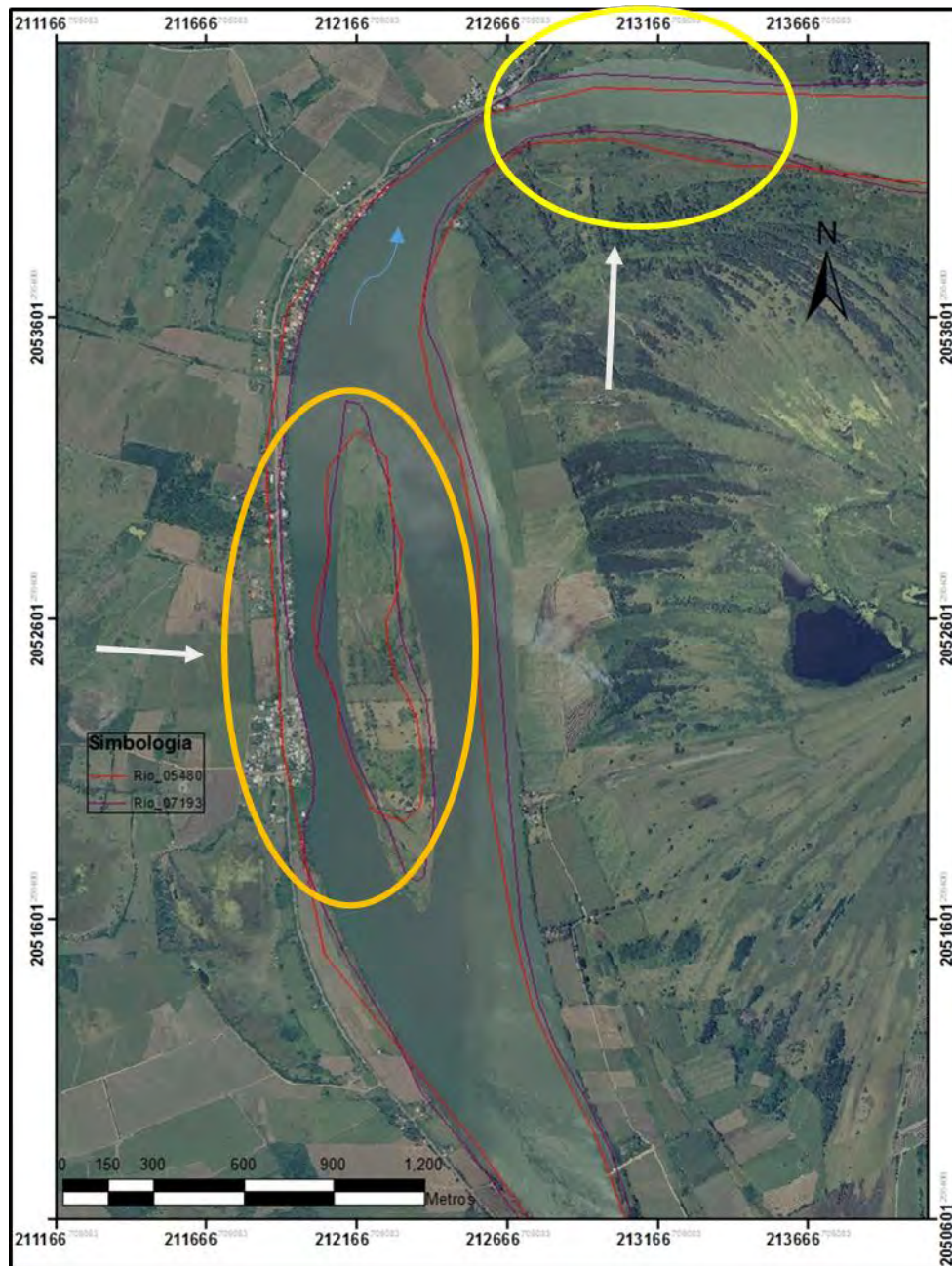


Figura 33. Cambios morfológicos en la zona seis durante el periodo de 1980 a 1993, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.

Para el segundo periodo (1993-1998), se presentaron cambios considerables en la geometría del cauce. En la zona de la isla, se continuó con la erosión del cauce por parte izquierda sobre su margen izquierda y depósito aumentado su longitud y ancho en aproximadamente 10%. De igual manera, el meandro ubicado aguas abajo continuó su desplazamiento hacia la parte convexa de la curva.

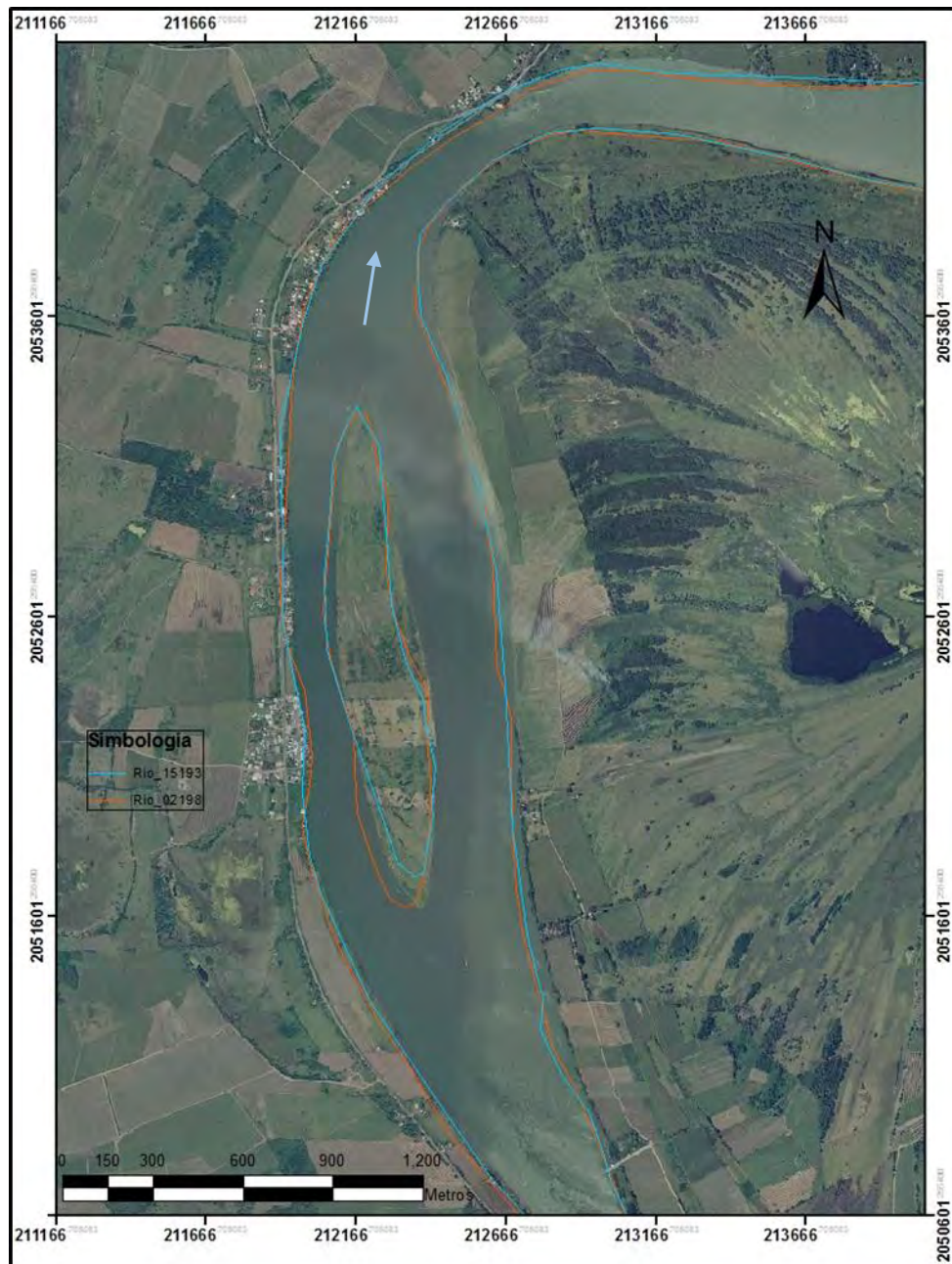


Figura 34. Periodo de 1993 a 1998, donde se identifican cambios para la zona seis, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.

Cabe resaltar que en 1998, el río alcanza su geometría actual definiéndose por completo los asentamientos humanos sobre la margen izquierda.

Finalmente para el periodo de 1998 a 2014, la zona 5 muestra cambios menores a diferencia de los periodos anteriores. Probablemente los mayores cambios se dieron en el meandro incrementando su cauce aguas arriba de su centro. Incluso

se puede decir que después de 30 años (1980 a 2010) lo que se erosionó en la margen izquierda se sedimentó en la margen derecha en la misma proporción.

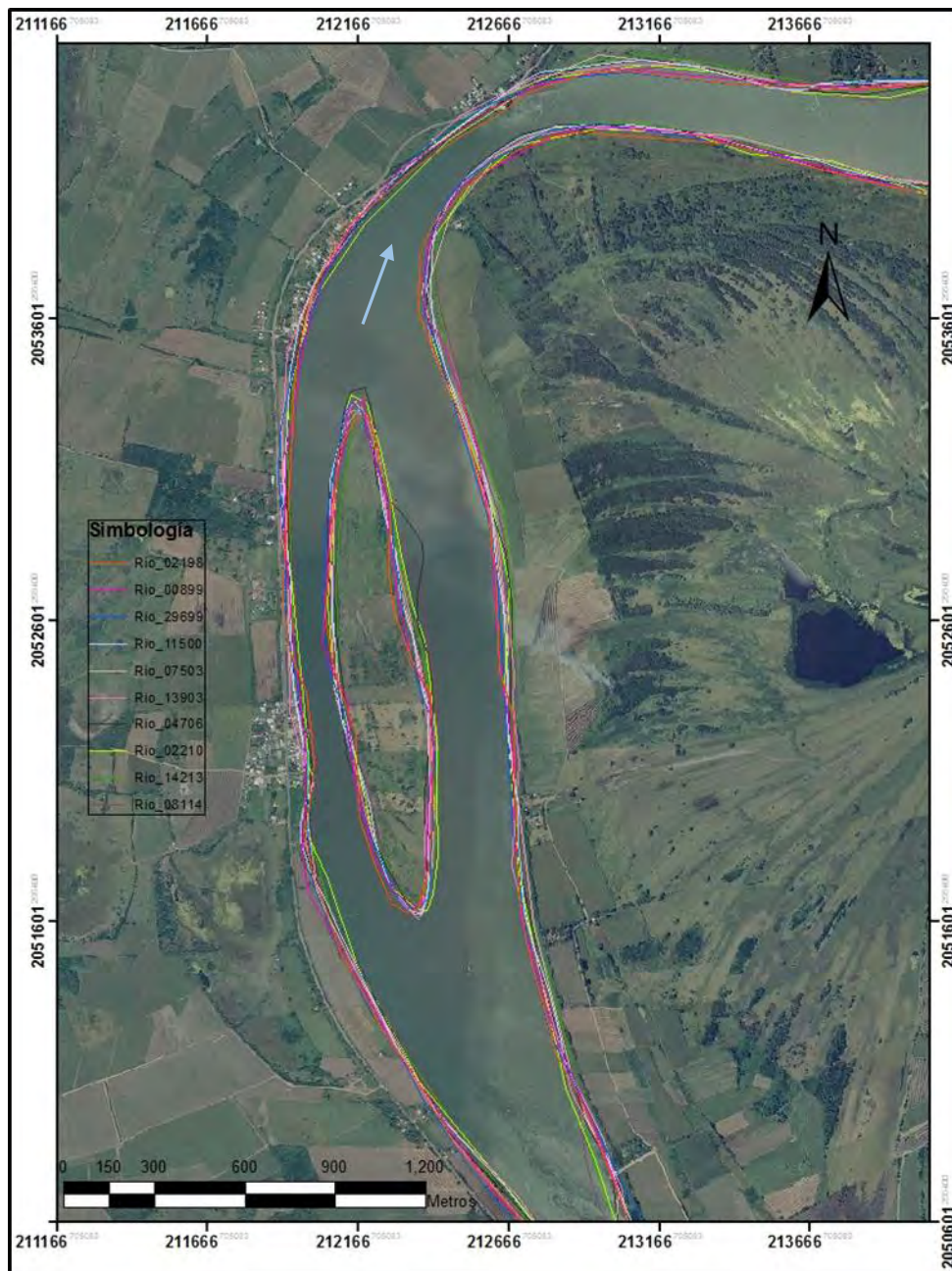


Figura 35. Comparación de los trazos obtenidos para la zona seis durante el periodo de 1998 a 2014, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.

Los últimos cambios más evidentes se dan de 2010 a la fecha. Estos corresponden a los círculos marcados en la Fig. 36:

- *Círculo naranja*, se aprecia el transporte de sedimentos que van hacia la parte sur de la isla. La erosión en la margen del río corresponde a 50 m tierra adentro del cauce, la cual ya fue empleada en agricultura
- *Círculo verde*, igual se muestra un proceso erosivo sobre la margen derecha aunque en menor proporción al que se originó en el círculo naranja.
- *Círculo rojo*, sobre el cauce derecho en la margen izquierda se observa una zona de acumulación de sedimento en 2014, la cual reduce a la mitad el ancho del cauce



Figura 36. Cambios en el cauce del río Papaloapan en el periodo de 2010 a 2015

4.6 Zona 6

En la zona 6, los cambios ocurridos en los periodos comprendidos por los años 1980-1993 son también muy evidentes. Esto se puede asociar al paso de la carretera Federal 175 Alvarado-Cosamaloapan a la altura de Boca del Río en Amatitlán, Veracruz. Siguiendo la línea roja, que representa el cauce en 1980 (Fig. 37), se observa una marcada erosión sobre la margen izquierda, lo que dio lugar a la reducción del banco fluvial arenoso o isla modificando la geometría del cauce a la izquierda del banco (se desplazó la margen izquierda cerca de 250 m). Este movimiento del cauce favoreció, por un lado, el asentamiento de la población creando barras marginales, las cuales actualmente sirven como bordos y están reforzadas con colchacreto y, por otro, el desarrollo de zonas agrícolas. Es posible que de continuar la erosión sobre la margen izquierda se formen uno o dos bancos aluviales más (Fig. 38).

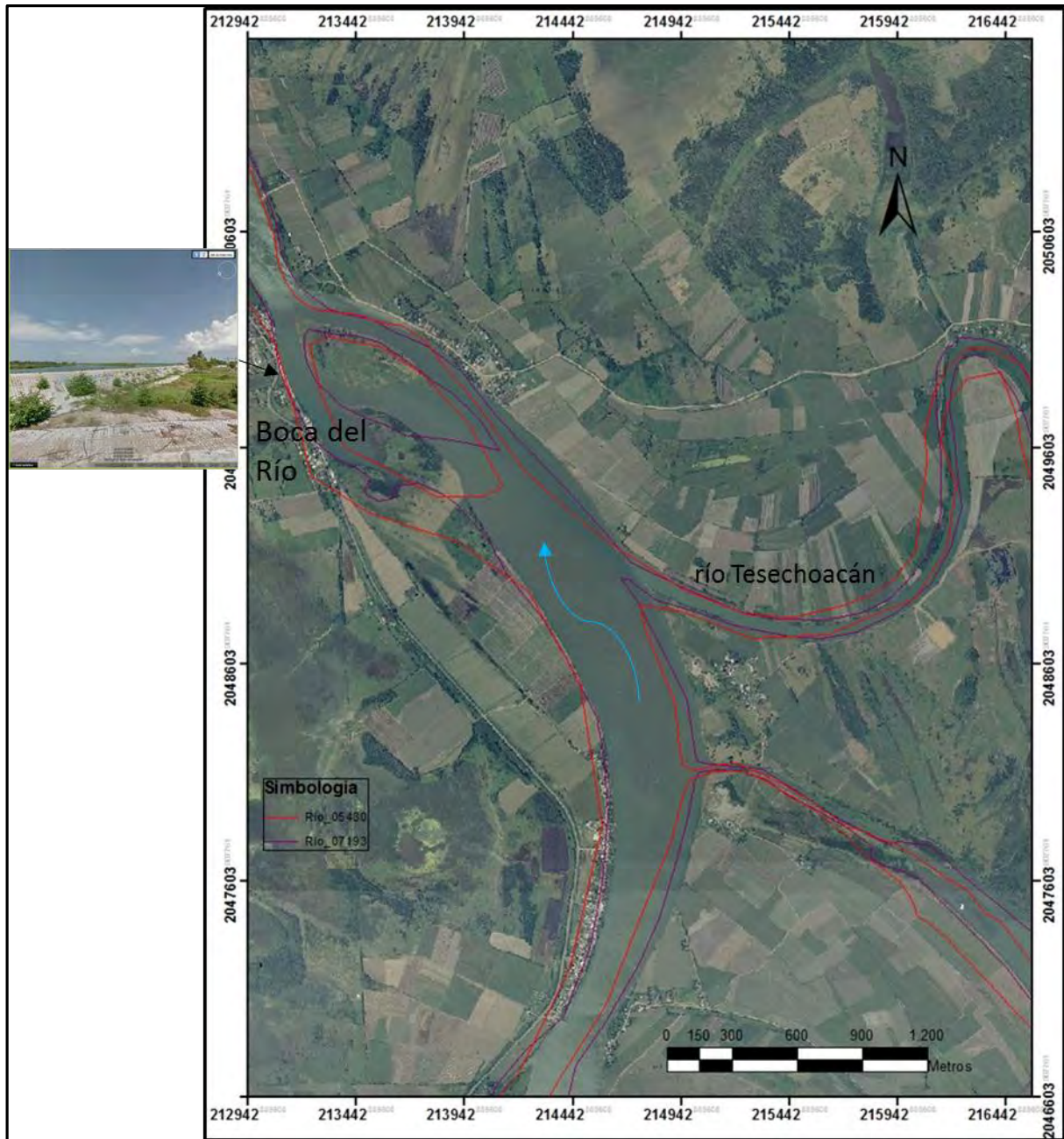


Figura 37. Cambios morfológicos en la zona seis durante el periodo de 1980 a 1993, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.



*Figura 38. Islas o Bancos fluviales formados en la corriente del río Papaloapan.
Fuente: Google Earth*

Asimismo, los cambios de 1980 a 1993 son muy evidentes sobre el tributario río Tesechoacán (Fig. 40), el cual se redujo en la confluencia y presenta movimientos del lecho menor hacia el mayor en todos los meandros formados. Aguas arriba de la confluencia de este río se tiene un meandro abandonado de 4,000m de largo y 1,500 m de ancho, el cual mantiene conexión constante con el lecho menor del río Papaloapan e inunda la zona agrícola formada dentro y fuera sobre el ex lecho mayor.



Figura 39. Meandro activo en época de lluvias. Fuente: Google earth

Durante el periodo limitado por los años 1999 y 2010, se presentaron cambios significativos en esta zona, ya que se definió la geometría actual de la isla; estos cambios determinantes fueron en 2003 y 2010. Por ejemplo, en el río Teseochacán se recupera parte de la zona de la confluencia y en 1999 sobre su primer meandro, en la parte cóncava o lecho menor, presenta un desbordamiento inundado su planicie. En cuando al meandro abandonado, en efecto se observa que ante una avenida este se activa incrementando su ancho en la confluencia con el río Papaloapan.

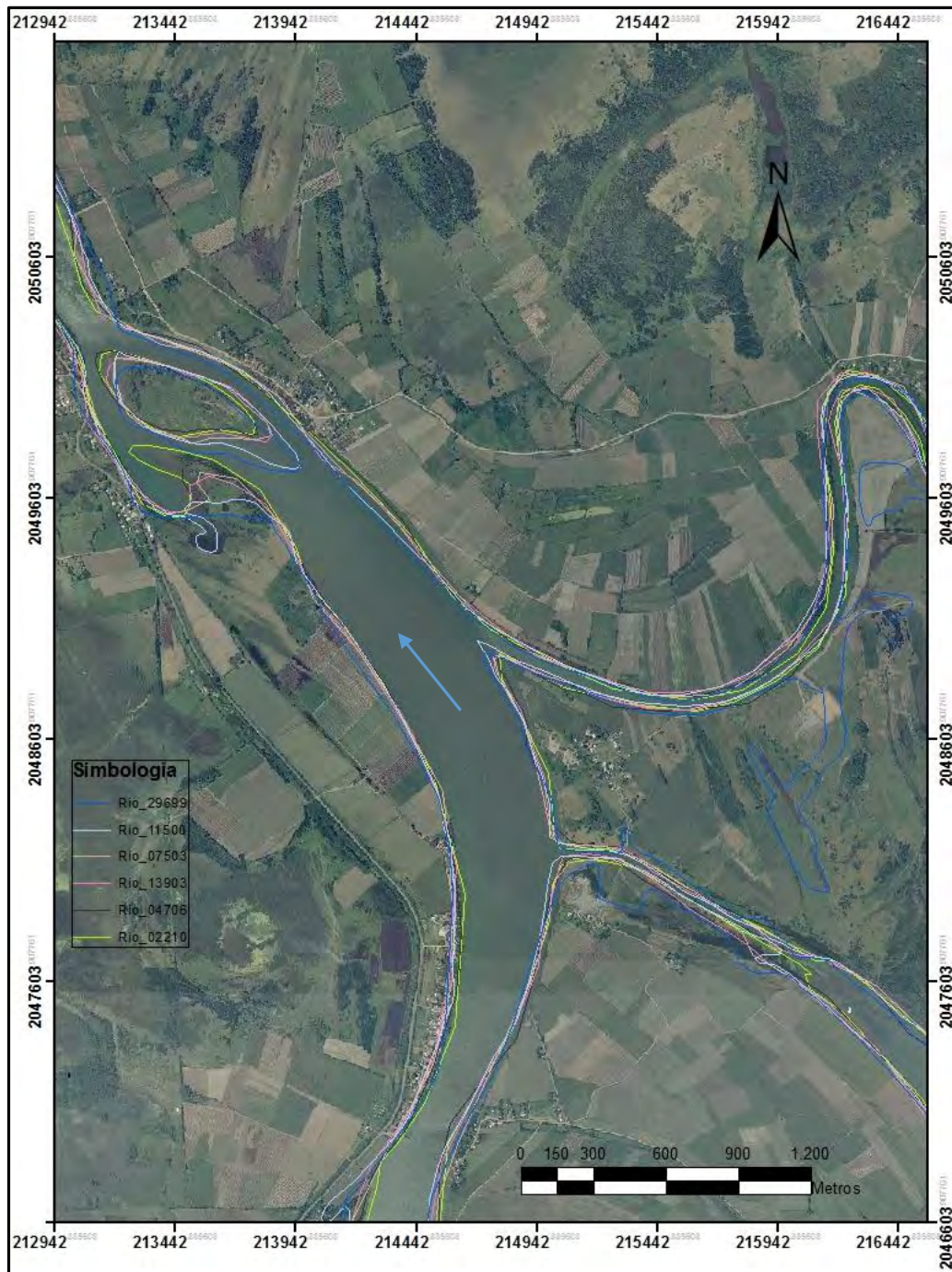


Figura 40. Trazos de la zona seis obtenidos del periodo entre los años 1999 y 2010, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.

Durante el periodo 2010-2014, los cambios continuaron en menor grado y, principalmente, en la zona del banco fluvial arenoso con vegetación agrícola, donde nuevamente se presenta erosión y sedimentación. Lo que lleva a la protección de los bordos sobre la margen izquierda del río para resguardar a la población de Boca del Río

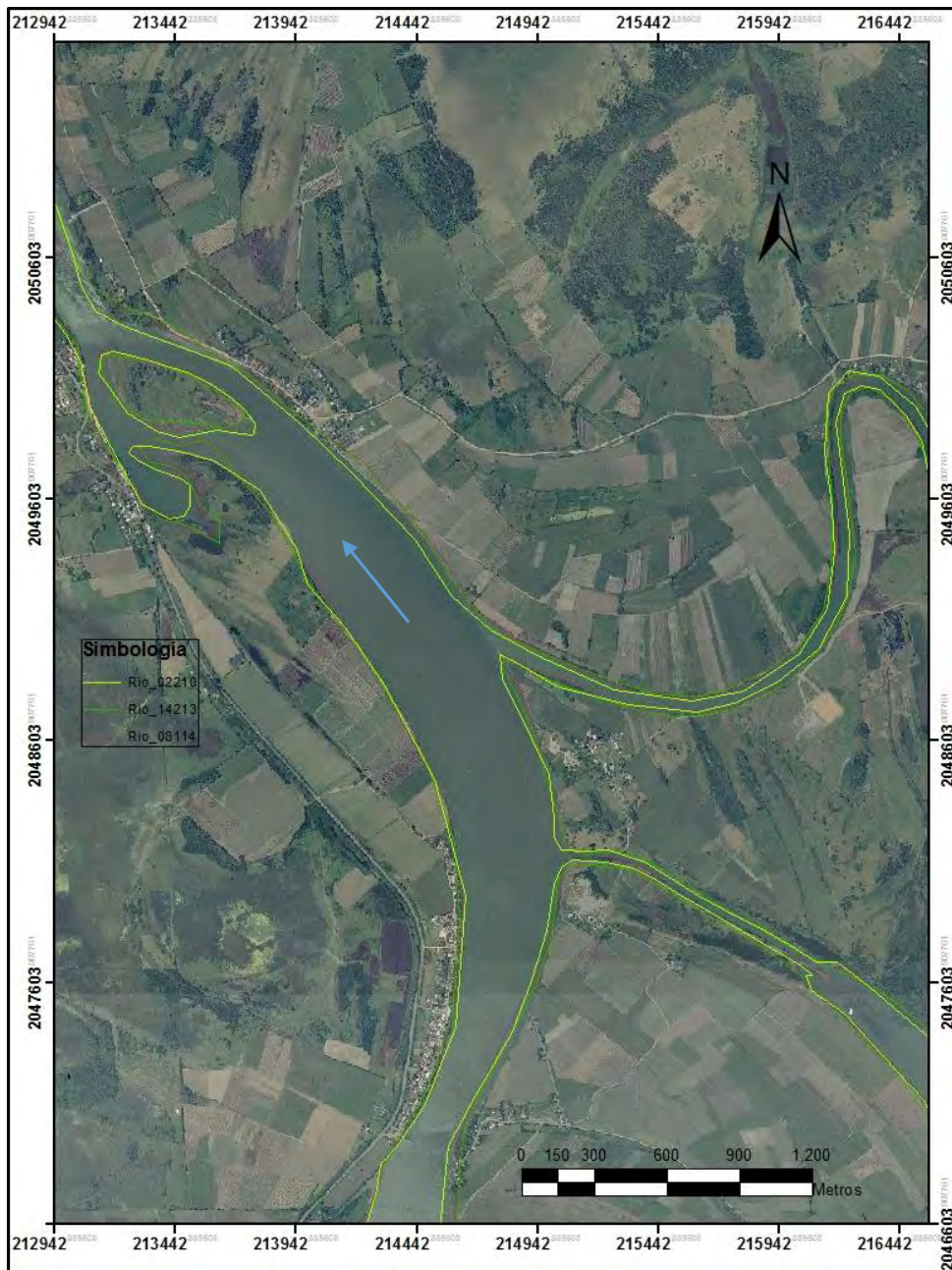


Figura 41. Comparación de los datos obtenidos en el periodo entre los años 2010 y 2014, empleando como mapa base ortofotos del servicio de mapeo de INEGI.



5. Discusión

La alta dinámica que presenta el río Papaloapan, se genera en primer lugar por las pendientes poco pronunciadas y debido a que se trata de un río aún joven, lo que ha traído cambios en la trayectoria del eje, las márgenes y la planicie del río, del tal modo que presentan movimientos, ya sea por erosión o acreción, pero siempre con una dinámica constante. Este tipo de ríos evoluciona a través de sus llanuras de inundación que suelen ser conformadas por materiales aluviales generalmente aportados por el mismo río. Si bien son esperados los cambios geomorfológicos, la dinámica resulta aún más evidente en las seis zonas que presentaron cambios de mayor grado dentro de la zona de estudio.

Gupta (2010) entre otros autores menciona que los cambios como la ampliación del canal o la transformación de la planicie de inundación se asocian a la inundación misma pero también a los cambios ocurridos en la zona de estudio por tres factores: tipo de suelo, clima y humano. En el estudio se puede observar que en efecto los cambios generados en el clima que a su vez han modificado la zona generando erosión o acreción han traído cambios que se tornan más evidentes durante un evento extraordinario. Al ser el tipo de suelo predominante cual es de esperar que presenten una elevada saturación de agua dada su baja permeabilidad, esto favorece la presencia de cuerpos de agua someros y estacionales. Asimismo, define la vegetación que se desarrolla pues es de raíz pequeña, no representando una restricción a la evolución del río.

Martín (1997), menciona que el movimiento de los meandros es de grandes distancias para los ríos que discurren por llanuras aluviales, donde no exista alguna restricción a la libertad de evolución, situación que se presentó en las seis zonas donde se determinaron los cambios importantes. En particular en la zona 3 donde sobre el río San Juan, aguas arriba de su desembocadura con el río Papaloapan, se identificó un desplazamiento considerable del cauce en dirección este. La poca o nula restricción del canal del cauce se debe a que el suelo es de tipo gleysol, la vegetación es pastizal, y no hay asentamientos humanos que influyeran en las modificaciones de las márgenes del río.

Además de los cambios mencionados, en vistas actuales como se muestra en la figura 31, se logró observar la presencia de islas en el río Papaloapan, que son resultado de la acumulación de material en suspensión producto de la erosión de las márgenes y del lecho del río. Este sitio correspondiente a la zona 3, donde se presentan dos de estos cuerpos frente al municipio de Tlacotalpan: uno de ellos a la altura de la convergencia entre el río Papaloapan y el río San Juan, y el otro aguas arriba sobre el río Papaloapan. Esta acumulación de material implica especial atención principalmente al analizarse la zona del municipio de Tlacotalpan, ya que de continuar el depósito de sedimentos implicará cambios en las márgenes de los ríos, lo cual implicar aún mayor riesgo para dicha comunidad.



Revisar la condición climática es determinante para este tipo de estudios, no sólo por los cambios regionales sino locales. Si bien se tiene la presencia de ciclones generados en el Golfo de México, con un aporte de lluvia considerable también se tienen modificaciones en el uso de suelo que alteran el clima, esto es, los asentamientos humanos o el cambio de uso de suelo a actividades agrícolas. Un aspecto a resaltar en este estudio, fue la dificultad para observar los cambios generados en la zona de estudio durante los eventos de 2010. Smith y Ward (1998) establecen que para evaluar la inundación y sus impactos se requiere abarcar el periodo antes, durante y después del evento de inundación; sin embargo para este trabajo la información disponible fue limitada para la parte principal del periodo, es decir, el momento en el cual se presentó la anegación en su máximo nivel ya sea porque no se generaron imágenes disponibles o porque la información disponible presento restricciones principalmente provenientes de la presencia de nubes en la zonas de interés. En este caso, el empleo de imágenes de microondas pudiera significar una variación importante al proporcionar información durante el evento.

Si bien no se logró evaluar con exactitud, los efectos provocados por todos los ciclones, principalmente los ocurridos en el año 2010, el hecho de abarcar un periodo de estudio de 30 años dio lugar información, que permitió confirmar la forma en que esta zona se anega, como se generó para el año 1999, la cual funcionó como referente para analizar el año 2010 en que se presentaron los ciclones Karl y Matthew.

Al analizar, la intervención del hombre como un factor que influye en los cambios morfológicos del río y su planicie, se observa que no siempre incrementan los cambios morfológicos afectando a la conducción del cauce y la morfología de la planicie, también puede esperarse una disminución de estas alteraciones. Por ejemplo, en la zona 6 (fig. 37) se presentan cambios sobre la margen izquierda del río Papaloapan a la altura de la isla, estos cambios pudieran tratarse de una acumulación que suele darse en las zonas de meandros, donde comúnmente se deposita material en la parte convexa; sin embargo, para este caso está no fue la única causa para el cambio, ya que se trata de una zona donde se ubican terrenos de cultivo sobre la ribera del río, lo que indica cambio de la trayectoria del río. Lo más alarmante es no el uso del terreno para actividades diversas al flujo del agua en el río, sino que posterior a los cambios donde se ganó más terreno al río, los cambios naturales del río y su planicie aumentan las modificaciones debido a la acumulación de sedimentos lo que a la larga lleva a perder más terreno.

En el caso de disminución de los cambios en el río y su planicie debido a la intervención del hombre, se observó un ejemplo en la zona 3 sobre la margen izquierda del río, a lo largo de la zona correspondiente al municipio de Tlacotalpan, donde dicha margen presenta una restricción importante al movimiento, la cual la mantiene con la misma trayectoria durante todo el periodo de estudio. Esta



restricción se trata del malecón de 500 metros de largo, el cual funciona como obra de proyección para esta comunidad, evitando que haya pérdidas de terreno.

Como ya se mencionó, las acciones del hombre también son importantes para disminuir los cambios que se presentan tanto en el cauce del río como en su planicie de inundación, y en los objetivos de este trabajo se propuso establecer acciones que ayuden a mitigar los efectos negativos de las inundaciones sobre las comunidades, con enfoque en el municipio de Tlacotalpan debido al daño sufrido durante los eventos de 2010 dejando pérdidas económicas considerables. Ante esto es importante tomar en cuenta como se originó la ciudad y que el riesgo a inundarse es alto debido a las modificaciones tanto del río Papaloapan como de su planicie de inundación a lo largo de 185 años. Atendiendo al hecho de que el río Papaloapan es de tipo meándrico, es común que se presenten curvas a lo largo del río, por lo que de acuerdo con Maza (1996) las principales obras que se emplean para la protección de las márgenes del río son: espigones, recubrimientos y diques marginales. Los espigones son empleados principalmente en la parte cóncava, ya que en esta parte es donde suele presentarse erosión, generando no solo protección sino también suele tener una función de recuperación de sedimentos. Sin embargo en este caso la zona que nos interesa proteger es la zona ubicada en la parte convexa, ya que ahí se ubica el poblado de Tlacotalpan. Maza (1996) comenta que los diques marginales son empleados para proteger las orillas en las cuales se encuentran cerca poblaciones, ciudades, vías de comunicación o canales de irrigación, lo que apoya a esta obra como una opción para evitar o mitigar los daños de anegación. Este tipo de obra ya ha sido empleada e incluso ha funcionado para una porción de esta zona, que es el caso del malecón de 500 metros, el cual ha realizado esta función de presentar una restricción no solo al cambio en la trayectoria de dicho margen, sino también para evitar la salida del agua a lo largo de ella, lo cual fue observado en 2010.



6. Conclusiones

El análisis realizado cubrió un periodo de treinta años, en el cual, se generó un análisis espacio temporal empleando la información obtenida a partir de las imágenes satelitales, lo que permitió determinar los cambios geomorfológicos del río y su planicie de inundación en la zona de estudio, comprobando así la hipótesis planteada.

Tres factores principales fueron observados a los cambios del río y su planicie: eventos ciclónicos, los cuales modifican el régimen climático de la zona, el tipo de suelo, el cual es en su mayoría gleysol (para las seis zonas de mayor dinámica) y la influencia del hombre, cambiando el uso de suelo en la planicie y obligando al río a moverse en función de sus actividades socio-económicas.

En general, se puede afirmar que el río Papaloapan es altamente dinámico por lo cual se han presentado cambios constantes a lo largo del tiempo. Seis zonas de interés fueron obtenidas donde los cambios más evidentes en las márgenes y en el eje del río se pueden asociar en general a erosión o acreción ya sea por causas naturales o del hombre.

El empleo de un sistema de información geográfica (SIG), resultó fundamental en este análisis, ya que en él se integró la información generada a partir de la información ráster y vectorial, es decir, en él se visualizaron, manejaron los trazos del cauce del río y la planicie de inundación, con lo que fue posible generar tras una comparación para cada lapso comprendido entre una imagen y otra, un análisis de las causas que se asocian al cambio en dichos trazos, tomando en cuenta que para algunos periodos se presentaron varios ciclones.

La zonas que presentaron cambios debido a anegación, se vieron influenciados principalmente por la relación que existe entre el tipo de suelo poco permeable y los eventos ciclónicos que se presentan con frecuencia por la cercanía de la zona de estudio con el Golfo de México, lo que provoca en que el suelo se sature rápidamente de agua y que esto provoque la formación de cuerpos de agua, al mismo tiempo que esto representa un riesgo mayor ante un desbordamiento del río, ya que provoca que la inundación continúe por más tiempo. Si bien, la inundación de 2010 no contó con información lo suficientemente cercana al evento como para lograr delimitar con exactitud el impacto de dicho evento, se logró obtener evidencia capaz de indicar que el desbordamiento que afectó al municipio de Tlacotalpan se dio aguas abajo de la confluencia del río Papaloapan y el río San Juan. Es altamente recomendable, para seguir el desbordamiento y la



extensión de la inundación, contar con imágenes de microondas, en particular de radar para evitar el problema de nubosidad en los periodos de lluvia.

Asimismo, se pudo observar que en la ciudad de Tlacotalpan, la obra del malecón ha permitido que las salidas de agua sean aguas abajo de ella, por lo que una posible recomendación sería extender dicha obra, es decir, continuar con la construcción de un dique a lo largo de la zona habitada; para ello, habrá que hacer un análisis más detallado.



BIBLIOGRAFÍA

Consejo de Cuenca del Río Papaloapan (2014). El sistema hidrográfico del Papaloapan por su caudal es el segundo en importancia del país. Página web consultada en febrero de 2014. <http://www.cuencapapaloapan.org/tucuenca.php>

Baker, V.R., Pickup, G. and Polanch H.A.(1895). Radiocarbon dating of flood events, Katherine Gorge, Torhern Territory, Australia. *Geology*, 12, 344-347

Benito G., Houdson P. (2010). Flood hazards: the context of fluvial geomorphology. In I. Alcantara-Ayala, A. Goudie (eds.), *Geomorphological hazard and disaster prevention*, Cambridge University Press, 111-128

Blum, M.D. (2007). Large river systems and climate change. In A. Gupta, (ed) , *Large Rivers: Geomorphology and Management*. Chichester: Wiley, pp. 627-659

Bourke, M. and Pickup, G. (1999). Fluvial form variability in arid central Australia. In A. J. Miller and A. Gupta, (eds.), *Varieties of Fluvial form*. Chichester: Weley, pp. 2499-271

Brakenridge, G.R.(1988) . River flood regine and floodplain stratigraphy. In V. Baker, C. Kockel and P. Patton (eds.), *Flood Geomorphology*. New York: Wiley Interscience, pp. 139-156

Díaz J. (2010). Reseña de la tormenta tropical “Matthew” del Océano Atlántico. *Temporada 2010 de Huracanes*, pp. 1-2

Gupta, A. (1975) Stream characteristics in eastern Jamaica, and environment of seasonal flow an dlarge floods. *American Journal of science*, 275, 825-847

Gupta, A. (1995). Magnitude, frequency, and special factors affecting channel form and processes in the seasonal tropics. In J.E. Costa, A.J. Miller, K.W. Potter and P.r. Wilcock(eds.), *Natural and Anthropogenic Influences in Fluvial Geomorphology*. Washington, D.C.: American Geophysical Union Monograph 89, pp. 125-136

Hernández, A., Bravo, C. y Díaz J. (2010).Reseña del Huracán “Karl” del Océano Atlántico. *Temporada 2010 de Huracanes*, pp. 1-4



Horton, R.E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. Geological Society of America Bulletin, 56, 275-370

Hudson, P.F. and Kesel, R.H. (2006), Spatial and temporal adjustment of the lower Mississippi River to major human impacts, Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband, pp. 17-33

Kochel, R.C., and Baker, V.R. (1982), Paleoflood hydrology, Science. pp. 353-361

Larsen, M.C., Vásquez Conde, M.T. and Clark, R.A. (2001). Flash-flood related hazards: landslides, with examples from the December 1999 disaster in Venezuela. In E. Gruntfest and J.U. Handmer,(eds.), Coping with flash floods. Dordrecht: Kluwer, pp. 259-275

Lastra, J., Fernández, E., Díez-Herrero, A. and Marquínez, J. (2008). Flood hazard delineation combining geomorphological and hydrological methods: and example in the Northern Iberian Peninsula. Natural Hazards, 45(2), 277-293

Leopold, L.B., Wolman, M.G. and Miller, J.P. (1964). Fluvial Processes in Geomorphology. San Francisco: W.H. Freeman.

Mapas Interactivos (2015). Mapa de Tlacotalpan, [Página Web consultada en febrero de 2015]

<http://mapasinteractivos.didactalia.net/comunidad/mapasflashinteractivos/recurso/plano-de-tlacotalpan/e811fc9a-1cd4-465f-b01f-10ba17c79956?rdf>

O'Connor, J.E. and Costa, J.E.(2003). Large floods in the United States: where they happen and why. U.S. Geological Survey Circular 1245, Denver

Organización de los Estados Americanos (1993).Manual sobre el manejo de peligros naturales en la planificación para el desarrollo integrado. [Página Web consultada en Junio de 2014] <https://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea65s/ch13.htm#c>. técnicas de cartografía del peligro de inundaciones y aplicaci&

Patton, P.C., Pickup, G. and Price, D.M.(1993). Holocene paleofloods of the Ross River, Central Australia. Quaternary Research, 40, 201-212

Pérez, Daniel (2007). Introducción a los sensores remotos-Aplicaciones en geología. Curso teórico-práctico. Laboratorio de Tectónica Andina, Buenos Aires.



[Página Web consultada en marzo de 2014]
http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso_SR/Guia_Curso_sr_2007.pdf

Sarker, M.H., Huque, I., Alam, M. and Koudstaal, R.(2003). Rivers, char and char dwellers of Bangladesh. *International Journal of River Basin Management*,1, 61-80.
Schick, A.P. (1998). Hydrological aspects of floods in extreme arid environments. In V.R. Baker, R.C. Kochel and P.C. Patton (eds.), *Flood Geomorphology*. New York: Wiley, pp. 189-203

Schumm, S.A. (1986). Alluvial River Response to Active Tectonics. Geophysics Study Committee, Geophysics Research Forum, National Research Council, National Academy of Sciences, Washington D.C

SEMAR (2012). Derrotero Mexicano. [Página web consultada en Junio de 2014]
<http://digaohm.semar.gob.mx/derrotero/cuestionarios/cnarioTlacotalpan.pdf>

Smith, K. and Ward, R. (1998). *Floods. Physical and Human Impacts*. Chichester: John Wiley

Smith, L.M and Winkley, B.R. (1996). The response of the Lower Mississippi River to river engineering. *Engineering Geology*, pp. 433-455

Stewart, J.H. and LaMarche, V.C. (1967). Erosion and deposition produced by the floods of December 1964 on Coffe Creek, Trinity County, California. U.S. Geological Survey Professional Paper, 422 K Washington, D. C.

Strahler, A.N. (1957). Quantitative analysis of watershed morphology. *Transactions of the American Geophysical Union*. pp. 913-920

Van Westen, C.J., 2010. GIS for the assessment of risk from geomorphological hazards. Chapter 17 in *Geomorphological Hazard and Disaster Prevention*, Eds. Irasema Alcántara-Ayala y Andrew S. Goudine publicado por Cabridge University Press, UK

Winkley, B.R (1994). Response of the Lower Mississippi River to flood control and navigation improvements. Nueva York. pp. 45-74

ANEXO



Satélite	Sensor	Bandas	Resolución espacial	Resolución radiométrica	Resolución temporal
Landsat 3	RBV	Banda 4-Azul(0.5 to 0.6 μm)	40m	8 bits	18 días
	MMS	Banda 4-Azul (0.5-0.6 μm)	79m		
		Banda 5-Verde (0.6 to 0.7 μm)			
		Banda 6 -Roja (0.7 to 0.8 μm)			
		Banda 7-Infrarrojo cercano(0.8 to 1.1 μm)			
Banda 8-Infrarrojo térmico(10.4 to 12.6 μm)					
Landsat 5	MMS	Banda 4-Azul (0.5-0.6 μm)	82m	8 bits	16 días
		Banda 5-Verde (0.6 to 0.7 μm)			
		Banda 6 -Roja (0.7 to 0.8 μm)			
		Banda 7-Infrarrojo cercano(0.8 to 1.1 μm)			
	TM	Banda 1-Azul (0.45-0.52 μm)	30m		
		Banda 2 -Verde (0.52-.60 μm)			
		Banda 3 -Roja (0.63-0.69 μm)			
		Banda 4-Infrarrojo cercano (0.76-0.90 μm)			
		Banda 5-Infrarrojo cercano (1.55-1.75 μm)			
		Banda 7-Infrarrojo medio (2.08-2.35 μm)			
Banda 6-Infrarrojo térmico(10.40-12-50 μm)	120m				
Landsat 7	ETM+	Banda 1-Azul (0.45-0.52 μm)	30 m	8 Bits	16 días
		Banda 2-Verde (0.52 μm)			
		Banda 3-Roja (0.63-0.69 μm)			
		Banda 4-Infrarrojo cercano (0.76-0.90 μm)			
		Banda 5-Infrarrojo cercano (1.55-1.75 μm)			
		Banda 6-Infrarrojo térmico (10.40-12-50 μm)			
		Banda 7-Infrarrojo medio(2.08-2.35 μm)			
	Banda 8-Pancromática (0.52-0.90 μm)	15 m			
Landsat 8	OLI	Banda 1-Aerosol costero(0.43-0.45 μm)	30m	12 bits	16 días
		Banda 2-Azul (0.45 - 0.51 μm)			
		Banda 3-Verde (0.53-0.59 μm)			
		Banda 4-Rojo (0.64- 0.67 μm)			
		Banda 5-Infrarrojo cercano (0.85-0.88 μm)			
		Banda 6 -SWIR 1 (1.57- 1.65 μm)			
		Banda 7-SWIR 2 (2.11, 2.29 μm)			
		Banda 8-Pancromático (0.50-0.68 μm)			
	Banda 9-Cirrus (1.36-1.38 μm)	30m			
	TIRS	Banda 10-Infrarrojo térmico 1 (10.6-11.19 μm)	100m		
		Banda 11-Infrarrojo térmico 2(11.5-12.51 μm)			