



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA
A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN
EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA
DEL RIO LA ANTIGUA, VERACRUZ

HUGO LARIOS TLALI

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2014

La presente tesis titulada “**Riesgo por inundación asociada a eventos de precipitación extraordinaria en la Subcuenca del río La Antigua**”, realizada por el alumno Hugo Larios Tlali, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



Dr. Abel Quevedo Nolasco

ASESOR



Dr. Mario Roberto Martínez Menes

ASESOR



Dr. Jorge Arturo Salgado Tránsito

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Julio de 2014

AGRADECIMIENTOS

A Dios, agradecer es poco por la vida que me dio, por los seres queridos que eligió para mí, por todo lo bueno que tengo en la vida, por lo que aún reserva, y por dejarme recorrer un camino de buenas experiencias, salud y alegría, sin él no llegaría a ningún lado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), al Colegio de Postgraduados y al Postgrado de Hidrociencias, por brindarme una oportunidad de preparación, de superación personal y por sembrar la semilla del conocimiento.

A la Comisión Nacional del Agua y a la Dirección Técnica del Organismo de Cuenca Golfo Centro (OCGC), por la información proporcionada y la libertad para hacer uso de ella, elementos imprescindibles en este proyecto.

Al Prof. Luis S. Torres Cedillo y la M.C. Elibeth Torres Benites, por su confianza, respaldo y apoyo incondicional que me han brindado. A la empresa Manejo Integral de cuencas S.A. de C.V., trabajo y escuela.

Al Dr. Abel Quevedo Nolasco, por su confianza y erudición, tanto en la academia como en lo personal. Al Dr. Mario R. Martínez Menes, por su valiosa aportación, individuo que suma y pule. Al Dr. Jorge A. Salgado Tránsito, por el respaldo que me brindó. A la Ing. Cristina Bonilla, por su apoyo y amistad.

DEDICATORIA

A Yeri, por estar conmigo aun cuando estoy ausente, por el apoyo y respaldo que siempre me ha dado.

A mis padres, René y Leti, por darme la vida y su apoyo incondicional sobre todas las cosas.

A Itzel y Reny, por la alegría y orgullo que representa su existencia.

A mis abuelos, Gaby, Isabel (†), Vidal y Ezequiel, todos un ejemplos de superación.

A la familia Larios y Tlali, por las buenas historias y agradables momentos que hemos pasado.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 2. JUSTIFICACIÓN	3
CAPÍTULO 3. REVISIÓN DE LITERATURA	5
3.1. CUENCA HIDROGRÁFICA.....	5
3.1.1. Definición de cuenca hidrográfica.....	5
3.1.2. Manejo de cuencas.....	6
3.1.3. Consecuencias de un mal manejo.....	8
3.1.4. Manejo de cuencas en México	9
3.2. FENÓMENOS HIDROMETEOROLÓGICOS	11
3.2.1. Descripción del fenómeno hidrometeorológico Karl.....	12
3.3. INUNDACIONES.....	17
3.3.1. Inundaciones en el mundo.....	21
3.3.2. Inundaciones en México	24
3.3.3. Elaboración de Mapas de riesgo por inundaciones	26
3.3.4. Medidas de control de inundaciones	30
3.4. MODELACIÓN	31
3.4.1. Definición de modelo	32
3.4.2. Importancia de los modelos	32
3.4.3. Clasificación general de los modelos.....	33
3.4.4. Modelo matemático de simulación hidráulica	34
3.4.5. Calibración y validación de modelos.....	36
3.4.6. Límites de aplicación de los modelos	36
3.5. MODELOS UTILIZADOS EN LA PREDICCIÓN DE ÁREAS DE INUNDACIÓN.....	37
3.5.1. AquaDyn.....	37
3.5.2. HSCTM-2D	38
3.5.3. River2D.....	39
3.5.4. TUFLOW	39
3.5.5. WMS.....	40
3.5.6. Iber	40

3.5.7. MIKE-DHI	41
3.5.8. FLO-2D.....	42
3.5.9. HEC-RAS	43
3.6. SELECCIÓN DEL MODELO.....	48
CAPÍTULO 4. OBJETIVOS	53
4.1. OBJETIVO GENERAL	53
4.2. OBJETIVOS PARTICULARES.....	53
CAPÍTULO 5. HIPÓTESIS	54
5.1. HIPÓTESIS GENERAL.....	54
5.2. HIPÓTESIS PARTICULAR	54
CAPÍTULO 6. SUPUESTOS	55
CAPÍTULO 7. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	56
7.1. UBICACIÓN HIDROLÓGICA	56
7.2. FISIOGRAFÍA Y TOPOGRAFÍA.....	58
7.3. GEOLOGÍA	59
7.4. CLIMA	60
7.5. SUELOS.....	62
7.6. USO DE SUELO Y VEGETACIÓN.....	63
7.7. POBLACIÓN	65
CAPÍTULO 8. MATERIALES y MÉTODOS.....	67
8.1. MATERIALES	67
8.2. METODOLOGÍA	72
8.2.1. Elaboración del mapa base	72
8.2.2. Información meteorológica	73
8.2.3. Información hidrológica.....	90
8.2.4. Unidades de análisis.....	102
8.2.5. Precipitación media	105
8.2.6. Estimación del hidrograma	107
8.2.7. Modelación con HEC-GeoRAS.....	118
8.2.8. Modelación con HEC-RAS	128
CAPÍTULO 9. RESULTADOS	149
9.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	149

9.2. CALIBRACIÓN DEL MODELO	157
9.3. VALIDACIÓN DEL MODELO	163
9.4. DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS DE RIESGO A INUNDACIÓN	168
9.4.1. Identificación del peligro por inundaciones	168
9.4.2. Identificación de la vulnerabilidad física ante inundaciones.....	171
9.4.3. Cartografía de Riesgo a Inundación	172
9.5. MEDIDAS DE CONTROL DE INDUCCIONES	177
CAPÍTULO 10. CONCLUSIONES.....	185
CAPÍTULO 11. RECOMENDACIONES	186
CAPÍTULO 12. LITERATURA CONSULTADA.....	187
ANEXOS	200

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes de una cuenca.	6
Figura 2. Huracán Karl después de tocar tierra en el Golfo de México (Imagen de satélite GOES, 17 set. 2010).	14
Figura 3. Programa de control de inundaciones (Arreguín, 2011).	21
Figura 4. Desastres naturales ocurridos en el mundo de 1990 a 2001 (CRED, 2002).	22
Figura 5. Zonas de peligro por inundaciones en la República Mexicana (Zepeda y González, 2001).	24
Figura 6. Si $AG < Ah$ se presenta la inundación.	27
Figura 7. Representación gráfica de un modelo (Vargas, 2010).	32
Figura 8. Representación de un modelo matemático de simulación hidráulica.	35
Figura 9. Caratula del modelo HEC-RAS.	43
Figura 10. Representación de los términos de la ecuación de energía.	45
Figura 11. Ejemplo de la obtención de la energía media.	47
Figura 12. Ubicación Hidrológica de la Cuenca del río La Antigua.	56
Figura 13. Ubicación de la Subcuenca RH28Be.	57
Figura 14. Mosaico de imágenes satelitales Rapideye.	70
Figura 15. Imágenes satelitales de Google Earth Pro.	70
Figura 16. Imágenes satelitales de Google Earth Pro.	73
Figura 17. Precipitación diaria de la estación meteorológica 30140 Rancho Viejo.	77
Figura 18. Precipitación máxima diaria mensual de la estación meteorológica 30140 Rancho Viejo.	83
Figura 19. Precipitación máxima diaria anual del inventario de estaciones meteorológicas.	89
Figura 20. Hidrograma de gastos diarios de la estación 28003 Cardel (1951-2010).	93
Figura 21. Hidrograma de gastos máximos y mínimos diarios mensuales de la estación 28003 Cardel (1951-2010).	95

Figura 22. Hidrograma de gasto máximo diario anual de la estación 28003 Cardel (1951-2010).	98
Figura 23. Sincronización de estaciones en la subcuenca del río La Antigua para el mes de julio de 1999.....	100
Figura 24. Sincronización de estaciones en la subcuenca del río La Antigua para el mes de septiembre de 2010.....	101
Figura 25. URH de afluentes de primer orden.....	102
Figura 26. URH de afluentes de segundo orden.	103
Figura 27. URH IX (Parte baja de la subcuenca).	104
Figura 28. Calculo de la precipitación media utilizando el método de Isoyetas... ..	106
Figura 29. Hidrograma unitario sintético (forma triangular).	108
Figura 30. Hidrogramas unitarios sintéticos correspondiente a las lluvias del huracán Karl en 2010.....	117
Figura 31. Hidrogramas unitarios sintéticos correspondiente a las lluvias extraordinarias del 12 julio 1999.	118
Figura 32. Comando para digitalizar el centro de los cauces.	119
Figura 33. Asignación del código o nombre de identificación.....	120
Figura 34. Comando para agregar la información 3D al centro del cauce.	121
Figura 35. Comando para digitalizar las márgenes de los afluentes.	121
Figura 36. Digitalización del centro y margen de los afluentes.....	122
Figura 37. Establecimiento de la dirección de flujo.	123
Figura 38. Creación de las secciones transversales.	124
Figura 39. Secciones transversales del rio La Antigua y sus afluentes.....	125
Figura 40. Asignación de la información 3D a las secciones transversales.	126
Figura 41. Especificación de las capas necesarias para asignar la información 3D a las secciones transversales.	127
Figura 42. Exportación de la geometría.	128
Figura 43. Comando para importar la geometría en HEC-RAS.....	129
Figura 44. Importación de la geometría en HEC-RAS.....	130
Figura 45. Secciones transversales de la red de drenaje.....	131
Figura 46. Perfiles longitudinales de cada tramo o afluente digitalizado.	131
Figura 47. Conjunto de secciones transversales.....	132

Figura 48. Ejemplo de la sección transversal No. 73005.96 del tramo Xochilapa.	132
Figura 49. Asignación del η de Manning para ambas márgenes o llanuras de inundación.	134
Figura 50. Asignación del η de Manning para el centro del cauce.	135
Figura 51. Comando para asignar el η de Manning.	136
Figura 52. Asignación de los valores de η de Manning.	137
Figura 53. Comando para asignar las distancia entre secciones.	138
Figura 54. Registro de las distancias entre secciones.	139
Figura 55. Ingreso de los hidrogramas unitarios del SCS.	140
Figura 56. Ingreso de los datos del hidrograma unitario del SCS.	141
Figura 57. Definición de las condiciones de frontera.	142
Figura 58. Generación del Plan y definición del régimen de flujo.	143
Figura 59. Cálculos del modelo hidráulico.	143
Figura 60. Visualización de los resultados.	144
Figura 61. Tabla de salida detallada.	145
Figura 62. Tabla de salida con información de perfiles.	146
Figura 63. Trazo de sección transversal.	147
Figura 64. Trazo de perfil.	147
Figura 65. Perspectiva en 3D (X, Y, Z).	148
Figura 66. Geometría de los tramos río La Bomba, Huilapa y La Bomba 2.	150
Figura 67. Nivel del agua (o tirante) para diferentes intervalos entre secciones.	152
Figura 68. Geometría del cauce con secciones a cada 500 m.	153
Figura 69. Sección trasversal variando el coeficiente de rugosidad.	156
Figura 70. Niveles medidos <i>versus</i> simulados (18 de septiembre 2010).	159
Figura 71. Niveles medido en la estación hidrométrica 28003 y simulados por HEC-RAS (18 de septiembre 2010).	160
Figura 72. Niveles medidos <i>versus</i> simulados (13 de julio 1999).	164
Figura 73. Niveles medidos en la estación hidrométrica 28003 y simulados por HEC-RAS (13 de julio 1999).	165
Figura 74. Factor perturbador y peligro en un tramo del río La Antigua.	169

Figura 75. Mapas de Riesgo a Inundación correspondiente al tramo Parte baja
(URH IX) de la RH28Be. 176

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Muertes que han generado las inundaciones en el mundo.	23
Cuadro 2. Eventos que han generado mayores daños por inundación en México.	25
Cuadro 3. Índice de vulnerabilidad según el tipo de vivienda.....	28
Cuadro 4. Índice de vulnerabilidad según el tipo de vivienda.....	28
Cuadro 5. Principales características de los modelos.	49
Cuadro 6. Comparación de modelos.....	51
Cuadro 7. Superficie por categoría de cuenca.	57
Cuadro 8. Tipos de rocas presentes en la subcuenca.	59
Cuadro 9. Descripción de las unidades climatológicas de la subcuenca.	60
Cuadro 10. Unidades edafológicas presentes en la subcuenca.....	62
Cuadro 11. Uso de suelo y vegetación de la subcuenca.....	63
Cuadro 12. Municipios que conforman la subcuenca.....	65
Cuadro 13. Metadatos de las estaciones meteorológicas de la subcuenca.	73
Cuadro 14. Registros de precipitación de la estación meteorológica 30140 Rancho Viejo (1970-2010).	76
Cuadro 15. Precipitación máxima diaria mensual de la estación meteorológica 30140 Rancho Viejo.....	79
Cuadro 16. Precipitación máxima diaria anual de las 24 estaciones meteorológicas.....	85
Cuadro 17. Metadatos de la estación hidrométrica 28003 Cardel.....	90
Cuadro 18. Segmento de la matriz generada con información de gastos diarios de la estación hidrométrica 28003 Cardel (1951-2010).	91
Cuadro 19. Segmento de la matriz generada con información de gastos máximos y mínimos diarios de la estación hidrométrica 28003 Cardel (1951-2010).	94
Cuadro 20. Gasto máximo diario anual de la estación hidrométrica 28003 Cardel (1951-2010).	96
Cuadro 21. Parámetros morfométricos de las URH.	104
Cuadro 22. Precipitación media (mm) asociada al huracán Karl en 2010 y lluvias extraordinarias de julio-1999.....	106

Cuadro 23. Datos para dibujar el HUT con lluvias asociadas a Karl 2010.	111
Cuadro 24. Datos para dibujar el HUT con lluvias del 12 julio 1999.....	111
Cuadro 25. Datos para graficar el hidrograma del SCS con lluvias asociadas a Karl 2010.....	112
Cuadro 26. Datos para graficar el hidrograma del SCS con lluvias del 12 julio 1999.....	114
Cuadro 27. Valores de η Manning.....	135
Cuadro 28. Iconos de visualización.....	144
Cuadro 29. Valores del coeficiente de rugosidad para áreas cultivadas.	154
Cuadro 30. Parámetros de modelación para el análisis de sensibilidad en HEC- RAS.	156
Cuadro 31. Clasificación de los parámetros según el tipo de sensibilidad.	157
Cuadro 32. Niveles medidos y simulados (18 de septiembre 2010).....	157
Cuadro 33. Resultados del análisis de comparación de niveles medidos y simulados por el modelo HEC-RAS (calibración).....	161
Cuadro 34. Niveles medidos vs simulados (13 de julio 1999).	163
Cuadro 35. Resultados del análisis de comparación de niveles medidos y simulados por el modelo HEC-RAS (validación).....	166
Cuadro 36. Localidades para las que representa un peligro el desbordamiento del río La Antigua.....	169
Cuadro 37. Índice de vulnerabilidad según el tipo de vivienda en la Subcuenca RH28Be.	171
Cuadro 38. Localidades de la subcuenca RH28Be bajo algún nivel de riesgo....	173
Cuadro 39. Medidas estructurales propuestas para la Subcuenca del río La Antigua.....	178
Cuadro 40. Organismos involucrados en la ejecución de medidas no estructurales.	180
Cuadro 41. Medidas no estructurales propuestas para la Subcuenca RH28Be..	182

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RIO LA ANTIGUA, VERACRUZ

Hugo Larios Tlali, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2014

RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue aplicar el modelo de simulación hidráulica HEC-RAS para delimitar las zonas con riesgo a inundación en la subcuenca del río La Antigua, Ver., utilizando la metodología del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) que considera la vulnerabilidad y el peligro de un sistema ante la ocurrencia de un fenómeno extremo perturbador. El modelo HEC-RAS usa ecuaciones diferenciales determinísticas que simulan el comportamiento y la dinámica de los niveles de agua en secciones transversales del cauce; su aplicación bajo condiciones de flujo no permanente y régimen mixto, permitió definir las áreas de inundación alcanzadas durante una avenida extraordinaria. Para la simulación hidráulica se construyeron hidrogramas unitarios sintéticos con datos de precipitación registrados durante un evento hidrometeorológico extremo; la geometría del cauce se obtuvo con la extensión HEC-GeoRAS, herramienta que extrajo y procesó información georeferenciada del Modelo Digital de Elevación (MDE) LiDAR tipo terreno; los coeficientes de rugosidad (η de Manning) se estimaron de acuerdo a las características físicas del canal. Mediante un análisis de sensibilidad se calibraron y validaron los resultados obtenidos por el modelo, para ello se empleó información hidrométrica (caudal y niveles) registrada en la estación 28003 Cardel; la aplicación de tres estadísticas de prueba: R^2 , RMSE y DMA, indicaron un alto ajuste entre datos observados versus simulados, respaldando la aplicabilidad del modelo HEC-RAS para simular, predecir y delimitar zonas de riesgo por inundación. Finalmente se propusieron algunas medidas estructurales y no estructurales para el control de inundaciones.

Palabras clave: simulación hidráulica, inundación, hidrograma, fenómenos hidrometeorológicos extremos, calibración, validación, riesgo por inundación.

FLOOD RISK ASSOCIATED WITH EXTRAORDINARY PRECIPITATION EVENTS IN THE SUBBASIN OF THE RIVER LA ANTIGUA, VERACRUZ

Hugo Larios Tlali, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2014

ABSTRACT

The aim of this study was to apply the hydraulic simulation model HEC-RAS to delineate flood hazard areas in the subbasin of the river La Antigua, Veracruz, using the methodology of the National Center for Disaster Prevention (CENAPRED) which considers the vulnerability and danger of system upon the occurrence of an extreme event disturbing. The HEC-RAS model used to simulate the behavior and dynamics of water levels in the channel cross sections deterministic differential equations; application under conditions of unsteady flow and mixed regime, allowed defining floodplains reached during an extraordinary avenue. For hydraulic simulation Synthetic unit hydrographs were constructed using data recorded during a hydrometeorological extreme precipitation event; channel geometry was obtained with HEC-GeoRAS, extension tool extracted and processed georeferenced information of Digital Elevation Model (DEM) LiDAR terrain type; roughness coefficients (Manning η) were estimated according to the physical characteristics of the channel. Through a sensitivity analysis was calibrated and validated the results obtained by the model for this hydrometric information (flow and level) recorded at station 28003 Cardel was used; the application of three test statistics: R^2 , RMSE and DMA, indicated a high fit between simulated versus observed data, supporting the applicability of the model HEC-RAS to simulate, predict and define flood risk areas. Finally some structural and non-structural measures for flood control were proposed.

Keywords: hydraulic simulation, flood hydrograph, extreme weather phenomena, calibration, validation, flood risk.



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Dada su ubicación geográfica, México es un país vulnerable a la ocurrencia de diversos fenómenos hidrometeorológicos, principalmente al impacto de ciclones tropicales. Los riesgos de estos eventos son diferentes en tierra firme que en superficie marina; sobre los océanos, la amenaza principal es para la industria pesquera e instalaciones petroleras; en tierra, el riesgo es para la población, su infraestructura y cualquier actividad antropogénica que se encuentre bajo la trayectoria de éstos fenómenos.

Un efecto de los ciclones tropicales en cualquiera de sus etapas, son las inundaciones originadas por las lluvias torrenciales; sin embargo, no es el único factor que determina la magnitud de estas catástrofes, también interfiere la distribución espacial de la lluvia, la morfometría de los cauces, la infraestructura hidráulica, la topografía, el relieve, la cobertura vegetal, el uso de suelo y las unidades edafológicas, entre otras.

Según reportes del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) (2012) en México, del 2000 a 2010, se registraron 1,353 muertes ocasionadas por diversos fenómenos hidrometeorológicos y daños estimados en 227,516 millones de pesos (mdp).

Para el estado de Veracruz se estima una superficie inundable de 6,275 km² (8% del territorio estatal), que incluye a 2,189 localidades de 118 municipios, en los que habitan 1, 252,251 personas. En resumen, uno de cada seis veracruzanos se ve afectado por las inundaciones (GEV, 2011).

Para prevenir, atender y mitigar los daños ocasionados por una inundación, es necesario implementar acciones, planes y programas que emanen de un estudio integral de la cuenca en particular, combinado el uso de Sistemas de Información



Geográfica (SIG), trabajo de campo, recopilación de datos, análisis de información y la aplicación de modelos de simulación hidráulica e hidrológica.

Un modelo es una representación simplificada de un sistema real y complejo llamado prototipo. Actualmente existen varios modelos que simulan los procesos hidrodinámicos de una cuenca que permiten entender la relación *causa-efecto* sin modificar el sistema real.

En el presente trabajo se utilizó el modelo matemático de simulación hidráulica Hydrologic Engineering Centers River Analysis System (HEC-RAS) Versión 4.1, es un software gratuito desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos (US Army Corps of Engineering) que pronostica las cotas de inundación sobre secciones transversales de un cauce.

Mediante el uso del HEC-RAS se delimitaron las zonas con riesgo por inundación en la subcuenca del río La Antigua, Ver., empleado la metodología del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) que considera la vulnerabilidad y peligro de un sistema ante la ocurrencia de un fenómeno extremo perturbador.

Mediante un análisis de sensibilidad se calibraron y validaron los resultados obtenidos por el modelo, para ello se empleó información hidrométrica (caudal y niveles) registrada en la estación 28003 Cardel; la aplicación de tres estadísticas de prueba: R^2 , RMSE y DMA, indicaron un alto ajuste entre datos observados versus simulados, respaldando la aplicabilidad del modelo HEC-RAS para simular, predecir y delimitar zonas de riesgo a inundación.



CAPÍTULO 2. JUSTIFICACIÓN

Los desastres naturales son uno de los problemas inherentes al desarrollo de las civilizaciones, mismos que la humanidad jamás resolverá, pero si podrá atenuar.

Se estima que 60% del territorio mexicano sufre el impacto de diversos fenómenos hidrometeorológicos, esto se debe a la ubicación geográfica y características fisiográficas de nuestro país. En México, los ciclones tropicales son los fenómenos que generan mayores pérdidas económicas y daños a la población, seguido de las sequias, heladas y granizadas.

En el estado de Veracruz, las características del relieve, la ubicación geográfica, el clima y el incremento de asentamientos humanos en zonas de alto riesgo, hacen de él un estado vulnerable a fenómenos hidrometeorológicos, tan solo su precipitación media anual es de 1,484 mm, superior en 52% a la media nacional que es de 772 mm; asimismo es la entidad federativa que concentra el mayor volumen de agua superficial, sus ríos descargan al mar más de 30% del caudal de todos los ríos del país. Veracruz es el estado que registra mayor ocurrencia de inundaciones anuales (3.5), cerca del 73% de su territorio yace por debajo de los 200 metros sobre el nivel de mar (msnm), su superficie inundable es de casi 6 mil km² (GEV, 2011).

En los últimos años los fenómenos hidrometeorológicos han afectado severamente al estado de Veracruz, por nombrar algunos: los daños ocasionados por los remanentes del huracán Roxanne en octubre de 1995; la combinación del frente frío No. 5 y la depresión tropical No. 11 en octubre de 1999; el impacto de cuatro ciclones tropicales en 2005, los huracanes Dean y Félix en 2007, Karl y Matthew en 2010, e Ingrid en 2013.



En 1999 los daños fueron significativos, más de 300 personas murieron y más de 200 mil sufrieron alguna afectación. En las inundaciones del 2005 se estimaron daños por 4 mil mdp, en 2008 se calcularon pérdidas materiales cercanas a los 900 mdp y en 2010 hubo un gasto superior a los 50 mil mdp por los daños que originaron las inundaciones en el estado.

Una de las medidas no estructurales para disminuir el riesgo por inundación, es la delimitación de las zonas propensas a estas catástrofes. El objetivo del presente trabajo fue aplicar el modelo de simulación hidráulica HEC-RAS para delimitar estas zonas en la subcuenca del río La Antigua, Ver.



CAPÍTULO 3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. CUENCA HIDROGRÁFICA

En este capítulo se exponen las definiciones de varios autores en relación a una cuenca hidrográfica; además se plantean los objetivos que deben cumplirse durante su manejo, y las consecuencias de prácticas o actividades que han degradado los recursos naturales con los que cuenta.

Finalmente se hace una reseña sobre el manejo de cuencas hidrográficas en México, sus orígenes y el estado que guarda actualmente el tema en el país.

3.1.1. Definición de cuenca hidrográfica

El concepto de cuenca hidrográfica posee connotaciones amplias que dependen de los objetivos programados, estos intereses determinan su definición, caracterización, y por consiguiente su planificación y manejo (García, 2002).

Brooks *et al.* (2013) señalan que una cuenca es un área delimitada topográficamente, la cual es drenada por un sistema de corrientes.

Georgia Adopt-A Stream (2003) menciona que una cuenca es el terreno donde el agua, sedimentos y materiales disueltos, drenan a un punto en común a lo largo de un río, humedal o lago. Sus márgenes están marcadas por los puntos más altos del terreno alrededor del cuerpo de agua, comúnmente llamado parteaguas.

Los componentes principales que determinan el funcionamiento de una cuenca son los elementos naturales y los de generación antrópica, que en conjunto forman parte de un sistema más complejo llamado medio ambiente. La cuenca se puede considerar como un sistema compuesto por las interacciones de los subsistemas biofísico, económico, social y cultural. En este sistema abierto existen

influencias y dependencias “entre” y “hacia” los elementos de los subsistemas, García (2002) esquematiza estas relaciones en la Figura 1.

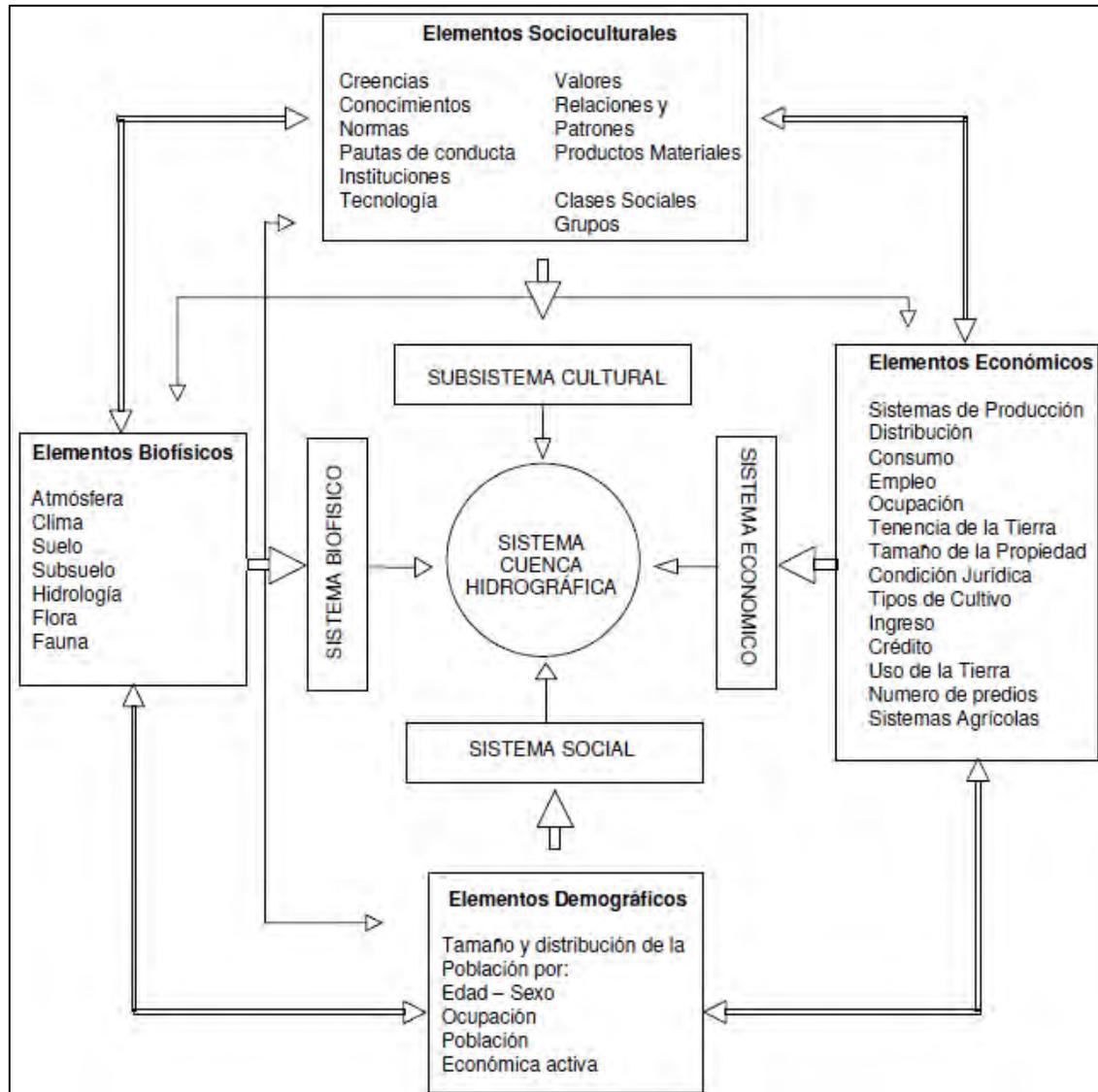


Figura 1. Componentes de una cuenca.

3.1.2. Manejo de cuencas

En el caso de una cuenca, se debe entender como el manejo de todo o parte de lo que está dentro de ella, para obtener un beneficio general previamente identificado (González, 2004).



Aguirre (2005) define al manejo de cuencas como la aplicación de principios y métodos para el uso racional, integrado y participativo de sus recursos naturales, fundamentalmente el agua, suelo y vegetación, a fin de lograr una producción óptima y sostenida de estos recursos con el mínimo deterioro ambiental para beneficio de los pobladores y usuarios de la cuenca. Los principios y métodos empleados su manejo se basan en ciencias como la hidrología, la geología, edafología, la agricultura, la forestaría, la meteorología, la ecología, la geografía, la sociología, la antropología, la administración, la economía y la informática, entre las principales.

González (2004) considera que además de las disciplinas anteriores, se deben utilizar técnicas modernas y eficientes de computación como la percepción remota, base de datos, modelos matemáticos específicos (software), SIG, entre otros.

El manejo de cuencas es una tarea propia de un equipo multi e interdisciplinario, donde la organización y disciplina de trabajo es indispensable para lograr un objetivo previamente establecido. Es un proceso flexible, dinámico y adaptativo, que puede esquematizarse en diferentes etapas a fin de proveer un marco para organizar la información, ejercer la toma de decisiones y evaluar el proceso (Davenport, 2003).

Brown *et al.* (2000) reconocen cuatro etapas básicas en el manejo de cuencas:

- I. Elaboración de diagnóstico
- II. Definición de prioridades y acciones estratégicas
- III. Instrumentación de acciones
- IV. Evaluación y retroalimentación

Por otro lado, la División de Recursos Naturales y Energía (DRNE) (1994) reconoce tres etapas indispensables para el manejo de cuencas:

- I. Etapa previa o de estudios y formulación de planes y proyectos



- II. Etapa intermedia o de inversión para la habilitación de la cuenca con el objetivo del aprovechamiento y manejo de sus recursos
- III. Etapa permanente o de operación y mantenimiento de las obras construidas y de manejo de los recursos de la cuenca.

En resumen, el manejo de una cuencas tiene como objetivo la conservación y restauración de sus recursos naturales (principalmente el recurso hídrico), la reconversión productiva hacia formas de aprovechamiento más eficientes de sus recursos y el control de externalidades negativas que impactan la funcionalidad y equilibrio ecológico de la cuenca.

3.1.3. Consecuencias de un mal manejo

Como sistema natural, la cuenca es un conjunto de subsistemas formados por diversos elementos y ciclos de energía, del cual el hombre es parte fundamental (García, 2002). Desafortunadamente, el establecimiento de una población en una cuenca transforma el sistema natural, reduce la composición de poblaciones, altera la regularidad de los ciclos de energía y causa el desequilibrio dinámico del sistema natural.

En la cuenca ocurren procesos que relaciona a los sistemas sociales y económicos con el sistema natural (o biofísico), en la mayoría de las ocasiones estas relaciones se vuelven conflictivas y crean graves desequilibrios que vulneran la estabilidad de la cuenca (Arias y Duque, 1992).

Las acciones del hombre sobre el sistema natural de una cuenca originan impactos difíciles de cuantificar y caracterizar. Los seres humanos modifican el sistema natural a través de la tecnología y la organización que el grupo social adopta, Bifani (1999) clasifica estos impactos en tres grupos:



- I. Ventajas o beneficios económicos obtenidos por la explotación de la productividad biológica del sistema natural. Se da cuando un elemento constitutivo de un ecosistema es retirado del mismo; por ejemplo, especies forestales, animales, o ciertos cultivos agrícolas. En la medida que estas sustracciones no regresan al ecosistema o no son sustituidas por otras para restablecer el ciclo biogeoquímico, la estructura y el funcionamiento del sistema natural se verán afectados, ello conduce a procesos de desertización, deforestación, degradación, etc.
- II. Incorporación al ecosistema de cantidades mayores de ciertos elementos, un proceso contrario al anterior, por ejemplo, la descarga de residuos en forma de contaminantes y desechos, adición de fertilizantes, etc., someten al sistema natural a una fuerte presión para continuar su funcionamiento normal.
- III. Descarga en un ecosistema de un elemento nuevo o completamente ajeno. El sistema reacciona, ya sea tratando de asimilarlo, degradarlo o simplemente rechazarlo, lo cual se traduce en presiones que pueden ser relativamente fuertes sobre el funcionamiento normal del sistema natural.

La superación de los efectos negativos por estos impactos depende del grado de homeostasis y resiliencia del sistema. El manejo adecuado de los recursos naturales de una cuenca aumentaría los rendimientos en las actividades productivas para el consumo de la población y permitirá que generaciones futuras dispongan de estos bienes.

3.1.4. Manejo de cuencas en México

Históricamente las civilizaciones en México y el mundo se han establecido, prosperado y decaído alrededor de los cuerpos de agua (ríos y lagos), elementos esenciales de una cuenca.



En México, la primera delimitación de cuencas fue establecida por Antonio García Cubas durante los años previos a la Revolución (Cotler, 2010). Pero fue hasta 1926, con la creación de la Comisión Nacional de Irrigación, que se estableció la organización e infraestructura básica para la ejecución de proyectos de desarrollo económico y territorial en México, concibiendo a las cuencas como el contexto ideal para la planeación y gestión de los recursos naturales; aunque en esta época solo se impulsó la construcción de infraestructura hidráulica que permitiera el aprovechamiento de los cuerpos de agua para aumentar la producción en áreas agrícolas de temporal.

En 1946 se crearon las “Comisiones de Cuenca” para los principales ríos del país, su objetivo era planear, diseñar y construir infraestructura que permitiera el desarrollo integral de las cuencas, estas comisiones fueron organismos descentralizados de la Secretaría de Recursos Hidráulicos copiadas del esquema TAV (Tennessee Authority Valley) de E.U.A., pero en México su propósito era aprovechar los recursos hídricos.

No fue sino hasta 1975 que la SARH realizó los primeros trabajos enfocados al manejo de cuencas. Los proyectos se ejecutaron en las cuencas de los ríos Papaloapan, Grijalva y Tepalcatepec, donde se establecieron programas de reforestación y conservación de suelo y agua, pero desafortunadamente no existía una planeación del uso de estos recursos, mucho menos una participación activa y permanente de la población, por lo que en 1988, con la creación de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), se estableció en su Artículo 157 la *“participación de la sociedad en la planeación, ejecución, evaluación y vigilancia de la política ambiental y de recursos naturales”*.

A finales de la década de 1980, muchos de los rezagos del sector hidráulico se habían acentuado, cerca de dos terceras partes del país no tenían servicio de



agua potable, las acciones de mantenimiento y modernización de infraestructura hidráulica eran prácticamente inexistentes, no había una administración ni gestión eficiente del agua. Castelán (2000) cita un diagnóstico elaborado en 1989 donde se exhibieron cuatro problemas fundamentales en las cuencas del país:

- a) escasez de agua
- b) alta ineficiencia en el uso del agua
- c) fuertes niveles de contaminación
- d) fuerte degradación ambiental

Para revertir esta problemática, el 1 de abril de 1989 el gobierno federal y los gobiernos estatales firmaron un acuerdo donde se comprometieron a:

- a) establecer nuevas reglas para la distribución del agua
- b) mejorar la calidad del agua en los cuerpos receptores
- c) incrementar el uso eficiente del agua
- d) conservar los recursos de la cuenca

En ese mismo año se crea la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), como el organismo descentralizado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) “*responsable de administrar las aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes (Artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos)*”.

En 1992 se crea la Ley de Aguas Nacionales (LAN), con su última reforma en el año 2004, donde se considera la cuenca hidrográfica como la unidad básica de administración del agua.

3.2. FENÓMENOS HIDROMETEOROLÓGICOS

Se refiere al fenómeno formado por un conjunto de partículas acuosas, líquidas o sólidas que caen a través de la atmósfera. Las partículas acuosas pueden estar en



suspensión, ser remontadas por el viento desde la superficie terrestre o ser depositadas sobre objetos situados en la atmósfera libre (UNAM, 2009).

Dada su ubicación geográfica, México es un país vulnerable a la ocurrencia de diversos fenómenos hidrometeorológicos, principalmente a la formación de ciclones tropicales. La pobreza en la mayoría de las comunidades, su ubicación en zonas de alto riesgo y el deterioro ambiental, son factores que potencializa su vulnerabilidad y complica su recuperación ante estos siniestros.

Las investigaciones de Xantomila (2013) indican que en los últimos 12 años el impacto de los fenómenos hidrometeorológicos sobre el estado mexicano (principalmente huracanes y las subsecuentes inundaciones) ha tenido un costo anual de 2 mil millones de dólares. Los mayores montos fueron a consecuencia de los huracanes Karl y Matthew en Veracruz (en 2010), seguido de las inundaciones en Tabasco en 2007 y el ciclón Stan en Chiapas en 2005. Los recursos destinados del 2009 al 2012 por el Fondo de Desastres Naturales (FONDEN) ascendieron a 1,445.7 mdp.

3.2.1. Descripción del fenómeno hidrometeorológico Karl

El huracán Karl de categoría III, ha sido uno de los huracanes más fuertes que haya impactado las costas del Golfo de México en los últimos 30 años, en ello radica la importancia de estudiar este fenómeno hidrometeorológico.

Según los registros de CONAGUA (2010) Karl fue el cuarto ciclón que impactó territorio mexicano; el meteoro se formó el 14 de septiembre 2010 a 365 km al Este de Puerto Bravo, Quintana Roo.

De acuerdo al reporte de Quiroga (2010), el día 15 alrededor de las 7:00 hr, Karl tocó tierra 15 km al Suroeste de Puerto Bravo, con vientos máximos sostenidos de 100 km/hr y rachas de 120 km/hr.



Para el día 16, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (2010a) reportó en su boletín no. 517, que el ciclón se encontraba nuevamente en el mar, pero ahora en el Golfo de México a 75 km en dirección Oeste-Suroeste de Campeche, Cam., donde adquirió la categoría de huracán I (según escala Saffir-Simpson) con vientos máximos sostenidos de 120 km/hr y rachas de 150 km/hr. Ese mismo día, alrededor de las 22:00 hr. aumentó a categoría II con vientos máximos sostenidos de 155 km/hr y rachas de 195 km/hr.

El 17 de septiembre Karl alcanzó la categoría III, con vientos máximos sostenidos de 195 km/hr y rachas de 240 km/hr. A las 11:30 hr el ojo del huracán tocó tierra en la población de Playa Chachalacas (DGCS, 2010), mientras que las bandas externas del ciclón afectaban los estados de Tlaxcala, México, Morelos, Puebla, Oaxaca, Chiapas, Tabasco y el Distrito Federal, (Figura 2).

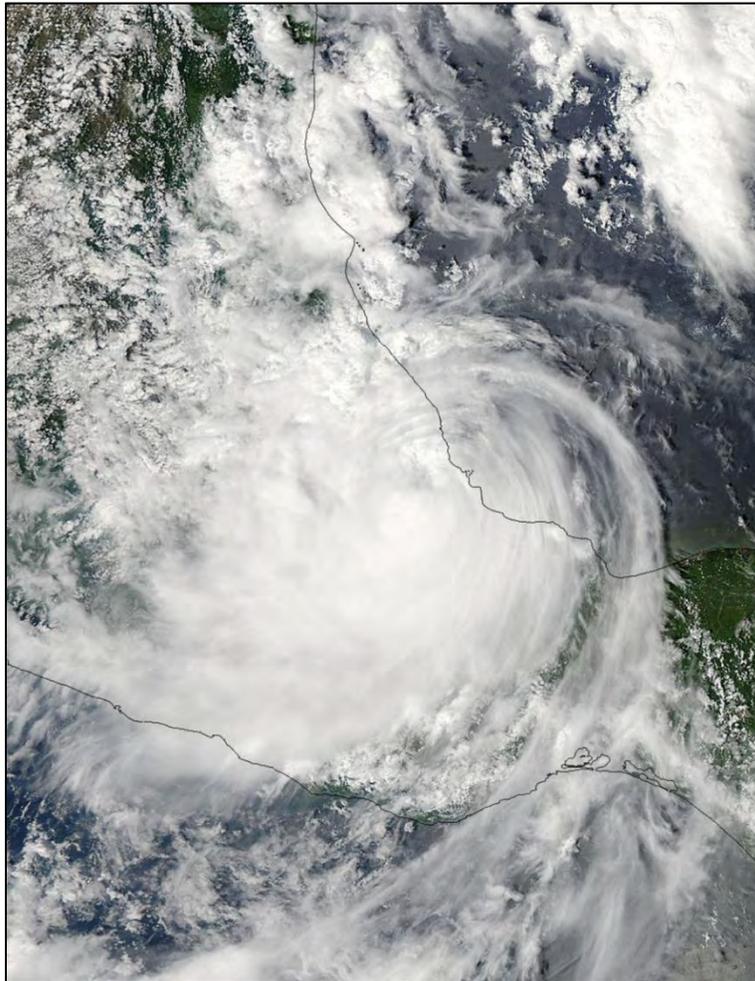


Figura 2. Huracán Karl después de tocar tierra en el Golfo de México (Imagen de satélite GOES, 17 set. 2010).

Ese mismo día, el SMN (2010b) reportó en su boletín no. 519, que el ciclón perdía fuerza al avanzar sobre tierra firme, por lo que cinco horas después de impactarse en Chachalacas redujo su categoría a nivel I.

Cuando el centro del meteoro se ubicaba aproximadamente a 115 km al Este de Puebla, Pue., se degradó a tormenta tropical. Para las 22:00 hr sobre la Sierra Madre se convirtió en depresión tropical.

Finalmente, a las 4:00 hr del 18 de sep., la depresión tropical Karl se ubicó por última vez a 95 km al Sur-Sureste de la Ciudad de Puebla, Pue., con vientos



máximos sostenidos de 35 km/hr y rachas de 45 km/hr. Las reseñas de Hernández *et al.* (2010) señalan que el ciclón desarrolló su trayectoria en 84 hr, recorriendo 1,470 km a una velocidad promedio de 17 km/hr.

3.2.1.1. Evaluación al impacto humano

Se ha mencionado que Karl impactó en dos ocasiones al territorio mexicano, en la primera ocasión el estado más perjudicado fue Campeche. Posteriormente, previo al impacto de Karl en Veracruz (cuando ya era un huracán de categoría III) se aplicaron los planes DN-III-E y Marina. El meteoro dañó 143 municipios (91 con afectaciones graves, 30 de impacto medio y 22 de impacto bajo), de los cuales sólo 92 se incluyeron en la Declaratoria de Desastre Natural que emitió la Secretaría de Gobernación (SEGOB) el 29 de septiembre 2010. Los municipios más afectados fueron San Rafael, Ursulo Galván, Martínez de la Torre, Nautla, Actopan, Misantla, Boca del Río, Veracruz, Cardel, Cotaxtla y La Antigua.

A su paso por esta entidad, el huracán cubrió un área que va desde la Sierra de los Tuxtlas (en el Sur) hasta el municipio de Tamiahua (en el Norte). La Dirección de Protección Civil y el Gobierno del Estado activaron 33 refugios temporales, en cada uno de ellos se atendió alrededor de siete mil personas.

En un comunicado de prensa divulgado por Terra (2010), Protección Civil informó el deceso de 14 personas, daños a 144 mil viviendas, afectaciones en 227 centros escolares, 144 tramos carreteros y 97 puentes, además del desbordamiento de 73 cuerpos de agua y 105 deslaves. Los reportes de Armenta *et al.* (2011) mencionan que el huracán dejó un saldo aproximado de 500,000 damnificados. El daño económico de Karl se estimó en 70 mil millones de pesos (mdp).

3.2.1.2. Estimación de impactos (daños y pérdidas) y acciones de respuesta

En los siguientes párrafos se citan los impactos a nivel sectorial originados por Karl, así como aquellas acciones de respuesta y montos estimados para mitigar



sus afectaciones. La información fue obtenida del estudio realizado por el CENAPRED (2012) en referencia a los principales desastres ocurridos en México durante 2010.

El sector salud reportó 10 inmuebles afectados, el monto de los daños se estimó en 5.2 mdp. Como medida provisional se dispuso de 53 Caravanas de Salud integradas por mil 500 personas que recorrieron los municipios afectados por Karl.

De acuerdo con los datos de la Secretaria de Educación del estado de Veracruz, las afectaciones al sector educativo se estimaron en 16.5 mdp. Esta misma cantidad fue invertida en acciones de: limpieza del sitio, revisión y reinstalaciones eléctricas, pintura, sustitución de mallas o bardas perimetrales, rehabilitación de servicios sanitarios y reposición de techos. En lo que respecta al Calendario Escolar 2010-2011, no se retrasó el periodo vacacional decembrino.

Por otro lado, la CONAGUA estimó las afectaciones al Sector Hidráulico en 2,200 mdp. El Gobierno Federal (a través del FONDEN) destinó 120 mdp para reinvertirse en infraestructura hidráulica (Galmiche, 2010), únicamente se recuperó 5.4% de los daños totales.

En infraestructura carretera federal se realizaron 66 acciones de mantenimiento y rehabilitación, para llevar a cabo dichas acciones se invirtieron 433.5 mdp. En vialidades urbanas la estimación del impacto por Karl fue de 376.6 mdp. Así mismo, en infraestructura ferroviaria se reportaron daños a la Línea Veracruz-Tierra Blanca y Santa Fe-Veracruz. Durante el evento la autopista Córdoba-Veracruz funcionó únicamente con tres carriles, mientras que el paso por la carretera 180 se suspendió por completo. El puerto y aeropuerto de Veracruz también suspendieron actividades.



Previo al paso del huracán, como medida de seguridad se detuvieron los generadores de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde. En total fueron siete las zonas de la División de Distribución de Oriente de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) que registraron algún tipo de afectaciones. Datos de esta comisión revelan que el monto utilizado para reparar los daños en infraestructura eléctrica asedió a 187.1 mdp.

El Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) reportó que en el estado de Veracruz se perdió casi 100% de las cosechas en cultivos como la papaya y el maíz, lo que en términos monetarios representó más de 100 mdp. En el sector acuícola, el huracán generó pérdidas de 40% en la producción (Valdez y Arreola, 2011), y en el sector pecuario, murieron más de 1,200 cabezas de ganado bovino, 11 mil cerdos y 20 mil aves.

La Secretaria de Hacienda y Crédito Público (SHCP) otorgó beneficios fiscales a los contribuyentes (personas físicas y morales) de los municipios afectados, eximió el pago de los Impuestos Sobre la Renta (ISR), Empresarial a Tasa Única (IETU) e Impuesto al Valor Agregado (IVA) correspondientes al segundo semestre de 2010. La Secretaria de Economía (SE) entregó apoyos de 15 mil pesos no reembolsables a pequeñas empresas y créditos de 150 mil hasta 2 mdp para empresas que requirieron mayor financiamiento.

Finalmente, para mitigar los impactos ambientales negativos de Karl se requirieron 160.2 mdp, los cuales fueron invertidos principalmente en acciones de reforestación, protección y restauración de ríos, establecimiento de barreras hidroreguladoras, entre otras.

3.3. INUNDACIONES

El agua es uno de los recursos naturales más valiosos para cualquier sociedad o cultura, esto se debe a los beneficios sociales y económicos que derivan de su



aprovechamiento, sin embargo, junto con las ventajas también existen algunos inconvenientes como el exceso de agua que producen las inundaciones.

En la antigüedad las inundaciones aportaban grandes beneficios económicos y sociales al representar un mecanismo natural de fertilización y aumento de la humedad que beneficiaba áreas agrícolas (Cuevas y Navarrete, 2006).

Hoy en día no se mencionan estos aspectos benéficos, es más frecuente que se perciban como catástrofes por los daños que causan, en ocasiones irreversibles. Pocklington (1989) considera que las afectaciones van en aumento por la urbanización de zonas naturalmente inundables como las áreas cercanas a ríos y arroyos.

Previo a la descripción de estas catástrofes, es necesario diferenciar el concepto de “avenida o crecida de un río” y el concepto de “inundación”. El primero se refiere a un fenómeno ligado a condiciones naturales determinadas en gran medida por el régimen de precipitaciones en una cuenca. El segundo es un proceso que tiene mucha más relación con intervenciones humanas que está determinada por la capacidad hidráulica y características morfométricas de los cauces (González, 2008).

Por otro lado, Cruz (2009) define una inundación como la ocupación de agua en un momento y en un lugar determinado donde su presencia y cantidad no son habituales. La OMM (1974) establece en el Glosario Internacional de Hidrología que una inundación es: “*el aumento del agua por arriba del nivel normal del cauce*”, definido el nivel normal como “*la elevación que alcanza el agua en su cauce definido*”. Salas y Jiménez (2004) definen una inundación como “*el evento en que debido a la precipitación, oleaje, marea de tormenta, o falla de alguna estructura hidráulica resulta en un incremento del nivel de la superficie libre del agua de los ríos o del mar, la cual penetra hacia sitios donde usualmente no la*



hay, generando daños en la población, la agricultura, la ganadería e infraestructura”.

La magnitud de las inundaciones están en función de la distribución espacial y temporal, del tamaño de las cuencas hidrológicas en que tienen lugar, de las características del suelo, la infiltración, y el drenaje natural o artificial de las cuencas (Rodríguez, 2013).

Según Oropeza *et al.* (2007) las inundaciones se clasifican por su origen y el impacto o daños que causan:

- a) Origen: pluviales, fluviales, lacustres, costeras, urbanas y por las fallas de la infraestructura hidráulica
- b) Por precipitaciones *in situ*; por avenidas o desbordamientos de los ríos, lagos o marismas; por rotura u operación incorrecta de obras de infraestructura hidráulica
- c) Tiempo de respuesta hidrológica de una cuenca: lentas, rápidas o súbitas
- d) Tiempo de ocurrencia: frecuentes, ocasionales, excepcionales
- e) Tiempo de advertencia: según su etapa (anticipadas: alarma o alerta; rescate o ayuda: rehabilitación y/o reconstrucción)
- f) Factores que provocan las inundaciones. Factores naturales como la ocurrencia de lluvias intensas prolongadas como sucede durante las tormentas tropicales y el paso de huracanes. Factores antropicos como la falla de la infraestructura hidráulica
- g) Impacto de las inundaciones: Inundaciones ordinarias, extraordinarias y catastróficas
- h) Daños, consecuencias o efectos: Primarios, secundarios, terciarios; directos e indirectos, tangibles e intangibles

Los daños de las inundaciones se evalúan con base al grado de vulnerabilidad, que depende fundamentalmente de tres factores:



- a) Físicos. Definido por la ubicación, aspecto social, referidos al nivel de bienestar y marginación de la población,
- b) Económicos. Depende de la reserva monetaria, deudas, acceso al crédito y seguros
- c) Aspectos ecológicos. Protección de la reserva ecológica y la biodiversidad

Para anticipar, hacer frente, resistir y recuperarse de una inundación se requiere un manejo adecuado de los tres factores anteriormente enlistados. Arreguín (2011) propone una metodología que considera diversos elementos del sistema social, económico, cultural, político, legal, ambiental y técnico, que deben incluirse en un Programa de Control de Inundaciones (Figura 3). Sin embargo, Rodríguez (2013) considera que es imposible establecer una metodología de acción única contra las inundaciones, que asegure la protección integral a la población y dé respuesta a todas las circunstancias generadas en cualquier tiempo y espacio.

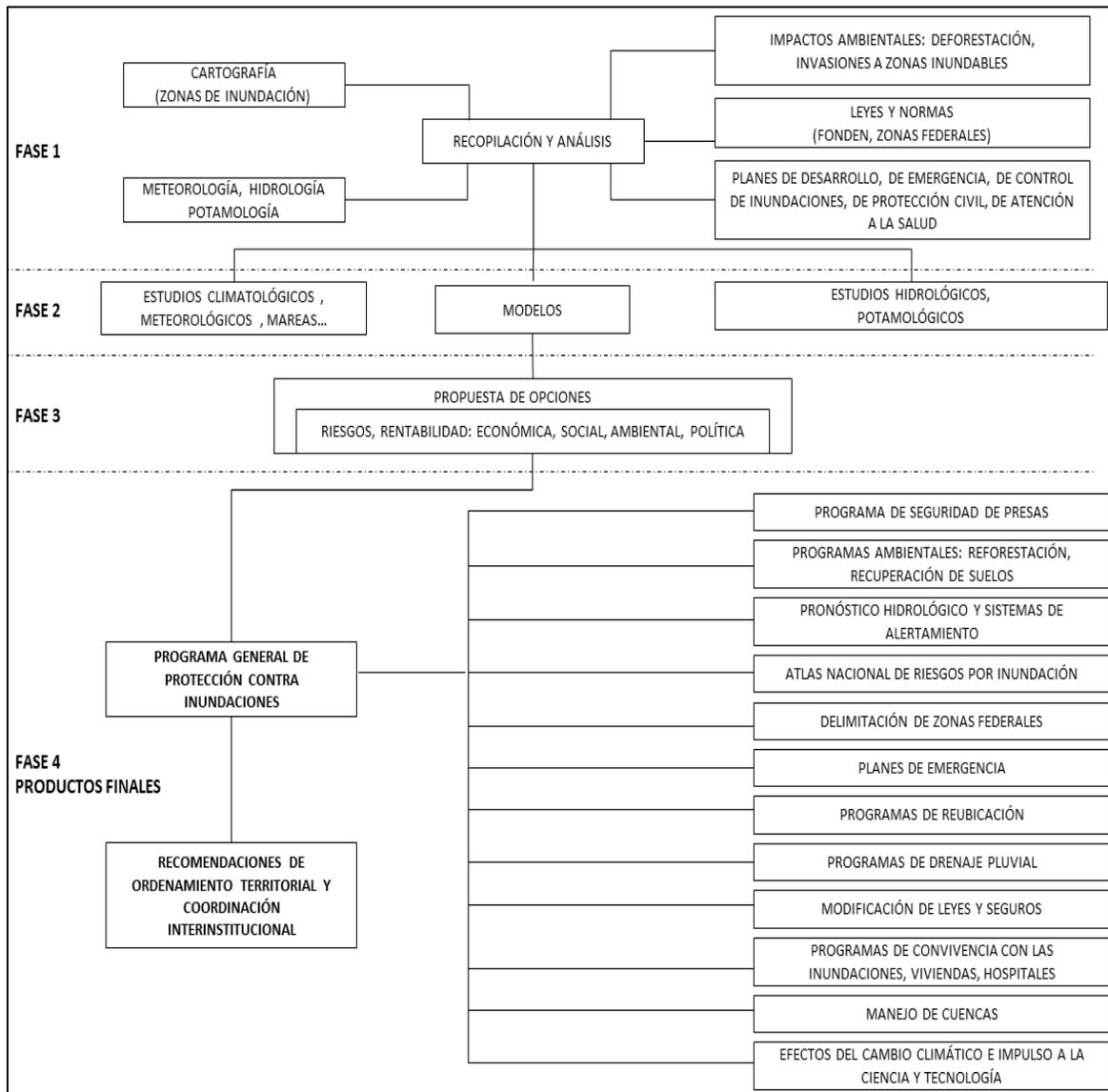


Figura 3. Programa de control de inundaciones (Arreguín, 2011).

3.3.1. Inundaciones en el mundo

A nivel mundial las inundaciones aumentan su frecuencia más que algún otro desastre. Salas y Jiménez (2004) señalan que la Cruz Roja Internacional ha colaborado durante el periodo 1919-2004 mayormente en eventos de inundación que en cualquier otro tipo de evento catastrófico.

Más de 2,200 desastres de origen natural relacionados con el agua ocurrieron en el mundo entre 1990 y 2001, En la Figura 4 se observa que la mitad de ellos fueron inundaciones.

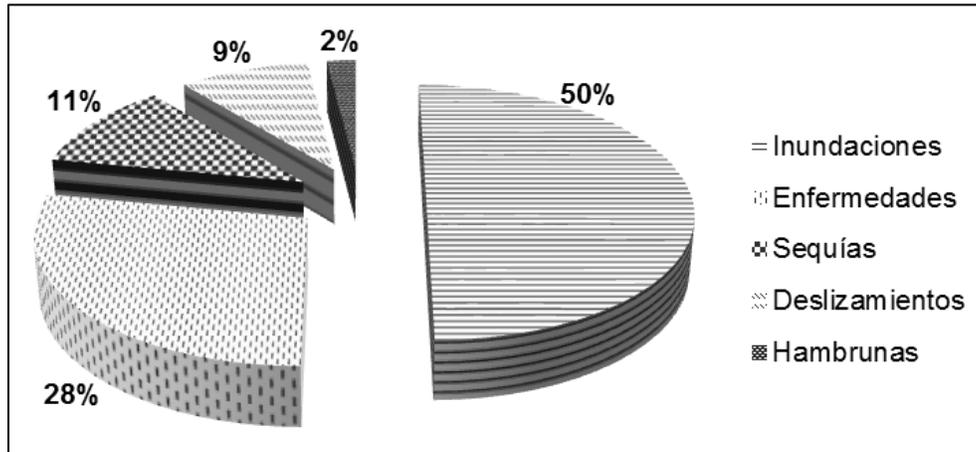


Figura 4. Desastres naturales ocurridos en el mundo de 1990 a 2001 (CRED, 2002).

Según datos del Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) (2002), el continente más afectado por la ocurrencia de inundaciones es Asia, donde 35% de estos eventos han sucedido entre los años 1990 y 2001, seguido de África con 29%, América 20%, Europa 13% y Oceanía con 3%.

A pesar de los avances en el conocimiento de las inundaciones y la aplicación de políticas para reducirlas, los daños siguen en aumento (Rodríguez, 2013). Las afectaciones causadas por estas catástrofes son el resultado de combinar la fuerza del agua y la concentración de comunidades cercanas a cuerpos de agua. En el Cuadro 1 se enlistan algunas de las inundaciones más importantes ocurridas en diferentes países, la mayoría de ellas asociadas a fenómenos hidrometeorológicos.



Cuadro 1. Muertes que han generado las inundaciones en el mundo.

Año	País	Muertes
2000	India	2,782
2002	China	1,532
	Rusia	104
	Bolivia	69
2004	China	1,000
2005	México y EUA	1,193
	India	1,524
2007	India, Nepal y Bangladesh	2,500
	México	53
2008	Myanmar	146,000
	Haití	425
2009	Turquía	37
	El Salvador	198
	Filipinas	540
2010	Pakistán	1,985
	Brasil	308
	Guatemala	220
	China	3,185
	Vietnam e Indonesia	287
	Tailandia	283
	Nigeria	118
	India	174
	México	43
	Colombia	79
2011	Tailandia	700
2012	Rusia	170
2013	Vietnam	41
	India	22
	México	145
	Filipinas	1,000

† Datos obtenidos de: *Diario ABC, 2012*

3.3.2. Inundaciones en México

En México se presentan en promedio 4 ciclones al año (PNPC, 2001) que generan lluvias intensas y constantes inundaciones. En la Figura 5 se aprecian las zonas de peligro a inundación. Prácticamente todos los años ocurren estas catástrofes originadas principalmente del desbordamiento de ríos y fallas en la infraestructura hidráulica.

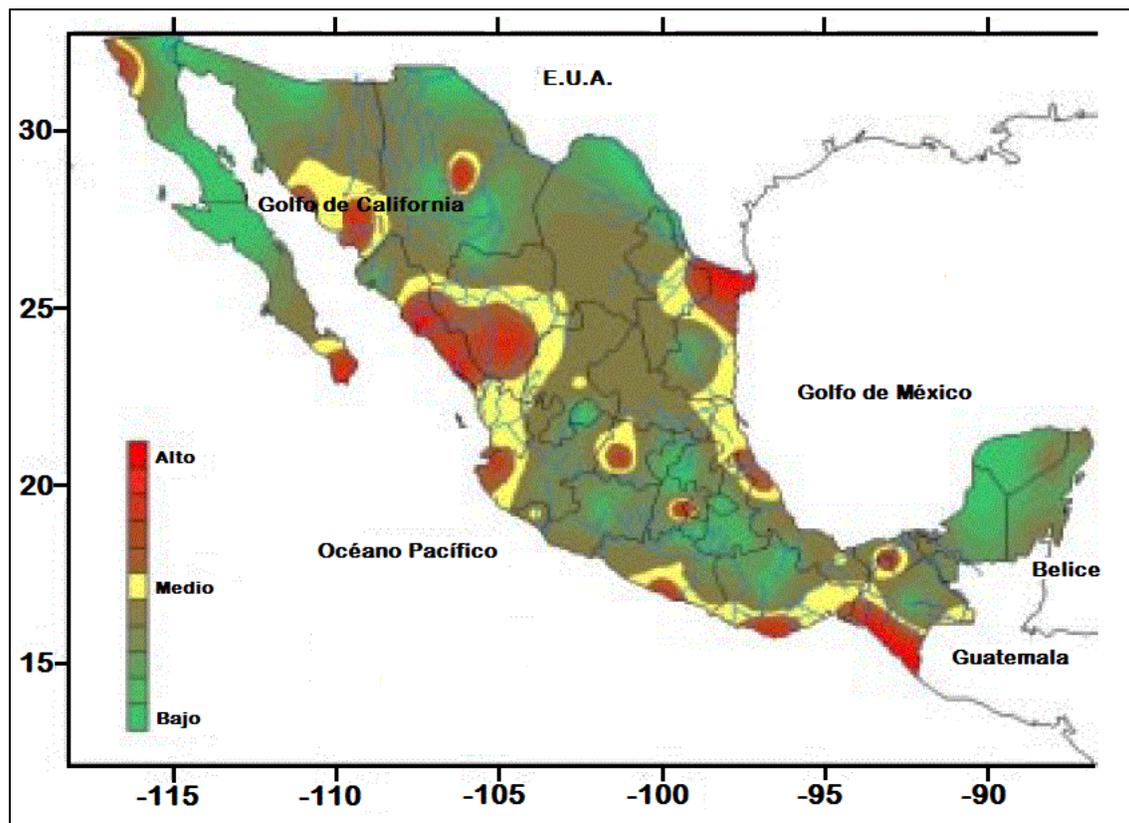


Figura 5. Zonas de peligro por inundaciones en la República Mexicana (Zepeda y González, 2001).

El Cuadro 2 enlista las inundaciones más importantes ocurridas en la República Mexicana de 2000 a 2013, todas ellas asociadas a las fuertes lluvias generadas por diversos fenómenos hidrometeorológicos.



Cuadro 2. Eventos que han generado mayores daños por inundación en México.

Año	Evento	Estado	Muertes	Población afectada	Daños totales (mdd)
2000	Huracán Keith	Quintana Roo, Chiapas, Tamaulipas y Nuevo León	9		38.78
2001	Huracán Juliette	Sonora y BCS	9	38,730	184.15
2002	Huracán Isidore	Yucatán y Campeche	4	500,000	870.07
	Huracán Kenna	Nayarit y Jalisco	2	374,500	122.15
2003	Lluvias de Verano	Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Nayarit y Zacatecas	14	256,301	194.13
2004	Frente frío no. 49	Coahuila	38	6,692	13.60
2005	Huracanes Emily, Stan y Wilma	Quintana Roo, Chiapas, Yucatán, Oaxaca y Veracruz	149	645,231	4,066.37
2006	Ciclones John, Lane y Paul	BCS, Sinaloa, Colima y Jalisco	88	521,178	377.44
2007	Frente Frío no. 4 y huracanes Dean y Lorenzo	Tabasco, Puebla, D.F., Tamaulipas y Guerrero	53	2,906,940	4,499.54
2008	Lluvias	Tabasco, Veracruz, Oaxaca y Tamaulipas	59	778,277	1,218.50
2009	Lluvias	Tabasco, Veracruz, Puebla, Chihuahua y Edo. de México	42	372,518	809.95
2010	Huracán Alex, Karl y Matthew	Quintana Roo, Tamaulipas, Tabasco, Yucatán, Campeche, Veracruz y Puebla	64	1,000,000	8,000
2011	Huracán Arlene	SLP, Veracruz, Hidalgo, Tamaulipas y Edo. de México	22	278,000	6.42
2012	Ernesto	Veracruz, Tabasco, Campeche, Quintana Roo	20	15,000	
2013	Tormentas Ingrid y Manuel	26 estados de la República Mexicana	145	248,477	2,000

† Datos obtenidos de Rodríguez (2013)



3.3.3. Elaboración de Mapas de riesgo por inundaciones

En tiempos recientes los desastres registrados en México han ocasionado, en promedio, la pérdida de 131 vidas humanas y alrededor de 500 millones de dólares por año. Esto hace que el tema de la prevención de desastres, tome relevancia en la agenda nacional de Protección Civil y marque la necesidad de establecer programas y estrategias de largo alcance enfocadas a prevenir y reducir los efectos de una catástrofe.

En este sentido, el CENAPRED ha publicado diferentes metodologías para elaborar mapas de riesgo que integren información sobre peligro y vulnerabilidad. Su objetivo es transmitir a los usuarios información y orientación relativa a los avances, conocimientos y desarrollos tecnológicos que permitan crear estrategias, políticas y programas enfocados a prevenir y reducir el efecto de los fenómenos perturbadores con la participación de los diferentes niveles de gobierno, sectores y sociedad en general.

A continuación se describe la metodología para elaborar mapas de riesgo por inundaciones editado por el CENAPRED (2011), que forma parte de la Serie Atlas Nacional de Riesgos.

3.3.3.1. Identificación del peligro por inundaciones

Guevara *et al.* (2004) definen al peligro como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino de cierta intensidad (factor perturbador), durante un cierto periodo de tiempo y en un sitio dado.

Una forma simple de saber si una sección en particular tendrá problemas por desbordamiento, es comprando las áreas permisibles (áreas hidráulicas, A_h) y geométricas (A_G).

Si $A_G > A_h$ la sección no presenta problemas por desbordamiento. Esto indica que existe más área geométrica o espacio para que el agua fluya sin problemas.

Si $A_G < A_h$ la sección presenta problemas por desbordamiento. Lo cual indica que el área geométrica no es suficiente para contener el flujo de agua, por lo que se presenta un desbordamiento en la sección de estudio (Figura 6).

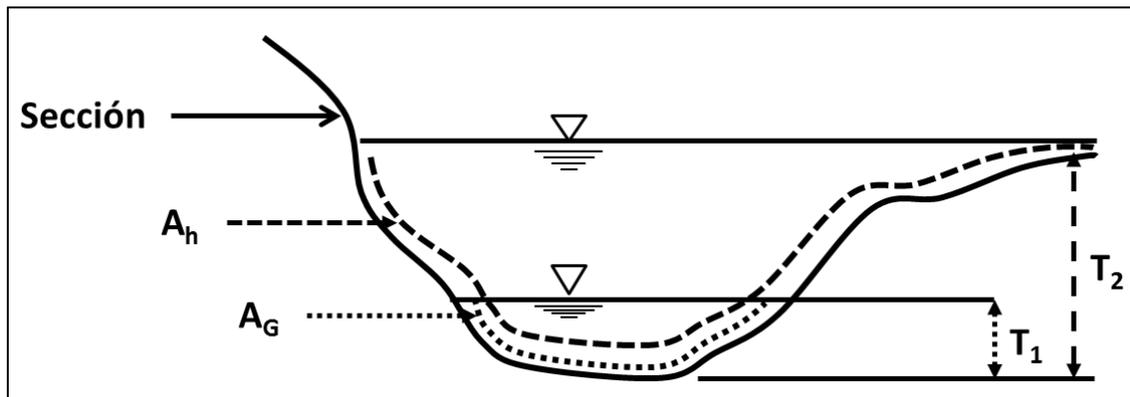


Figura 6. Si $A_G < A_h$ se presenta la inundación.

Para determinar el peligro se establece como factor perturbador la llanura de inundación que está fuertemente relacionada con los niveles o tirantes de agua alcanzados en cada sección transversal durante la simulación hidráulica.

3.3.3.2. Identificación de la vulnerabilidad física ante inundaciones

Cardona (2001) define vulnerabilidad como la susceptibilidad o propensión de los sistemas expuestos a ser afectados o dañados por el efecto de un fenómeno perturbador. Así mismo, distingue dos tipos de vulnerabilidad: física y social. La vulnerabilidad física corresponde al análisis de las viviendas para conocer qué tan susceptibles son a las inundaciones.

El CENAPRED (2011) clasifica en cinco niveles la vulnerabilidad de una población según la tipología de la vivienda y su capacidad de respuesta ante una inundación (Cuadro 3).



Cuadro 3. Índice de vulnerabilidad según el tipo de vivienda.

Tipo	Índice de vulnerabilidad	Color propuesto
I	Muy Alta	Rojo
II	Alta	Naranja
III	Medio	Amarillo
IV	Baja	Verde
V	Muy Baja	Verde y Blanco

El Cuadro 4 establece el Índice de vulnerabilidad de acuerdo al material utilizado en techos y muros durante la construcción de la vivienda.

Cuadro 4. Índice de vulnerabilidad según el tipo de vivienda.

No. de combinación	Tipo de vivienda	Combinación entre tipo de material para techo y muros
1	I	Vivienda con muros y techo de material de desecho
2	I	Vivienda con muros y techos de cartón
3	I	Vivienda con muros de lámina de cartón y techo de lámina de asbesto o metálica
4	II	Vivienda con muros de láminas de asbesto o metálica y techo de lámina de cartón
5	II	Vivienda con muros de carrizo, bambú o palma y techo de lámina de cartón
6	II	Vivienda con muros de carrizo, bambú o palma y techo de lámina de asbesto o metálica
7	II	Vivienda con muros de adobe y techo de lámina de cartón
8	II	Vivienda con muros de adobe y techo de lámina de asbesto o metálica
9	II	Vivienda con muros de adobe y techo de palma, tejamanil o madera
10	II	Vivienda con muros de madera y techo de lámina de cartón
11	III	Vivienda con muros de madera y techo de lámina de asbesto o metálica
12	II	Vivienda con muros de adobe y techo de lámina o cartón
13	III	Vivienda con muros de adobe y techo de lámina de asbesto o metálica



No. de combinación	Tipo de vivienda	Combinación entre tipo de material para techo y muros
14	III	Vivienda con muros de adobe y techo de lámina de palma, tejamanil o madera
15	III	Vivienda con muros de adobe y techo de lámina de teja
16	II	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de lámina de cartón
17	III	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de lámina de asbesto o metálica
18	III	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de palma, tejamanil o madera
19	III	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de teja
20	IV	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de losa, concreto, tabique o ladrillo
21	V	Vivienda con muros de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto y techo de losa, concreto, tabique o ladrillo. Además de disponibilidad de computadora y automóvil

† Información obtenida de: CENAPRED, 2011.

3.3.3.3. Evaluación del riesgo

La elaboración de los mapas de riesgo por inundación en el medio rural se hará con ayuda de los mapas de peligro y de vulnerabilidad, dado que con la combinación de éstas variables determina el riesgo. El riesgo en general está dado por la expresión:

$$R = C V P \quad (1)$$

donde:

R = riesgo

C = es el valor de los bienes expuestos

V = es el porcentaje de daños de una vivienda por efecto de una inundación, o vulnerabilidad

P = es la probabilidad de que ocurra un hecho potencialmente dañino, o peligro.



3.3.4. Medidas de control de inundaciones

García (2010) refiere a las medidas estructurales como la realización de obras de infraestructura que actúan sobre los mecanismos de formación y propagación de las avenidas, se pueden clasificar en tres categorías:

- reducción de caudales punta
- reducción de niveles de inundación para un caudal dado
- reducción de la duración de la inundación

En el diseño de las medidas estructurales, se debe asumir que nunca podrán eliminar totalmente el riesgo. Para evitar posibles efectos negativos a otras zonas, estas medidas deben contemplar –desde el inicio de su diseño– ciertas restricciones ambientales y la posible modificación del esquema de flujo por causas ajenas al proyecto ejecutivo (Aldana *et al.*, 1996).

El Manual para el Control de Inundaciones editado por la CONAGUA (2011b) propone la ejecución de las siguientes obras estructurales para el control de inundaciones:

- a) obras de almacenamiento controladas
- b) mantenimiento de infraestructura hidráulica existente
- c) construcción de bordos marginales o perimetrales
- d) estabilización lateral de cauces mediante espigones, gaviones, recubrimientos o muros
- e) obras de limpieza y desazolve en cauces
- f) construcción de cauces paralelos de alivio
- g) rectificación de cauces
- h) identificación y corrección de construcciones en el cauce
- i) obras de retención de sedimentos sobre el cauce o en la cuenca aguas arriba
- j) reforestación
- k) reubicación de zonas habitadas



l) diseño de construcciones resistentes a inundación

Por otro lado, las medidas no estructurales, no actúan sobre la avenida en sí, ya que no altera sus características hidráulicas o hidrológicas, pero si modifica la susceptibilidad de la zona inundable frente a una inundación. Según Graham (1999) las medidas no estructurales comprenden políticas, advertencias, medidas para desarrollo, procesos legislativos, participación pública y recopilación de información que permita la reducción de riesgo.

Las medidas no estructurales complementan a las medidas estructurales por encima de su umbral de protección, aumentan su efectividad y en general tienen un costo económico sensiblemente inferior. No obstante, estas medidas plantean dificultades de aplicación y requieren una coordinación entre distintas dependencias bajo un marco legal que fije los ámbitos competenciales (Pilar, 2007), algunas medidas no estructurales son:

- a) políticas y planeamiento urbano (ordenación territorial de las zonas inundables)
- b) predicción de inundaciones (cartografía de riesgos)
- c) comunicación (sistemas de alerta temprana)
- d) movilización
- e) coordinación y procedimientos de operación (planificación de la Protección Civil ante el riesgo a inundaciones)
- f) seguros e indemnizaciones
- g) inspecciones especializadas (regulares y de emergencia)

3.4. MODELACIÓN

El uso de modelos, a veces llamado "modelación" es un instrumento común que se utiliza para estudiar cualquier sistema, su empleo facilita este análisis, sobre todo cuando poseen numerosos componentes y diferentes interacciones.

3.4.1. Definición de modelo

Wadsworth (1997) define al modelo como “*un bosquejo que representa un conjunto real con cierto grado de precisión y en la forma más completa posible, pero sin pretender aportar una réplica de lo que existe en la realidad. Los modelos son útiles para describir, explicar o comprender mejor la realidad, cuando es imposible trabajar directamente en la realidad en sí*”.

En su forma más simple, Vargas (2010) define al modelo como una representación de una situación u objeto real que muestra las relaciones (directas o indirectas) de sus elementos en términos de causa y efecto. La Figura 7 esquematiza la correspondencia que debe existir entre el modelo y el sistema real.

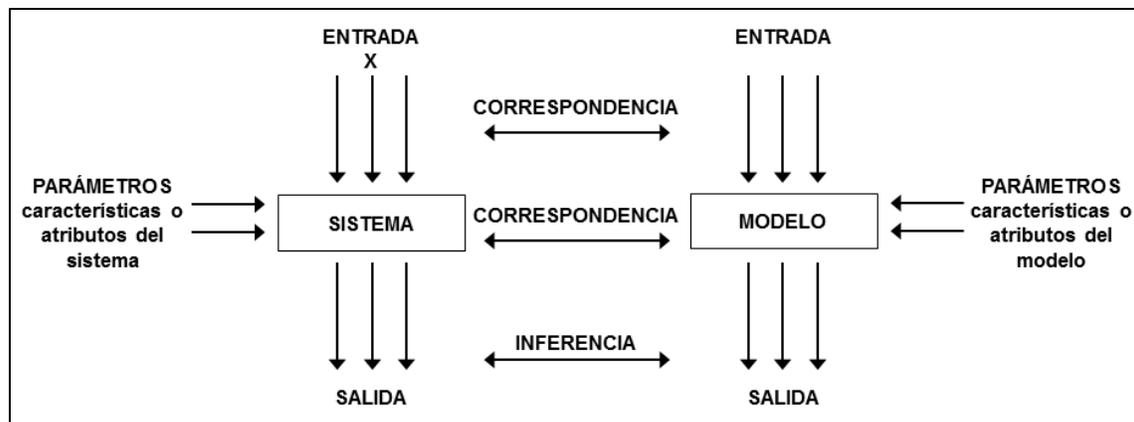


Figura 7. Representación gráfica de un modelo (Vargas, 2010).

3.4.2. Importancia de los modelos

El uso de modelos no es algo nuevo, el hombre siempre ha tratado de representar sus ideas y vivencias para entender y manipular su medio. Una cualidad esencial de cualquier modelo debe ser su facilidad para describir el sistema con suficiente detalle, esto le permitirá hacer predicciones válidas sobre el comportamiento del sistema real.



La adecuada construcción del modelo ayuda a organizar, manipular, representar y evaluar los componentes de un sistema real, sin embargo, se debe tomar en cuenta que el modelo nunca será una representación exacta, es decir, trabaja en cierto rango de precisión.

La importancia de los modelos radica entre otros aspectos, en la simulación y predicción de los fenómenos físicos, sobre todo los de baja periodicidad. A través de los modelos se puede obtener la relación causa-efecto sin realizar cambios en los sistemas (Oropeza, 1999).

Algunas de las principales ventajas en el uso de los modelos son las siguientes:

- a) proporcionan respuestas cuantitativas de los fenómenos
- b) sirven como herramienta para experimentar sin destruir
- c) ayudan a interpolar, simular y predecir fenómenos
- d) proporcionan una idea del comportamiento del fenómeno cuando no se cuenta con información
- e) ayudan a definir metodologías
- f) caracterizan la influencia de las variables que participan en el modelo
- g) ayudan a sugerir prioridades de investigación
- h) sirven para entender e instruir
- i) estimulan la participación y comunicación del equipo de trabajo

3.4.3. Clasificación general de los modelos

Existen varios tipos de modelos para representar la realidad, algunos de ellos son:

Dinámicos: utilizados para representar sistemas cuyo estado varía con el tiempo.

Estáticos: utilizados para representar sistemas cuyo estado es invariable a través del tiempo.

Matemáticos: representan la realidad en forma abstracta.

Físicos: son aquellos donde la realidad es representada por algo tangible, construido a escala (maquetas, prototipos, modelos analógicos, etc.).



Analíticos: representan la realidad mediante fórmulas matemáticas, estudian el sistema mediante la resolución de ecuaciones.

Numéricos: resuelven el comportamiento numérico de las variables que intervienen, pero no obtienen alguna solución analítica.

Continuos: representan sistemas cuyos cambios de estado son graduales.

Discretos: representan sistemas cuyos cambios de estado son saltos, no son graduales.

Determinísticos: son modelos cuya solución para determinadas condiciones es única y siempre la misma.

Estocásticos: representan sistemas donde los hechos suceden al azar, lo cual no es repetitivo. No se puede asegurar que acciones ocurrirán en un tiempo determinado, aun conociendo la probabilidad de ocurrencia y su distribución probabilística.

3.4.4. Modelo matemático de simulación hidráulica

Un modelo hidráulico es una representación simplificada de un sistema real y complejo llamado prototipo, bajo forma física o matemática predice los procesos físicos-hidrológicos que tienen lugar dentro de una cuenca (Salett y Nelson, 2010). De manera matemática, el sistema real está representado por una expresión analítica, la Figura 8 ilustra el funcionamiento de un modelo de este tipo.

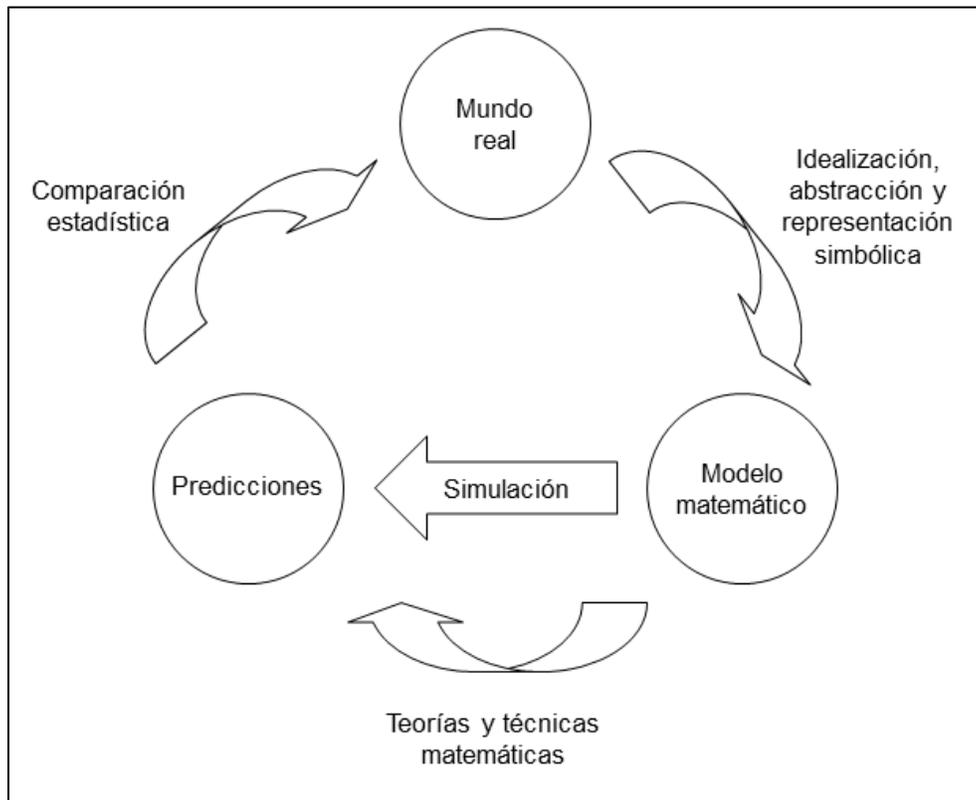


Figura 8. Representación de un modelo matemático de simulación hidráulica.

3.4.4.1. Clasificación de los modelos hidráulicos

Los modelos se clasifican de acuerdo al proceso que simulan, Puga (2010) reconoce tres clases de modelos:

Modelos matemáticos

Consisten habitualmente en sistemas de ecuaciones diferenciales que describen el fenómeno hidráulico, generalmente en regímenes transitorios que son resueltos por métodos numéricos.

Modelos análogos

El modelo analógico no es una reproducción detallada de todas las cualidades del sistema o mundo real, sino que refleja solamente la estructura de relaciones y determinadas propiedades fundamentales de la realidad. Se usa principalmente en



la ingeniería para validar hipótesis y aproximaciones que forman un modelo conceptual de cierto proceso u objeto mediante el cálculo numérico.

Modelos físicos

Son una contraposición a los modelos matemáticos y a los modelos analógicos, son construcciones en escala reducida o simplificada de obras, maquinas o sistemas de ingeniería para estudiar en ellos su comportamiento y permitir así la perfección de los diseños, pero siempre antes de iniciar la construcción de las obras u objetos reales. Se le conocen como “modelos simplificados” el cual debe satisfacer las leyes de Similitud Geométrica, Cinemática y Dinámica, que en conjunto relacionan magnitudes físicas y homologas definidas entre ambos sistemas.

3.4.5. Calibración y validación de modelos

Según Ponce (1986) durante la calibración se busca la máxima correlación entre los valores de las variables generadas por el modelo y las medidas en el sistema real. Si después de muchas pruebas no se obtuviera la calibración, se tendría que revisar el planteamiento del modelo (Fernández *et al.*, 1997).

Por otro lado, la validación consiste en comprobar el adecuado funcionamiento del modelo con una serie de mediciones reales no utilizadas en el proceso de calibración. Aunque la correlación de los resultados no sea tan buena como la calibración, deben obtenerse valores lo bastante cercanos. De otra forma, es necesario reiniciar el proceso de calibración.

3.4.6. Límites de aplicación de los modelos

Todo modelo de simulación debe especificar el marco dentro del cual se desarrolló, así como los objetivos generales y particulares de su proyección (Oropeza, 1999), con esta información, el usuario podrá conocer el campo de aplicación y los límites que pueda tener el modelo.



Tapia (2010) enlista cuatro puntos esenciales que se deben considerar durante el desarrollo de un proyecto, trabajo o investigación donde sea utilizado un modelo de simulación:

- a) No se debe utilizar cuando existan técnicas analíticas que permitan plantear, resolver y optimizar todo el sistema o alguna parte del mismo.
- b) No es posible asegurar que el modelo sea válido al 100%. Se corre el riesgo de tomar medidas erróneas basadas en aplicar conclusiones falsas obtenidas mediante un modelo que no representa la realidad.
- c) No existe criterio científico de selección de alternativas a simular. Es posible omitir una buena sugerencia de innovación simplemente porque a nadie se le ocurrió ensayarla.
- d) Existe el riesgo de utilizar un modelo fuera de los límites para el cual fue construido, queriendo realizar ensayos para el cual el modelo no es válido. Es posible elaborar un escenario de pruebas y resultados falsos, basados en un modelo confiable y válido bajo otras condiciones.

3.5. MODELOS UTILIZADOS EN LA PREDICCIÓN DE ÁREAS DE INUNDACIÓN

En las últimas tres décadas se han desarrollado diferentes modelos de simulación hidrológica e hidráulica para su aplicación en el manejo de cuencas. En este capítulo se exponen brevemente las características de algunos de ellos, así como una comparación de sus cualidades que justifiquen el uso del modelo empleado en el presente trabajo.

3.5.1. AquaDyn

Es un modelo hidrodinámico que permite la descripción y el análisis de cauces, simula el nivel de agua en canales abiertos como ríos, lagos o estuarios, puede modelar flujo permanente e intermitente, tanto para régimen crítico o supercrítico. El programa utiliza el Método de Elementos Finitos (MEF) para resolver las



ecuaciones de Saint-Venant, proporcionando como parámetros de calibración y el coeficiente de viscosidad de la turbulencia artificial (Hidrosoft Energy Inc., 2000).

AquaDyn predice los impactos y el factor de riesgo en condiciones particulares del flujo de agua, además permite analizar el funcionamiento de diversas estructuras como diques, embarcaderos, terraplenes, ente otros. La desventaja de este programa es que no realiza interpolaciones entre secciones y la entrada de datos al modelo es bastante compleja, sobre todo si se manejan secciones irregulares (Pereira, 2008). Actualmente la licencia del modelo tiene un costo de \$1,975 USD.

3.5.2. HSCTM-2D

El Modelo Hidrodinámico de Transporte de Sedimento y Contaminante (HSCTM, por sus siglas en inglés), es un programa que simula un flujo promedio de aguas superficiales en dos dimensiones: la vertical y el flujo horizontal; posee dos módulos, uno para el modelaje hidrodinámico (HYDRO 2D), y el otro para modelar el transporte de sedimento y contaminantes (CS 2D) (EPA U.S., 1998).

Las ecuaciones del modelo son resueltas por el método de Galerkin de Residuos Ponderados usando el MEF. Las velocidades de cada nodo son calculadas en dos direcciones: horizontal (en el plano) y vertical (profundidad de flujo o tirante). Adicionalmente, se puede revisar la continuidad en múltiples secciones. El modelo simula el efecto del fondo, esfuerzo interno y superficial y la fuerza de Coriolis (Marín, 2010).

El sistema de modelaje del HSCTM-2D se puede correr usando la opción predeterminada o no-predeterminada. En la primera, se usan los valores predeterminados (contenidos en el programa) para ciertos parámetros relacionados a sedimentos; mientras que en el modo no-predeterminado deben ser ingresados todos los parámetros. La primera opción permite usar del modelo aun cuando no se conocen todos los datos y sólo se debe usar para un análisis



qualitativo; además permite hacer comparaciones relativas entre varios sitios o diseños (EPA U.S., 1998). El software se puede obtener de forma gratuita en la página WEB de la U.S. EPA: www.epa.gov

3.5.3. River2D

El modelo hidrodinámico River2D (desarrollado en la Universidad de Alberta, Canadá) se basa en la solución de la fórmula de Galerkin, puede ajustar el flujo en transiciones supercríticas o subcríticas, cubiertas de hielo y en áreas húmedas variables (Elera, 2005), además modela parámetros hidrodinámicos como velocidades, niveles de agua, entre otros.

El paquete del modelo River2D consiste en cuatro programas: R2D_Bed, R2D_Ice, R2D_Mesh y River2D. R2D_Bed fue diseñado para la edición de datos topográficos del terreno, mientras R2D_Ice desarrolla la topografía en ambientes cubiertos de hielo. El programa de R2D_Mesh crea una malla que puede ser modificada (o editada), corrige los datos de topografía y calaca la profundidad y velocidad del agua a través de la discretización (River2D, 2006). Finalmente el módulo River2D se utiliza para visualizar e interpretar los resultados. Este software se obtiene de forma gratuita en su página WEB: www.river2d.ualberta.ca

3.5.4. TUFLOW

TUFLOW se desarrolló por la empresa WBM–WBM Group y la Universidad de Queensland, Australia, el objetivo del proyecto era generar un sistema de modelado en 2D con enlaces dinámicos a un sistema 1D. Es un software que simula la avenida de ríos, inundaciones de llanuras costeras, mareas, redes de tubería e inundaciones urbanas mediante la solución de la ecuación de Stelling (por diferencias finitas).

El esquema 2D maneja regímenes de flujo controlado aguas arriba (flujo supercrítico), además considera la infraestructura hidráulica como vertederos,



puentes, alcantarillas, ente otras. La solución 1D incluye la representación detallada de los ríos, llanuras de inundación, redes de tuberías, control de cárcavas y pozos.

El modelo utiliza los SIG para editar, modificar y manejar datos. La licencia del software tiene un costo base de \$6,000 USD, aumenta según las aplicaciones que se adquieran (Guide to TUFLOW, 2013).

3.5.5. WMS

El Sistema de Modelación de Cuencas (WMS, por sus siglas en inglés) fue diseñado por Aquaveo TM (empresa de origen estadounidense) para modelar diversos escenarios y procesos hidrológicos e hidráulicos de un sistema.

WMS puede delimitar una cuenca a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE) y calcular algunos datos geométricos como: área, pendiente, altitud media, tiempo de la concentración, curva numérica, parámetros de infiltración, entre otros (AQUAVEO, 2013).

El modelo predice la crecida de un río mediante la vinculación de la red de drenaje y los datos del modelo hidrológico (en profundidad y velocidad bajo un esquema 2D); además analiza el flujo de aguas subterráneas, la infiltración, y el efecto del cambio de uso de suelo, simula infraestructura hidráulica (como canales, presas, estanques, diques, entre otros) y puede representar las características artificiales o cambios propuestos a la cuenca (escenarios). El software tiene un costo de \$5,600 USD con todas las aplicaciones y módulos disponibles.

3.5.6. Iber

Iber es un modelo numérico desarrollado por la administración pública española y diferentes universidades de ese país. Su rango de aplicación incluye la hidrodinámica fluvial, la simulación de ruptura de presas, la evaluación de zonas



inundables, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de marea en estuarios.

Es un modelo que simula el flujo en lámina libre bajo un régimen no-permanente. Actualmente consta de 3 módulos de cálculo principales: un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos.

El módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad, también conocidas como 2D Shallow Water Equations (2D-SWE) o ecuaciones de Saint Venant bidimensionales. El módulo de turbulencia permite incluir las tensiones turbulentas en el cálculo hidrodinámico. El módulo de transporte de sedimentos resuelve las ecuaciones de transporte en el fondo y transporte turbulento en suspensión, simula los cambios en la cota del fondo a partir del balance de masa de sedimento (Iber, 2012). Este software se obtiene de forma gratuita en su página WEB: www.iberaula.es

3.5.7. MIKE-DHI

Actualmente el Instituto Danés de Hidráulica (DHI, por sus siglas en inglés) es uno de los principales programadores y proveedores de modelos numéricos aplicables en hidráulica, este instituto ofrece la familia de modelos comerciales MIKE, cuyas licencias varían de \$2,000 a \$42,500 USD.

Entre ellos se encuentra el MIKE 11 que posee diferentes módulos para simulan el sistema real en régimen permanente, onda cinemática, onda difusiva y ecuaciones completas. Modela secciones compuestas y llanuras de inundación mediante células de almacenaje, así como pasos bajo vías y otras estructuras. Junto al módulo hidrodinámico se pueden utilizar otros módulos para el estudio de transporte de sedimentos y de calidad de aguas. MIKE 11 permite realizar la



entrada de datos a partir de programas que utilizan los SIG y exportar los resultados hacia ellos.

En cuanto a los modelos bidimensionales destaca el modelo MIKE 21, con un módulo hidrodinámico que resuelve las ecuaciones bidimensionales de Saint Venant, que puede considerar, a parte de la pendiente del fondo y las fuerzas de fricción, el efecto de fuerzas como el viento, la fuerza de Coriolis, corrientes inducidas por el oleaje y la evapotranspiración. A parte del módulo básico hidrodinámico consta también de módulos para transporte de sedimentos, material sólido cohesivo, transporte de contaminantes, calidad de aguas, eutrofización y polución por materiales pesados. Recientemente el DHI ha integrado el MIKE 11 y MIKE 21 en un solo modelo, dando paso al modelo MIKE FLOOD, éste último puede crear escenarios 1D y 2D, sin embargo, los esquemas numéricos siguen siendo los del MIKE 11 y MIKE 21.

También hay modelos en tres dimensiones, el MIKE 3 se desarrolló para simular la hidrodinámica, calidad de aguas y transporte de sedimentos (cohesivos y no cohesivos) en ríos, estuarios, bahías, zonas costeras y mares. MIKE 3 resuelve las ecuaciones de Reynolds con un esquema en diferencias finitas (DHI, 2011).

3.5.8. FLO-2D

El modelo simula el flujo en topografías complejas como áreas urbanizadas y planicies de inundación, así como el intercambio de flujo entre los canales y la planicie de inundación O'Brien (1988). Puede modelar el flujo de agua, transporte de sedimentos y aludes torrenciales (deslizamientos).

Como datos de entrada requiere la topografía digital del terreno, la geometría del canal, valores estimados de la rugosidad del canal y de la planicie de inundación, hidrogramas de entrada, precipitación y propiedades geológicas de la mezcla agua-sedimento.

3.5.9. HEC-RAS

El Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de E. U. (US ACE por sus siglas en inglés) desarrolló el HEC-RAS. Este software permite al usuario establecer modelaciones de flujo permanente y no permanente (Figura 9).

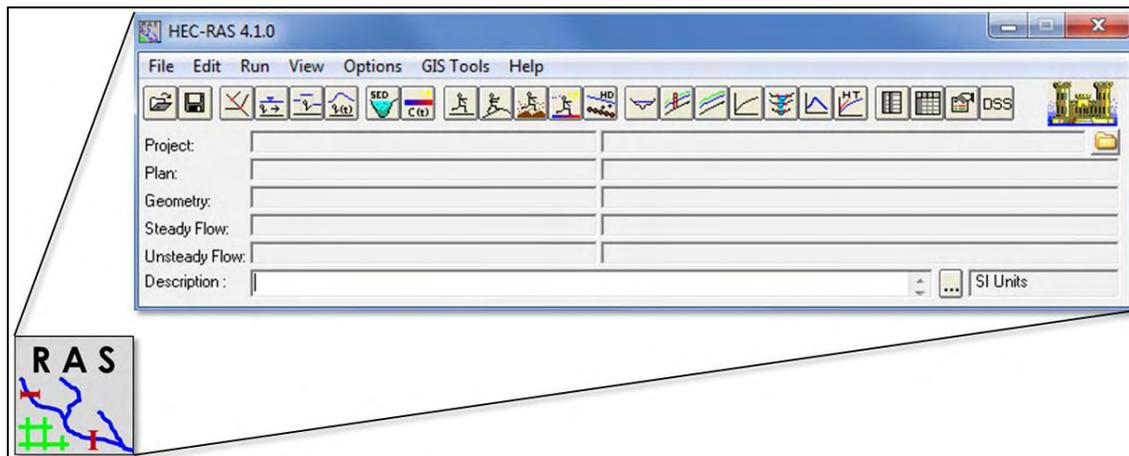


Figura 9. Caratula del modelo HEC-RAS.

El modelo se diseñó para realizar cálculos hidráulicos unidimensionales en un sistema de canales naturales o construidos. El procedimiento de cálculo se basa en la solución de la ecuación unidimensional de la energía con un proceso iterativo denominado método del paso estándar (o *Standard Step*) (Guerra, 2005)

El programa permite evaluar el efecto de los obstáculos sobre la capacidad de flujo, también se puede usar en proyectos de encauzamientos, acondicionamiento de márgenes, sustitución de puentes, entre otros, ya que permite determinar la influencia de cada acción u obra sobre los niveles o perfiles de agua. El software es libre y se puede obtener en la página WEB de la U.S. Army Corps of Engineers: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/download.html>



3.5.9.1. Procedimiento de cálculo

El objetivo de HEC-RAS es calcular la cota del espejo de agua o tirante en función del caudal circulante a lo largo del río o canal. Los cálculos comienzan en una sección transversal bajo condiciones iniciales conocidas o estimadas, se procede hacia aguas arriba si el régimen es lento, o hacia aguas abajo si el régimen es rápido.

A continuación se detalla la metodología que usa el modelo HEC-RAS para el cálculo de líneas de agua, retomado por Castelló (2009) y Santaella y Donado (2007).

El modelo HEC-RAS basa sus rutinas de cálculo en cuatro ecuaciones: Ecuación de conservación de masa, Ecuación de conservación de energía, Ecuación de conservación de cantidad de movimiento y Ecuación de Manning. A continuación se presentan las expresiones generales para cada una de estas ecuaciones:

- Ecuación de continuidad (conservación de masa):

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (2)$$

donde:

Q = gasto (m^3/s)

A = área de la sección transversal (m^2)

V = velocidad promedio de la sección transversal (m/s)

- Ecuación de conservación de la energía (ecuación de Bernoulli)

$$Y_2 + Z_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (3)$$

donde:

Y_1, Y_2 = profundidades del agua en la sección trasversal

Z_1, Z_2 = elevaciones del fondo del canal principal

V_1, V_2 = velocidades promedio

a_1, a_2 = coeficientes de velocidad

g = aceleración de la gravedad

h_e = pérdida de energía

La Figura 10 muestra esquemáticamente un tramo de canal con cada uno de los términos de la ecuación de energía.

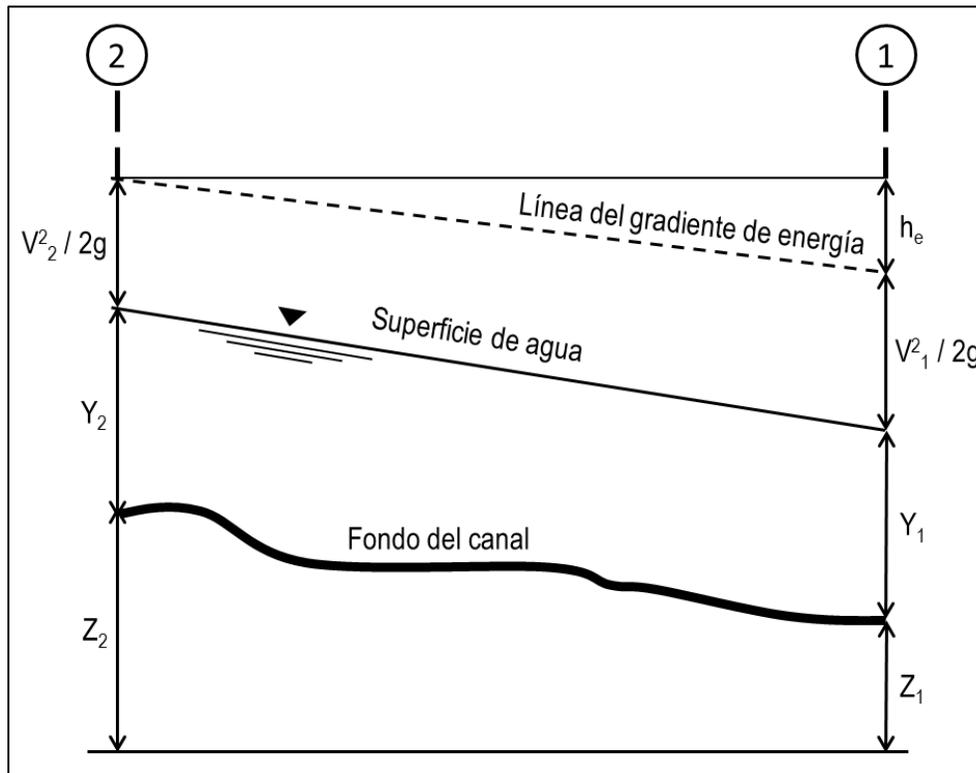


Figura 10. Representación de los términos de la ecuación de energía.

- Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento

$$F_2 - F_1 + W \text{ Sen } \theta - F_t - F_o = \frac{\gamma}{g} Q (\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) \quad (4)$$

donde:

F_1, F_2 = fuerzas hidrostáticas en las fronteras del volumen de contorno (N)

$W \text{ Sen } \theta$ = componente del peso de la masa de agua en dirección del flujo (N)

F_t = fuerza de fricción en las paredes y fondo del canal (N)



F_o = fuerza de obstáculo dentro del volumen de control (N)

β = coeficiente de cantidad de movimiento o de boussinesq

- Ecuación de Manning

$$V = \frac{k}{n} R_h^{2/3} S_o^{1/2} \quad (5)$$

donde:

k = 1.486 para unidades inglesas y 1.0 para sistema internacional

n = coeficiente de rugosidad de Manning

R_h = radio hidráulico de la sección transversal (m)

S_o = pendiente promedio del canal

Como se mencionó anteriormente, una de las capacidades que tiene HEC-RAS es determinar los perfiles de la superficie de agua. Para ello, el programa utiliza, cuando es debido, el Método de paso Estándar. Este método es aplicable para canales tanto prismáticos como no prismáticos, incluyendo las adyacentes llanuras de inundación.

El Método de paso Estándar se usa para calcular perfiles de superficie de agua en flujo permanente, en condiciones subcríticas y supercríticas. Este método utiliza las ecuaciones de continuidad, energía y Manning para calcular la profundidad o altura de la superficie del agua en diferentes secciones transversales a lo largo del cauce. La ecuación base para este método es:

$$WSEL_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = WSEL_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_{L1-2} \quad (6)$$

donde:

$WSEL_{1,2}$ = elevación de la superficie de agua (z+y) en cada sección (m)

h_{L1-2} = pérdidas entre las dos secciones (m)

Debido a que este modelo es unidimensional, cada sección transversal debe tener un valor único de elevación de la superficie del agua o tirante, así también la altura de velocidad. Para un determinado tirante, la energía media es obtenida por una ponderación según el flujo que atraviesa cada una de las tres subáreas de una sección transversal. La Figura 11 muestra cómo se obtiene la energía media para una sección (sin planicie de inundación izquierda).

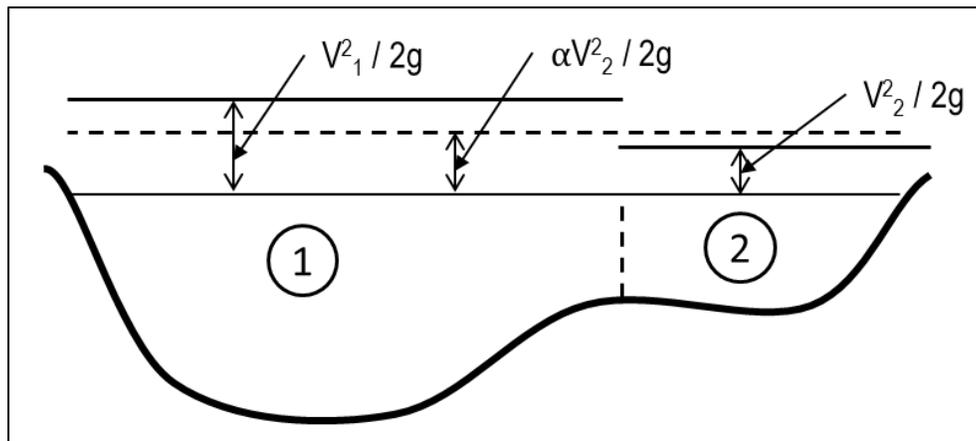


Figura 11. Ejemplo de la obtención de la energía media.

El término de pérdidas incluye las pérdidas generadas por fricción, así como las generadas por expansiones y contracciones en el canal entre dos secciones transversales. Así pues para las pérdidas se tiene:

$$h_{L1-2} = h_f + h_o \quad (7)$$

donde:

h_f = pérdida de energía debida a la fricción entre dos secciones (m)

h_o = pérdidas debidas a expansión y contracción entre las dos secciones (m)

Las pérdidas por fricción son calculadas a partir de la ecuación de Manning, con la cual se puede calcular la pendiente media de la línea entre dos secciones transversales. La multiplicación de las distancias entre las secciones por esta pendiente da las pérdidas por fricción:

$$h_f = L\bar{S}_f \quad (8)$$



donde:

L = longitud en el sentido del flujo entre dos secciones (m)

\bar{S}_f = pendiente media de la línea de energía entre dos secciones (m/m)

De la misma manera las pérdidas por expansión y contracción, que por lo general son pérdidas menores, se calcular así:

$$h_o = C_{c,e} \left(\frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right) \quad (9)$$

donde:

C = coeficiente de pérdida por contracción o expansión

V_1 = velocidad promedio en la sección aguas abajo (m/s)

V_2 = velocidad promedio en la sección aguas arriba (m/s)

3.6. SELECCIÓN DEL MODELO

Los modelos mencionados anteriormente poseen diferentes capacidades para el modelado hidráulico e hidrológico. El Cuadro 5 representa una comparación de los modelos anteriormente descritos en relación a 11 objetivos definidos por el MSC (Model Steering Committee) y el HSPF (Hydrological Simulation Program – Fortran).

Cuadro 5. Principales características de los modelos.

CARACTERÍSTICA	Modelo													
	MIKE SHE / MIKE 11	HEC-HMS y HEC-RAS con UNET	MODNET (incluido MODFLOW y UNET)	XP-SWMN 2000	MODRANCH (incluido MODFLOW y BRANCH)	WASH123	SFRSM	ISGW (incluido HSPF y MODFLOW)	MODFLOW	EPA SWMN	MOD-HMS	AdICPR	BASIN 3.0 (incluido HSPF y FEQ)	InHM
Simula los niveles de aguas subterráneas y sus áreas de recarga	●		●		●	●	●	●	●		●			●
Simula rápidamente los cambios de niveles de agua subterránea y flujo-bidireccional por filtraciones en los canales de un acuífero	●		●		●	●	●	●	●		●			●
Estima la disponibilidad y abastecimiento de agua (riego por bombeo, suministro de agua, precipitaciones, pérdidas por filtración, evaporación, etc.)	●	●		●		●	●	●		●	●		●	●
Puede intercambiar datos con el modelo 2x2 en un formato de cuadrícula	●		●		●			●	●		●			
Modela eventos de tormenta aprobado por la FEMA (Federal Emergency Management Agency) y eventos continuos durante varios años	●	●	●	●										
Modela estructuras de control hidráulico de tipo común con disparadores de encendido y apagado (presas, compuertas, bombas, etc.)	●	●	●	●	●	●	●			●		●	●	
Modela la geometría del canal únicamente con la simulación de la rejilla	●	●		●		●	●	●		●		●	●	



CARACTERÍSTICA	Modelo													
	MIKE SHE / MIKE 11	HEC-HMS y HEC-RAS con UNET	MODNET (incluido MODFLOW y UNET)	XP-SWMM 2000	MODRANCH (incluido MODFLOW y BRANCH)	WASH123	SFRSM	ISGW (incluido HSPF y MODFLOW)	MODFLOW	EPA SWMM	MOD-HMS	AdICPR	BASIN 3.0 (incluido HSPF y FEQ)	InHM
Intercambia datos con el DSS (Decision Support Systems)		•	•											
Dispone de una interfaz gráfica de usuario con capacidades pre y post-procesamiento	•	•		•	•	•			•	•			•	
Simula condiciones similares a las encontradas en el EAA (Everglades Agricultural Area)	•	•	•	•	•				•	•				
Configura los tiempos de ejecución para cumplir con el cronograma del proyecto	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•

† Datos obtenidos de: *Central and Southern Florida Pojec (2002).*



El Cuadro 6 muestra los criterios cumplidos por cada modelo o combinación de modelos, también identifica los modelos sugeridos por el MSC.

Cuadro 6. Comparación de modelos.

Modelo	No. criterios cumplidos	¿Considera más posibilidades?	Observaciones
AdICPR	4	No	No considera el movimiento de agua subterránea
BASIN 3.0 (incluido HSPF y FEQ)	4	No	No considera el movimiento de aguas subterráneas, no fue aprobado por la FEMA
HEC-HMS y HEC-RAS con UNET	8	No	Se puede combinar con MODNET
InHM	3	No	No simula estructuras de control hidráulico comunes
ISGW (incluido HSPF y MODFLOW)	6	No	Aunque 6 criterios se cumplen por este modelo, las estructuras rutinarias del modelo son demasiado simple para evaluar la complejidad de cuencas EAA
MIKE SHE / MIKE 11	10	Si	
MODRANCH (incluido MODFLOW y BRANCH)	7	No	Aunque 7 criterios se cumplen en este modelo, no es capaz de modelar un evento de tormenta avado por la FEMA
MODFLOW	6	No	Puede combinarse con XP-SWMM
MODHMS	5	No	No están disponibles las dinámicas de las rutinas estructurales
MODNET (incluido MODFLOW y UNET)	8	No	Puede combinarse con HEC-HMS/HEC-RAS o UNET
SFRSM	6	No	No se ha concluido los simuladores de gestión
EPA SWMN	5	No	XP-SWMM seleccionado
WASH123	6	No	Los tiempos de funcionamiento son excesivos
XP-SWMM 2000	7	No	Fue aprobado por la FEMA y puede fusionarse con MODFLOW



Modelo	No. criterios cumplidos	¿Considera más posibilidades?	Observaciones
HEC-HMS, HEC-RAS con UNET y MODNET	11	Si	
XP-SWMN 2000 y MODFLOW	10	Si	

† *Datos obtenidos de Central and Southern Florida Pojec (2002).*

Los tres modelos o combinaciones de modelos recomendados por el MSC son:

1. MIKE SHE / MIKE 11
2. Combinación de HEC-HMS, HEC-RAS con UNET y MODNET
3. Combinación de XP-SWMM2000 y MODFLOW

La selección del modelo es un proceso de comparación y equilibrio entre sus características individuales, la capacidad de adaptación a la zona de estudio, su costo y la practicidad de uso. Considerando estos elementos se eligió el modelo matemático de simulación hidráulica HEC-RAS Versión 4.1.0.



CAPÍTULO 4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Delimitar y evaluar las zonas de riesgo a inundación de la Subcuenca del río La Antigua, Ver., mediante la simulación hidráulica con HEC-RAS.

4.2. OBJETIVOS PARTICULARES

- Calibrar y validar la modelación hidráulica generada por el modelo
- Elaborar un mapa de riesgo a inundación para la subcuenca
- Proponer medidas estructurales y no estructurales de control de inundaciones



CAPÍTULO 5. HIPÓTESIS

5.1. HIPÓTESIS GENERAL

Mediante el uso de información hidrometeorológica, puntos de verificación en campo de usos de suelo y vegetación y un MDE de alta resolución, se pueden representar las condiciones de la subcuenca para delimitar y evaluar las zonas de riesgo a inundación a través de la simulación hidráulica.

5.2. HIPÓTESIS PARTICULAR

- Un análisis de sensibilidad y la información hidrométrica ayudan al proceso de calibración y validación de los resultados obtenidos en la simulación hidráulica.
- La determinación del índice de vulnerabilidad física y la delimitación de zonas inundables permiten generar un mapa de riesgo a inundación.
- La simulación hidráulica ayuda en la formulación de medidas estructurales y no estructurales para el control de inundaciones.



CAPÍTULO 6. SUPUESTOS

La información disponible (registros históricos de estaciones meteorológicas e hidrométricas, el MDE, las imágenes satelitales, los datos recopilados en campo y demás revisión bibliográfica) permitirá delimitar y evaluar las áreas con riesgo a inundación de la Subcuenca del río La Antigua por medio del modelo HEC-RAS.

CAPÍTULO 7. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

7.1. UBICACIÓN HIDROLÓGICA

La Cuenca del río La Antigua se ubica entre los paralelos 19°05' y 19°34' latitud Norte y los meridianos -96°06' y -97°16' longitud Oeste, tiene un área aproximada de 2,827 km² que se distribuye en los estados de Puebla y Veracruz. La cuenca pertenece a la Región Hidrológica 28 Papaloapan (RH28) y a la Subregión Jamapa y Otros, está conformada por cuatro subcuencas: RH28Bc, RH28Bd, RH28Be y RH28Bf (Figura 12). El río La Antigua nace en la Sierra Madre Oriental, con el nombre de río Sumidero, al oriente de la localidad González Ortega, en el estado de Puebla, a una altitud de 3 345 m.s.n.m. (Espinoza, 2009).

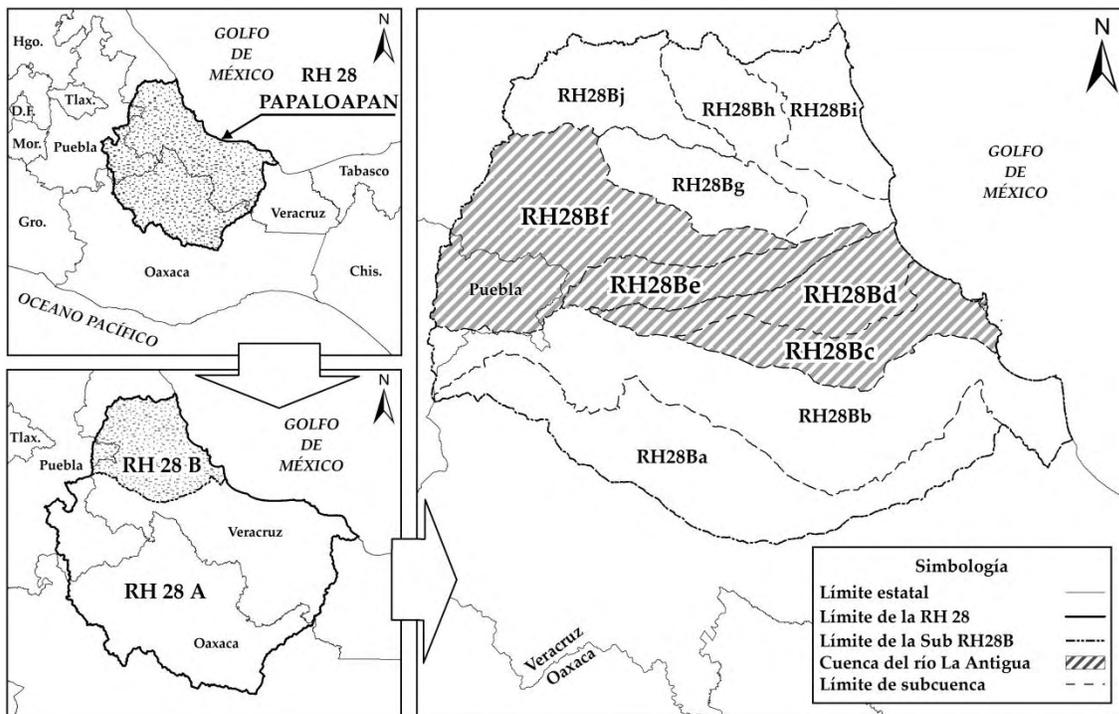


Figura 12. Ubicación Hidrológica de la Cuenca del río La Antigua.

El área de estudio incluye únicamente la subcuenca RH28Be (Subcuenca del río La Antigua), ya que en esta zona se han registrado los mayores daños provocados por el desbordamiento del río La Antigua.

Ubicación de la Subcuenca RH28Be

La Subcuenca del río La Antigua (RH28Be) tiene una superficie de 508.34 km², se distribuye horizontalmente con dirección Oeste-Este en el estado de Veracruz. Se enmarca dentro de los paralelos 19.37° y 19.20° y los meridianos -96.36° y -97.00° (Mapa 1). La subcuenca inicia en Eje Neovolcánico Transversal a una altitud de 1,570 m.s.n.m., y termina a una altitud de 5 m.s.n.m, 5 km antes de llegar al Golfo de México (Figura 13). El Cuadro 7 muestra la superficie por categoría de cuenca.

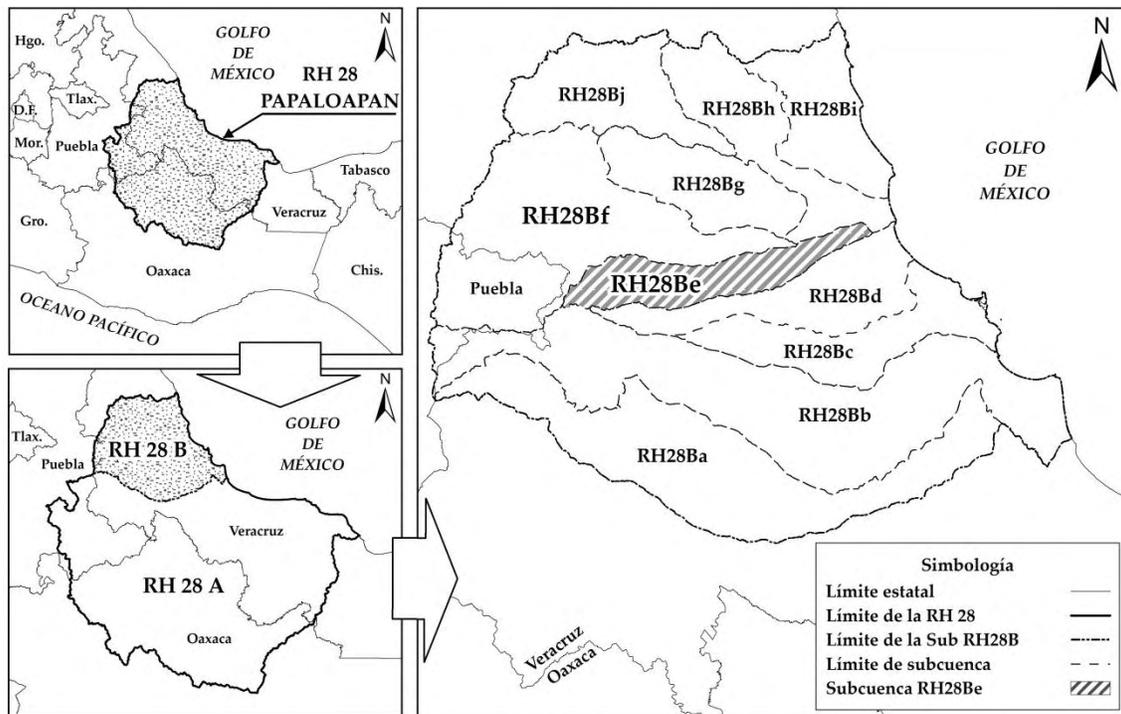
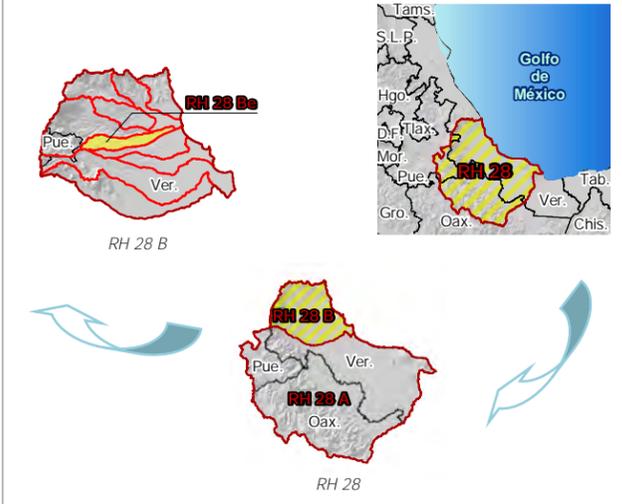


Figura 13. Ubicación de la Subcuenca RH28Be.

Cuadro 7. Superficie por categoría de cuenca.

Categoría	Nombre	Superficie (km ²)	Porcentaje (%)
Región Hidrológica	Papaloapan	57,610.62	100.0
Subregión	Jamapa y Otros	10,007.35	17.37
Subcuenca	Río La Antigua	508.34	0.88

CROQUIS DE LOCALIZACIÓN



SIMBOLOGÍA

Principales áreas urbanas		Limite de la subcuenca	
Limite estatal			
Intervalos de Elevación (m.s.n.m.)			
0 - 100		800 - 900	
100 - 200		900 - 1,000	
200 - 300		1,000 - 1,100	
300 - 400		1,100 - 1,200	
400 - 500		1,200 - 1,300	
500 - 600		1,300 - 1,400	
600 - 700		1,400 - 1,500	
700 - 800		1,500 - 1,600	
Símbolos topográficos			
Carretera pavimentada		Corriente perenne	
Terracería		Curva de nivel acotada	
Brecha		Curva de nivel ordinaria	

INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

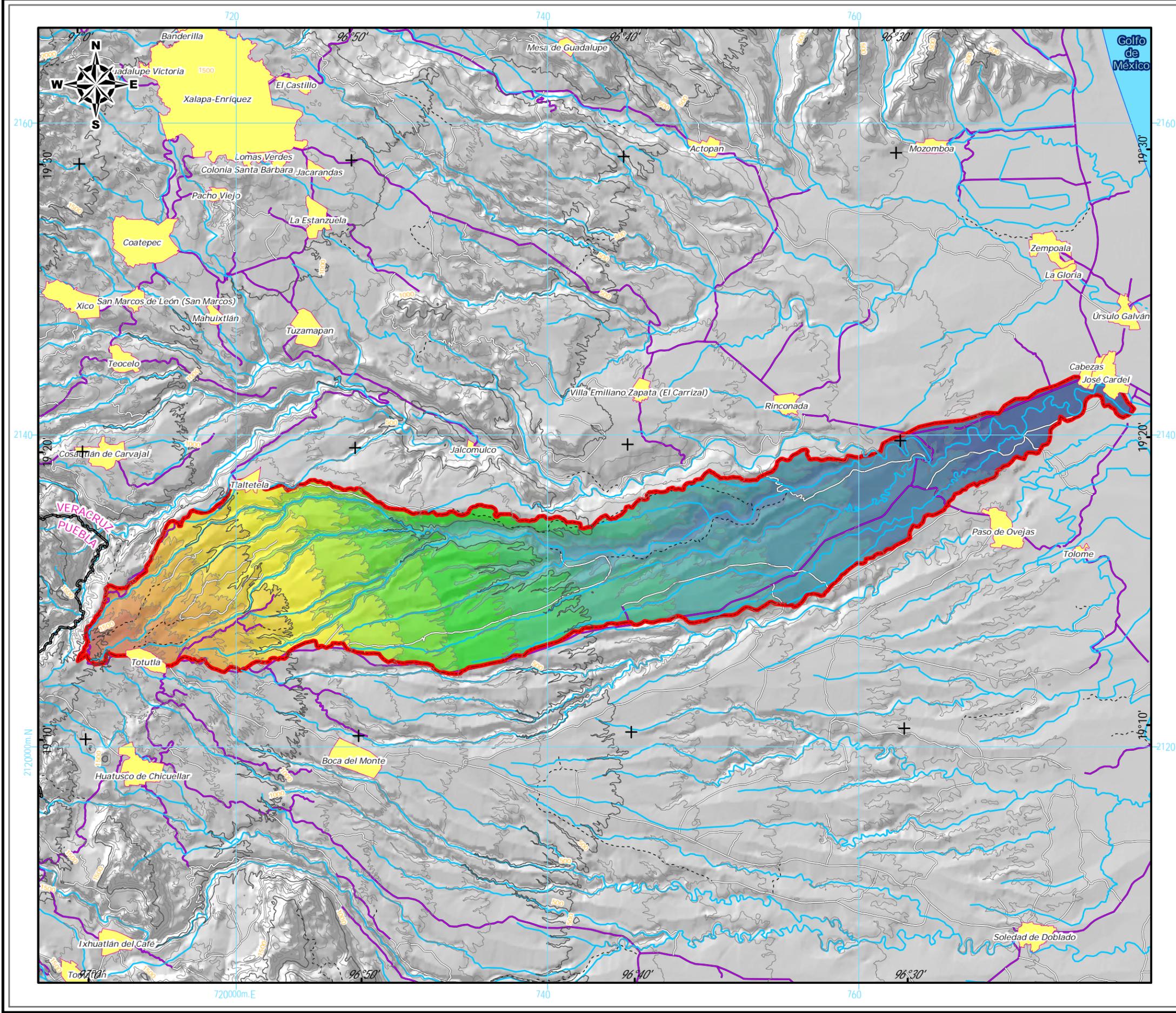
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

MAPA BASE

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI

Escala Gráfica





7.2. FISIOGRAFÍA Y TOPOGRAFÍA

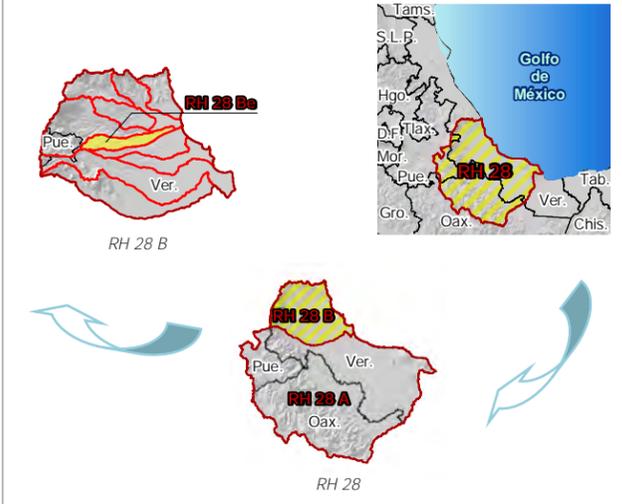
La Subcuenca del río La Antigua se encuentra sobre las subprovincias fisiográficas denominadas Chiconquico y Llanura Costera Veracruzana, las cuales pertenecen a la “Provincia Fisiográfica X Eje Neovolcánico Transversal” y a la “Provincia Fisiográfica XIII Llanura Costera del Golfo Sur” respectivamente.

El Eje Neovolcánico Transversal se conforma de aluviones antiguos, lomeríos basálticos y llanuras de piso rocoso. La primera sección (lomerío de aluvión antiguo) se localiza en dirección Oeste, en la parte alta de la subcuenca donde el terreno es muy abrupto, escabroso e irregular; en este sitio nace el río La Antigua. Por otro lado, el lomerío basáltico es una zona ligeramente más uniforme, los cauces comienzan a tomar forma y a disectar el terreno con algunas cañadas levemente profundas que desfilan en sentido de los cauces de segundo orden. En la tercera sección se observa una pequeña llanura de piso rocoso, disectada por los cauces de segundo y tercer orden que forman pequeños cañones de rugosidad media, el terreno posee una forma convexa.

La Llanura Costera del Golfo Sur se integra por dos topoformas. La primera (lomeríos típicos) se distribuye en la parte media de la subcuenca, presenta una superficie convexa dividida por los cauces de cuarto orden, en algunas zonas se observan pequeñas playas, se consideran las zonas más baja de las laderas y la transición de pendientes bajas a moderadas. La segunda topoforma (lomerío con llanura) se localiza en la parte más baja de la subcuenca, muy cerca de su desembocadura al Golfo de México, son extensiones de terreno de poca variación altitudinal, tienen una forma ligeramente convexa y de muy baja rugosidad (Ver Mapa 2).



CROQUIS DE LOCALIZACIÓN



SIMBOLOGÍA

Principales áreas urbanas		Limite de la subcuenca	
Limite estatal			
Topoformas			
Lomerio de aluvi6n antiguo		Provincia fisiográfica	
Lomerio de basalto		Subprovincia fisiográfica	
Llanura de piso rocoso			
Lomerio tpico			
Lomerio con llanuras			
Llanura aluvial costera			
Sierra volcánica			
Símbolos topográficos			
Carretera pavimentada		Corriente perenne	
Terracería		Curva de nivel acotada	
Brecha		Curva de nivel ordinaria	

INFORMACI6N GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

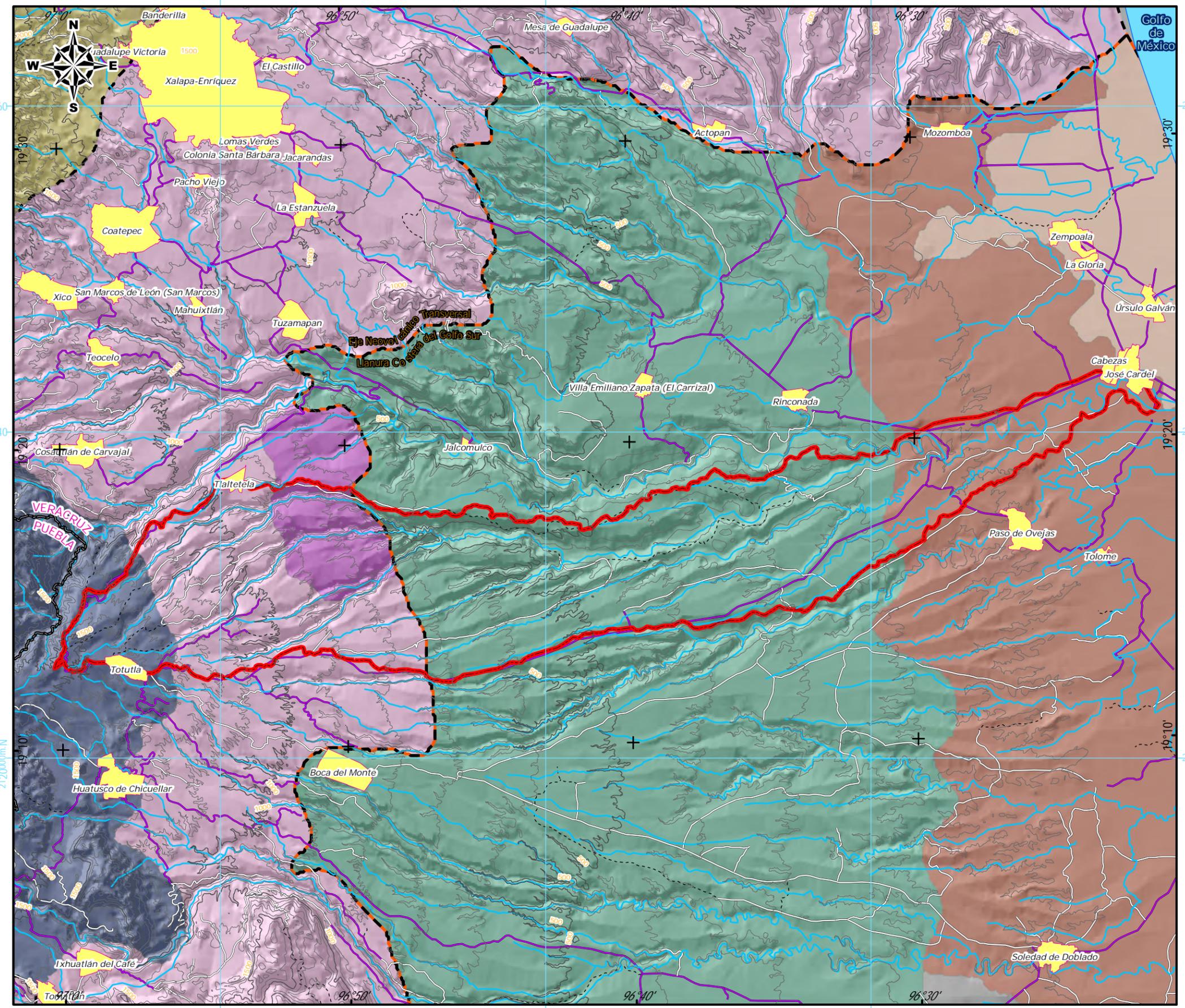
Proyecci6n Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACI6N ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACI6N EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

FISIOGRAFÍA

ELABOR6: HUGO LARIOS TLALI

Escala Gráfica





7.3. GEOLOGÍA

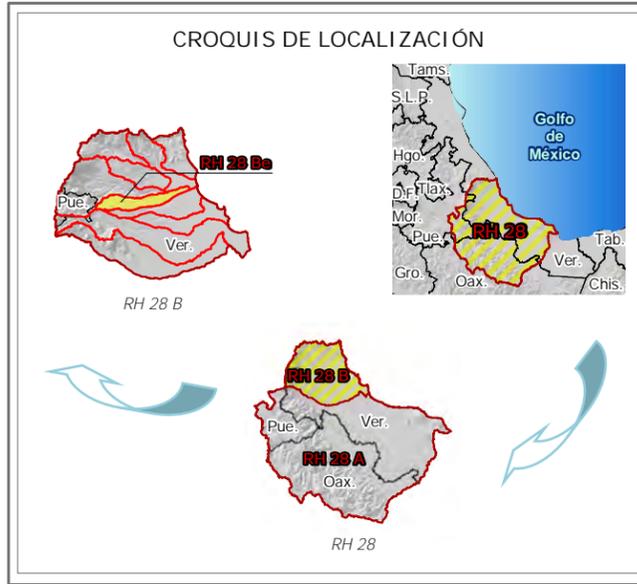
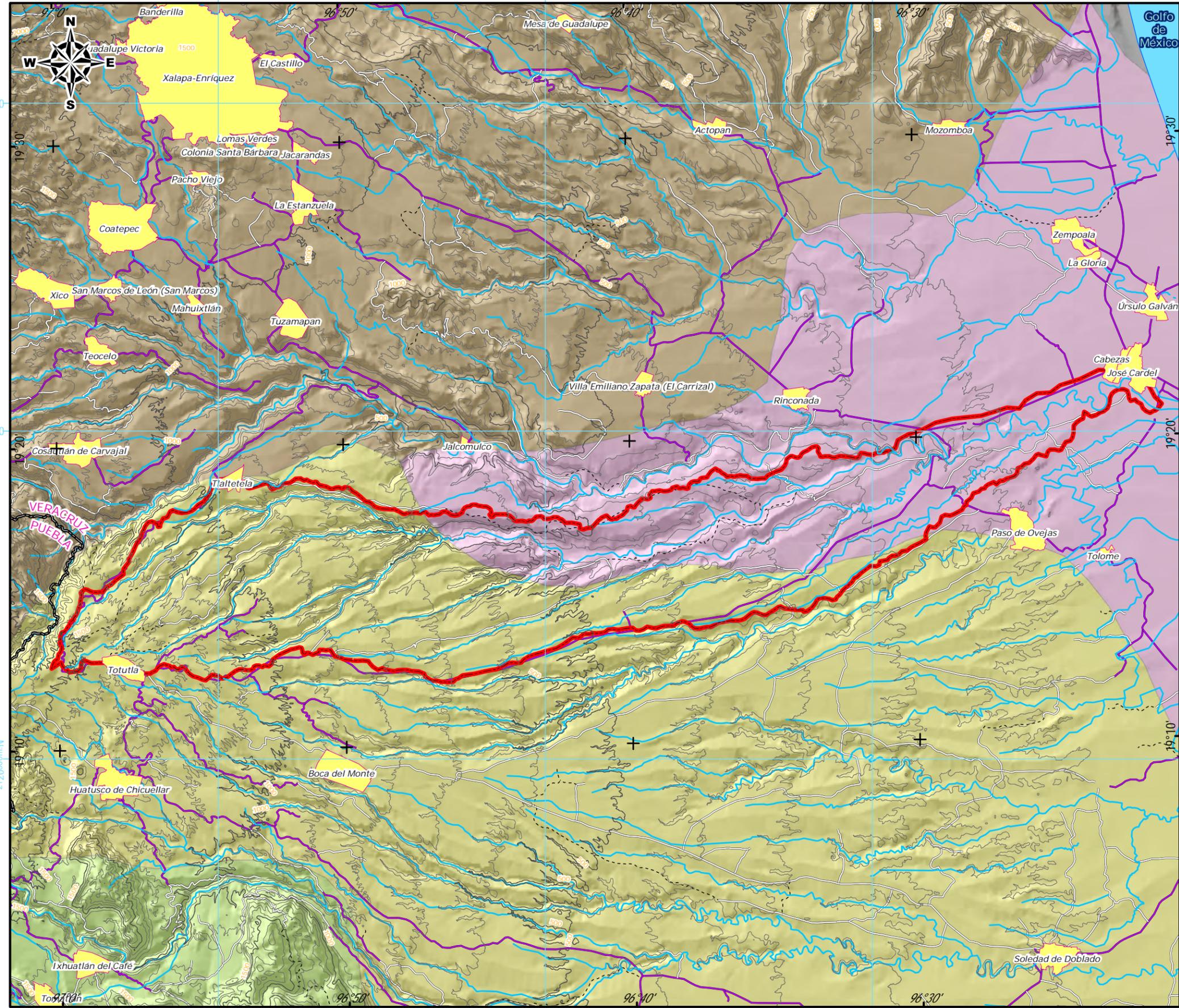
En la subcuenca predominan las areniscas y algunos depósitos aluviales y lacustres (Cuadro 8).

Cuadro 8. Tipos de rocas presentes en la subcuenca.

Era	Período	Época	Roca	Superficie (km ²)
Cenozoico	Cuaternario	Pleistoceno	Depósitos aluviales y lacustres	197.95
	Terciario	Paleógeno	Arenisca y conglomerados	310.39
		Total		508.34

La unidad predominante es la asociación arenisca-lutita que representa el 61.10 % de la subcuenca. La arenisca es una roca alóctona, esto quiere decir que se formó en un lugar distinto al que ahora se encuentra; son cuerpos preexistentes que por intemperismo y erosión formaron este tipo de rocas de fácil meteorización.

Los depósitos aluviales (que representan el 38.90 %) son materiales detríticos, transportado por un río y depositado temporalmente a lo largo de su llanura de inundación, se componen normalmente por arenas y gravas. En el Mapa 3 se observa la distribución de las unidades geológicas dentro del área de estudio.



SIMBOLOGÍA

Principales áreas urbanas		Limite de la subcuenca	
Limite estatal			
Tipo de rocas			
Rocas volcánicas (lavas, brechas y tobas)			
Areniscas y conglomerados			
Depósitos aluviales y lacustres			
Rocas sedimentarias marinas (calizas)			
Simbolos topográficos			
Carretera pavimentada		Corriente perenne	
Terracería		Curva de nivel acotada	
Brecha		Curva de nivel ordinaria	

INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

GEOLOGÍA

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI



7.4. CLIMA

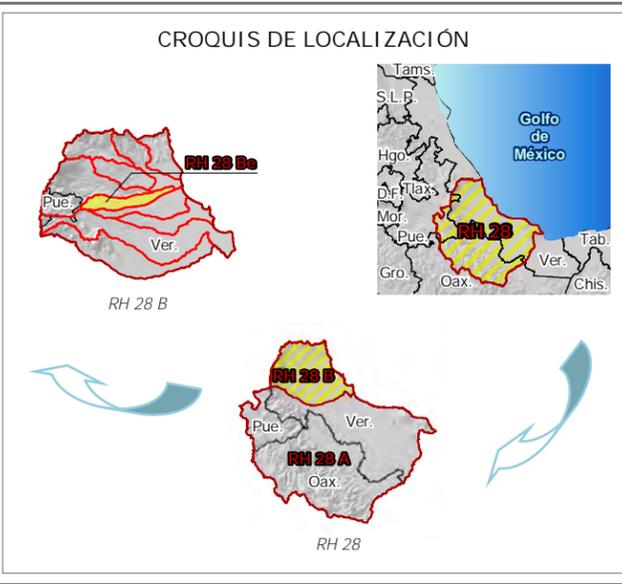
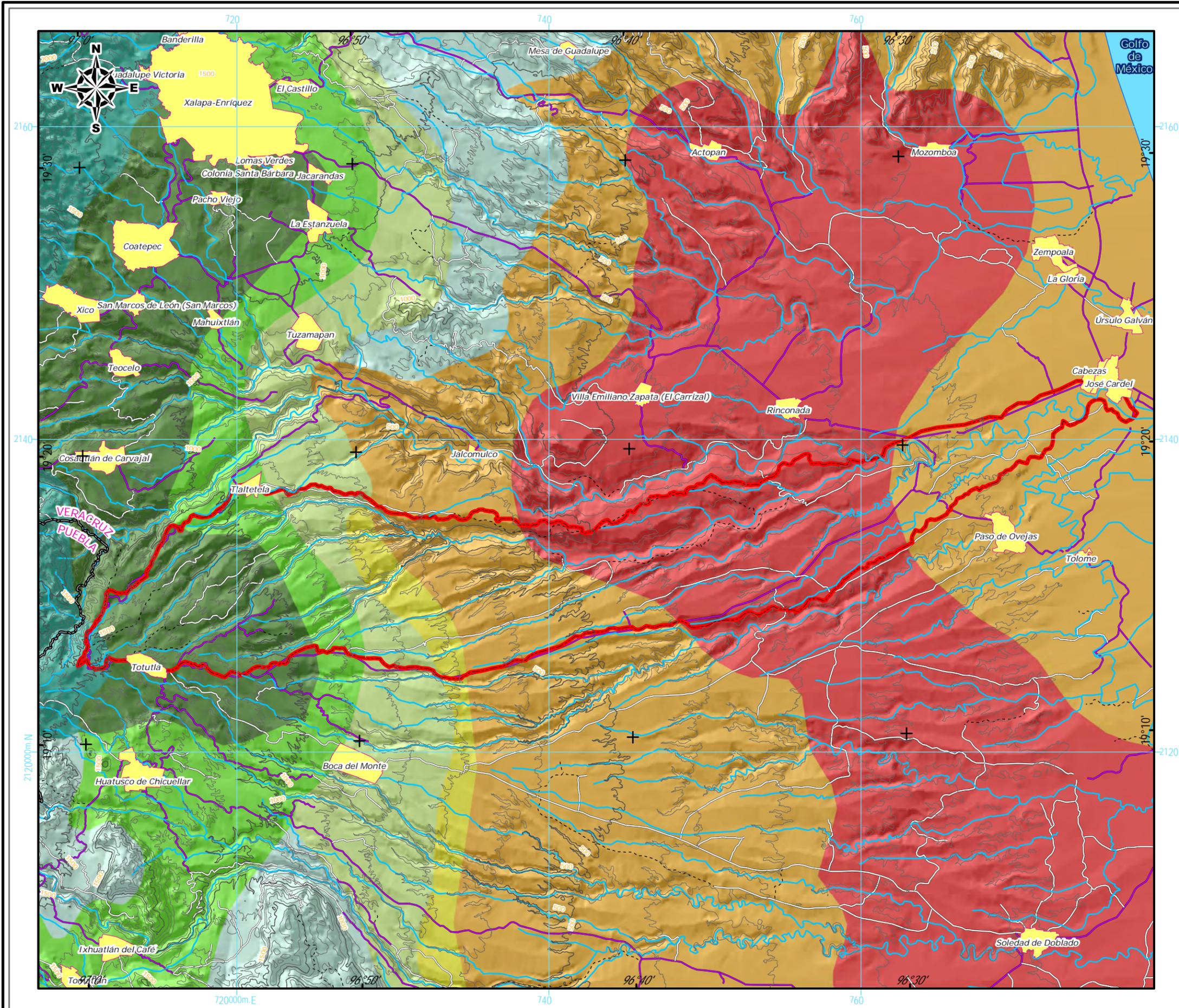
Para la clasificación climática de la subcuenca se utilizó la metodología propuesta por Köppen modificada por Enriqueta García, dando como resultado siete unidades climatológicas, seis pertenecen al Grupo A y uno al Grupo C (Cuadro 9).

Cuadro 9. Descripción de las unidades climatológicas de la subcuenca.

Tipo	Clave	Temperatura	Precipitación
A	Awo	Cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C.	Precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
	Aw1		Precipitación del mes más seco menor de 60 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55.3 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
	Aw2		Precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55.3 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
	(A)C(w2)	Semicálido húmedo, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.	Precipitación del mes más seco menor a 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
	(A)C(m)(f)		Con precipitación anual mayor de 500 mm y precipitación del mes más seco mayor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.
	(A)C(fm)		Precipitación del mes más seco mayor a 40 mm; lluvias entre verano e invierno y porcentaje de lluvia invernal menor al 18% del total anual.
C	C(f)	Templado húmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente por debajo de 22°C.	Precipitación en el mes más seco mayor de 40 mm; lluvias todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.



La parte más cálida se localiza en dirección Oeste de la subcuenca, sobre la llanura costera, mientras que las temperaturas más bajas y zonas más lluviosas se presentan en la parte alta, en las faldas de la subprovincia fisiográfica conocida como Chiconquiaco –perteneciente al Eje Neovolcánico Transversal–. En este caso, se observa una fuerte relación entre la altitud y la orografía con la variación térmica: la temperatura disminuye conforme aumenta la altitud, y las precipitaciones son mayores en la parte alta que en la llanura costera (Mapa 4).



SIMBOLOGÍA

Principales áreas urbanas		Limite de la subcuenca	
Limite estatal			
Unidades climáticas			
Awo			
Aw1			
Aw2			
(A)C(w2)			
(A)C(m)(f)			
(A)C(fm)			
C(f)			
Simbolos topográficos			
Carretera pavimentada		Corriente perenne	
Terracería		Curva de nivel acotada	
Brecha		Curva de nivel ordinaria	

INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

CLIMA

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





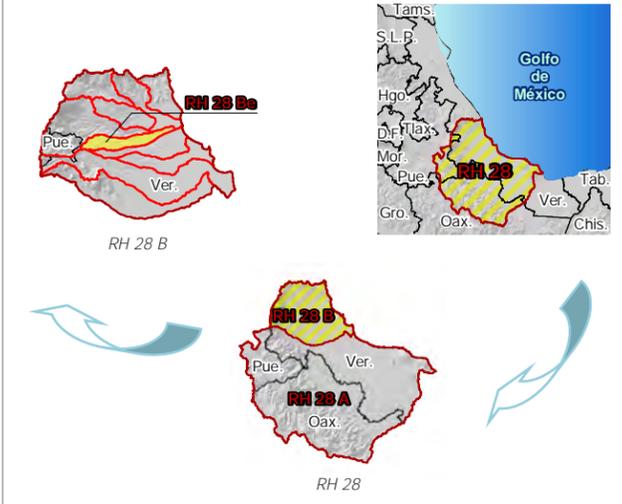
7.5. SUELOS

A partir de la sobreposición del límite de la subcuenca y la carta edafológica digital del Instituto Nacional de Estadística Geografía (INEGI) (2004) escala 1:250,000, se ubicaron 5 unidades principales de suelos: Feozems, Acrisoles, Andosoles, Litosoles, y Vertisoles que corresponden al Sistema de Clasificación de Suelos WRB-2000. En el Mapa 5 se observa la distribución de estas unidades y en el Cuadro 10 la superficie ocupada por cada una de ellas.

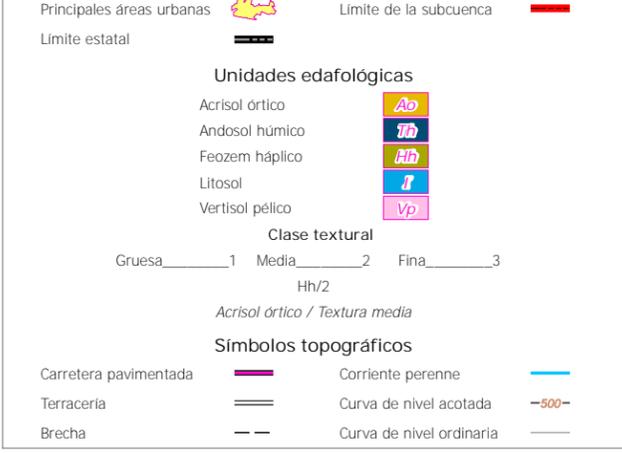
Cuadro 10. Unidades edafológicas presentes en la subcuenca.

Grupo de suelos	Textura	Clave	Superficie (km ²)	Porcentaje (%)
Vertisol pélico	Fina	Vp/3	271.69	53.44
Acrisol órtico	Media	Ao/2	110.73	21.78
Litosol	Media	I/2	98.30	19.34
Feozem háplico	Media	Hh/2	26.92	5.30
Andosol húmico	Media	Th/2	0.10	0.02
Uso urbano			0.60	0.12
	Total		508.34	100.00

CROQUIS DE LOCALIZACIÓN



SIMBOLOGÍA



INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

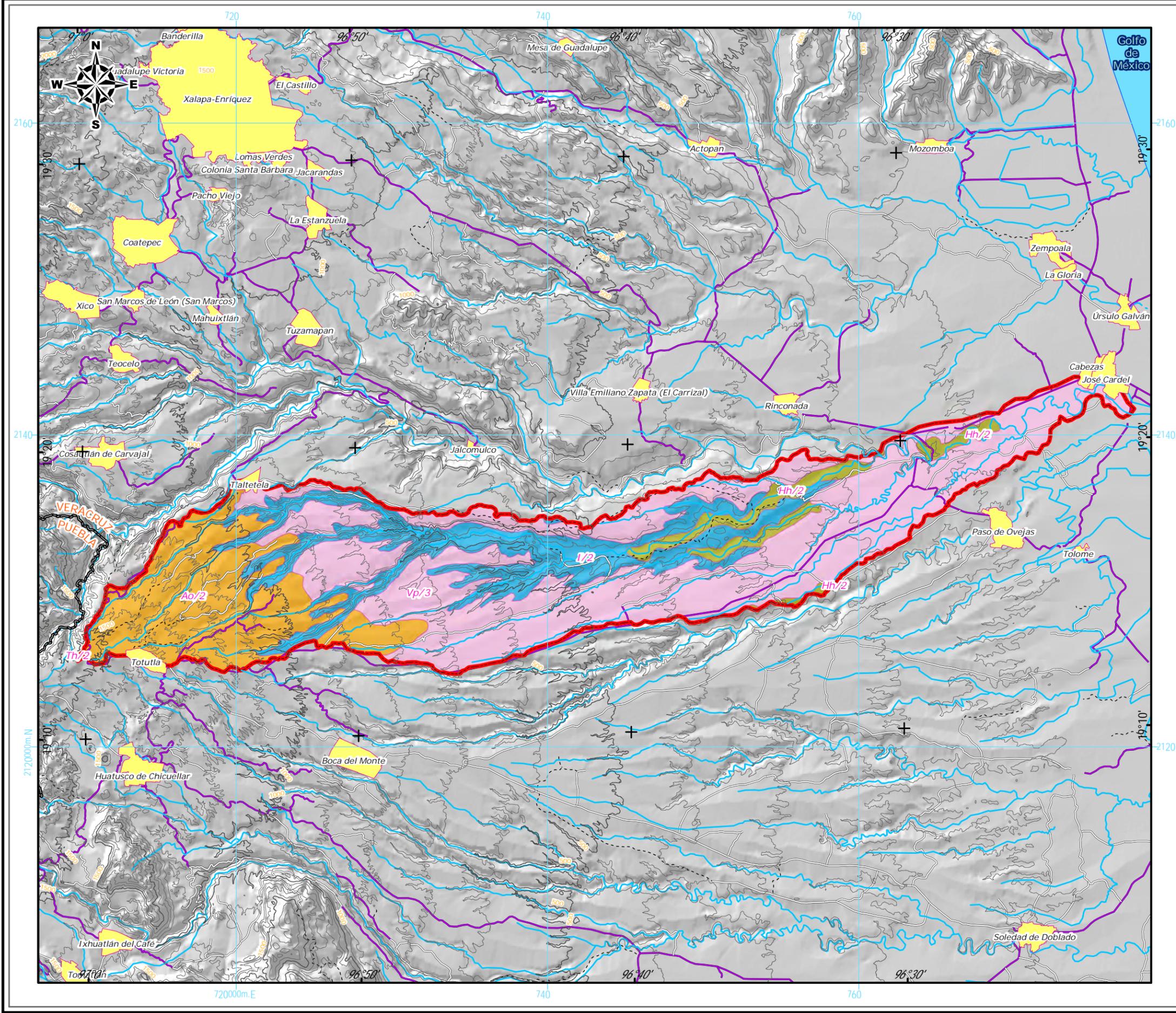
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

EDAFOLOGÍA

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI

Escala Gráfica





7.6. USO DE SUELO Y VEGETACIÓN

A través de la clasificación supervisada de imágenes satelitales *RapidEye*, la revisión de la carta de Uso de suelo y vegetación Serie IV (INEGI, 2012) y la verificación en campo, se determinó que en la subcuenca existen 6 clases principales de uso de suelo y vegetación:

- a) agricultura
- b) pastizal cultivado
- c) bosque de encino
- d) bosque de coníferas
- e) selva baja caducifolia
- f) selva mediana subcaducifolia

El uso de suelo predominante es la agricultura, ocupa una superficie de 322.34 km² lo que representa 63.41% (Cuadro 11), varía la temporalidad y duración de los cultivos en relación a la humedad (precipitación) o disponibilidad del agua en cada región.

Cuadro 11. Uso de suelo y vegetación de la subcuenca.

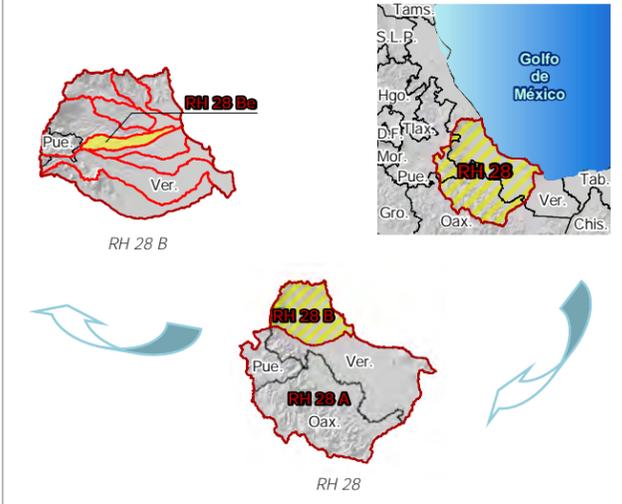
Uso de suelo	Superficie (km ²)	Porcentaje (%)
Agricultura de temporal de ciclo semipermanente	7.83	1.54
Agricultura de temporal de ciclo semipermanente permanente	114.17	22.46
Agricultura de temporal de ciclo permanente	26.52	5.22
Agricultura de temporal de ciclo anual	29.85	5.87
Agricultura de temporal de ciclo anual semipermanente	78.15	15.37
Agricultura de temporal de ciclo anual permanente	59.28	11.66
Agricultura de humedad de ciclo semipermanente permanente	1.93	0.38
Agricultura de riego de ciclo semipermanente	4.62	0.91
Pastizal cultivado de ciclo permanente	118.61	23.33
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	3.18	0.63



Uso de suelo	Superficie (km ²)	Porcentaje (%)
Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino	17.98	3.54
Bosque de coníferas primario con desarrollo arbóreo mediano	3.46	0.68
Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia	32.12	6.32
Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia	3.12	0.61
Vegetación secundaria arbustiva de selva mediana subcaducifolia	5.27	1.04
Zona urbana	2.25	0.44
Total	508.34	100.00

En el Mapa 6 se muestra la distribución de las seis clases de uso de suelo y vegetación.

CROQUIS DE LOCALIZACIÓN



SIMBOLOGÍA

Principales áreas urbanas		Limite de la subcuenca	
Limite estatal		Uso de suelo y vegetación	
Agricultura de temporal		Vegetación secundaria arborea	
Agricultura de humedad		Vegetación secundaria arbustiva	
Agricultura de riego		Bosque de encino	
Pastizal		Bosque de coníferas	
Selva baja caducifolia		Selva mediana subcaducifolia	
Selva mediana subcaducifolia		Zona urbana	
Zona urbana		Símbolos topográficos	
Carretera pavimentada		Corriente perenne	
Terraceria		Curva de nivel acotada	
Brecha		Curva de nivel ordinaria	

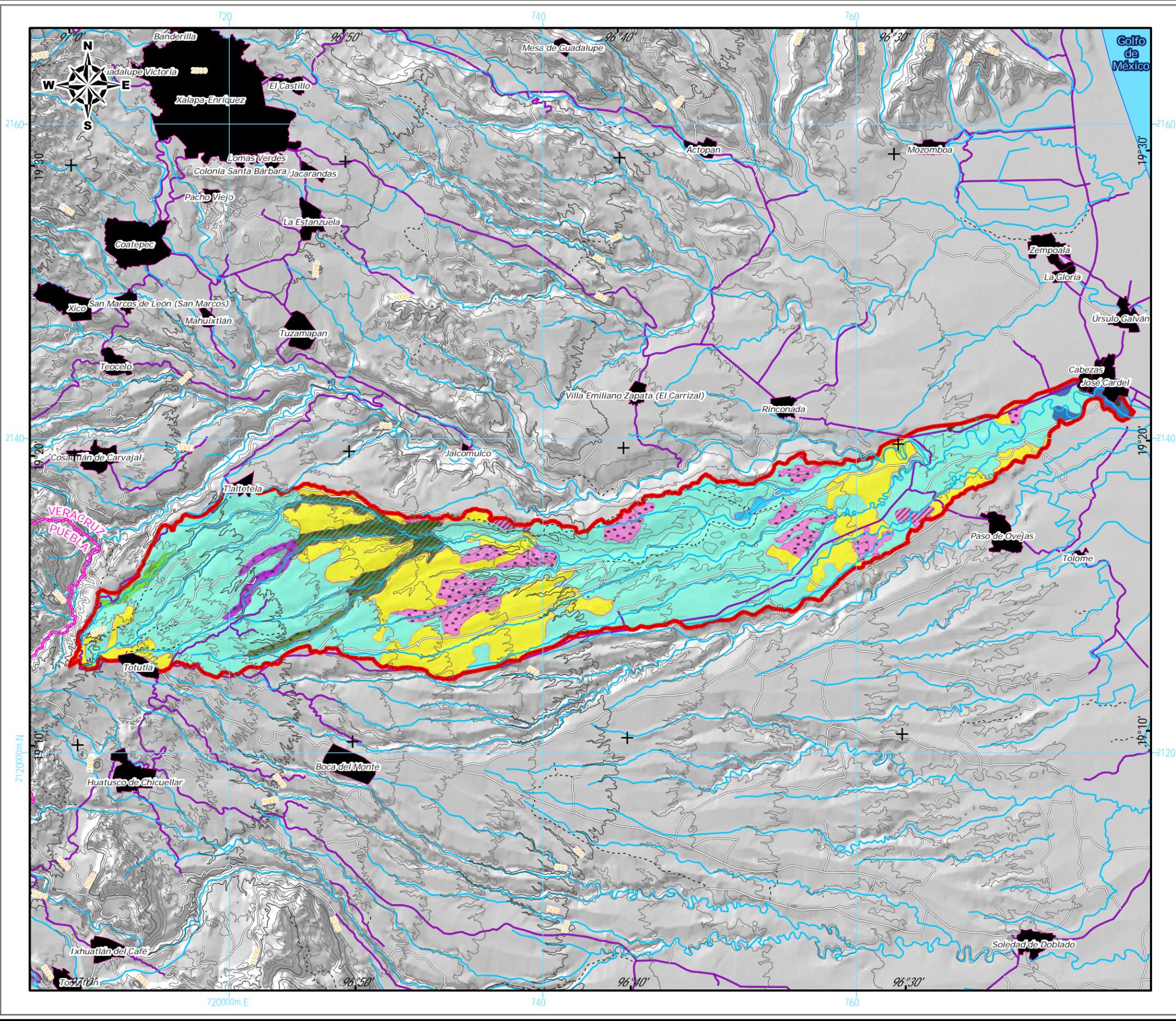
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





7.7. POBLACIÓN

En los últimos 50 años los seres humanos han cambiado los ecosistemas más rápida y extensamente que en cualquier periodo comparable de la historia humana, en gran parte para satisfacer las demandas crecientes de alimento, agua, madera, fibras y combustibles (Reid, 2005).

Estos cambios han generado bienestar humano y desarrollo económico, pero también consecuencias negativas ambientales que no están incluidas en el costo de producción (Góndola, 2011).

Por lo anterior es importante realizar un estudio y análisis sobre la población existente en la subcuenca para evaluar la presión que ejercen sobre los ecosistemas y sus recursos naturales.

La subcuenca se conforma por siete municipios, todos pertenecientes al estado de Veracruz, pero solo Tenampa está completamente dentro de los límites de la subcuenca, los otros seis comparten parcialmente su área. El Cuadro 12 muestra la superficie de cada municipio en la zona de estudio.

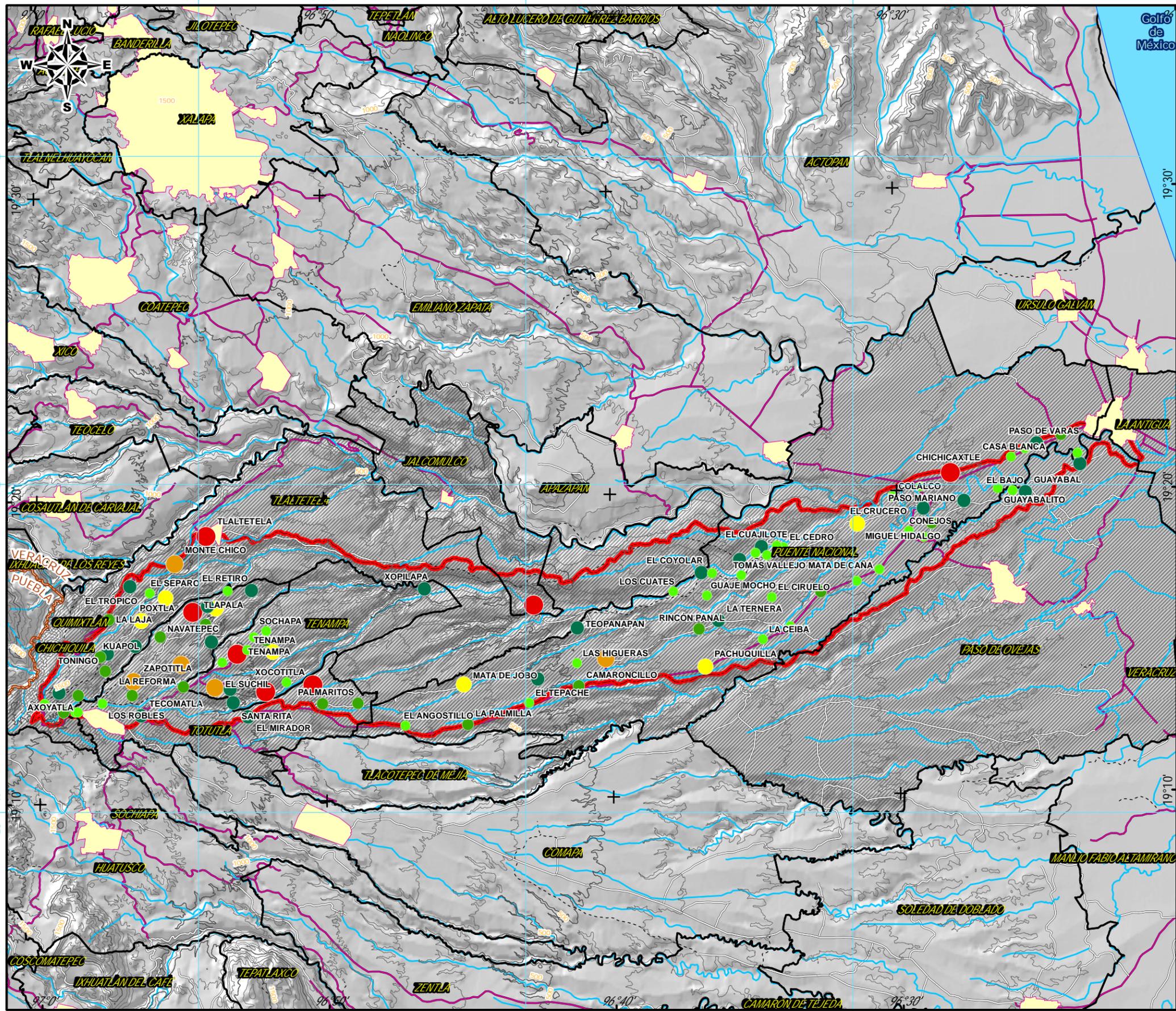
Cuadro 12. Municipios que conforman la subcuenca.

Municipio	Superficie total del municipio (km ²)	Superficie del municipio dentro de la subcuenca	
		km ²	%
Jalcomulco	72.35	6.47	8.94
La Antigua	131.71	2.49	1.89
Paso de Ovejas	388.02	22.17	5.71
Puente Nacional	383.99	202.95	52.85
Tenampa	65.33	65.33	100.00



Municipio	Superficie total del municipio (km ²)	Superficie del municipio dentro de la subcuenca	
		km ²	%
Tlaltetela	278.60	146.88	52.72
Totutla	97.78	62.05	63.46
	Total	508.34	

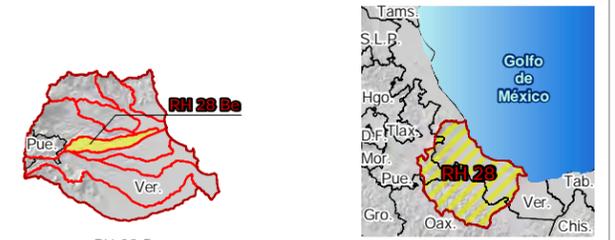
En la subcuenca existen 96 localidades, 44 pertenecen al municipio de Puente Nacional, 18 a Totutla, 16 a Tlaltetela, 14 a Tenampa, 3 a Paso de Ovejas y solo 1 a Jalcomulco (ver Mapa 7). De acuerdo al Censo de Población INEGI (2010) en ellas habitan 34,877 personas, de las cuales 17,405 son hombres y 17,375 mujeres.



COLEGIO DE POSTGRADUADOS
POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS



CROQUIS DE LOCALIZACIÓN



SIMBOLOGÍA

Principales áreas urbanas		Limite municipal	
Limite estatal		Limite de la subcuenca	
Municipios que integran la subcuenca			
Población			
1 - 100 habitantes			
101 - 250			
251 - 500			
501 - 750			
751 - 1,000			
Mayor a 1,000			
Símbolos topográficos			
Carretera pavimentada		Corriente perenne	
Terracería		Curva de nivel acotada	
Brecha		Curva de nivel ordinaria	

INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

MUNICIPIOS Y LOCALIDADES

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI

Escala Gráfica





CAPÍTULO 8. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se describe el procedimiento para simular eventos de precipitación extraordinaria relacionados a fenómenos hidrometeorológicos, que en conjunto con las características morfométricas del río La Antigua y la geografía de la subcuenca, permitieron delimitar las zonas con riesgo a inundación.

8.1. MATERIALES

A continuación se describen las fuentes de información consultadas durante la investigación.

A. Información antecedente

- Boletines meteorológicos e hidrológicos referente a huracanes y tormentas tropicales.
- Diagnósticos, evaluaciones y/o notas periodísticas sobre los daños ocasionados a la población por la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos.
- Libros y textos relacionados al manejo de cuencas, hidrología superficial, hidráulica y demás temas afines.
- Artículos científicos, tesis de licenciatura y de posgrado cuya investigación hace referencia al uso de modelos hidráulicos e hidrológicos.
- Estudios o proyectos que contienen información específica como la existencia de obras de protección marginal y sus principales características en la Subcuenca del río La Antigua.
- Tutoriales de modelos hidráulicos.
- Manuales o metodologías para generar mapas de riesgo, control de inundaciones, clasificación climática, etcétera.
- Anuarios de información histórica y estadística, como censos de población, registros de producción, entre otros.
- Recorridos de prospección y puntos de control en campo.



B. Información meteorológica

Se revisaron los siguientes acervos que contienen información meteorológica:

- Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III) Versión 2013 editado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)
- Estaciones Meteorológicas a cargo del SMN
- Estaciones Meteorológicas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)
- Estaciones Meteorológicas de la CFE
- Información proporcionada por la Dirección Técnica del Organismo de Cuenca Golfo Centro (OCGC) de la CONAGUA
- Datos vectoriales de Unidades Climáticas escala 1:1,000,000

C. Información hidrométrica

Para el análisis hidrométrico se consideraron estaciones hidrométricas localizadas en el río La Antigua, para ello se consultaron:

- Boletines hidrológicos
- Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS)
- Datos registrados por la Dirección Técnica del OCGC

D. Información biofísica

Para caracterizar íntegramente el sistema y garantizar la correcta adaptación del modelo, se recopiló y analizó la siguiente información:

- Cartas Digitales
 - Datos vectoriales del Continuo Nacional de Uso de Suelo y Vegetación Serie IV escala 1:250,000
 - Datos vectoriales del Continuo Nacional Edafológico escala 1:250,000
 - Datos vectoriales del Continuo Nacional Fisiográfico escala 1:1,000,000
 - Datos vectoriales del Continuo Nacional de Subprovincias Fisiográficas escala 1:1,000,000



- Datos vectoriales del Continuo Nacional de Topoformas escala 1:1,000,000
- Datos vectoriales del Continuo Nacional Geológico escala 1:250,000
- Datos vectoriales de Topónimos (Localidades y vías de comunicación) escala 1:1,000,000
- Cartas impresas
 - Cartas Topográficas E14B37, E14B38, E14B47 y E14B48
- MDE LiDAR tipo Terreno con resolución horizontal de 5 m y 25 cm en la vertical
- Datos vectoriales de la RH 28, Subregión 28B, y Subcuencas RH28Be y RH28Bf, escala 1:50,000

E. Imágenes de satélite

Se utilizaron dos tipos de imágenes satelitales:

- Imágenes satelitales Rapideye. Tomadas del 22 de octubre al 01 de noviembre 2010, con una resolución espacial de 5 m y una resolución espectral de cinco bandas (azul, verde, rojo, borde del rojo e infrarrojo cercano). Para cubrir el área de la subcuenca se ocuparon 6 imágenes, cada una tiene un ancho de observación de 25 km (Figura 14).

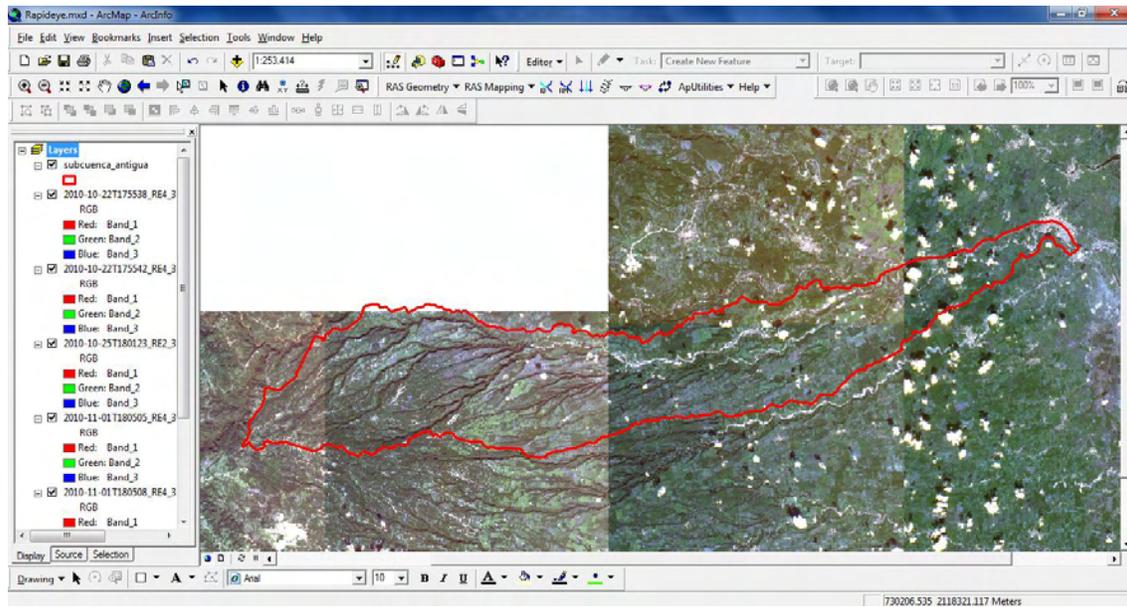


Figura 14. Mosaico de imágenes satelitales Rapideye.

- Imágenes satélites del programa informático Google Earth Pro. Se descargaron 110 cuadros, su alta resolución permite ver los detalles del terreno, alcanza una escala 1:1,000 (Figura 15).

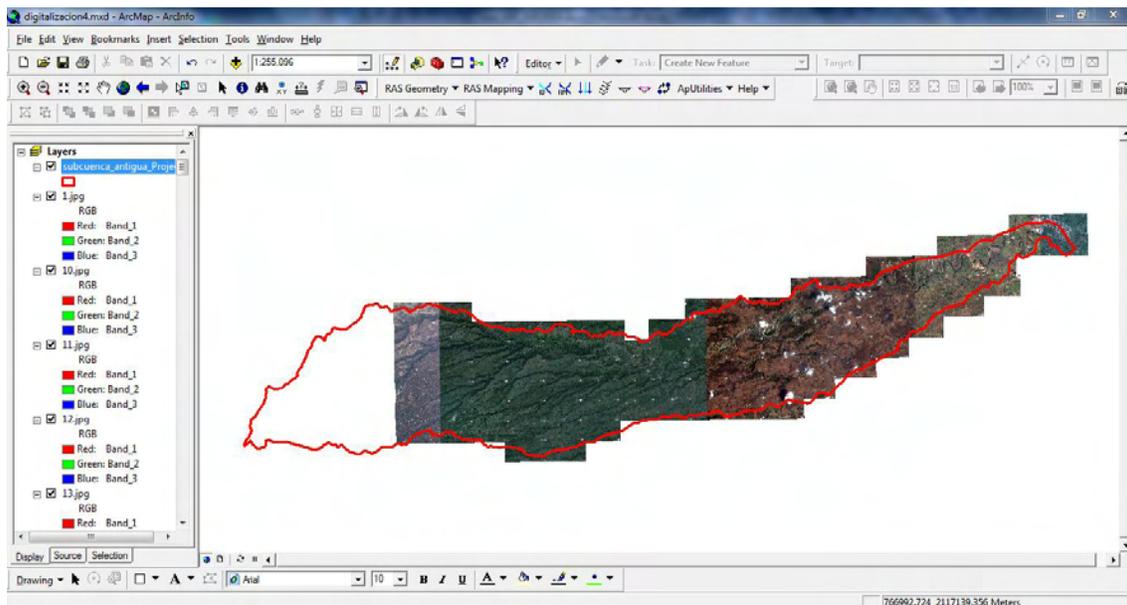


Figura 15. Imágenes satelitales de Google Earth Pro.



No se cubrió la parte alta de la subcuenca debido a que los afluentes considerados en la modelación hidráulica no se perciben desde su nacimiento; dicho de otra forma, las imágenes se descargaron según la visualización del río La Antigua y afluentes.

F. Hardware y Software

Se utilizó una computadora personal con las siguientes características técnicas:

- Marca: Toshiba Satellite L635-SP3012M
- Sistema operativo: Windows 7 Ultimate de 64 bits
- Procesador: Intel[®] Core[™] i3 CPU 2.40 GHz
- Memoria instalada (RAM): 4.00 GB
- Capacidad de Disco Duro: 500 GB
- Velocidad de red: 65.0 Mbps
- Resolución de pantalla: 1366 x 768 color verdadero (32 bits)

Los programas computacionales utilizados fueron:

- Auto CAD[®] 2013
- ArcView[®] 3.3
- ArcGis[®] 9.3
- HEC-RAS[®] 4.1.0.
- HEC-GeoRAS[®]
- Google Earth Pro[®]
- WMS[®] 8.3
- Microsoft Office 2010[®] (Word, Excel y PowerPoint)



8.2. METODOLOGÍA

8.2.1. Elaboración del mapa base

En México se han hecho múltiples esfuerzos para generar una base estandarizada de datos hidrográficos, como resultado se obtuvieron cuencas con límites que varían según el procedimiento de la institución generadora.

Con el objetivo de homogenizar criterios y metodologías para la delimitación de cuencas, el INEGI, INE (Instituto Nacional de Ecología) y CONAGUA, elaboraron el Continuo Nacional de Cuencas Hidrográficas (escala 1:50,000), el cual establece una sola toponimia y permite una visión común del territorio para cualquier usuario que requiera conocer la configuración de las cuencas a nivel nacional.

Considerando esta premisa, se elaboró el Mapa Base utilizando la delimitación de cuencas y subcuencas que el INEGI publica en su página WEB:

<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/hidrologia/Descarga.aspx>

Una vez que se descargó el vectorial en formato *shape*, se afinó el límite de la subcuenca utilizando el MDE LiDAR y las curvas de nivel bajo el entorno de ArcMap 9.3 (Figura 16). El Mapa 1 muestra el límite de la Subcuenca RH28Be (R. La Antigua), considerada en este proyecto como la unidad base para la simulación hidráulica.

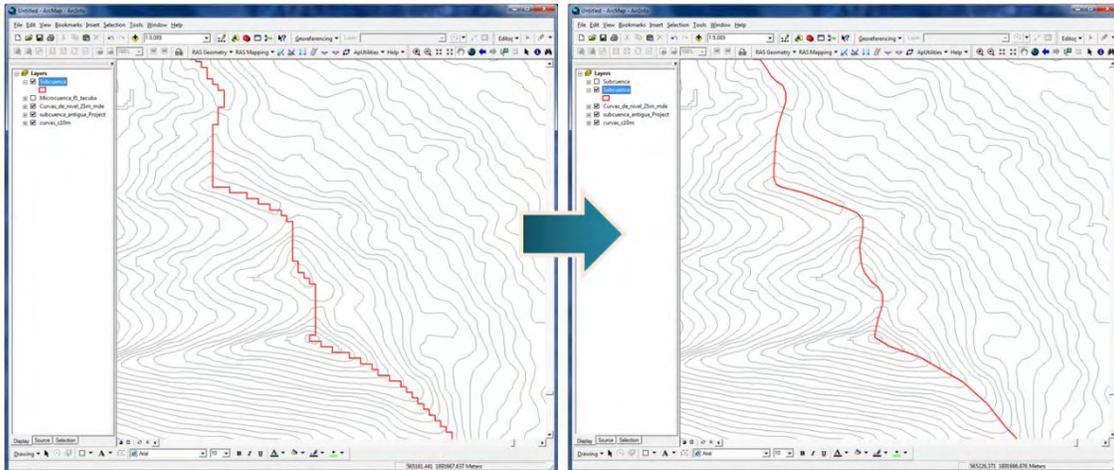


Figura 16. Imágenes satelitales de Google Earth Pro.

8.2.2. Información meteorológica

En este apartado se presenta el análisis de precipitación con base en los registros de 24 estaciones meteorológicas.

8.2.2.1. Recopilación de información

El inventario se formó de estaciones que cumplieron las siguientes especificaciones:

- a) Deben localizarse dentro de la subcuenca, en su defecto, a no más de 10 km fuera del parteaguas
- b) cada estación deberá tener un mínimo de 30 años de registro
- c) cada estación debe tener más del 80% de la información de su registro total

El Cuadro 13 presenta los metadatos de las 24 estaciones que integran el inventario.

Cuadro 13. Metadatos de las estaciones meteorológicas de la subcuenca.

No.	Clave	Nombre	Longitud	Latitud	Altitud
1	30003	Actopan	19.50	-96.61	250
2	30007	Almolonga	19.59	-96.78	770



No.	Clave	Nombre	Longitud	Latitud	Altitud
3	30021	Carrizal	19.32	-96.65	250
4	30026	Coatepec	19.46	-96.94	252
5	30056	El Tejar	19.07	-96.16	10
6	30068	Idolos	19.41	-96.52	100
7	30072	Ixhuatlan del Café	19.05	-96.99	306
8	30087	Las Animas	19.50	-96.89	115
9	30101	Manlio Fabio Altamiramo	19.09	-96.34	44
10	30128	Perote	19.58	-97.25	415
11	30136	Puente Jula	19.20	-96.34	45
12	30137	Puente Nacional (CFE)	19.33	-96.48	110
13	30140	Rancho Viejo	19.45	-96.78	880
14	30141	Rinconada	19.35	-96.56	313
15	30158	Santa Rosa	19.47	-96.46	48
16	30175	Tembladeras	19.52	-97.12	316
17	30178	Tenextepec	19.49	-97.26	266
18	30179	Teocelo	19.39	-96.97	218
19	30187	Totutla	19.21	-96.96	446
20	30193	José Cardel	19.37	-96.37	28
21	30266	El Diamante	19.45	-96.54	110
22	30339	Cerro Gordo	19.43	-96.70	580
23	30342	Centro Regional Huatusco	19.15	-96.95	344
24	30452	Briones	19.51	-96.95	132

8.2.2.2. Complemento de datos faltantes

La precipitación es una variable meteorológica de gran importancia para conceptualizar un sistema hidrológico (Giddings y Soto, 2006). Desafortunadamente la falta de esta información limita la capacidad de análisis y constituye una fuente de error adicional en los balances hidrológicos.



Actualmente existen varios modelos capaces de generar, completar o interpolar datos de precipitación y otras variables meteorológicas, algunos utilizan modelos regresivos univariados, multivariados o la interpolación con Kriging, entre otros (Sveinsson *et al.*, 2007).

El presente trabajo aplicó el Método de U.S. National Weather Service que según Guevara (1987) genera los datos faltantes mensuales o anuales de una estación con base en los registros de estaciones cercanas, la relación utilizada es:

$$P_x = \frac{\sum(P_i W_i)}{\sum W_i} \quad (10)$$

donde:

P_x = dato buscado (mm)

P_i = precipitación observada en las estaciones auxiliares circundantes (mm), registrada el día o la fecha faltante (pueden ser como mínimo dos)

$W_i = \frac{1}{D_i^2}$ = siendo D_i la distancia promedio de las estaciones circundantes y la estación incompleta (Km)

8.2.2.3. Análisis de la precipitación diaria

El análisis de precipitación se realizó para las 24 estaciones que integran el inventario, cada estación tiene en promedio 14,965 datos (sin considerar datos faltantes), que corresponden a un registro diario durante 41 años (de 1970 a 2010).

El Cuadro 14 muestra un bosquejo de la matriz que reúne los datos de precipitación registrados durante 41 años por la estación meteorológica 30140 Rancho Viejo.



Cuadro 14. Registros de precipitación de la estación meteorológica 30140 Rancho Viejo (1970-2010).

No.	Año	Mes	Día	Precipitación (mm / 24 hr)
1	1970	1	1	0.2
2	1970	1	2	0.9
3	1970	1	3	2.8
...
14,963	2010	12	29	0.0
14,964	2010	12	30	13.2
14,965	2010	12	31	37.7
Estadísticos				
		Media		3.16
		Desviación Estándar		10.27
		Máximo		192.00
		Mínimo		0.00

Con la matriz anterior, se generó el pluviograma que incluye todos los datos registrados por la estación 30140 (Figura 17).

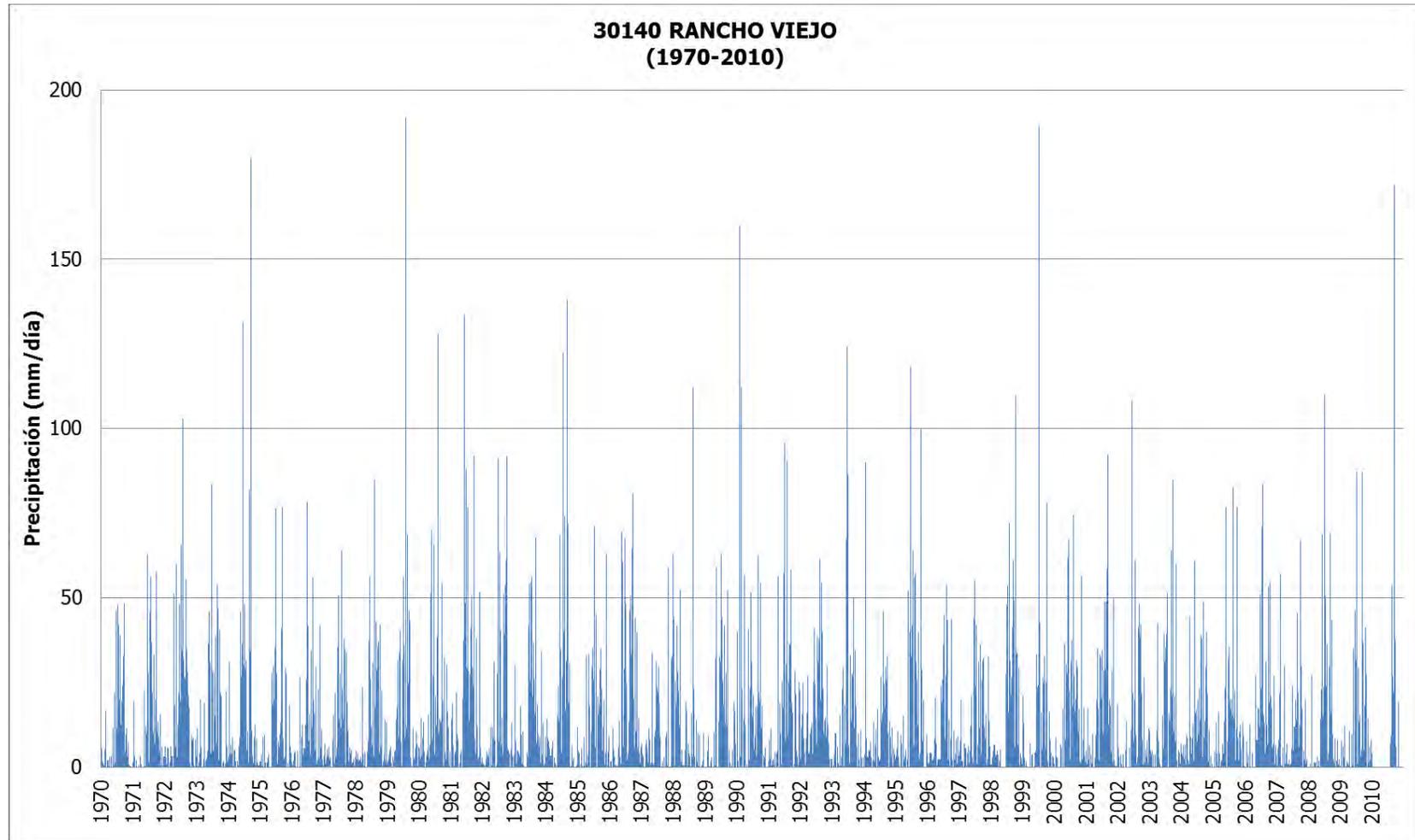


Figura 17. Precipitación diaria de la estación meteorológica 30140 Rancho Viejo.



En la Figura 17 se observa que en 5 años (1974, 1979, 1990, 1999 y 2010) se registró una precipitación mayor a 150 mm/24 hr. Aun cuando la media es de 3.16 mm/24 hr, la máxima es de 192 mm/24 hr, registrada el 5 de agosto 1979. La lluvia asociada al huracán Karl es 172 mm/24 hr, la segunda más grande registrada en 41 años.

8.2.2.4. Análisis de la precipitación máxima diaria mensual

La precipitación máxima diaria mensual (P_{MDM}) se determina con la siguiente relación:

$$P_{MDM} = \text{Max}[Pr_1, Pr_{\text{días que tiene el mes}}] \quad (11)$$

donde:

Max = valor máximo (mm)

Pr_1 = precipitación observada el día 01 del mes (mm)

$Pr_{\text{días que tiene el mes}}$ = precipitación observada el último día del mes (mm)

Este análisis se realizó para las 24 estaciones del inventario; sin embargo, por la gran cantidad de información que representa este análisis, únicamente se expone el proceso que seguido para una de ellas.

El Cuadro 15 muestra la P_{MDM} que se observó en la estación meteorológica 30140 Rancho Viejo durante el periodo 1970–2010.



Cuadro 15. Precipitación máxima diaria mensual de la estación meteorológica 30140 Rancho Viejo.

Año	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1970	5.4	16.7	2.0	3.1	11.7	46.2	48.0	39.0	48.1	11.3	7.3	0.2
1971	19.5	2.0	3.3	0.9	22.5	63.0	56.3	37.0	57.6	13.5	15.8	3.2
1972	6.1	5.5	6.1	51.0	60.0	48.1	103.0	55.6	35.0	17.7	9.2	8.1
1973	11.3	20.0	2.5	19.0	46.0	83.5	28.0	53.8	47.0	20.8	1.6	22.3
1974	31.0	8.8	5.1	1.8	45.8	131.5	48.1	81.8	180.0	8.8	12.5	1.4
1975	3.5	9.5	2.6	3.8	30.0	35.6	76.5	13.0	77.0	29.2	27.6	18.4
1976	2.0	4.5	9.2	26.7	12.5	78.4	41.8	34.5	56.0	29.7	41.9	11.2
1977	6.8	5.3	5.9	15.4	21.8	50.5	64.0	37.8	34.7	19.0	5.3	2.8
1978	4.7	2.5	23.7	4.5	7.5	56.2	30.8	85.0	37.0	42.0	22.5	14.0
1979	5.0	6.0	4.5	17.6	40.3	36.8	56.3	192.0	46.4	11.5	5.5	10.5
1980	14.5	13.3	4.5	15.5	70.0	65.9	38.5	128.0	54.4	32.2	30.1	12.0
1981	18.7	6.4	22.1	3.6	37.6	133.6	77.0	50.6	92.0	38.0	12.1	51.8
1982	1.1	4.5	5.4	12.0	31.0	91.1	63.3	14.8	54.0	91.8	5.2	13.1
1983	30.2	5.0	18.1	10.5	4.2	54.3	56.2	36.8	67.8	9.6	34.0	9.1
1984	14.3	7.6	7.7	2.8	24.0	68.6	122.5	74.0	138.2	6.5	2.6	11.8
1985	4.7	5.5	8.7	33.0	33.5	35.3	71.0	21.0	34.8	16.8	62.8	9.1
1986	1.8	11.5	1.2	13.6	69.5	67.7	48.1	46.2	81.0	44.1	39.8	13.3
1987	6.9	6.4	9.6	11.4	33.8	31.0	30.0	9.0	2.9	10.2	58.9	32.8
1988	62.8	41.8	52.2	5.2	11.2	19.2	16.0	112.3	23.1	9.9	0.0	10.0
1989	1.3	9.0	2.9	10.2	58.9	32.8	62.8	41.8	52.2	5.2	11.2	19.2



Cuadro 15. Precipitación máxima diaria mensual de la estación meteorológica 30140 Rancho Viejo (continuación).

Año	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1990	160.0	112.3	23.1	56.8	40.5	51.5	21.4	18.0	62.5	54.7	5.7	0.0
1991	8.0	11.1	4.3	56.5	18.8	57.4	96.0	90.5	58.5	16.1	28.2	25.2
1992	25.0	12.3	26.8	10.1	22.5	41.1	38.5	61.5	54.6	14.7	30.0	2.3
1993	3.5	10.0	6.0	15.2	29.2	124.3	86.5	27.6	50.1	10.0	11.0	2.8
1994	90.0	3.0	7.3	13.0	11.1	17.0	26.7	46.0	29.7	32.8	11.7	5.5
1995	10.5	3.2	9.5	15.2	52.0	118.2	64.0	57.3	40.0	100.0	19.7	9.8
1996	4.0	4.4	20.5	7.2	2.5	26.0	45.0	54.0	14.0	44.0	10.8	9.0
1997	20.0	2.0	7.0	6.3	21.0	55.0	42.0	31.0	36.0	32.3	32.7	13.5
1998	4.7	6.7	4.8	5.3	0.0	27.6	72.2	31.5	61.0	110.0	33.8	4.1
1999	21.0	1.6	7.2	3.8	4.8	33.3	189.5	26.5	32.8	78.0	16.5	3.4
2000	8.9	2.6	6.7	36.4	30.5	67.2	37.5	74.5	31.5	17.0	56.5	17.5
2001	17.3	6.5	9.7	9.5	35.2	33.2	34.5	58.6	92.3	28.3	50.0	18.5
2002	5.7	3.5	5.0	13.5	5.8	108.0	61.0	41.4	48.3	21.8	26.6	11.4
2003	5.0	3.5	11.0	42.5	15.3	39.5	51.3	22.8	85.0	60.0	10.4	7.0
2004	6.4	9.6	8.5	44.5	12.8	61.0	23.2	39.0	49.0	40.0	10.9	1.0
2005	4.5	13.0	16.5	6.9	77.0	32.0	35.7	82.5	22.6	77.0	12.5	13.0
2006	7.5	12.5	4.2	27.0	17.3	51.0	83.5	13.0	53.5	54.5	17.7	27.0
2007	8.0	57.0	5.8	30.0	2.2	24.0	12.0	45.5	67.0	30.0	20.0	2.3
2008	0.8	27.0	1.5	3.2	23.0	68.5	110.0	36.3	69.0	9.4	8.2	6.5



Cuadro 15. Precipitación máxima diaria mensual de la estación meteorológica 30140 Rancho Viejo (continuación).

Año	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2009	7.8	12.3	1.6	10.8	9.8	46.2	87.3	15.5	87.0	41.3	14.2	8.2
2010	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	NO_D	53.6	172.0	19.0	NO_D	NO_D
Estadísticos												
Media	16.8	12.6	9.6	16.9	27.6	57.8	58.9	51.0	59.4	33.1	20.8	11.6
Mediana	7.2	6.6	6.4	11.7	22.8	51.3	53.8	41.6	52.9	28.8	15.0	9.9
Desviación Est	28.4	19.1	9.5	15.3	19.9	30.2	33.2	35.0	31.4	26.4	16.1	9.9
Máximo	160.0	112.3	52.2	56.8	77.0	133.6	189.5	192.0	180.0	110.0	62.8	51.8
Mínimo	0.8	1.6	1.2	0.9	0.0	17.0	12.0	9.0	2.9	5.2	0.0	0.0



Con la matriz anterior se generó el pluviograma de P_{MDM} para el periodo de registro 1970 a 2010 (Figura 18). En la imagen se observa la tendencia de máximos, mínimos, media, mediana y desviación estándar, estadísticos que mantienen una fuerte relación con la época de lluvias y de estiaje.

La media y mediana indican que la temporada de lluvias se presenta de junio a septiembre, y la época de estiaje ocurre de diciembre a abril. La máxima precipitación se registró en agosto 1979; aunque también se registraron los meses sin lluvia: noviembre 1988, diciembre 1990 y mayo 1998.

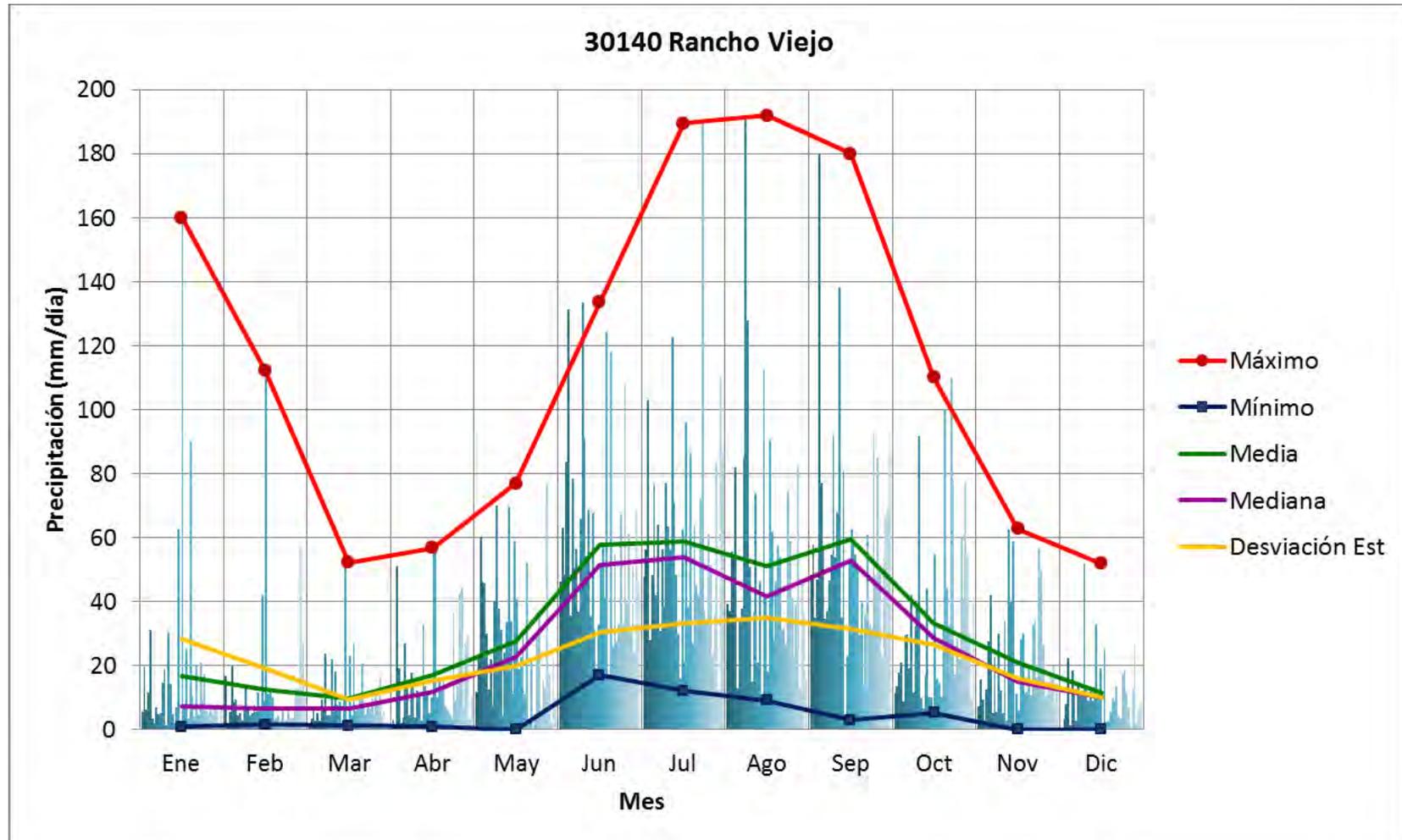


Figura 18. Precipitación máxima diaria mensual de la estación meteorológica 30140 Rancho Viejo.



8.2.2.5. Análisis de la precipitación máxima diaria anual

El análisis de P_{MDM} que se realizó anteriormente, fue la base para determinar la precipitación máxima diaria anual (P_{MDA}), la relación utilizada fue la siguiente:

$$P_{MDA} = Max[Pr_{MDM1}, Pr_{MDM12}] \quad (12)$$

donde:

Max = valor máximo (mm)

Pr_{MDM1} = P_{MDM} correspondiente al primer mes del año (mm)

Pr_{MDM12} = P_{MDM} correspondiente al último mes del año (mm)

El Cuadro 16 muestra la P_{MDA} registrada por las 24 estaciones meteorológicas. Se observa que cuatro estaciones (30021, 30101, 30137 y 30339) registraron la precipitación de 2010 como la máxima ocurrida en 41 años.

De esta matriz se generó el pluviograma de P_{MDA} (Figura 19), en la imagen también se observa la tendencia de la media y desviación estándar.



Cuadro 16. Precipitación máxima diaria anual de las 24 estaciones meteorológicas.

Año	Estación													
	30003	30007	30021	30026	30056	30068	30072	30087	30093	30101	30128	30136	30137	30140
1970	84.9	69.8	101.5	80.0	110.0	75.4	75.1	70.6	80.0	66.4	33.5	86.0	113.0	48.1
1971	60.4	40.0	46.0	63.3	206.0	95.3	101.5	68.1	71.0	100.0	28.0	100.7	78.0	63.0
1972	160.2	99.0	123.5	107.0	198.5	136	89.0	102.1	95.0	105.0	21.5	100.6	282.7	103.0
1973	183.4	65.0	72.0	85.0	100.0	222	68.0	75.0	68.0	109.5	49.4	143.5	183.0	83.5
1974	180.3	200.0	200.0	180.0	178.0	197	123.0	175.0	90.0	158.0	106.0	205.0	198.0	180.0
1975	76.9	100.0	71.0	55.0	111.5	89.2	53.5	100.1	60.0	100.0	60.0	89.2	96.0	77.0
1976	69.1	95.0	114.0	95.8	94.2	100.3	110.5	93.0	87.0	63.8	39.0	86.2	86.0	78.4
1977	42.3	56.5	43.0	73.4	151.0	84.5	64.5	86.5	64.0	50.0	19.5	120.0	65.0	64.0
1978	64.2	46.0	46.0	73.2	120.5	111.6	84.0	103.5	89.0	80.0	40.5	68.0	89.0	85.0
1979	189.2	114.5	121.0	101.3	122.5	174.2	65.0	156.0	102.0	84.0	48.5	74.0	162.0	192.0
1980	58.6	93.5	94.0	268.0	136.0	60	84.6	84.9	109.0	162.0	86.0	206.0	88.4	128.0
1981	113.9	84.0	100.0	76.0	151.5	118.5	85.0	69.9	103.0	137.8	61.5	145.0	118	133.6
1982	103.0	60.0	52.0	77.0	94.2	100	90.0	62.0	72.5	65.5	43.5	80.0	65.5	91.8
1983	55.0	75.0	82.0	78.3	118.0	61.8	62.0	101.0	101.0	148.0	22.8	74.0	125.0	67.8
1984	100.4	129.5	122.5	97.0	180.0	84.7	91.0	83.0	83.0	120.5	48.8	125.0	93.5	138.2
1985	73.4	70.0	65.0	61.0	211.5	119	102.0	80.0	87.5	109.5	40.6	133.5	80.4	71.0
1986	101.0	80.4	75.0	72.0	83.0	137	77.5	56.0	89.4	120.0	35.0	103.0	98.0	81.0
1987	46.3	40.2	69.0	33.3	123.0	65.3	60.0	44.8	99.1	110.5	26.0	136.0	73.2	58.9
1988	51.8	43.3	74.0	63.3	122.0	95.6	76.0	52.3	70.5	67.4	65.2	71.4	108.0	112.3
1989	137.6	61.9	102.0	61.2	120.0	104.6	70.0	78.0	85.0	88.7	26.3	72.4	119.0	62.8
1990	71.7	68.0	82.0	87.3	73.0	103.5	112.0	93.5	77.0	70.2	66.4	110.3	80.0	160.0
1991	71.4	70.4	81.0	61.6	142.0	53.5	55.0	78.5	122.0	125.2	22.5	149.7	86.0	96.0



**RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN
EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ**



Cuadro 16. Precipitación máxima diaria anual de las 24 estaciones meteorológicas (continuación).

Año	Estación											Media	Desviación Est.
	30141	30158	30175	30178	30179	30187	30193	30266	30339	30342	30452		
1970	121.0	179.0	90.0	22.7	86.5	161.7	130.0	99.3	40.7	126.1	43.5	87.3	37.0
1971	62.0	103.0	69.5	38.5	108.0	74.4	152.0	64.9	41.6	36.5	54.6	77.9	38.6
1972	151.0	139.9	100.3	27.6	76.0	101.3	131.0	130.0	48.8	107.8	105.6	113.7	50.9
1973	72.0	125.3	81.0	33.8	108.0	88.7	169.3	177.3	67.2	75.8	57.0	102.8	48.6
1974	195.0	185.3	315.0	29.7	171.0	218.2	138.0	197.7	142.6	171.5	160.9	171.4	50.7
1975	95.0	97.3	139.0	58.7	137.5	117.4	131.0	93.2	40.7	111.4	76.3	90.2	26.4
1976	120.0	98.5	77.0	73.3	106.5	90.2	107.0	109.0	43.0	160.5	68.2	89.0	25.9
1977	90.0	60.0	46.0	35.7	100.0	89.5	187.5	129.6	30.3	116.1	42.5	75.4	39.7
1978	65.0	84.7	102.0	48.5	103.5	81.8	134.5	64.0	82.9	116.6	78.4	81.0	25.2
1979	101.0	204.0	126.0	39.5	136.0	120.5	170.0	191.0	135.7	97.4	137.8	124.2	46.3
1980	65.0	68.0	80.0	39.5	85.5	114.5	63.6	31.6	100.0	154.9	79.1	101.6	51.3
1981	127.0	105.4	131.0	68.7	116.0	95.2	146.5	83.2	102.0	87.2	77.3	108.7	30.8
1982	58.0	69.3	71.5	25.8	61.5	99.8	76.2	103.0	61.8	108.5	64.9	73.9	20.3
1983	81.0	107.5	73.0	30.1	74.5	110.3	73.0	63.4	71.5	122.0	70.3	85.1	32.6
1984	167.0	127.7	98.0	37.4	150.0	128.9	86.8	86.8	93.8	104.5	95.3	107.6	32.2
1985	77.0	113.5	165.0	44.6	103.0	96.5	164.0	100.4	89.0	66.5	73.7	96.7	38.8
1986	102.0	111.5	62.9	18.3	80.0	88.8	104.0	100.0	76.5	88.0	90.0	85.2	24.5
1987	65.0	53.5	50.0	16.8	83.5	65.5	96.5	64.1	29.2	82.0	56.8	68.0	31.1
1988	85.5	56.5	60.5	44.4	79.0	184.5	89.0	180.5	43.1	100.5	60.6	81.9	36.4
1989	62.0	100.0	65.2	29.8	61.0	71.6	95.4	106.2	60.5	93.2	85.0	81.3	26.3
1990	63.0	74.8	67.5	45.3	100.0	55.1	135.5	49.0	62.1	67.0	81.4	82.3	25.9
1991	70.0	80.0	112.0	42.3	81.0	79.0	113.5	87.4	56.2	82.5	86.7	84.8	29.7



**RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN
EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ**



Cuadro 16. Precipitación máxima diaria anual de las 24 estaciones meteorológicas (continuación).

Año	Estación													
	30003	30007	30021	30026	30056	30068	30072	30087	30093	30101	30128	30136	30137	30140
1992	101.3	57.2	110.0	65.2	201.0	127.4	85.5	88.0	86.1	115.0	54.2	105.7	154.5	61.5
1993	84.1	100.2	159.0	134.6	77.0	93.7	123.5	112.1	131.0	105.4	22.7	132.5	114.0	124.3
1994	64.5	56.5	102.0	74.6	132.0	54.7	78.5.0	66.5	94.0	57.9	22.0	90.0	60.0	90.0
1995	124.3	129.5	91.0	58.1	134.0	73.5	110.0	89.7	102.0	62.8	108.9	131.2	76.2	118.2
1996	87.6	79.0	61.0	88.7	129.0	69.0	122.0	107.6	169.0	120.0	40.2	189.9	65.0	54.0
1997	73.3	48.0	48.0	77.1	113.0	61.0	83.0	66.4	70.0	97.0	38.8	233.7	71.0	55.0
1998	64.0	70.7	84.0	89.1	112.2	75.0	102.0	66.9	74.0	120.0	54.0	189.7	62.0	110.0
1999	147.2	125.5	171.5	100.5	133.5	147.0	186.0	133.0	92.0	165.0	180.0	235.4	204.0	189.5
2000	113.1	140.6	118.0	78.7	111.5	65.0	160.0	95.5	78.0	65.0	56.7	216.8	80.0	74.5
2001	63.0	62.0	149.0	58.1	128.2	62.2	77.0	49.6	54.0	132.2	56.3	277.3	128.0	92.3
2002	56.5	53.7	48.0	170.0	122.0	68.8	84.5	99.2	88.0	48.6	28.5	51.6	73.0	108.0
2003	56.5	102.6	87.0	104.5	121.5	84.2	94.0	61.2	111.0	104.8	44.5	90.0	17.8	85.0
2004	82.1	60.2	58.5	140.0	109.8	65.4	85.0	63.9	64.0	73.0	27.5	30.6	72.0	61.0
2005	111.6	81.5	82.0	86.5	357.0	100.8	91.5	90.3	74.0	56.7	100.2	31.9	58.7	82.5
2006	99.4	88.0	71.5	72.0	156.7	97.7	74.0	55.6	67.0	105.0	41.8	47.8	108.0	83.5
2007	142.9	80.0	96.0	67.8	108.0	90.6	122.5	61.6	73.0	130.0	83.6	31.2	36.0	67.0
2008	74.1	140.2	133.5	106.5	157.0	91.2	115.5	81.0	105.0	93.0	94.0	108.3	43.0	110.0
2009	79.7	82.0	78.5	75.5	140.0	100.6	98.5	78.4	74.0	89.0	48.3	169.6	92.5	87.3
2010	150.4	108.0	200.4	128.0	175.5	178.2	140.0	20.0	80.0	188.0	134.4	198.8	340.0	172.0
Pr MDA	189.2	200.0	200.4	268.0	357.0	222.0	186.0	175.0	169.0	188.0	180.0	277.3	340.0	192.0
Fecha	05/08/1979	20/09/1974	17/09/2010	25/08/1980	05/10/2005	20/06/1973	12/07/1999	20/09/1974	29/07/1996	17/09/2010	04/10/1999	23/08/2001	17/09/2010	05/08/1979



**RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN
EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ**



Cuadro 16. Precipitación máxima diaria anual de las 24 estaciones meteorológicas (continuación).

Año	Estación											Media	Desviación Est.
	30141	30158	30175	30178	30179	30187	30193	30266	30339	30342	30452		
1992	146.0	131.0	100.0	41.2	96.5	114.9	125.0	117.2	109.5	136.0	80.7	103.6	35.1
1993	83.0	126.8	126.0	65.6	141.0	104.2	126.0	84.5	70.5	134.9	130.0	108.4	29.5
1994	90.0	75.0	53.0	23.9	90.0	79.7	88.0	53.5	65.2	117.0	75.4	75.7	25.9
1995	66.0	64.5	73.5	63.8	74.5	130.2	98.0	80.5	111.4	106.3	85.6	93.2	25.2
1996	73.0	90.0	69.0	35.9	61.0	96.8	102.5	116.5	26.1	85.9	130.0	90.5	38.4
1997	47.0	96.6	55.0	30.4	87.5	82.0	65.0	75.3	49.2	89.4	83.5	76.4	37.8
1998	62.0	86.2	89.0	41.3	119.5	89.0	89.3	68.6	130.0	119.0	80.6	90.2	30.4
1999	87.0	157.0	200.0	138.3	52.1	280.5	111.0	95.0	201.5	214.0	148.1	153.5	52.5
2000	100.0	75.2	103.0	77.7	83.3	84.5	80.5	89.0	109.2	93.0	115.9	97.7	34.0
2001	41.2	80.0	71.0	53.8	66.8	94.5	76.8	60.3	113.0	77.0	69.1	87.3	48.0
2002	60.0	65.0	58.4	31.1	152.0	102.3	67.0	60.8	54.0	69.9	160.3	78.8	37.4
2003	98.0	108.2	69.5	43.1	89.4	46.6	146.0	50.2	77.8	55.3	58.2	81.8	30.0
2004	58.0	92.0	80.0	71.5	73.2	80.5	86.5	76.0	58.4	70.5	69.8	71.1	22.6
2005	120.0	129.3	120.0	94.0	83.6	83.4	121.5	100.1	150.8	84.5	95.0	101.1	58.5
2006	85.0	98.0	75.0	29.5	84.6	111.8	105.0	93.2	122.4	78.0	73.5	85.2	26.5
2007	122.0	100.0	133.0	74.0	95.9	90.4	83.0	97.0	82.5	60.0	51.2	87.3	28.3
2008	125.0	82.0	104.0	40.0	113.8	97.5	111.4	72.3	83.7	99.0	93.7	99.6	26.1
2009	105.0	51.0	43.8	56.0	109.2	149.3	69.2	87.3	128.4	137.0	80.5	90.3	33.3
2010	138.0	190.0	183.0	91.0	87.0	271.5	150.9	145.0	216.7	191.0	120.2	160.7	62.9
Pr MDA	195.0	204.0	315.0	138.3	171.0	280.5	187.5	197.7	216.7	214.0	160.9		
Fecha	20/06/1974	05/08/1979	21/09/1974		20/09/1974	12/07/1999	22/11/1977		17/09/2010	12/07/1999			

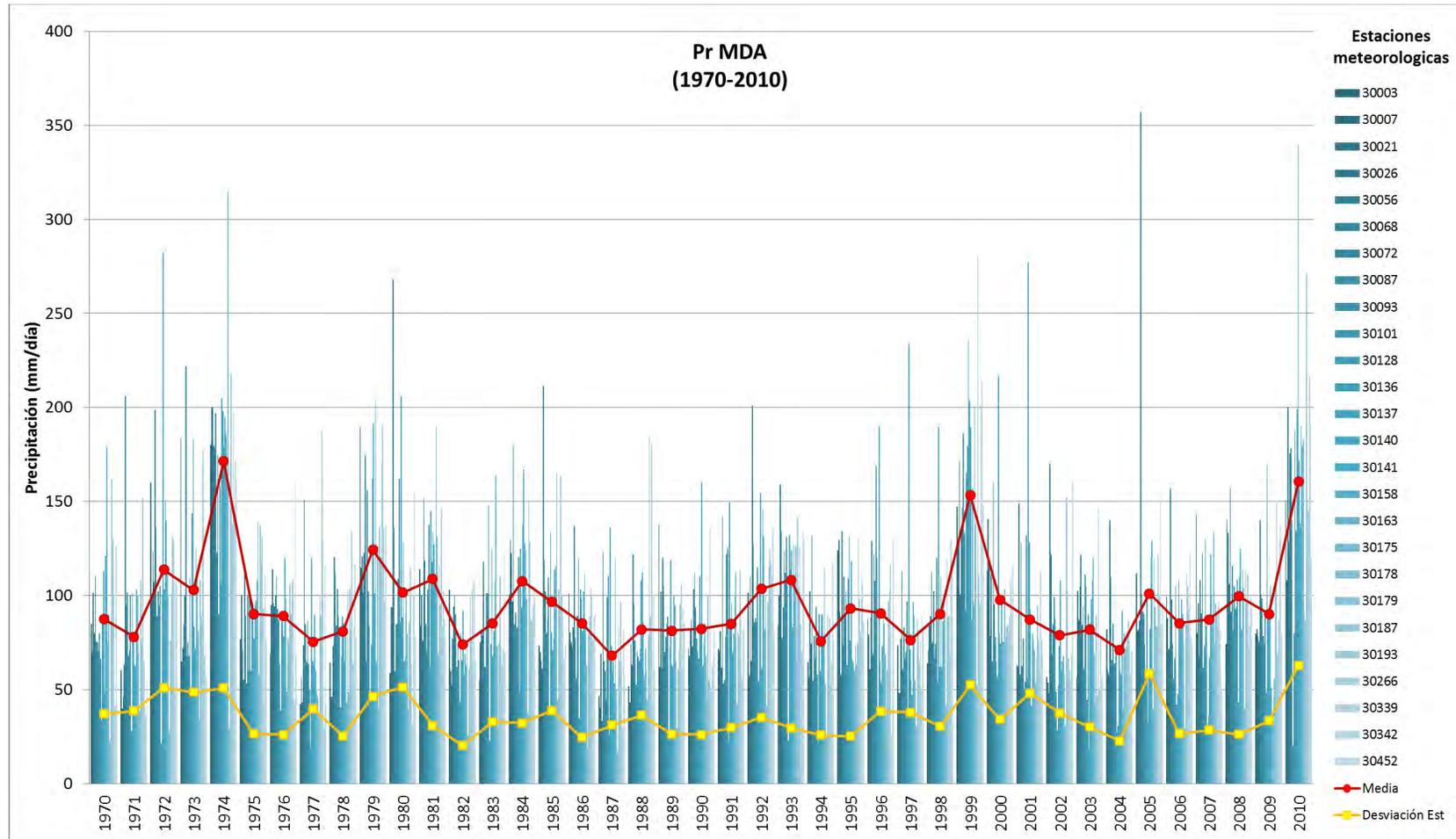


Figura 19. Precipitación máxima diaria anual del inventario de estaciones meteorológicas.



En la Figura 19 se observan tres sobresaltos en la media que se relacionan con eventos de precipitación extraordinaria, uno de los sobresaltos corresponde a las lluvias provocadas por el huracán Karl en 2010, mientras que el valor más bajo se relaciona con la sequía de 1987.

El valor más bajo de la desviación estándar se registró en 1982 que indica un año con lluvias constantes (o regulares entre sí), es decir, sus valores extremos no están muy alejados de la media. Por otro lado, un valor elevado en la desviación estándar (como la de 2010) indica un año de lluvias irregulares, donde las precipitaciones son tan altas como bajas (alejando los valores extremos de la media).

8.2.3. Información hidrológica

En la subcuenca del río La Antigua se ubica una sola estación hidrométrica, la estación 28003 Cardel. Se localiza sobre la margen izquierda del río La Antigua, en el cruce con el ferrocarril interoceánico (km 428+800 origen en México D. F.), a 300 m de la población Villa Cardel, dentro del municipio de La Antigua, Ver.

La estación inició operaciones el 7 de octubre 1935, pero se efectuaban irregularmente, hasta que en enero 1951 se reanudaron de forma regular. El Cuadro 17 presenta los metadatos de la estación 28003 Cardel.

Cuadro 17. Metadatos de la estación hidrométrica 28003 Cardel.

Metadato	Descripción
Nombre	Cardel
ID	28003
Latitud	19° 21' 42"
Longitud	96° 22' 24"
Altitud	16.36 m.s.n.m.
Área drenada	2,234 km ²

8.2.3.1. Recopilación de información

De la estación hidrométrica 28003 Cardel se extrajo la siguiente información:

- Gasto o escurrimiento diario de 1951 a 2010
- Niveles registrados diariamente de 1951 a 2010

8.2.3.2. Análisis hidrológico de escurrimientos diarios

Con la información extraída del BANDAS se elaboró una matriz que reúne los escurrimientos diarios observados del año 1951 a 2010, el Cuadro 18 muestra un bosquejo de esa matriz.

Cuadro 18. Segmento de la matriz generada con información de gastos diarios de la estación hidrométrica 28003 Cardel (1951-2010).

No.	Año	Mes	Día	Hora de registro	Gasto (m ³ / s)
1	1951	1	1	23:00 hr	18.33
2	1951	1	2	23:00 hr	18.29
3	1951	1	3	23:00 hr	18.02
...
318,946	2010	12	29	08:00 hr	95.31
318,947	2010	12	30	08:00 hr	96.43
318,948	2010	12	31	23:00 hr	96.47
Estadísticos					
				Media	72.03
				Desviación Estándar	95.20
				Máximo	4,742.53
				Mínimo	0.00



Con la matriz anterior se elaboró el hidrograma de registros diarios durante el periodo 1951-2010 (Figura 20). En la imagen se parecía una tendencia constante del gasto, cuyos valores difícilmente superan 1,500 m³/s. El gasto máximo es de 4,742.53 m³/s, registrado el 18 de septiembre 2010, el segundo más alto es de 3,378 m³/s, registrado el 31 de julio 1961.

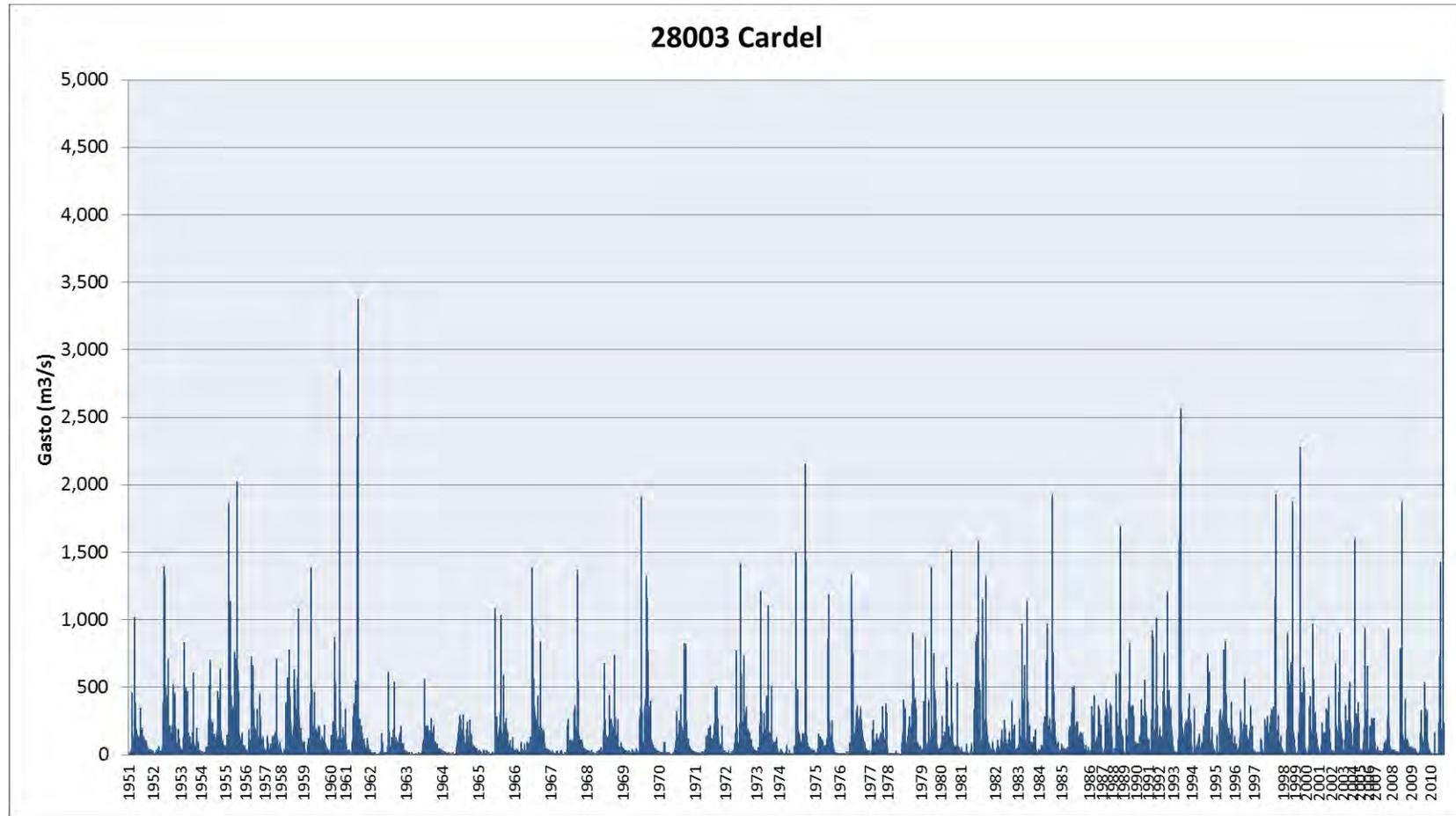


Figura 20. Hidrograma de gastos diarios de la estación 28003 Cardel (1951-2010).

8.2.3.3. Escurrecimientos máximos y mínimos diarios mensuales

A partir de la información del Cuadro 16 se generó el Cuadro 19 que presenta los gastos máximos y mínimos diarios mensuales, las relaciones utilizadas fueron las siguientes:

$$Q_{minDM} = Min[Q_1, Q_{días\ que\ tiene\ el\ mes}] \quad (13)$$

$$Q_{MaxDM} = Max[Q_1, Q_{días\ que\ tiene\ el\ mes}] \quad (14)$$

donde:

Q_{minDM} = gasto mínimo diario mensual (m^3/s)

Q_{MaxDM} = gasto máximo diario mensual (m^3/s)

Q_1 = gasto observado el día 01 del mes (m^3/s)

$Q_{días\ que\ tiene\ el\ mes}$ = Gasto observado el último día del mes (m^3/s)

Cabe mencionar que Q_{min} y Q_{Max} se determinó para los doce meses del año, desde 1951 hasta 2010, dando como resultado 720 valores para cada variable.

Cuadro 19. Segmento de la matriz generada con información de gastos máximos y mínimos diarios de la estación hidrométrica 28003 Cardel (1951-2010).

No.	Año	Mes	Q max	Fecha	Q min	Fecha
1	1951	1	18.34	01/01/1951	12.41	31/01/1951
2	1952	1	28.00	01/01/1952	9.14	26/01/1952
3	1953	1	27.10	01/01/1953	17.30	31/01/1953
...
718	2008	12	59.06	08/12/2008	49.13	29/12/2008
719	2009	12	34.62	01/12/2008	10.15	29/12/2009
720	2010	12	105.20	01/12/2008	95.31	29/12/2010

Con la matriz anterior se elaboró el hidrograma de registros mínimos y máximos diarios para el periodo 1951-2010 (Figura 21). En la imagen se parecía el aumento súbito de los gastos máximos entre junio y noviembre, lo cual se relaciona con la

época de lluvias. Así mismo los gastos mínimos se mantienen relativamente altos hasta el mes de diciembre, situación atribuible a la humedad residual acumulada durante la época de lluvias.

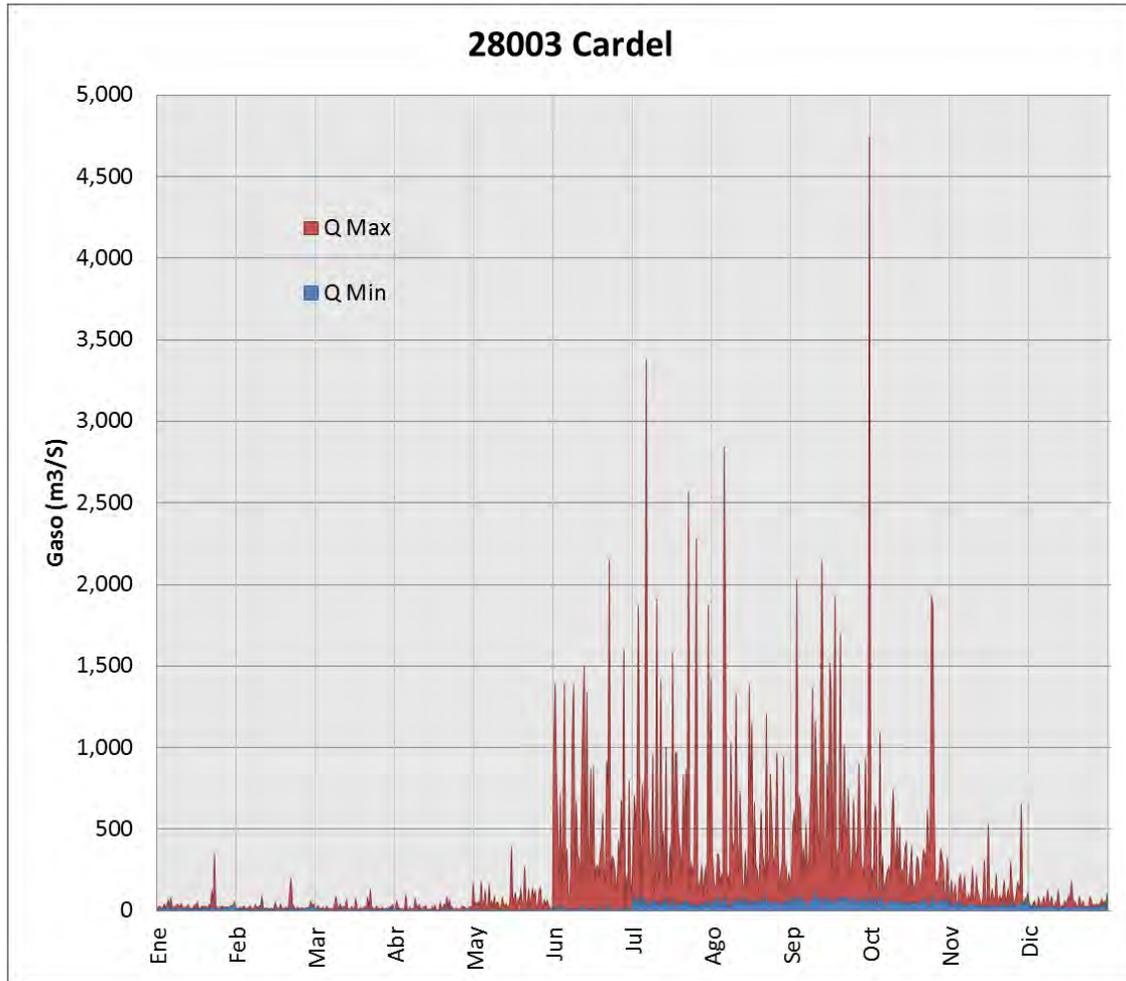


Figura 21. Hidrograma de gastos máximos y mínimos diarios mensuales de la estación 28003 Cardel (1951-2010).

8.2.3.4. Esguerrimiento máximo diario anual

Este valor se determinó con la siguiente relación:

$$Q_{MDA} = \text{Max}[Q_1, Q_{12}] \quad (15)$$

donde:

Q_{MDA} = gasto máxima diaria anual (m^3/s)



$Q_1 = Q_{\text{MaxDM}}$ correspondiente al primer mes del año (m^3/s)

$Q_{12} = P_{\text{MaxDM}}$ correspondiente al último mes del año (m^3/s)

El Cuadro 20 presenta el Q_{MDA} medido en la estación hidrométrica 28003 Cardel durante el periodo 1951 a 2010.

Cuadro 20. Gasto máximo diario anual de la estación hidrométrica 28003 Cardel (1951-2010).

Q Max (m^3/s)	Hora / Día / Mes / Año	Q Max (m^3/s)	Hora / Día / Mes / Año
1,018.00	05 hr 25/06/1951	1,580.44	24 hr 14/07/1981
1,394.00	07 hr 13/06/1952	396.00	02 hr 07/10/1982
832.00	06 hr 21/06/1953	1,140.88	04 hr 08/09/1983
699.67	13 hr 03/07/1954	1,923.70	03 hr 05/09/1984
2,026.00	02 hr 30/09/1955	511.59	07 hr 31/07/1985
726.63	01 hr 24/06/1956	442.43	11 hr 07/07/1986
707.77	07 hr 19/09/1957	405.94	05 hr 29/06/1987
1,085.00	03 hr 18/10/1958	1,696.22	11 hr 03/09/1988
1,388.00	04 hr 19/06/1959	829.00	18 hr 12/07/1989
2,847.00	17 hr 30/08/1960	550.61	14 hr 04/09/1990
3,378.00	18 hr 31/07/1961	1,016.50	15 hr 23/09/1991
615.04	14 hr 04/07/1962	1,207.18	16 hr 10/08/1992
556.44	07 hr 03/07/1963	2,568.00	11 hr 05/07/1993
297.60	11 hr 28/07/1964	745.50	11 hr 16/09/1994
1,081.00	04 hr 21/06/1965	840.00	10 hr 20/08/1995
1,388.87	23 hr 24/06/1966	574.00	15 hr 10/08/1996
1,366.20	01 hr 24/09/1967	1,928.00	07 hr 11/10/1997
741.71	09 hr 07/10/1968	1,877.01	15 hr 19/11/1998
1,913.60	09 hr 04/07/1969	2,279.57	08 hr 13/07/1999
824.57	12 hr 13/09/1970	968.52	23 hr 10/08/2000
508.77	02 hr 10/10/1971	428.91	24 hr 24/09/2001
1,420.83	13 hr 28/07/1972	899.68	06 hr 14/09/2002



Q Max (m ³ /s)	Hora / Día / Mes / Año	Q Max (m ³ /s)	Hora / Día / Mes / Año
1,215.00	19 hr 22/06/1973	538.79	06 hr 28/09/2003
2,152.00	13 hr 21/09/1974	1,599.76	07 hr 13/06/2004
1,189.18	15 hr 10/09/1975	939.19	08 hr 23/08/2005
1,335.22	12 hr 27/06/1976	273.05	06 hr 24/07/2006
379.50	06 hr 29/10/1977	933.88	14 hr 08/09/2007
901.00	03 hr 09/09/1978	1,873.33	16 hr 10/07/2008
1,388.00	14 hr 06/08/1979	533.97	08 hr 09/09/2009
1,519.20	07 hr 26/09/1980	4,742.53	03 hr 18/09/2010

Estadísticos	
Media	1,218.99
Desviación Estándar	799.10
Máximo	4,742.53
Mínimo	273.05

De la información anterior se elaboró el hidrograma de gasto máximo diario anual para el periodo 1951-2010. En la Figura 22 se parecía una tendencia constante del gasto cuyos valores difícilmente superan 1,500 m³/s. El gasto máximo es de 4,742.53 m³/s, registrado el 18 de septiembre 2010 a las 3:00 hr, mientras que el más bajo es de 273.05 m³/s, registrado el 24 de julio 2006 a las 06:00 hr.

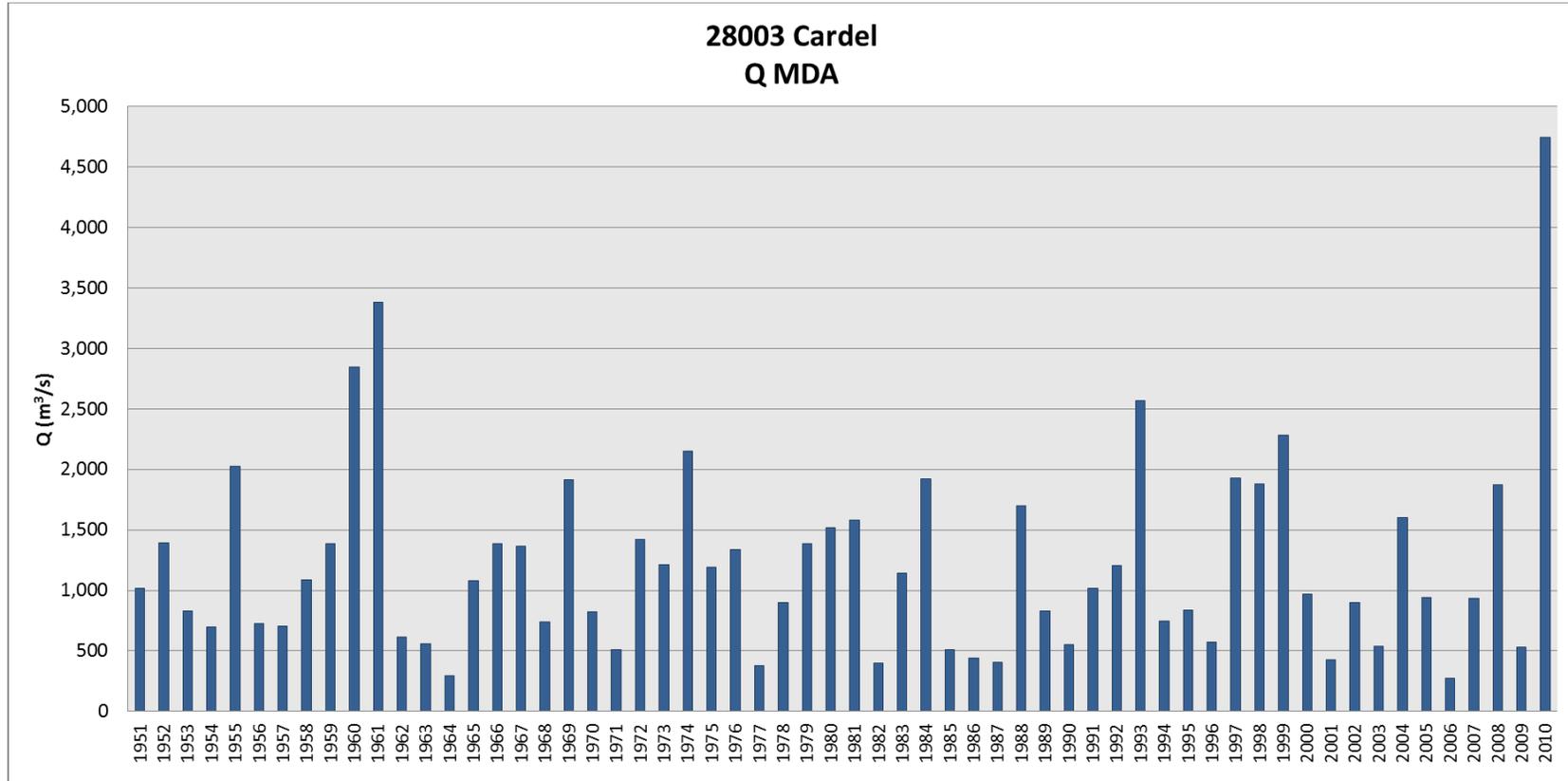


Figura 22. Hidrograma de gasto máximo diario anual de la estación 28003 Cardel (1951-2010).



8.2.3.5. Sincronización de estaciones

A partir de datos de precipitación y gastos, se generaron las gráficas que ilustran el proceso de lluvia-escurrimiento ocurrido en la subcuenca del río La Antigua.

En la Figura 23 se observa el promedio de precipitaciones diarias calculado para los 31 días del mes de julio 1999 (utilizando los registros de 24 estaciones meteorológicas), donde el máximo ocurrió el día 12 y fue de 139.9 mm/24 hr. En la gráfica se incluyó el gasto máximo diario registrado por la estación hidrométrica 28003 Cardel correspondiente al mismo periodo (31 días del mes de julio 1999), el gasto máximo fue de 2,279.6 m³/s, ocurrido el 13 de julio 1999.

Así mismo, la Figura 24 muestra que el gasto máximo diario registrado durante el mes de septiembre de 2010 ocurrió el día 18 y fue de 4,742.5 m³/s, el cual se asocia a las precipitaciones del día anterior (17 de septiembre) que fueron generadas por el huracán Karl y cuyo promedio es de 169.3 mm/24 hr. En ambas figuras se observa que el escurrimiento ocurre 24 hr después de la lluvia.

Este análisis de eventos máximos permitió identificar la precipitación causante de una avenida extraordinaria y ayudó en la selección de eventos a modelar para delimitar zonas con riesgo a inundación.

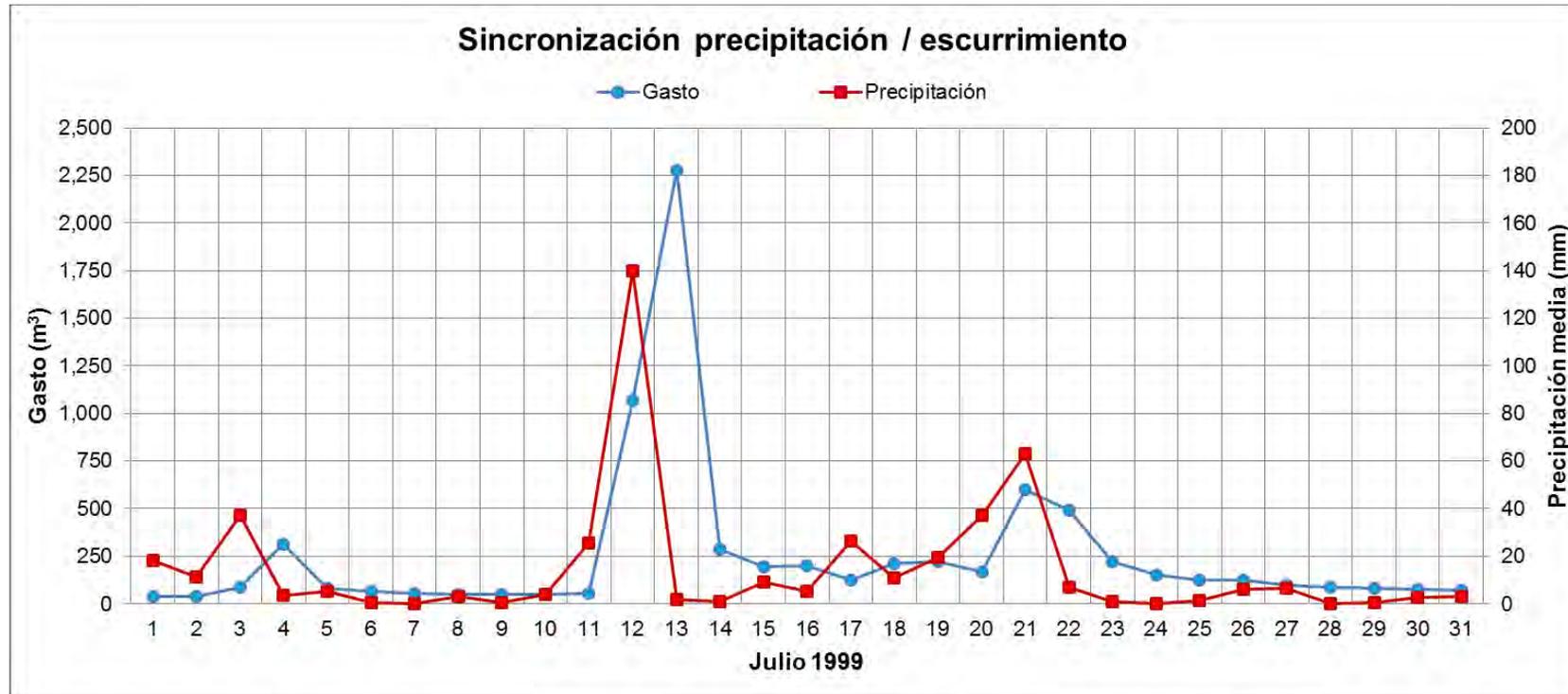


Figura 23. Sincronización de estaciones en la subcuenca del río La Antigua para el mes de julio de 1999.

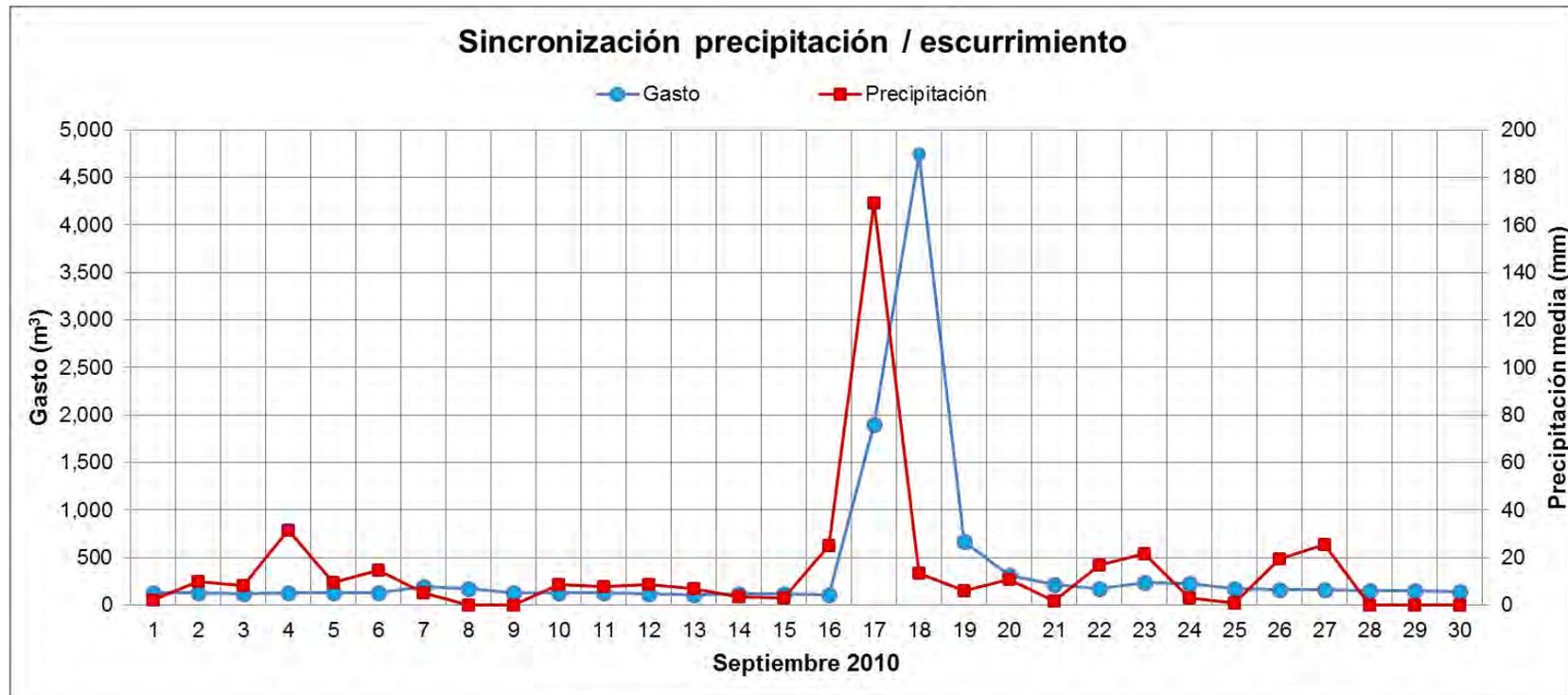


Figura 24. Sincronización de estaciones en la subcuenca del río La Antigua para el mes de septiembre de 2010.

8.2.4. Unidades de análisis

La escasez de información hidrométrica requerida para simular el escurrimiento en la subcuenca del río La Antigua exige relacionar –desde el inicio–, las áreas de modelación con algunos elementos del ciclo hidrológico o procesos físicos como la lluvia y el escurrimiento.

8.2.4.1. Unidades de Respuesta Hidrológica

Las unidades de respuesta hidrológica (URH) se establecieron con base en los afluentes considerados para la simulación hidráulica y su respectiva área de captación o aporte.

En total se delimitaron nueve URH, la primera corresponde al área de captación del río Xochilapa (URH I), la URH II concierne al río Actipan, la URH III al río La bomba, la URH IV al río Huilapa, y la URH V al río Pescados, todos estos de primer orden (Figura 25). Es importante aclarar que la URH V corresponde a la Subcuenca RH28Bf, las otras 4 URS son microcuencas enmarcadas dentro de la Subcuenca RH28Be.

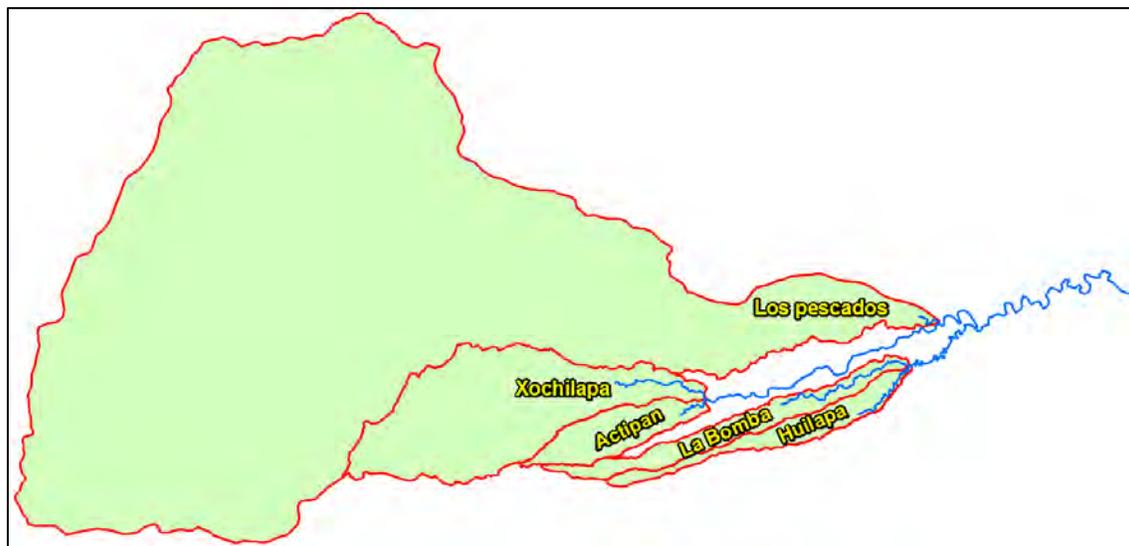


Figura 25. URH de afluentes de primer orden.

La unión de los ríos Xochilapa y Actipan forma al río Santa María (URH VI), la unión del La Bomba y Huilapa forma la URH VII (La Bomba 2), y la unión de las URH V-VI forma la URH VIII (Santa María 2), Figura 26.

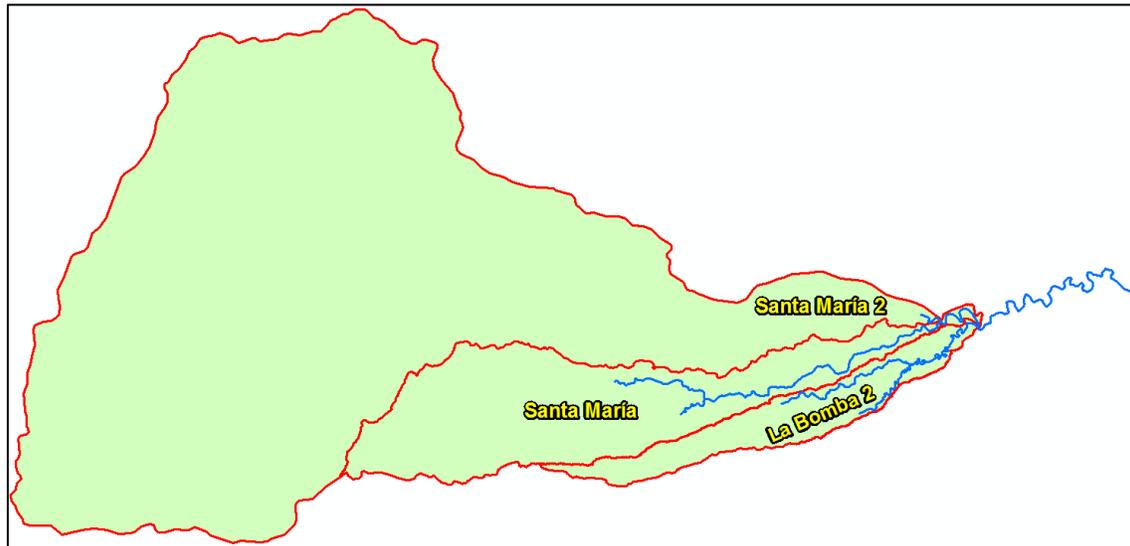


Figura 26. URH de afluentes de segundo orden.

Finalmente, la URH IX es la suma de todas las áreas de captación y corresponde al último tramo considerado en la modelación hidráulica (parte baja de la subcuenca), Figura 27.

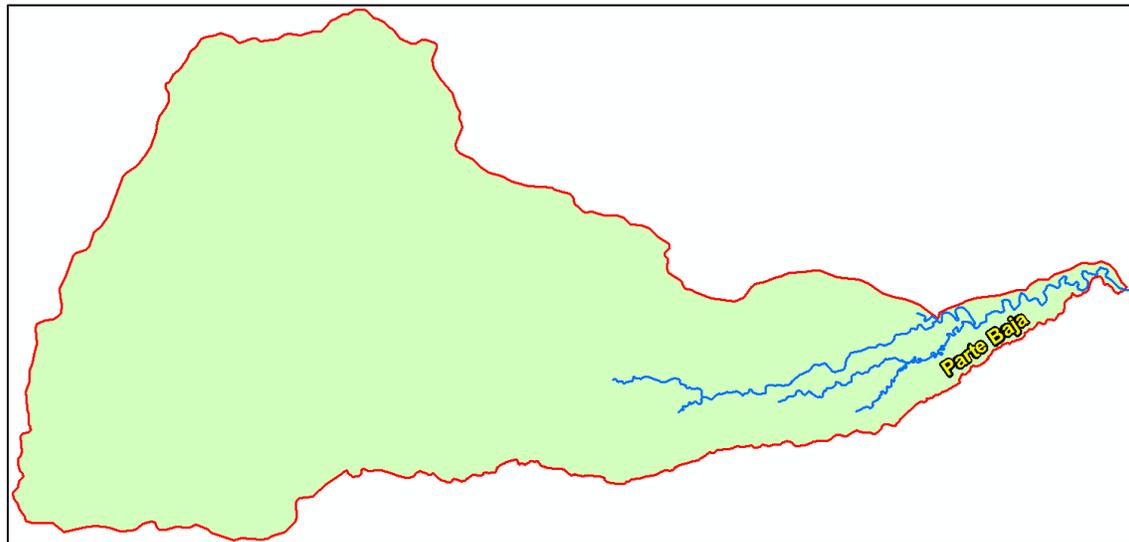


Figura 27. URH IX (Parte baja de la subcuenca).

El Cuadro 21 muestra los parámetros morfométricos de las nueve URH, mismos que se utilizaron para estimar el gasto asociado a precipitaciones de Karl en 2010 y las lluvias extraordinarias del 12 julio 1999, gastos que figuran como el 1er y 4to lugar (de mayor a menor) de los datos históricos registrados en la estación hidrométrica, respectivamente.

Cuadro 21. Parámetros morfométricos de las URH.

URH		Parámetro				
ID	Nombre	Longitud del cauce (km)	Cota máxima (m.s.n.m.)	Cota mínima (m.s.n.m.)	Superficie (km ²)	Pendiente (%)
I	Xochilapa	38.76	1,556	260	193.96	0.032
II	Actipan	16.25	984	260	44.91	0.044
III	La Bomba	35.75	900	182	53.96	0.020
IV	Huilapa	28.25	722	182	40.57	0.019
V	Pescados	113.88	3,721	98	1,631.67	0.031
VI	Santa María	62.98	1,556	98	314.02	0.023
VII	La bomba 2	46.38	900	73	110.06	0.018
VIII	Santa María 2	120.01	3,721	73	1,95.06	0.030
IX	Parte baja	142.17	3,721	5	2,145.15	0.026



8.2.5. Precipitación media

La precipitación media es la cantidad de lluvia que cae sobre una superficie delimitada, en un lapso de tiempo y con una distribución espacial acotada. Para el cálculo de la precipitación media se analizaron los registros de precipitación de las 24 estaciones meteorológicas que integran el inventario.

La precipitación media se calculó utilizando el método de Isoyetas. El método pondera el valor de la variable climática a una superficie o área de influencia delimitada por líneas que unen los puntos de igual valor de precipitación (Figura 28). El valor se determina con la siguiente expresión:

$$D = \frac{\sum_i^n a_i D_i}{A} \quad (16)$$

donde:

D = precipitación media (mm)

a_i = área entre cada dos isoyetas (mm)

D_i = promedio de precipitación entre dos isoyetas (mm)

A = área total de la cuenca (km²)

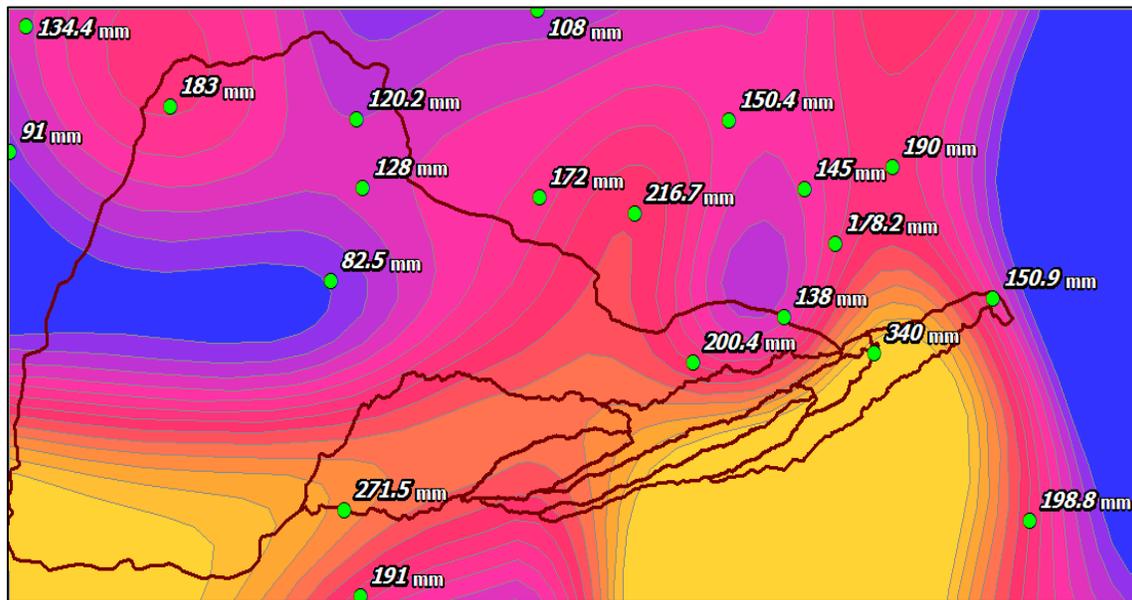
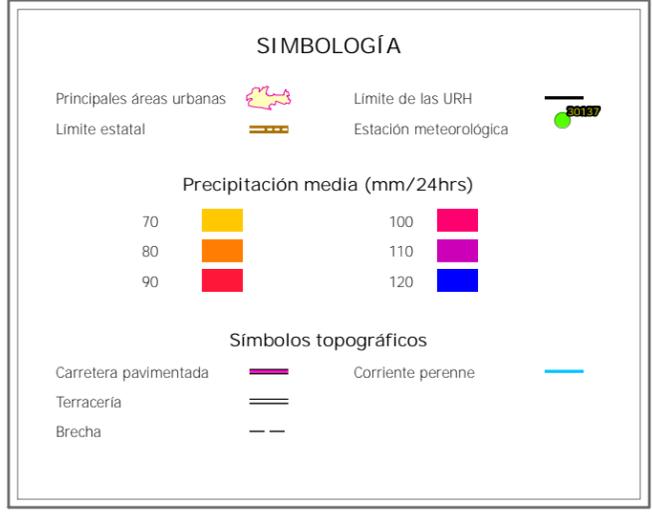
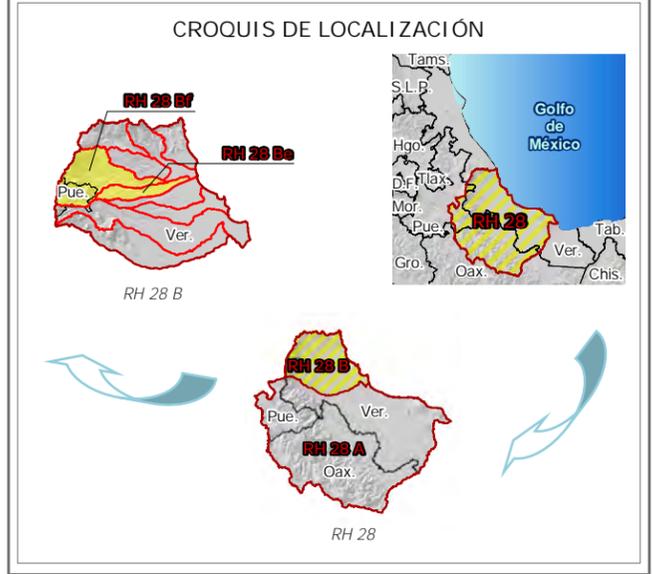
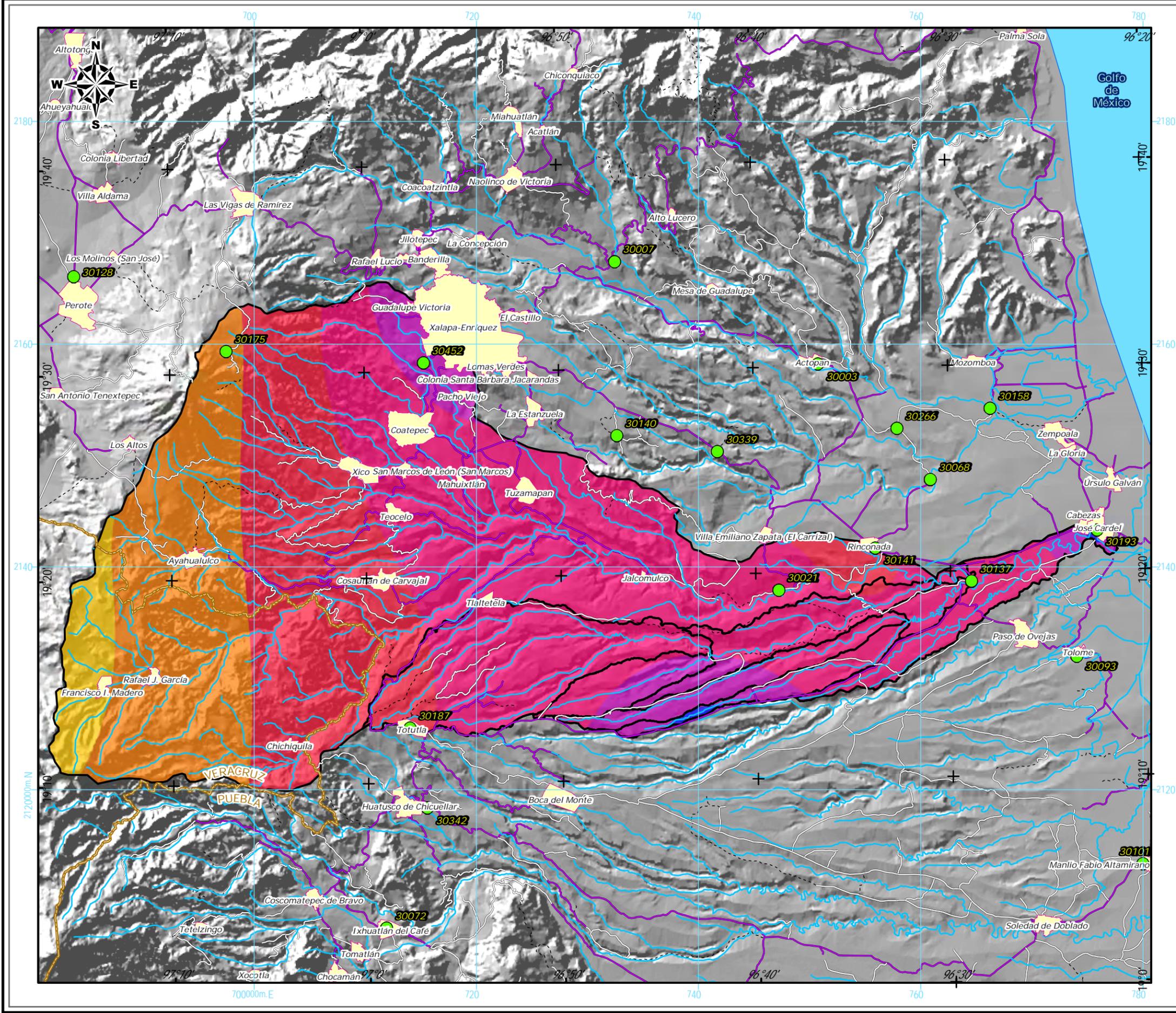


Figura 28. Cálculo de la precipitación media utilizando el método de Isoyetas.

El Cuadro 22 muestra la precipitación media calculada para las nueve URH utilizando datos de precipitación registrados el 12 de julio 1999 y durante el huracán Karl en 2010 (Mapas 8 y 9 respectivamente).

Cuadro 22. Precipitación media (mm) asociada al huracán Karl en 2010 y lluvias extraordinarias de julio-1999.

URH	Lluvias extraordinarias de julio 1999	Karl (2010)
I	100.0	258.3
II	109.6	256.4
III	110.8	294.6
IV	108.3	328.3
V	94.7	182.8
VI	102.1	260.5
VII	108.2	310.8
VIII	95.9	195.6
IX	96.8	205.9



INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

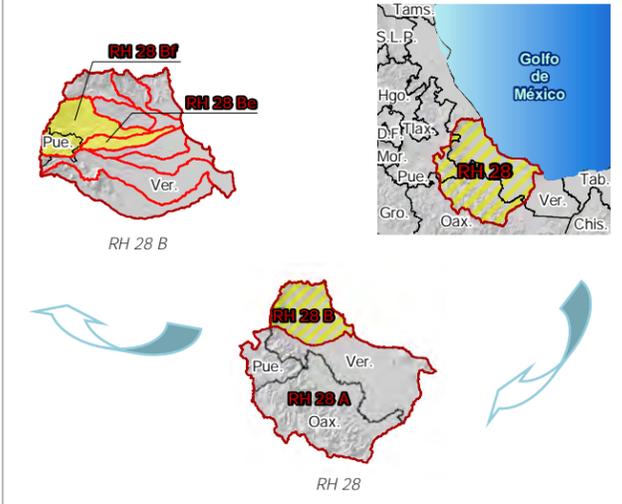
RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

PRECIPITACIÓN MEDIA (12/07/1999)

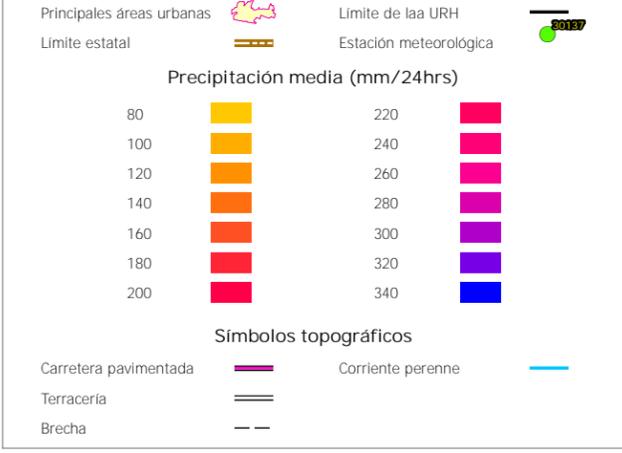
ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI



CROQUIS DE LOCALIZACIÓN



SIMBOLOGÍA



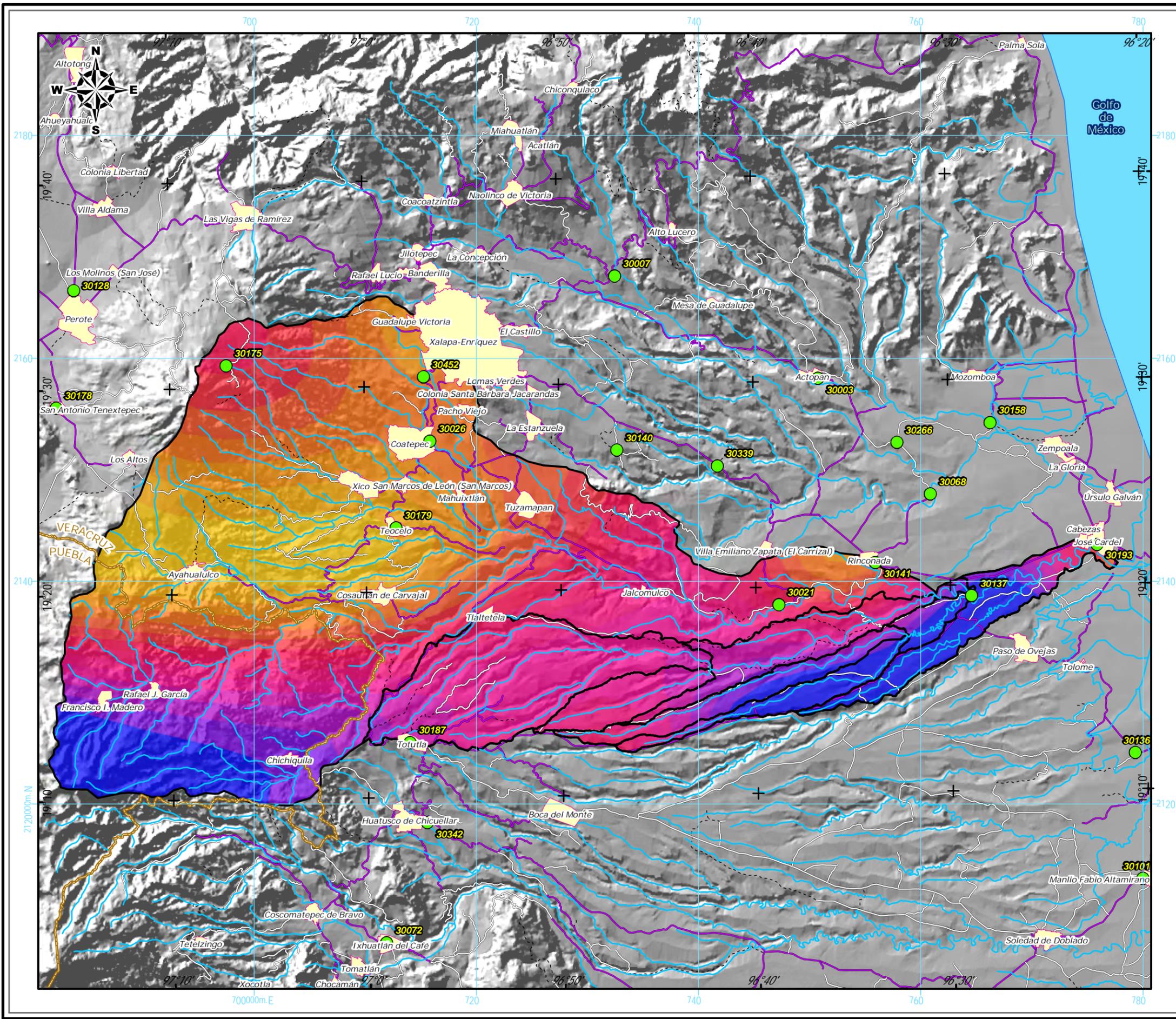
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

PRECIPITACIÓN MEDIA (17/09/2010)

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





8.2.6. Estimación del hidrograma

Un hidrograma es una representación gráfica que expresa la variación temporal del caudal que pasa sobre una sección. Según Rivas *et al.* (2007) es el resultado de las condiciones meteorológicas, fisiográficas y características del suelo

En la subcuenca RH28Be los registros de precipitación son más abundantes que los de escurrimiento, por ello se eligió un método indirecto que permitió construir un hidrograma de escurrimiento superficial para una lluvia de duración y profundidad unitaria. El método utilizado fue el Hidrograma Adimensional Curvilíneo del SCS (Soil Conservation Service) (1972) que puede ser representado por un Hidrograma Unitario Triangular (HUT), el método propuesto por Mockus (1957) genera un gasto pico en función del área de la cuenca y el tiempo pico. La expresión del gasto pico (Q_p), se obtiene igualando:

el volumen de agua escurrido según la siguiente ecuación:

$$V_e = hp_e A \quad (17)$$

donde:

V_e = volumen de agua escurrido (m^3/s)

hp_e = altura de precipitación en exceso, o precipitación efectiva (mm)

A = área de la cuenca (km^2)

con el área que se encuentra bajo el hidrograma de la Figura 29.

$$V_e = \frac{1}{2} t_b Q_p \quad (18)$$

donde:

V_e = volumen de agua escurrido (m^3/s)

t_b = tiempo base (hr)

Q_p = gasto pico (m^3/s)

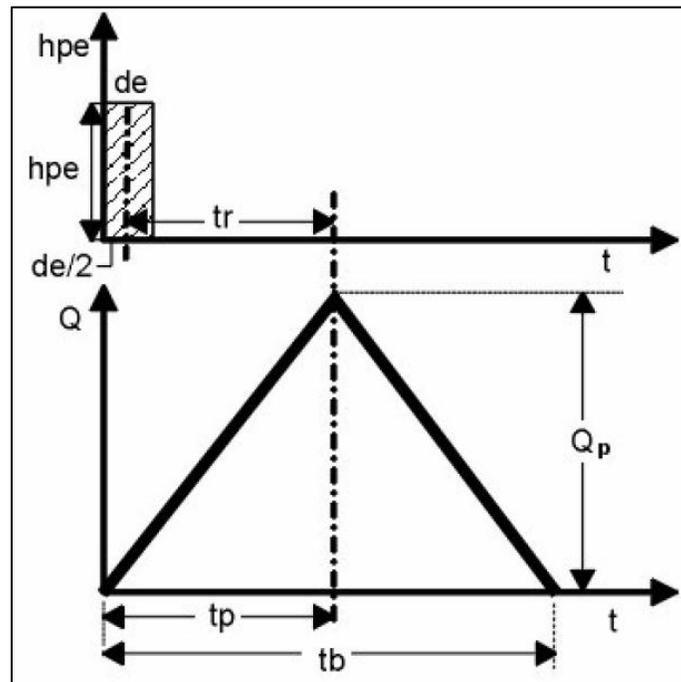


Figura 29. Hidrograma unitario sintético (forma triangular).

De igualar las dos últimas ecuaciones, se tiene:

$$V_e = hp_e A = \frac{1}{2} t_b Q_p \quad (19)$$

de donde:

$$Q_p = \frac{2hp_e A}{t_b} \quad (20)$$

Haciendo la transformación de unidades en la ecuación anterior tenemos:

$$Q_p = \frac{0.555 hp_e A}{t_p} \quad (21)$$

donde:

Q_p = gasto pico (m^3/s)

hp_e = altura de precipitación en exceso, o precipitación efectiva (mm)

A = área de la cuenca (km^2)

t_p = tiempo pico (hr)



Del análisis de varios hidrogramas, Mockus concluye que el tiempo base y el tiempo pico se relacionan mediante la expresión:

$$t_b = 2.67 t_p \quad (22)$$

A su vez, el tiempo pico se expresa:

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r \quad (23)$$

Donde el tiempo de retraso se estima mediante el tiempo de concentración, de la forma:

$$t_r = 0.6 t_c \quad (24)$$

donde:

t_r = tiempo de retraso (hr)

t_c = tiempo de concentración (hr)

También (t_r), se puede estimar con la ecuación desarrollada por Chow (1994) como:

$$t_r = 0.005 \left[\frac{L}{\sqrt{S}} \right]^{0.64} \quad (25)$$

donde:

t_r = tiempo de retraso (hr)

L = longitud del cauce principal (m)

S = pendiente le cauce (%)

El tiempo de concentración (t_c) se puede estimar con la ecuación de Kirpich:

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (26)$$

donde:

t_c = tiempo de concentración (hr)

L = longitud del cauce principal (m)

S = pendiente le cauce (%)



La duración del exceso de lluvia se calcula para cuencas grandes con la siguiente ecuación:

$$d_e = 2\sqrt{t_c} \quad (27)$$

donde:

d_e = duración en exceso (hr)

t_c = tiempo de concentración (hr)

Sustituyendo la ecuación 22 en 21 resulta:

$$Q_p = 0.5555 \frac{hp_e A}{2.67 t_p} \quad (28)$$

$$Q_p = 0.208 \frac{hp_e A}{t_p} \quad (29)$$

Además sustituyendo la ecuación 27 en 24 en la ecuación 23 resulta:

$$t_p = \frac{1}{2} 2 \sqrt{t_c} + 0.6 t_c \quad (30)$$

$$t_p = \sqrt{t_c} + 0.6 t_c \quad (31)$$

Las ecuaciones 22, 29 y 31 se calculan las características de hidrograma unitario triangular

Una vez generado el HUT con la metodología de Mockus, se estimó el Hidrograma Adimensional Curvilíneo del SCS que suaviza la forma del HUT. El hidrograma del SCS conserva las mismas unidades de tiempo y volumen que el HUT. Para obtener el hidrograma unitario del SCS se divide la escala de caudales entre el gasto pico (Q_p) y la escala del tiempo entre el tiempo al que se presenta el pico (t_p), (Barrios y Olaya, 2007).



El hidrograma unitario se construyó con los datos de precipitación que se registraron en 24 estaciones meteorológicas (ubicadas dentro y en la periferia de las subcuencas RH28Be y RH28Bf) durante la ocurrencia de dos fenómenos hidrometeorológico extremos: el huracán Karl que impacto las costas de Veracruz el 17 de septiembre 2010 y las lluvias extraordinarias del 12 julio 1999.

El Cuadro 23 y 24 muestran los datos que se utilizaron para dibujar el HUT con datos de las lluvias asociadas al huracán Karl de 2010 y las lluvias extraordinarias del 12 de julio 1999.

Cuadro 23. Datos para dibujar el HUT con lluvias asociadas a Karl 2010.

Parámetro	URH								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Tiempo	14.47	13.13	14.81	14.39	17.74	16.11	15.57	18.04	19.34
	38.64	35.05	39.53	38.41	47.36	43.01	41.57	48.16	51.64
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Gasto	720.19	182.49	223.31	192.56	3,497.44	1,056.34	457.08	4,398.92	4,749.16
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Cuadro 24. Datos para dibujar el HUT con lluvias del 12 julio 1999.

Parámetro	URH								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Tiempo	14.47	13.13	14.81	14.39	17.74	16.11	15.57	18.04	19.34
	38.64	35.05	39.53	38.41	47.36	43.01	41.57	48.16	51.64
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Gasto	731.65	164.31	183.69	136.14	4,711.09	990.20	327.06	5,527.82	5,590.48
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



Los Cuadros 25 y 26 muestran la distribución del gasto que se estimó por el método de SCS, con datos de las lluvias asociadas al huracán Karl de 2010 y las lluvias extraordinarias de julio 1999.

Cuadro 25. Datos para graficar el hidrograma del SCS con lluvias asociadas a Karl 2010.

$\frac{t}{t_p}$	$\frac{Q}{Q_p}$	URH									
		I		II		III		IV		V	
		t	Q	t	Q	t	Q	t	Q	t	Q
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.015	1.45	10.80	1.31	2.74	1.56	6.86	1.44	2.89	1.77	52.46
0.2	0.075	2.89	54.01	2.63	13.69	3.11	34.28	2.88	14.44	3.55	262.31
0.3	0.16	4.34	115.23	3.94	29.20	4.67	73.13	4.32	30.81	5.32	559.59
0.4	0.28	5.79	201.65	5.25	51.10	6.23	127.98	5.75	53.92	7.10	979.28
0.5	0.43	7.24	309.68	6.56	78.47	7.78	196.55	7.19	82.80	8.87	1,503.90
0.6	0.6	8.68	432.11	7.88	109.49	9.34	274.25	8.63	115.54	10.64	2,098.46
0.7	0.77	10.13	554.55	9.19	140.52	10.90	351.96	10.07	148.27	12.42	2,693.03
0.8	0.89	11.58	640.97	10.50	162.42	12.45	406.81	11.51	171.38	14.19	3,112.72
0.9	0.97	13.02	698.59	11.81	177.02	14.01	443.37	12.95	186.78	15.96	3,392.52
1.0	1.00	14.47	720.19	13.13	182.49	15.57	457.08	14.39	192.56	17.74	3,497.44
1.1	0.98	15.92	705.79	14.44	178.84	17.13	447.94	15.82	188.71	19.51	3,427.49
1.2	0.92	17.37	662.58	15.75	167.89	18.68	420.52	17.26	177.16	21.29	3,217.65
1.3	0.84	18.81	604.96	17.06	153.29	20.24	383.95	18.70	161.75	23.06	2,937.85
1.4	0.75	20.26	540.14	18.38	136.87	21.80	342.81	20.14	144.42	24.83	2,623.08
1.5	0.65	21.71	468.12	19.69	118.62	23.35	297.11	21.58	125.16	26.61	2,273.34
1.6	0.57	23.15	410.51	21.00	104.02	24.91	260.54	23.02	109.76	28.38	1,993.54
1.8	0.43	26.05	309.68	23.63	78.47	28.02	196.55	25.89	82.80	31.93	1,503.90
2.0	0.32	28.94	230.46	26.25	58.40	31.14	146.27	28.77	61.62	35.48	1,119.18
2.2	0.24	31.84	172.85	28.88	43.80	34.25	109.70	31.65	46.21	39.02	839.39
2.4	0.18	34.73	129.63	31.50	32.85	37.36	82.28	34.53	34.66	42.57	629.54
2.6	0.13	37.63	93.62	34.13	23.72	40.48	59.42	37.40	25.03	46.12	454.67
2.8	0.098	40.52	70.58	36.75	17.88	43.59	44.79	40.28	18.87	49.67	342.75
3.0	0.075	43.41	54.01	39.38	13.69	46.71	34.28	43.16	14.44	53.21	262.31



$\frac{t}{t_p}$	$\frac{Q}{Q_p}$	URH									
		I		II		III		IV		V	
		t	Q	t	Q	t	Q	t	Q	t	Q
3.5	0.036	50.65	25.93	45.94	6.57	54.49	16.46	50.35	6.93	62.08	125.91
4.0	0.018	57.89	12.96	52.50	3.28	62.27	8.23	57.54	3.47	70.95	62.95
4.5	0.009	65.12	6.48	59.06	1.64	70.06	4.11	64.74	1.73	79.82	31.48
5.0	0.004	72.36	2.88	65.63	0.73	77.84	1.83	71.93	0.77	88.69	13.99

Cuadro 25. Datos para graficar el hidrograma del SCS con lluvias asociadas a Karl 2010 (continuación).

$\frac{t}{t_p}$	$\frac{Q}{Q_p}$	URH							
		VI		VII		VIII		IX	
		t	Q	t	Q	t	Q	t	Q
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.015	1.61	15.85	1.56	6.86	1.80	65.98	1.93	71.24
0.2	0.075	3.22	79.23	3.11	34.28	3.61	329.92	3.87	356.19
0.3	0.16	4.83	169.01	4.67	73.13	5.41	703.83	5.80	759.87
0.4	0.28	6.44	295.77	6.23	127.98	7.21	1,231.70	7.74	1,329.77
0.5	0.43	8.05	454.23	7.78	196.55	9.02	1,891.53	9.67	2,042.14
0.6	0.6	9.66	633.80	9.34	274.25	10.82	2,639.35	11.61	2,849.50
0.7	0.77	11.28	813.38	10.90	351.96	12.63	3,387.16	13.54	3,656.86
0.8	0.89	12.89	940.14	12.45	406.81	14.43	3,915.03	15.47	4,226.76
0.9	0.97	14.50	1,024.65	14.01	443.37	16.23	4,266.95	17.41	4,606.69
1.0	1.00	16.11	1,056.34	15.57	457.08	18.04	4,398.92	19.34	4,749.16
1.1	0.98	17.72	1,035.21	17.13	447.94	19.84	4,310.94	21.28	4,654.18
1.2	0.92	19.33	971.83	18.68	420.52	21.64	4,047.00	23.21	4,369.23
1.3	0.84	20.94	887.32	20.24	383.95	23.45	3,695.09	25.14	3,989.30
1.4	0.75	22.55	792.25	21.80	342.81	25.25	3,299.19	27.08	3,561.87
1.5	0.65	24.16	686.62	23.35	297.11	27.05	2,859.29	29.01	3,086.96
1.6	0.57	25.77	602.11	24.91	260.54	28.86	2,507.38	30.95	2,707.02
1.8	0.43	28.99	454.23	28.02	196.55	32.47	1,891.53	34.82	2,042.14
2.0	0.32	32.22	338.03	31.14	146.27	36.07	1,407.65	38.68	1,519.73
2.2	0.24	35.44	253.52	34.25	109.70	39.68	1,055.74	42.55	1,139.80
2.4	0.18	38.66	190.14	37.36	82.28	43.29	791.80	46.42	854.85



$\frac{t}{t_p}$	$\frac{Q}{Q_p}$	URH							
		VI		VII		VIII		IX	
		t	Q	t	Q	t	Q	t	Q
2.6	0.13	41.88	137.32	40.48	59.42	46.90	571.86	50.29	617.39
2.8	0.098	45.10	103.52	43.59	44.79	50.50	431.09	54.16	465.42
3.0	0.075	48.32	79.23	46.71	34.28	54.11	329.92	58.03	356.19
3.5	0.036	56.38	38.03	54.49	16.46	63.13	158.36	67.70	170.97
4.0	0.018	64.43	19.01	62.27	8.23	72.15	79.18	77.37	85.48
4.5	0.009	72.48	9.51	70.06	4.11	81.16	39.59	87.04	42.74
5.0	0.004	80.54	4.23	77.84	1.83	90.18	17.60	96.71	19.00

Cuadro 26. Datos para graficar el hidrograma del SCS con lluvias del 12 julio 1999.

$\frac{t}{t_p}$	$\frac{Q}{Q_p}$	URH									
		I		II		III		IV		V	
		t	Q	t	Q	t	Q	t	Q	t	Q
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.015	1.45	4.18	1.31	1.17	1.48	1.23	1.44	0.97	1.77	27.18
0.2	0.075	2.89	20.91	2.63	5.85	2.96	6.16	2.88	4.87	3.55	135.90
0.3	0.16	4.34	44.60	3.94	12.48	4.44	13.13	4.32	10.40	5.32	289.91
0.4	0.28	5.79	78.06	5.25	21.84	5.92	22.99	5.75	18.20	7.10	507.35
0.5	0.43	7.24	119.87	6.56	33.54	7.40	35.30	7.19	27.95	8.87	779.14
0.6	0.6	8.68	167.27	7.88	46.80	8.88	49.25	8.63	38.99	10.64	1,087.17
0.7	0.77	10.13	214.66	9.19	60.06	10.36	63.21	10.07	50.04	12.42	1,395.21
0.8	0.89	11.58	248.11	10.50	69.42	11.85	73.06	11.51	57.84	14.19	1,612.64
0.9	0.97	13.02	270.41	11.81	75.66	13.33	79.63	12.95	63.04	15.96	1,757.60
1.0	1.00	14.47	278.78	13.13	78.00	14.81	82.09	14.39	64.99	17.74	1,811.96
1.1	0.98	15.92	273.20	14.44	76.44	16.29	80.45	15.82	63.69	19.51	1,775.72
1.2	0.92	17.37	256.47	15.75	71.76	17.77	75.52	17.26	59.79	21.29	1,667.00
1.3	0.84	18.81	234.17	17.06	65.52	19.25	68.96	18.70	54.59	23.06	1,522.04
1.4	0.75	20.26	209.08	18.38	58.50	20.73	61.57	20.14	48.74	24.83	1,358.97
1.5	0.65	21.71	181.20	19.69	50.70	22.21	53.36	21.58	42.24	26.61	1,177.77
1.6	0.57	23.15	158.90	21.00	44.46	23.69	46.79	23.02	37.04	28.38	1,032.82
1.8	0.43	26.05	119.87	23.63	33.54	26.65	35.30	25.89	27.95	31.93	779.14



$\frac{t}{t_p}$	$\frac{Q}{Q_p}$	URH									
		I		II		III		IV		V	
		t	Q	t	Q	t	Q	t	Q	t	Q
2.0	0.32	28.94	89.21	26.25	24.96	29.61	26.27	28.77	20.80	35.48	579.83
2.2	0.24	31.84	66.91	28.88	18.72	32.57	19.70	31.65	15.60	39.02	434.87
2.4	0.18	34.73	50.18	31.50	14.04	35.54	14.78	34.53	11.70	42.57	326.15
2.6	0.13	37.63	36.24	34.13	10.14	38.50	10.67	37.40	8.45	46.12	235.55
2.8	0.098	40.52	27.32	36.75	7.64	41.46	8.04	40.28	6.37	49.67	177.57
3.0	0.075	43.41	20.91	39.38	5.85	44.42	6.16	43.16	4.87	53.21	135.90
3.5	0.036	50.65	10.04	45.94	2.81	51.82	2.96	50.35	2.34	62.08	65.23
4.0	0.018	57.89	5.02	52.50	1.40	59.23	1.48	57.54	1.17	70.95	32.62
4.5	0.009	65.12	2.51	59.06	0.70	66.63	0.74	64.74	0.58	79.82	16.31
5.0	0.004	72.36	1.12	65.63	0.31	74.03	0.33	71.93	0.26	88.69	7.25

Cuadro 26. Datos para graficar el hidrograma del SCS con lluvias del 12 julio 1999 (continuación).

$\frac{t}{t_p}$	$\frac{Q}{Q_p}$	URH							
		VI		VII		VIII		IX	
		t	Q	t	Q	t	Q	t	Q
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.015	1.61	6.21	1.56	2.39	1.80	32.35	1.93	33.50
0.2	0.075	3.22	31.05	3.11	11.93	3.61	161.75	3.87	167.48
0.3	0.16	4.83	66.24	4.67	25.46	5.41	345.06	5.80	357.29
0.4	0.28	6.44	115.92	6.23	44.55	7.21	603.85	7.74	625.26
0.5	0.43	8.05	178.02	7.78	68.42	9.02	927.35	9.67	960.21
0.6	0.6	9.66	248.40	9.34	95.46	10.82	1,293.97	11.61	1,339.83
0.7	0.77	11.28	318.78	10.90	122.51	12.63	1,660.60	13.54	1,719.45
0.8	0.89	12.89	368.46	12.45	141.60	14.43	1,919.39	15.47	1,987.42
0.9	0.97	14.50	401.58	14.01	154.33	16.23	2,091.92	17.41	2,166.06
1.0	1.00	16.11	414.00	15.57	159.11	18.04	2,156.62	19.34	2,233.05
1.1	0.98	17.72	405.72	17.13	155.92	19.84	2,113.49	21.28	2,188.39
1.2	0.92	19.33	380.88	18.68	146.38	21.64	1,984.09	23.21	2,054.41
1.3	0.84	20.94	347.76	20.24	133.65	23.45	1,811.56	25.14	1,875.77
1.4	0.75	22.55	310.50	21.80	119.33	25.25	1,617.46	27.08	1,674.79



$\frac{t}{t_p}$	$\frac{Q}{Q_p}$	URH							
		VI		VII		VIII		IX	
		t	Q	t	Q	t	Q	t	Q
1.5	0.65	24.16	269.10	23.35	103.42	27.05	1,401.80	29.01	1,451.49
1.6	0.57	25.77	235.98	24.91	90.69	28.86	1,229.27	30.95	1,272.84
1.8	0.43	28.99	178.02	28.02	68.42	32.47	927.35	34.82	960.21
2.0	0.32	32.22	132.48	31.14	50.91	36.07	690.12	38.68	714.58
2.2	0.24	35.44	99.36	34.25	38.19	39.68	517.59	42.55	535.93
2.4	0.18	38.66	74.52	37.36	28.64	43.29	388.19	46.42	401.95
2.6	0.13	41.88	53.82	40.48	20.68	46.90	280.36	50.29	290.30
2.8	0.098	45.10	40.57	43.59	15.59	50.50	211.35	54.16	218.84
3.0	0.075	48.32	31.05	46.71	11.93	54.11	161.75	58.03	167.48
3.5	0.036	56.38	14.90	54.49	5.73	63.13	77.64	67.70	80.39
4.0	0.018	64.43	7.45	62.27	2.86	72.15	38.82	77.37	40.19
4.5	0.009	72.48	3.73	70.06	1.43	81.16	19.41	87.04	20.10
5.0	0.004	80.54	1.66	77.84	0.64	90.18	8.63	96.71	8.93

Las Figuras 30 y 31 representan los hidrogramas del SCS calculados para las nueve URH, con datos de las lluvias asociadas al huracán Karl y las lluvias extraordinarias del 12 julio 1999.

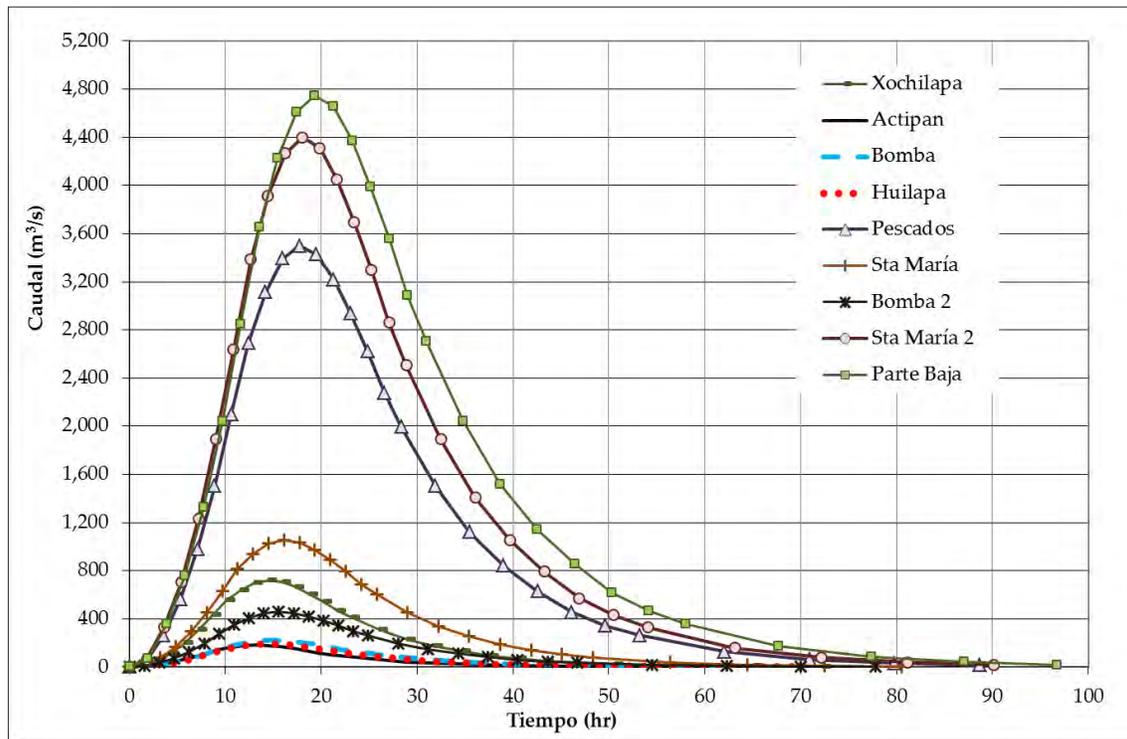


Figura 30. Hidrogramas unitarios sintéticos correspondiente a las lluvias del huracán Karl en 2010.

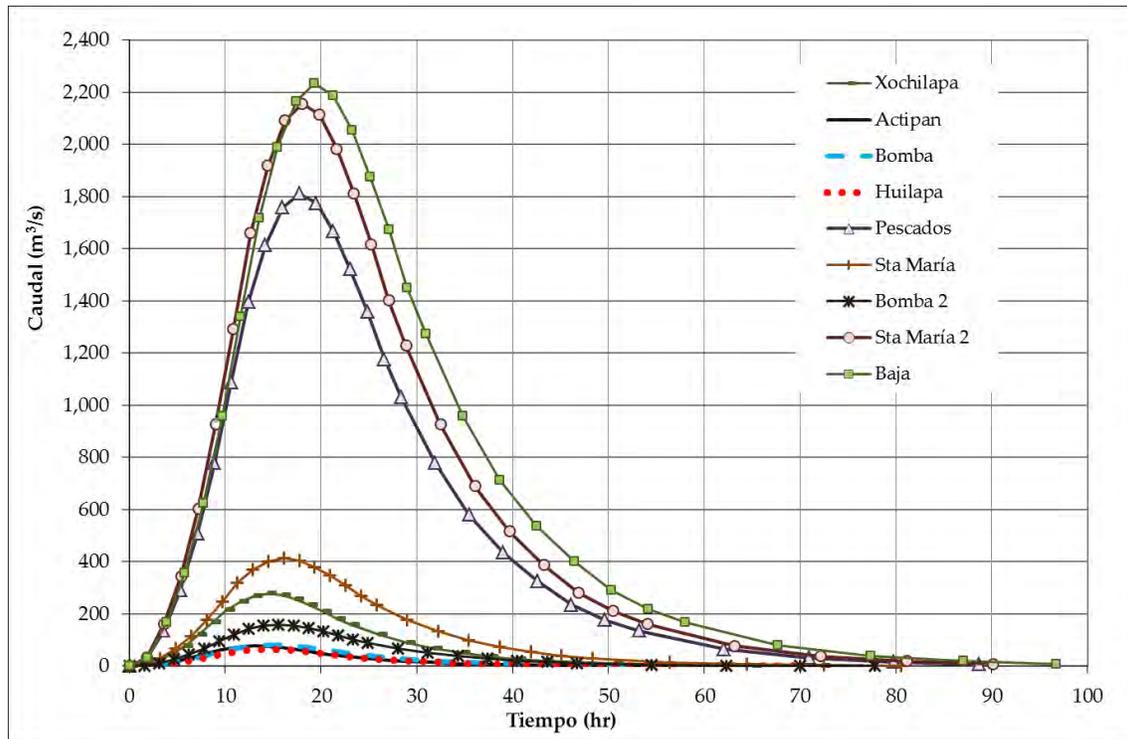


Figura 31. Hidrogramas unitarios sintéticos correspondiente a las lluvias extraordinarias del 12 julio 1999.

8.2.7. Modelación con HEC-GeoRAS

La extensión Hec-GeoRAS se desarrolló para procesar los datos georeferenciados del terreno bajo el entorno de los SIG. Con esta herramienta se obtuvo la geometría de los afluentes considerados en la simulación hidráulica.

8.2.7.1. Digitalización del centro y márgenes de los afluentes

En ArcMap 9.3 se digitalizaron los márgenes y centro de los afluentes utilizando las imágenes de satélite y el MDE LiDAR tipo Terreno. La digitalización se realizó mediante el comando *Stream Centerline* del menú *RAS Geometry* (Figura 32).

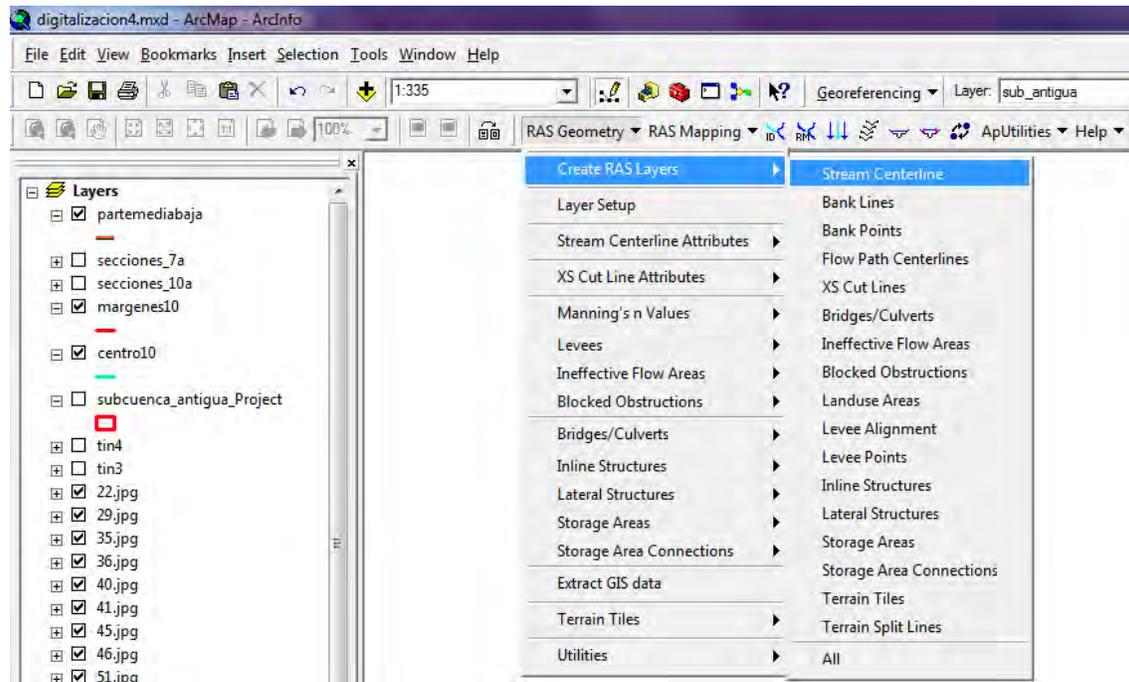


Figura 32. Comando para digitalizar el centro de los cauces.

Primero se digitalizó el centro del cauce principal (río La Antigua), de aguas arriba hacia aguas abajo; los centros de afluentes secundarios se unieron al centro del cauce principal conforme avanzó la digitalización. Cada centro o eje se forma por una línea continua.

A cada eje o centro de cauce se le asignó un nombre de identificación mediante el comando *Assign River and Reach Code*. En la primera celda (*River Name*) se escribió el nombre del cauce principal, en la segunda (*Reach Name*) se colocó el nombre del tramo o afluente secundario (Figura 33).

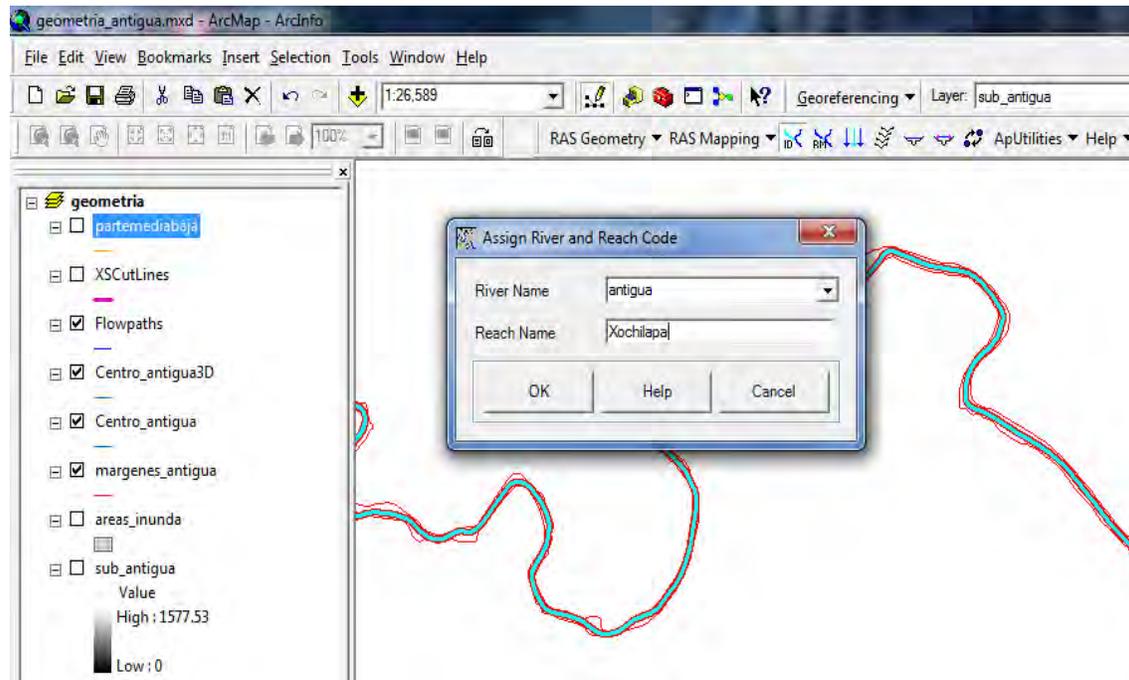


Figura 33. Asignación del código o nombre de identificación.

Posteriormente se agregó la información topográfica o 3D (X, Y, Z) a los nueve centros de cauces digitalizados, esto se hizo mediante el comando *Stream Centerline Attributes*, que extrajo la información del MDE LiDAR y la añadió a cada uno de los centros (Figura 34).

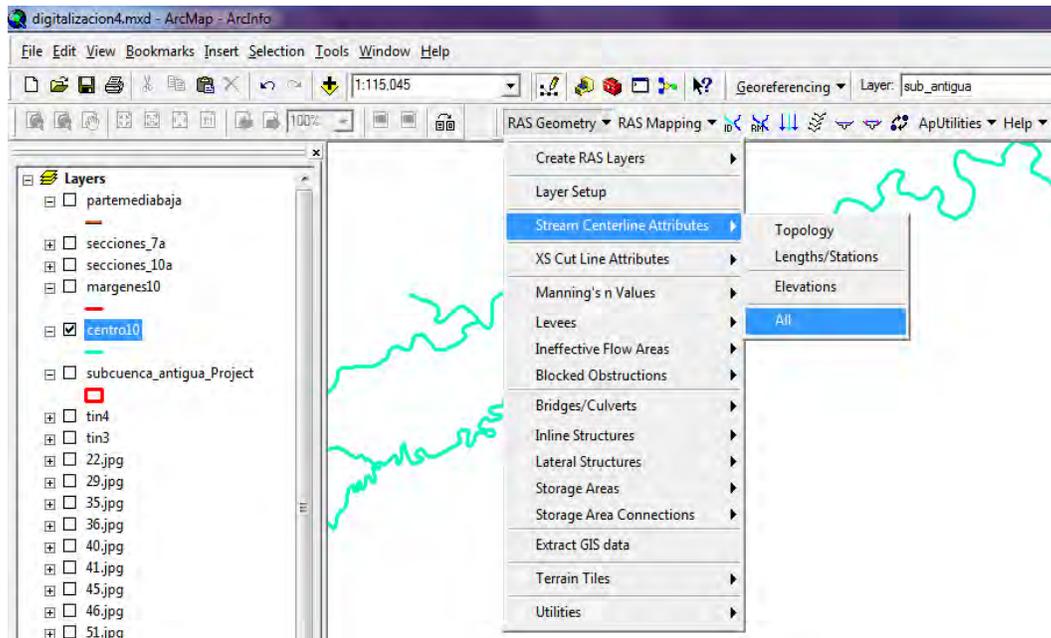


Figura 34. Comando para agregar la información 3D al centro del cauce.

El siguiente paso fue digitalizar las márgenes de los afluentes, para ello se utilizó el comando *Bank Lines* (Figura 35).

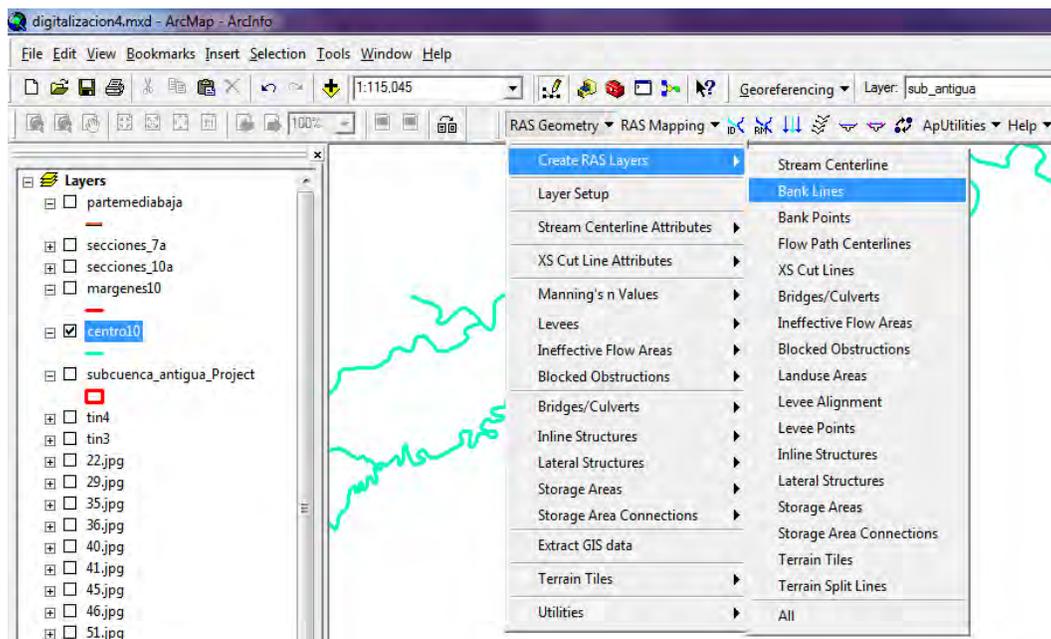


Figura 35. Comando para digitalizar las márgenes de los afluentes.

Primero se digitalizó la margen izquierda del cauce principal, después la margen derecha, ambas de aguas arriba hacia aguas abajo, cada margen se forma por una línea continua. Conforme se avanzó en la digitalización se unieron los márgenes de los afluentes tributarios. La longitud de los centros de cauces digitalizados suman 186.5 km y las márgenes sumaron 374.4 km (Figura 36).

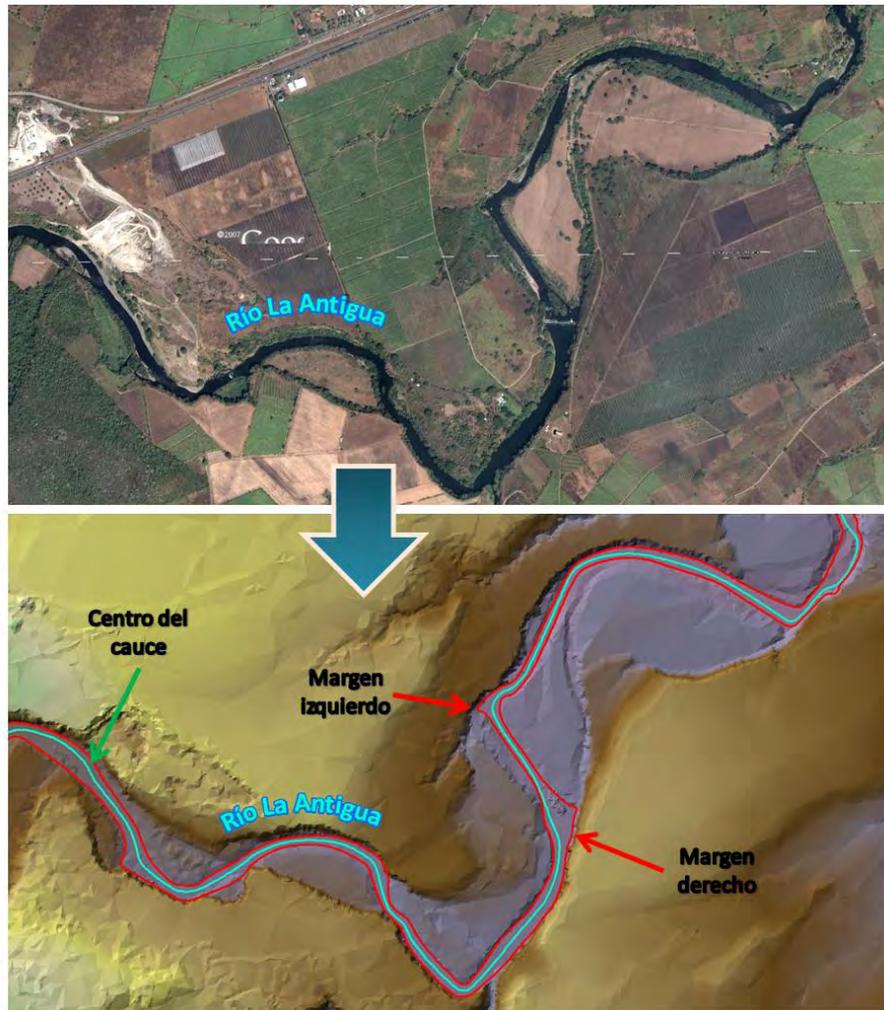


Figura 36. Digitalización del centro y margen de los afluentes.

8.2.7.2. Proyección de los centroides

Una vez que se digitalizó el centro y márgenes de los cauces, se dibujaron los *FlowPaths* o centroides de las zonas por donde circula el flujo de agua. El comando *Flow Path Centerlines* asignó la dirección de flujo que el modelo previo para cada centro de cauce (Figura 37).

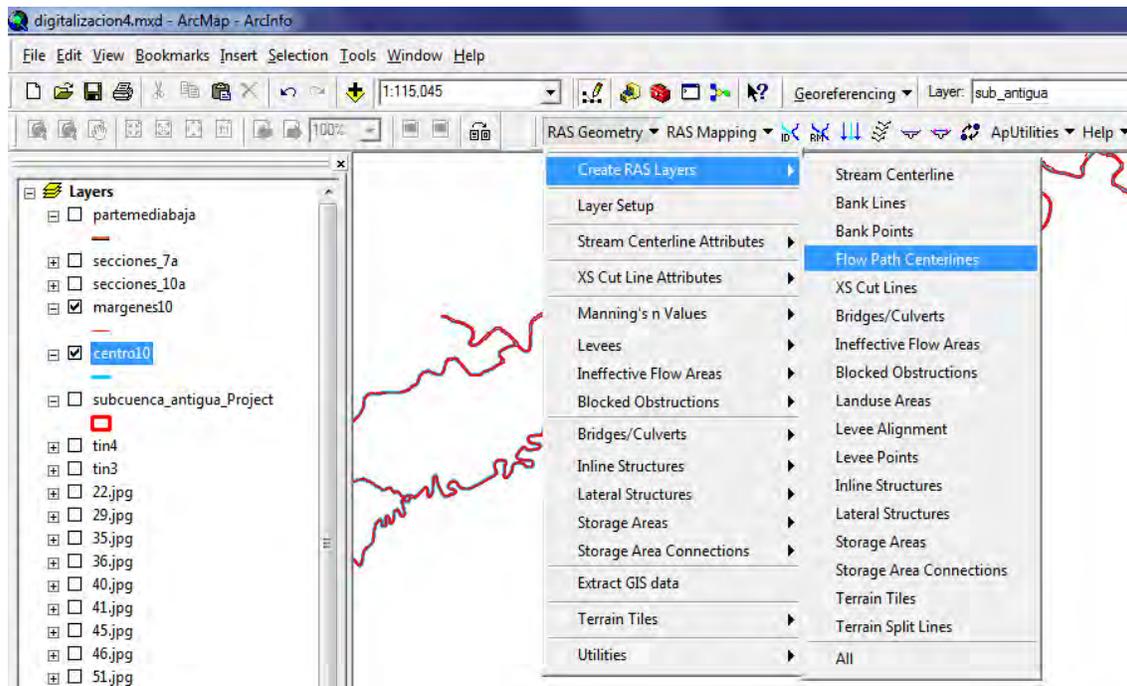


Figura 37. Establecimiento de la dirección de flujo.

8.2.7.3. Dibujo de las secciones transversales

A partir de las secciones transversales se definió la forma de los cauces, para generar las secciones se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- a) el trazo de la sección transversal inicia de la margen izquierda hacia la margen derecha
- b) las secciones transversales se dibujan de aguas arriba hacia aguas abajo
- c) las secciones transversales son perpendiculares al centro del cauce
- d) en ningún momento se deben cruzar (o interceptar) las secciones transversales

- e) cada sección transversal cruza una sola vez al centro del cauce (*Stream Centerline*) y una sola vez a las márgenes (*Bank Lines*)

Se utilizó el comando *Create Cross Sections* (Figura 38) para crear 2,435 secciones transversales a lo largo de los nueve tramos o cauces que integran la red hidrológica digitalizada. El intervalo entre cada sección transversal es de 20 m y la longitud de trazo (o ancho de sección) oscila entre 100 y 1,200 m (Figura 39).

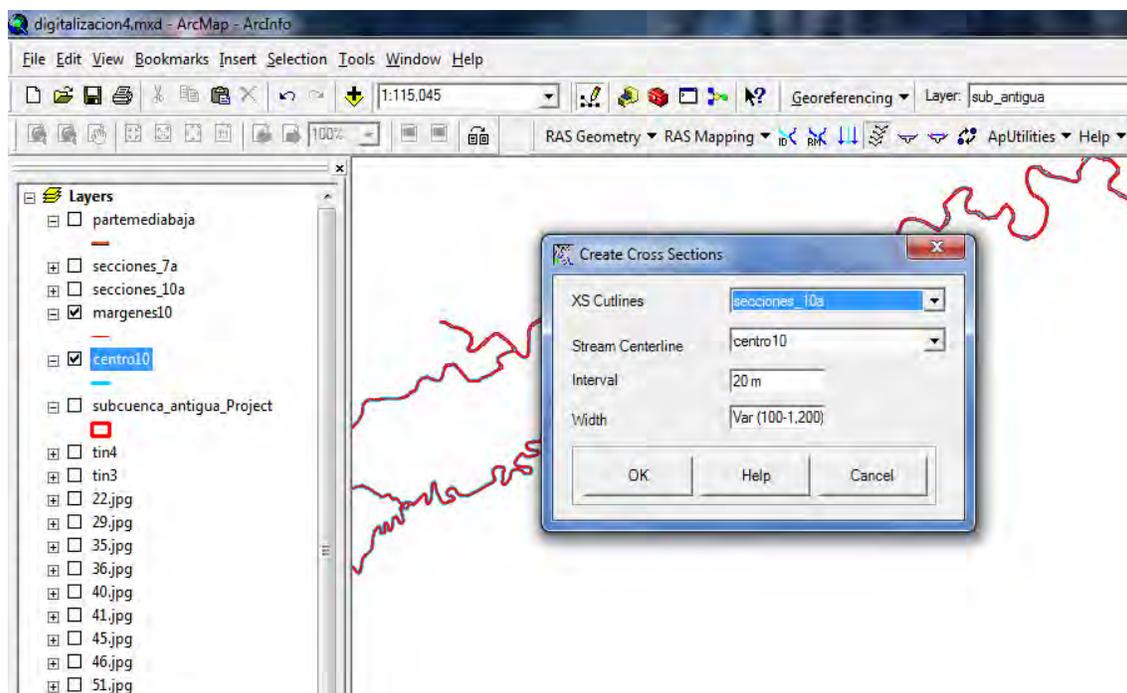


Figura 38. Creación de las secciones transversales.

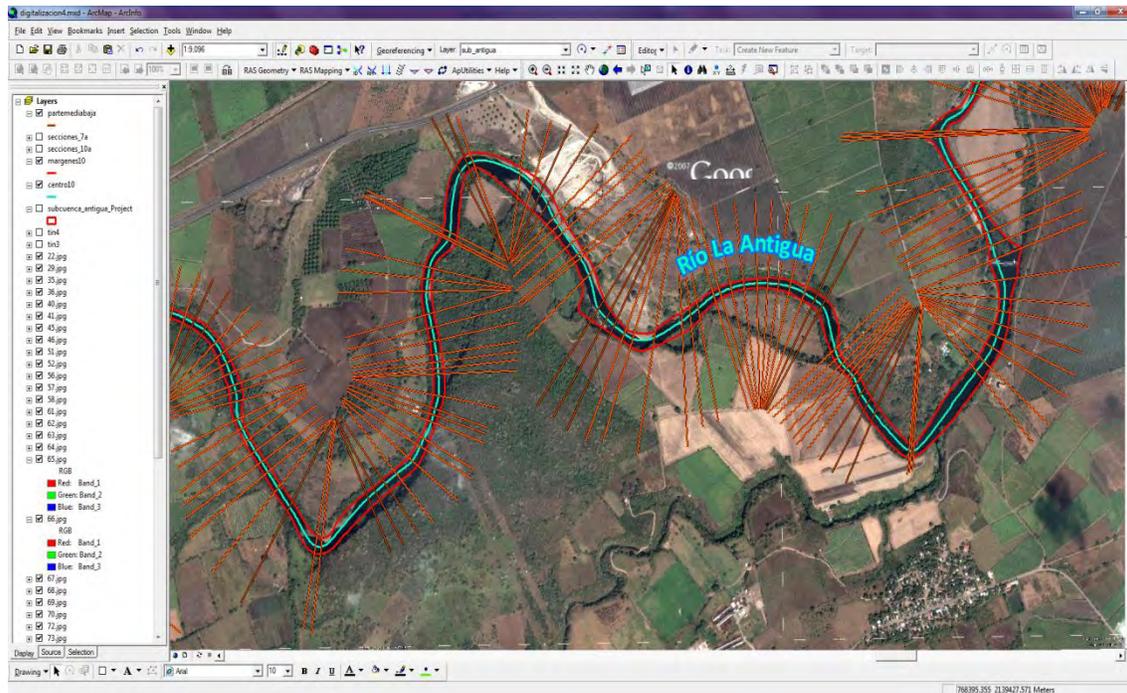


Figura 39. Secciones transversales del río La Antigua y sus afluentes.

Al igual que los centros o ejes del cauces, se debe agregar la información topográfica o 3D (X, Y, Z) a las secciones transversales, esto se hizo mediante el comando *XS Cut Line Attributes* (Figura 40), el cual extrajo la información del MDE LiDAR y la añadió a las secciones transversales.

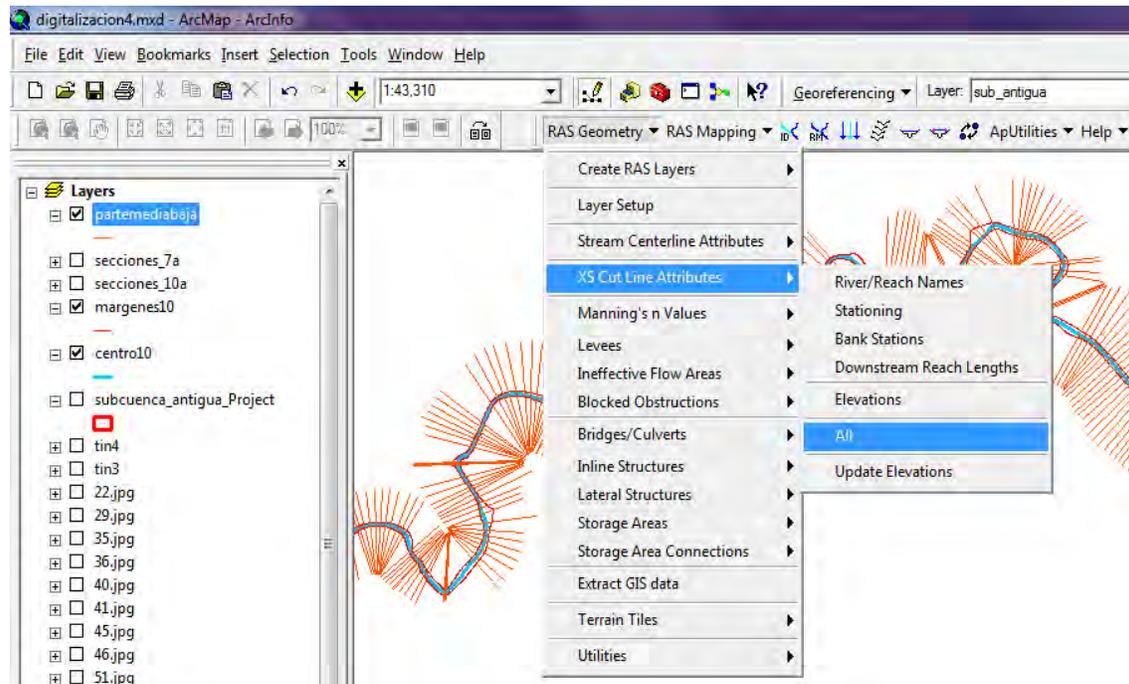


Figura 40. Asignación de la información 3D a las secciones transversales.

Al activar la extensión aparece un cuadro de dialogo donde se eligen las capas necesarias para agregar la información 3D (Figura 41). En la primera celda (*Stream Centerline*) se seleccionó la capa de los centros o ejes de cauce; en *Bank Lines* se eligió la capa de las márgenes; en la tercera celda (*Flowpaths*) se eligió la dirección de flujo; en *XS Cutlines* se eligieron los trazos que dibujaron las secciones transversales; en *Terrain* se seleccionó el MDE LiDAR; y en la sexta celda (*XS Cutlines Profiles*) se asignó el nombre al archivo que contiene la información 3D.

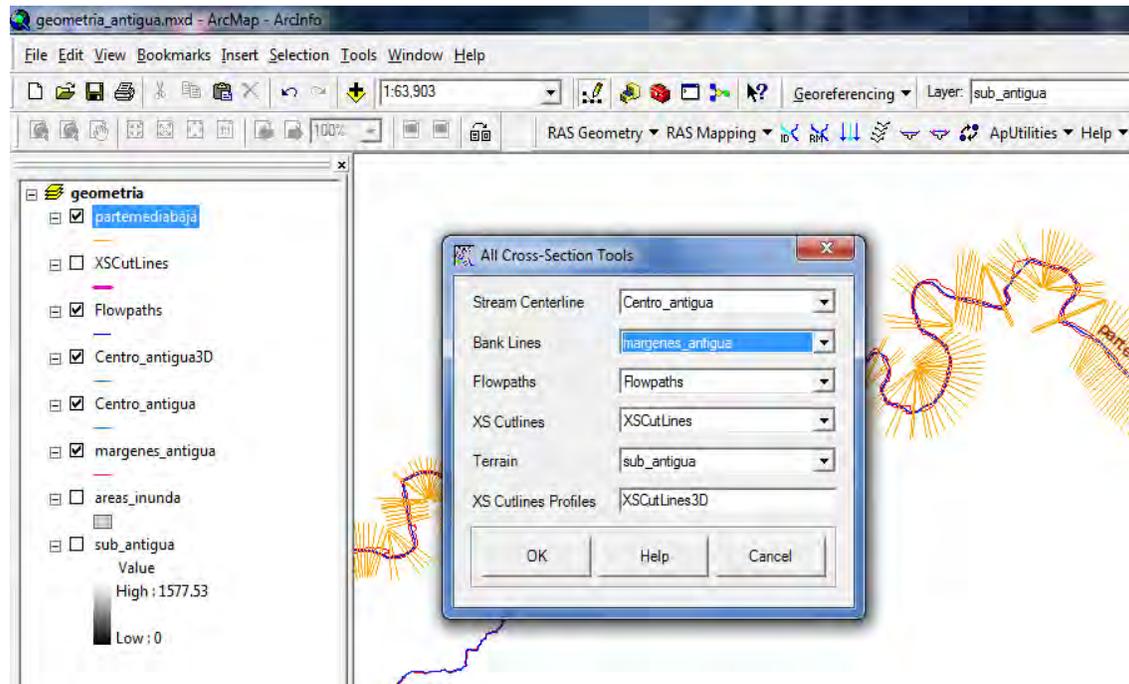


Figura 41. Especificación de las capas necesarias para asignar la información 3D a las secciones transversales.

8.2.7.4. Exportación de la geometría

Una vez que se generó la geometría de los afluentes se exportó a HEC-RAS activando el fichero *Extract GIS Data* (Figura 42), la cual prepara la información 3D para ser leído por HEC-RAS, el fichero de texto se guardó con el formato *.sdf*

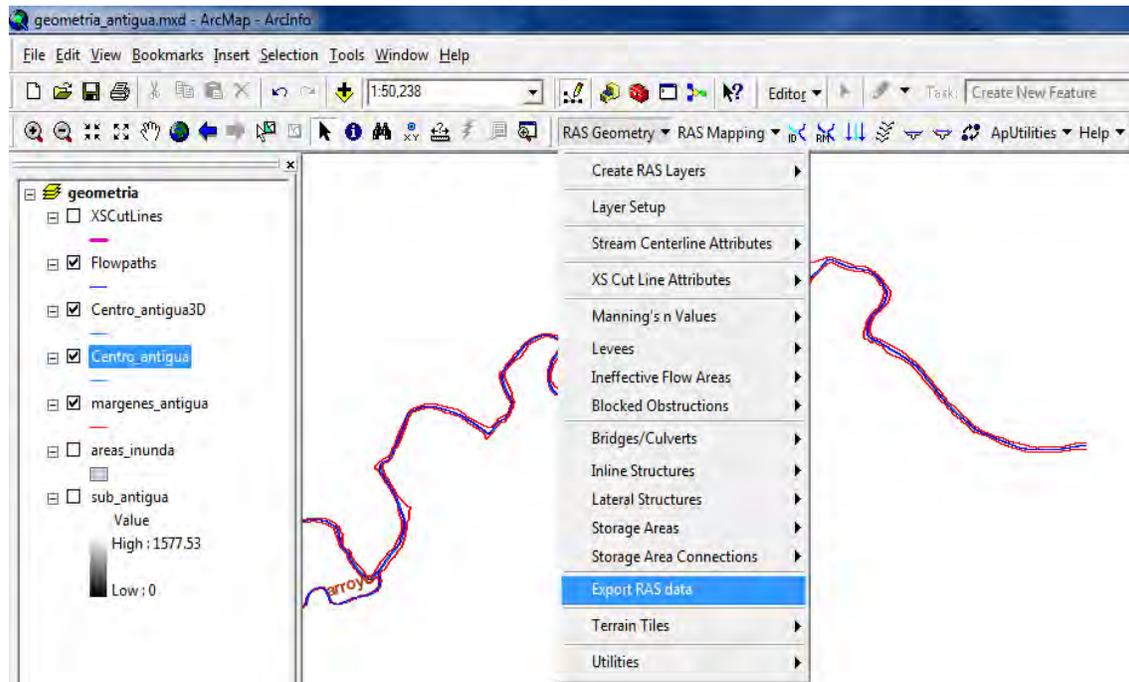


Figura 42. Exportación de la geometría.

8.2.8. Modelación con HEC-RAS

En este apartado se describirá el procedimiento seguido para modelar bajo el entorno de HEC-RAS. Entre los elementos más importantes, se describe el proceso de importación de la geometría obtenida con HEC-GeoRAS, la determinación del coeficiente de rugosidad de Manning y la integración de las bases de datos para correr el modelo bajo flujo no permanente, así como las condiciones de frontera y régimen de flujo.

8.2.8.1. Importación a HEC-RAS

Ya en la plataforma de HEC-RAS se importó la geometría de los afluentes activando el comando *Import Geometry Data / GIS format* del menú *File* (Figura 43), y se eligió el archivo *.sdf* generado en ArcGis 9.3.

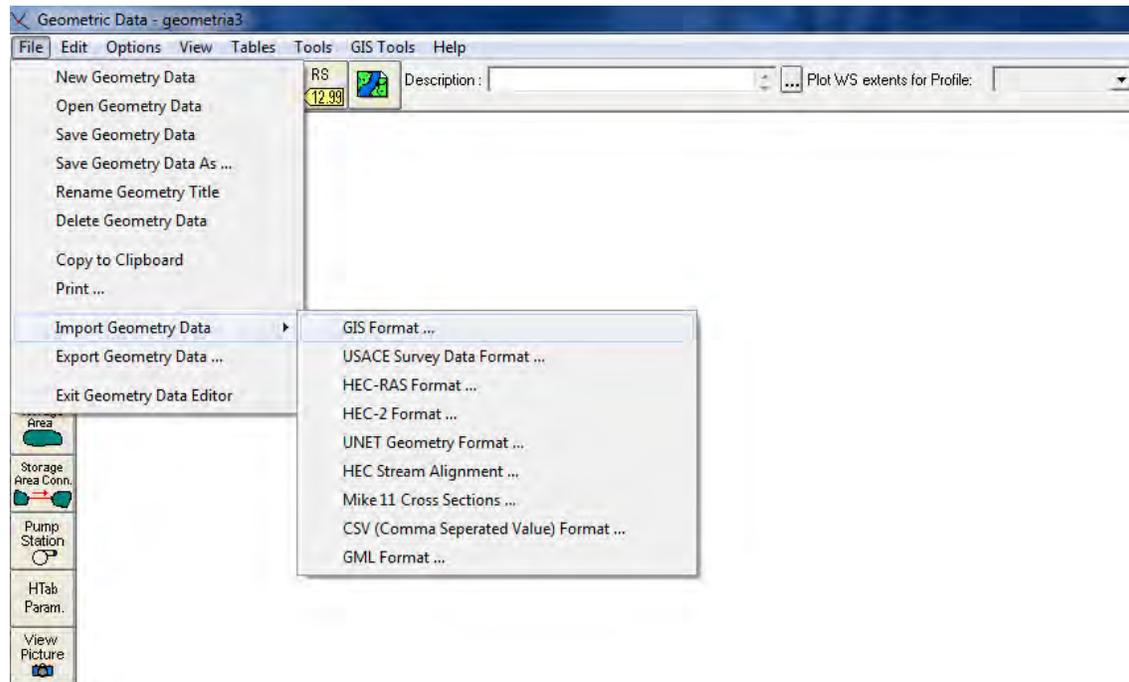


Figura 43. Comando para importar la geometría en HEC-RAS.

Al activar este comando aparece un cuadro de dialogo (Figura 44), en las opciones de importación se eligió Unidades del Sistema Métrico (SI), posteriormente se comprobó que los datos en la pestaña *River Reach Stream Lines* fuesen los correctos. En la pestaña *Cross Sections and IB Nodes*, se añadió la información en las ventanas *Import River e Import Reach* y se redondeó el número que identifica las secciones en el fichero *Round Selected RS*.

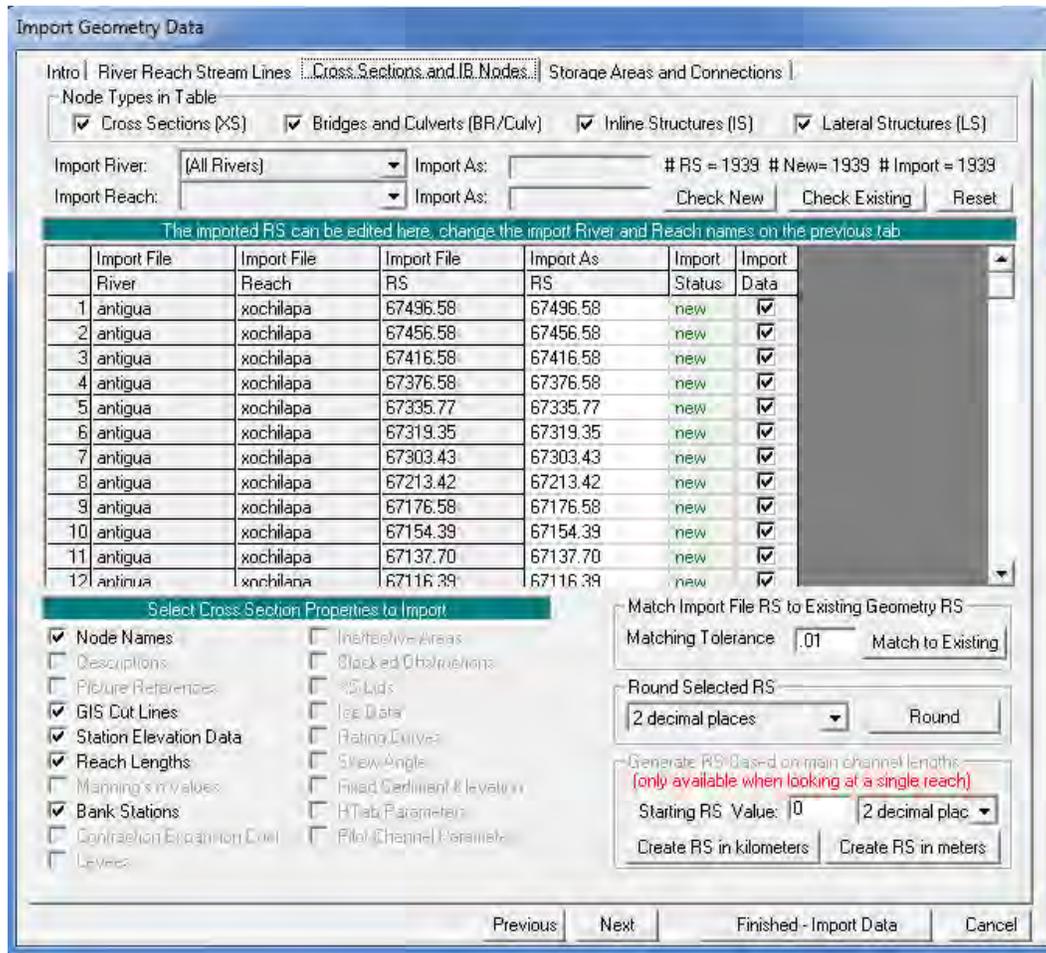


Figura 44. Importación de la geometría en HEC-RAS.

Las Figuras 45 a 48 muestran la apariencia de los datos geométricos importados en HEC-RAS.

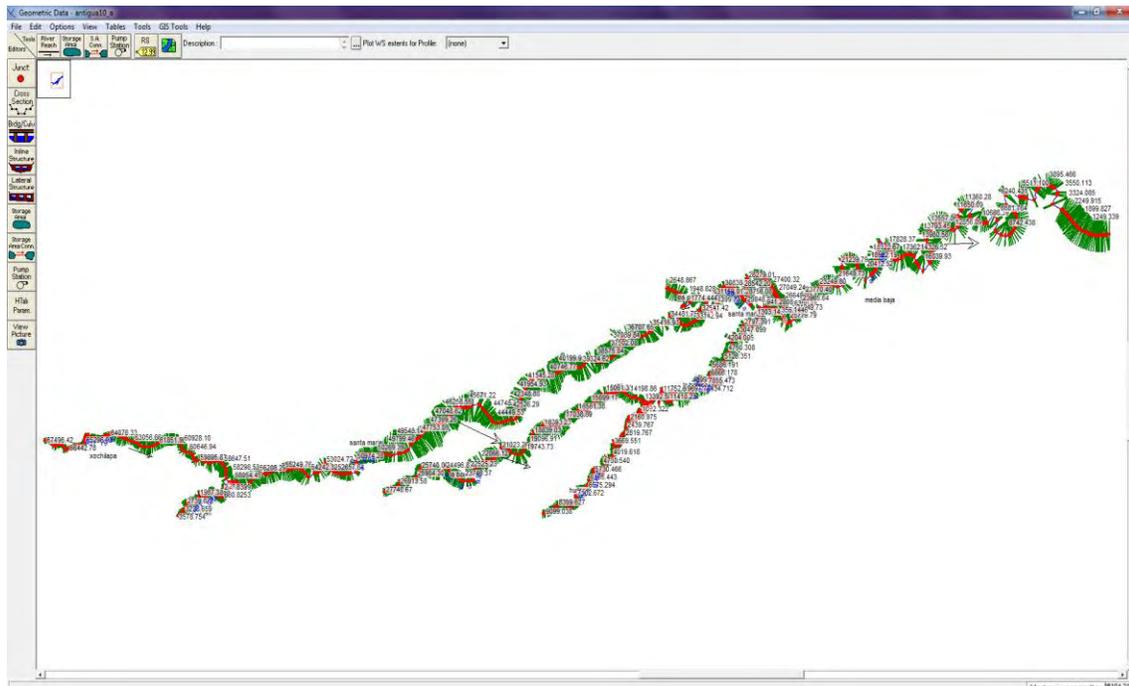


Figura 45. Secciones transversales de la red de drenaje.

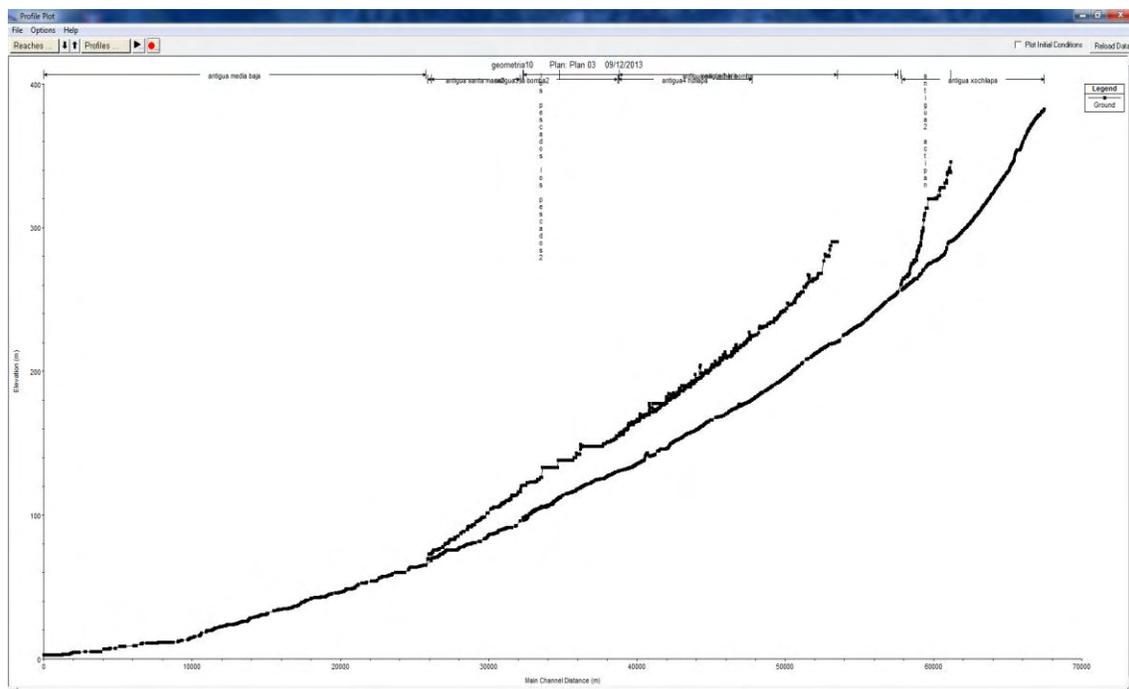


Figura 46. Perfiles longitudinales de cada tramo o afluente digitalizado.

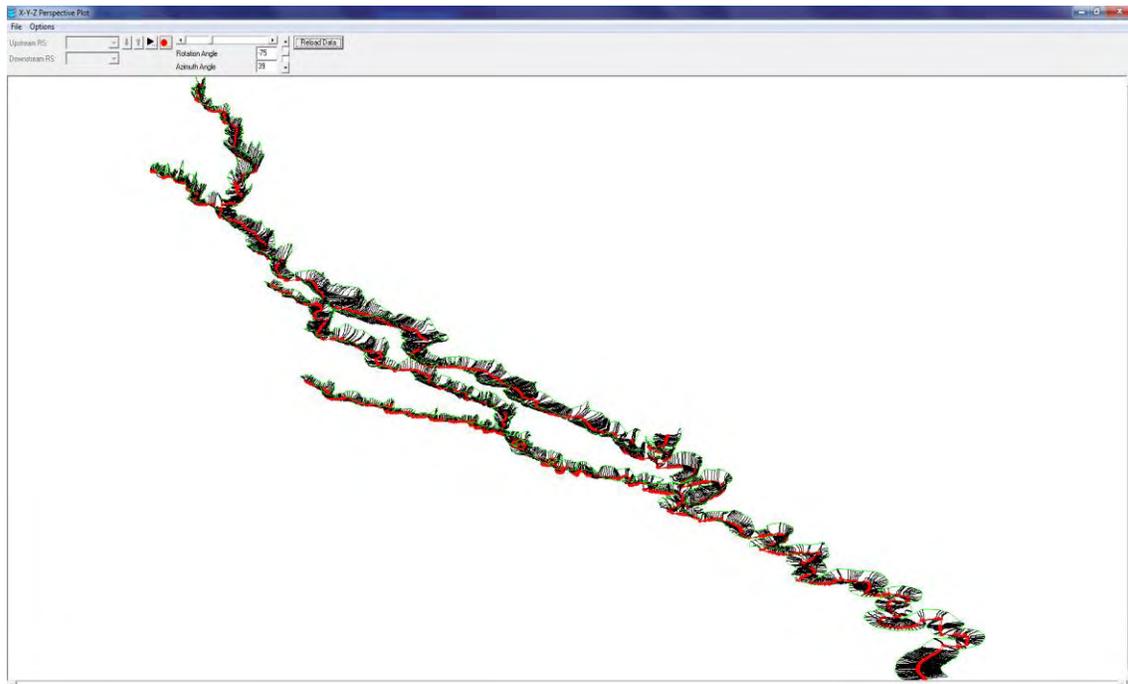


Figura 47. Conjunto de secciones transversales.

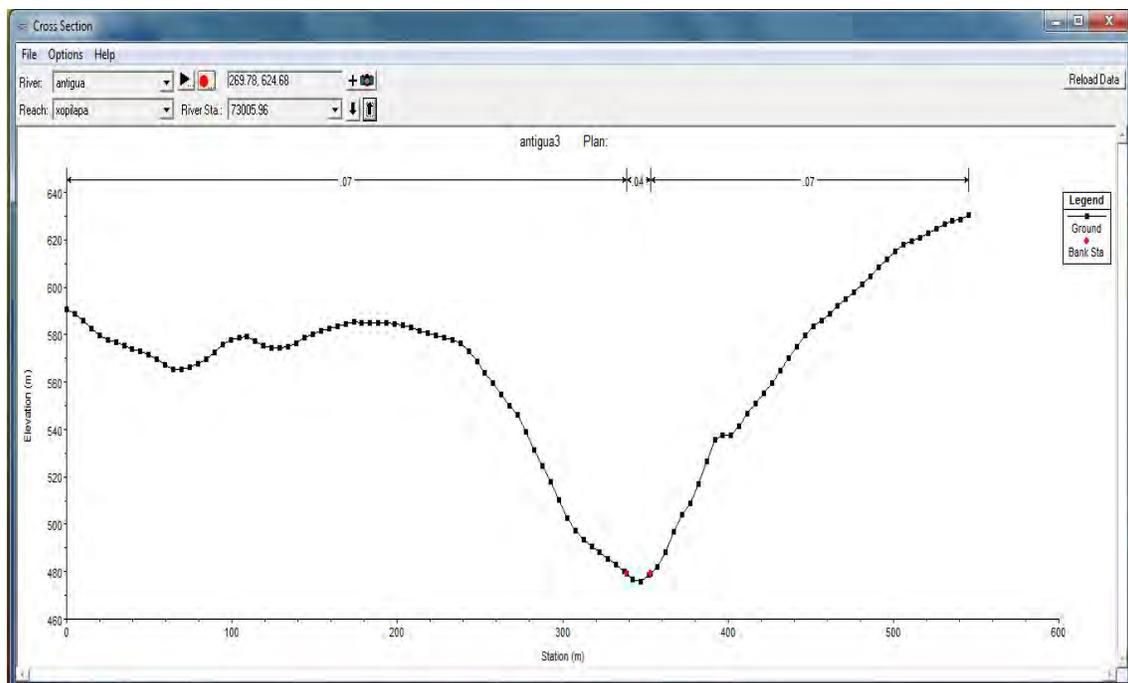


Figura 48. Ejemplo de la sección transversal No. 73005.96 del tramo Xochilapa.



8.2.8.2. Determinación del coeficiente de Manning

El coeficiente de rugosidad de Manning representa la resistencia al flujo de agua en cauces sobre las llanuras de inundación, el valor es más alto cuando existe mayor rugosidad en la superficie de contacto con el flujo (Kumar, 2013). Este coeficiente debería ser calibrado a partir de información de perfiles de agua observados, sin embargo, cuando no se dispone de datos de aforo, se recomienda utilizar guías para la selección del coeficiente que propongan valores para cauces de características similares o valores obtenidos de datos experimentales (Turégano, 2012).

El modelo requiere la asignación de un coeficiente de rugosidad para la margen izquierda, derecha y centro de cada sección transversal. El valor se estableció utilizando la “Tabla del coeficiente de rugosidad de Manning” propuesta por Ven Te Chow (1994) que establece el coeficiente en relación a las características y condiciones más sobresalientes del canal como: rugosidad del fondo del cauce, cobertura y tipo de vegetación, sinuosidad del canal, entre otras. La asignación de este coeficiente se apoyó en puntos de verificación en campo efectuados sobre el río La Antigua y sus afluentes.

En la Figura 49 se observa que los márgenes (izquierda y derecha) pueden ser muy diferentes en una misma sección, por lo tanto cada margen tiene un valor diferente.

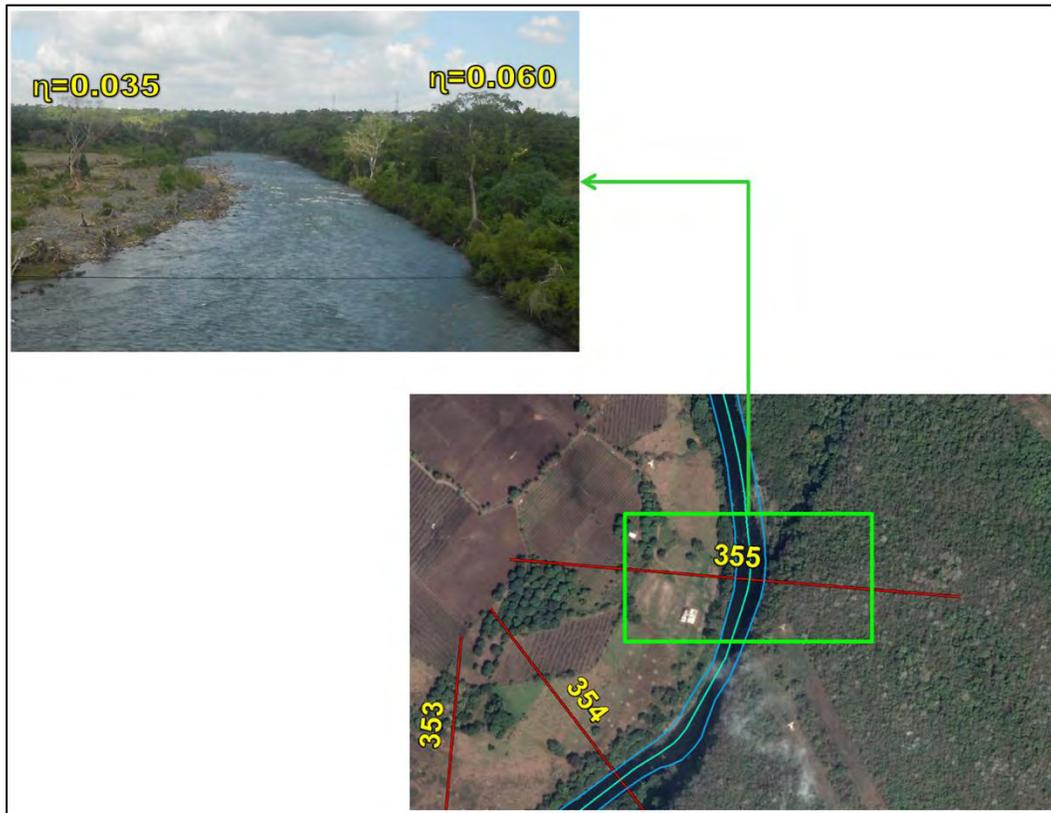


Figura 49. Asignación del η de Manning para ambas márgenes o llanuras de inundación.

Así mismo, en la Figura 50 se observan dos tramos del río La Antigua cuyos centros poseen distintas características de rugosidad, por ello se asignó un valor diferente a cada tramo, acorde a las condiciones del sitio en la sección.



Figura 50. Asignación del η de Manning para el centro del cauce.

En total se asignaron 7,305 valores de Manning, correspondientes a 2,435 secciones, el Cuadro 27 muestra un segmento de la matriz que se creó con estos datos.

Cuadro 27. Valores de η Manning.

Sección	Izquierda	Centro del canal	Derecha
Tramo Xochilapa (URH I)			
1	0.030	0.030	0.030
2	0.030	0.030	0.030
3	0.030	0.030	0.030
...
Tramo Parte baja (URH IX)			
387	0.025	0.025	0.025
388	0.025	0.025	0.025
389	0.025	0.025	0.025

Los datos se ingresaron mediante el comando *Tables / Manning's n or k values* (Figura 51).

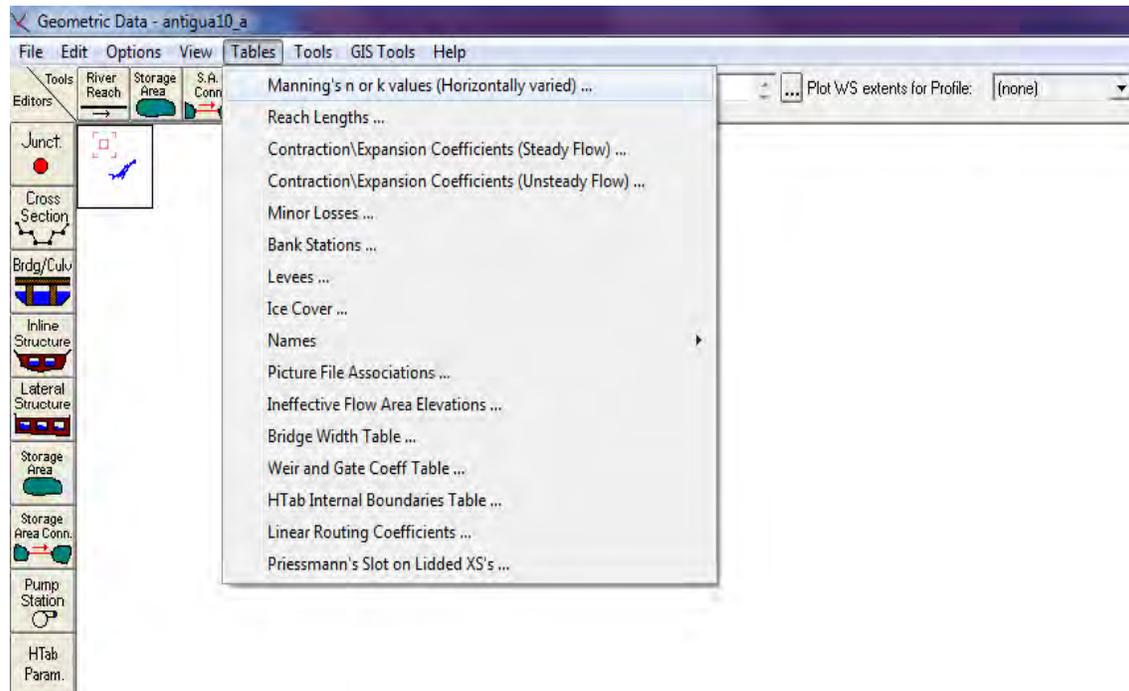


Figura 51. Comando para asignar el η de Manning.

Al activar dicho comando aparece un cuadro de dialogo donde se ingresaron los valores de Manning, primero se anotaron los valores de la margen izquierda, después los del centro del cauce y al final la margen derecha, este mismo procedimiento se aplicó para cada tramo (Figura 52).

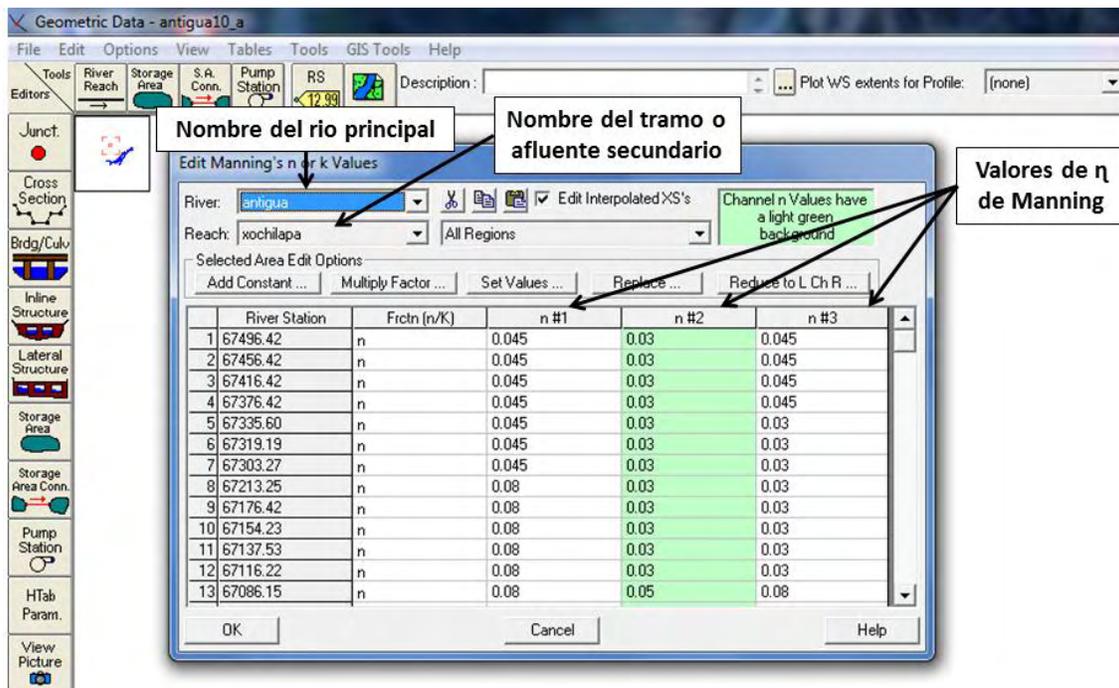


Figura 52. Asignación de los valores de η de Manning.

8.2.8.3. Distancia entre secciones

Otro elemento importante para la simulación es la distancia que existe entre cada sección transversal, al igual que los valores de Manning, las distancias se ingresaron por tramo, el comando para ejecutar este paso es *Tables / Teach Lengths* (Figura 53).

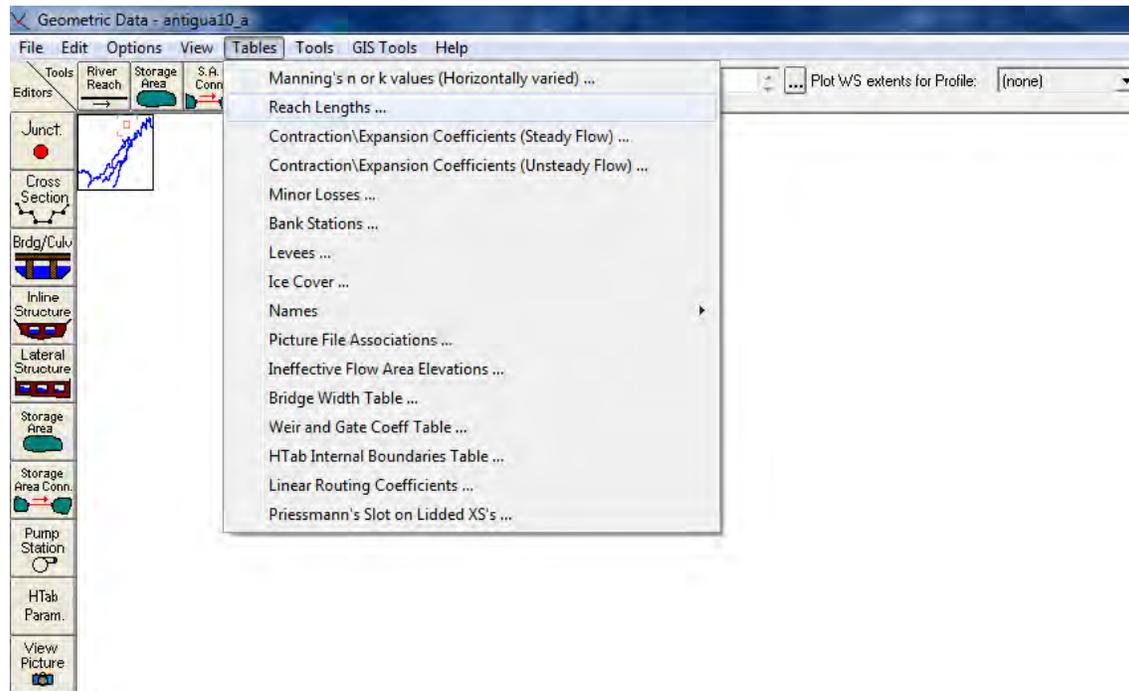


Figura 53. Comando para asignar las distancia entre secciones.

Los datos requeridos son:

- la separación entre el extremo izquierdo de una sección transversal y el extremo izquierdo de la sección de abajo
- la distancia que existe entre un cruce de una sección al centro del cauce y el cruce de la sección de abajo
- la separación entre el extremo derecho de una sección transversal y el extremo derecho de la sección de abajo

Primero se anotaron las distancias de la margen izquierda, después los del centro y finalmente las distancias de la margen derecha, este mismo procedimiento se aplicó para cada tramo (Figura 54). El archivo de la geometría se guardó con el fichero *File / Steady Flow Data*.

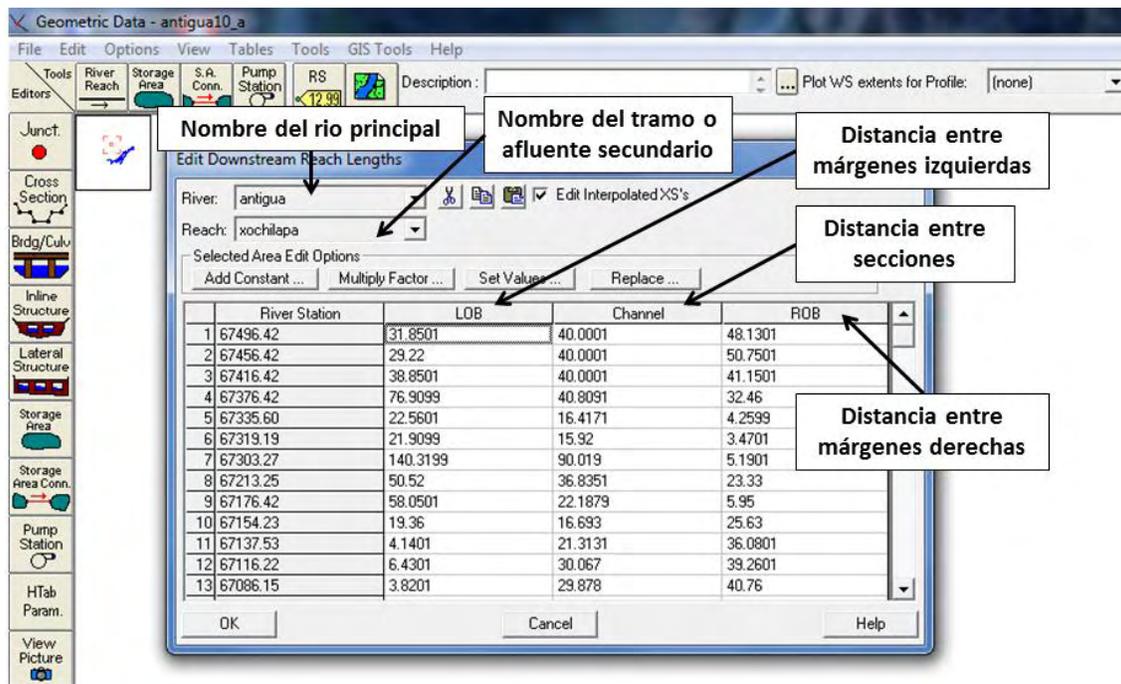


Figura 54. Registro de las distancias entre secciones.

8.2.8.4. Datos hidráulicos para flujo no permanente

El comando para ejecutar esta acción es *Edit / Unsteady Flow Data*, al activarlo aparece un cuadro de dialogo donde se ingresan los hidrogramas unitarios del SCS (Figura 55).

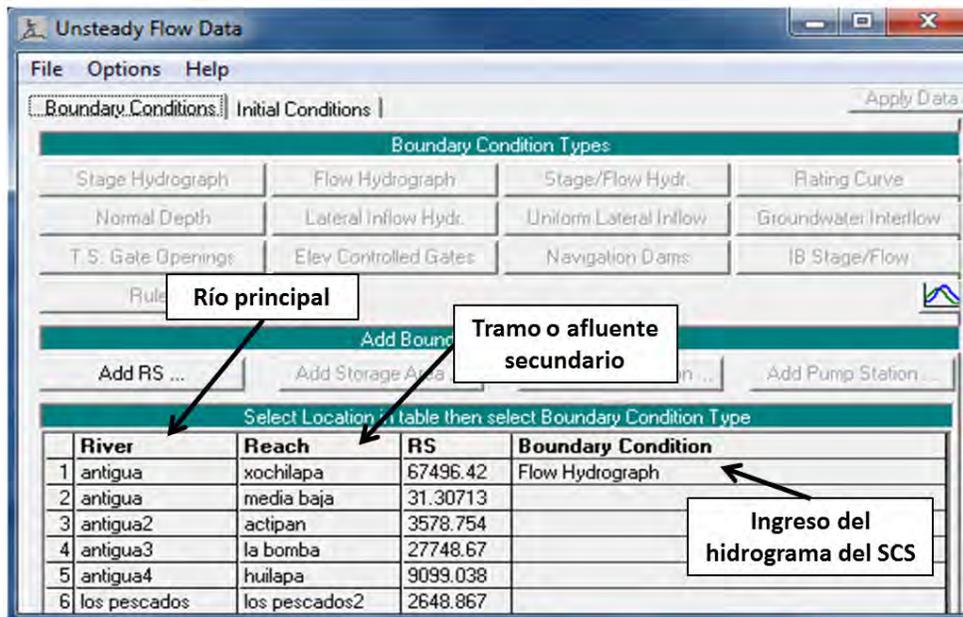


Figura 55. Ingreso de los hidrogramas unitarios del SCS.

Activando la celda *Flow Hidrograph* (de este mismo cuadro de dialogo) se ingresaron los datos el hidrograma unitario del SCS (Figura 56).

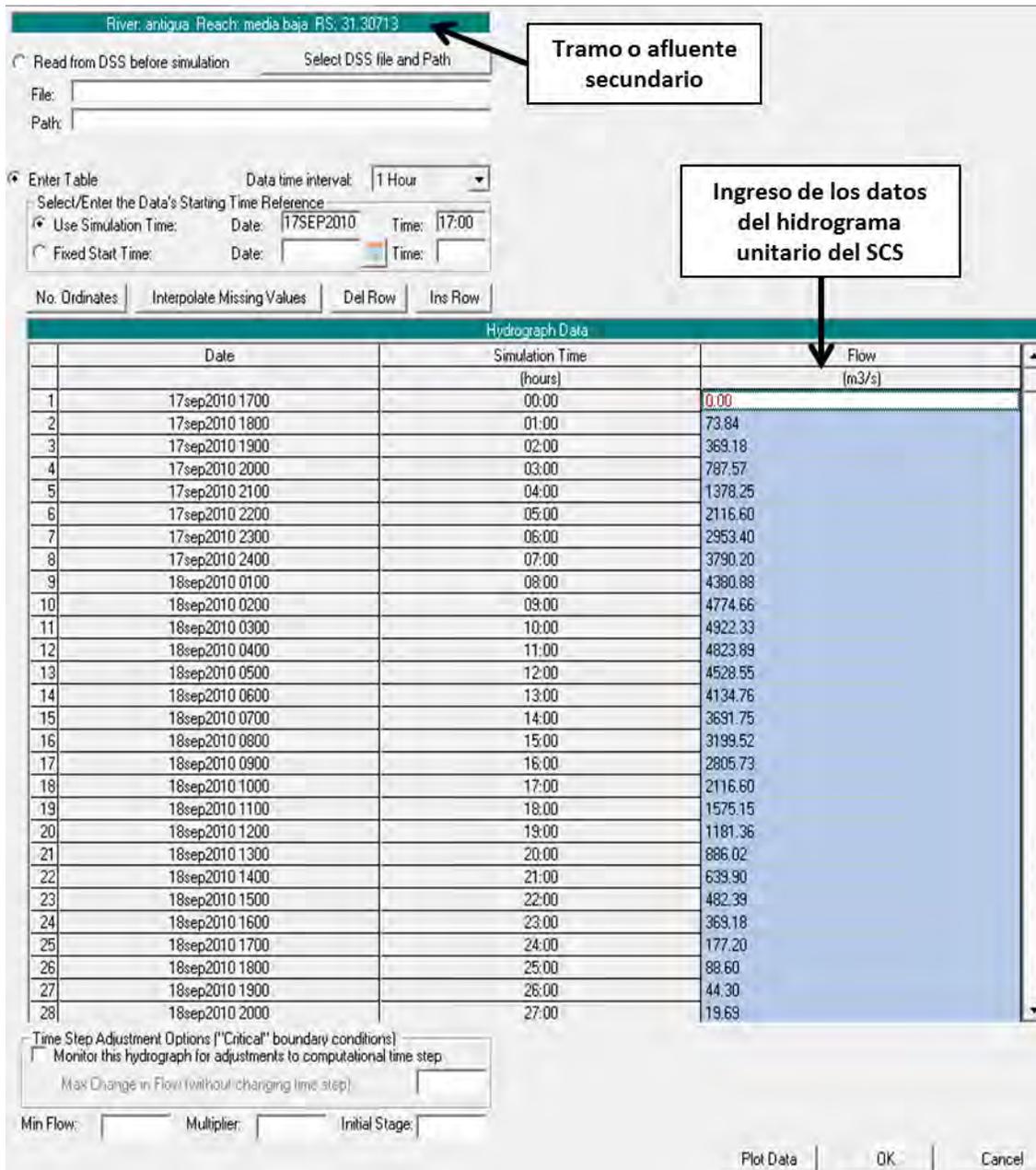


Figura 56. Ingreso de los datos del hidrograma unitario del SCS.

8.2.8.5. Condiciones de frontera

Dada la sinuosidad de los afluentes se planteó la necesidad de simular bajo un régimen de flujo mixto, el cual exige definir condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo del tramo modelado.

Estos datos se establecieron con el fichero *Reach Boundary Conditions*, al activar la herramienta aparece un cuadro de dialogo donde se eligió la tercera opción: *Normal Depth* (Profundidad Normal), allí se ingresaron las pendientes de cada tramo (Figura 57).

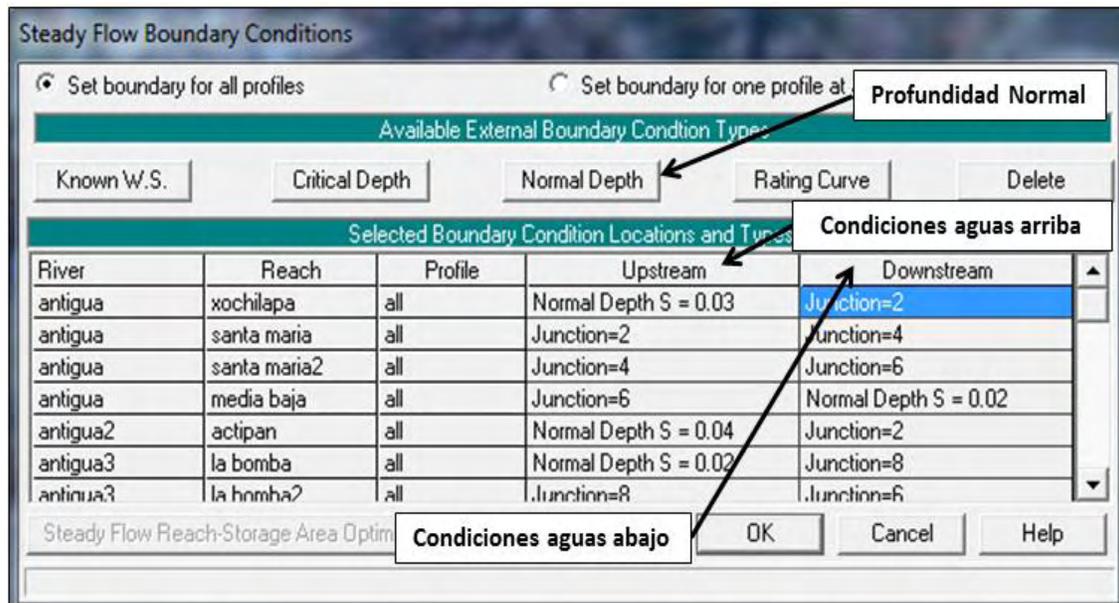


Figura 57. Definición de las condiciones de frontera.

8.2.8.6. Régimen de flujo

Una vez que se introdujeron los datos de flujo y las condiciones de frontera, se creó un *Plan* mediante la selección de datos geométricos (*Geometry File*) y de flujo (*Steady Flow File*).

Para preparar el *Plan* se activó el comando *File / New Plan* en la ventana *Steady Flow Analysis*. Posteriormente se asignó un título y un identificador abreviado (*Short ID*), y se seleccionó el Régimen de Flujo para el cual el modelo realizaría los cálculos (Figura 58).

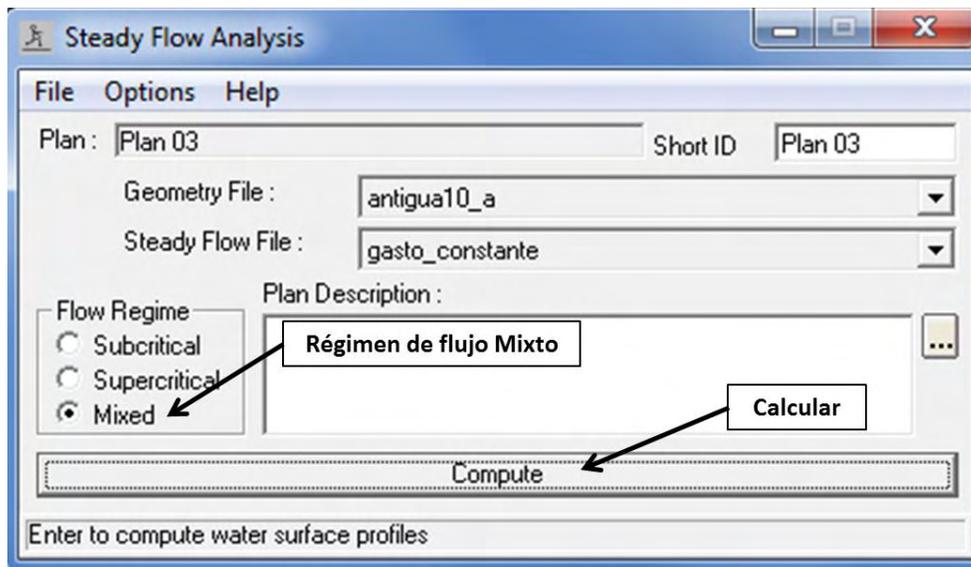


Figura 58. Generación del Plan y definición del régimen de flujo.

8.2.8.7. Visualización de los resultados

Al ejecutarse la simulación (Figura 59), se pudo visualizar los resultados de diferentes maneras. Dentro del menú *View* se tienen varias opciones (Figura 60) que son accesibles también a través de iconos (Cuadro 28).

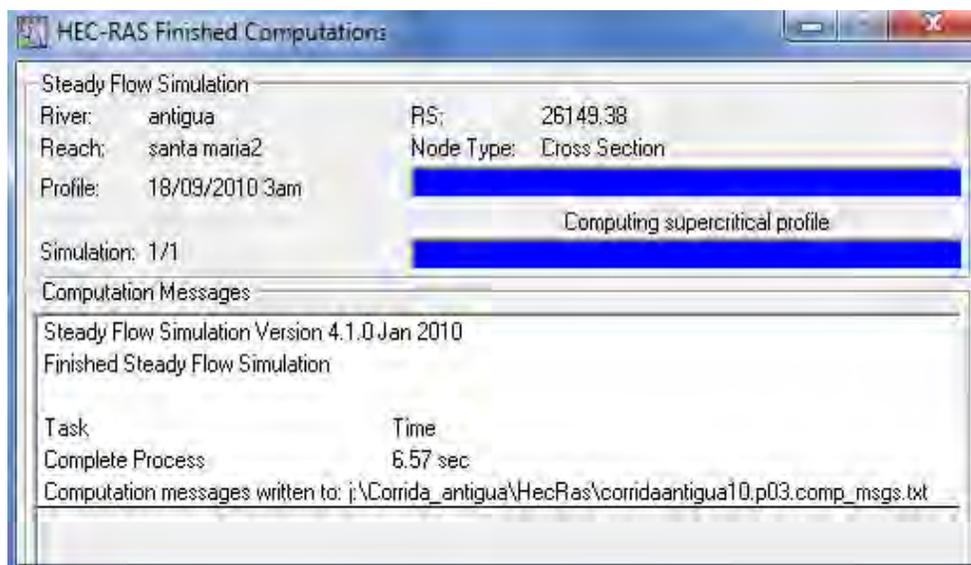


Figura 59. Cálculos del modelo hidráulico.

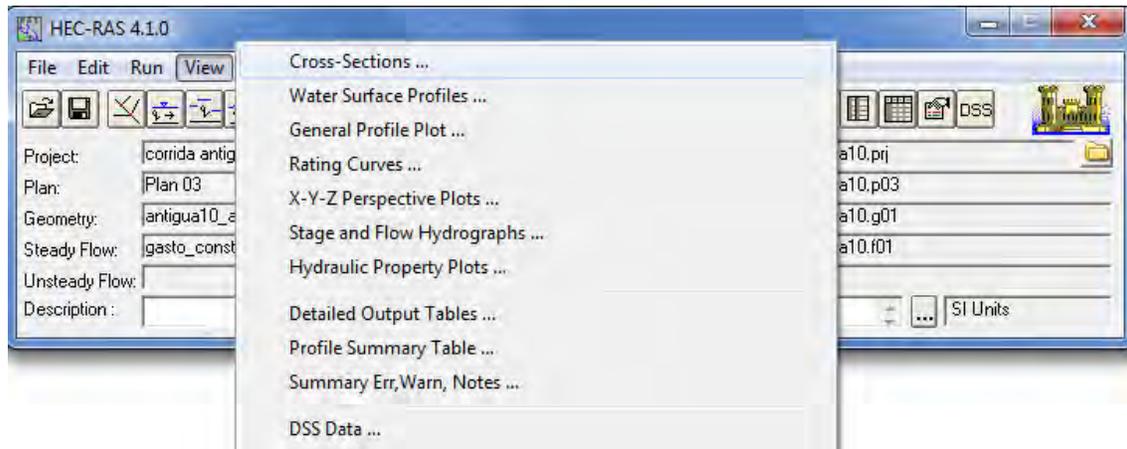


Figura 60. Visualización de los resultados.

Cuadro 28. Iconos de visualización.

Icono	Nombre	Descripción
	<i>Cross – Sections</i>	Permite visualizar las secciones transversales
	<i>Water Surface Profiles</i>	Permite visualizar los perfiles de la superficie de agua
	<i>General Profile Plot</i>	Permite visualizar las gráficas de varios parámetros a lo largo de todo el perfil
	<i>Rating Curves</i>	Permite visualizar las curvas caudal – calado de cada perfil
	<i>X-Y-Z Perspectiva Plots</i>	Permite visualizar los dibujos en perspectiva
	<i>Hydraulic Property Plots</i>	Permite visualizar las gráficas de propiedades hidráulicas
	<i>Detailed Output Table</i>	Permite visualizar las tablas de detalle
	<i>Profile Summary Table</i>	Permite visualizar la tabla de resumen de los perfiles
	<i>Summary, Err, Warn, Notes</i>	Permite visualizar el Resumen de errores, avisos y notas
	<i>DSS Data</i>	Permite visualizar los datos en formato DSS

Hay dos salidas tabulares, el primer tipo proporciona resultados hidráulicos detallados de una sección transversal en específico (Tabla de salida detallada – *Detailed Output Table*), ver Figura 61.

Plan: Plan 03 antigua santa maria RS: 57548.77 Profile: 18/09/2010 3am					
		Element	Left OB	Channel	Right OB
E.G. Elev (m)	259.63	Wt. n-Val.	0.025	0.025	0.025
Vel Head (m)	1.58	Reach Len. (m)	65.89	51.43	43.38
W.S. Elev (m)	258.05	Flow Area (m2)	14.20	66.51	96.25
Crit W.S. (m)	258.67	Area (m2)	14.20	66.51	96.25
E.G. Slope (m/m)	0.005551	Flow (m3/s)	60.28	453.85	330.39
Q Total (m3/s)	844.51	Top Width (m)	12.86	19.08	77.67
Top Width (m)	109.62	Avg. Vel. (m/s)	4.24	6.82	3.43
Vel Total (m/s)	4.77	Hydr. Depth (m)	1.10	3.49	1.24
Max Chl Dpth (m)	3.78	Conv. (m3/s)	809.0	6091.7	4434.6
Conv. Total (m3/s)	11335.3	Wetted Per. (m)	13.60	19.20	77.85
Length Wtd. (m)	51.41	Shear (N/m2)	56.86	188.59	67.29
Min Ch El (m)	254.28	Stream Power (N/m.s)	24826.74	0.00	0.00
Alpha	1.36	Cum Volume (1000 m3)	2382.97	2039.98	2160.70
Frctn Loss (m)	0.28	Cum SA (1000 m2)	1959.61	566.55	1971.38
C & E Loss (m)	0.00				

Figura 61. Tabla de salida detallada.

El segundo tipo de salida tabular muestra un número limitado de variables hidráulicas para varias secciones transversales y múltiples perfiles (Tablas de resumen de perfiles – *Profile Summary Table*) (Figura 62). Además se pueden crear tablas de salida con las variables que se deseen proyectar.



Profile Output Table - Standard Table 1

Nombre del tramo o afluente secundario

File Options Std. Tables Locations Help

HEC-RAS Plan Plan 03 River: antigua Reach: santa maria Profile: 18/09/2010 3am Reload Data

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
santa maria	57630.58	18/09/2010 3am	844.51	255.28	258.68	258.97	260.13	0.005325	6.27	169.91	83.98	1.13
santa maria	57598.95	18/09/2010 3am	844.51	254.90	258.35	258.76	259.91	0.006104	6.64	164.10	84.11	1.20
santa maria	57548.77	18/09/2010 3am	844.51	254.28	258.05	258.67	259.63	0.005551	6.82	176.96	109.62	1.17
santa maria	57497.34	18/09/2010 3am	844.51	253.64	257.28	257.98	259.28	0.006802	7.37	161.56	124.09	1.27
santa maria	57469.43	18/09/2010 3am	844.51	253.30	257.06	257.80	259.07	0.006338	7.41	158.71	126.71	1.25
santa maria	57444.66	18/09/2010 3am	844.51	253.11	256.82	257.60	258.90	0.006479	7.52	155.31	90.80	1.27
santa maria	57420.66	18/09/2010 3am	844.51	252.92	256.65	257.59	258.74	0.006556	7.50	152.38	100.18	1.27
santa maria	57397.58	18/09/2010 3am	844.51	252.75	256.42	257.40	258.58	0.006643	7.59	149.85	81.13	1.28
santa maria	57346.98	18/09/2010 3am	844.51	252.35	256.01	257.01	258.24	0.006623	7.60	147.99	93.32	1.28
santa maria	57298.81	18/09/2010 3am	844.51	252.00	255.14	256.21	257.82	0.009779	8.20	129.68	72.07	1.51
santa maria	57273.82	18/09/2010 3am	844.51	251.81	254.85	255.94	257.56	0.010498	8.16	124.75	65.14	1.55
santa maria	57214.67	18/09/2010 3am	844.51	251.44	255.49	255.96	256.80	0.003551	5.94	195.61	162.54	0.95
santa maria	57164.94	18/09/2010 3am	844.51	251.13	255.31	255.81	256.65	0.003574	6.04	205.29	172.00	0.96
santa maria	57092.65	18/09/2010 3am	844.51	250.63	253.61	254.45	256.19	0.010906	8.27	130.64	77.56	1.58
santa maria	57049.71	18/09/2010 3am	844.51	250.33	253.75	254.37	255.73	0.007321	7.59	156.20	93.40	1.33
santa maria	57002.76	18/09/2010 3am	844.51	249.99	253.47	253.98	255.49	0.007785	7.67	157.04	100.78	1.36
santa maria	56975.23	18/09/2010 3am	844.51	249.79	252.79	253.60	255.27	0.010332	8.29	137.64	94.82	1.55
santa maria	56827.04	18/09/2010 3am	844.51	248.46	251.93	252.65	254.27	0.007593	7.84	141.31	74.49	1.36
santa maria	56767.36	18/09/2010 3am	844.51	247.94	252.87	251.80	253.41	0.001189	3.93	280.41	93.95	0.57
santa maria	56720.29	18/09/2010 3am	844.51	247.54	252.47		253.31	0.001800	4.75	229.68	83.05	0.70
santa maria	56684.58	18/09/2010 3am	844.51	247.24	252.03	252.03	253.20	0.002792	5.50	195.07	94.77	0.85
santa maria	56642.77	18/09/2010 3am	844.51	246.83	250.11	250.93	252.81	0.009482	8.11	123.27	57.57	1.49
santa maria	56595.26	18/09/2010 3am	844.51	246.35	251.25	251.25	252.19	0.002126	5.01	235.75	139.20	0.75
santa maria	56549.39	18/09/2010 3am	844.51	245.88	249.90	250.77	251.93	0.005392	6.69	147.24	64.62	1.16
santa maria	56510.36	18/09/2010 3am	844.51	245.48	249.08	250.18	251.66	0.008700	7.81	130.28	66.94	1.42
santa maria	56460.12				0.42	250.42	251.05	0.001473	4.36	321.28	281.51	0.63
santa maria	56419.07	1 Secciones transversales			3.90	249.38	250.84	0.005039	6.83	154.11	71.91	1.12

Total flow in cross section:

Figura 62. Tabla de salida con información de perfiles.

En la Figura 63 se muestra una sección transversal del tramo Santa María. Se puede visualizar cualquier sección eligiendo el río principal, el tramo y la estación.

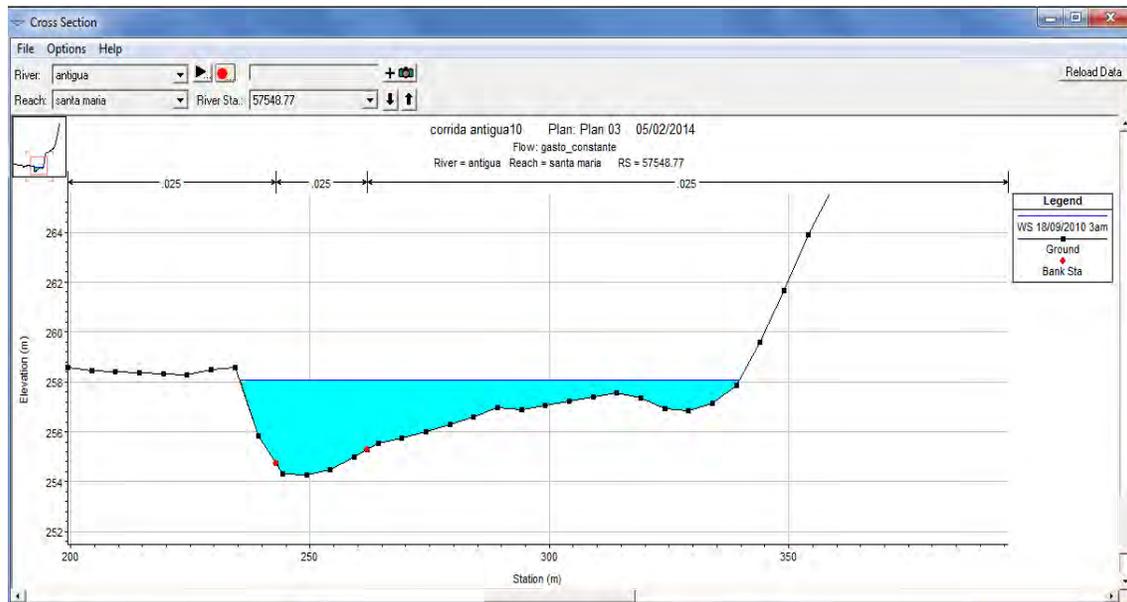


Figura 63. Trazo de sección transversal.

Así mismo, la Figura 64 muestra una imagen de perfil del mismo tramo (Santa María). Se pueden seleccionar los tramos específicos que se deseen visualizar, esta opción es muy útil cuando se simula un sistema hidrológico de múltiples tramos.

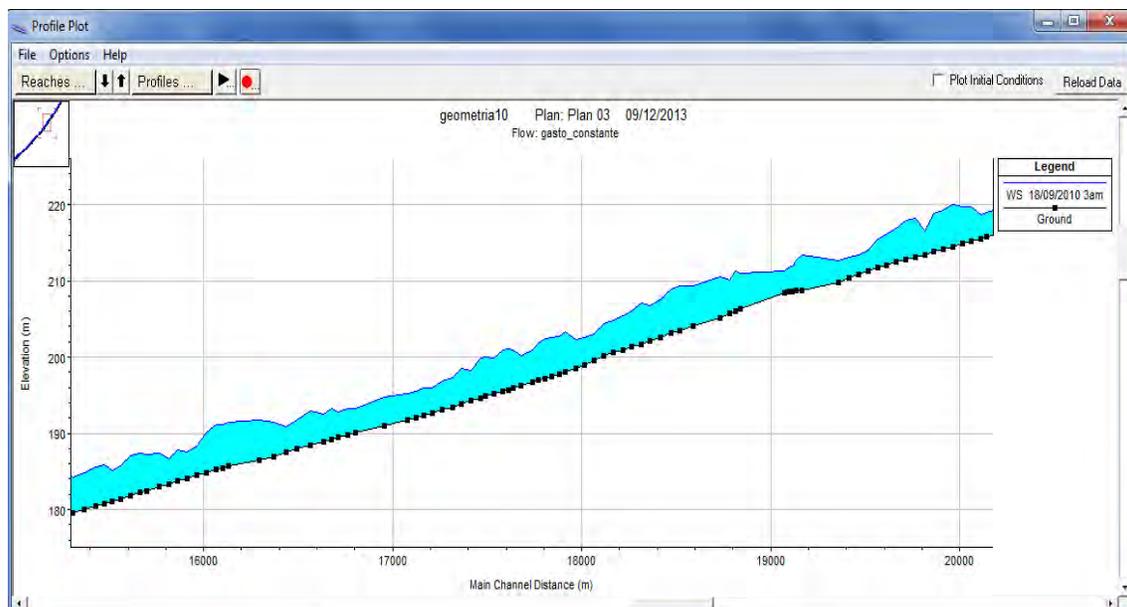


Figura 64. Trazo de perfil.

La Figura 65 muestra una perspectiva en 3D (X-Y-Z), el trazado se puede rotar hacia al norte, sur, este y oeste para obtener diferentes perspectivas del tramo del río.

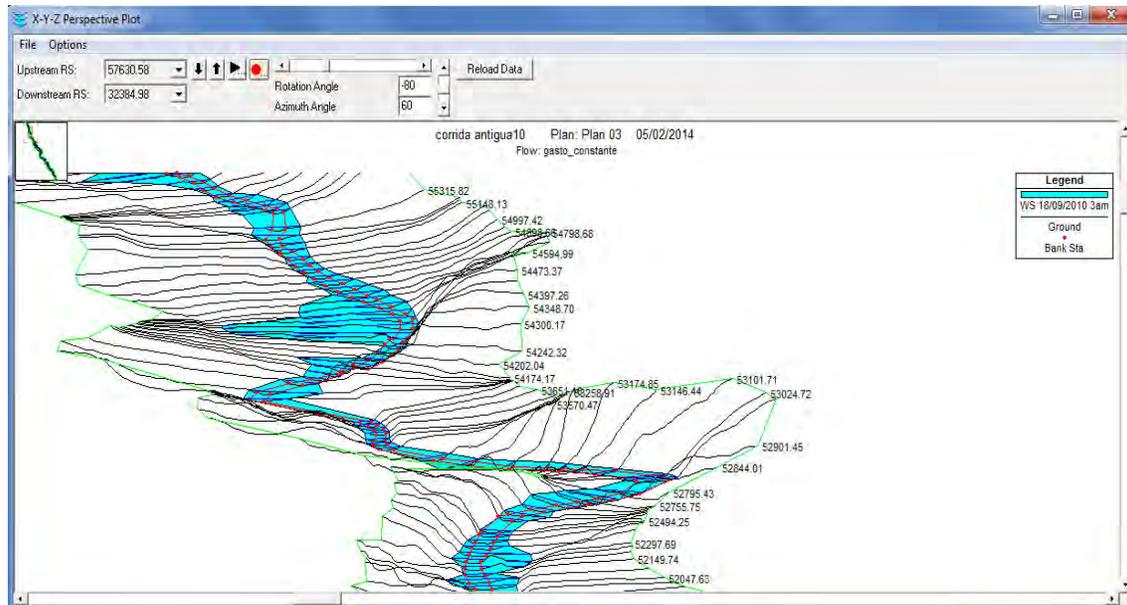


Figura 65. Perspectiva en 3D (X, Y, Z).

En los Anexos 1 al 9 se muestra los perfiles de los nueve tramos simulados y una vista 3-D de la llanura de inundación para cada URH, la cual corresponde al escurrimiento generado por las lluvias del huracán Karl.



CAPÍTULO 9. RESULTADOS

La modelización con HEC-RAS permitió calcular los niveles de agua (o tirantes) en asociados a un gasto generado por las lluvias de dos fenómenos hidrometeorológicos extremos. La simulación se desarrolló en 2,435 secciones transversales distribuidas en el cauce principal del río La Antigua y cuatro afluentes secundarios.

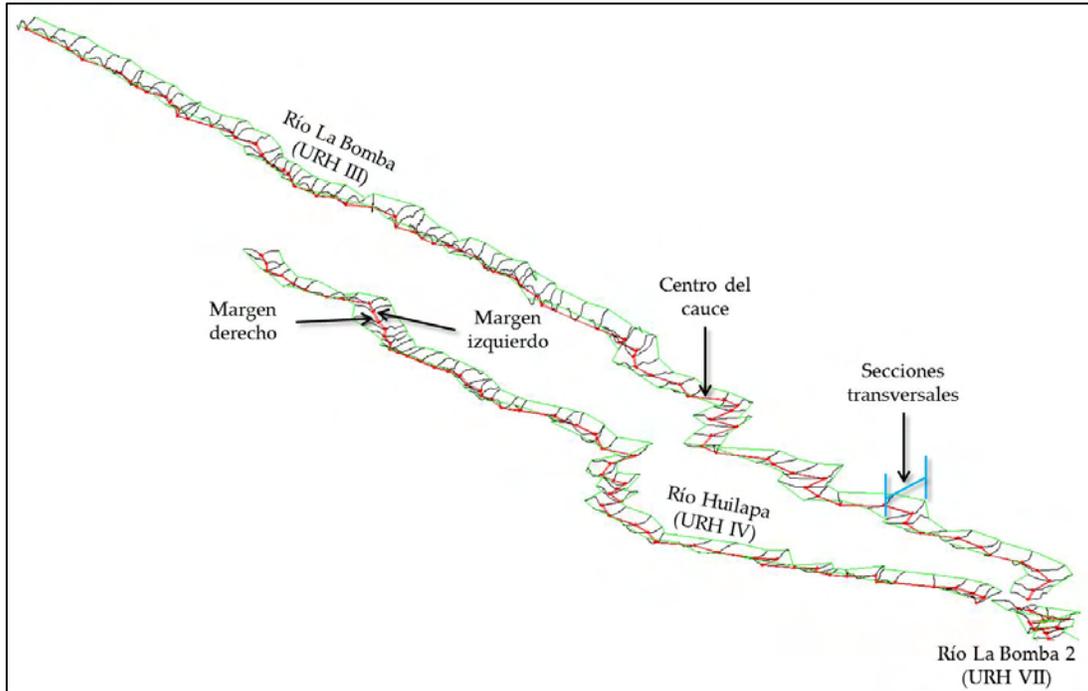
El modelo se calibró con los niveles de la avenida generada por las lluvias del huracán Karl el 18 de septiembre 2010, mientras que la validación se apoyó en datos que registró la estación hidrométrica 28003 durante las lluvias extraordinarias del 12 de julio 1999.

9.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para llevar a cabo el proceso de calibración y validación del modelo se efectuó previamente un análisis de sensibilidad, este último consistió en realizar diferentes simulaciones variando dos parámetros del modelo: distanciamiento entre secciones transversales y coeficiente de rugosidad, hasta obtener el mejor ajuste posible entre niveles de agua (o tirante) registrados por la estación hidrométrica 28003 y niveles (o tirantes) simulados con HEC-RAS.

El primer parámetro del modelo analizado fue la geometría de cauces que se extrajo del MDE LiDAR; para evaluar la respuesta del modelo HEC-RAS se generan secciones transversales en diferentes intervalos: cada 500, 100 y 20 m (Figura 66). La variación en la geometría de cauces permitió mejorar el ajuste entre niveles medidos y simulados.

Secciones transversales en intervalos de 500 m.



Secciones transversales en intervalos de 20 m.

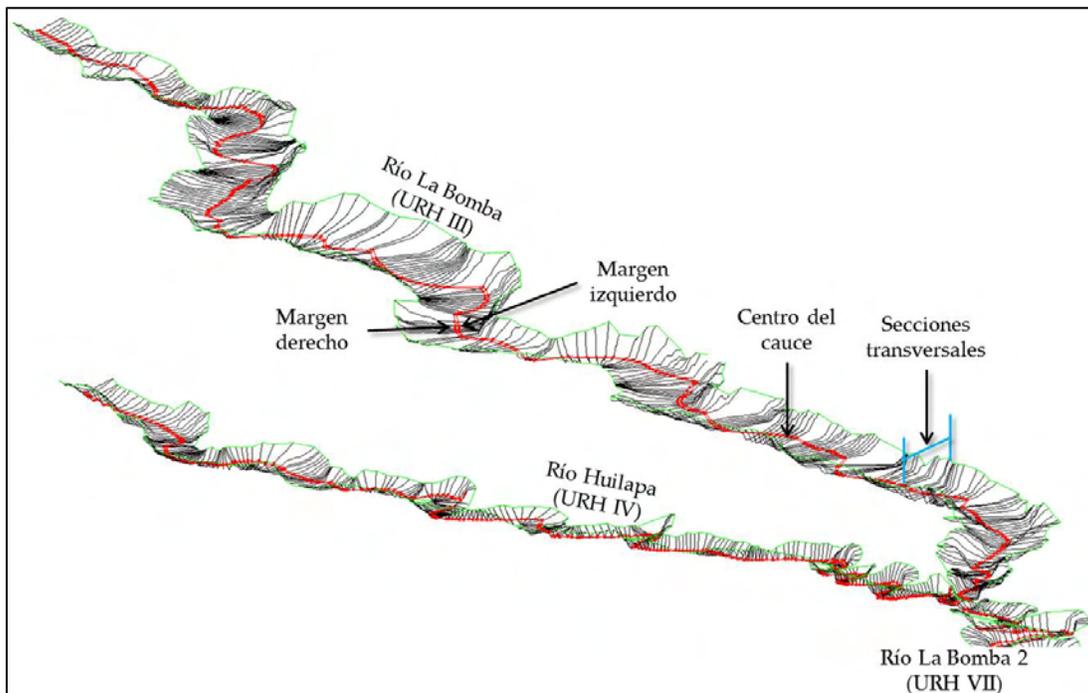
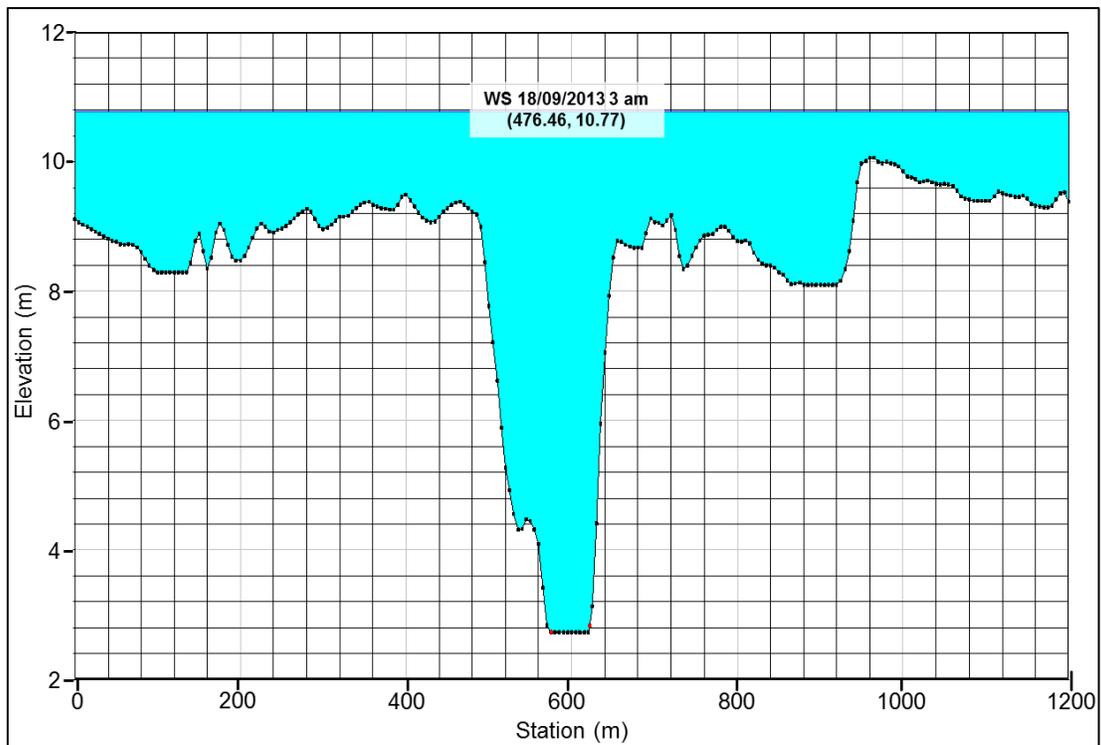


Figura 66. Geometría de los tramos río La Bomba, Huilapa y La Bomba 2.

La Figura 67 muestra la sección 0+476.46 del tramo Parte baja (URH IX), donde se observa una diferencia de 10 cm al modelar con intervalo entre secciones de 500 m (67a) y 20 m (67b).

67a. Nivel del agua simulado con secciones transversales en intervalos de 500 m.



67b. Nivel del agua simulado con secciones transversales en intervalos de 20 m.

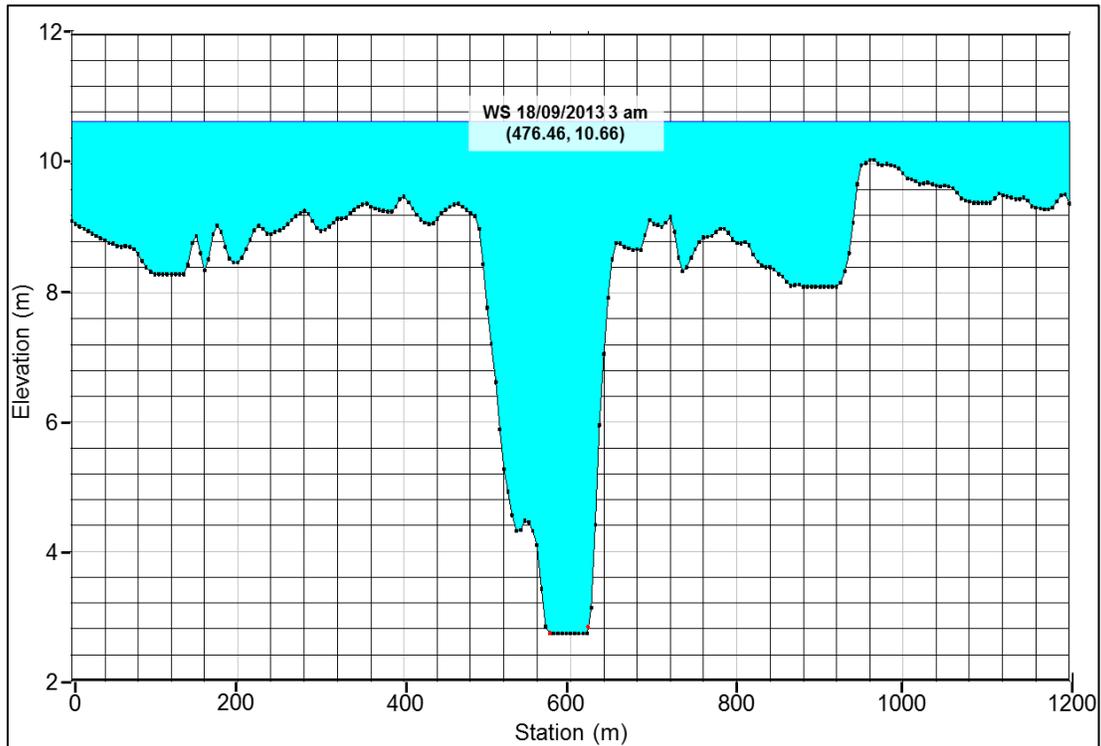


Figura 67. Nivel del agua (o tirante) para diferentes intervalos entre secciones.

Al bajar el intervalo entre secciones transversales a cada 500 m, luego a 100 m y finalmente a 20 m, se observó una diferencia promedio de 10 cm en el nivel de agua. Mientras más bajo sea el intervalo entre secciones, más bajo es el nivel de agua, esto podría deberse a que cierto volumen de agua se “pierde” en una geometría más detallada, al proyectar secciones cada 500 m se ocultan áreas de socavación o erosión, pozas e inclusive los meandros del mismo río (Figura 68).

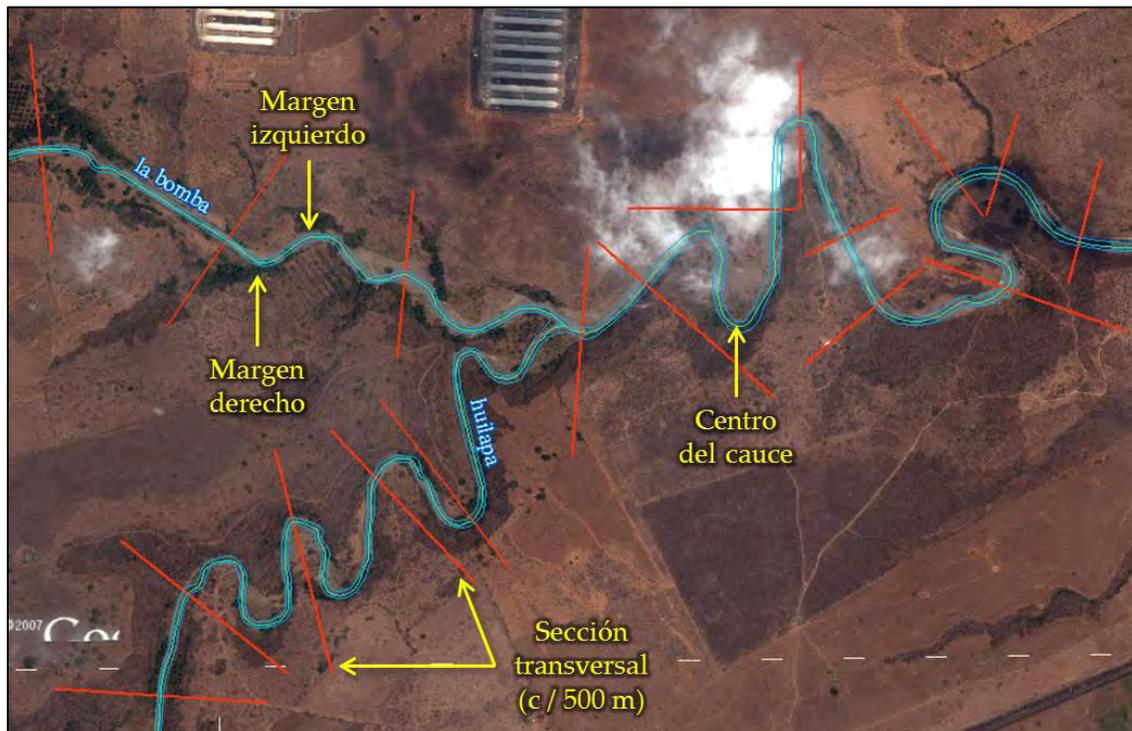


Figura 68. Geometría del cauce con secciones a cada 500 m.

Mediante el análisis de este parámetro se garantizó la estabilidad del modelo al representar correctamente la geometría del cauce proyectando secciones a cada 20 m.

En conclusión, ingresar secciones transversales en intervalos cortos permitió describir con más detalle la geometría de cauces y obtener una mejor simulación hidráulica, lo cual fue comprobado mediante índices estadísticos que determinaron la correlación entre niveles medidos y simulados.

Por otro lado, para determinar la influencia del coeficiente de rugosidad de Manning en la hidráulica del río, se seleccionaron diferentes valores de este parámetro ajustándolo a las características de la llanura de inundación, específicamente sobre terrenos agrícolas localizados en las márgenes del río La Antigua, ya que el uso de suelo predominante en RH28Be es agricultura, cuya superficie representa el 63.41% del total.



Los valores se establecieron utilizando la “Tabla del coeficiente de rugosidad de Manning” propuesta por Chow (1994) que sugiere los siguientes valores para Áreas cultivadas (Cuadro 29).

Cuadro 29. Valores del coeficiente de rugosidad para áreas cultivadas.

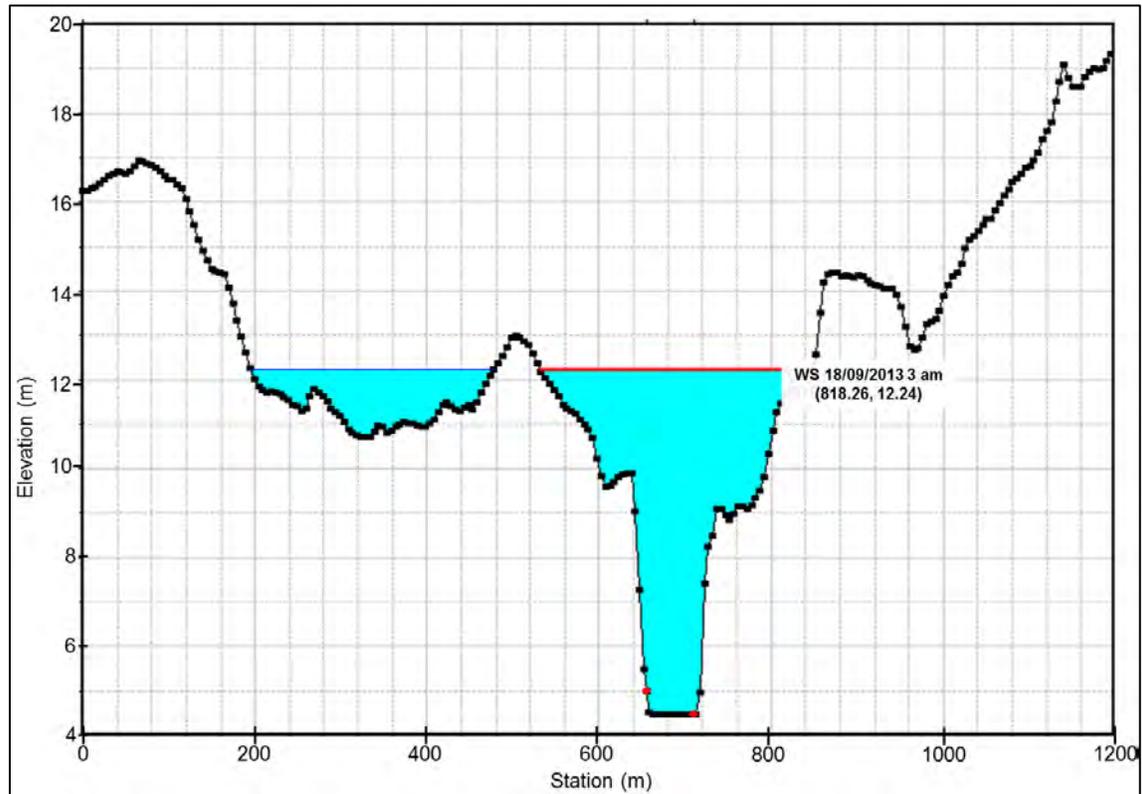
Áreas cultivadas	Mínimo	Normal	Máximo
Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
Cultivos en líneas maduros	0.025	0.035	0.045
Campos de cultivos maduros	0.030	0.040	0.050

Con base en cuadro anterior, se realizaron varias simulaciones combinado diferentes valores de rugosidad en tramos que presentaban un uso agrícola, pero siempre, dentro del rango de valores correspondientes a áreas cultivadas; sin embargo, Palacios (1986) menciona que se pueden utilizar valores que salgan del rango.

En la Figura 69 se muestra la influencia que tuvo el parámetro físico en el nivel del agua, donde se observa que el nivel es sensible a los cambios de rugosidad. Se concluyó que la profundidad del agua tiene una tasa de cambio promedio de 12 cm por cada 0.01 que aumenta de rugosidad.



69a. Nivel del agua simulado con un coeficiente de rugosidad $\eta=0.020$.



69b. Nivel del agua simulado con un coeficiente de rugosidad $\eta=0.050$.

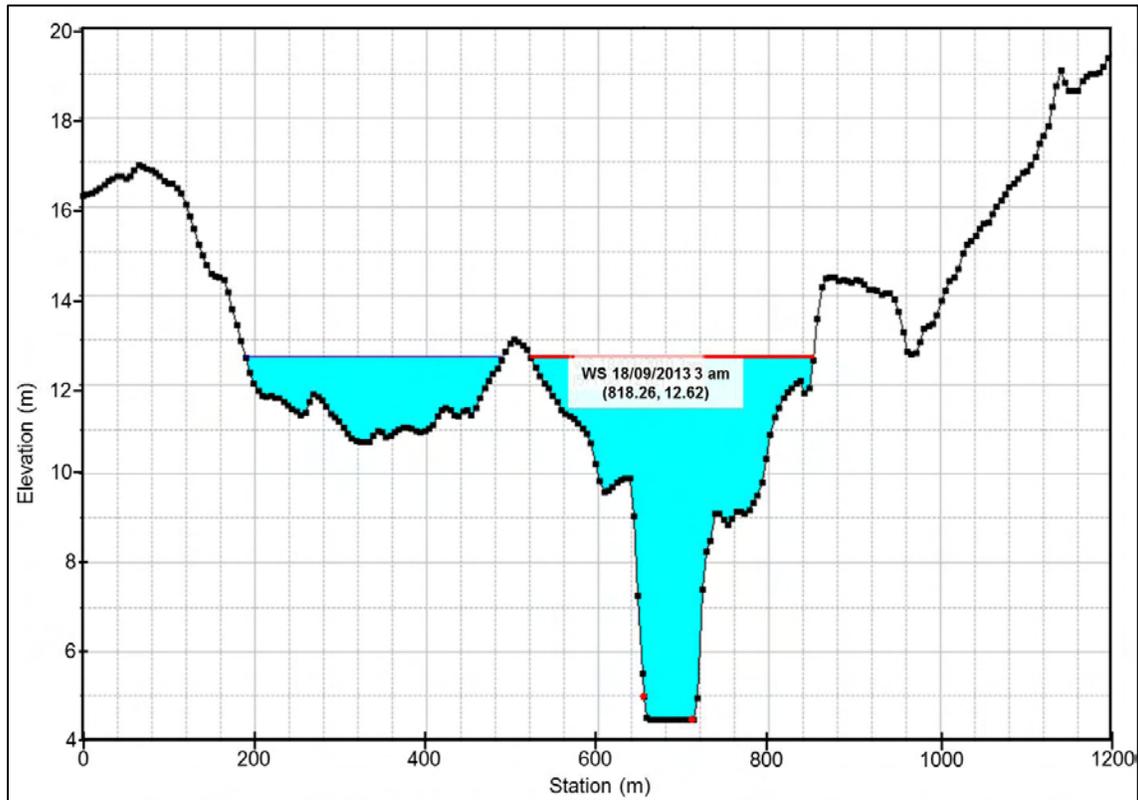


Figura 69. Sección transversal variando el coeficiente de rugosidad.

En el Cuadro 30 se muestra los dos parámetros involucrados en el análisis de sensibilidad y las condiciones fijas o iniciales para hacer las respectivas simulaciones.

Cuadro 30. Parámetros de modelación para el análisis de sensibilidad en HEC-RAS.

Parámetro	Condición inicial	Variaciones	Sensibilidad	
			✓	✗
Espaciamiento entre secciones	500 m	100 m y 20 m	✓	
Rugosidad de Manning	0.030	0.020 - 0.050	✓	



Con base en este análisis, para identificar la influencia de los parámetros del modelo en los resultados finales de la simulación, se categorizaron dichos parámetros según el tipo de sensibilidad en: Alta, Media y Baja (Cuadro 31).

Cuadro 31. Clasificación de los parámetros según el tipo de sensibilidad.

Parámetro	Tipo de sensibilidad
Espaciamiento entre secciones transversales	Media
Coefficiente de rugosidad de Manning	Alta

El análisis de sensibilidad es un proceso iterativo por medio del cual se busca ajustar algunos parámetros o coeficientes con el fin de aproximar los resultados de las simulaciones al comportamiento natural del sistema (Número, 2013).

9.2. CALIBRACIÓN DEL MODELO

La calibración consiste en lograr un ajuste satisfactorio entre los datos medidos y simulados, mediante el cambio en los valores de los parámetros más sensibles del modelo, aun de aquellos que se consideraban conocidos (Palacios, 1986).

El análisis de sensibilidad permitió obtener el mejor ajuste entre niveles de agua registrados por la estación hidrométrica 28003 y niveles simulados con HEC-RAS. Los datos simulados se compararon con los datos de la avenida originada por las lluvias del huracán Karl, la información corresponde al día 18 de septiembre 2010, entre las 00:00 y las 23:00 hr (Cuadro 32).

Cuadro 32. Niveles medidos y simulados (18 de septiembre 2010).

Fecha	Hora	Nivel medido (m)	Nivel Simulado (m)
18/09/2010	00:00	11.50	13.38
18/09/2010	01:00	13.20	14.40
18/09/2010	02:00	14.80	15.08
18/09/2010	03:00	16.10	15.15



Fecha	Hora	Nivel medido (m)	Nivel Simulado (m)
18/09/2010	04:00	15.80	14.46
18/09/2010	05:00	14.90	14.13
18/09/2010	06:00	14.38	13.51
18/09/2010	07:00	13.36	13.02
18/09/2010	08:00	12.70	11.32
18/09/2010	09:00	10.56	10.85
18/09/2010	10:00	10.10	11.96
18/09/2010	11:00	11.30	11.79
18/09/2010	12:00	11.08	11.54
18/09/2010	13:00	10.78	11.09
18/09/2010	14:00	10.30	10.8
18/09/2010	15:00	10.00	10.46
18/09/2010	16:00	9.70	10.18
18/09/2010	17:00	9.40	9.92
18/09/2010	18:00	9.16	9.68
18/09/2010	19:00	8.96	9.46
18/09/2010	20:00	8.75	9.32
18/09/2010	21:00	8.60	9.13
18/09/2010	22:00	8.44	9.09
18/09/2010	23:00	8.40	9.09

Con los valores del Cuadro 31 se generó la Figura 70, en ella se observa una ligera subestimación del nivel simulado durante el gasto pico medido (de 0.95 m) que disminuye progresivamente hasta una diferencia entre nivel medido y simulado de 0.29 m (a las 09:00 hr).

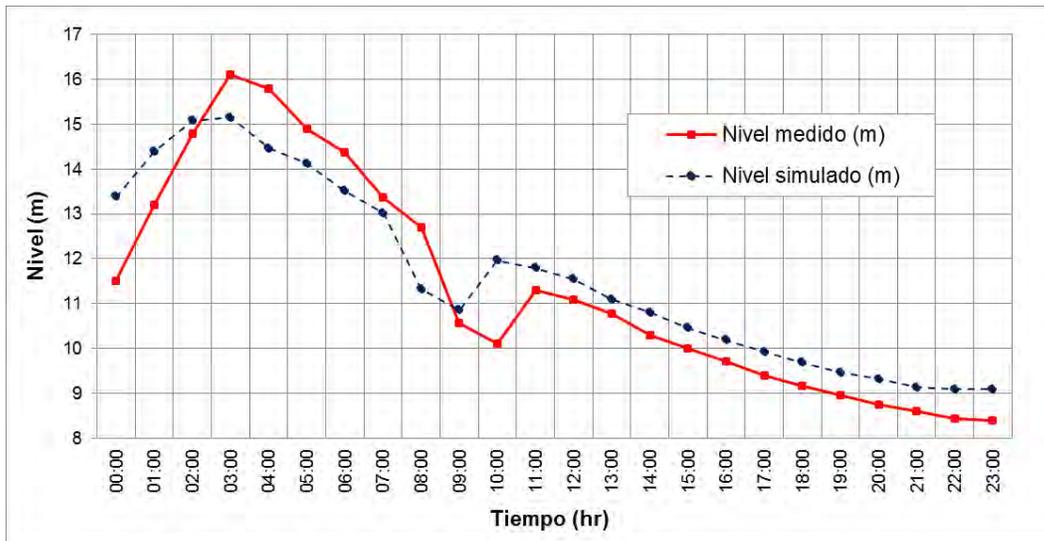


Figura 70. Niveles medidos *versus* simulados (18 de septiembre 2010).

Las técnicas gráficas de evaluación son herramientas que facilitan la comparación visual de los datos simulados *versus* medidos y permiten una valoración inmediata de los resultados (ASCE, 1993).

Esto conjunto de datos (medidos y simulados) se ajustó a un modelo lineal, en la Figura 71 se observa una menor relación cuando el nivel supera los 11 m, el coeficiente de determinación (R^2) es de 0.816.

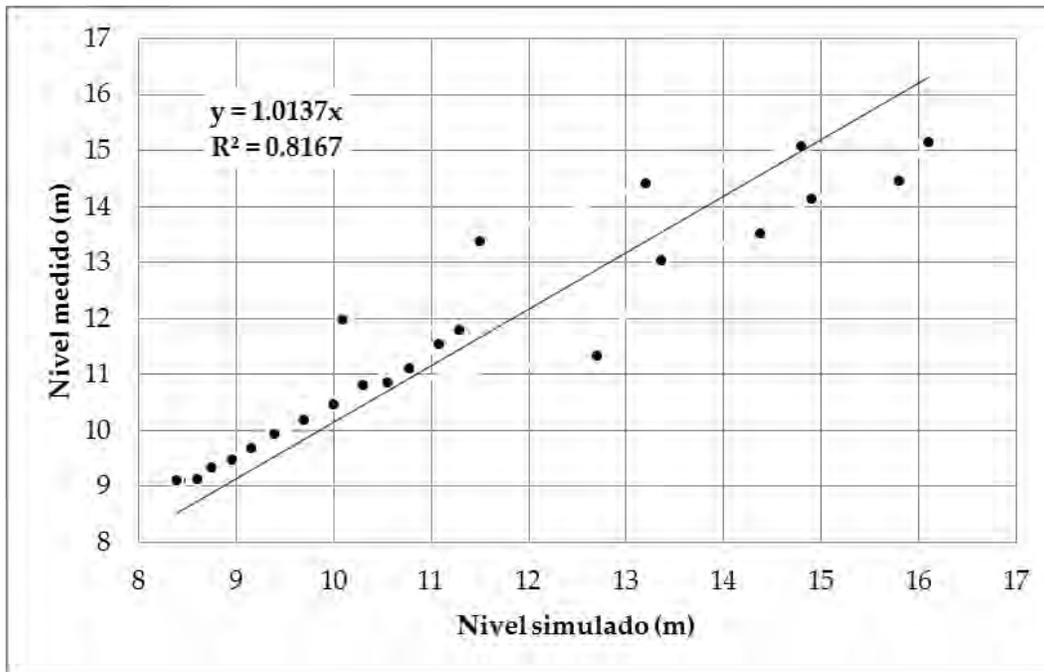


Figura 71. Niveles medido en la estación hidrométrica 28003 y simulados por HEC-RAS (18 de septiembre 2010).

Debido a que los métodos gráficos revelan poca información sobre la calidad de los resultados y el funcionamiento del modelo, se utilizarían índices estadísticos de prueba para determinar la correlación entre ambos valores, Moriasi (2007) recomienda el uso de los siguientes índices:

la raíz del error cuadrático medio (RMSE) que se calcula con la siguiente ecuación:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (a_i - t_i)^2}{N}} \quad (32)$$

la desviación media acumulada (DMA), dada por la siguiente ecuación:

$$DMA = \frac{\sum_{i=1}^N |a_i - t_i|}{N} \quad (33)$$

y el coeficiente de determinación, R^2 , dado por:

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})(t_i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2}} \right)^2 \quad (34)$$

donde a es el dato estimado por el modelo; t , el dato que se asume como medido; N , el número de observaciones o estimaciones; \bar{a} , el promedio de los datos estimados por el modelo; y \bar{t} , el promedio de los datos que se asumen como medidos (Cai *et al.*, 2007). En los dos primeros índices el valor 0 corresponde a un ajuste perfecto, mientras que un valor más alto representa un menor ajuste; para R^2 , el valor 1.0 indica una alta correlación, entre 0.5 y < 1.0 una buena correlación, entre 0.0 y < 0.5 una baja correlación y 0 que no existe correlación.

El Cuadro 33 presenta los valores obtenidos de estadísticos de ajuste aplicados en la calibración del modelo.

Cuadro 33. Resultados del análisis de comparación de niveles medidos y simulados por el modelo HEC-RAS (calibración).

Índice de evaluación estadística	Valor
Raíz del error cuadrático medio	0.866
Desviación media acumulada	0.744
Coefficiente de determinación	0.816

Los valores obtenidos indican una buena correspondencia entre datos simulados y medidos, esto demuestra que la modelación hidráulica con HEC-RAS es aplicable para delimitar las zonas con riesgo a inundación de la subcuenca RH28Be.

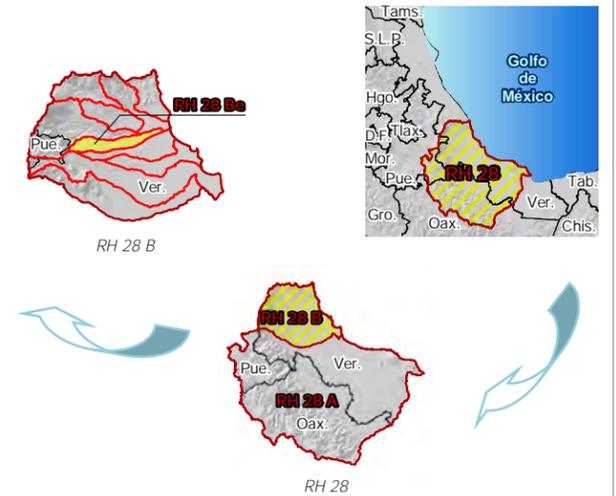
En los Mapas 10 al 17 se compara la llanura de inundación obtenida mediante la simulación del escurrimiento generado por las lluvias del huracán Karl, y la llanura de inundación registrada después del evento, esta última se obtuvo digitalizando sobre imágenes satelitales *Rapideye* tomadas 34 días después del evento;



aunque corresponden a un mes después, los daños se observan con la claridad suficiente para ser comparados con los resultados de HEC-RAS. La comparación de las dos llanuras de inundación (en estos mapas) ratifica los valores obtenidos mediante los estadísticos de ajuste empleados en la calibración del modelo, esto confirma que los resultados obtenidos con HEC-RAS son configurables y útiles para delimitar y evaluar las zonas con riesgo a inundación.



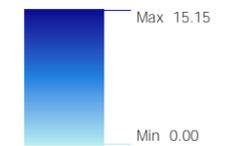
CROQUIS DE LOCALIZACIÓN



SIMBOLOGÍA

- Localidad
- Límite de la subcuenca
- Márgenes
- Carretera pavimentada
- Terracería
- Brecha
- Envolvente registrada en la subcuenca

Nivel del río simulado (m)



INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

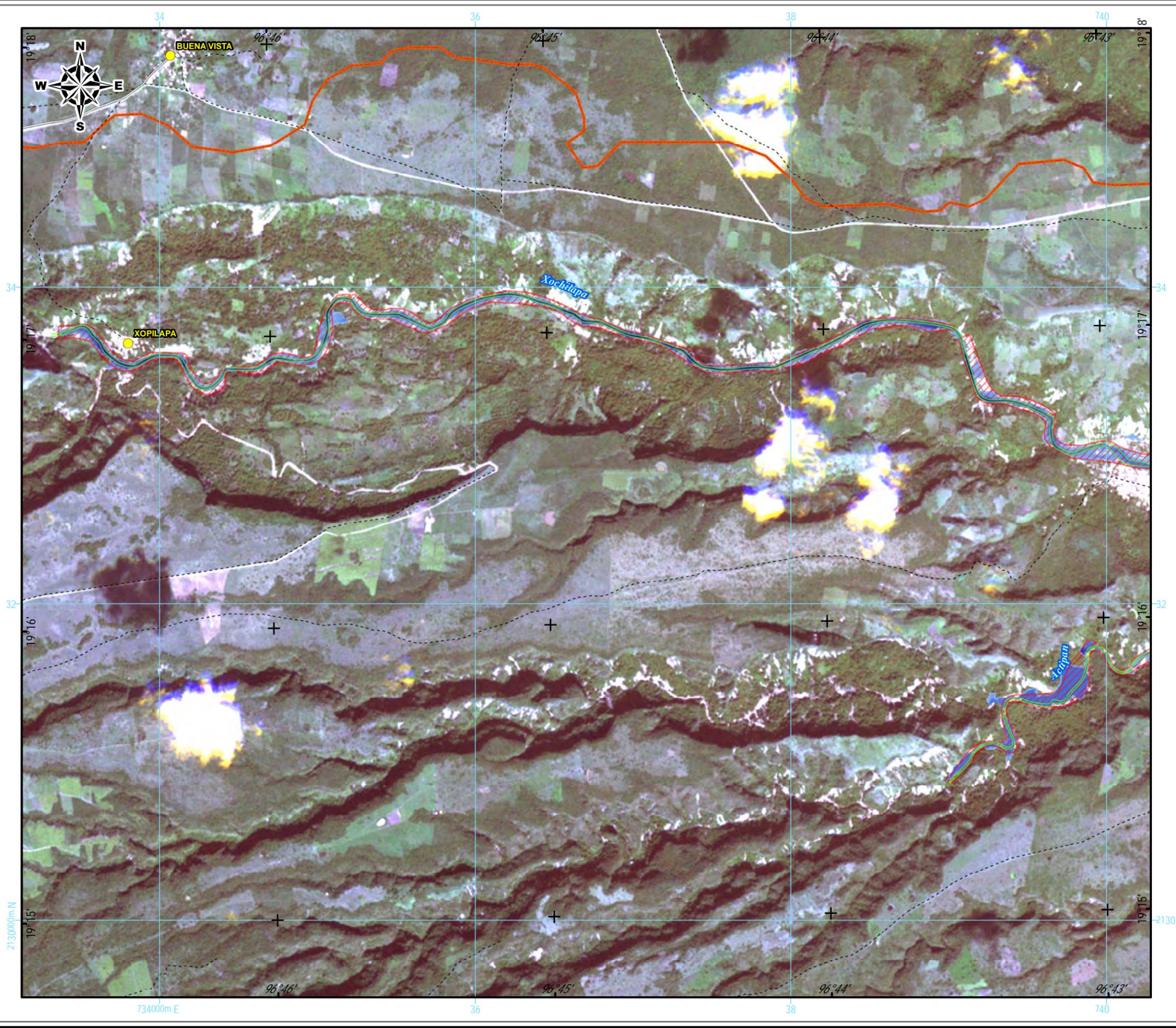
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
Elipsoide WGS1984
Datum Horizontal WGS1984
Zona UTM 14N

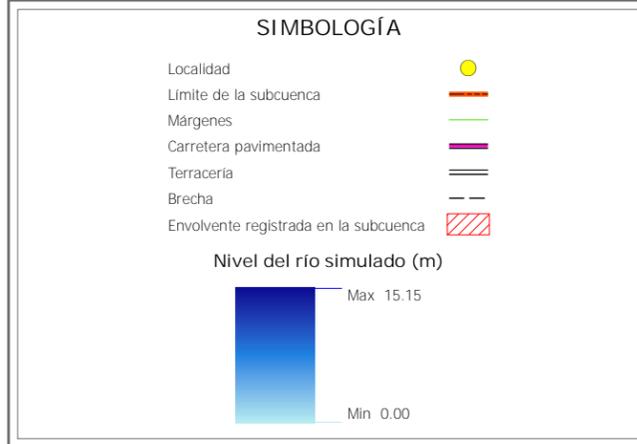
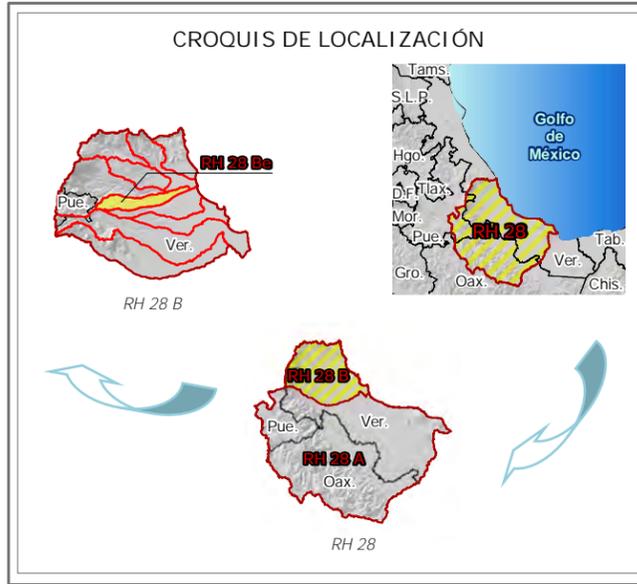
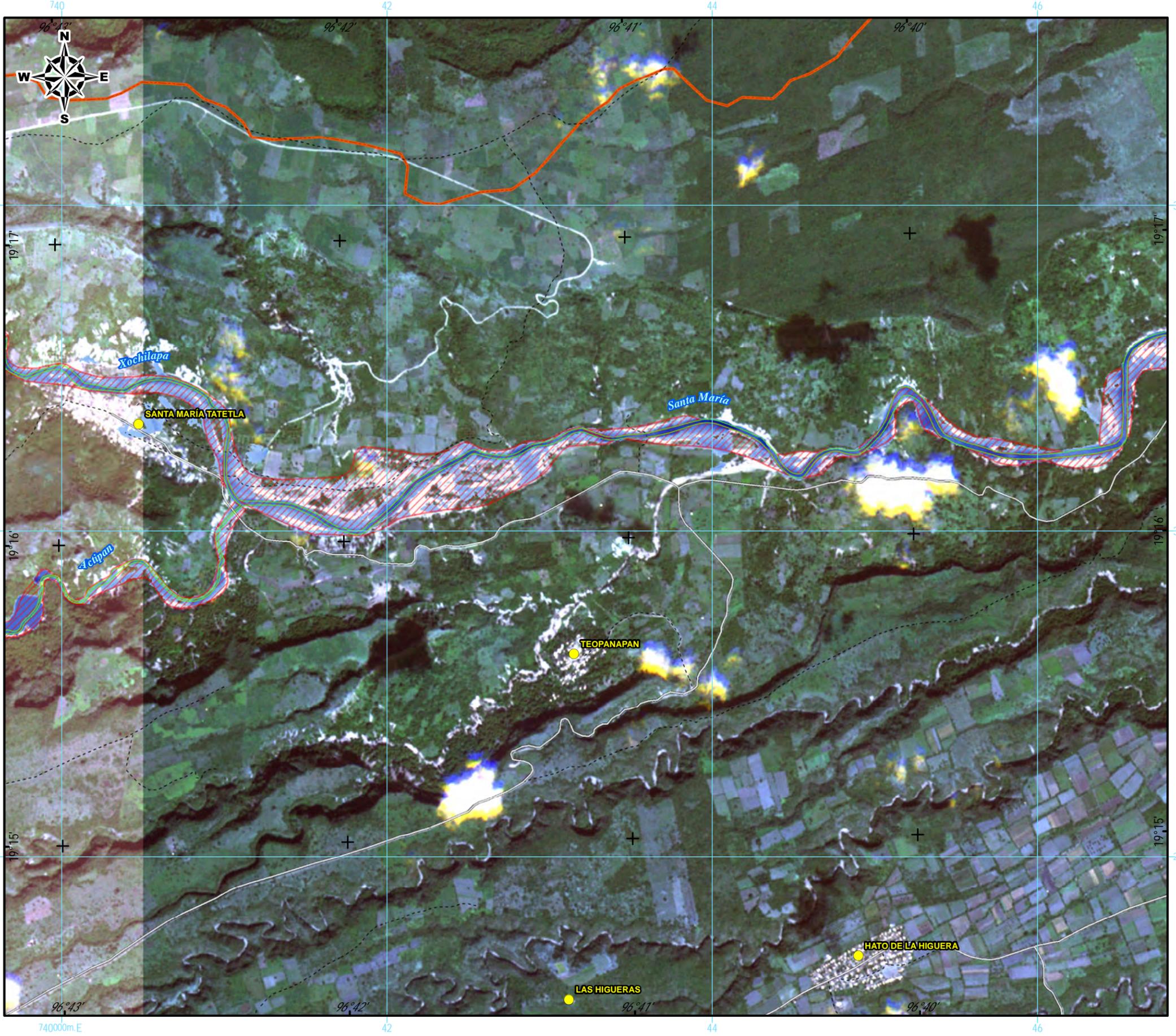
RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN SIMULADA vs ENVOLVENTE REGISTRADA EN LA SUBCUENCA

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI

Escala Gráfica





INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

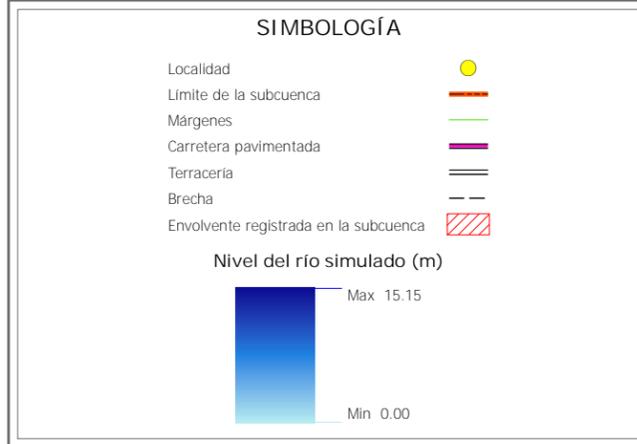
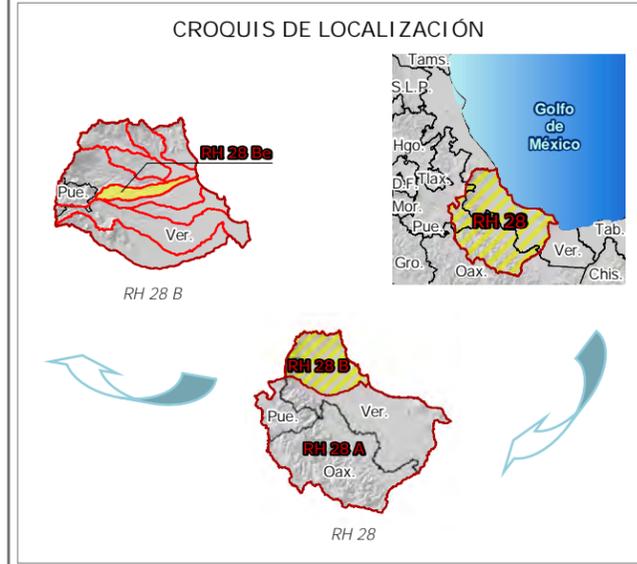
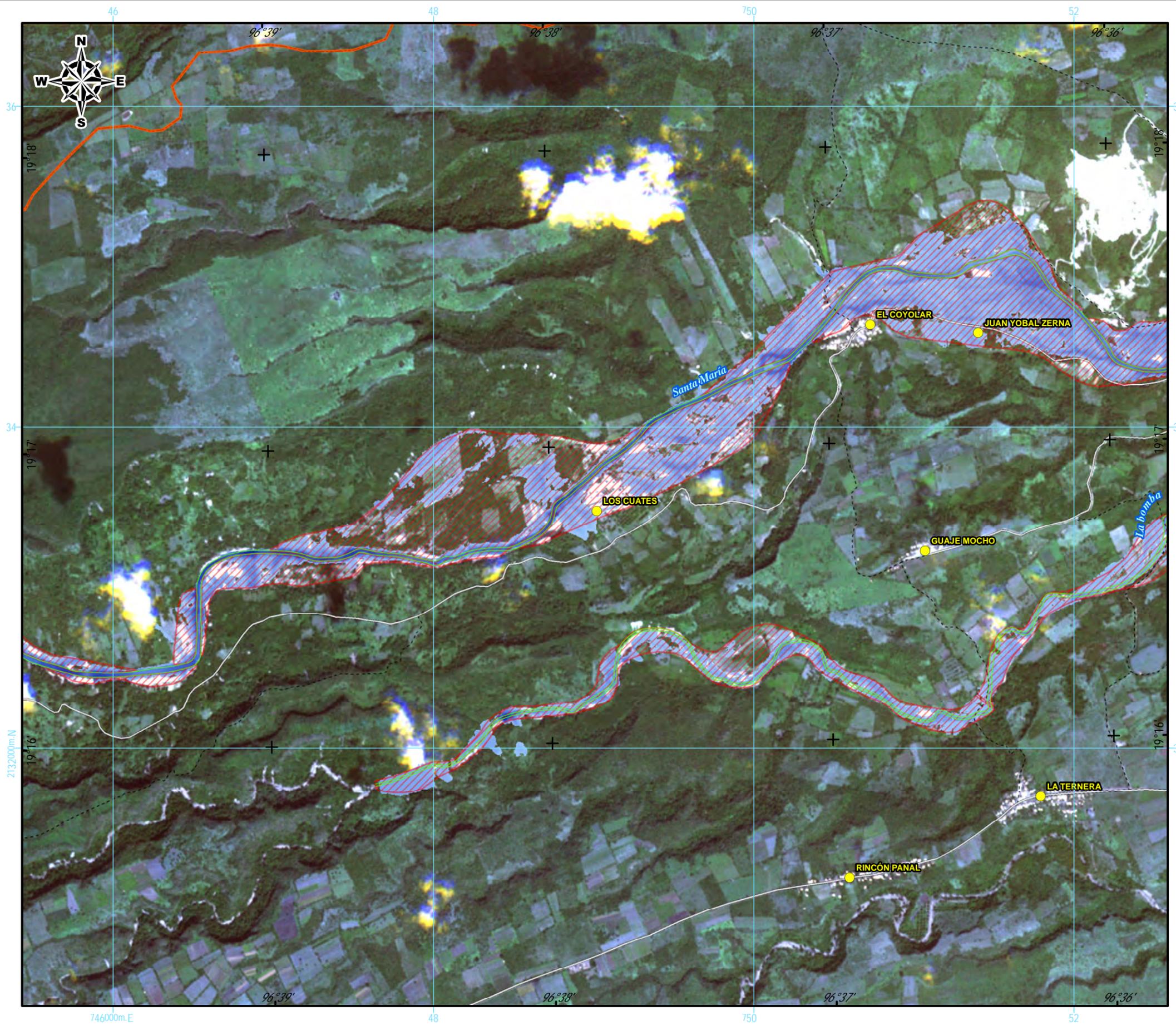
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN SIMULADA vs ENVOLVENTE REGISTRADA EN LA SUBCUENCA

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





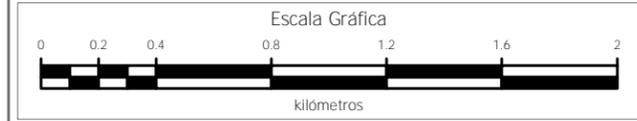
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

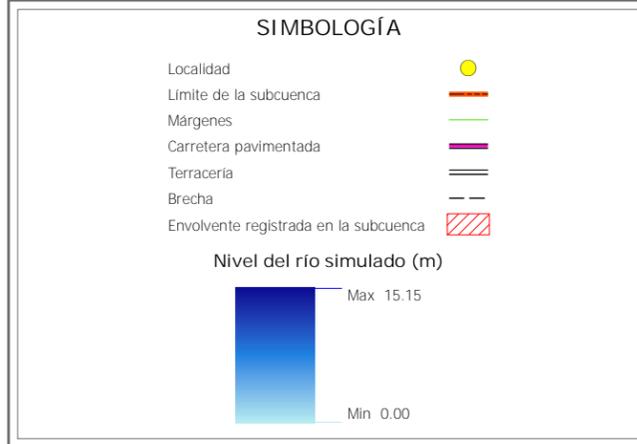
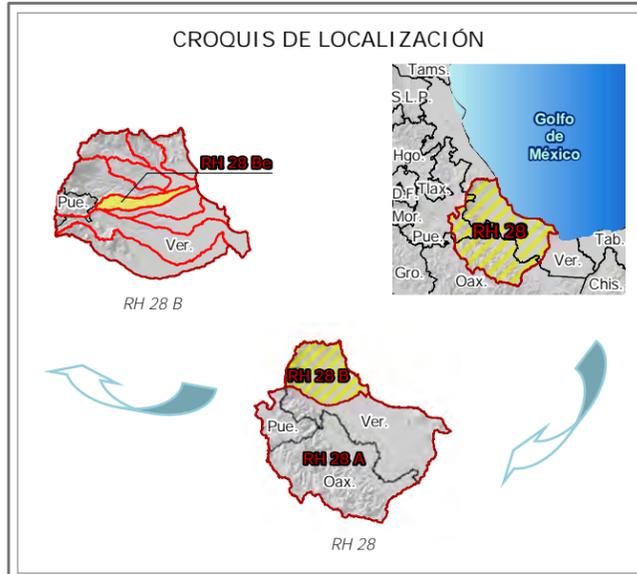
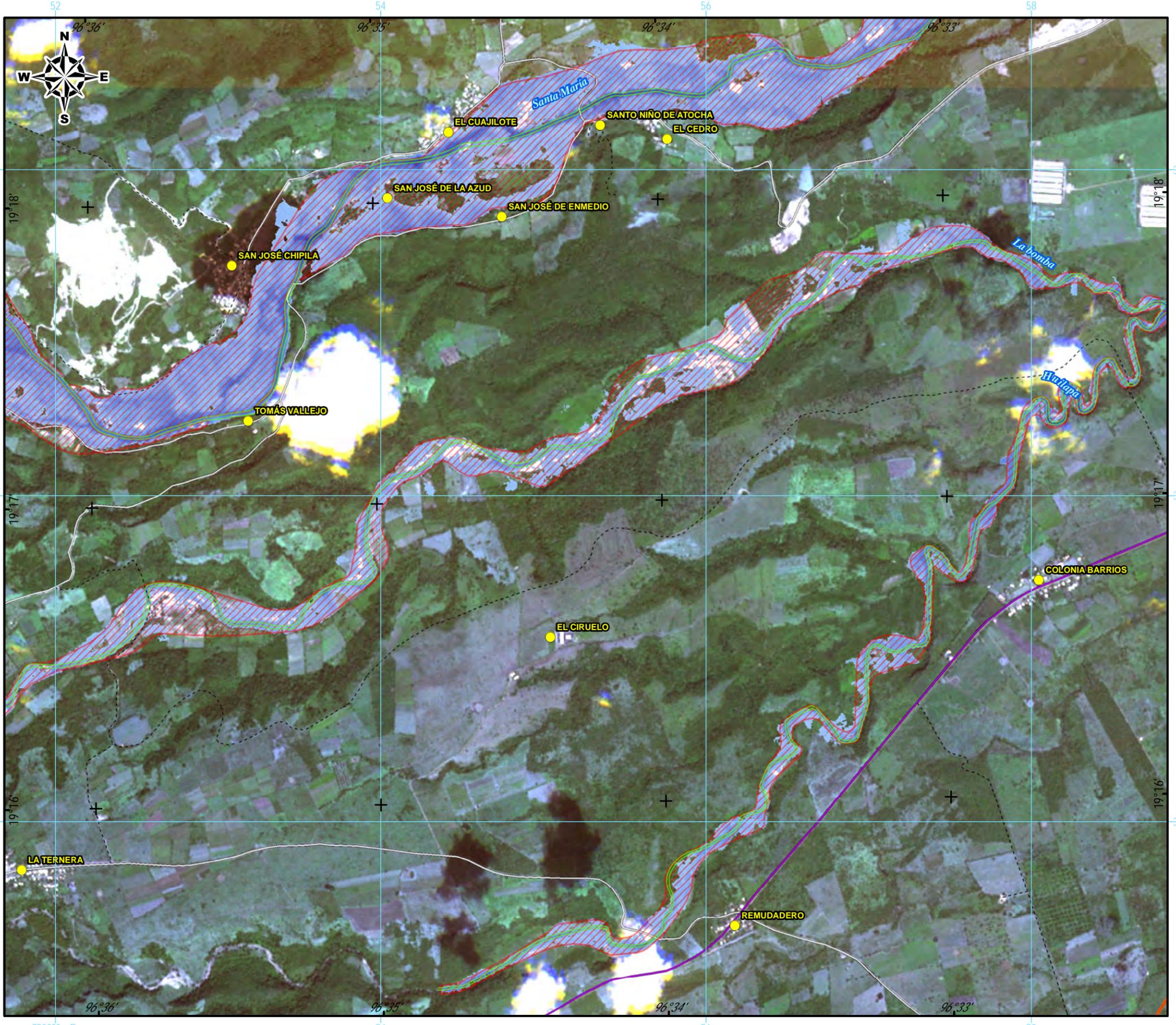
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN SIMULADA vs ENVOLVENTE REGISTRADA EN LA SUBCUENCA

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

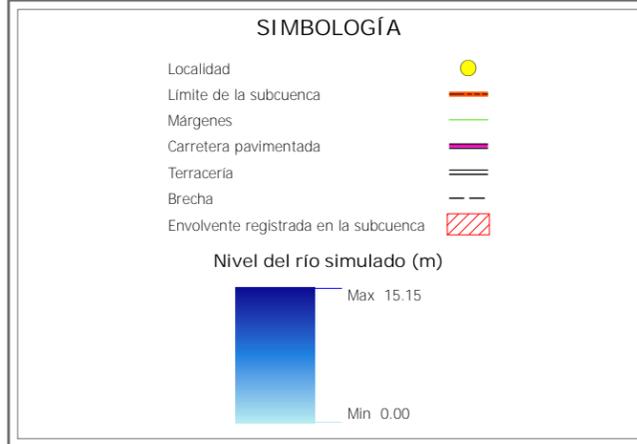
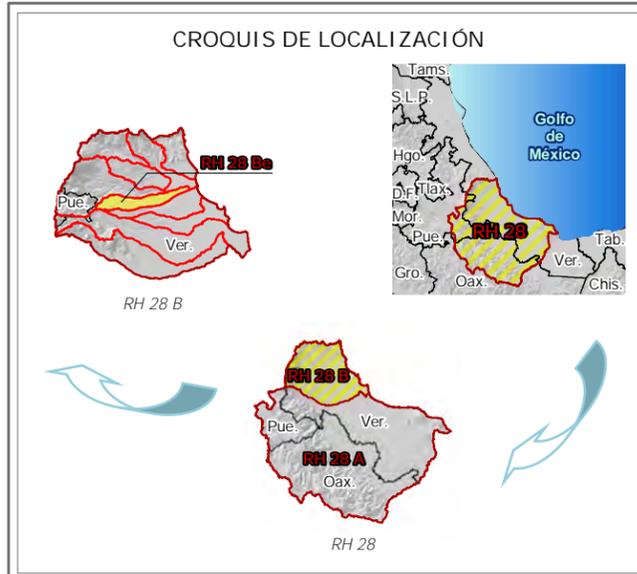
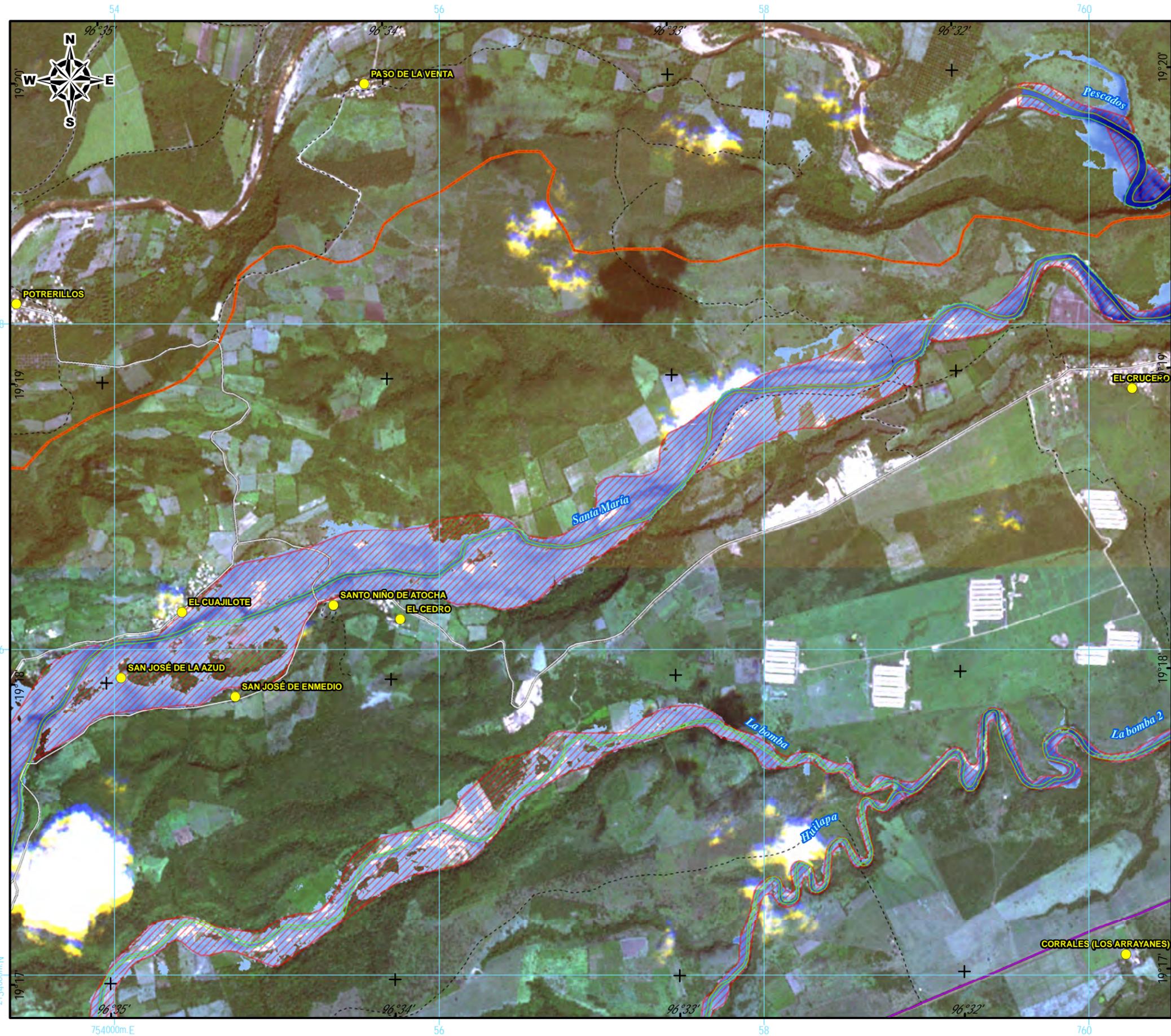
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN SIMULADA
vs
ENVOLVENTE REGISTRADA EN LA SUBCUENCA

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





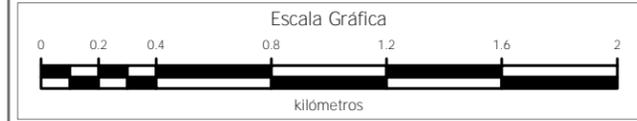
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

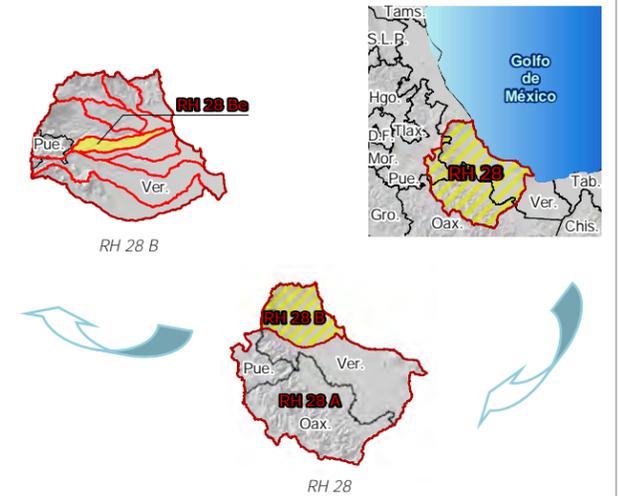
ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN SIMULADA vs ENVOLVENTE REGISTRADA EN LA SUBCUENCA

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





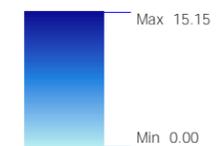
CROQUIS DE LOCALIZACIÓN



SIMBOLOGÍA

- Localidad
- Límite de la subcuenca
- Márgenes
- Carretera pavimentada
- Terracería
- Brecha
- Envolvente registrada en la subcuenca

Nivel del río simulado (m)



INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

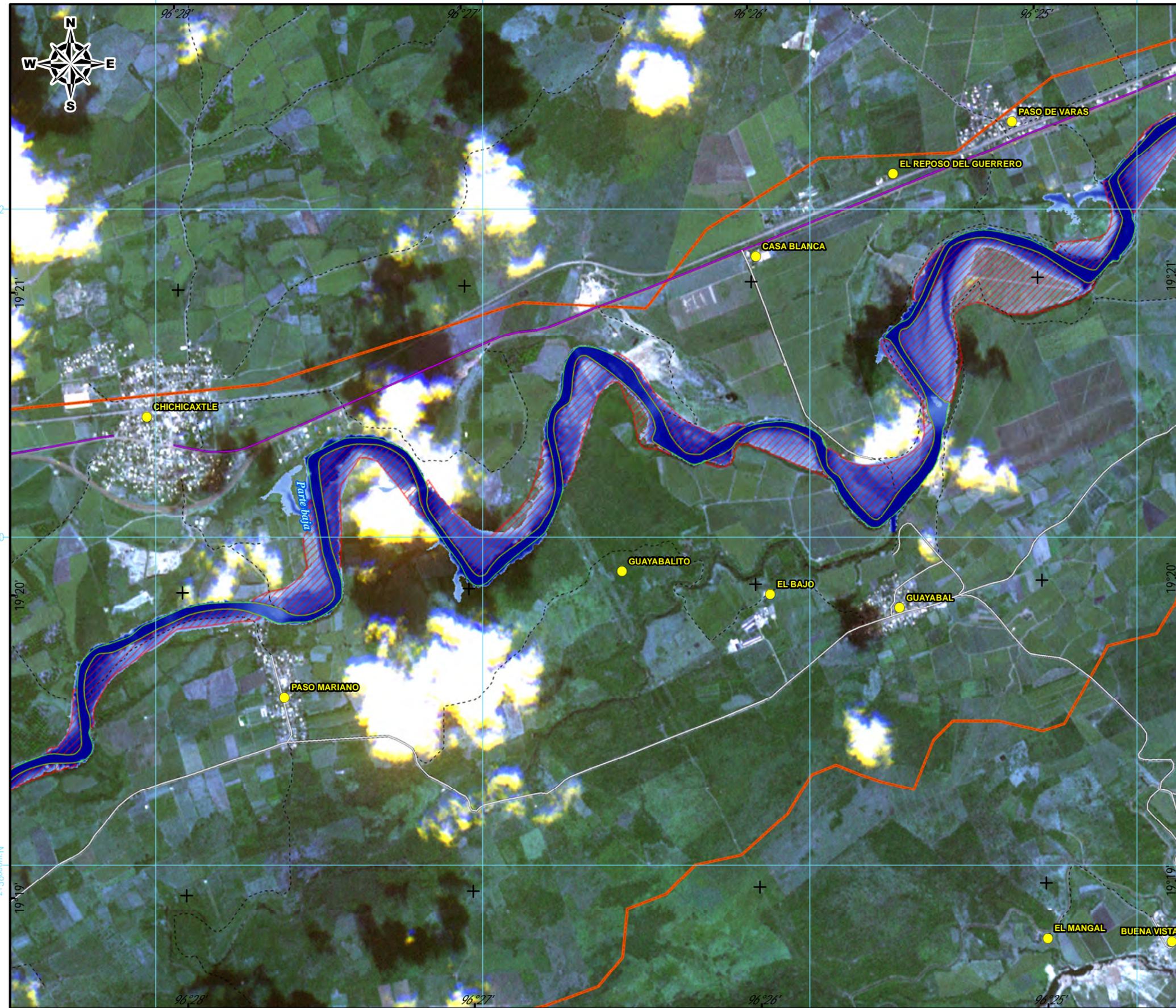
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
Elipsoide WGS1984
Datum Horizontal WGS1984
Zona UTM 14N

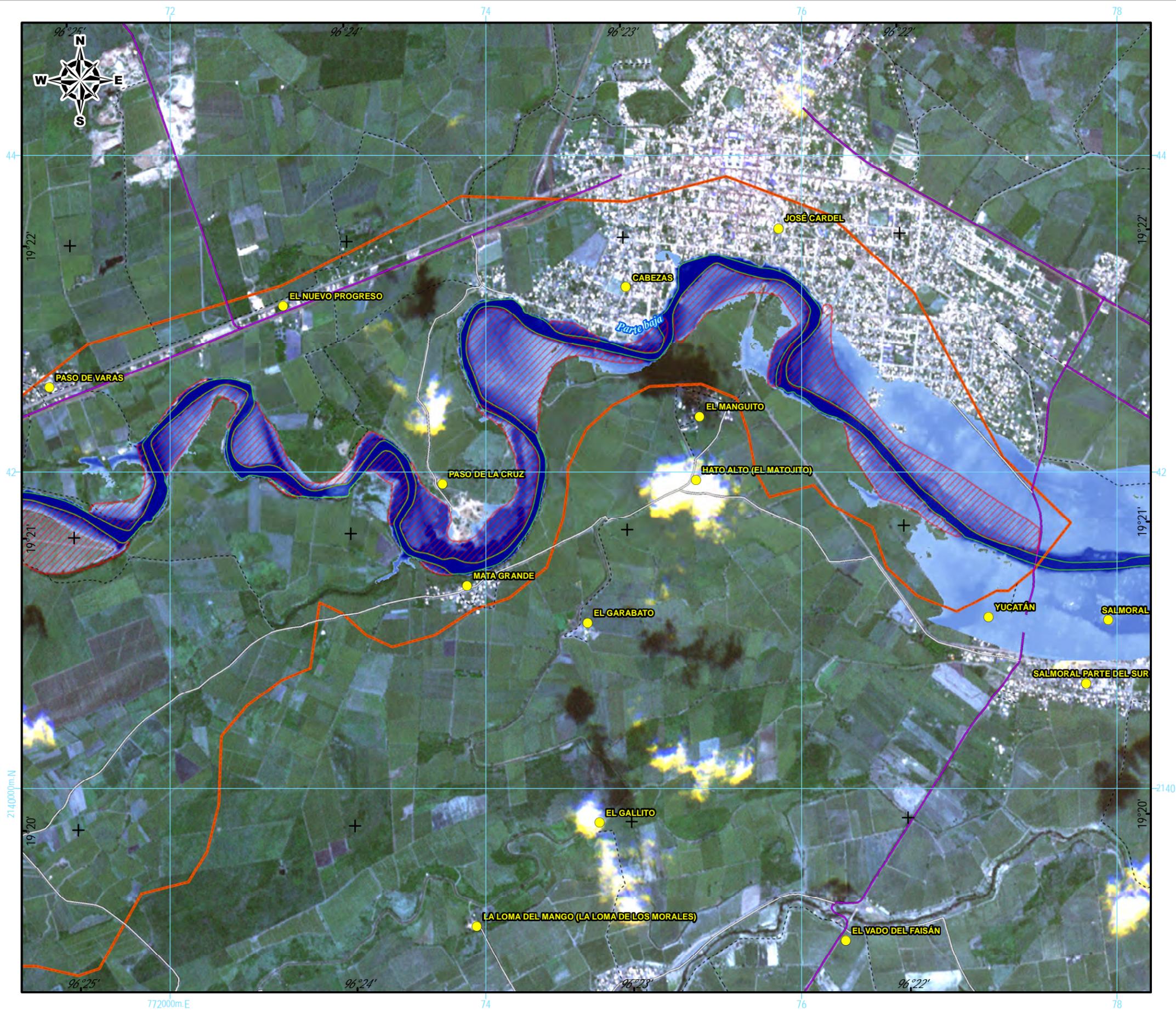
RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN SIMULADA vs ENVOLVENTE REGISTRADA EN LA SUBCUENCA

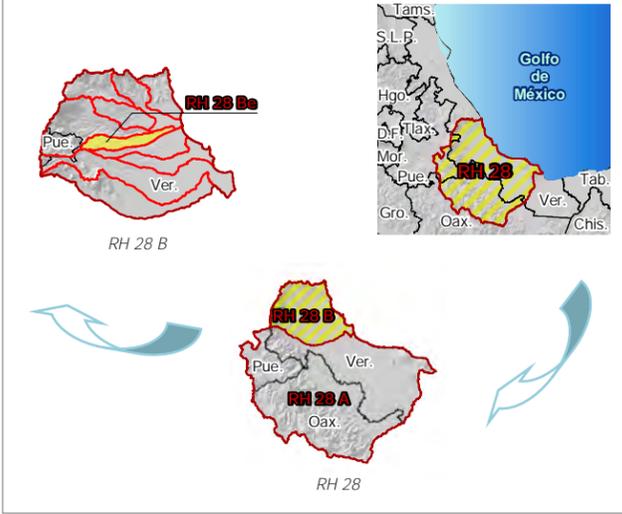
ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI

Escala Gráfica





CROQUIS DE LOCALIZACIÓN



SIMBOLOGÍA



INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN SIMULADA
vs
ENVOLVENTE REGISTRADA EN LA SUBCUENCA

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





9.3. VALIDACIÓN DEL MODELO

La validación del modelo consiste en medir su capacidad predictiva mediante la comparación de los datos medidos y estimados con parámetros determinados en la fase de calibración pero en un periodo diferente del utilizado en la calibración (Palacios, 1986). Generalmente el ajuste entre datos medidos y simulados obtenidos durante la validación es menos satisfactorio que el obtenido en la calibración, pero es más indicativo de la exactitud de las predicciones que se hagan con el modelo.

Palacios (1986) sugiere utilizar durante la validación datos medidos en un periodo diferente a la calibración, esta premisa no condiciona el uso de eventos anteriores o posteriores, por lo tanto se emplearon los niveles de agua medidos en la estación hidrométrica 28003 durante el periodo comprendido entre las 00:00 hr y las 15:00 hr del día 13/07/1999 (Cuadro 34). Los parámetros del modelo utilizados en el proceso de validación son los mismos de la calibración (espaciamiento entre secciones de 20 m y coeficientes de rugosidad de Manning), únicamente cambiaron los hidrogramas unitarios sintéticos, esto para simular el comportamiento hidráulico del río La Antigua en respuesta al escurrimiento generado por las precipitaciones del 12/07/1999.

Cuadro 34. Niveles medidos vs simulados (13 de julio 1999).

Fecha	Hora	Nivel medido (m)	Nivel Simulado (m)
13/07/1999	00:00	5.83	8.10
13/07/1999	01:00	6.32	8.51
13/07/1999	03:00	6.40	8.56
13/07/1999	04:00	6.70	8.77
13/07/1999	05:00	7.32	9.23
13/07/1999	06:00	7.50	9.35
13/07/1999	07:00	7.70	9.47
13/07/1999	08:00	8.30	9.73
13/07/1999	09:00	8.04	9.67

Fecha	Hora	Nivel medido (m)	Nivel Simulado (m)
13/07/1999	10:00	7.46	9.32
13/07/1999	11:00	6.87	8.89
13/07/1999	14:00	5.40	7.66
13/07/1999	15:00	4.90	7.20

Con los valores del cuadro anterior se generó la Figura 72, en ella se observa una ligera sobrestimación del nivel simulado que alcanza un máximo de 2.30 m al final de la simulación; en contra parte, el mejor ajuste coincide con el gasto pico, donde la sobrestimación se reduce a 1.43 m. Esto podría deberse a que la cantidad de lluvia considerada para generar los hidrogramas unitarios sintéticos fue superior a la cantidad de lluvia que genero el verdadero gasto del 13/07/1999.

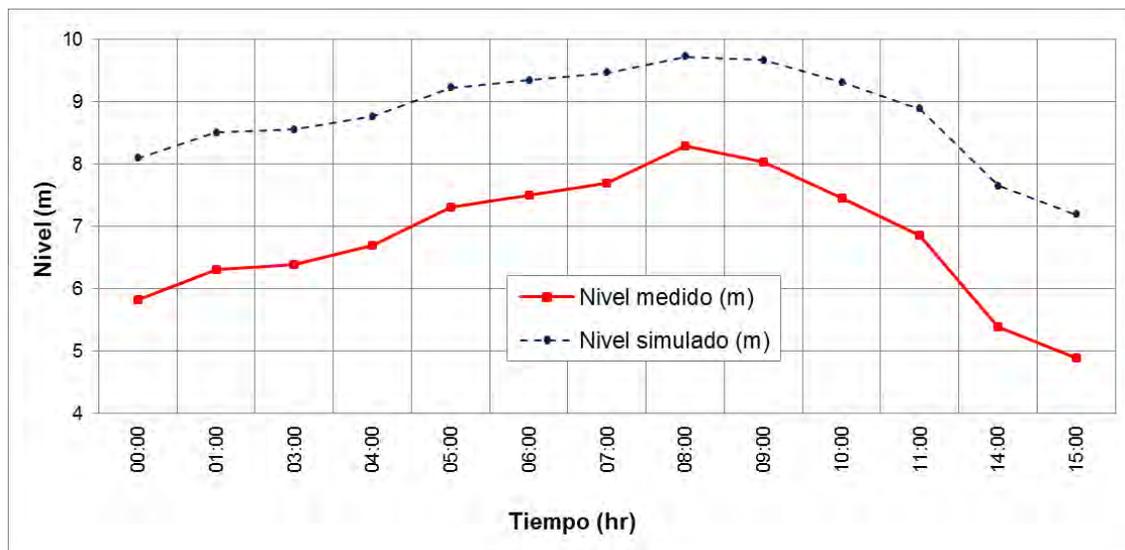


Figura 72. Niveles medidos *versus* simulados (13 de julio 1999).

Por otro lado, los niveles simulados podrían ser superiores a los que ocurrieron en la estación de aforo, debido a que la sección de aforo actual (extraída del MDE LiDAR) pudiera presentar mayor azolve en comparación con la sección transversal de julio 1999 y, por tanto, los tirantes simulados resultan superiores a los medidos en la estación hidrométrica.

Los datos del Cuadro 33 se ajustaron a un modelo lineal (Figura 73) que se encuentran alrededor de la recta 1:1; esta figura muestra que cuanto más estrecho sea el diagrama de dispersión o nube de puntos, menor es el margen de variación, y por tanto existe una mayor correlación.

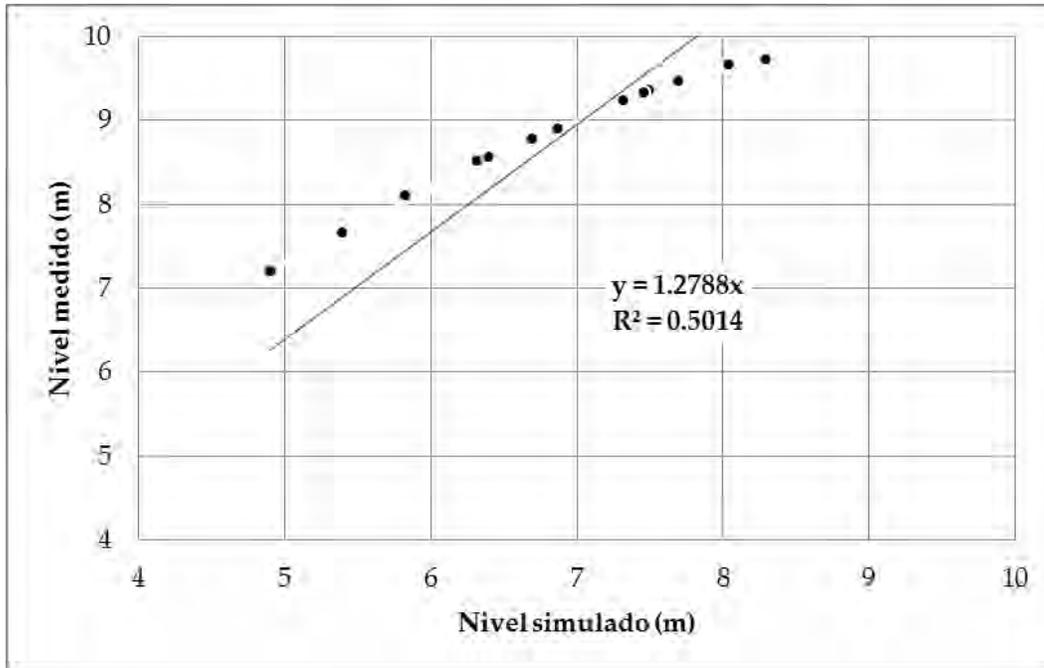


Figura 73. Niveles medidos en la estación hidrométrica 28003 y simulados por HEC-RAS (13 de julio 1999).

En este proceso también se aplicaron los tres índices estadísticos de prueba propuestos por Moriasi (2007) para determinar la correlación entre niveles medidos y simulados. El Cuadro 35 muestra los valores obtenidos en la validación del modelo.

Cuadro 35. Resultados del análisis de comparación de niveles medidos y simulados por el modelo HEC-RAS (validación).

Índice de evaluación estadística	Valor
Raíz del error cuadrático medio	1.995
Desviación media acumulada	1.978
Coefficiente de determinación	0.501

Como era de esperarse, el ajuste entre datos medidos y simulados obtenidos en la validación es menos satisfactorio que el obtenido en la calibración; sin embargo, los valores de los tres estadísticos indican una buena correlación entre este conjunto de datos. El coeficiente de determinación (R^2) es menor al obtenido en la calibración, aún presentado una relación lineal 1:1. Esto se debe a los niveles empleados en la validación, cuya diferencia entre simulados y medidos (de hasta 2.30 m, ver Figura 72) aumenta la variación y reduce el índice de R^2 .

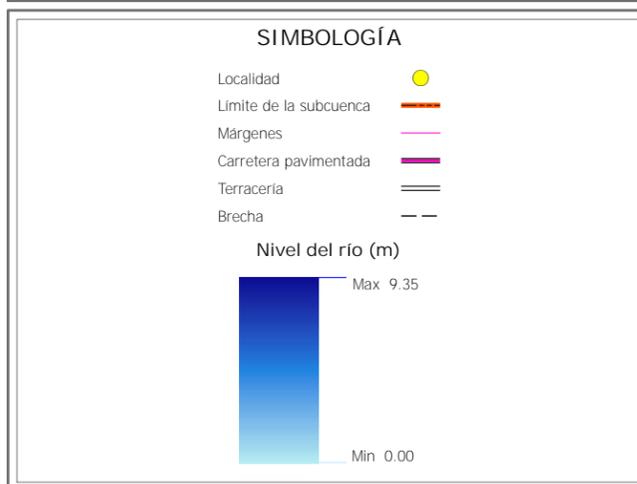
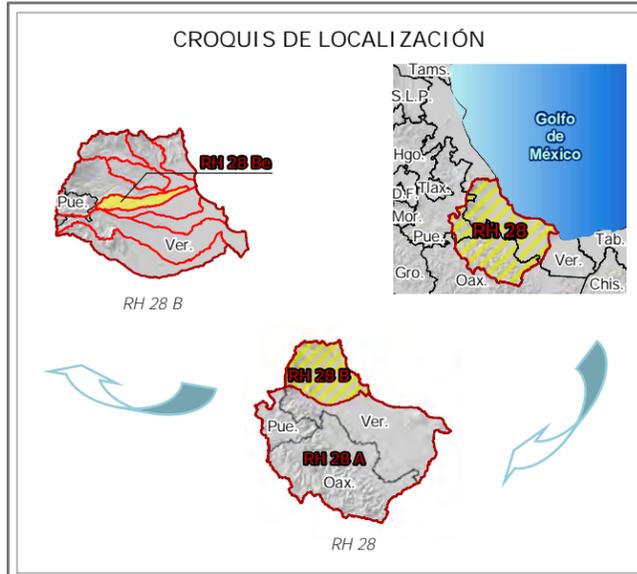
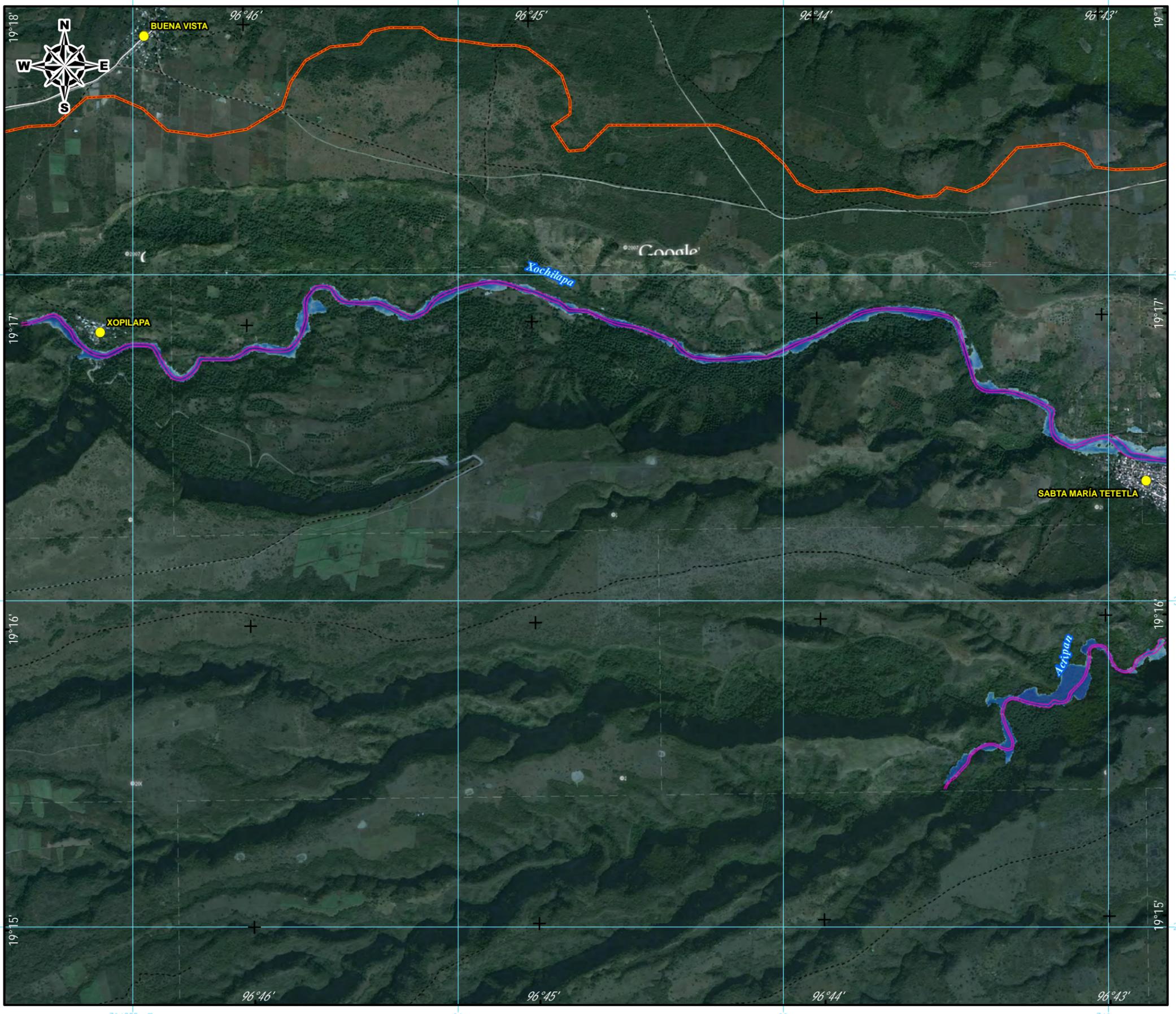
Así mismo, el error cuadrático medio (RMSE) obtenido en la validación es mayor que en la calibración (partiendo del hecho que 0 significa una precisión perfecta), ya que el RMSE mide el promedio del cuadrado del "error", siendo el "error" el valor en la que el estimado (o simulado) difiere de la cantidad medida o real, en términos generales, este índice evalúa la diferencia entre el estimado y el valor real. Los niveles considerados en la calibración (medidos y simulados) reportan una diferencia no mayor a los 0.95 m, lo cual reduce el error, mientras que los niveles considerados en la validación reportan una diferencia de hasta 2.30 m, esto aumenta el error y con ello el índice de RMSE.

De igual forma, la diferencia entre niveles medidos y simulados considerados en la validación (de hasta 2.30 m) indica que ambos valores están más alejados de la media, principalmente los datos simulados, lo que aumenta el índice de DMA; a diferencia de los niveles medidos y simulados considerados en la calibración (con una discrepancia no mayor a 0.95 m), que están más cerca de la media



(principalmente los datos simulados). La DMA es la media aritmética de los valores absolutos de las desviaciones respecto a la media de datos agrupados.

En los Mapas 18 a 25 se observa la llanura de inundación obtenida mediante la simulación del escurrimiento generado por las lluvias del 12 de julio 1999.



INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

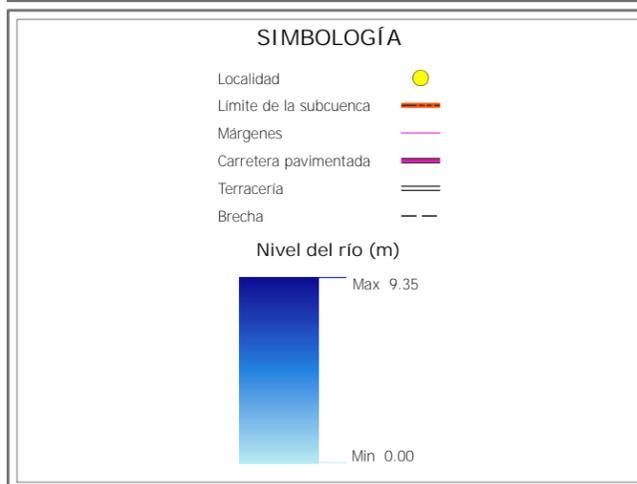
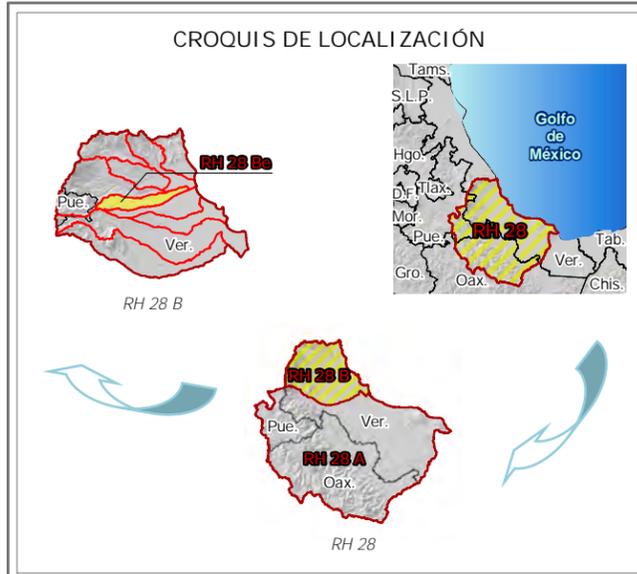
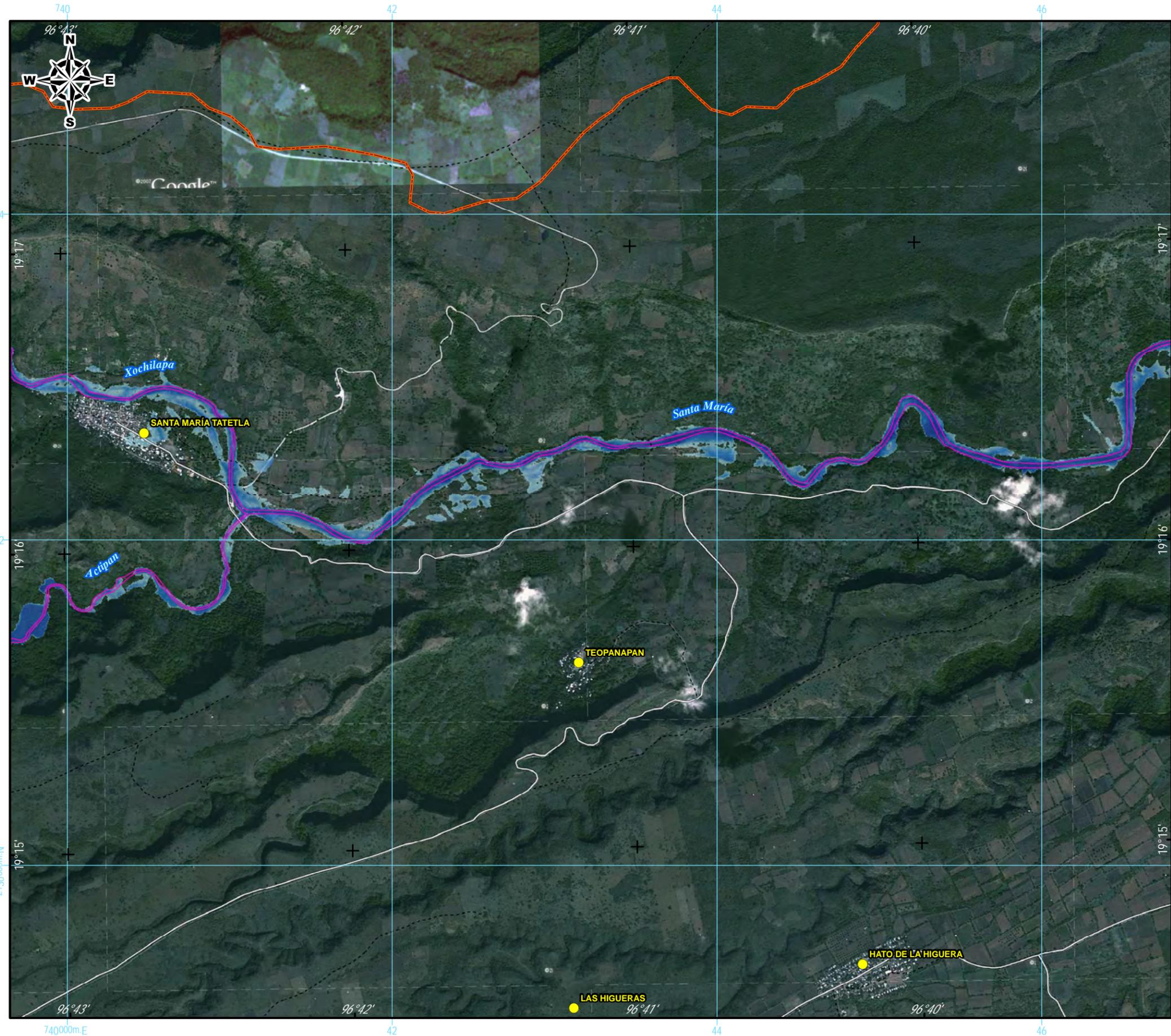
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN ASOCIADA A LAS PRECIPITACIONES DEL 12 JULIO 1999

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





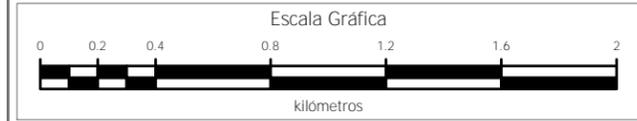
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

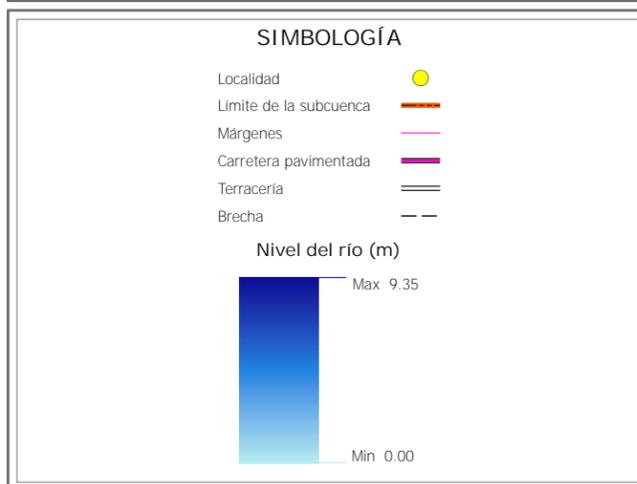
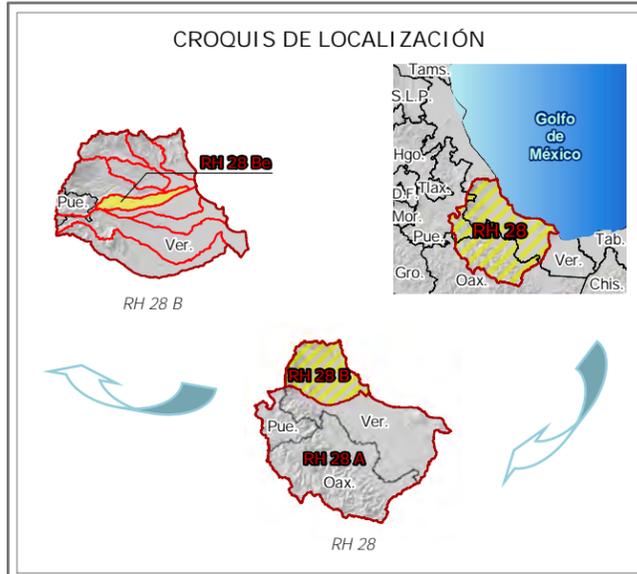
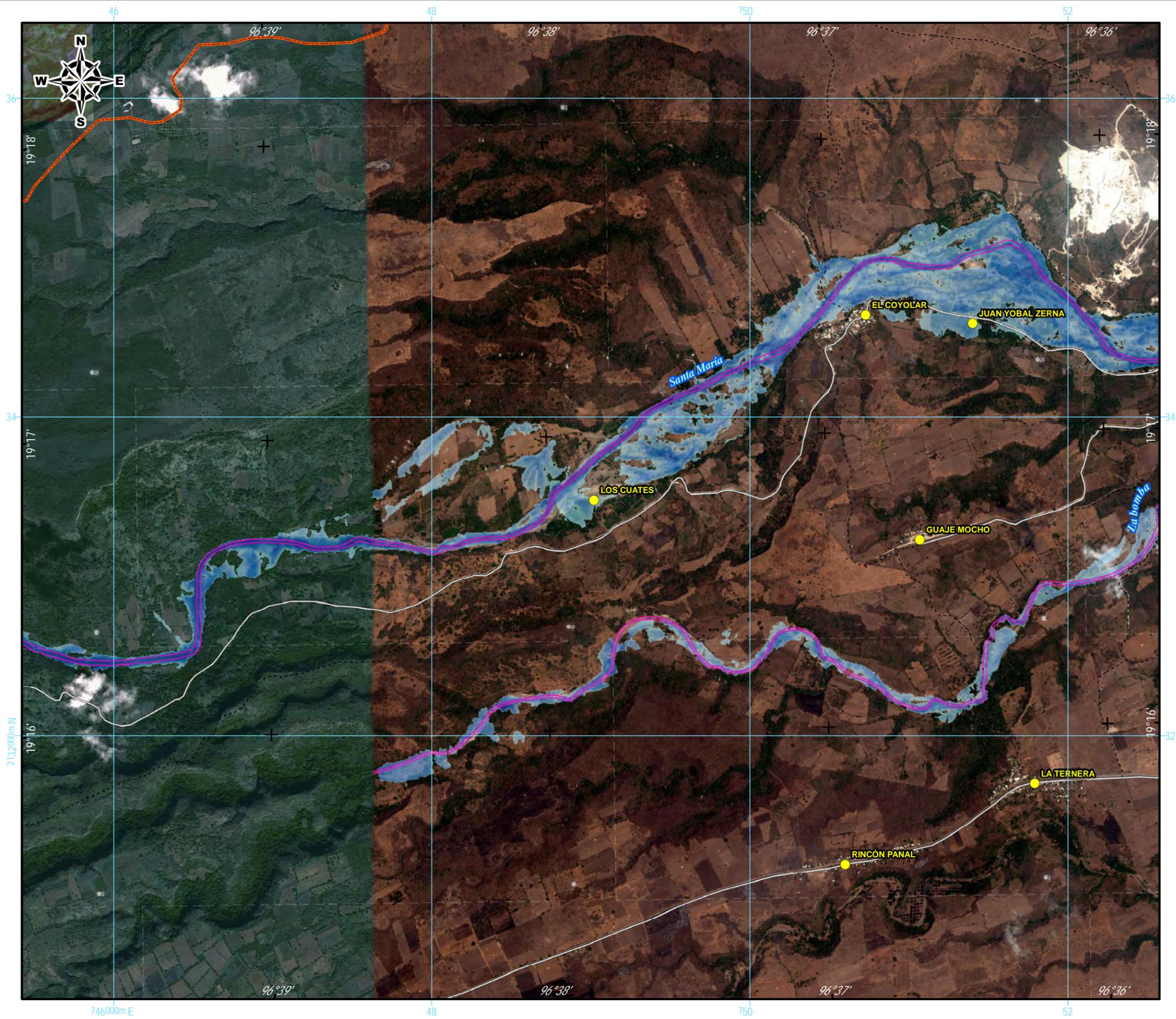
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN ASOCIADA A LAS PRECIPITACIONES DEL 12 JULIO 1999

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





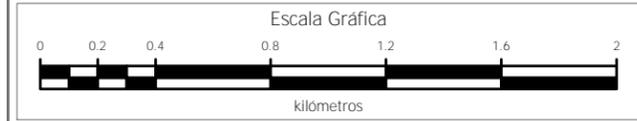
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

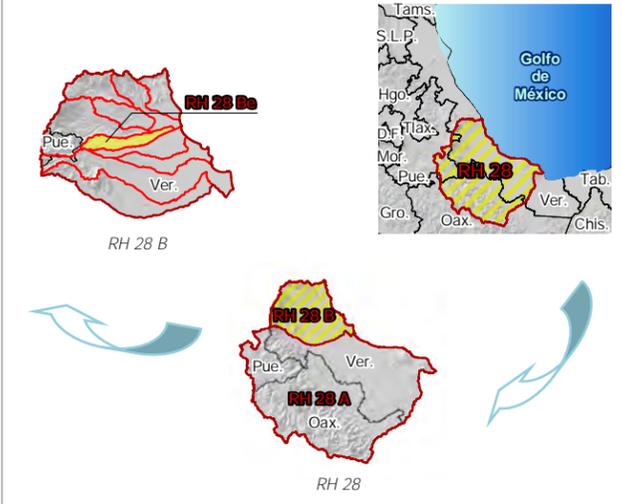
ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN ASOCIADA A LAS PRECIPITACIONES DEL 12 JULIO 1999

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI

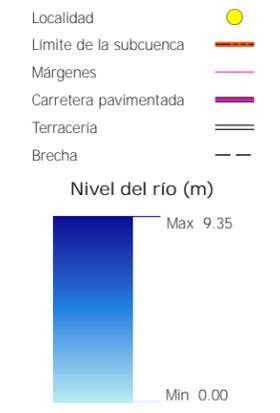




CROQUIS DE LOCALIZACIÓN



SIMBOLOGÍA



INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

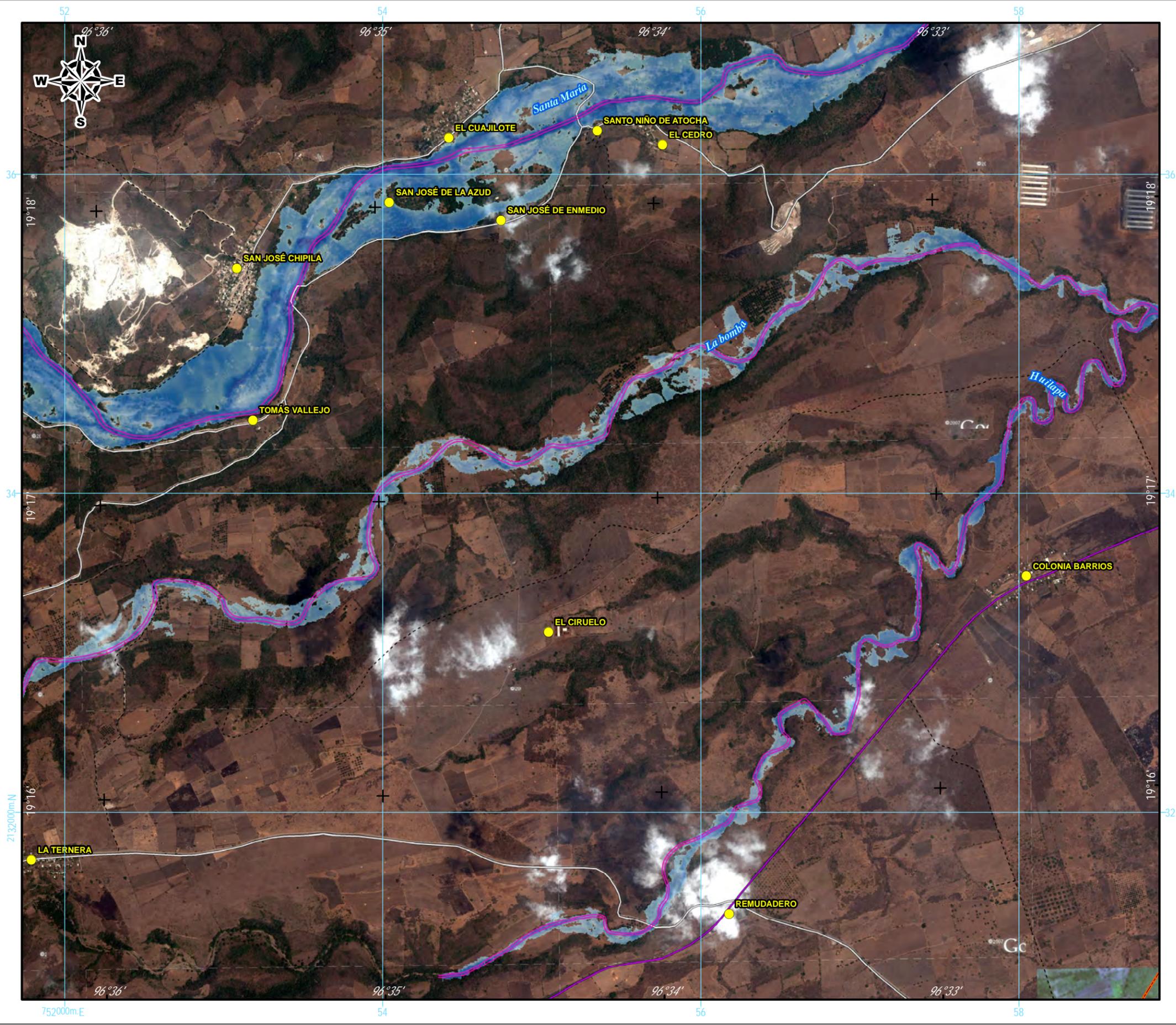
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

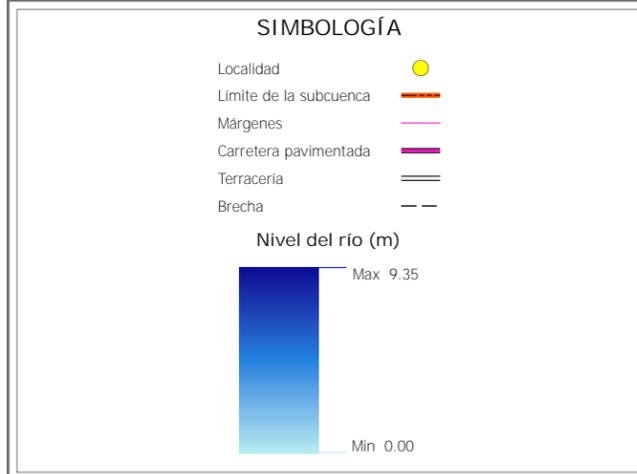
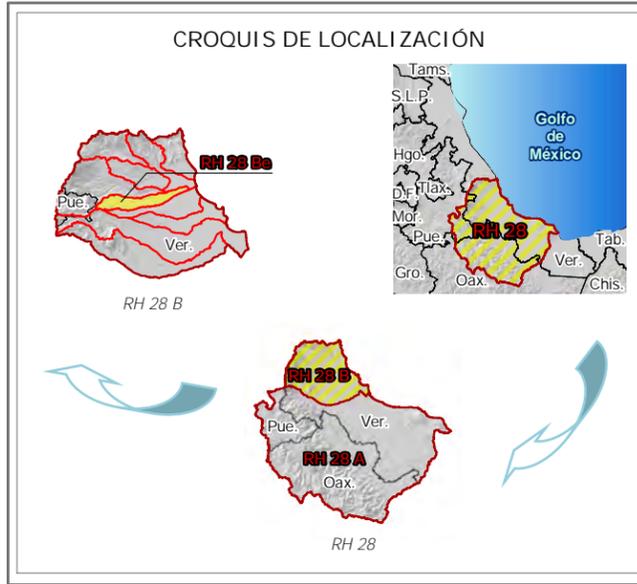
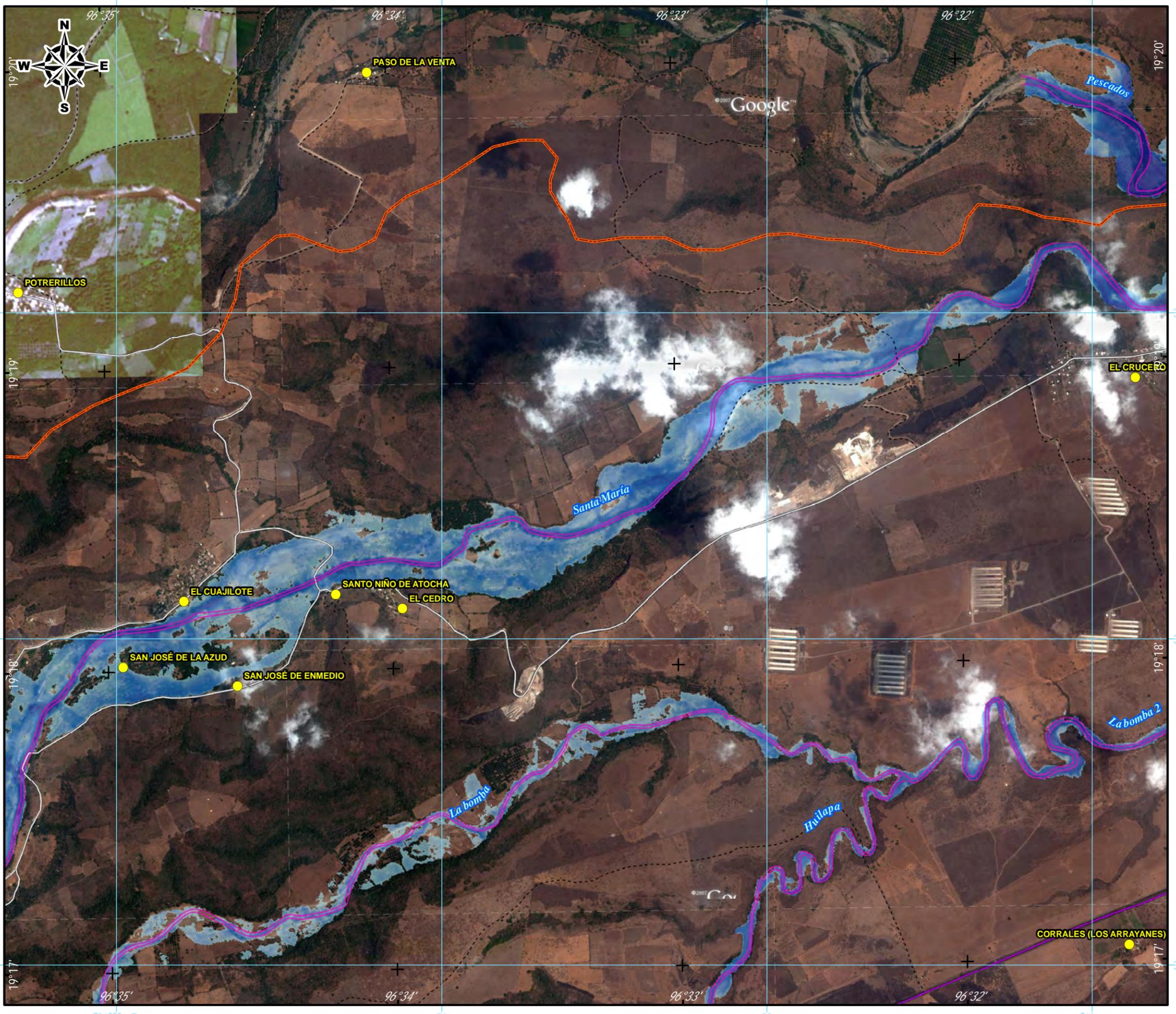
RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN ASOCIADA A LAS PRECIPITACIONES DEL 12 JULIO 1999

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI

Escala Gráfica





INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

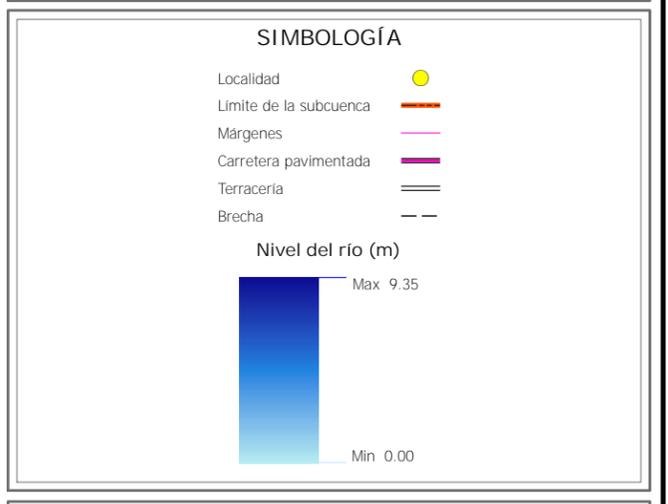
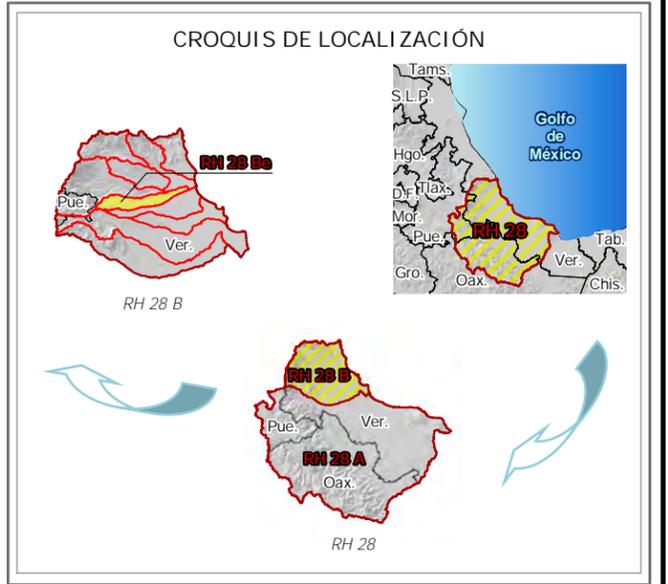
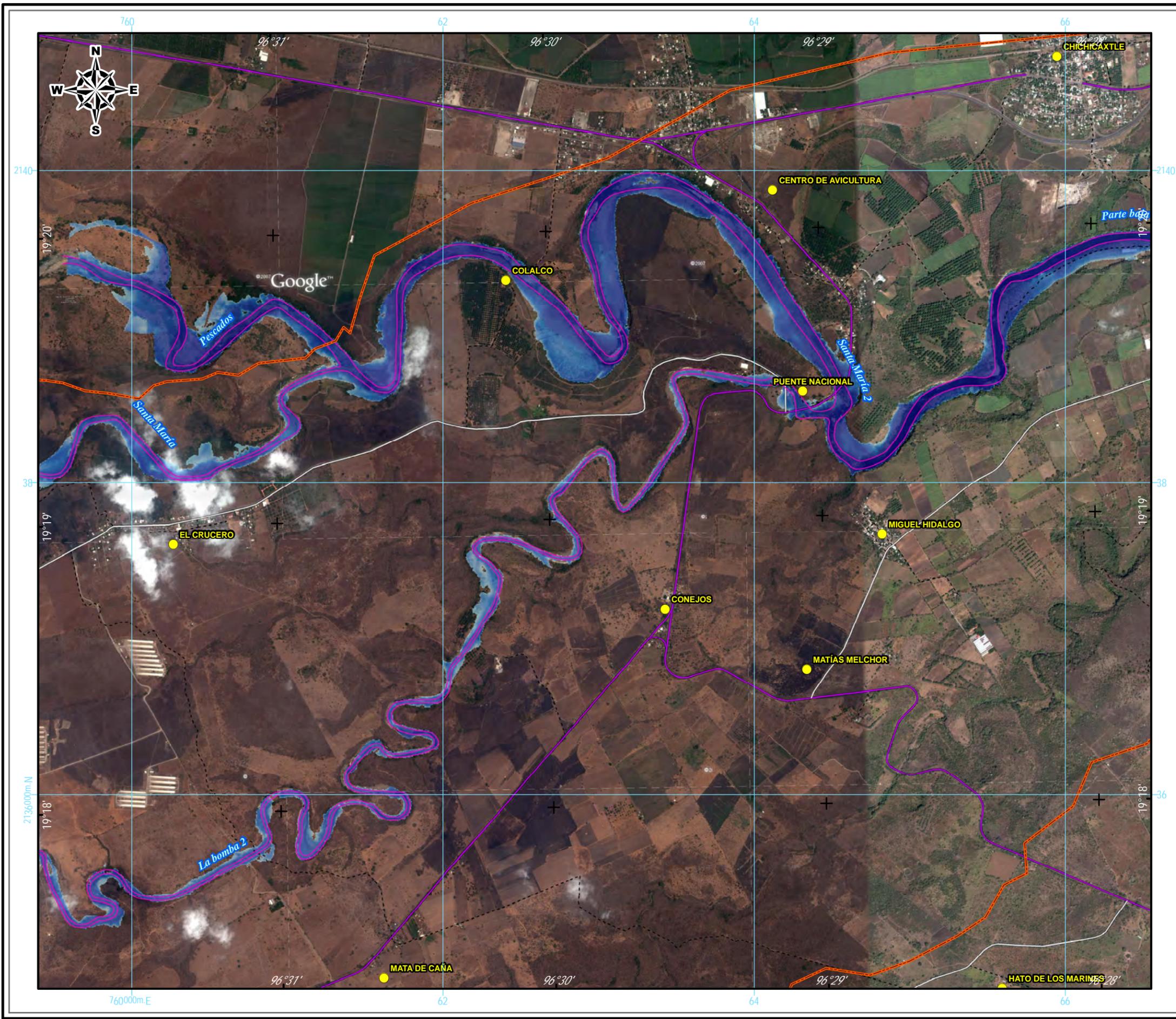
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN ASOCIADA A LAS PRECIPITACIONES DEL 12 JULIO 1999

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

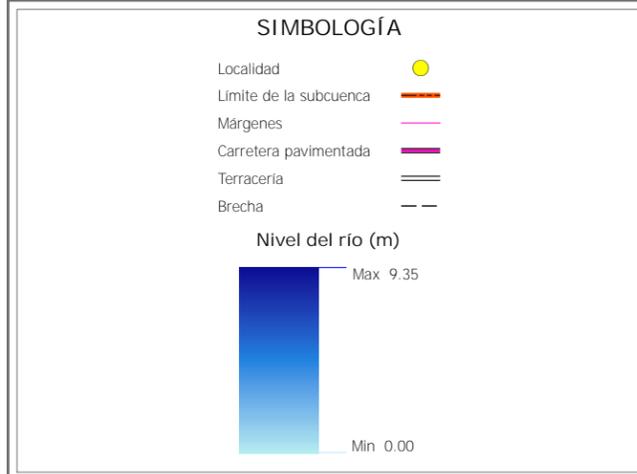
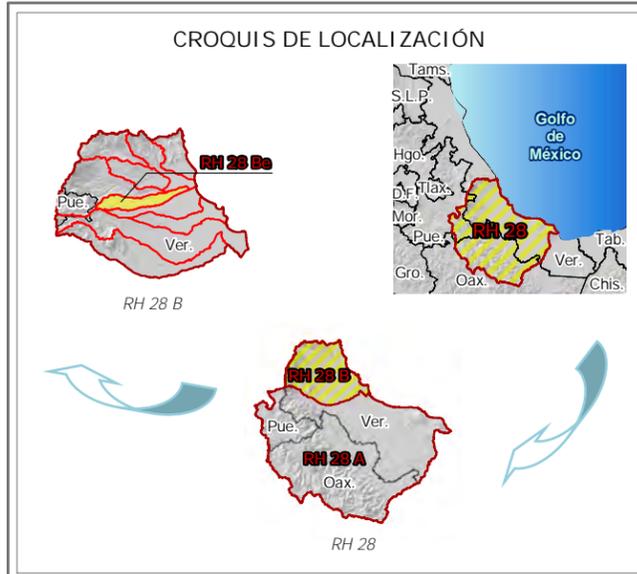
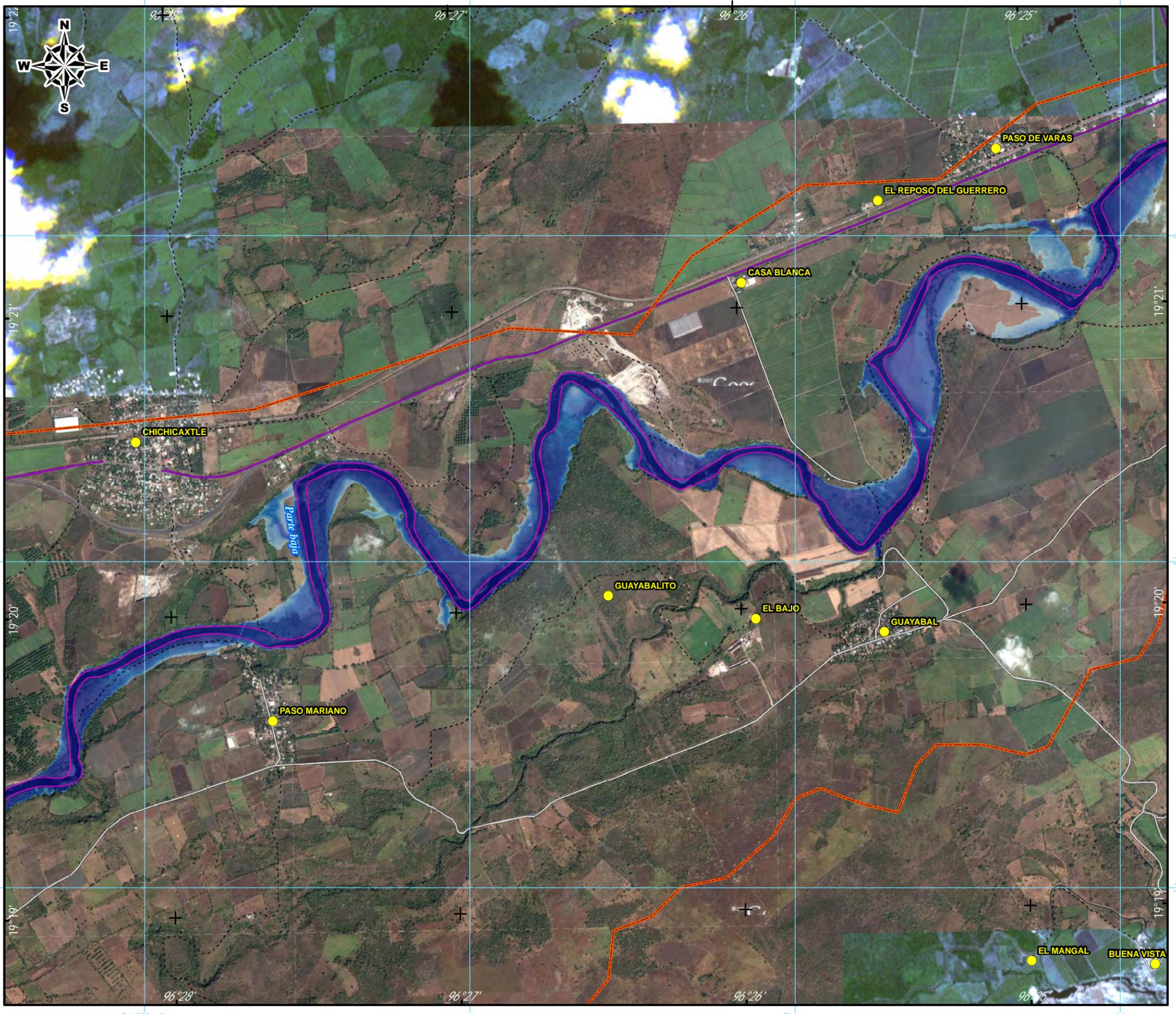
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN ASOCIADA A LAS PRECIPITACIONES DEL 12 JULIO 1999

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





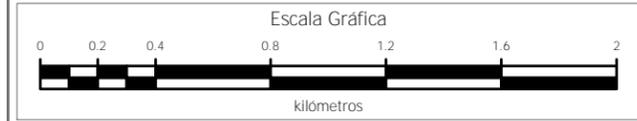
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

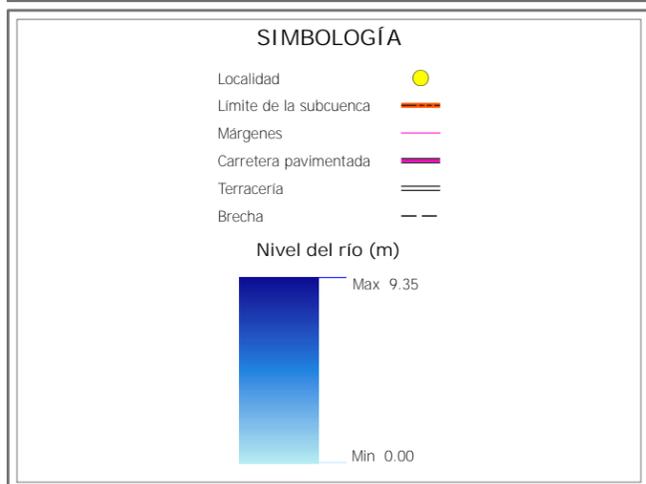
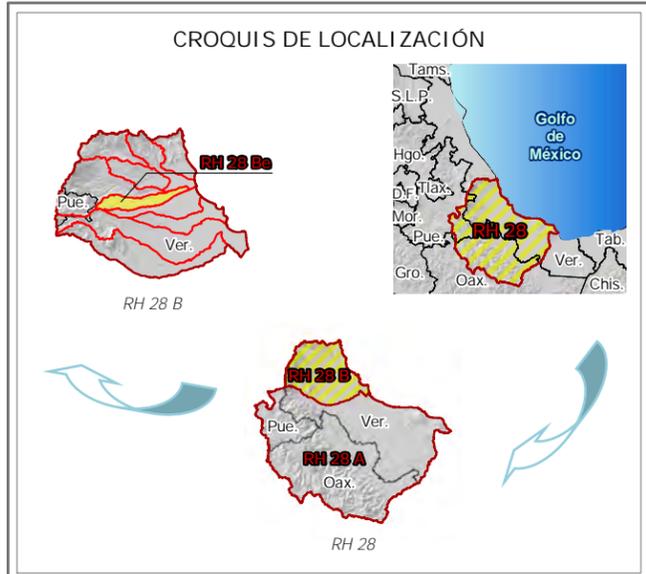
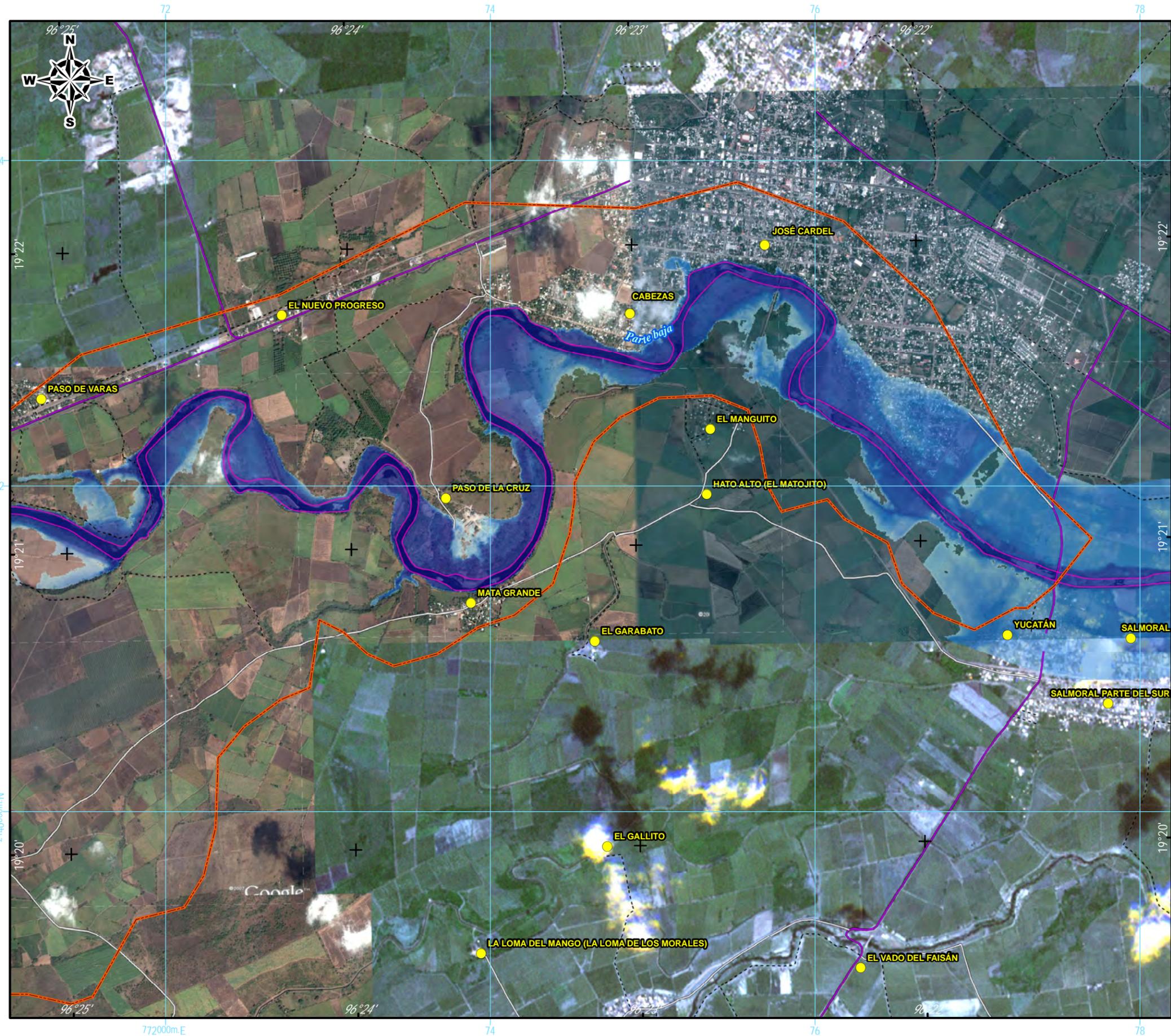
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN ASOCIADA A LAS PRECIPITACIONES DEL 12 JULIO 1999

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN ASOCIADA A LAS PRECIPITACIONES DEL 12 JULIO 1999

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





9.4. DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS DE RIESGO A INUNDACIÓN

El riesgo es una variable que cambia continuamente en el tiempo, es función de la variabilidad de las amenazas que nos circundan y de la condición dinámica de la vulnerabilidad y grado de exposición; el riesgo depende de dos factores fundamentales que son el peligro y la vulnerabilidad (Quaas, 2004).

9.4.1. Identificación del peligro por inundaciones

Guevara *et al.* (2004) definen al peligro como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino de cierta intensidad (factor perturbador) durante un cierto periodo de tiempo y en un sitio dado.

Por otro lado, el CENAPRED (2004) define al factor perturbador como un fenómeno natural o generado por el hombre que tenga la probabilidad de ocasionar daños a un sistema afectable (asentamientos humanos, infraestructura, planta productiva, etc.), en un grado tal que constituya un desastre.

Para determinar el peligro se estableció como factor perturbador el área indudable (o llanura de inundación) obtenida a través de la simulación con HEC-RAS, misma que se relaciona con los niveles de agua alcanzados en las secciones transversales durante la simulación hidráulica (respuesta al escurrimiento generado por las lluvias del huracán Karl).

En la Figura 74 se observa que el factor perturbador no representa un peligro para todas las localidades, esto se debe principalmente al relieve de la subcuenca y la distancia que existe entre el poblado y el río La Antigua, es decir, la probabilidad de que ocurra un fenómeno o evento potencialmente dañino para una población no depende únicamente del comportamiento hidráulico del cauce.

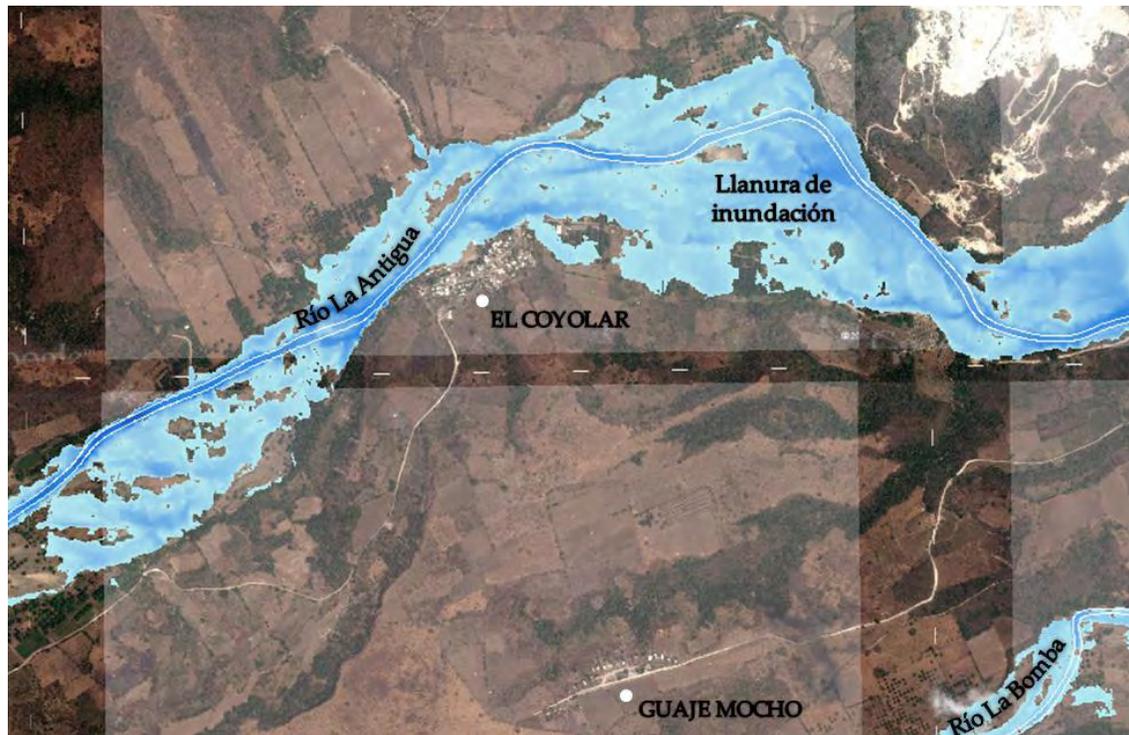


Figura 74. Factor perturbador y peligro en un tramo del río La Antigua.

De las 96 localidades que existen en la subcuenca RH28Be, solo para 23 de ellas representa un peligro el desbordamiento del río La Antigua (Cuadro 36), fenómeno representado por el nivel o tirantes que el agua alcanzó en las secciones transversales durante la simulación hidráulica.

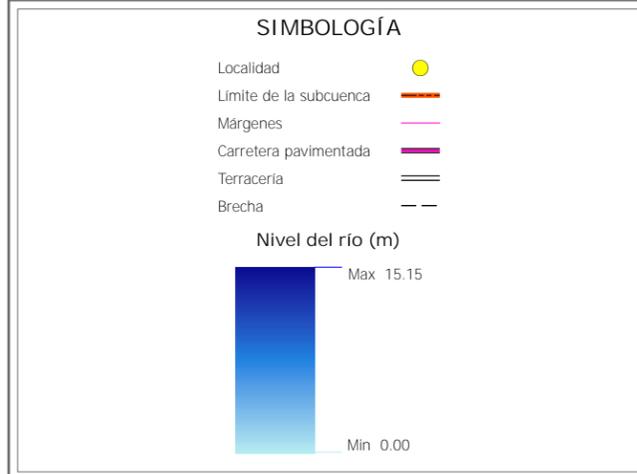
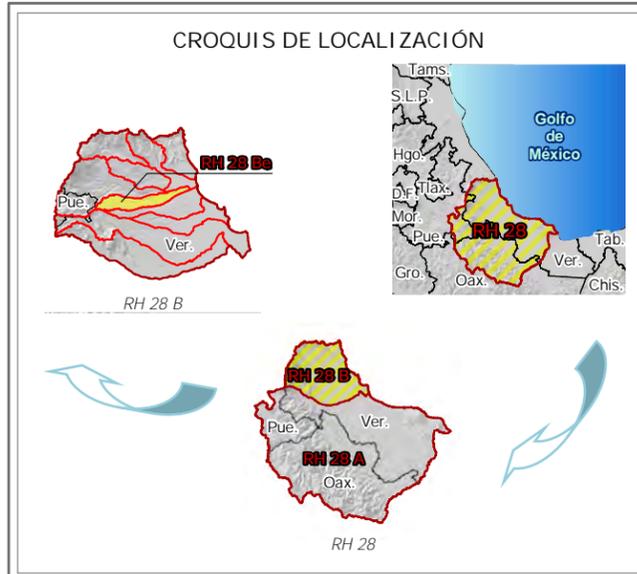
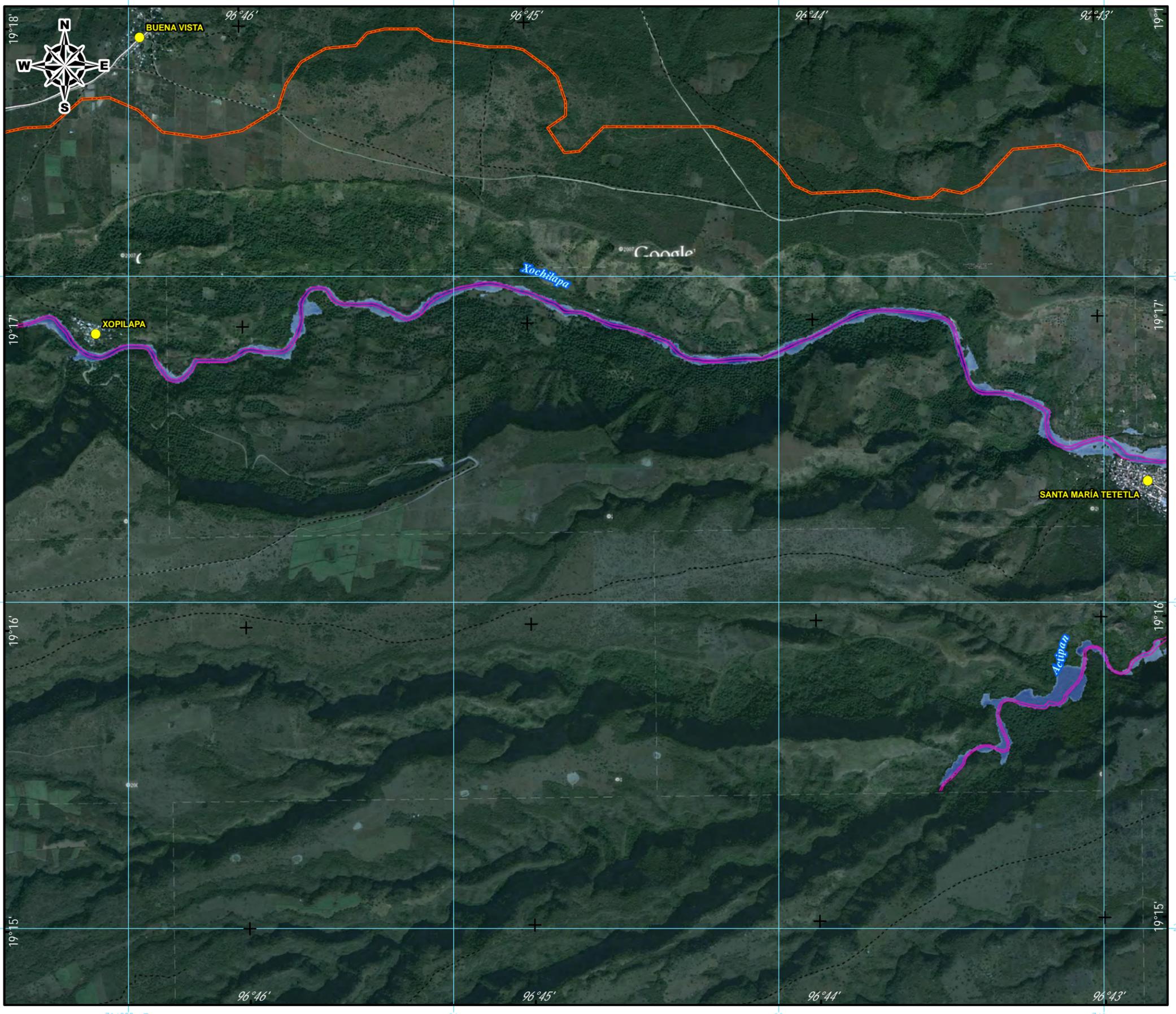
Cuadro 36. Localidades para las que representa un peligro el desbordamiento del río La Antigua.

No.	Localidad	Municipio	Población Total	Latitud	Longitud
1	Santa María Tatetla	Jalcomulco	1,777	19.273	-96.712
2	José Cardel y Cabezas	La Antigua	24,846	19.373	-96.376
3	Salmoral	La Antigua	753	19.344	-96.354
4	El Manguito	Paso de Ovejas	173	19.356	-96.379
5	Mata Grande	Paso de Ovejas	345	19.347	-96.393
6	Salmoral parte del Sur	Paso de Ovejas	1,161	19.341	-96.356



No.	Localidad	Municipio	Población Total	Latitud	Longitud
7	Yucatán	Paso de Ovejas	543	19.344	-96.361
8	Juan Yobal Zerna	Puente Nacional	4	19.289	-96.607
9	Los Cuates	Puente Nacional	4	19.279	-96.630
10	San José de Enmedio	Puente Nacional	6	19.299	-96.575
11	San José de La Azud	Puente Nacional	9	19.300	-96.582
12	Santo Niño de Atocha	Puente Nacional	5	19.304	-96.570
13	Tomas Vallejo	Puente Nacional	3	19.288	96.590
14	Colalco	Puente Nacional	9	19.330	96.502
15	El Cedro	Puente Nacional	71	19.303	-96.566
16	Puente Nacional	Puente Nacional	347	19.323	-96.484
17	Chichicaxtla	Puente Nacional	1,910	19.343	-96.468
18	El Coyolar	Puente Nacional	390	19.290	-96.614
19	El Cuajilote	Puente Nacional	258	19.304	-96.579
20	San José Chipila	Puente Nacional	402	19.296	-96.591
21	Paso de la Cruz	Puente Nacional	7	19.352	-96.394
22	Paso Marino	Puente Nacional	388	19.327	-96.461
23	Xopilapa	Tenampa	357	19.283	-96.775

Los Mapas 26 al 33 muestran al factor perturbador o llanura de inundación que afecta 23 localidades de la subcuenca RH28Be, y donde según el Censo de Población y Vivienda 2010 (INEGI, 2011), habitan en total 33,768 personas.



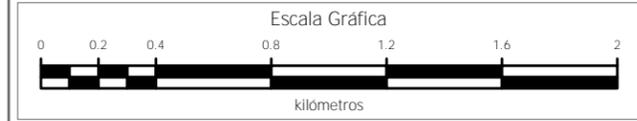
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

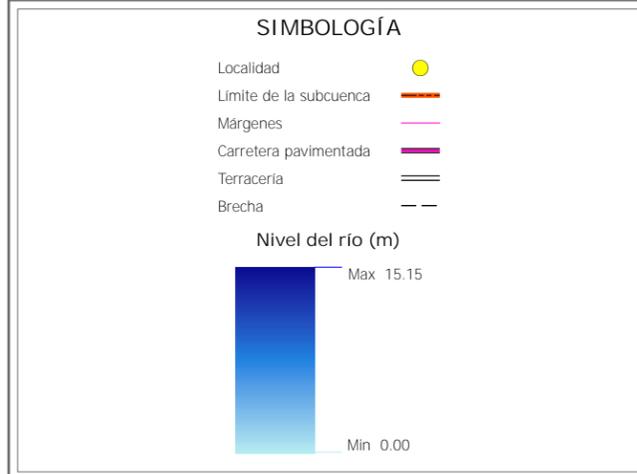
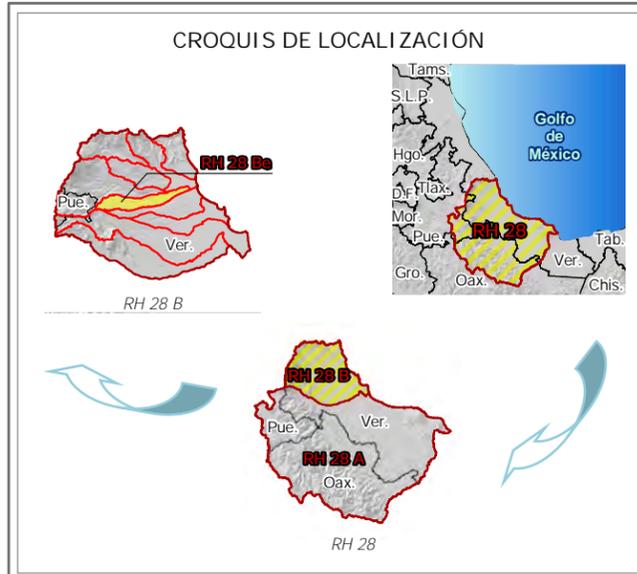
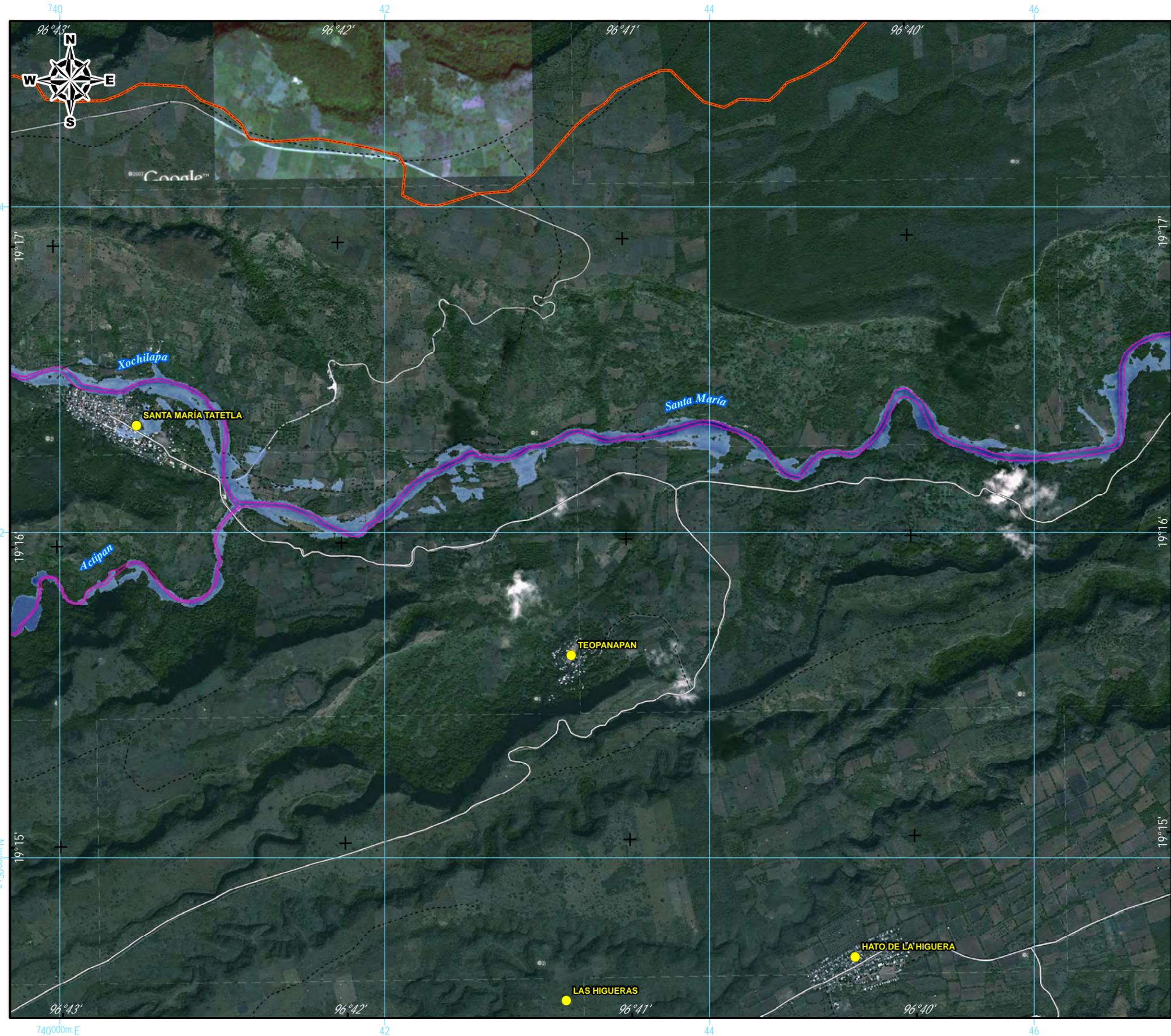
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN ASOCIADA A LAS PRECIPITACIONES DEL HURACÁN KARL

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





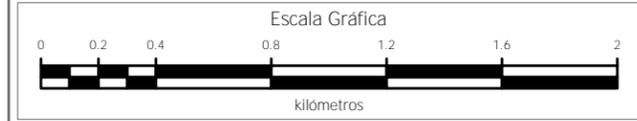
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

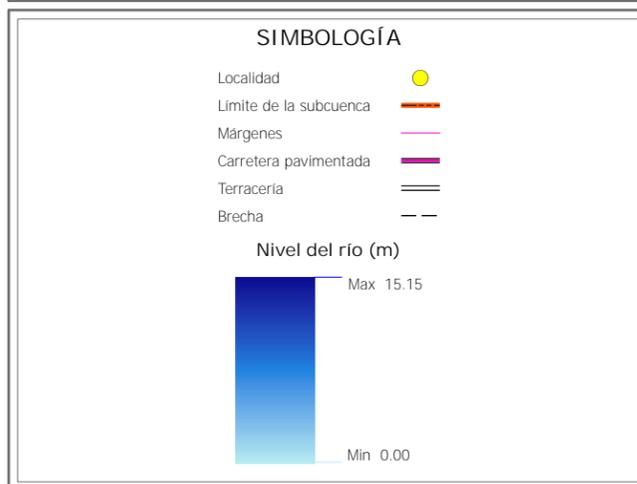
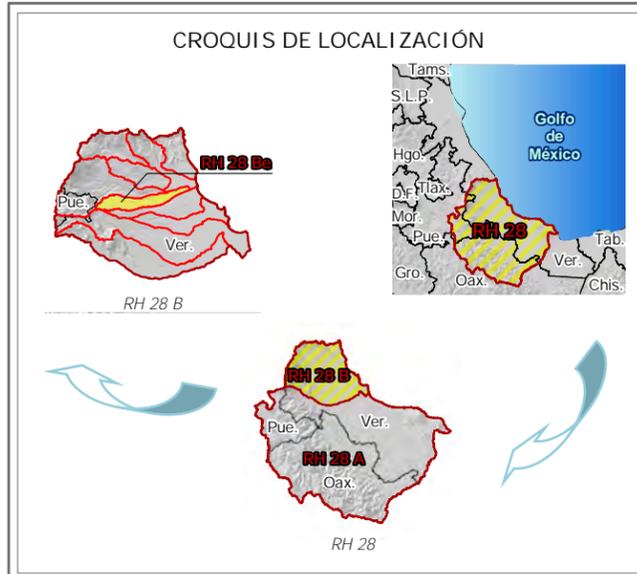
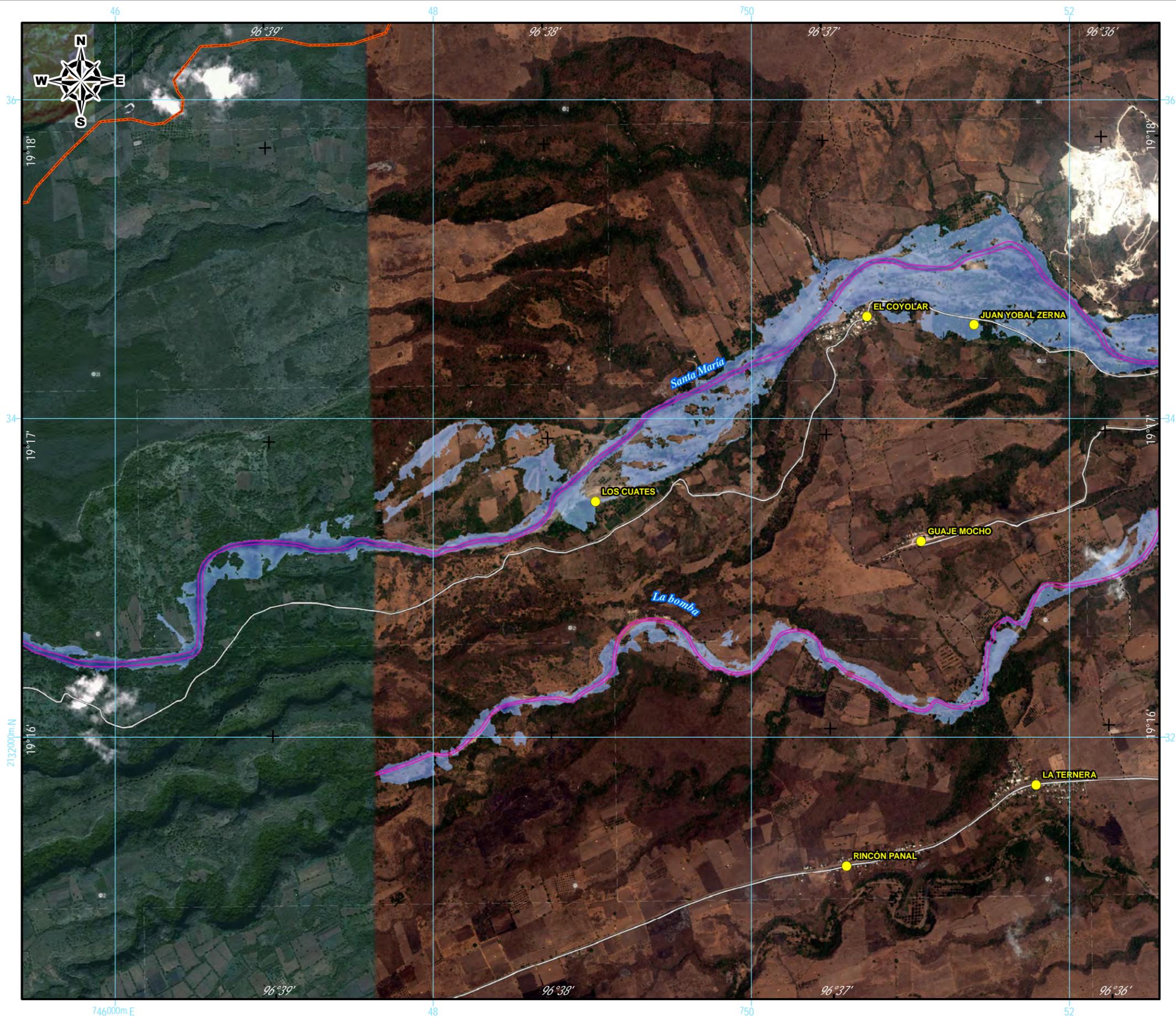
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN ASOCIADA A LAS PRECIPITACIONES DEL HURACÁN KARL

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





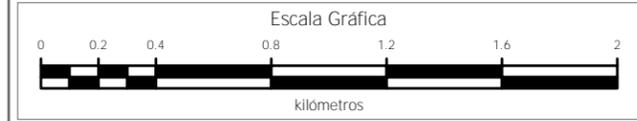
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

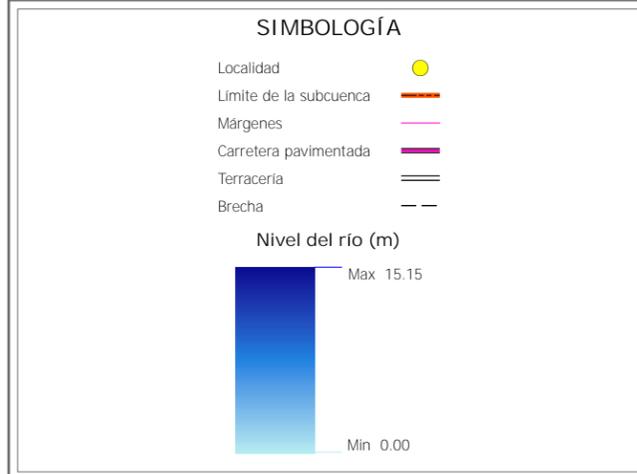
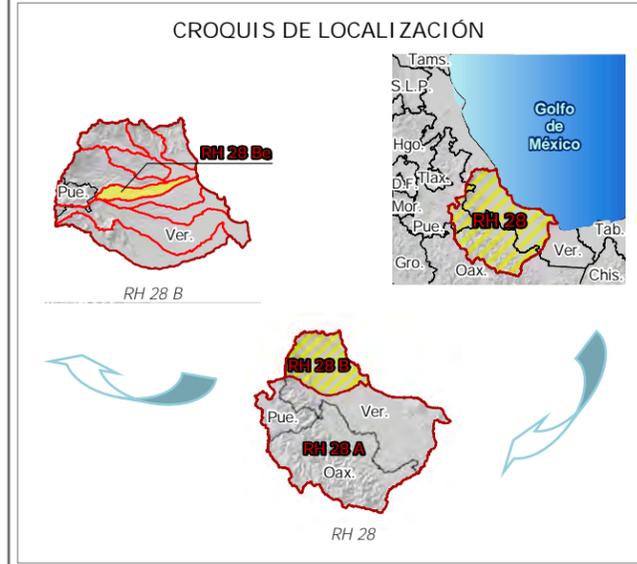
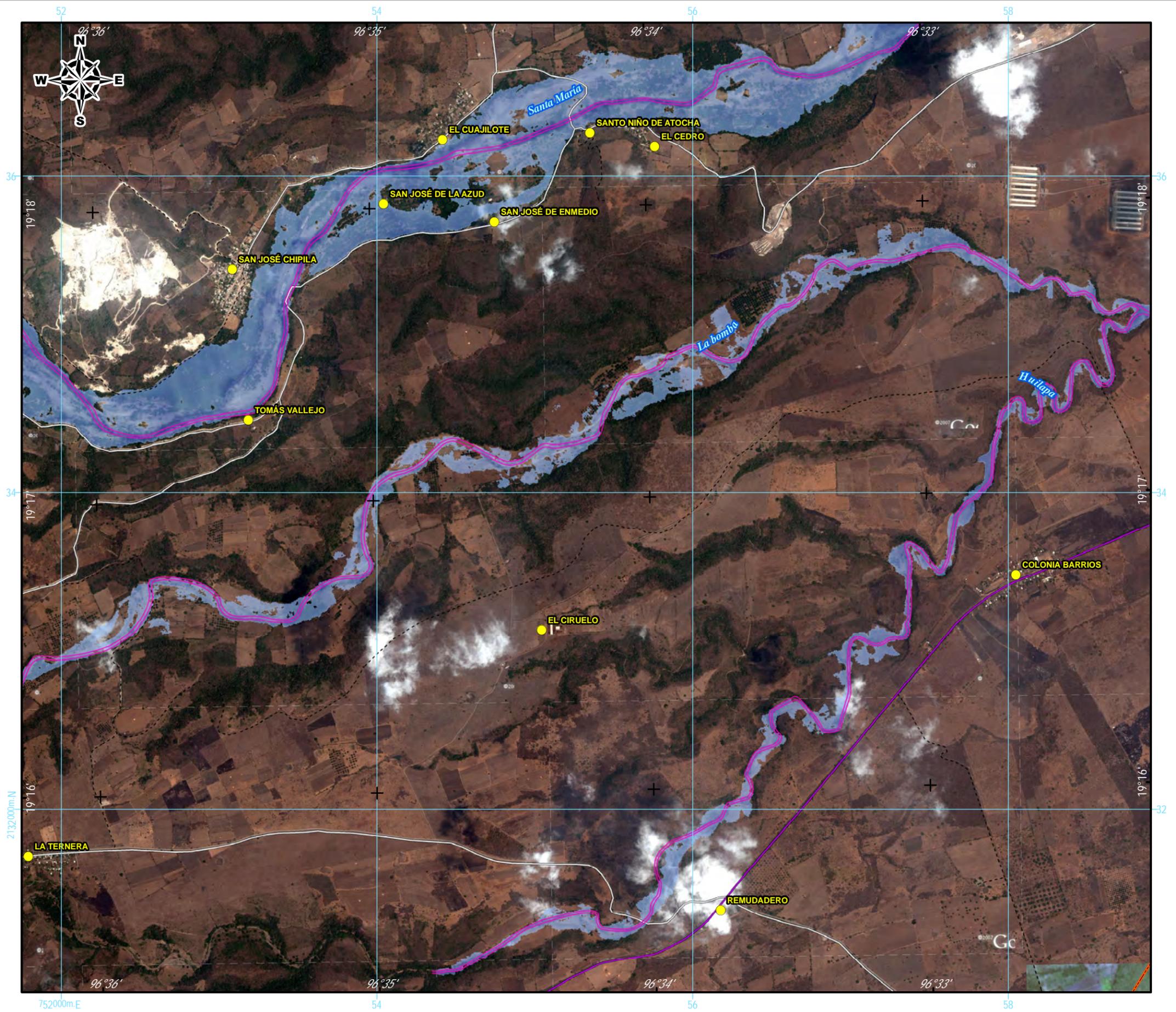
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN ASOCIADA A LAS PRECIPITACIONES DEL HURACÁN KARL

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

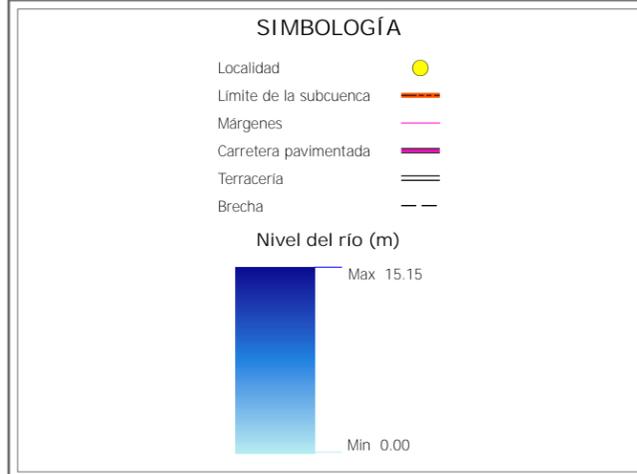
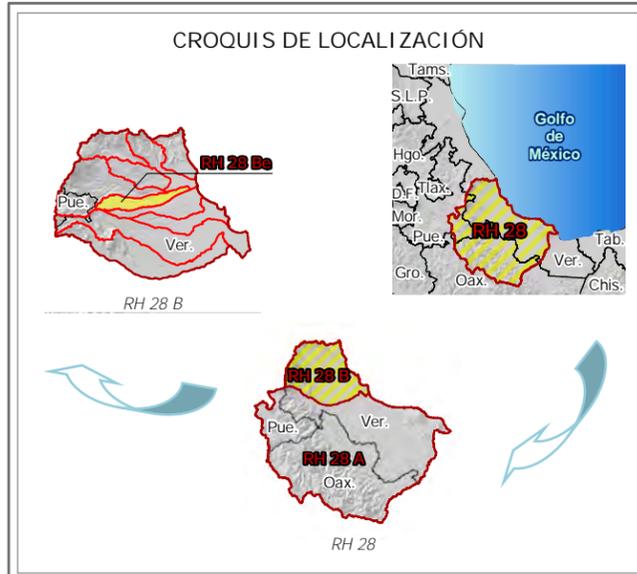
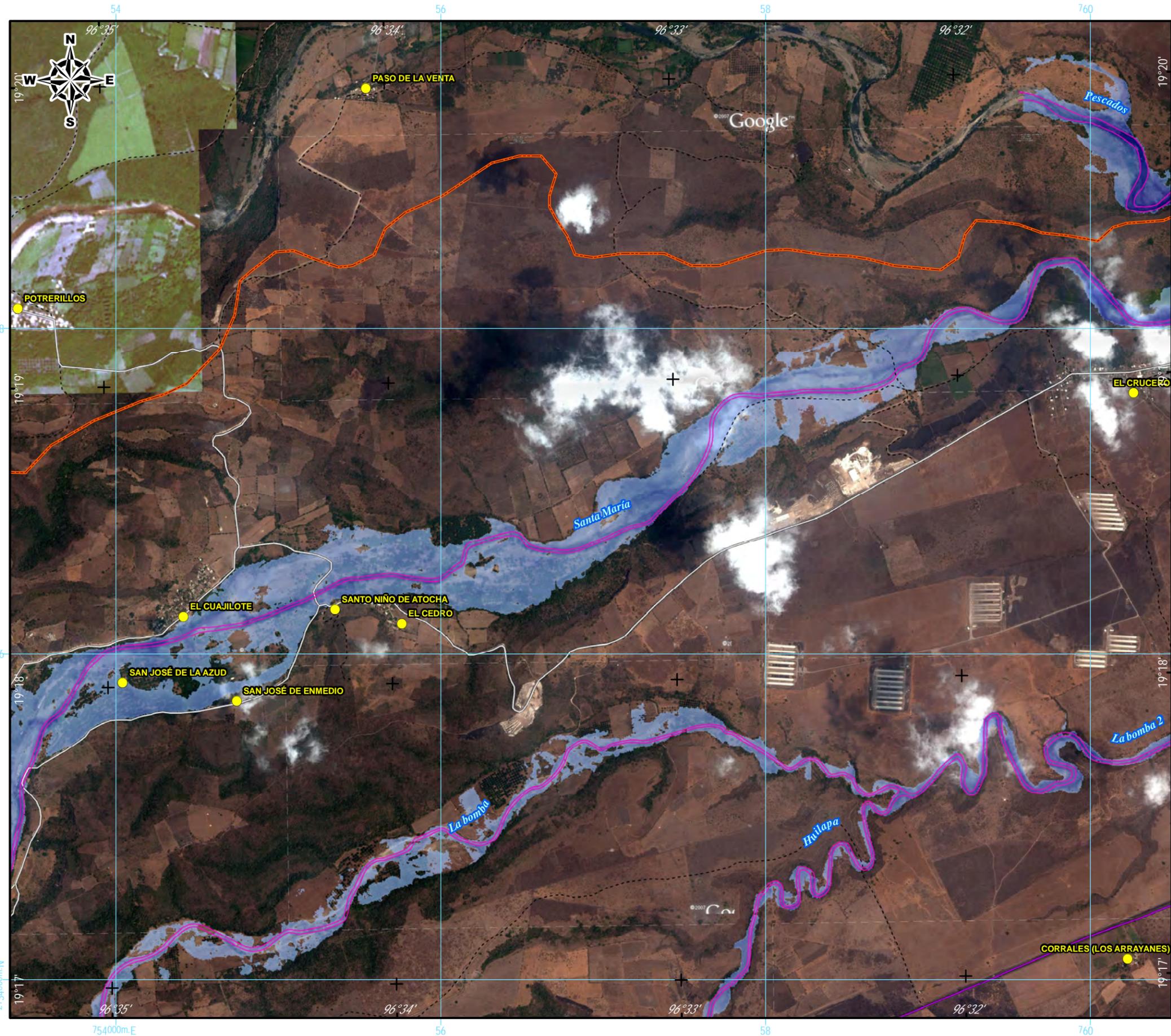
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN ASOCIADA A LAS PRECIPITACIONES DEL HURACÁN KARL

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





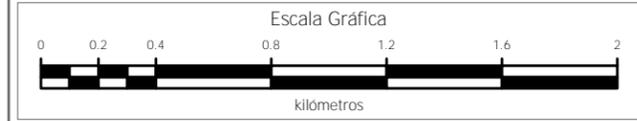
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

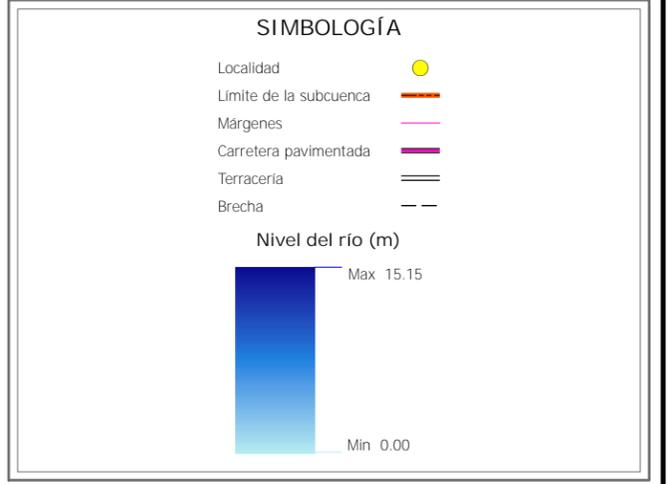
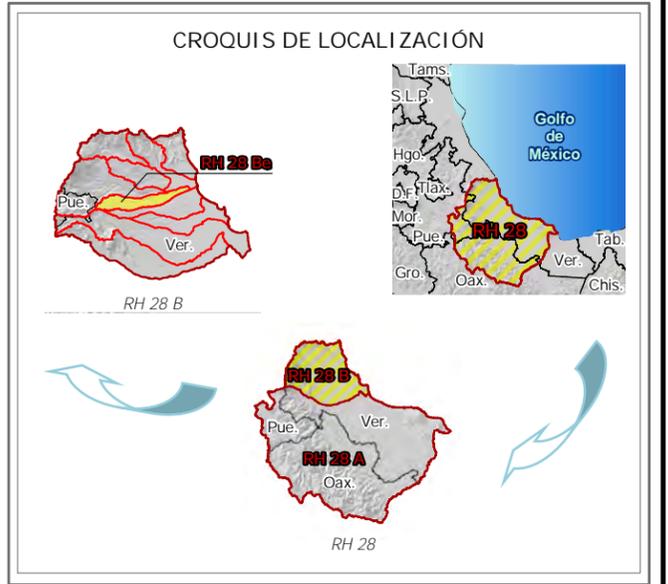
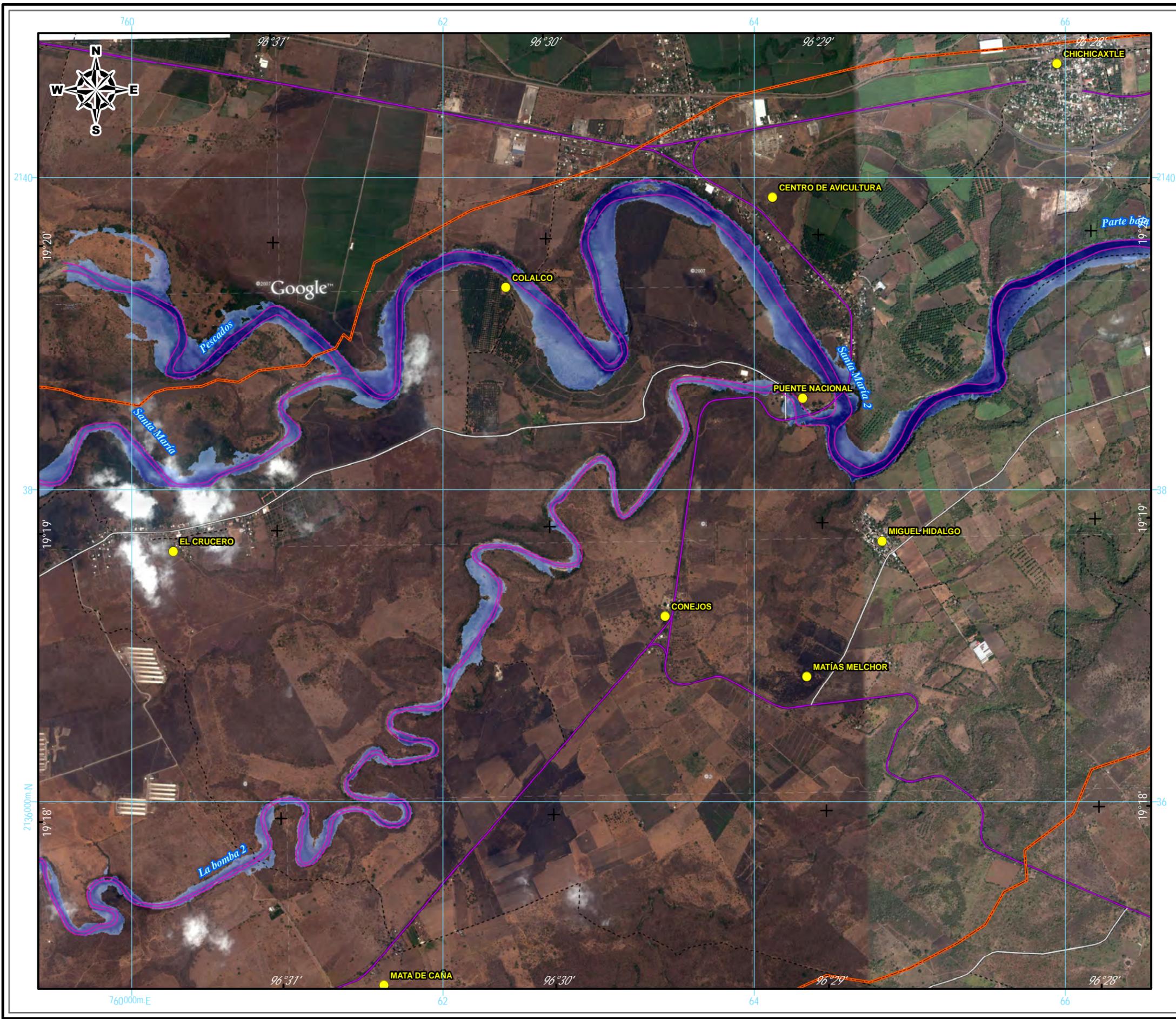
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN ASOCIADA A LAS PRECIPITACIONES DEL HURACÁN KARL

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

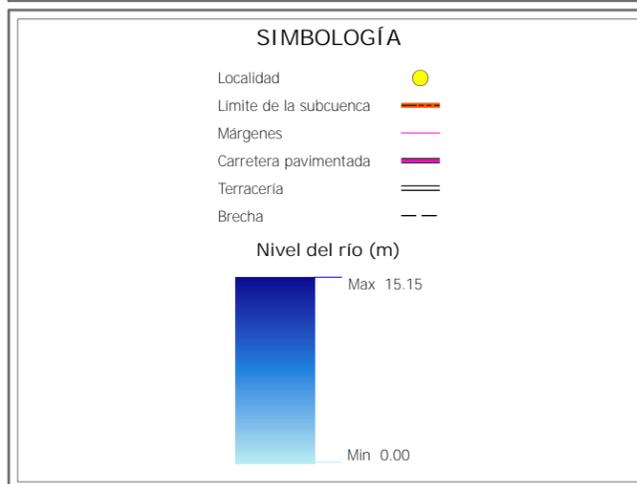
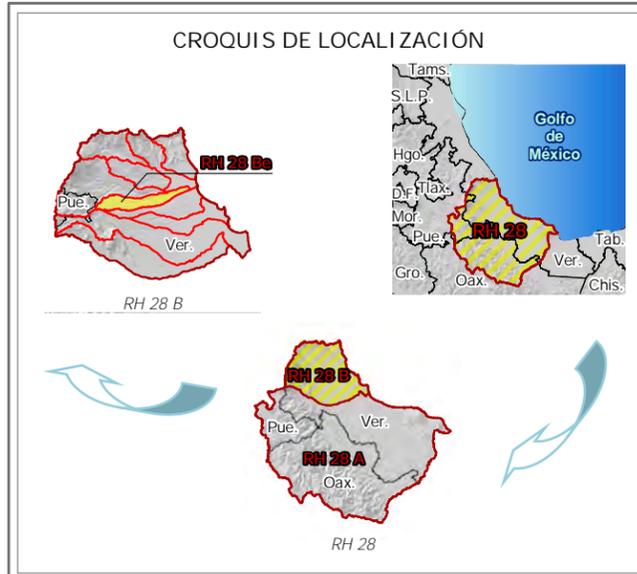
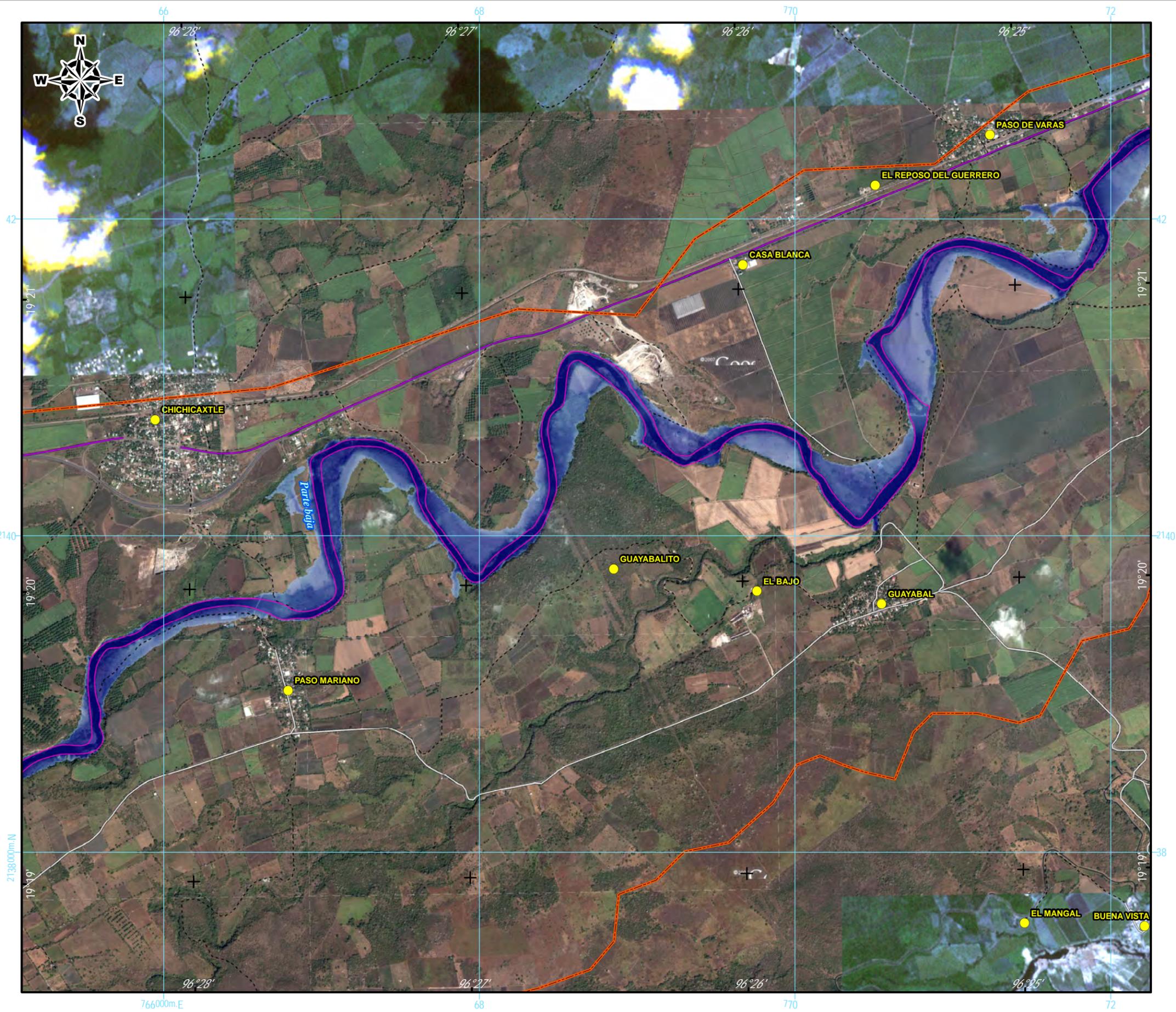
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN ASOCIADA A LAS PRECIPITACIONES DEL HURACÁN KARL

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

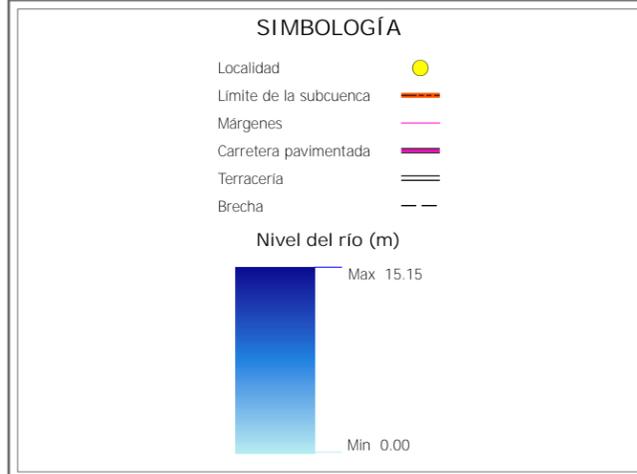
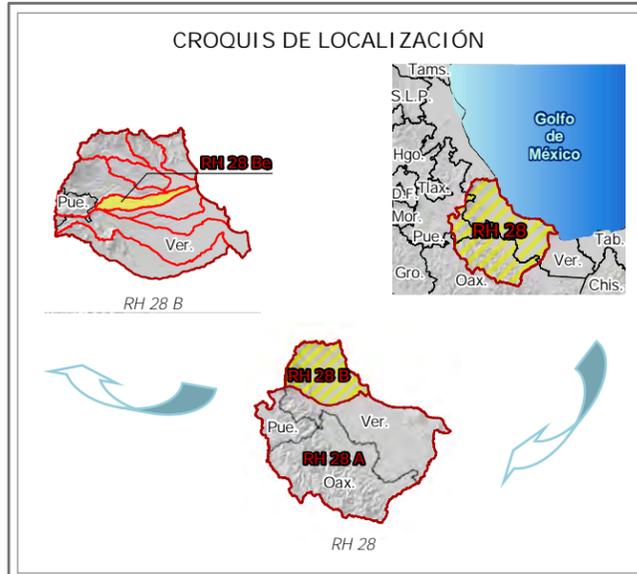
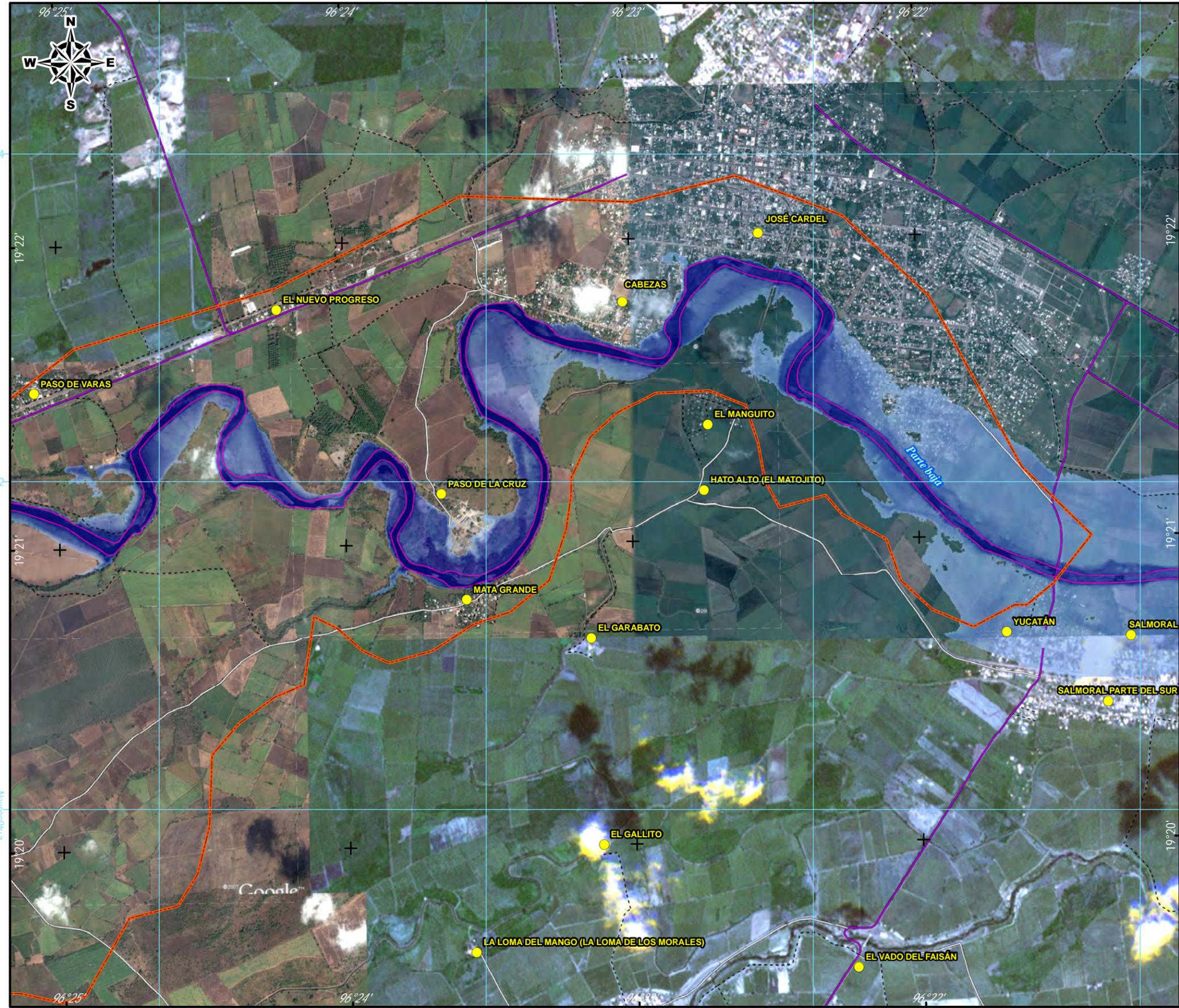
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN ASOCIADA A LAS PRECIPITACIONES DEL HURACÁN KARL

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI



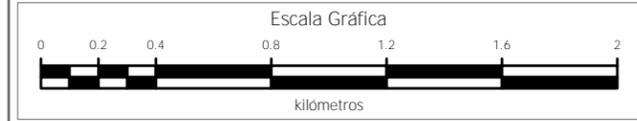


INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ
ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN ASOCIADA A LAS PRECIPITACIONES DEL HURACÁN KARL

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





9.4.2. Identificación de la vulnerabilidad física ante inundaciones

Cardona (2001) define vulnerabilidad como la susceptibilidad o propensión de los sistemas expuestos a ser afectados por un fenómeno perturbador.

Según Cardona (2011) la vulnerabilidad física corresponde al análisis de las viviendas para conocer qué tan susceptibles son a una inundación. El análisis se hizo con base en la tipología de las viviendas a nivel localidad; una vivienda es más vulnerable si los materiales de construcción son de baja resistencia como adobe, cartón o lámina; y será menos vulnerable si está hecha de cemento, ladrillo o tabique (materiales de mayor resistencia). La información referente al tipo de material utilizado para su construcción se extrajo del Censo de Población y Vivienda 2010.

El índice de vulnerabilidad se determinó solo para las localidades que representa un peligro el desbordamiento del río La Antigua y sus afluentes (como resultado de la simulación hidráulica). De esta forma se obtuvo que 11 localidades, donde habitan 988, personas tienen un índice de vulnerabilidad Alto y Muy Alto; cinco localidades, donde habitan 4,737 personas, tienen un índice de vulnerabilidad Medio; y siete localidades, donde habitan 28,043, personas tienen un índice de vulnerabilidad Bajo y Muy Bajo (Cuadro 37).

Cuadro 37. Índice de vulnerabilidad según el tipo de vivienda en la Subcuenca RH28Be.

Índice de vulnerabilidad	Localidad
Muy Alto	Juan Yobal Zerna
Muy Alto	Los Cuates
Muy Alto	San José de Enmedio
Muy Alto	San José de La Azud
Muy Alto	Santo Niño de Atocha
Muy Alto	Tomas Vallejo
Alto	El Manguito



Índice de vulnerabilidad	Localidad
Alto	Colalco
Alto	El Cedro
Alto	Puente Nacional
Alto	Xopilapa
Medio	Chichicaxtla
Medio	Santa María Tatetla
Medio	El Coyolar
Medio	El Cuajilote
Medio	San José Chipila
Bajo	Paso de la Cruz
Bajo	Mata Grande
Bajo	Paso Marino
Muy Bajo	Salmoral parte del Sur
Muy Bajo	Yucatán
Muy Bajo	José Cardel y Cabezas
Muy Bajo	Salmoral

9.4.3. Cartografía de Riesgo a Inundación

La elaboración de los mapas de riesgo por inundación se apoya en los mapas de peligro y la vulnerabilidad, dado que con la combinación de éstas variables determina el riesgo. La base conceptual para elaborar el mapa de riesgo a inundación se describe con más detalle en CENAPRED (2011); sin embargo, se describe a continuación brevemente el fundamento de la cartografía de riesgo, que está dada por la expresión:

$$R = C V P \quad (1)$$

donde:

R = riesgo

C = es el valor de los bienes expuestos

V = es el porcentaje de daños de una vivienda por efecto de una inundación, o vulnerabilidad



P = es la probabilidad de que ocurra un hecho potencialmente dañino, o peligro.

Adicionalmente se consideraron los siguientes parámetros para delimitar con mayor detalle las zonas con riesgo a inundación:

- a) Riesgo Alto, es toda zona cuyo tirante es > 1 m y la velocidad es > 1 m/s
- b) b) Riesgo Medio, es la zona cuyo tirante está comprendido entre 0.4 y 1 m y la velocidad fluctúa entre 0.4 y 1 m/s
- c) c) Riesgo Bajo, es la zona cuyo tirante es < 0.4 m y la velocidad es < 0.4 m/s

Con base en los criterios anteriores, se abstuvo que nueve localidades, donde habitan 4,604 personas, poseen un nivel de riesgo Alto; ocho localidades donde habitan 3,193 personas poseen un nivel Medio; y seis localidades donde habitan 10,699 personas poseen un nivel Bajo. Estos datos indican que el 30% de la población que habita en la subcuenca RH28Be, radica en una zona con riesgo a inundación.

El Cuadro 38 enlista las localidades que se encuentran bajo algún nivel de riesgo de acuerdo a la modelación hidráulica del río La Antigua y sus afluentes.

Cuadro 38. Localidades de la subcuenca RH28Be bajo algún nivel de riesgo.

No.	Localidad	Nivel de Riesgo
1	José Cardel	Alto
2	Juan Yobal Zerna	Alto
3	Los Cuates	Alto
4	Puente Nacional	Alto
5	Salmoral	Alto
6	Salmoral parte del Sur	Alto
7	San José de Enmedio	Alto
8	San José de La Azud	Alto
9	Yucatán	Alto



No.	Localidad	Nivel de Riesgo
10	Colalco	Medio
11	El Coyolar	Medio
12	El Cuajilote	Medio
13	Mata Grande	Medio
14	Paso de la Cruz	Medio
15	San José Chipila	Medio
16	Santa María Tatetla	Medio
17	Santo Niño de Atocha	Medio
18	Chichicaxtle	Bajo
19	El Cedro	Bajo
20	El Manguito	Bajo
21	Paso Marino	Bajo
22	Tomas Vallejo	Bajo
23	Xopilapa	Bajo

La modelación permitió simular el desbordamiento de los afluentes que integran la red hidrológica de RH28Be provocado por las lluvias asociadas al huracán Karl, sin embargo, no todos los sitios afectados representan un riesgo directo para los habitantes de las 23 localidades, debido a que cinco de los nueve tramos simulados impactan únicamente zonas agrícolas, pastizales o relictos de bosque y selva (los tramos contenidos en las URH II, III, IV, V y VII). Este hecho no debe exceptuar la atención de dichas zonas, pues según los reportes de Valdez y Arreola (2011) en Veracruz (a causa del huracán Karl) se perdió casi 100% de las cosechas en cultivos como la papaya y el maíz, lo que en términos monetarios representó más de 100 mdp, y en el sector pecuario se perdieron más de 1,200 cabezas de ganado bovino, 11,000 cerdos y 20,000 aves.

Por otro lado, las URH I, VI, VIII y IX adquieren mayor importancia social, en ellas se localiza el 100% de las localidades con algún nivel de riesgo por inundación.



Los reportes de Armenta *et al.* (2011) mencionan que el huracán dejó un saldo aproximado de 500 mil damnificados y daños estimado en 70 mil mdp.

La frecuencia o recurrencia de inundaciones depende de la frecuencia de precipitaciones excepcionalmente fuertes. Un estudio realizado por la CONAGUA (2011a) indica que el gasto generado por las lluvias del huracán Karl tiene un periodo de retorno de 500 años, lo cual según Ahmed (2008) su frecuencia sitúa a la mayoría de las localidades (de RH28Be) en un nivel bajo de amenaza. Esta forma de evaluación comúnmente se usa en países como Australia, Estados Unidos y Suiza; en el presente trabajo se utilizó la metodología del CENAPRED (2011) que aplica como criterios fundamentales el peligro y la vulnerabilidad.

La Figura 75 representa un Mapa de Riesgo por Inundación correspondiente a la Parte baja del río La Antigua (URH IX), donde se aprecia que las localidades más cercanas al río La Antigua y cuyas viviendas en su mayoría son de materiales de baja resistencia, son las de mayor riesgo. Por el contrario, las localidades más alejadas al río y cuyas viviendas son de materiales resistentes, se clasifican en localidades de bajo riesgo.

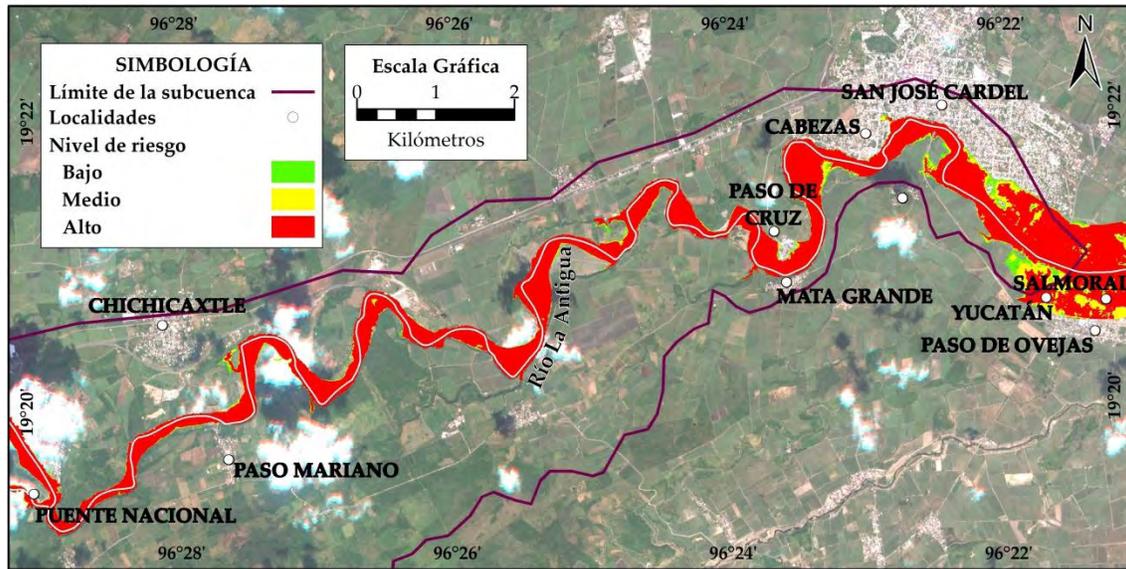
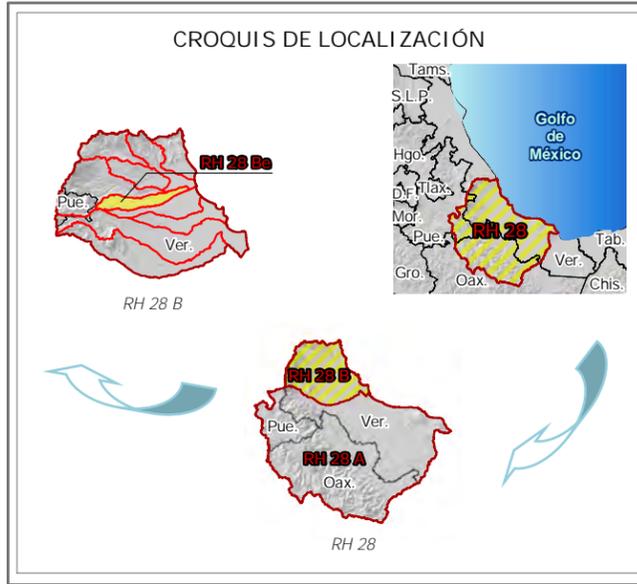
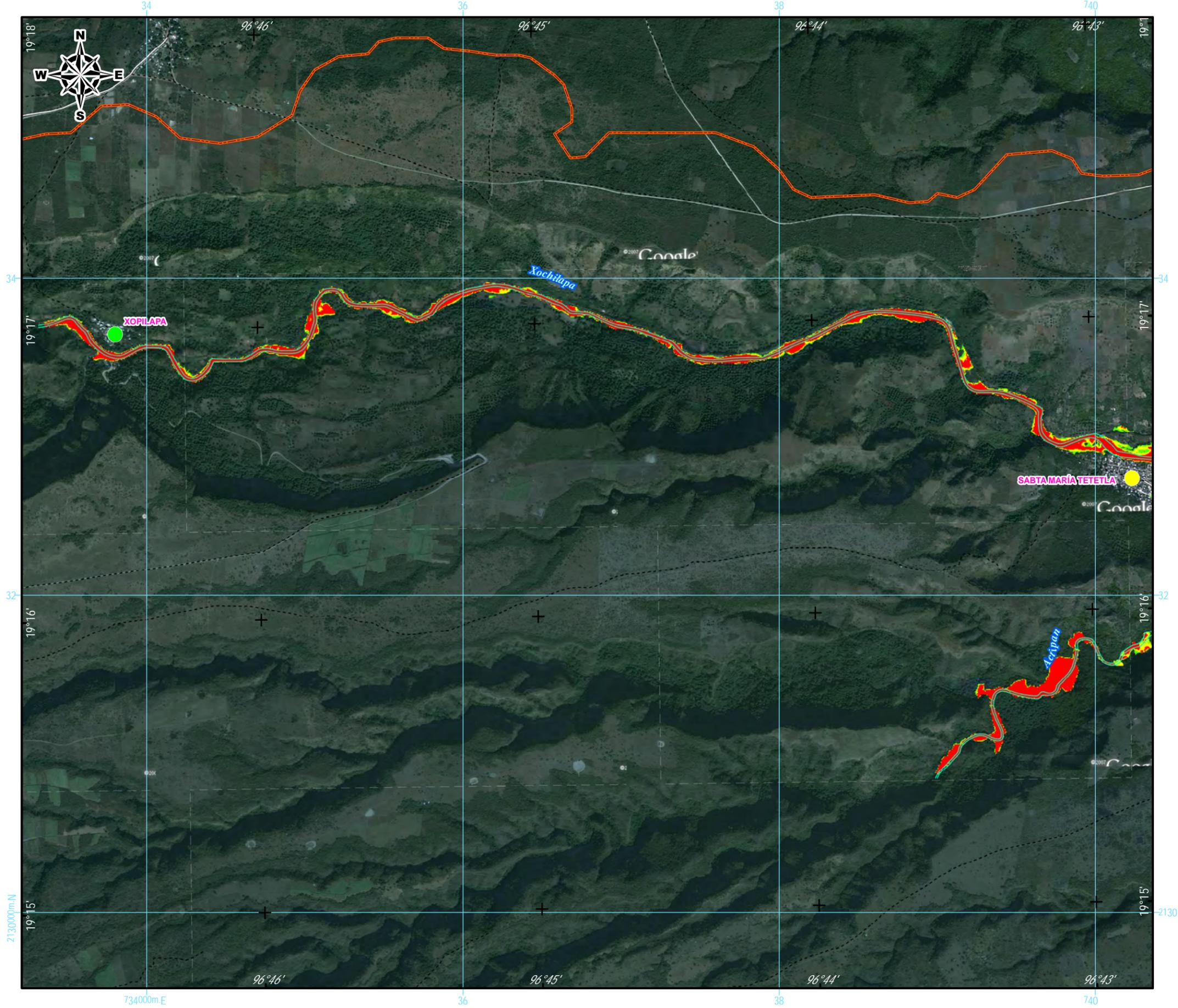


Figura 75. Mapas de Riesgo a Inundación correspondiente al tramo Parte baja (URH IX) de la RH28Be.

Los Mapas 34 al 41 ilustran el riesgo a inundación para las 23 localidades de la subcuenca RH28Be.



SIMBOLOGÍA

Limite de la subcuenca	
Limite de la URH	
Márgenes	
Vías de comunicación	
Carretera pavimentada	
Terracería	
Brecha	
Niveles de riesgo	
Alto	
Medio	
Bajo	

INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

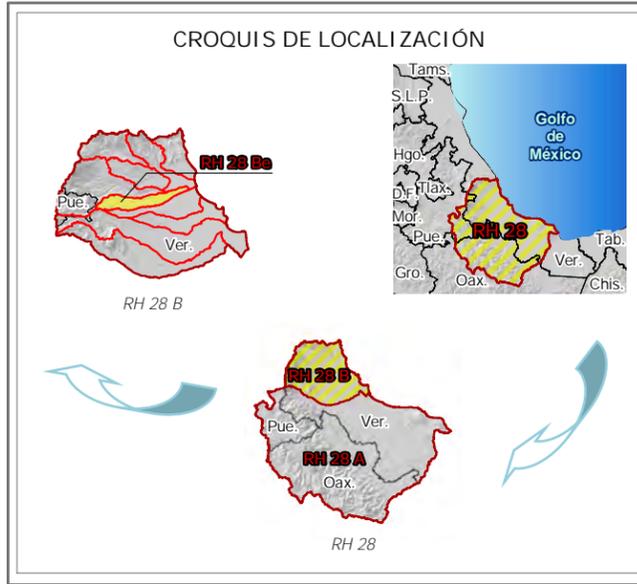
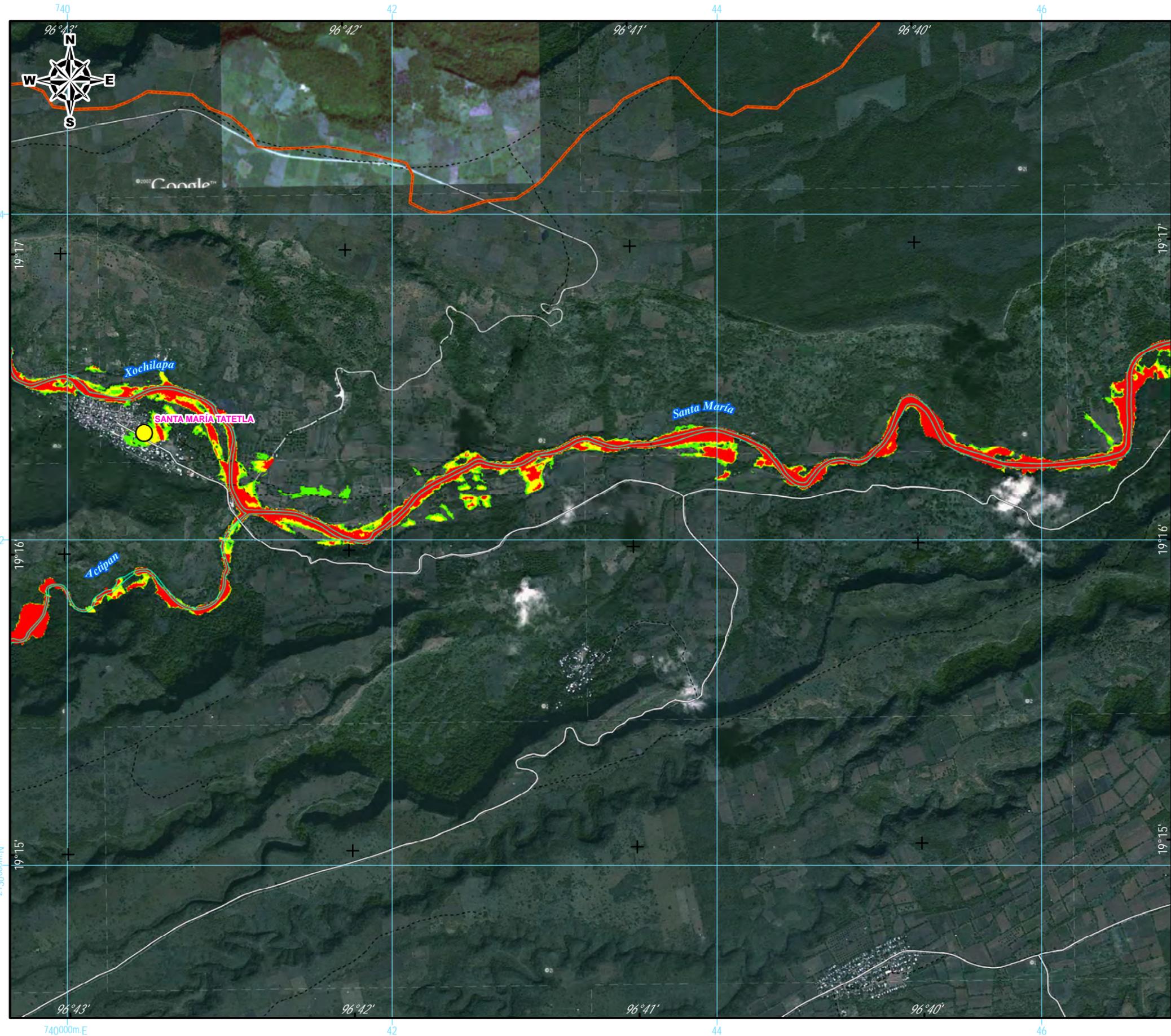
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

MAPA DE RIESGO POR INUNDACIÓN

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





SIMBOLOGÍA

Límite de la subcuenca	
Límite de la URH	
Márgenes	
Vías de comunicación	
Carretera pavimentada	
Terracería	
Brecha	
Niveles de riesgo	
Alto	
Medio	
Bajo	

INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

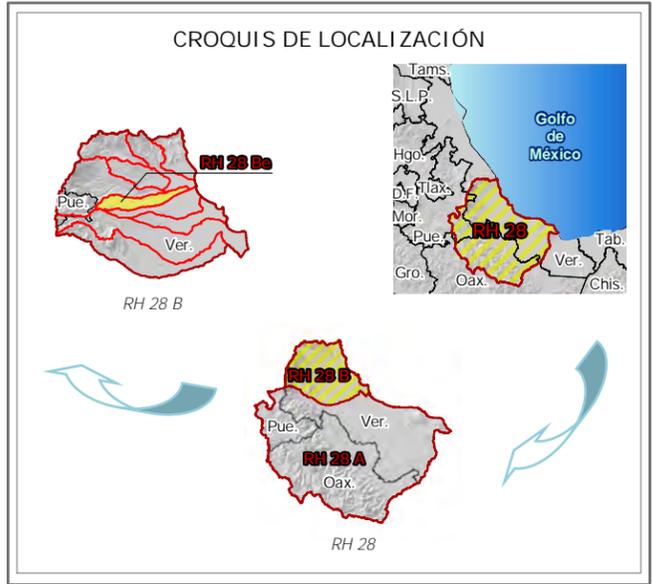
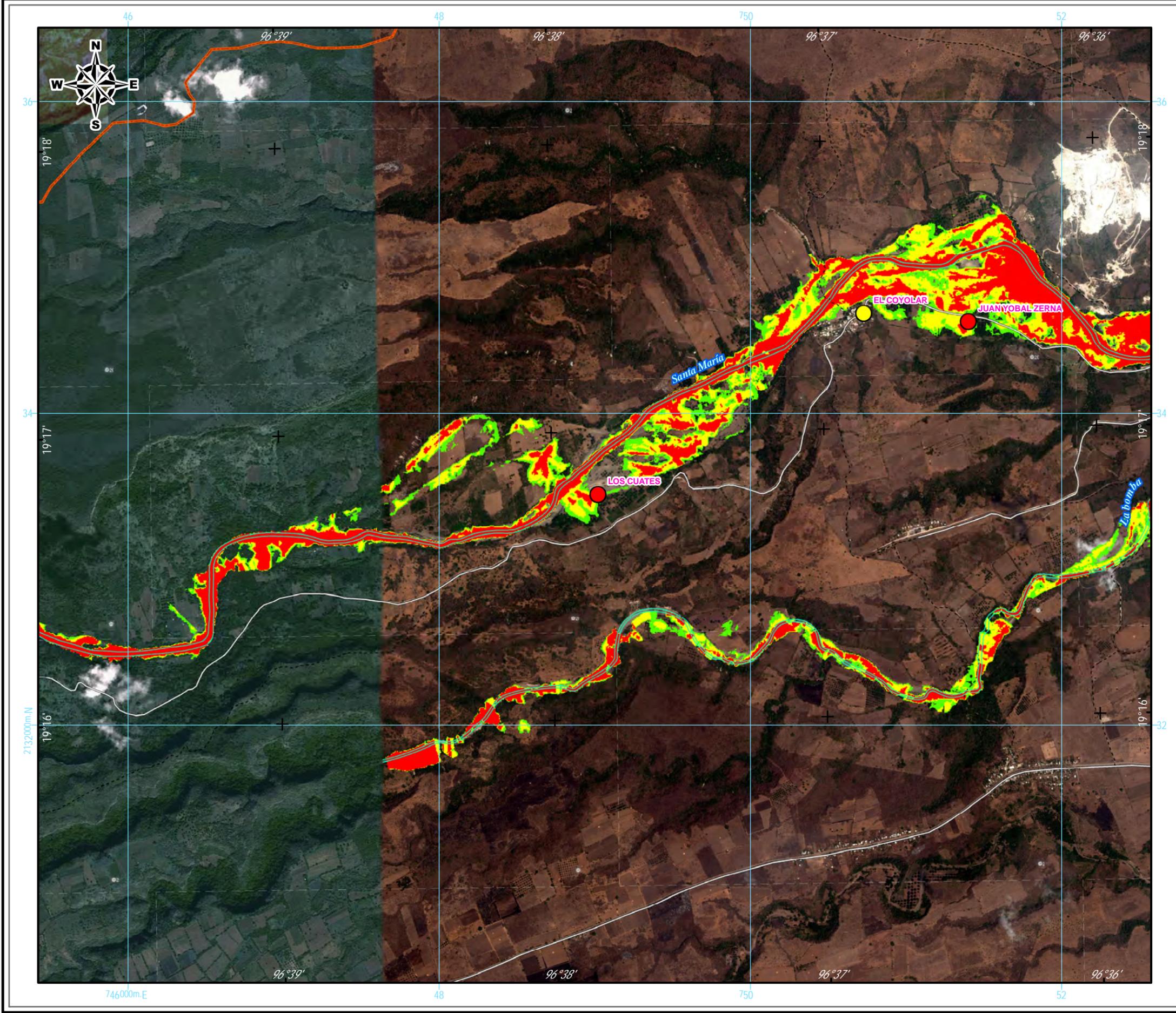
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

MAPA DE RIESGO POR INUNDACIÓN

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





SIMBOLOGÍA

Límite de la subcuenca	
Límite de la URH	
Márgenes	
Vías de comunicación	
Carretera pavimentada	
Terracería	
Brecha	
Niveles de riesgo	
Alto	
Medio	
Bajo	

INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección	Universal Transversa de Mercator (UTM)
Elipsoide	WGS1984
Datum Horizontal	WGS1984
Zona UTM	14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

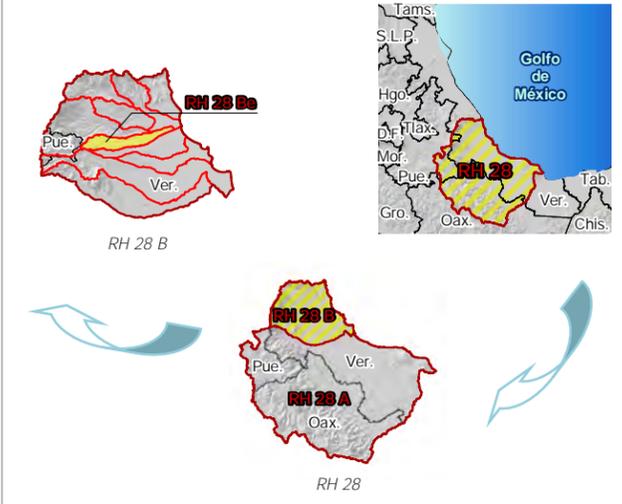
MAPA DE RIESGO POR INUNDACIÓN

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





CROQUIS DE LOCALIZACIÓN



SIMBOLOGÍA

- Límite de la subcuenca
- Límite de la URH
- Márgenes
- Vías de comunicación
- Carretera pavimentada
- Terracería
- Brecha
- Niveles de riesgo
- Alto
- Medio
- Bajo

INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

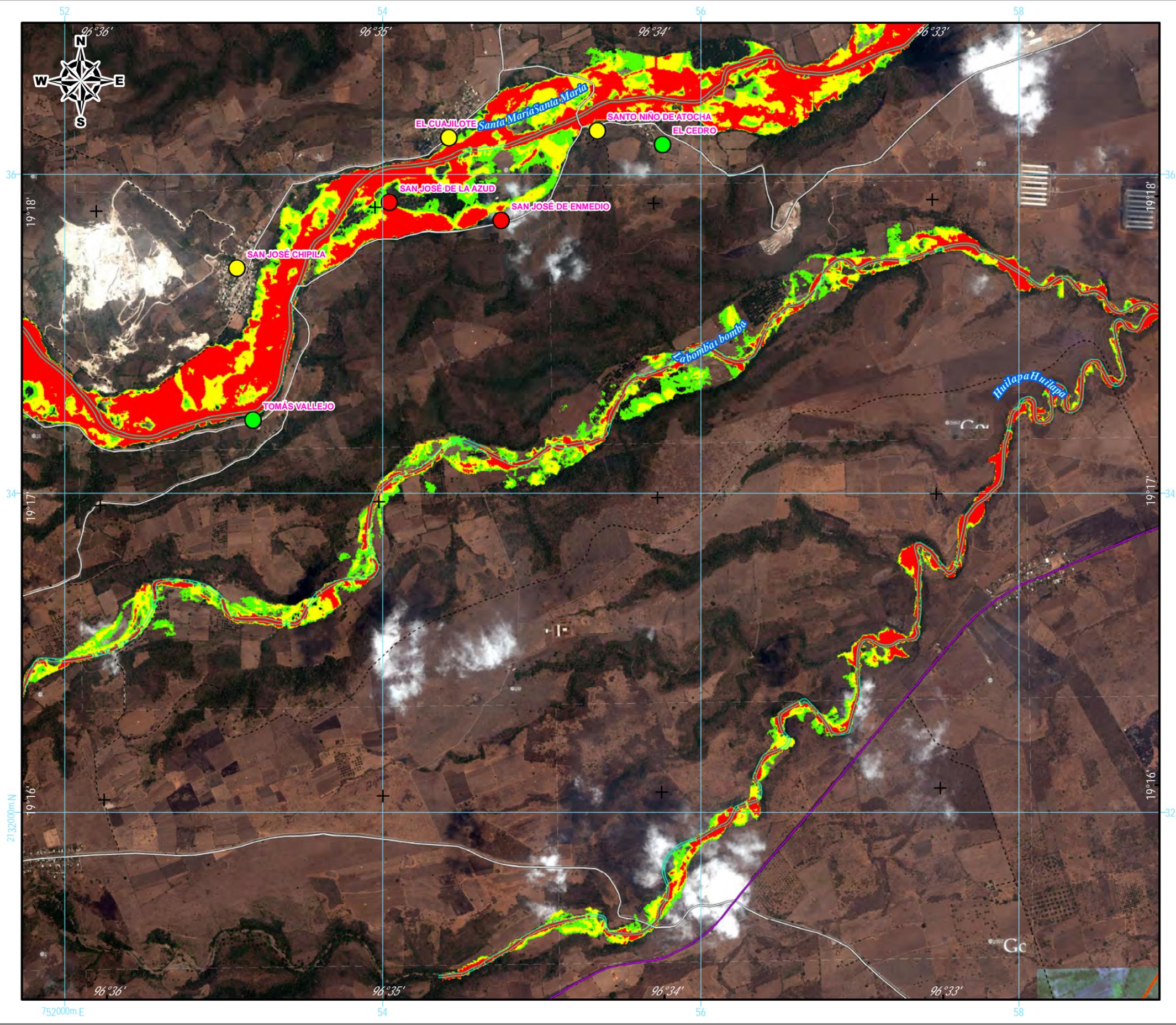
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

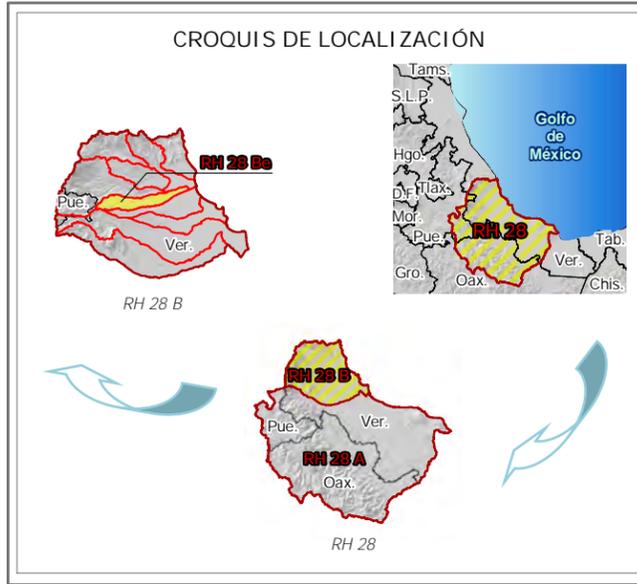
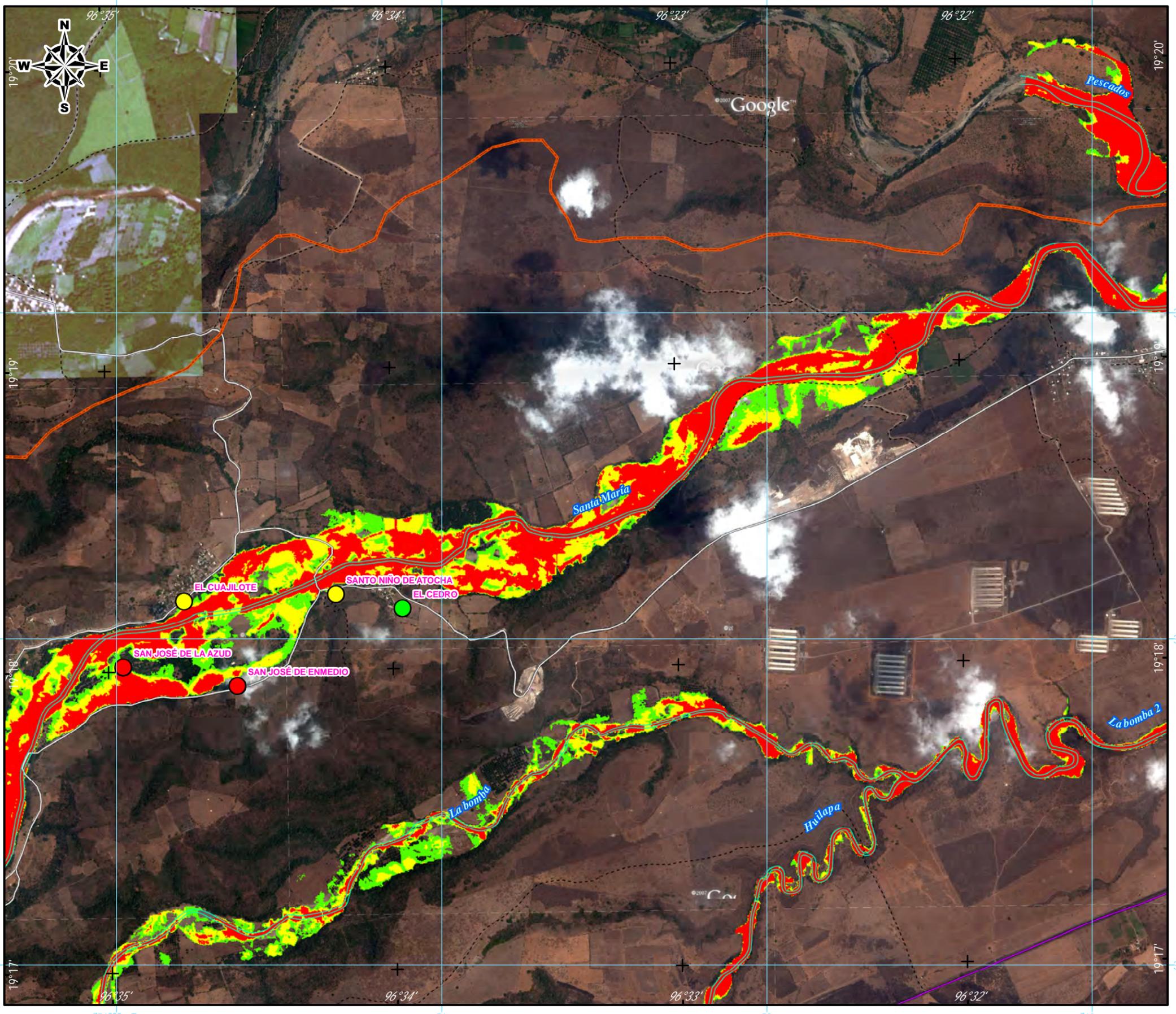
RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

MAPA DE RIESGO POR INUNDACIÓN

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI

Escala Gráfica





SIMBOLOGÍA

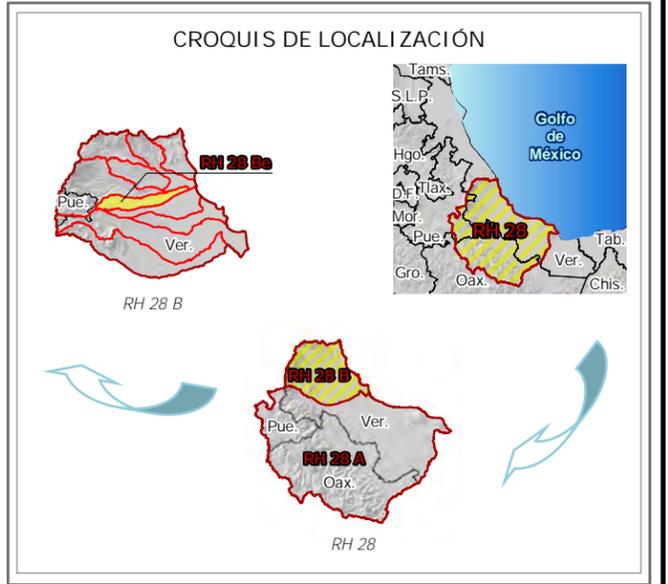
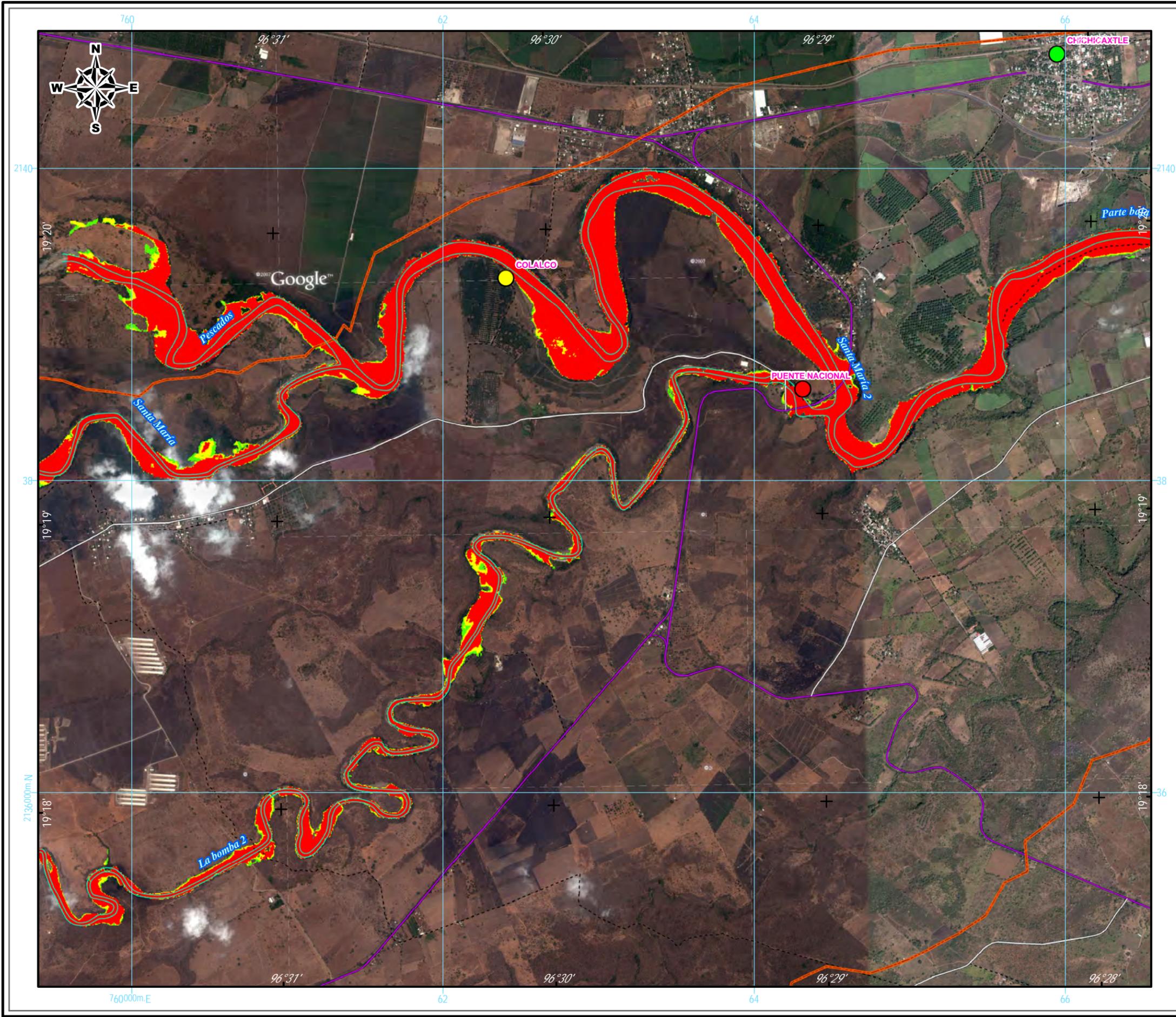
Límite de la subcuenca	
Límite de la URH	
Márgenes	
Vías de comunicación	
Carretera pavimentada	
Terracería	
Brecha	
Niveles de riesgo	
Alto	
Medio	
Bajo	

Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ
MAPA DE RIESGO POR INUNDACIÓN

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





SIMBOLOGÍA

Límite de la subcuenca	
Límite de la URH	
Márgenes	
Vías de comunicación	
Carretera pavimentada	
Terracería	
Brecha	
Niveles de riesgo	
Alto	
Medio	
Bajo	

INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

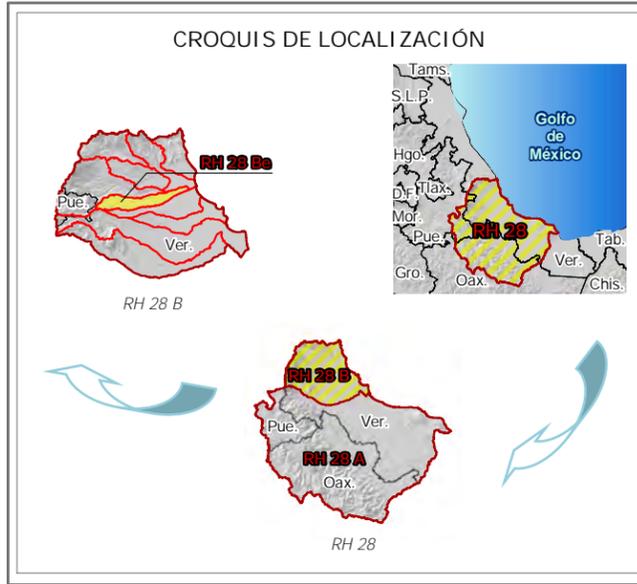
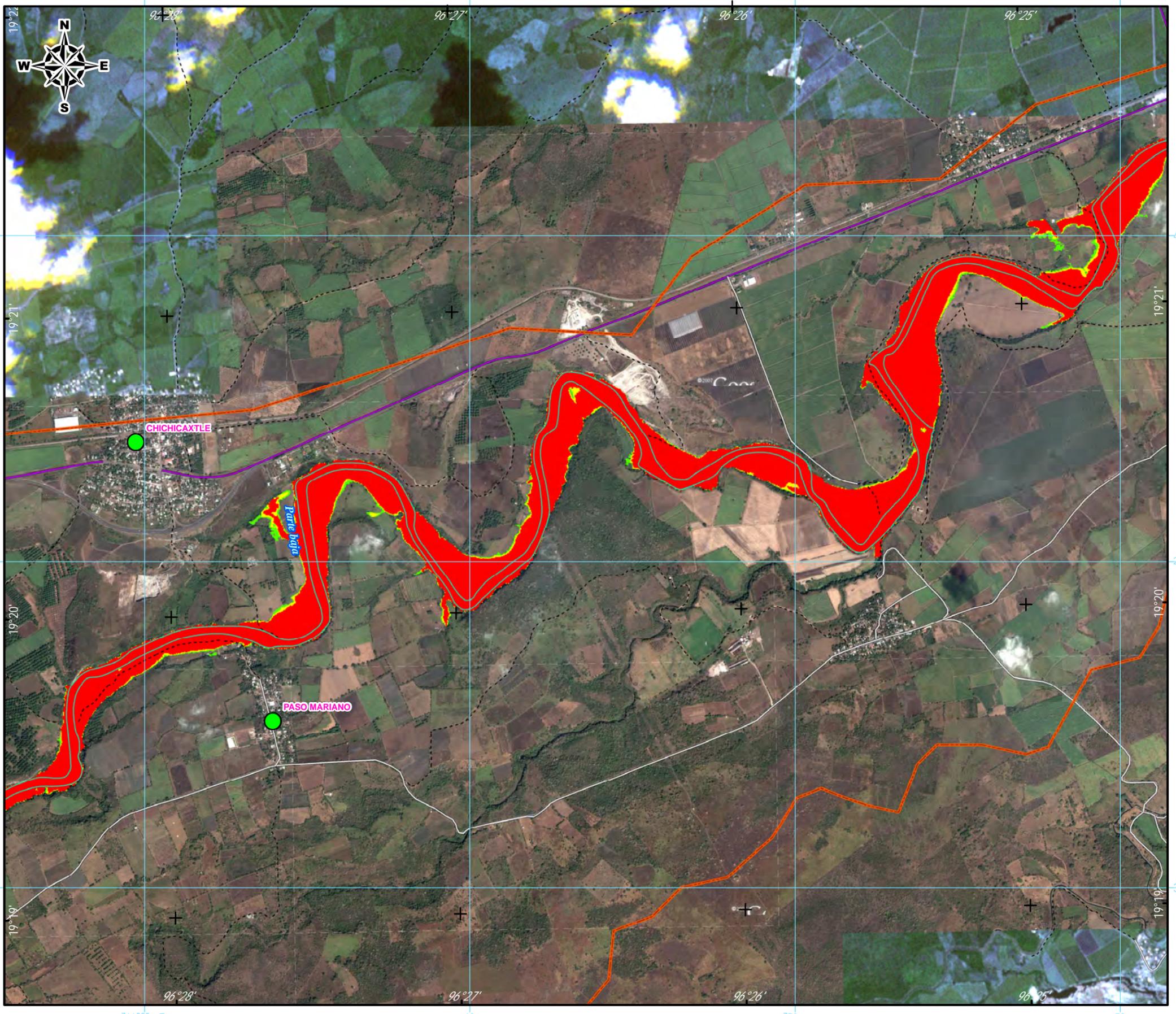
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

MAPA DE RIESGO POR INUNDACIÓN

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





SIMBOLOGÍA

Límite de la subcuenca	
Límite de la URH	
Márgenes	
Vías de comunicación	
Carretera pavimentada	
Terracería	
Brecha	
Niveles de riesgo	
Alto	
Medio	
Bajo	

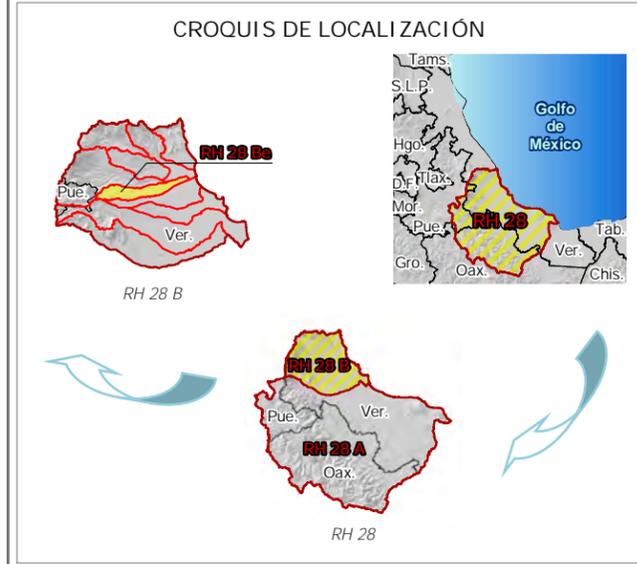
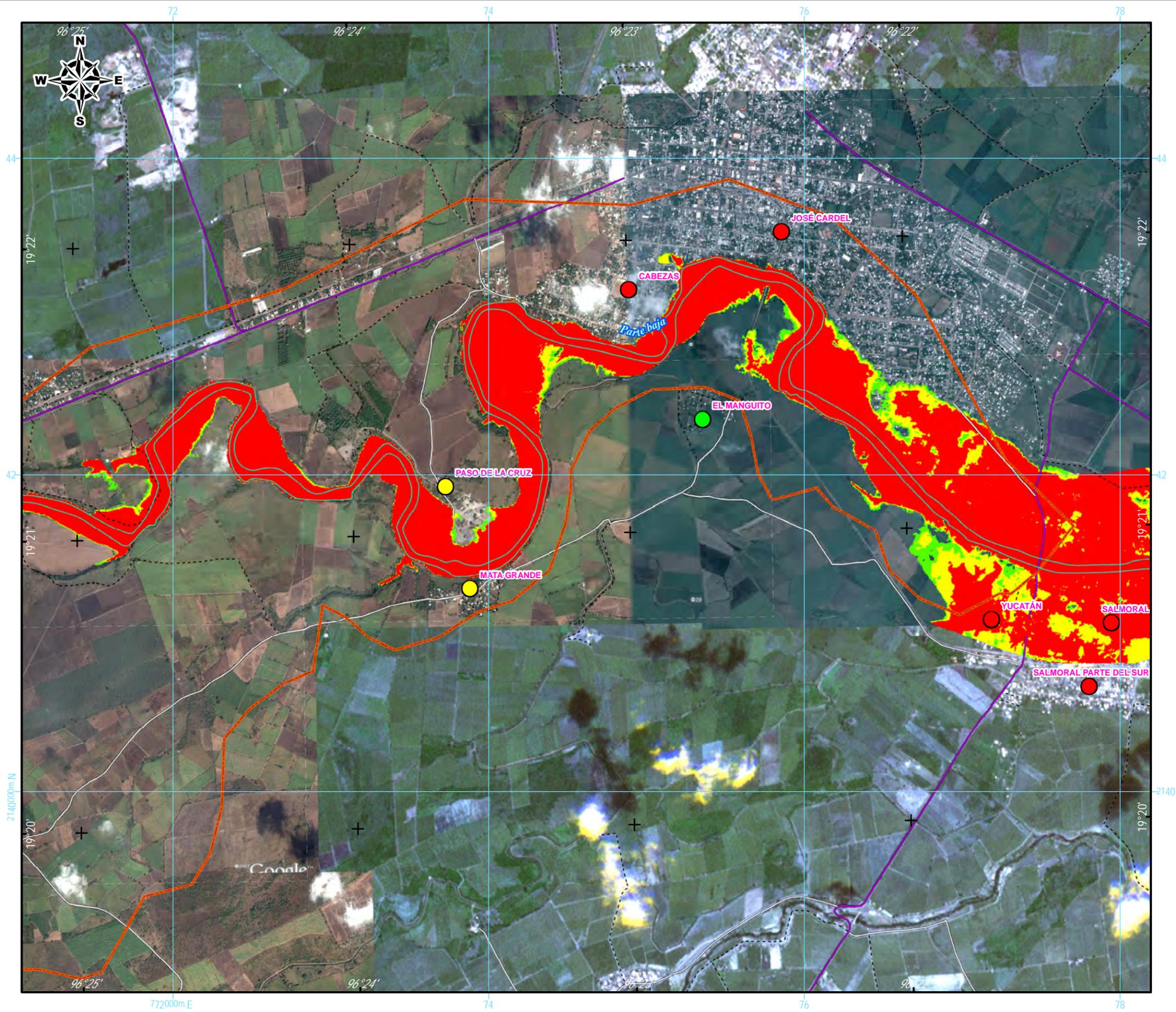
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

MAPA DE RIESGO POR INUNDACIÓN

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





SIMBOLOGÍA

Límite de la subcuenca	—
Límite de la URH	- - -
Márgenes	—
Vías de comunicación	
Carretera pavimentada	—
Terracería	==
Brecha	- - -
Niveles de riesgo	
Alto	●
Medio	●
Bajo	●

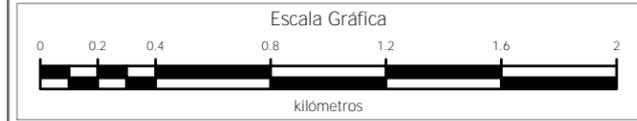
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide WGS1984
 Datum Horizontal WGS1984
 Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

MAPA DE RIESGO POR INUNDACIÓN

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI





9.5. MEDIDAS DE CONTROL DE INDUCCIONES

Cuantificar el peligro, evaluar la vulnerabilidad y con ello establecer el índice de riesgo, es la base para proponer medidas de control de inundación. Los mapas de riesgo por inundación permitieron identificar las zonas críticas en la Subcuenca RH28Be que requieren la aplicación de medidas de control de inundaciones; sin embargo, la falta de un levantamiento topográfico a detalle, limita el proceso de abstracción, diseño, análisis y evaluación de medidas de control.

A pesar de estas restricciones, se proponen algunas medidas estructurales y no estructurales, cuyo objetivo es prevenir y reducir los daños ocasionados por estas catástrofes en la subcuenca. El Cuadro 39 enlista las medidas estructurales propuestas para la subcuenca que podrían disminuir el riesgo a inundación.

Este tipo de medidas no reducirán el escurrimiento asociado aun un evento hidrometeorológico extremo, pero sí podrían disminuir los niveles de agua y en consecuencia las áreas de inundación. No eliminan el riesgo a inundación, pero si reducirán los daños ocasionados por estas catástrofes en la subcuenca.



Cuadro 39. Medidas estructurales propuestas para la Subcuenca del río La Antigua.

Tramo (Según geometría de HEC-GeoRAS)	Sección	Tipo de obra	Objetivo de la obra
Xochilapa	67213.25 – 66776.42	Bordo de protección	Proteger a la localidad Xopilapa contra crecidas extraordinarias del río Xochilapa. La obra no evitará su desbordamiento, pero bloqueará la entrada de agua a la comunidad, reducirá los daños que producen estas catástrofes y protegerá una población de 357 habitantes.
	59741.67 – 57999.68	Bordo de protección	Proteger a la comunidad Santa María Tetetla contra crecidas extraordinarias del río Xochilapa. La obra no evitará su desbordamiento, pero bloqueará la entrada de agua a la comunidad, reducirá los daños que producen estas catástrofes y protegerá una población de 1,777 habitantes.
Santa María	46636.10 – 39302.83	Desazolve y conformación de bordos	<p>Aumentar la capacidad hidráulica del río Santa María. El desazolve ampliará su capacidad de almacenamiento y reducirá la posibilidad de desbordamiento.</p> <p>La conformación de los bordos dará estabilidad y dirección al cauce, ya que en algunos sitios su flujo disperso.</p> <p>Ambas medidas protegerán 10 comunidades de Puente Nacional: Los Cuates, Tomás Vallejo, Juan Yobal, El Coyolar, San José Chipila, San José de Enmedio, San José de la Azud, El Cedro, El Cuajilote y Santo niño de Atocha, la mayoría de ellos con un Índice de vulnerabilidad muy alto, el beneficio será para 1,152 habitantes.</p>
Santa María 2	31216.90 – 30050.36	Desazolve	Aumentar la capacidad hidráulica del río Santa María (en su segundo tramo). El desazolve aumentará la capacidad de almacenamiento y reducirá la posibilidad de un desbordamiento.
Parte baja	21464.54 – 20949.70	Protección Marginal (estabilización de taludes)	Proteger los terrenos agrícolas de la comunidad Chichicaxtle (de Puente Nacional) contra las crecidas extraordinarias del río La Antigua (en la parte baja). La obra detendrá la irrupción del cauce sobre terreno natural y protegerá las viviendas más cercanas al río.
	22805.59 – 22489.74	Protección Marginal	Proteger a la comunidad Paso Mariano contra crecidas extraordinarias del río La Antigua (en la parte baja). La obra detendrá la irrupción del cauce sobre terreno natural. Se protegerá una población de 388 habitantes.



Tramo (Según geometría de HEC-GeoRAS)	Sección	Tipo de obra	Objetivo de la obra
Parte baja	9082.441 – 7777.087	Sobreelevación y protección de bordos	Proteger a las comunidades Paso de la Cruz (de Puente Nacional) y Mata Grande (Paso de Ovejas) contra las crecidas extraordinarias del río La Antigua (en la parte baja). La obra bloqueará la entrada de agua a las comunidades, reducirá los daños que producen estas catástrofes y detendrá la irrupción del cauce sobre terreno natural. Se protegerá una población de 195 habitantes.
	6240.431 – 31.307	Desazolve	Aumentar la capacidad hidráulica del río Santa María. El desazolve aumentará su capacidad de almacenamiento y reducirá la posibilidad de un desbordamiento. Esta obra protegerá 3 comunidades de La Antigua y 2 de Paso de Ovejas: José Cardel, Cabezas, Salmoral, Yucatán y El Manguito, respectivamente, el beneficio será para 26,315 habitantes.



Estas medidas requieren de una coordinación entre distintas dependencias y niveles de gobierno, sectores y a la sociedad en general. El Cuadro 40 enlista los organismos involucrados en la ejecución de las medidas.

Cuadro 40. Organismos involucrados en la ejecución de medidas no estructurales.

Dependencias Involucradas		Nombre
Gobierno	Federal	Secretaría de Gobernación
		Secretaría de Hacienda y Crédito Público
		Secretaría de Economía
		Secretaría de Desarrollo Social
		Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
		Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
		Secretaría de Trabajo y Previsión Social
		Secretaría de Comunicaciones y Transporte
		Secretaría de la Defensa Nacional
		Secretaría de la Marina
		Secretaría de Seguridad Pública
		Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano
		Consejo Nacional de Protección Civil
		H. Congreso de la Unión
		Senado de la República
		Comisán Nacional del Agua
		Servicio Meteorológico Nacional
		Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
		Centro Nacional de Prevención de Desastres
		Estatal
Secretaría de Hacienda y Crédito Público		
Secretaría de Finanzas		
Secretaría del Trabajo, Previsión Social y Productividad		
Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Rural y Pesca		



Dependencias Involucradas		Nombre
		Secretaría de Infraestructura y Obras Públicas
		Secretaría de Protección Civil
		Secretaría de Desarrollo Social
		Secretaría de Medio Ambiente
		Secretaría de Desarrollo Económico
		Secretaría de Seguridad Pública
		Coordinación General de Comunicación Social
		Congreso Local
	Municipal	Secretaría Particular
		Tesorería y Administración
		Comunicación Social
		Catastro
		Obras Públicas
		Servicios Públicos
		Desarrollo Económico
		Desarrollo Rural
		Desarrollo Urbano
		Ecología y Medio Ambiente
		Fomento Agropecuario
		Regulación Comercial
		Comandancia de Policía
		Bomberos
Sector	Privado	Bancos
		Aseguradoras
		Casas de empeño
		Casas de cambio
Otras	Medios de comunicación	Diarios locales y de circulación nacional
		Programas de radio local y regional
		Programas de televisión local, nacional e internacional
	Sociedad en General	



Las medidas no estructurales, no actúan directamente sobre el escurrimiento, ya que no altera las características hidráulicas del río o hidrológicas de la subcuenca, pero si previene a la población sobre las afectaciones que origina una inundación.

Comprenden políticas de planeación, acciones de monitoreo, y en su caso, el procedimiento frente a una contingencia. El Cuadro 41 enlista las medidas no estructurales propuestas para la Subcuenca RH28Be.

Cuadro 41. Medidas no estructurales propuestas para la Subcuenca RH28Be.

Medida	Objetivo
Políticas y planeamiento urbano	<p>Generar un planeamiento de desarrollo urbano que evite la construcción de instalaciones y asentamientos en zonas inundables. Esta medida requiere del desarrollo de normativa que limite el uso de suelo y la edificación en zonas de alto riesgo por inundación.</p> <p>Las políticas de urbanización deben combinarse con información a la población en materia de riesgo por inundación. Ureña y Teixeira (2004) consideran que el planeamiento urbano debe fundarse en los principios de conservación y sustentabilidad (Ureña y Teixeira, 2004).</p>
Predicción y Cartografía de Riesgos	<p>La predicción de inundaciones es una herramienta que puede reducir considerablemente las consecuencias de la misma, siempre y cuando se combine con adecuados sistemas de alertamiento y procedimientos de evacuación (Bramer, 2010). Puede ser una herramienta muy útil en la gestión de otras medidas estructurales y no estructurales como la generación de un Atlas de Riesgo.</p> <p>La predicción de inundaciones se compone de dos pasos. El primer paso consiste en la predicción meteorológica y se basa en el conocimiento científico y el uso de nuevas tecnologías para predecir el estado atmosférico a corto plazo de un lugar determinado.</p> <p>El segundo paso se corresponde a la pre-caracterización de avenidas, considerando la situación meteorológica futura para predecir las inundaciones resultantes mediante modelos hidráulicos (Moreno <i>et al.</i>, 2000)</p>
Comunicación y Sistemas de Alerta Temprana	<p>Balmforth <i>et al.</i> (2006) consideran que la comunicación sobre el riesgo es</p>



Medida	Objetivo
	<p>un proceso continuo que debe facilitar la información para aumentar el nivel de conciencia sobre el riesgo existente. El objetivo de esta medida es alcanzar un mayor grado de responsabilidad pública y capacitar a la población para actuar frente a una inundación.</p> <p>El aviso a la población en riesgo debe efectuarse de forma directa una vez percibida la amenaza (por ejemplo el aumento del nivel del agua en el cauce) empleando los siguientes medios:</p> <ul style="list-style-type: none">- Medios de comunicación: radio, Internet, televisión, etc.- Sistemas de alerta: altavoces, bando, sirenas, etc.- Difusión individual: personal de emergencias, fuerzas de seguridad, redes sociales, etc.- Otros sistemas: llamadas de teléfono, mensajes de texto, etc.
Planes o Programas de Contingencia	<p>Los Programas de Contingencia deben incluir las acciones llevadas a cabo por fuerzas de seguridad y servicios de emergencia para la reducción de daños.</p> <p>Jonkman (2007) clasifican este procediendo en tres categorías en función del tiempo disponible para la evacuación:</p> <ul style="list-style-type: none">- Evacuación preventiva. Con anterioridad al inicio del evento de inundación- Evacuación forzosa. Durante el desarrollo de la inundación- Huida. Desplazamiento de la población existente, en un área expuesta, afectada por los efectos de un evento inminente <p>Los planes de evacuación en áreas de alto riesgo de inundación definen los procedimientos a seguir y el papel de cada agente interviniente: fuerzas de seguridad, autoridades y servicios de emergencia (FEAT, 1997).</p>
Seguros e indemnizaciones	<p>La rápida recuperación tras la inundación es fundamental y requiere de la existencia de esquemas apropiados de indemnización y seguros.</p> <p>Los seguros incluyen la distribución de riesgos y pérdidas entre un elevado número de personas (Kundzewicz, 2001). Un sistema de seguros adecuado reducirá notablemente las consecuencias indirectas de la inundación, de modo que las pérdidas económicas pueden cubrirse rápidamente para restablecer el orden.</p> <p>Por otra parte, las indemnizaciones se deben emplear para compensar las pérdidas no cubiertas por los seguros. El sistema para la asignación de indemnizaciones se basará en la contribución solidaria y el</p>



Medida	Objetivo
	<p>voluntariado, así como en la asistencia procedente del gobierno central y de la ayuda internacional.</p> <p>Ambos mecanismos deben planearse con anterioridad a la inundación para facilitar el restablecimiento del empleo, ayudar a las víctimas a reparar los daños producidos y recuperar su vida normal tras la inundación.</p>



CAPÍTULO 10. CONCLUSIONES

Los datos de precipitación registrados durante el huracán Karl (en septiembre 2010) y las lluvias extraordinarias de julio 1999, permitieron estimar los hidrogramas unitarios sintéticos para alimentar al modelo. Así mismo, los puntos de verificación en campo de uso de suelo y vegetación facilitaron la asignación del valor n de Manning, mediante el uso de tablas con valores preestablecidos. Finalmente, el MDE de alta resolución permitió representar las condiciones morfométricas del río La Antigua y afluentes secundarios. Esta información procesada (para su utilización en HEC-RAS) permitió delimitar las zonas de riesgo a inundación en la subcuenca RH28Be.

Durante la etapa de calibración del modelo se logró un excelente ajuste entre datos medidos y simulados. Por otro lado, la etapa de validación demostró la capacidad predictiva y aplicabilidad de HEC-RAS para evaluar las eventuales inundaciones que ocurren en la subcuenca RH28Be. Ambos procesos están comprobados mediante pruebas estadísticas que indicaron una alta correlación entre datos medidos y simulados.

La modelación hidráulica permitió delimitar las zonas con riesgo a inundación, a partir de ello se obtuvo que 23 localidades se encuentran bajo algún nivel de riesgo, el 30% de la población total que habita en la subcuenca RH28Be, radica en una zona con riesgo a inundación.

La cartografía de riesgo permitió identificar las zonas críticas en la subcuenca RH28Be que requieren la implementación de medidas estructurales y no estructurales contra inundaciones a fin de prevenir, controlar y/o mitigar los daños ocasionados por estas catástrofes.



CAPÍTULO 11. RECOMENDACIONES

Para obtener una mejor simulación hidráulica se recomienda ingresar secciones transversales en intervalos cortos para describir con más detalle la geometría del cauce, además de extender las secciones sobre ambos márgenes para determinar con mayor precisión la llanura de inundación. Así mismo, durante la simulación hidráulica de una red de drenaje es recomendable tener secciones de aforo en cada intersección de afluentes, la información obtenida de estos sitios podrá utilizarse en los procesos de calibración y validación del modelo.

Para un estudio de modelación hidráulica es importante contar con información de campo, un levantamiento topográfico detallado, series de registro de caudales y niveles, entre otros elementos. Teniendo una buena cantidad de información y certificando la calidad de ésta, se podrá realizar un análisis de sensibilidad para obtener un buen ajuste en los principales parámetros del modelo, probar su estabilidad y garantizar resultados confiables en la modelación.

La cartografía de riesgo debe editarse a una escala tal que muestre la distribución de localidades, el peligro y vulnerabilidad de cada zona frente a una inundación, por ello es recomendable emplear diferentes metodologías para delimitar estas zonas y poder identificar las áreas críticas que requieren la aplicación de medidas de control de inundaciones.

Cualquiera que sea el caso, desbordamientos en zonas agrícolas o áreas urbanas, se deben implementar medidas de control de inundaciones para prevenir, controlar y/o mitigar los daños ocasionados por estas catástrofes. Las medidas estructurales o no estructurales que sean propuestas deben coordinarse entre distintas dependencias y niveles de gobierno, sectores y a la sociedad en general.



CAPÍTULO 12. LITERATURA CONSULTADA

- Aguirre N, M., 2005. Marco conceptual y manejo de cuencas hidrográficas en el Perú. Intendencia de Recursos Hídricos. Instituto Nacional de Recursos Naturales, Perú. 36 diapositivas.
- Ahmed H., K. M., 2008. Aplicaciones del modelo HEC-RAS para el análisis del flujo no permanente con superficie libre. Ecuador, Escuela Politécnica Nacional. 290 p.
- AQUAVEO, 2013. Introducing WMS 9.1 [en línea]. Utah, E. U. A. Consultado 1 jul. 2013. Disponible en <https://www.aquaveo.com/>
- Aldana A., L., F. Estrada y F. Cabezas, 1996. Modelación hidrológica y de la gestión hidráulica en el sistema automático de información hidrológica: modelos Plu y Crem. Revista de Ingeniería Civil. no. 104:81- 88.
- Arias F., E. Lucero, y M. Duque, 1992. La cuenca hidrográfica como una unidad de análisis y planificación territorial. Colombia, Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional de Colombia. 250 p.
- Armenta M., S., *et al.*, 2011. Inundaciones 2010 en el estado de Veracruz: la restauración ecológica como estrategia para la reducción del riesgo de desastres ante inundaciones. Veracruz, México. CVICDT, pp. 196- 236.
- Arreguín C., F. I., 2011. Riesgo de inundación en México. CONAGUA. México. 59 diapositivas.
- American Society of Civil Engineers (ASCE), 1993. Criteria for evaluation of watershed models. J. Irrigation Drainage Eng., 119(3): 429-442.



- Balmforth, D., C. Digman, R. Kellagher, y D. Butler, 2006. Designing for exceedance in urban drainage - good practice. Londres, Inglaterra, CIRIA C635.
- Barrios P., M. I., y M. Olaya .E.J., 2007. Calculo y análisis de hidrogramas para el flujo torrencial del 22 de Junio de 2006 ocurrido en la microcuenca “El Salto”, Ibagué – Colombia. Avances en Recursos Hidráulicos, no. 16: 31-40.
- Bifani P., 1999. Medio ambiente y desarrollo sostenible. 4^{ta} ed. Madrid, España. IEPALA. 593 p.
- Bramer. D., 2010. Weather forecasting, online meteorology guide. [en línea]. University Illinois, E. U. A. Consultado 03 ene. 2014. Disponible en <http://ww2010.atmos.uiuc.edu/%28Gh%29/guides/mtr/fcst/home.rxml>
- Brooks K., N., F. Ffolliot P., y A. Magner, J., 2013. Hydrology and the management of watersheds. 4^{ta} ed. Iowa, E.U. A. Wiley-Blackwell. 552 p.
- Brown E., A. Peterson, R. Kline-Robach, K. Smith y L. Wolfson, 2000. Developing a watershed management plan for water quality: an introductory guide. Michigan State University (MSU), Michigan DEQ and EPA, E.U. A. 52 p.
- Cai J., Liu Y., Lei T., and Pereira L.S. 2007. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages. Agricultural and Forest Meteorology. No. 145: 22-35.
- Cardona A., O. D., 2001. La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo, Una crítica y una revisión necesaria



para la gestión. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Republica de Panama. 18 p.

Castelán C., J. E., 2000. Los consejos de cuenca en México. IWMI. Serie Latinoamérica. No. 20: 175-187.

Castelló M., E., 2009. Determinación de la capacidad hidráulica del canal Los Molinos-Córdoba. España, Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 145 p.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 2012. Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2010. México. 158 p.

_____, 2004. Guía Básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgo. México. 389 p.

_____, 2011. Metodología para la elaboración de mapas de Riesgo por inundaciones en zonas urbanas. México. 73 p.

Central and Southern Florida Project, 2002. Final Model Evaluation Report. Florida, E. U. A. 37 p.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2010. Informe sobre el pronóstico de la temporada de ciclones 2010. México. 5 p.

_____, 2011a. Estudio Integral del Río La Antigua, del estado de Veracruz. México. pp. 145 - 146.

_____, 2011b. Manual para el Control de Inundaciones. México. 338 p.



Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 1917. México. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. Última Reforma 26 feb. 2013.

Cotler A., H., 2010. Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización: perspectivas sobre las cuencas hidrográficas de México. México. INE. pp. 4-7.

Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), 2002. The quality and accuracy of disaster data: A comparative analyses of 3 global data sets. Brussels, Belgium. World Water Assessment Programme, UNESCO. s.p.

Cruz B., J., 2009. Formulación del riesgo conjunto, inundación–sequía, bajo un esquema probabilístico, aplicado en la región hidrológica Nazas– Aguanaval (RH-36). Morelos, México. Facultad de Ingeniería, UNAM.

Soil Conservation Service (CSC). 1972. National Engineering Handbook Hydrology Section, 4, pp: 0-100, 200-301, 400-501.

Cuevas F., H. y M. Navarrete H., 2006. Inundaciones en el Estado de Veracruz 2005: los huracanes en la época prehispánica y en el siglo XVI. Veracruz, México. Universidad Veracruzana. pp. 39-49.

Davenport E., T., 2003. The watershed project management guide. Florida, E. U. Lewis Publishers. 296 p.

Dirección General de Comunicación Social (DGCS), 2010. Karl impacto en Veracruz con categoría III. México. Boletín de prensa no. 431/10

Danish Hydraulic Institute (DHI), 2011. Catálogo de Software MIKE. Hørsholm, Dinamarca. 32 p.



Diario ABC, 2012. Principales inundaciones ocurridas en el mundo desde el año 2000 [en línea]. Madrid, España. Consultado 30 abr. 2013. Disponible en <http://www.abc.es/20110113/internacional/rc-principales-inundaciones-ocurridas-mundo-201101131953.html>

División de Recursos Naturales y Energía (DRNE), 1994. Políticas públicas para el desarrollo sustentable: la gestión integrada de cuencas. Mérida, Venezuela. CEPAL. 231 p.

Elera M., G. A., 2005. Modelación numérica del río Piura utilizando River 2D, entre los puentes cáceres e integración. Piura, Perú. Facultad de Ingeniería, Universidad de Piura. 182 p.

United States Environmental Protection Agency (EPA U. S.), 1998. Summary of functions, theory, and applicability [en línea]. Georgia, U.S. Consultado 23 mayo 2013. Disponible en <http://www2.epa.gov/exposure-assessment-models/hsctm2d>

Espinoza T., B. 2009. Evaluación de los recursos hídricos de la cuenca del río La Antigua, Veracruz: estado actual y ante escenarios de cambio climático. Universidad Veracruzana. 102 p.

Flood Emergency Action Team (FEAT), 1997. Legal Guidelines for Flood Evacuation. Governor's Office of Emergency Services of California, E. U. A.

Fernández M., M., A. Vela M. y A. Castaño F., 1997. La utilización de los modelos en hidrología (Sección: Ciencias). Ensayos. Revista de la Facultad de Educación de Albacete. no. 12: 305-317.



- García C., W., 2002. El sistema complejo de la cuenca hidrográfica. Colombia, Facultad de Ciencias Humanas, Universidad de Colombia. 136 p.
- García P., A., 2010. Medidas estructurales y medidas no estructurales de defensa frente a inundaciones. España, Escuela de Negocios. 22 p.
- Galmiche A., 2010. Anuncia \$120 millones de pesos más del Fonden para municipios damnificados por Karl. La Jornada en Veracruz. Xalapa, Veracruz. MX, set. 30 2010.
- Georgia Adopt-A Stream, 2003. Introducción a las cuencas hidrológicas. Georgia, E.U.A. 92 p.
- Giddings, L., y Soto, M. (2006). Participación de América Latina y del Caribe en los Registros Globales Climatológicos, GHCN. Interciencia: Revista de Ciencia y Tecnología de América, 31(9): 632-637.
- Gobierno del Estado de Veracruz (GEV), 2011. Plan Veracruzano de Desarrollo 2011-1016. Veracruz, México. 303 p.
- Góndola E., 2011. Cuentas ambientales de Panamá. Panamá. Autoridad Nacional del Ambiente, Unidad de Economía Ambiental. 35 diapositivas.
- González P., J. I., 2004. El manejo integral de cuencas en México: el manejo de cuencas en Cuba, actualidades y retos. México. INE. pp. 21-40.
- González, T. M. del, 2008. El cambio climático en España y sus consecuencias en el sector del agua: inundaciones y cambio climático. Madrid, España. URJC-A. s.p.



Graham W., J., 1999. A procedure for estimating loss of life caused by dam failure. U.S. Department of Interior. Bureau of Reclamation, DSO-99-06, 1999.

Guerra C., V. H., 2005. HEC-RAS Sistema de Análisis de Ríos. México, Instituto de Ingeniería Civil, Departamento de Hidráulica, Universidad Autónoma de Nuevo León. 32 p.

Guevara D., J. M., 1987. Métodos de Estimación y Ajuste de datos. Caracas, Universidad Central de Venezuela, s. p.

Guevara O., E., R. Quaas W., y G. Fernández V., 2004 Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos: Lineamientos Generales para la Elaboración de Atlas de Riesgos. México, pp. 15-29.

Guide to TUFLOW. 2013. Flood and coastal simulation software [en línea]. Australia. Consultado 25 mayo 2013. Disponible en <http://www.tuflow.com/Default.aspx>

Hidrosoft Energie Inc. 2000. AquaDyn 3.1, Users Guide. Québec, Canada.

Iber, 2012. Manual de referencia hidráulica. España. Ministerio de Medio Ambiente y medio Rural y Marino, Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente. 59 p.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2004. Guía para la interpretación de cartografía edafológica. Aguascalientes, México. 28 p.

_____, 2011. Censo de Población y Vivienda 2010. México. s. p.



- _____, 2012. Guía para la interpretación de cartografía uso del suelo y vegetación, Serie IV. México. 126 p.
- Jonkman S., N., 2007. Loss of life estimation in flood risk assessment. Theory and applications. PhD thesis, Civil Engineering Faculty, Technical University of Delft.
- Kumar P., P., 2013. HEC-RAS Model for Mannig-s Roughness: A Case Study. *Scientific Research*. 3(3): 97-101.
- Kundzewicz Z., W., 2001. Non-structural flood protection and sustainability. Nonstructural measures for water management problems. International Hydrological Programme, UNESCO. Ontario, Canada p. 309.
- Ley de Aguas Nacionales (LAN), 1992. México. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. Última Reforma 8 jun. 2012.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al ambiente (LGEEPA), 1988. México. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. Última Reforma 4 jun. 2012.
- Marín J., M. J., 2010. Simulación de un derrame de hidrocarburos en el puerto pesquero de Santa Rosa del Cantón Salinas. Guayaquil, Ecuador. Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar, Escuela Superior Politécnica del Litoral. 78 p.
- Mockus, V., 1957. Use of storm and watershed characteristics in synthetic hydrograph analysis and application. American Geophysical Union, Pacific Southwest Region, Sacramento, CA.



- Moreno S., M. L., E. García S., y A. Linares S., 2005. Sistema de ayuda a la decisión para la explotación de la cuenca del ebro: Eficaz herramienta de prevención. España. Revista Cauce. no. 129:15–19.
- Moriasi, 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulation. Transactions of the ASABE, 50(3): 885 - 900.
- Númera M., C. P. 2013. Análisis comparativo de los modelo HEC-RAS, CCHE2D, G-STARS y BRI-STARS, para la modelación hidráulico-morfológica en un cauce aluvial. Aplicación al río Negro (Antioquia). Colombia, Facultad de Minas, Dpto. de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia. 180 p.
- O'brien, J.S. and Julien P.Y., 1988. Laboratory analysis of mudflow properties. J. of Hyd. Eng., ASCE. 114(8): 887.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM), 1974. Glosario hidrológico internacional. Suiza. Secretaría de la OMM. no. 385. s.p.
- Oropeza M., J.L., 1999. Modelos matemáticos y su aplicación al manejo de cuencas hidrográficas. Sinaloa, México. IX Congreso Nacional de Irrigación. pp. 21-28.
- Oropeza O., O., C. Enríquez y J. C. Preciado, 2007. Nuevo atlas nacional de México: inundaciones en México. México. Instituto de Geografía, UNAM. Atlantida Coll-Hurtado. 430 p.
- Palacios V., O. L. 1986. El uso de modelos en irrigación y áreas afines. Terra, (4):41-49.



- Pereira V., I. L., 2008. Estudos de revitalização de cursos de água–trecho experimental no rio das velhas. Minas Gerais, Brasil, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. 122 p.
- Pilar C., A., 2007. Medidas no estructurales como alternativas de mitigación de riesgo de origen pluvial y fluvial. El caso de la Ciudad de Resistencia. Guatemala. 10 p.
- Pocklington R., 1989. Avenidas fluviales e Inundaciones en la cuenca del Mediterráneo: observaciones sobre el aprovechamiento del agua torrencial para la agricultura en Murcia y Lorca durante la época árabe. Valencia, España. Instituto Universitario de Geografía de la Universidad de Alicante. pp. 462-473.
- Ponce V., M., 1986. Diffusion wave modeling of catchment dynamics. Journal of Hydrologic Engineering. 109(4): 637-638.
- Programa Nacional de Protección Civil (PNPC), 2001. México. CENAPRED, Secretaría de Gobernación. 92 p.
- Puga B., M. A., 2010. Modelo hidráulico físico de vertederos como ayuda de aprendizaje de la materia de hidráulica. Sangolqui, Ecuador, Escuela Politécnica del Ejército. 108 p.
- Quaas W., R. 2004. Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. México. pp. 9-10.



- Quiroga C., S., 2010. Aviso tormenta tropical Karl. México. Evaluación de Riesgos Naturales.
- Reid W. V. *et al.*, 2005. Evaluación de los ecosistemas del milenio. Strengthening Capacity to Manage Ecosystems Sustainably for Human Well-Being. 43 p.
- Rial-Rivas M.E., Álvarez Enjo M., y Díaz-Fierros F., 2007. Water balance and observed flows in the Anllóns River basin (NW Spain). *IAHS . Publ. 310*,
- River2D, 2006. University of Alberta, Canadá [en línea]. Canadá. Consultado 23 mayo 2013. Disponible en <http://www.river2d.ualberta.ca>
- Rodríguez V., H. G., 2013. Inundaciones en zonas urbanas, medidas preventivas y correctivas, acciones estructurales y no estructurales. Morelos, México. Facultad de Ingeniería, UNAM. 347 p.
- Salas S., M. A. y M. Jiménez E., 2004. Inundaciones. México. CENAPRED. Serie Fascículos. 53 p.
- Salett, B. M. y H. Nelson, 2010. Modelo, modelación y modelaje. Métodos de enseñanza–aprendizaje de matemáticas. Brasil. Departamento de Matemática, Universidad Regional de Blumenau. 9 p.
- Santaella O., R. A. y L. D. Donaldo, 2007. Guía de iniciación del software HEC-RAS v.3.1.3. España, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander. 31 p.
- Secretaría de Agricultura y Recurso Hídricos (SARH), 1977. Recursos naturales de la cuenca del Papaloapan. Tomo II. México. Comisión del Papaloapan, Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables. s.p.



Servicio Meteorológico Nacional (SMN), 2010a. Boletín Meteorológico no. 517. México.

_____, 2010b. Boletín Meteorológico no. 519. México.

Sveinsson, O.G.B., Salas, J.D, Lane, W.L. & Frevert, D.K. (2007). Stochastic analysis, modeling, and simulation (SAMS). User's Manual, Version 2007. [en línea]. Consultado 30 nov. 2013. Disponible en http://www.engr.colostate.edu/Sams-CSU-USBR/SAMS/Resources/SAMS_2007User_Manual.pdf.

Tapia A., C., 2010. Sistemas, modelos y simulación. Argentina. Fiuba (Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires). 19 p.

Terra, 2010. Recibe Veracruz 265 mdp del FONDEN para trabajos de rehabilitación [en línea]. México. Consultado 30 jun. 2013. Disponible en <http://www.terra.com.mx/noticias/articulo/965578/Recibe+Veracruz+265+mdp+del+Fonden+para+trabajos+de+rehabilitacion.htm>

Turégano C., F. 2012. Gestión de riesgo de inundación. Universidad Politécnica de Madrid. 254 p.

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), 2009. Glosario de meteorología [en línea]. México, D.F. Consultado 20 mayo 2013. Disponible en <http://www.observatoriometeorologicounam.com/glosario.htm>

Ureña F., J. M., y L. C. Teixeira G, 2004. Ordenación fluvial, usos del suelo y construcción de infraestructuras. Ingeniería y territorio, España. (68):32–41.



U.S. Army Corps of Engineers, 2010. User's Manual. Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center (HEC), Davis, CA.

Valdez R., V. y A. Arreola V., 2011. Inundaciones 2010 en el estado de Veracruz: Estrategias para reducir la vulnerabilidad de las inundaciones de producción de tilapia ante inundaciones. Veracruz, México. CVICDT. pp. 527-548.

Vargas A., J. R., 2010. Modelación y simulación de sistemas. Nicaragua, Universidad Nacional de Ingeniería. 96 diapositivas.

Chow T. V., D. Maidment R. y L. Mays W. 1994. Hidrología aplicada. Santafé de Bogotá, Colombia. McGraw Hill. 584 p.

Wadsworth J., 1997. Análisis de sistemas de producción animal. Tomo 2: las herramientas básicas. (Estudio FAO Producción y Sanidad Animal 140/2) [en línea]. Roma, Italia. Consultado 30 abr. 2013. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/w7452s/w7452s00.HTM>

Xantomila R., G., Desastres naturales en México le han costado a México 2 mdd anuales. El Occidental. Jalisco, MX. Jul. 14 2013.

Zepeda R., O. y S. González M. (eds.), 2001. Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México. México. CENAPRED. 225 p.

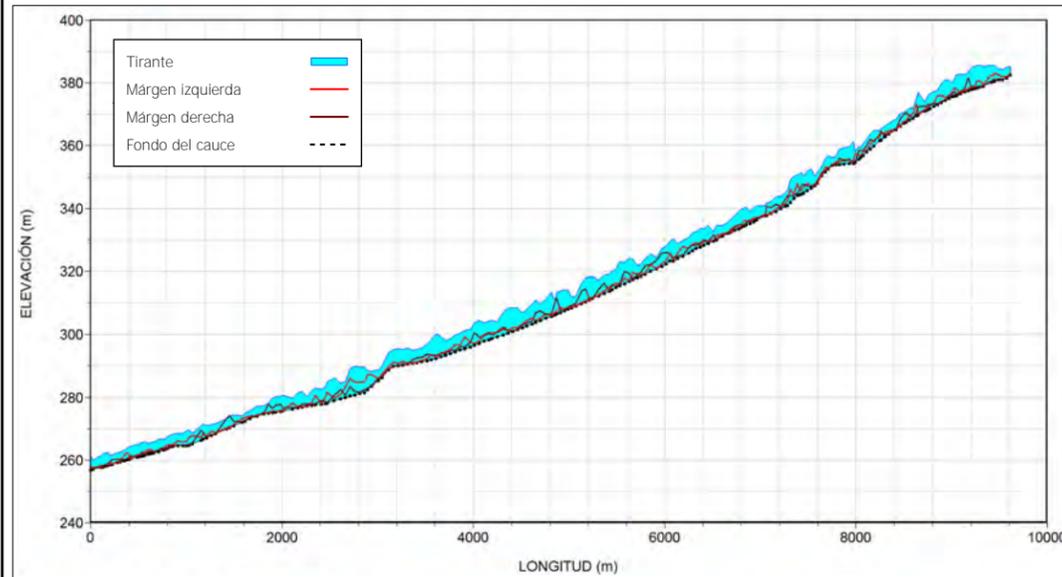


ANEXOS

Anexo A. Mapas de simulación hidráulica



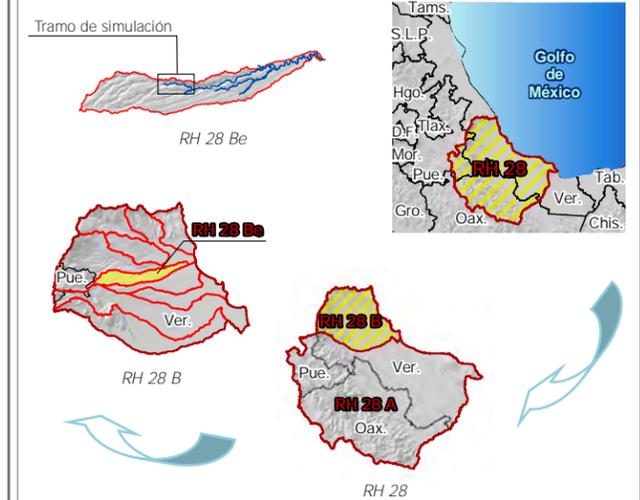
PERFIL LONGITUDINAL DEL TRAMO XOCHILAPA



VISTA 3-D DEL TRAMO XOCHILAPA



CROQUIS DE LOCALIZACIÓN



SIMULACIÓN HIDRÁULICA DEL TRAMO XOCHILAPA



SIMBOLOGÍA



INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

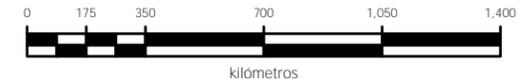
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
Elipsoide WGS1984
Datum Horizontal WGS1984
Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN ASOCIADA A LAS PRECIPITACIONES DEL HURACÁN KARL

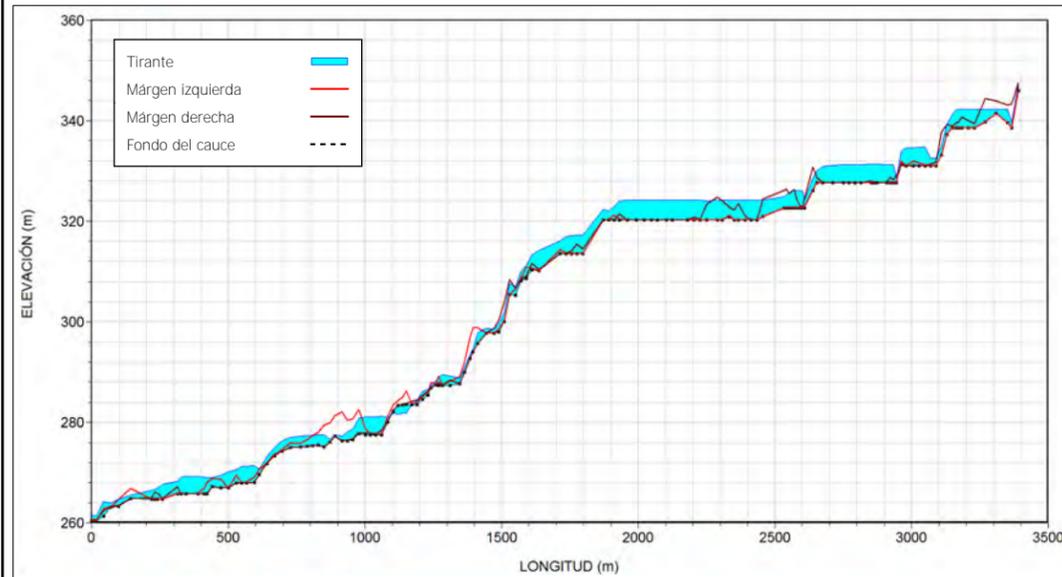
ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI

Escala Gráfica

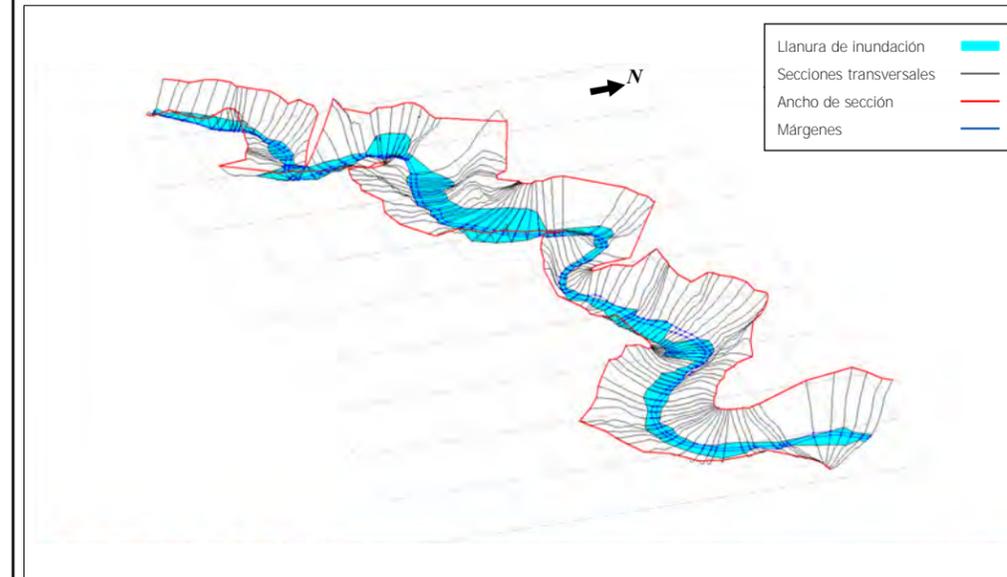




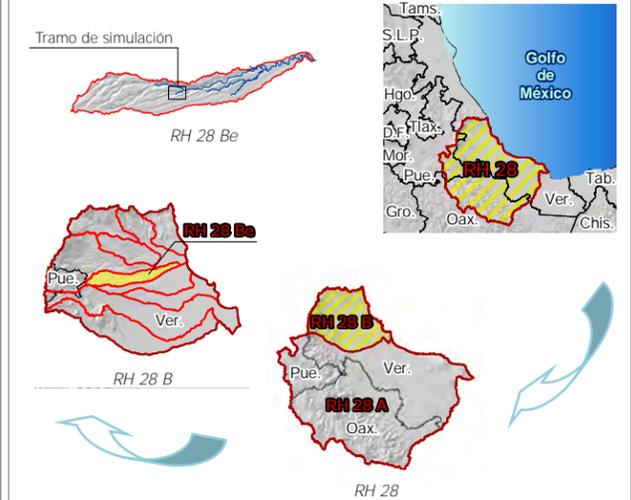
PERFIL LONGITUDINAL DEL TRAMO ACTIPAN



VISTA 3-D DEL TRAMO ACTIPAN



CROQUIS DE LOCALIZACIÓN

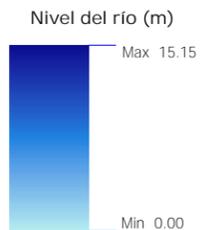


SIMULACIÓN HIDRÁULICA DEL TRAMO ACTIPAN



SIMBOLOGÍA

- Localidad ●
- Límite de la subcuenca —
- Márgenes —
- Carretera pavimentada —
- Terracería —
- Brecha - - -



INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
Elipsoide WGS1984
Datum Horizontal WGS1984
Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN ASOCIADA A LAS PRECIPITACIONES DEL HURACÁN KARL

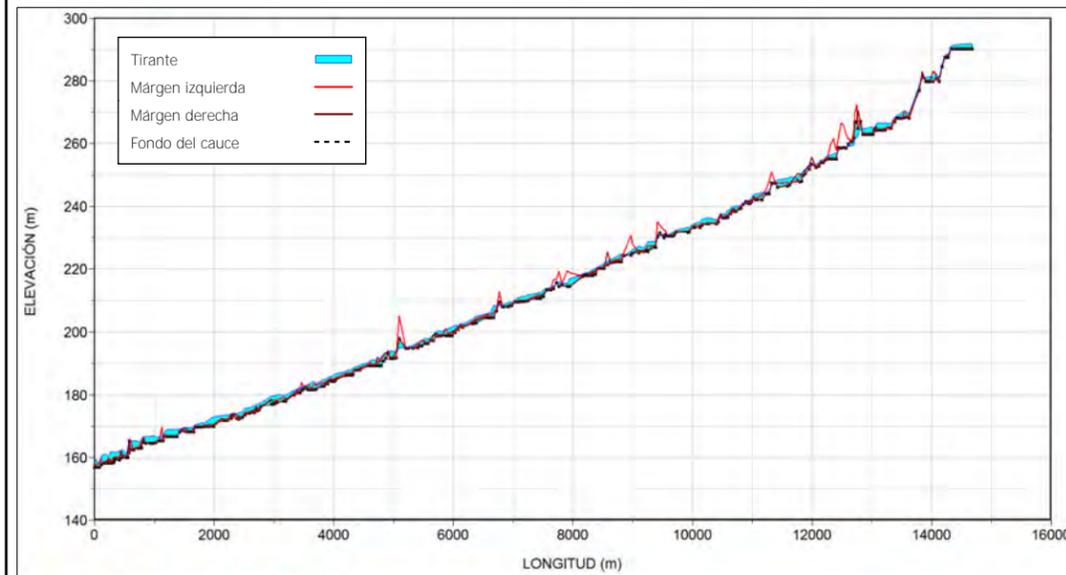
ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI

Escala Gráfica





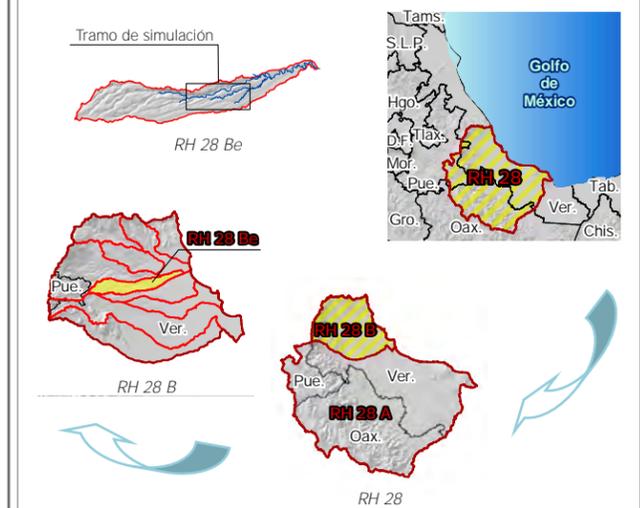
PERFIL LONGITUDINAL DEL TRAMO LA BOMBA



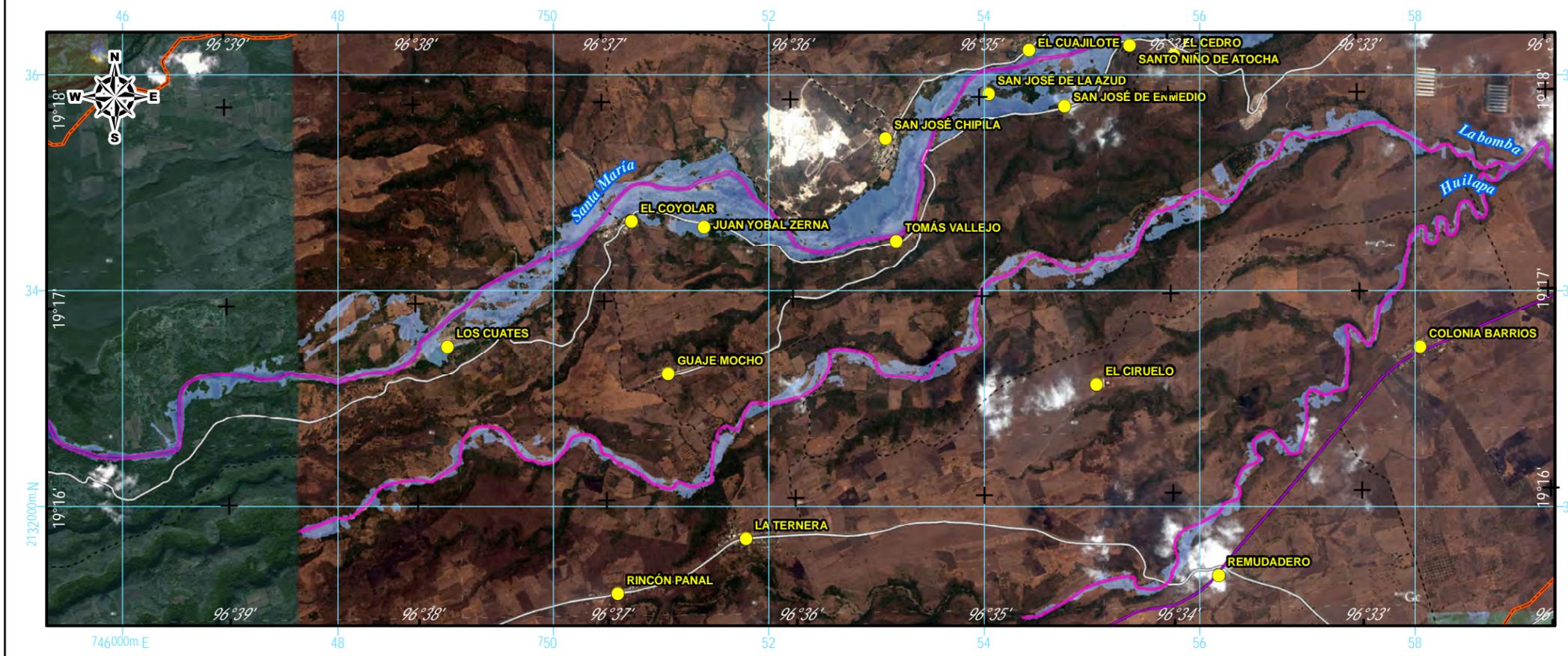
VISTA 3-D DEL TRAMO LA BOMBA



CROQUIS DE LOCALIZACIÓN



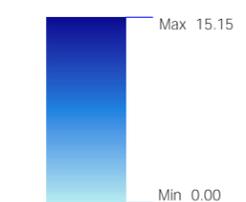
SIMULACIÓN HIDRÁULICA DEL TRAMO LA BOMBA



SIMBOLOGÍA

- Localidad ●
- Límite de la subcuenca —
- Márgenes —
- Carretera pavimentada —
- Terracería —
- Brecha - - -

Nivel del río (m)



INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
Elipsoide WGS1984
Datum Horizontal WGS1984
Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN ASOCIADA A LAS PRECIPITACIONES DEL HURACÁN KARL

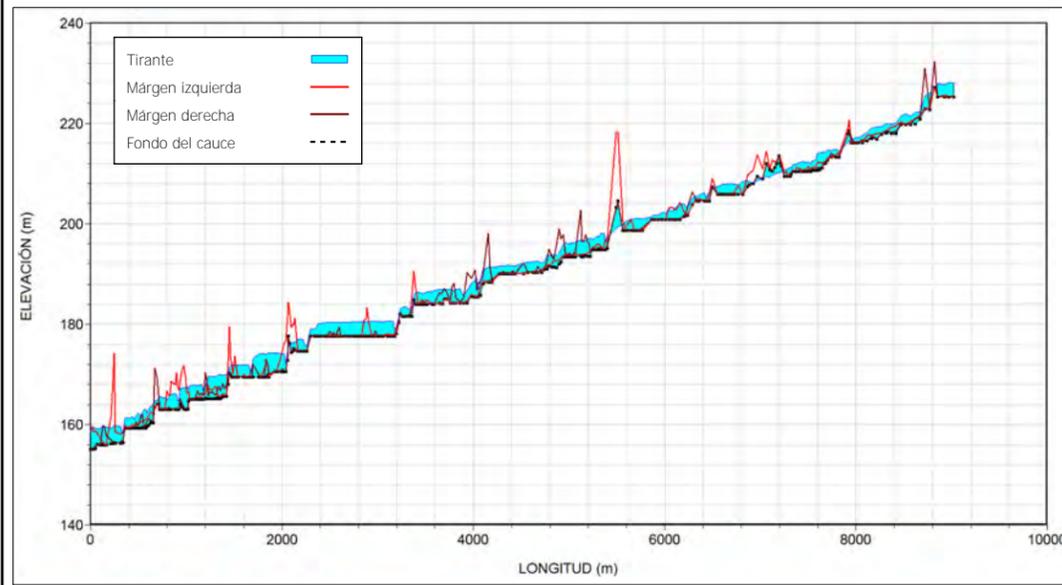
ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI

Escala Gráfica

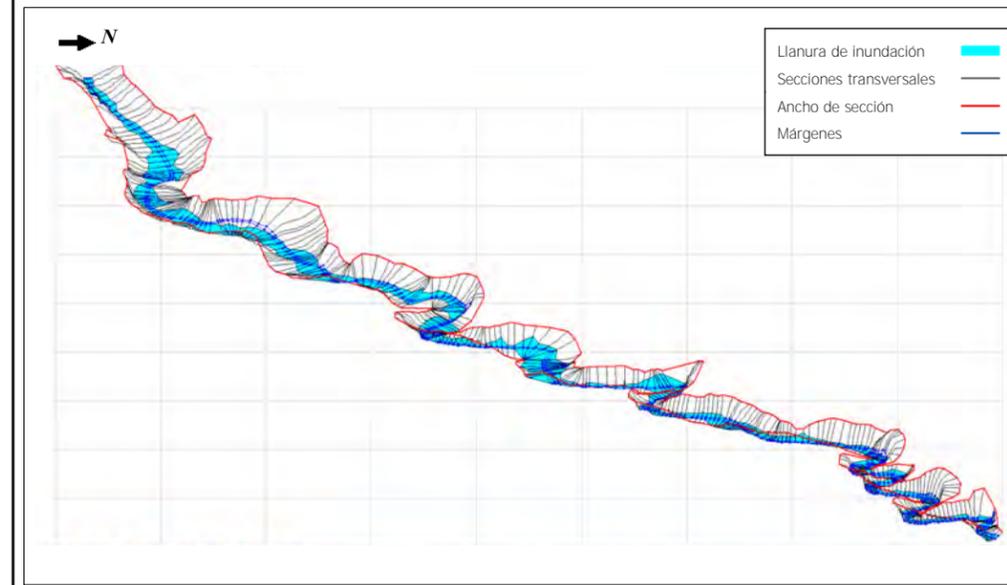




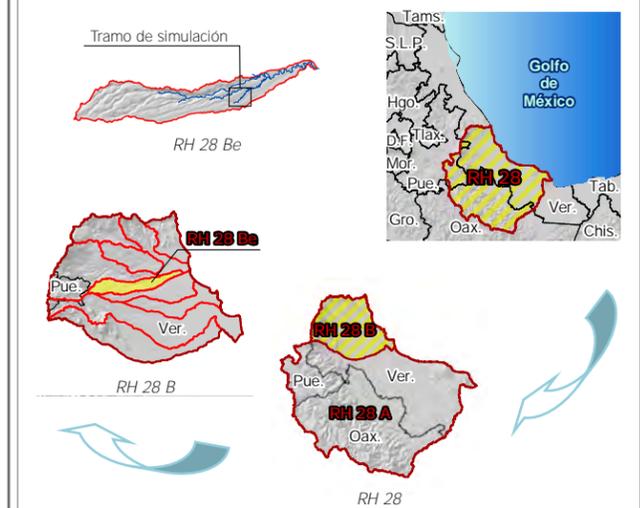
PERFIL LONGITUDINAL DEL TRAMO HUILAPA



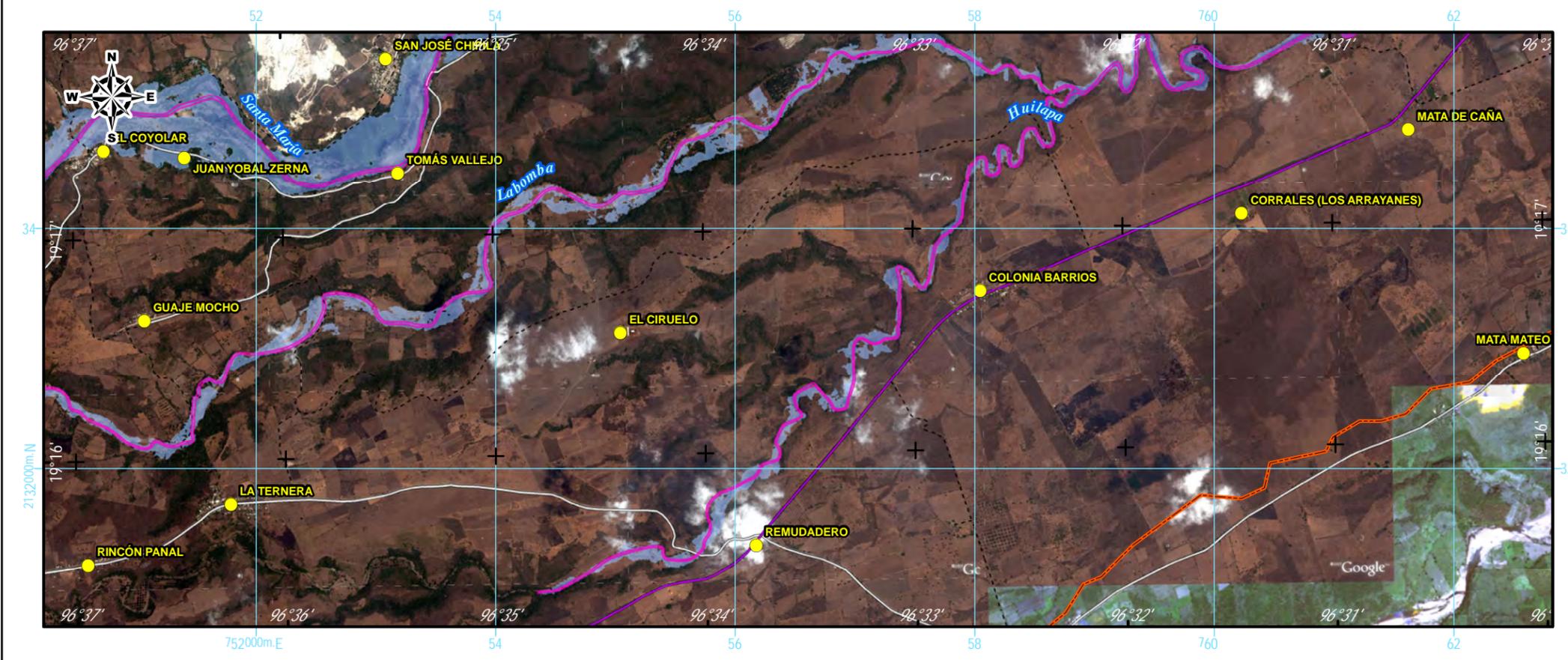
VISTA 3-D DEL TRAMO HUILAPA



CROQUIS DE LOCALIZACIÓN



SIMULACIÓN HIDRÁULICA DEL TRAMO HUILAPA



SIMBOLOGÍA



INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
Elipsoide WGS1984
Datum Horizontal WGS1984
Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN ASOCIADA A LAS PRECIPITACIONES DEL HURACÁN KARL

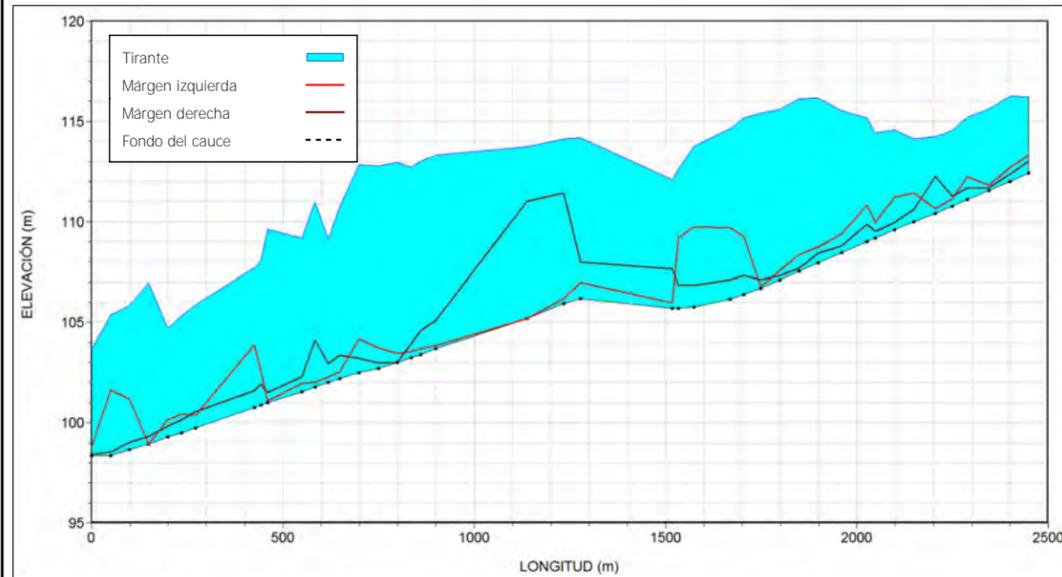
ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI

Escala Gráfica

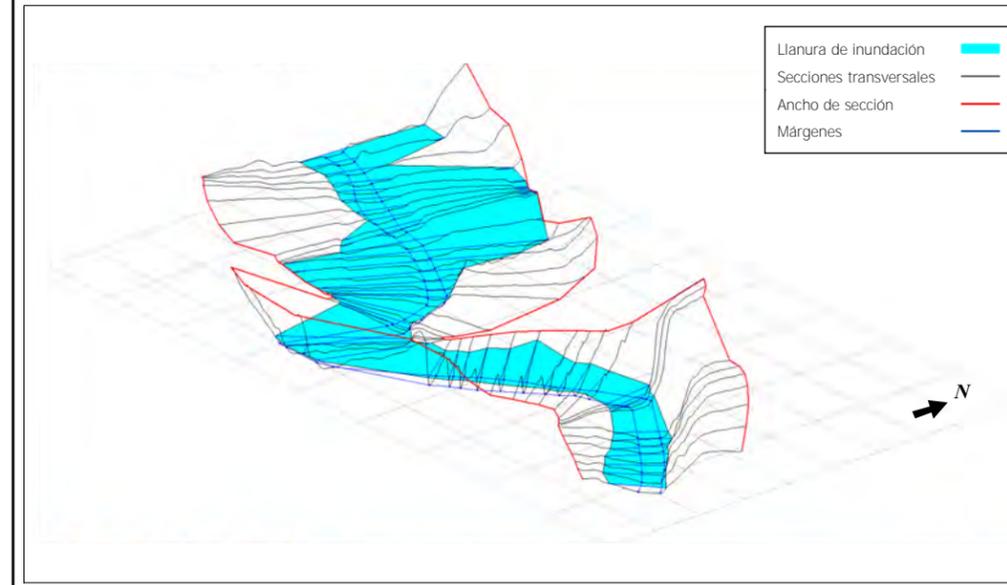




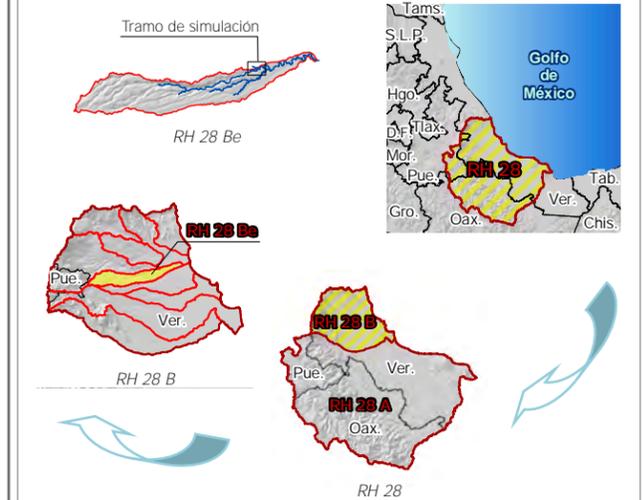
PERFIL LONGITUDINAL DEL TRAMO PESCADOS



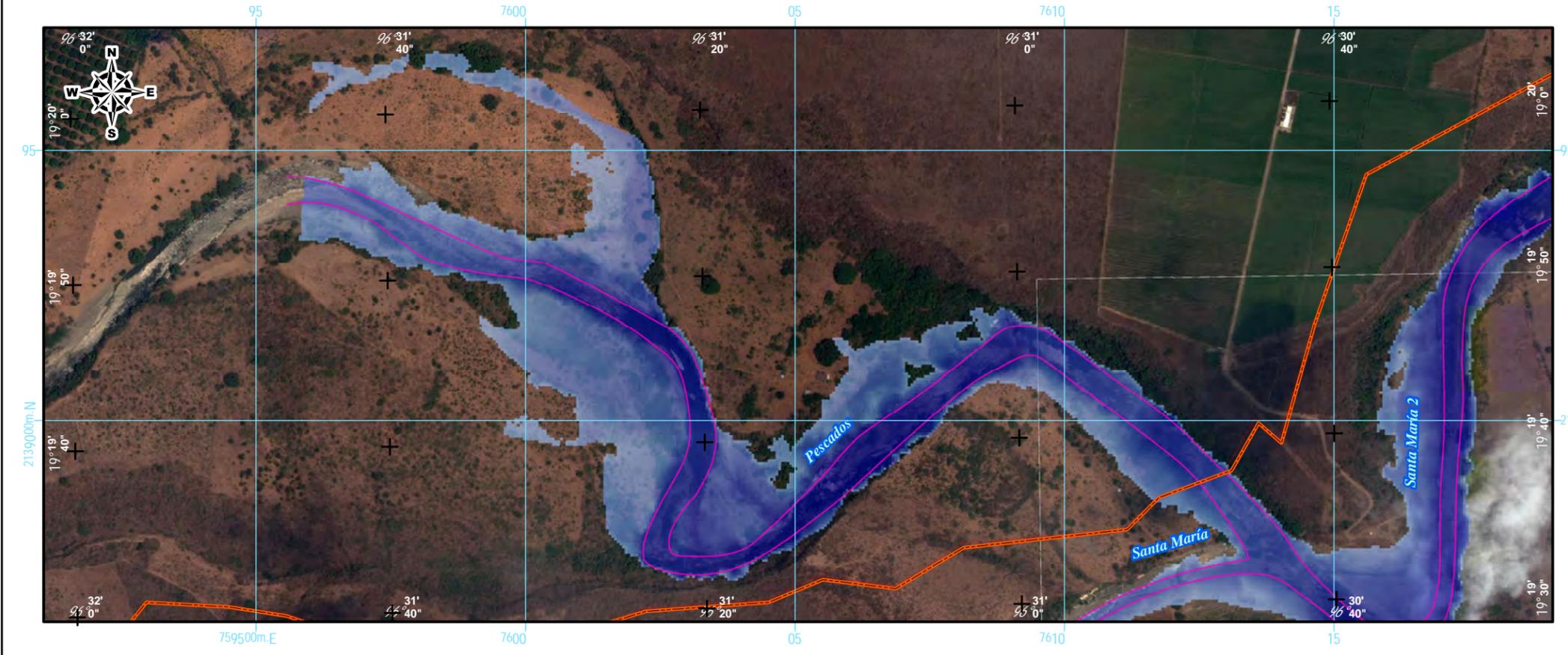
VISTA 3-D DEL TRAMO PESCADOS



CROQUIS DE LOCALIZACIÓN



SIMULACIÓN HIDRÁULICA DEL TRAMO PESCADOS



SIMBOLOGÍA



INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

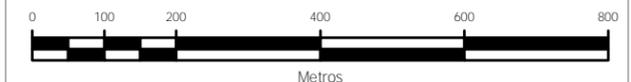
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
Elipsoide WGS1984
Datum Horizontal WGS1984
Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN ASOCIADA A LAS PRECIPITACIONES DEL HURACÁN KARL

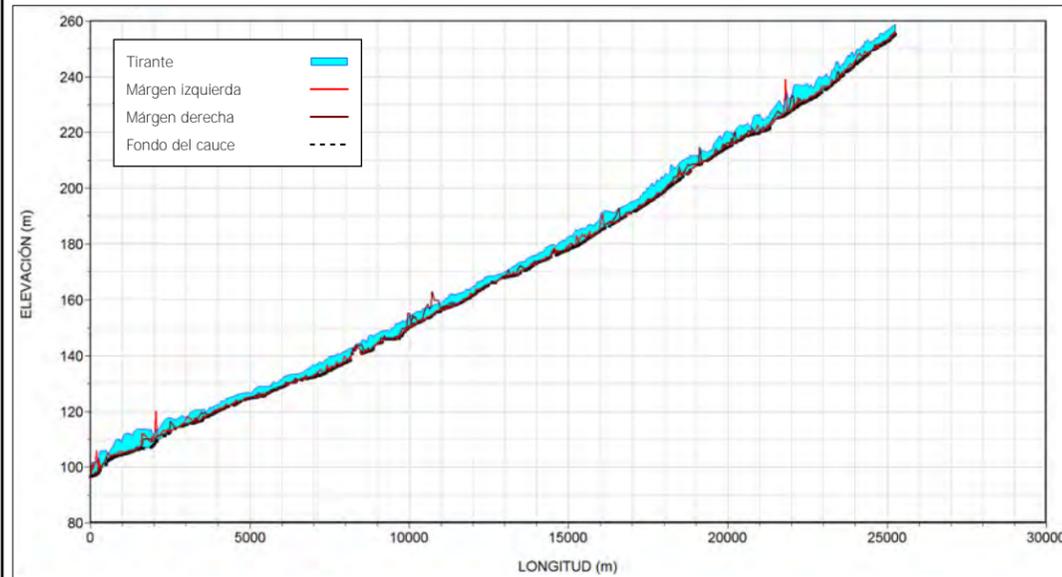
ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI

Escala Gráfica

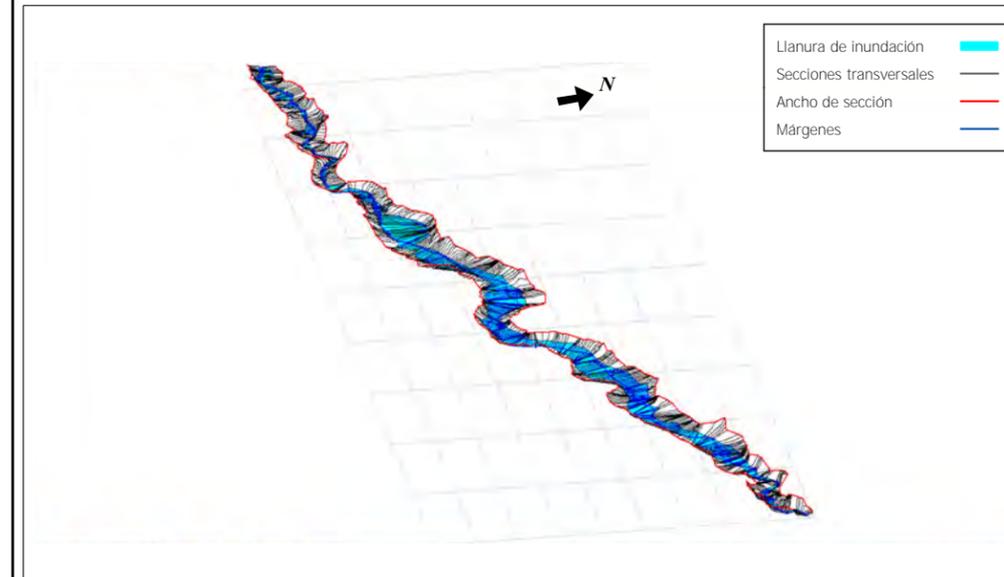




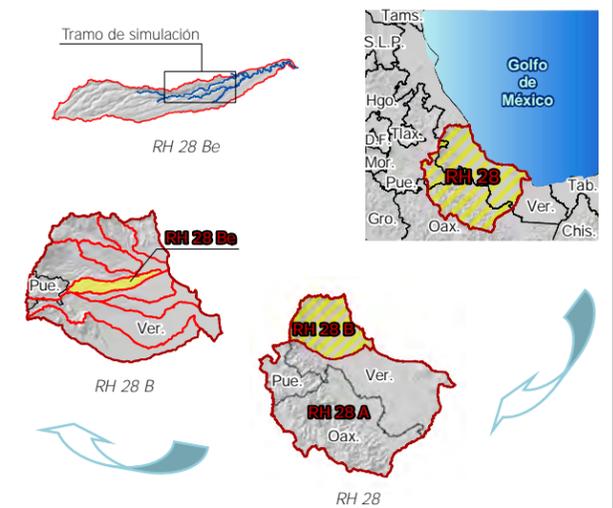
PERFIL LONGITUDINAL DEL TRAMO SANTA MARÍA



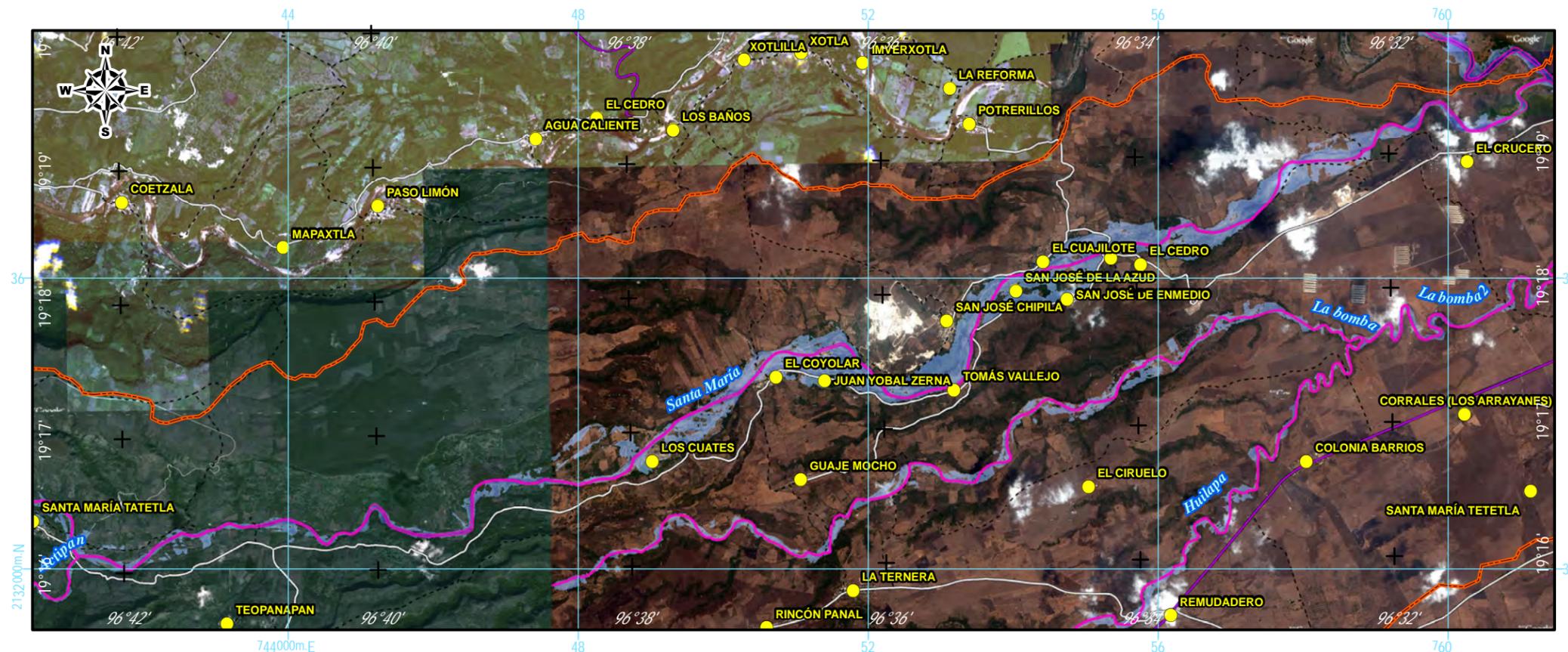
VISTA 3-D DEL TRAMO SANTA MARÍA



CROQUIS DE LOCALIZACIÓN



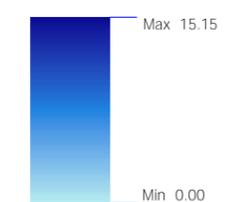
SIMULACIÓN HIDRÁULICA DEL TRAMO SANTA MARÍA



SIMBOLOGÍA

- Localidad ●
- Limite de la subcuenca —
- Márgenes —
- Carretera pavimentada —
- Terracería —
- Brecha - - -

Nivel del río (m)



INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
Elipsoide WGS1984
Datum Horizontal WGS1984
Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN ASOCIADA A LAS PRECIPITACIONES DEL HURACÁN KARL

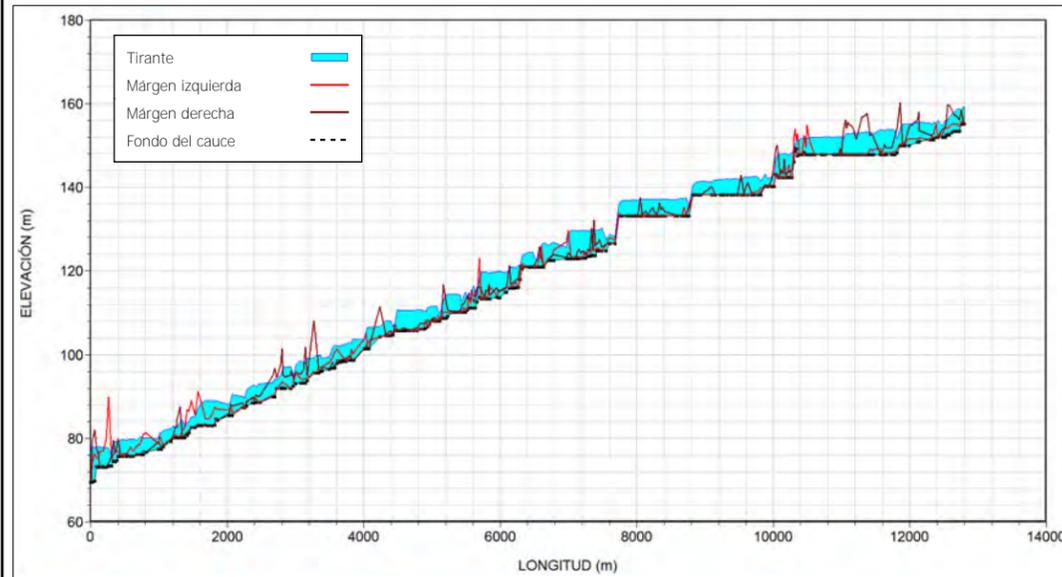
ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI

Escala Gráfica

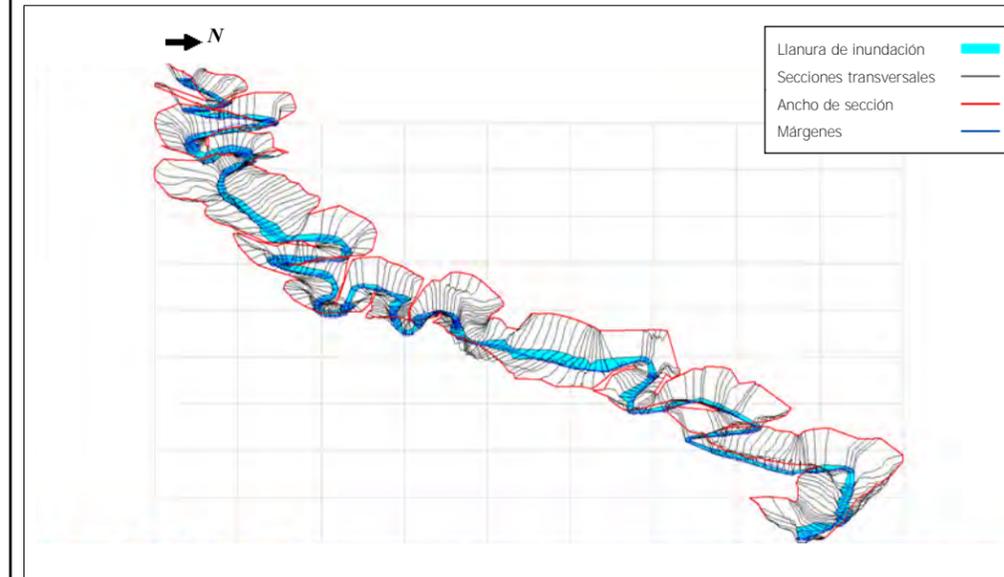




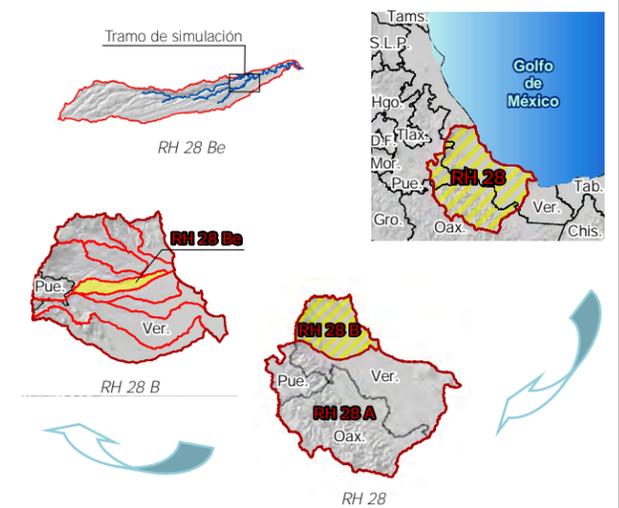
PERFIL LONGITUDINAL DEL TRAMO LA BOMBA 2



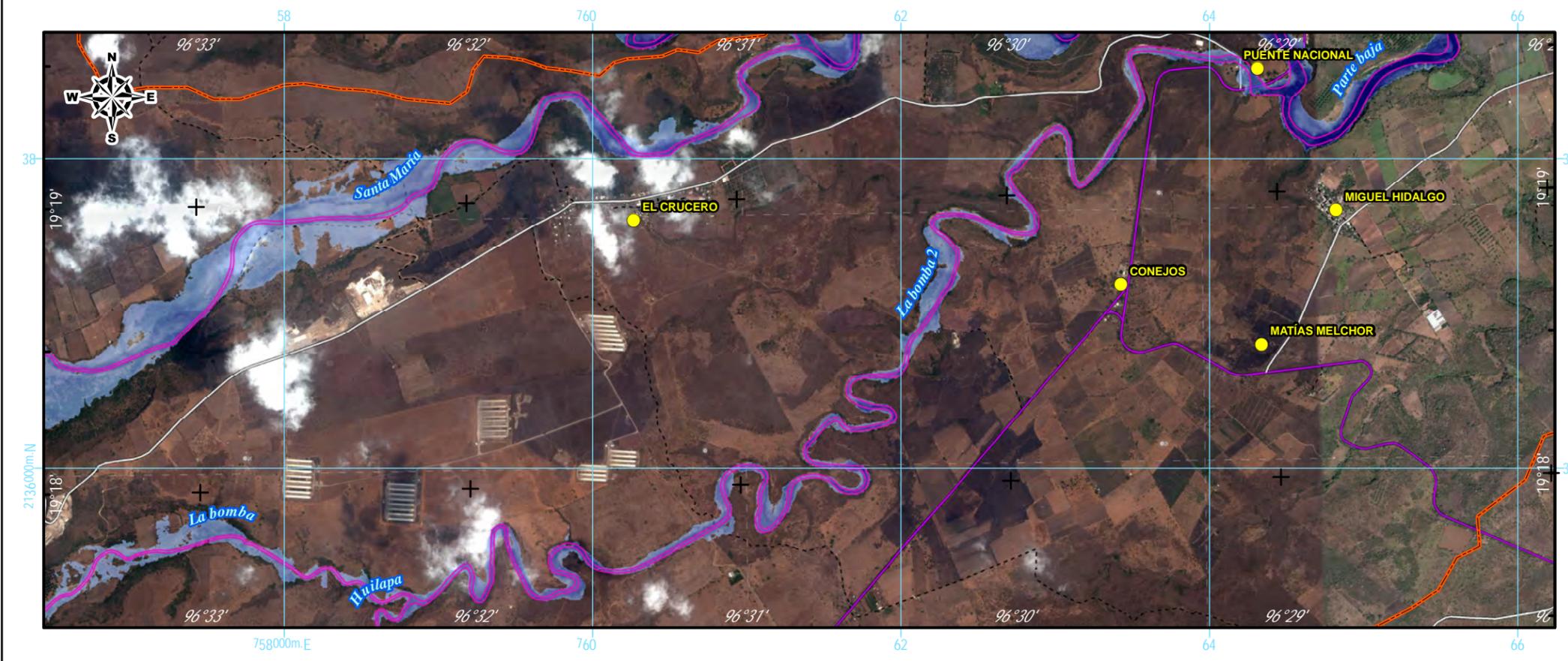
VISTA 3-D DEL TRAMO LA BOMBA 2



CROQUIS DE LOCALIZACIÓN



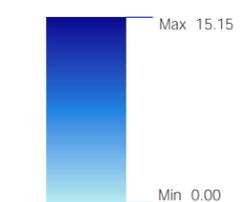
SIMULACIÓN HIDRÁULICA DEL TRAMO LA BOMBA 2



SIMBOLOGÍA

- Localidad ●
- Límite de la subcuenca —
- Márgenes —
- Carretera pavimentada —
- Terracería —
- Brecha - - -

Nivel del río (m)



INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

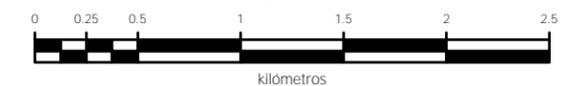
Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
Elipsoide WGS1984
Datum Horizontal WGS1984
Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN ASOCIADA A LAS PRECIPITACIONES DEL HURACÁN KARL

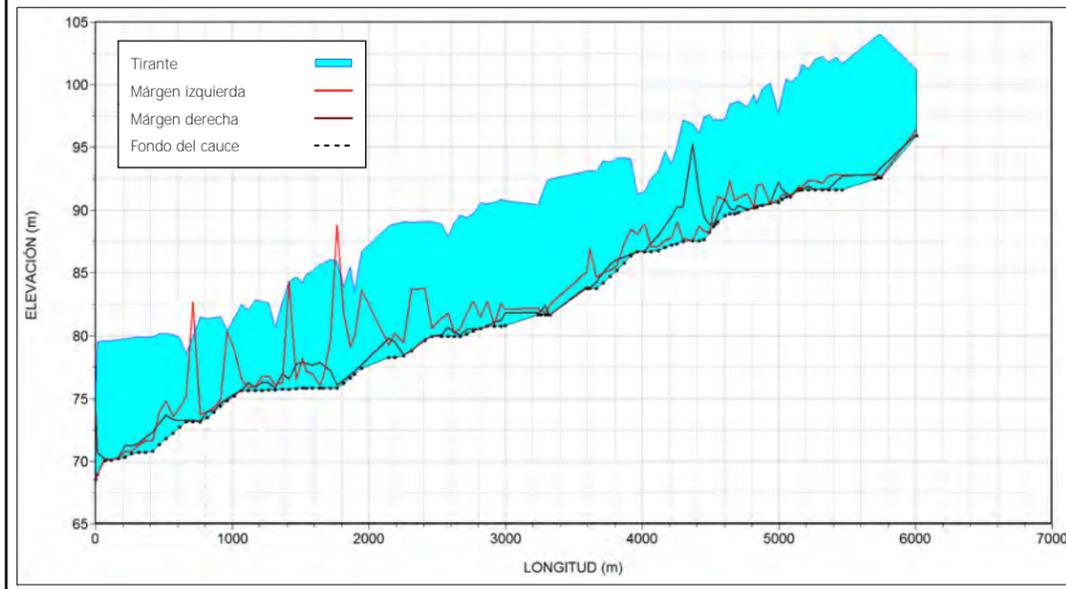
ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI

Escala Gráfica

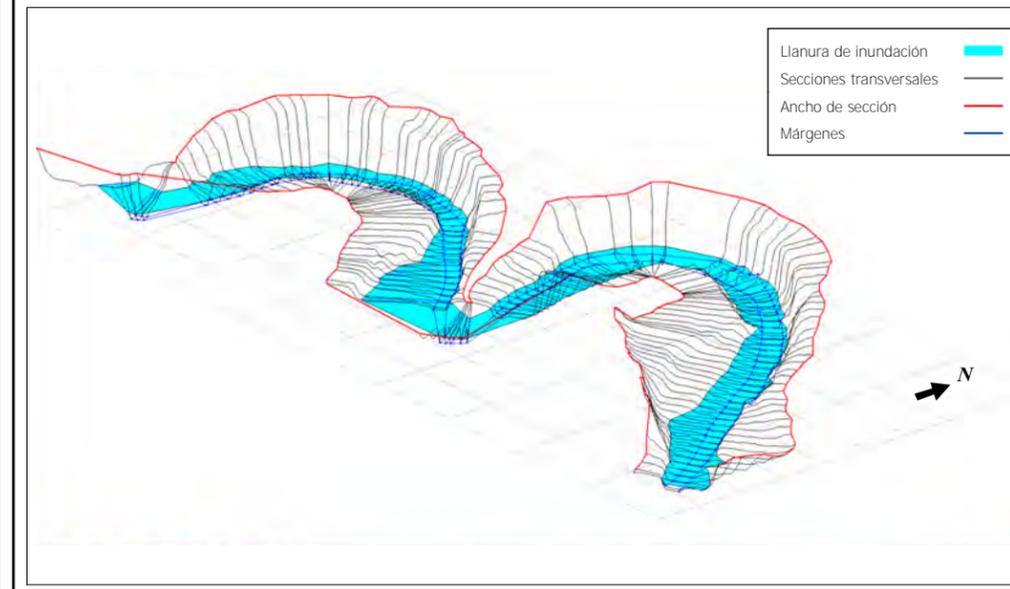




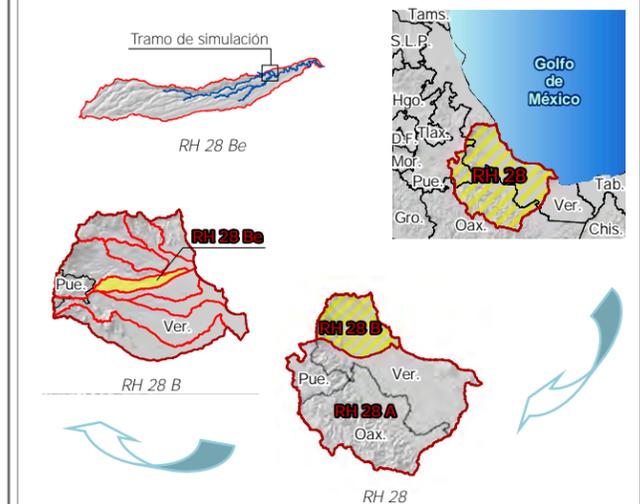
PERFIL LONGITUDINAL DEL TRAMO SANTA MARÍA 2



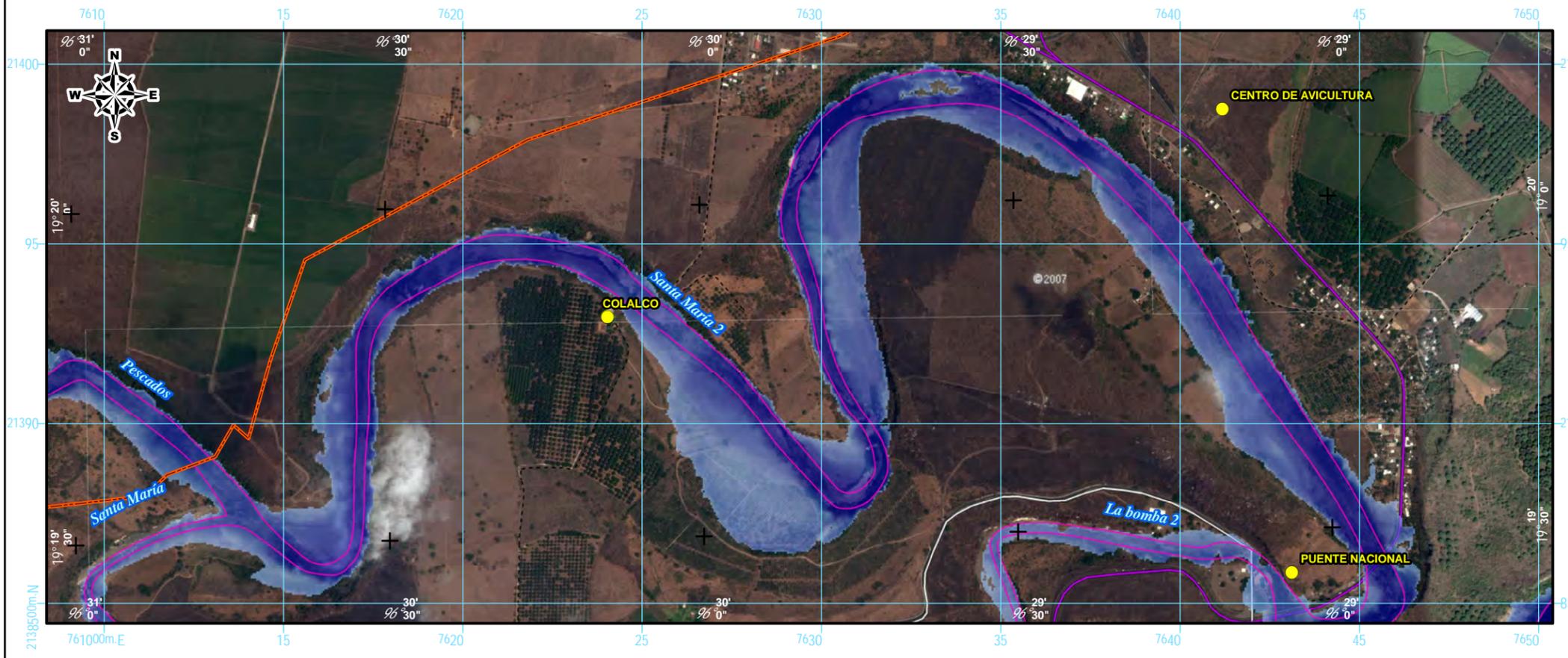
VISTA 3-D DEL TRAMO SANTA MARÍA 2



CROQUIS DE LOCALIZACIÓN



SIMULACIÓN HIDRÁULICA DEL TRAMO SANTA MARÍA 2



SIMBOLOGÍA



INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
Elipsoide WGS1984
Datum Horizontal WGS1984
Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN ASOCIADA A LAS PRECIPITACIONES DEL HURACÁN KARL

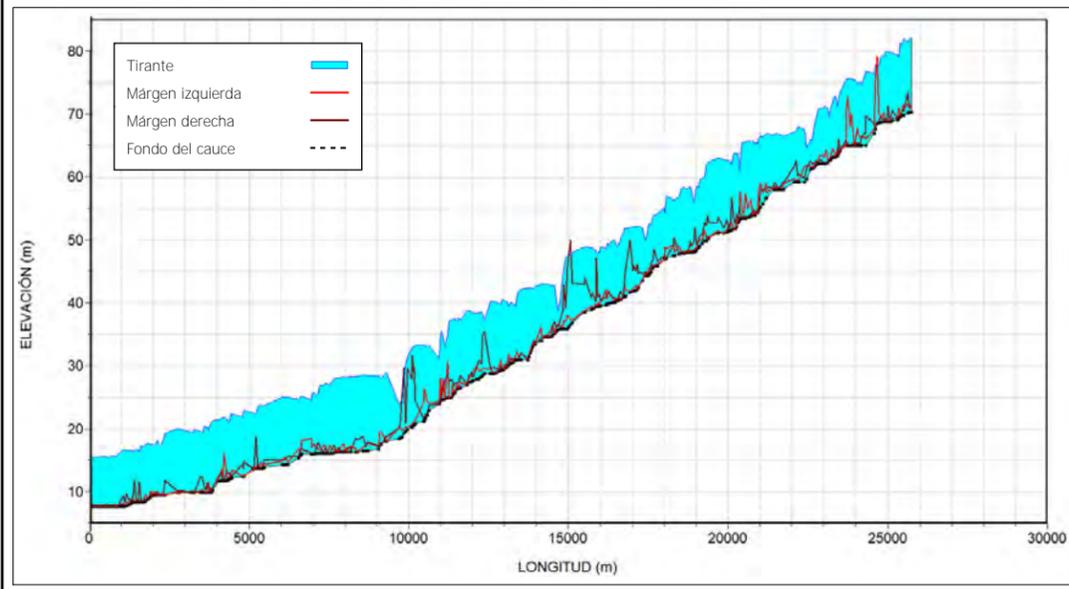
ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI

Escala Gráfica

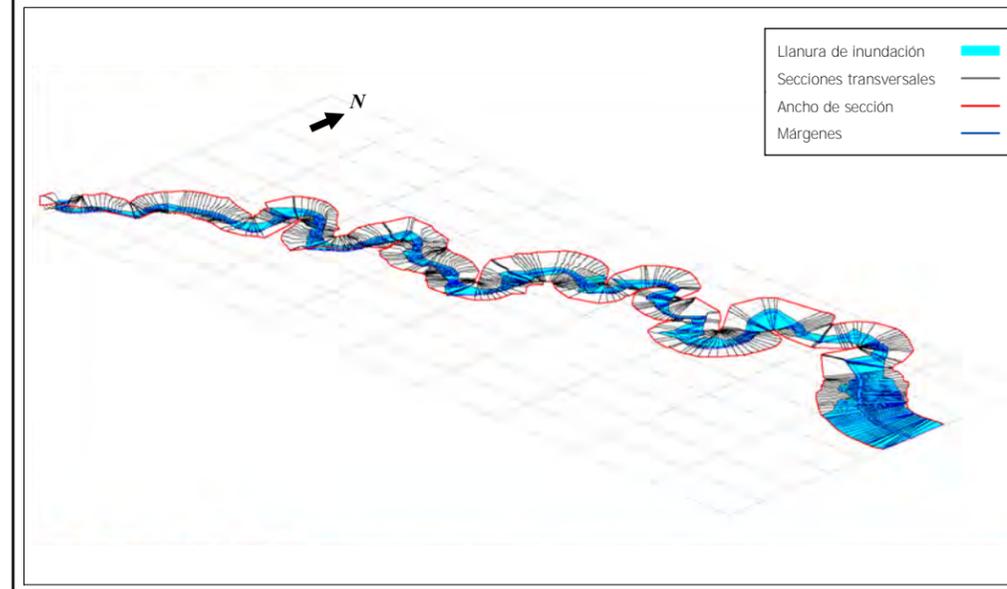




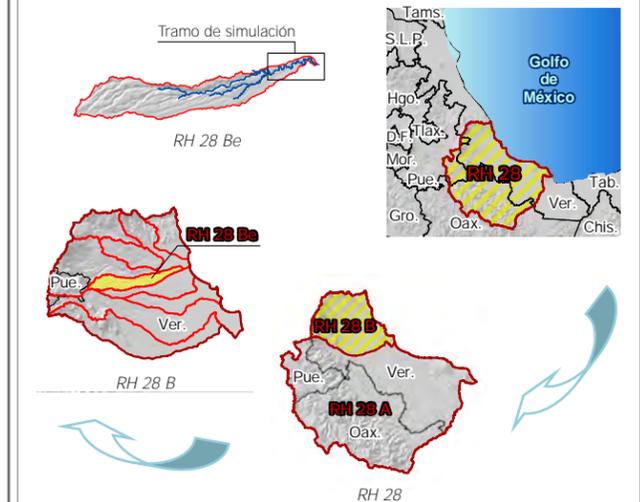
PERFIL LONGITUDINAL DEL TRAMO PARTE BAJA



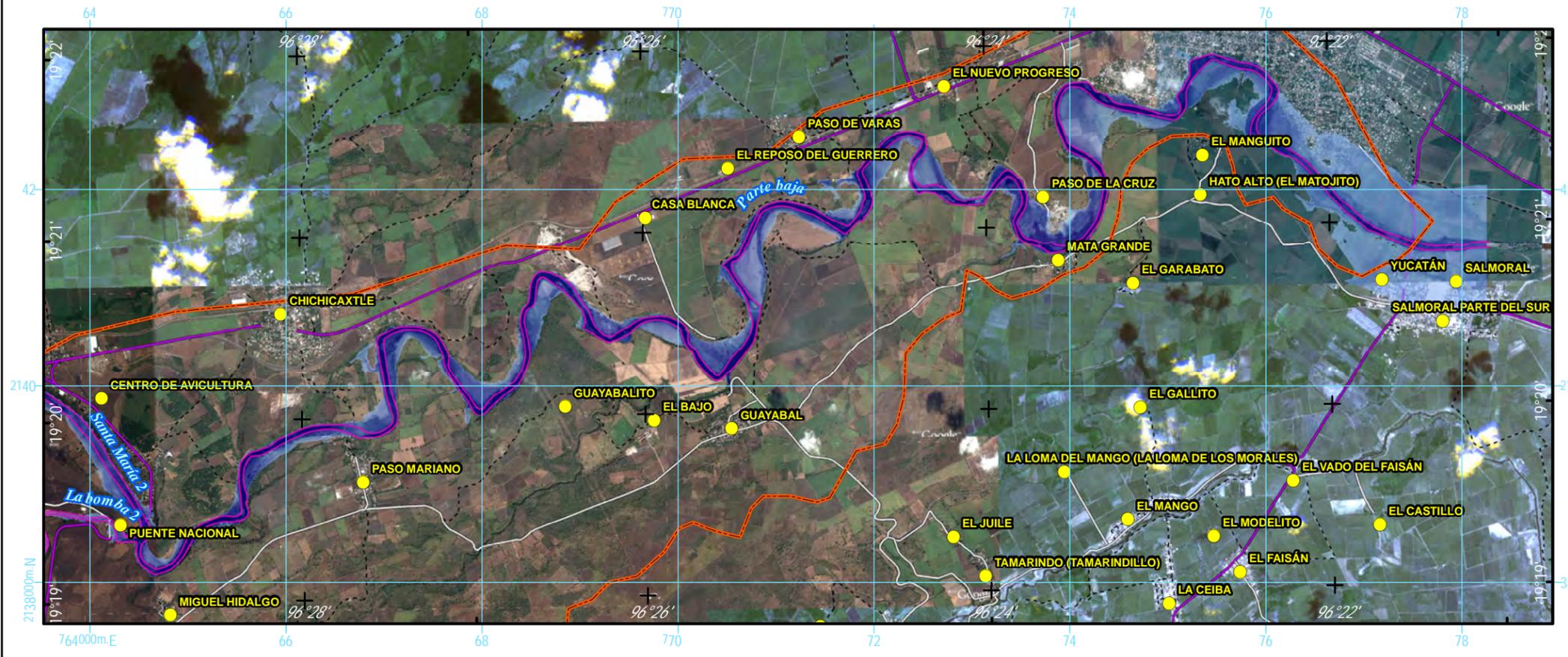
VISTA 3-D DEL TRAMO PARTE BAJA



CROQUIS DE LOCALIZACIÓN



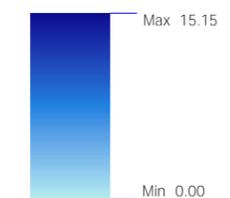
SIMULACIÓN HIDRÁULICA DEL TRAMO PARTE BAJA



SIMBOLOGÍA

- Localidad ●
- Limite de la subcuenca —
- Márgenes —
- Carretera pavimentada —
- Terracería —
- Brecha - - -

Nivel del río (m)



INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección Universal Transversa de Mercator (UTM)
Elipsoide WGS1984
Datum Horizontal WGS1984
Zona UTM 14N

RIESGO POR INUNDACIÓN ASOCIADA A EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LA ANTIGUA, VERACRUZ

ENVOLVENTE DE INUNDACIÓN ASOCIADA A LAS PRECIPITACIONES DEL HURACÁN KARL

ELABORÓ: HUGO LARIOS TLALI

Escala Gráfica

