



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**Modelación numérica para determinar el comportamiento
hidrodinámico en un tramo del Río Gallinas, San Luis Potosí,
en condiciones hidrometeorológicas extremas**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestro en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:

Ing. José Guadalupe Alejandrez Palacios

Asesor:

Dr. Clemente Rodríguez Cuevas

San Luis Potosí, S. L. P.

Enero de 2022



20 de mayo de 2021

**ING. JOSÉ GUADALUPE ALEJANDREZ PALACIOS
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Clemente Rodríguez Cuevas**, *Asesor de la Tesis* que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Tecnología y Gestión del Agua**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 20 de mayo del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"Modelación numérica para determinar el comportamiento hidrodinámico en un tramo del Río Gallinas, San Luis Potosí, en condiciones hidrometeorológicas extremas"

Introducción.

1. Antecedentes y descripción del área de estudio
2. Análisis hidrológico de la cuenca del Río Gallinas
3. Metodología para la determinación de la topo-batimetría y aforo de caudales
4. Modelos numéricos de flujo a superficie libre
5. Campañas de medición en el tramo de estudio
6. Modelación hidrodinámica del río

Conclusiones.

Referencias.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

A T E N T A M E N T E



DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR

DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCION

www.uaslp.mx

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP)**, la **Facultad de Ingeniería** y el **Centro de Investigación y Estudios de Posgrado (CIEP)**, por la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado dentro de su programa educativo.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)**, por la confianza brindada para ser becaria y estar en un posgrado de calidad, además del apoyo económico durante los dos años de maestría.

A mi director de tesis, el **Dr. Clemente Rodríguez**, por brindarme la oportunidad de trabajar bajo su dirección, por su colaboración, asesoría, disposición de tiempo y acompañamiento en el proceso de investigación.

A mis sinodales, el **Dr. Hermann Rocha** y el **Dr. Rodolfo Cisneros**, por las revisiones, comentarios, sugerencias, disposición, así como el seguimiento brindado durante esta etapa.

A mi novia, **Mónica Verdugo**, por haberme acompañado en esta etapa de mi vida, brindarme su apoyo incondicional, consejos, motivación, cariño, confianza y ser un pilar fundamental para alcanzar mis metas.

A mis **Maestros** por sus enseñanzas para desarrollarme profesionalmente y haberme brindado todos sus conocimientos.

A mis **padres y hermanos**, por el cariño, confianza y motivación para realizar las metas que me he propuesto.

A mis amigos y compañeros del posgrado, en especial a **Katya Onchi** y **Carlos Ontiveros**, por involucrarse en los trabajos de campo y compartir de su conocimiento, así como a **Lázaro González** por su amistad y apoyo durante este proceso.

Índice

Introducción	2
a. Planteamiento de la problemática	3
b. Zona de estudio	6
I. Macro localización	7
II. Micro localización	8
c. Objetivos	9
Objetivo general	9
Objetivos específicos	9
d. Hipótesis	9
1. Antecedentes y descripción del área de estudio	12
1.1. Marco teórico	13
1.1.1. Fenómenos hidrometeorológicos	13
1.1.2. Modelos numéricos	20
1.1.3. Estudios previos en la zona de estudio	26
1.2. Marco metodológico	34
1.2.1. Recopilación de información	34
1.2.2. Análisis hidrológico	34
1.2.3. Topografía del tramo a modelar	35
1.2.4. Aforo de caudales	36
1.2.5. Construcción del modelo numérico de flujo a superficie libre	36
1.2.6. Presentación y análisis de resultados	37
1.3. Caracterización de la zona de estudio	37
1.3.1. Unidades climáticas	37
1.3.2. Edafología	39
1.3.3. Uso de suelo y vegetación	42

1.3.4.	Fisiografía	44
1.3.5.	Regiones hidrológicas y cauce principal	46
1.3.6.	Hidrografía	49
1.3.7.	Geología	49
2.	Análisis hidrológico de la cuenca del Río Gallinas	56
2.1.	Introducción	56
2.1.1.	Ciclo hidrológico del agua.....	56
2.1.2.	Precipitación	57
2.1.3.	Evapotranspiración.....	57
2.1.4.	Escurrimiento	58
2.1.5.	Infiltración	58
2.2.	Geomorfología de la cuenca.....	59
2.2.1.	Delimitación de la cuenca.....	60
2.2.2.	Área y perímetro de la cuenca	60
2.2.3.	Forma de la cuenca.....	61
2.2.4.	Curva hipsométrica y elevación mediana de la cuenca	62
2.2.5.	Elevación mediana de la cuenca.....	64
2.2.6.	Elevación media de la cuenca.....	64
2.3.	Características de la red de drenaje	67
2.3.1.	Tipo de corrientes y cauce principal.....	67
2.3.2.	Orden de corrientes	67
2.3.3.	Densidad de drenaje	68
2.3.4.	Pendiente del cauce principal	68
2.3.5.	Tiempos de concentración	72
2.3.6.	Principales características geomorfológicas	72
2.4.	Análisis de la precipitación	73

2.4.1.	Estaciones climatológicas.....	74
2.4.2.	Deducción de datos faltantes.....	74
2.4.3.	Análisis de homogeneidad e independencia	75
2.4.4.	Selección de estaciones	76
2.4.5.	Precipitación media	78
2.4.6.	Precipitación máxima 24	80
2.4.7.	Análisis de frecuencias en hidrológica	82
2.4.8.	Funciones de distribución	83
2.5.	Curvas I – D – Tr.....	88
2.6.	Número de escurrimiento (N)	91
2.7.	Modelos lluvia - escurrimiento	93
2.7.1.	Estimación de lluvia en exceso.....	94
2.7.2.	Método Racional	95
2.7.3.	Método del Hidrograma Unitario Triangular	96
2.7.4.	Método de Ven Te Chow	97
2.7.5.	Método de Snyder.....	98
2.7.6.	Comparación y selección de escurrimientos de diseño	99
2.8.	Balance hidrológico superficial	100
2.8.1.	Precipitación media anual de la cuenca	100
2.8.2.	Evapotranspiración real y potencial.....	101
2.8.3.	Escurrimiento	102
2.8.4.	Infiltración	103
2.8.5.	Balance hídrico de la cuenca	103
2.9.	Caudal ecológico.....	106
3.	Metodología para la determinación de la topo-batimetría y aforo de caudales.	112

3.1. Topografía	112
3.1.1. Levantamientos topográficos	112
3.1.2. Sistemas de referencia	114
3.2. Puntos de Control Terrestre	116
3.2.1. Receptores GNSS	117
3.2.2. Levantamiento de los PCT	119
3.3. Fotogrametría	128
3.3.1. Clasificación de la fotogramétrica	128
3.3.2. Fotogrametría aérea	129
3.3.3. Levantamiento fotogramétrico	129
3.3.4. Metodología de la fotogrametría.....	133
3.4. Aforo de caudales.....	142
3.4.1. Técnicas de aforo convencional.....	142
3.4.2. ADCP	143
3.4.3. Metodología implementada.....	145
4. Modelos numéricos de flujo a superficie libre.....	152
4.1. Clasificación de modelos.....	152
4.1.1. Modelos unidimensionales.....	153
4.1.2. Modelos bidimensionales.....	153
4.1.3. Modelos numéricos implementados	156
4.2. EFDC Explorer.....	156
4.2.1. Ecuaciones implementadas	156
4.2.2. Procesos para la modelación en EFDC Explorer.....	161
4.2.3. Análisis de sensibilidad	167
4.2.4. Calibración y validación del EFDC.....	167
4.3. Hec – Ras.....	168

4.3.1.	Ecuaciones implementadas	169
4.3.2.	Procesos para la modelación en Hec – Ras.....	173
4.3.3.	Análisis de sensibilidad.....	176
4.3.4.	Calibración y validación del Hec – Ras	177
5.	Campañas de medición en el tramo de estudio	180
5.1.	Campaña topo-batimétricas.....	180
5.1.1.	Actividades preliminares.....	181
5.1.2.	Trabajo de campo	181
5.1.3.	Procesamiento de información.....	183
5.1.4.	Análisis de resultados obtenidos durante la campaña.....	186
5.2.	Campaña de aforo de caudales.....	187
5.2.1.	Actividades previas	188
5.2.2.	Monitoreo de caudales	189
5.2.3.	Procesamiento de información.....	190
6.	Modelación hidrodinámica del río.....	194
6.1.	EFDC Explorer.....	197
6.1.1.	Calibración del modelo	197
6.1.2.	Validación del modelo.....	199
6.1.3.	Caudal Tr de 25 años.....	202
6.1.4.	Flujo de caudal ecológico	211
6.2.	Hec – Ras.....	218
6.2.1.	Escenario de calibración del modelo	218
6.2.2.	Caudal Tr de 25 años	221
6.2.3.	Flujo de caudal ecológico	225
6.3.	Análisis de resultados	230
	Conclusiones	236

Referencias	242
Anexos	254
Anexo I – Funciones de distribución	254
Gamma dos parámetros - Factor de forma (a)	254
Gumbel - Constantes en función del tamaño de la muestra n	255
Anexo II – Clasificación de suelos y número de escurrimiento	256
Clasificación hidrológica de los tipos de suelo según su permeabilidad	256
Número de escurrimiento según la cobertura del suelo	257
Anexo III – Variable de evapotranspiración potencial.....	259
Número máximo de horas al sol.....	259
Valores de la Evapotranspiración potencial	260
Anexo IV - Softwares de procesamiento fotogramétrico	261
Anexo V – Especificaciones técnicas del equipo RiverRay ADCP	262

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tramo de Río Gallinas seco, imagen aérea captada con VANT.	4
Figura 2. Comparación de Cascada de Tamul con y sin agua.	5
Figura 3. Cascada de Tamul seca, imagen aérea captada con VANT.	5
Figura 4. Asentamientos de la localidad el Jabalí al margen izquierdo del Río Gallinas.	5
Figura 5. División política y regional de San Luis Potosí.	6
Figura 6. Ubicación del Río Gallinas y su cuenca.	7
Figura 7. Ubicación espacial del tramo a modelar.	8
Figura 1.1. Interrelación entre los tipos de sequía, principalmente en función del tiempo.	16
Figura 1.2. Componentes de un modelo.	21
Figura 1.3. Etapas de la modelación dinámica del agua.	25
Figura 1.4. Batimetría procesada de campañas de medición.	27
Figura 1.5. Batimetría del modelo numérico para la calidad del agua en el Río Gallinas.	28
Figura 1.6. Cadena de modelación hidro-climática utilizada por Velázquez Zapata et al.	29
Figura 1.7. Flujo de visitantes a la Huasteca Potosina en temporada de semana santa 201630	
Figura 1.8. Índice de Vulnerabilidad Social en la Huasteca y Zona Media.	33
Figura 1.9. Mapa de las unidades climáticas.	38
Figura 1.10. Mapa de la edafología en la zona de estudio.	41
Figura 1.11. Mapa con usos de suelo y vegetación en la cuenca del Río Gallinas.	44
Figura 1.12. Mapa con topoformas y provincias fisiográficas en la cuenca del Río Gallinas...	45
Figura 1.13. Región hidrológica de la cuenca del Río Gallinas.	48
Figura 1.14. Orografía y Red hidrográfica de la cuenca del Río Gallinas.	53
Figura 1.15. Geología de la cuenca del Río Gallinas.	54
Figura 2.1. Representación esquemática del ciclo hidrológico.	56
Figura 2.2. Características de la curva hipsométrica.	62
Figura 2.3. Curva hipsométrica de la cuenca Río Gallinas	64
Figura 2.4. Puntos para la elevación media de la cuenca Río Gallinas.	65
Figura 2.5. Perfil topográfico del Río Gallinas.	70
Figura 2.6. Estaciones climatológicas analizadas en la cuenca del Río Gallinas.	78
Figura 2.7. Isoyetas con la precipitación media anual en la cuenca de estudio.	80
Figura 2.8. Precipitaciones máximas en 24 horas en la cuenca del Río Gallinas.	81
Figura 2.9. Precipitación registrada vs funciones de distribución I.	87
Figura 2.10. Precipitación registrada vs funciones de distribución II	87
Figura 2.11. Curvas I - D - Tr, de la cuenca Río Gallinas.	91

Figura 2.12. Caudal ecológico mensual y anual.....	109
Figura 3.1. Elementos del sistema de referencia.....	115
Figura 3.2. Estructura de un GNSS.....	117
Figura 3.3. Equipo GNSS: antena R8s, trípode, triback y colectora TCS3.	119
Figura 3.4. Red Geodésica Nacional Activa.	122
Figura 3.5. Sistema de referencia de los PCT.	124
Figura 3.6. Ventana para importar datos crudos y RGNA.	124
Figura 3.7. Ventana con PCT importados.	125
Figura 3.8. Valores importados de la RGNA.	125
Figura 3.9. Punto de control de la RGNA.	126
Figura 3.10. Descarga de efemérides.....	126
Figura 3.11. Primer ajuste de líneas base.	126
Figura 3.12. Revisión de sesión, Antena - Constelación satelital.....	127
Figura 3.13. Procesamiento de líneas con resultado "Fijo".	127
Figura 3.14. Vant Phantom 4 Pro con control conectado a celular vía USB.....	131
Figura 3.15. Metodología implementada para procesamiento fotogramétrico.	134
Figura 3.16. Interfaz de DroneDeploy para plan de vuelo.	135
Figura 3.17. Revisión de componentes del VANT previo al vuelo.....	136
Figura 3.18. Flujo de trabajo en software fotogramétrico (procesos).	137
Figura 3.19. Colocacion de PCT sobre imágenes – Proceso fotogramétrico.	139
Figura 3.20. Configuración y resultado de la nube de puntos densa.....	139
Figura 3.21. Ventana para la clasificacion de pixeles y contrucción del mallado.....	140
Figura 3.22. Modelo digital de terreno.	141
Figura 3.23. Ejemplo de ortomosaico con zoom en recuadro rojo.	142
Figura 3.24. Relación efecto doppler-velocidad.	143
Figura 3.25. Equipo ADCP y GPS.....	144
Figura 3.26. Hydroboard, ADCP, GPS, lancha y caja con baterías y conexiones.	145
Figura 3.27. Configuración de periféricos ADCP y GPS.....	147
Figura 3.28. Configuración de equipo ADCP ajustando frecuencia de Badios.....	147
Figura 3.29. Laptop con WinRiver conectada al receptor de Bluetooth.	147
Figura 3.30. Requerimientos del diálogo de configuración.....	148
Figura 3.31. Calibración realizada previo al aforo de caudales.	149
Figura 3.32. Calibración del compás, imagen de Winriver II	149
Figura 3.33. Aforo de caudales en el Río Gallinas.....	150
Figura 3.34. Reporte del perfilador de corrientes.	150

Figura 4.1. Interfaz del EFDC Explorer.....	162
Figura 4.2. Imagen de malla de 3.5x5 metros al centro combinada con 7x5 metros.	163
Figura 4.3. Condiciones iniciales del modelo.	163
Figura 4.4. Pestaña para insertar las condiciones de frontera.	164
Figura 4.5. Ejemplo de condición de frontera – condición de flujo de entrada.	165
Figura 4.6. Pestaña para insertar el Timing / Linkage.	166
Figura 4.7. Pestaña de Hydrodynamics.	166
Figura 4.8. Comparación de resultados del modelo numérico e imágenes VANT.....	167
Figura 4.9. Calibración y validación del modelo.	168
Figura 4.10. Interfaz del Hec-Ras.	174
Figura 4.11. Eje y secciones transversales sobre el Río Gallinas.	175
Figura 4.12. Visualización del Río Gallinas, Cadenamiento 16+600 – 20+350.....	175
Figura 4.13. Ejemplo de sección en Hec – Ras.....	176
Figura 4.14. Condiciones de frontera (entrada de caudal e infiltraciones).	176
Figura 4.15. Análisis del comportamiento hidráulico del cauce y su topo-batimetría.	177
Figura 5.1. Campañas de medición topo-batimétricas.....	180
Figura 5.2. Posicionamiento de los PCT.	182
Figura 5.3. VANT Phantom 4 pro.....	182
Figura 5.4. Río Gallinas sobre localidad El Jabalí. Imagen capturada con VANT.....	183
Figura 5.5. Imagen capturada con VANT durante la campaña de Abril.	183
Figura 5.6. Puntos de control terrestre levantados.	185
Figura 5.7. Análisis de sección transversal 17+625.....	186
Figura 5.8. Análisis de sección transversal 4+700.....	187
Figura 5.9. Monitoreo de caudales, ubicación puente “El Carpintero”.	188
Figura 5.10. Monitoreo de caudales, ubicación “cascada de Tamul”.....	189
Figura 5.11. Aforo de caudales en los distintos puntos seleccionados.	190
Figura 5.12. Hidrograma en puente El Carpintero registrado en campaña de aforo.	191
Figura 5.13. Cascada de Tamul.....	191
Figura 6.1. Ubicación del tramo a modelar.	195
Figura 6.2. Monitoreo de caudales, modelo numérico y campaña de medición.....	198
Figura 6.3. Velocidad de salida registrada en el modelo numérico vs campaña de aforo. ...	198
Figura 6.4. RMSE estimado con EFDC.	199
Figura 6.5. Campaña de medición de caudales, recuperada de Robles (2019).....	199
Figura 6.6. Ubicación de puntos de control y campaña de aforo para validación del modelo.	200

Figura 6.7. RMSE estimado durante validación del modelo numérico.....	201
Figura 6.8. Caudal simulado punto 1.2 y caudal aforado.	201
Figura 6.9. Caudal simulado punto 2.1 y caudal aforado.	202
Figura 6.10. Caudal simulado Punto 3.4 y caudal aforado.	202
Figura 6.11. Hidrograma unitario por el método de Snyder para diferentes periodos de retorno.....	203
Figura 6.12. Nivel del agua (m) para Tr de 25 años (F).....	205
Figura 6.13. Velocidades (m/s) para Tr de 25 años (F).....	205
Figura 6.14. Nivel del agua (m) para Tr de 25 años (E).	206
Figura 6.15. Velocidades (m/s) para Tr de 25 años (E).....	206
Figura 6.16. Nivel del agua (m) para Tr de 25 años (D).....	207
Figura 6.17. Velocidades (m/s) para Tr de 25 años (D).	207
Figura 6.18. Nivel del agua (m) para Tr de 25 años (C).....	208
Figura 6.19. Velocidades (m/s) para Tr de 25 años (C).	208
Figura 6.20. Nivel del agua (m) para Tr de 25 años (B).	209
Figura 6.21. Velocidades (m/s) para Tr de 25 años (B).	209
Figura 6.22. Nivel del agua (m) para Tr de 25 años (A).	210
Figura 6.23. Velocidades (m/s) para Tr de 25 años (A).	210
Figura 6.24. Comportamiento del caudal a la salida del modelo.	211
Figura 6.25. Nivel del agua (m) para caudal ecológico (F).....	212
Figura 6.26. Velocidades (m/s) para caudal ecológico (F).....	212
Figura 6.27. Nivel del agua (m) para caudal ecológico (E).....	213
Figura 6.28. Velocidades (m/s) para caudal ecológico (E).....	213
Figura 6.29. Nivel del agua (m) para caudal ecológico (D).	214
Figura 6.30. Velocidades (m/s) para caudal ecológico (D).	214
Figura 6.31. Nivel del agua (m) para caudal ecológico (C).	215
Figura 6.32. Velocidades (m/s) para caudal ecológico (C).	215
Figura 6.33. Nivel del agua (m) para caudal ecológico (B).	216
Figura 6.34. Velocidades (m/s) para caudal ecológico (B).....	216
Figura 6.35. Nivel del agua (m) para caudal ecológico (A).	217
Figura 6.36. Velocidades (m/s) para caudal ecológico (A).....	217
Figura 6.37. Secciones transversales con velocidades (estaciones 0+775 - 0+850).....	220
Figura 6.38. Perfil del tirante de agua; Q=1231.8m ³ /s – cadenamiento 15+000 – 20+350..	221
Figura 6.39. Perfil del tirante de agua; Q=1231.8m ³ /s – cadenamiento 10+000 – 15+000..	222
Figura 6.40. Perfil del tirante de agua; Q=1231.8m ³ /s – cadenamiento 5+000 – 10+000....	222

Figura 6.41. Perfil del tirante de agua; $Q=1231.8\text{m}^3/\text{s}$ – cadenamiento 0+000 – 5+000.	222
Figura 6.42. Imagen tridimensional; $Q=1231.8\text{m}^3/\text{s}$ – Cadenamiento 17+000 – 20+350.	225
Figura 6.43. Perfil del tirante de agua; Q ecológico – cadenamiento 15+000 – 20+350.	226
Figura 6.44. Perfil del tirante de agua; Q ecológico – cadenamiento 10+000 – 15+00.	226
Figura 6.45. Perfil del tirante de agua; Q ecológico – cadenamiento 5+000 – 10+000.	226
Figura 6.46. Perfil del tirante de agua; Q ecológico – cadenamiento 0+000 – 5+000.	227
Figura 6.47. Imagen tridimensional; Q ecológico – Cadenamiento 0+000 – 2+000.	227
Figura 6.48. Comparación EFDC y Hec – Ras, $Tr=25$ años (F).	231
Figura 6.49. Comparación EFDC y Hec – Ras, $Tr=25$ años (D).	231
Figura 6.50. Comparación EFDC y Hec – Ras, $Tr=25$ años (B).	232
Figura 6.51. Comparación EFDC y Hec – Ras, $Tr=25$ años (A).	232
Figura 6.52. Comparación EFDC y Hec – Ras, Q Ecológico (F).	233
Figura 6.53. Comparación EFDC y Hec – Ras, Q Ecológico (A).	233

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Unidades climáticas de la zona de estudio.....	39
Tabla 1.2. Tipos de suelos de la cuenca del Río Gallinas.	40
Tabla 1.3. Subunidades de suelos de la cuenca del Río Gallinas.	41
Tabla 1.4. Edafología de la cuenca del Río Gallinas.	42
Tabla 1.5. Uso del suelo de la cuenca del Río Gallinas.	43
Tabla 1.6. Características de las subprovincias presentes en la cuenca de estudio.	46
Tabla 1.7. Fisiografía y topoformas en la cuenca del Río Gallinas.	46
Tabla 1.8. Eras y periodos geológicos.	51
Tabla 1.9. Tipos y clases de rocas presentes en la cuenca de estudio.	52
Tabla 2.1. Clasificación propuesta para cuencas.	60
Tabla 2.2. Clasificación del factor de forma (Kf).....	61
Tabla 2.3. Clasificación del factor de forma (Cc).	62
Tabla 2.4. Datos para obtención de la curva hipsométrica de la cuenca del Río Gallinas.	63
Tabla 2.5. Valores para la elevación media de la cuenca.	65
Tabla 2.6. Tipo de terreno según la pendiente del cauce principal.	69
Tabla 2.7. Valores para el cálculo de la pendiente Taylor – Schwartz.....	70
Tabla 2.8. Tiempos de concentración del cauce principal.	72
Tabla 2.9. Características geomorfológicas de cuenca y cauce.	73
Tabla 2.10. Estaciones climatológicas analizadas.....	77
Tabla 2.11. Precipitación media anual de la cuenca Río Gallinas.....	79
Tabla 2.12. Precipitaciones máximas en 24 horas en la cuenca del Río Gallinas.....	82
Tabla 2.13. Factores de frecuencia K de la distribución normal y log normal.	83
Tabla 2.14. Comparación de la precipitación registrada con la estimada mediante las funciones de distribución.	85
Tabla 2.15. Precipitación máxima diaria asociada a un periodo de retorno (Tr).....	88
Tabla 2.16. Relación lluvia – duración (R) para la zona de estudio.	90
Tabla 2.17. Parámetros y variables de la fórmula de Chen para la zona de estudio.....	90
Tabla 2.18. Intensidad (mm) – Duración (min) – para distintos periodos de retorno.	90
Tabla 2.19. Número de escurrimiento de la cuenca Río Gallinas.	92
Tabla 2.20. Valores recomendados para el parámetro (e) en la ecuación de Kuischling.	94
Tabla 2.21. Valores de Hp, Hpd y He; en la cuenca Río Gallinas.	95
Tabla 2.22. Gastos máximos por el método Racional.	96
Tabla 2.23. Gastos máximos por el método H. U. T.....	96

Tabla 2.24. Gastos máximos por el método de Ven Te Chow,.....	98
Tabla 2.25. Gastos máximos por el método de Snyder.....	99
Tabla 2.26. Comparación de avenidas máximas por distintos métodos.....	99
Tabla 2.27. Balance hidrológico superficial por años de la cuenca Río Gallinas.	104
Tabla 2.28. Recomendación de porcentajes de caudales por objetivos ambientales.....	108
Tabla 3.1. Características técnicas del Phantom 4 pro.....	132
Tabla 4.1. Valores de las condiciones del flujo – condiciones de frontera.	165
Tabla 5.1. PCT y planes de vuelo realizados durante las campañas de medición.....	182
Tabla 5.2. Coordenadas ajustadas de los PCT.	184
Tabla 5.3. Valores de caudal y velocidad registrados a 800m de la cascada de Tamul.	191
Tabla 6.1. Valores de RMSE para validación del modelo numérico.....	201
Tabla 6.2. Resultados Río Gallinas en Hec – Ras para escenario de calibración.	219
Tabla 6.3. Reporte de variables hidráulicas a cada 250 metros $Q=1231.8\text{m}^3/\text{s}$	223
Tabla 6.4. Reporte de variables hidráulicas a cada 250 metros Q ecológico.....	228

Introducción

Introducción

El agua es uno de los recursos naturales más valiosos de cualquier país debido a los beneficios sociales y económicos que se derivan de su consiente explotación; sin embargo junto con las ventajas existen también situaciones hidrometeorológicas extremas tales como las inundaciones y las sequías (CENAPRED, 2019).

En las últimas décadas, las inundaciones representaron la principal causa de los desastres relacionados con el clima en todo el mundo (CRED, 2015). Las afectaciones ocasionadas por las inundaciones han aumentado recientemente, ya sea en términos de pérdidas económicas (Kundzewicz *et al.*, 2014) o del número de eventos de inundaciones ocurridas (Camilloni *et al.*, 2020),

Mientras que la sequía produjo daños en América Latina, en el periodo 2005 – 2015 en la agricultura y ganadería por 13.000 millones de dólares (FAO, 2017).

La existencia de diversos escenarios hidrometeorológicos, los cuales varían con el tiempo, hace que la predicción del comportamiento de un cuerpo de agua se vuelva complejo. Sin embargo, es posible determinar la respuesta hidrodinámica de un cauce mediante la elaboración de modelos físicos a escala o modelos numéricos, logrando entender, predecir y controlar los procesos físicos que ocurren en un cuerpo de agua.

La modelación numérica es una herramienta novedosa que proporciona conocimiento de procesos físicos en general y, en particular de flujos hidrodinámicos. Las modelaciones utilizadas para predecir el comportamiento de un cauce proporcionan información sobre variables relevantes como la superficie libre del agua, el tirante, la velocidad del flujo y el caudal. Hoy en día se trata de una práctica necesaria dentro de la tecnología hidráulica moderna, ya que ofrece la posibilidad de evaluar, de una forma no muy costosa, la respuesta de los sistemas hidráulicos frente a una gran variedad de situaciones prácticas (Murillo *et al.*, 2008).

El uso de modelos numéricos para determinar la respuesta hidráulica de cualquier cuerpo de agua, se ha convertido en la principal herramienta implementada debido a los beneficios que estos presentan.

Actualmente existe una gran variedad de software que simulan el comportamiento hidrodinámico, haciendo posible simular el comportamiento del cuerpo de agua para distintos escenarios hipotéticos (Salamea, 2015), logrando un amplio panorama del comportamiento hidráulico del cuerpo de agua en cuestión.

El desarrollo de esta tesis consiste en determinar las respuestas de las variables hidráulicas de diversos escenarios hidrometeorológicos extremos, mediante el uso de modelaciones numéricas, en un tramo del Río Gallinas, ubicado en la Huasteca Potosina. Para ello, es necesario generar información de la topo-batimetría del cauce, así como un análisis hidrológico y climatológico de la cuenca de estudio que permita caracterizar el entorno físico del cauce y los escenarios con los que se ejecutarán los modelos hidrodinámicos.

a. Planteamiento de la problemática

La Huasteca Potosina representa desde el punto de vista socioeconómico, la segunda región más importante de San Luis Potosí. Donde por su ubicación geográfica, cuenta con una estructura productiva de grandes extensiones dedicadas a la ganadería, agricultura, comercio y servicios (Castañeda Camacho *et al.*, 2018; Martínez Melgarejo, 2018).

Dentro de la Huasteca Potosina se encuentra el Río Gallinas, objeto de este estudio. La cuenca del Río Gallinas resalta principalmente por el cultivo de la caña, la ganadería y el turismo, producto de los bellos paisajes y cascadas a los alrededores del cauce (Gobierno del Estado de San Luis Potosí, 2016). Por consiguiente, cualquier alteración en el comportamiento hidráulico del cauce afecta directamente a su entorno físico, a las actividades económicas y a los asentamientos cercanos.

La alteración al comportamiento hidráulico del río, deriva de la variabilidad climática observada en la región y del inadecuado manejo de los recursos hídricos, provocando diversos problemas de escasez en la zona (Pereda & Padilla, 2016; Velázquez Zapata *et al.*, 2020).

Recientemente durante la temporada de estiaje, entre los meses de marzo y mayo de los años 2016, 2017, 2019, 2020 y 2021 el Río Gallinas dejó de presentar flujo constante en la parte baja del cauce, ocasionando que varios tramos del río (Figura 1),

así como en la cascada de Tamul se secan (Figura 2 y Figura 3) (Frontal Noticias, 2021; Plano Informativo, 2016; Pulso SLP, 2019; SDP Noticias, 2017).

Así mismo, durante el temporal de lluvias (junio – octubre) el volumen de escurrimiento incrementa, elevando el tirante, la velocidad y el caudal del cauce, provocando el desbordamiento del río en algunos tramos (Código San Luis, 2017; San Luis a Tiempo, 2017), ocasionando accidentes (Plano Informativo, 2020) y afectando a los asentamientos cercanos (Figura 4), vías de acceso y actividades económicas de la región.

Debido a las afectaciones sociales, económicas, culturales y paisajísticas que se presentan y que pueden incrementar tanto en intensidad como en ocurrencia, nace el interés por conocer y el comportamiento hidrodinámico del cauce en presencia de escenarios hidrometeorológicos extremos.

De modo que, el primer escenario hidrometeorológico está relacionado con el comportamiento del cauce durante la temporada de estiaje, donde el Río Gallinas se ha presentado sin flujo constante en algunos tramos, en contraste, el segundo escenario se relaciona con la presencia de precipitaciones máximas extraordinarias y la identificación de zonas susceptibles a desbordamiento e inundación.

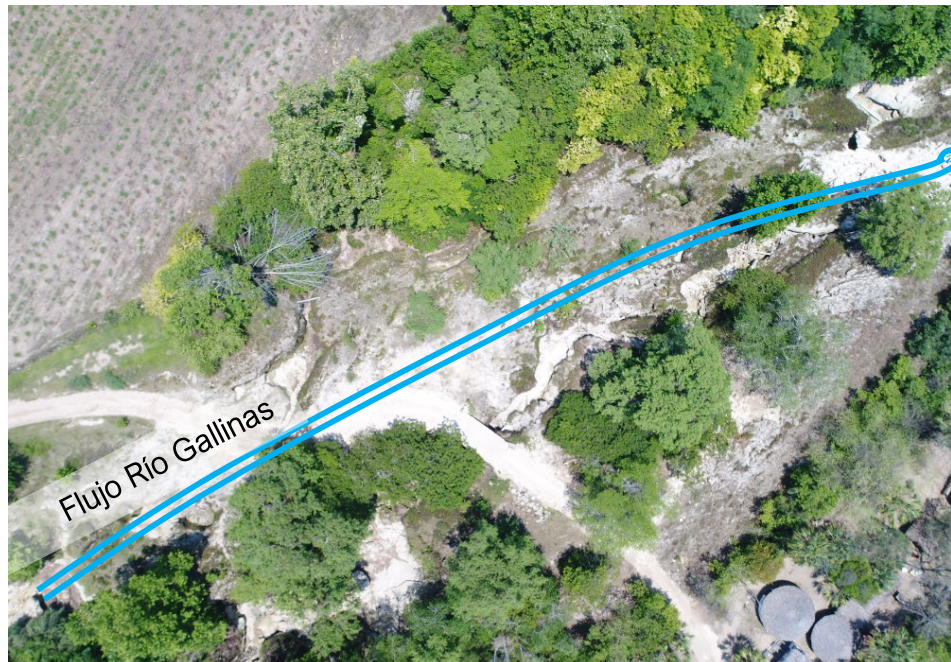


Figura 1. Tramo de Río Gallinas seco, imagen aérea captada con VANT.



Figura 2. Comparación de Cascada de Tamul con y sin agua.

Fuente: <https://metropolisanluis.com/2016/03/se-seca-la-cascada-tamul-la-mas-alta-san-luis-potosi/>



Figura 3. Cascada de Tamul seca, imagen aérea captada con VANT.



Figura 4. Asentamientos de la localidad el Jabalí al margen izquierdo del Río Gallinas.

b. Zona de estudio

El área de estudio, conformada por la cuenca del Río Gallinas, se encuentra en la Huasteca Potosina, la cual, es una de las cuatro zonas que constituyen el estado de San Luis Potosí (Figura 5), localizada en la porción este del estado, dentro de la Sierra Madre Oriental y las planicies costeras del Golfo de México.

La región huasteca, integrada por 20 municipios que contrastan por su amplia diversidad fisiográfica y cultural, es favorecida por las masas de aire húmedo que se desplazan del golfo y, en su geografía accidentada confluyen importantes redes fluviales que propician ríos; cascadas imponentes; innumerables parajes y cavidades naturales (Lara Lárraga, 2014).

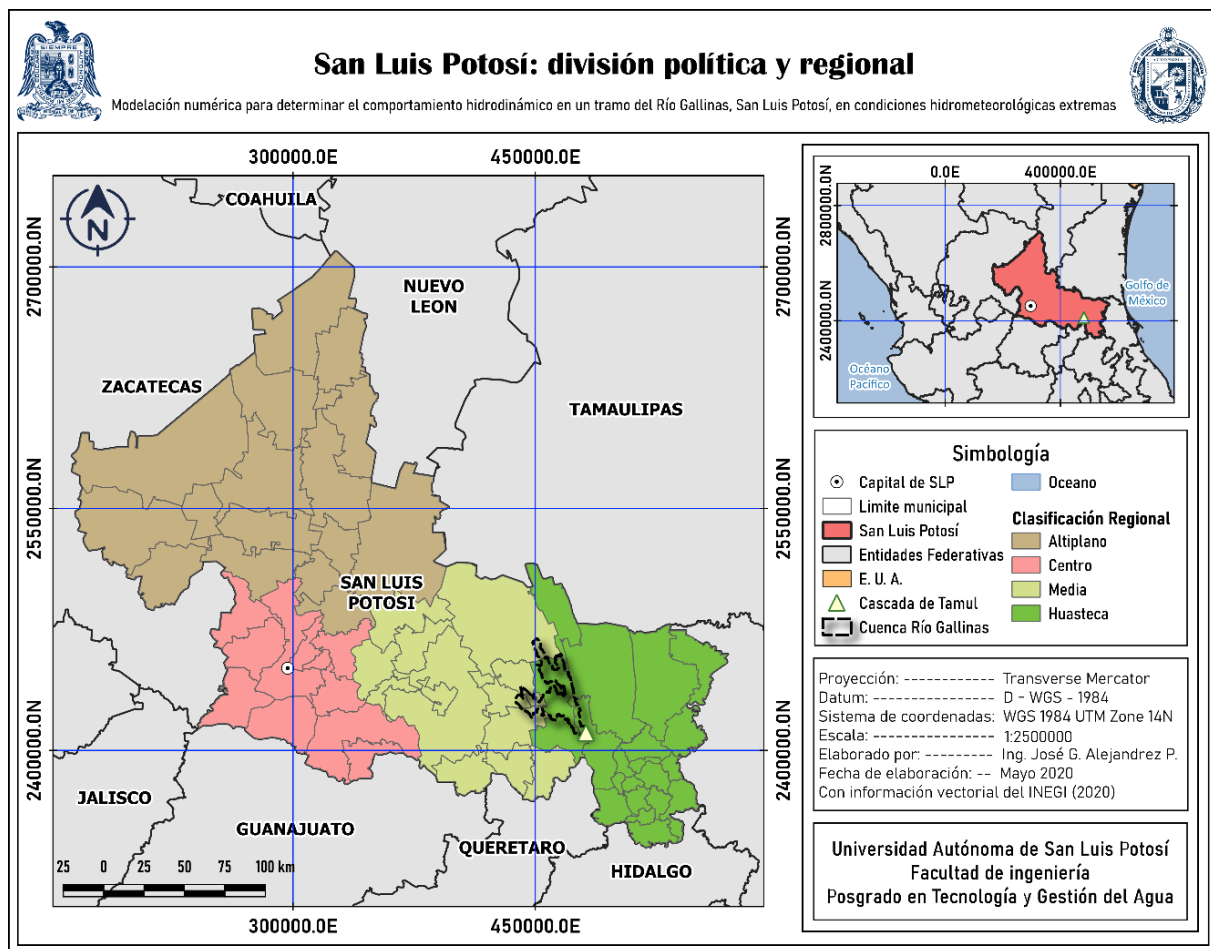


Figura 5. División política y regional de San Luis Potosí.

I. Macro localización

El Río Gallinas ubicado en el municipio de Tamasopo, da origen a la cascada de Tamul, situada entre los municipios de Tamasopo y Aquismón (Secretaría del Turismo, n.d.). La cascada cuenta con una altura de 105 metros, siendo la caída de agua más grande y representativa del estado.

La cuenca de la zona de estudio se encuentra inmersa principalmente en el municipio de Tamasopo y, en menor proporción abarca parte de los municipios de Rayón, Cárdenas, Alaquines, Ciudad del Maíz, El Naranjo, Aquismón y Ciudad Valles (Figura 6).

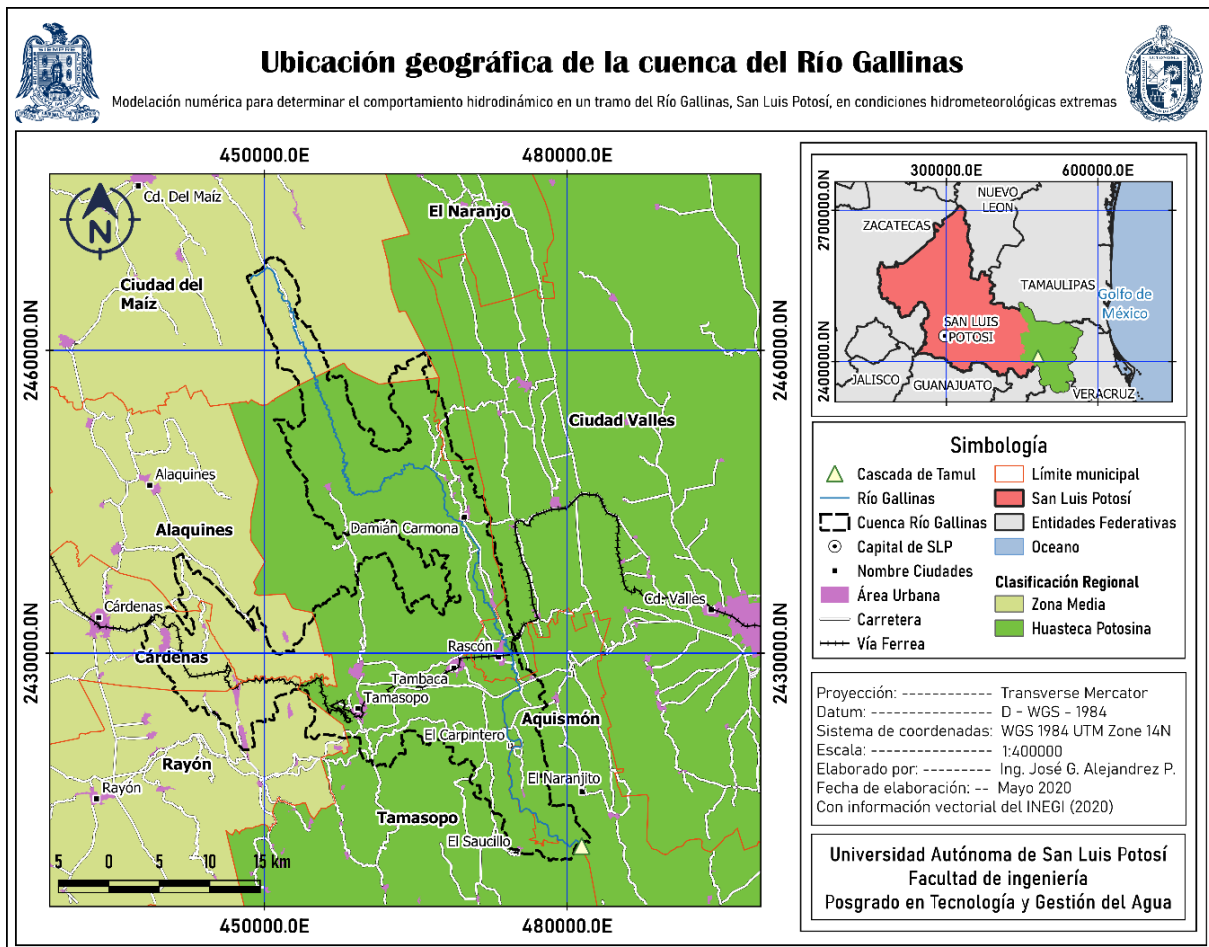


Figura 6. Ubicación del Río Gallinas y su cuenca.

II. Micro localización

El tramo del modelo inicia en el puente *El Carpintero* a un kilómetro de la localidad del mismo nombre, ubicado en el cruce del Río Gallinas con la carretera federal Rioverde – Ciudad Valles, el tramo del modelo continúa aguas abajo por el cauce rectilíneo con algunas sinuosidades durante 20.35 km, hasta llegar a la cascada de Tamul donde finaliza el área a modelar (Figura 7).

Acceder al sitio de interés desde la capital del estado de San Luis Potosí, se logra conduciendo por la carretera federal libre México 70 o la autopista 75D con rumbo a Rioverde. Posteriormente, continuar por la carretera México 70 con dirección a Ciudad Valles, superando las cabeceras municipales de Rayón y Tamasopo hasta llegar a las localidades de El Jabalí, Aquismón y El Carpintero, Tamasopo.

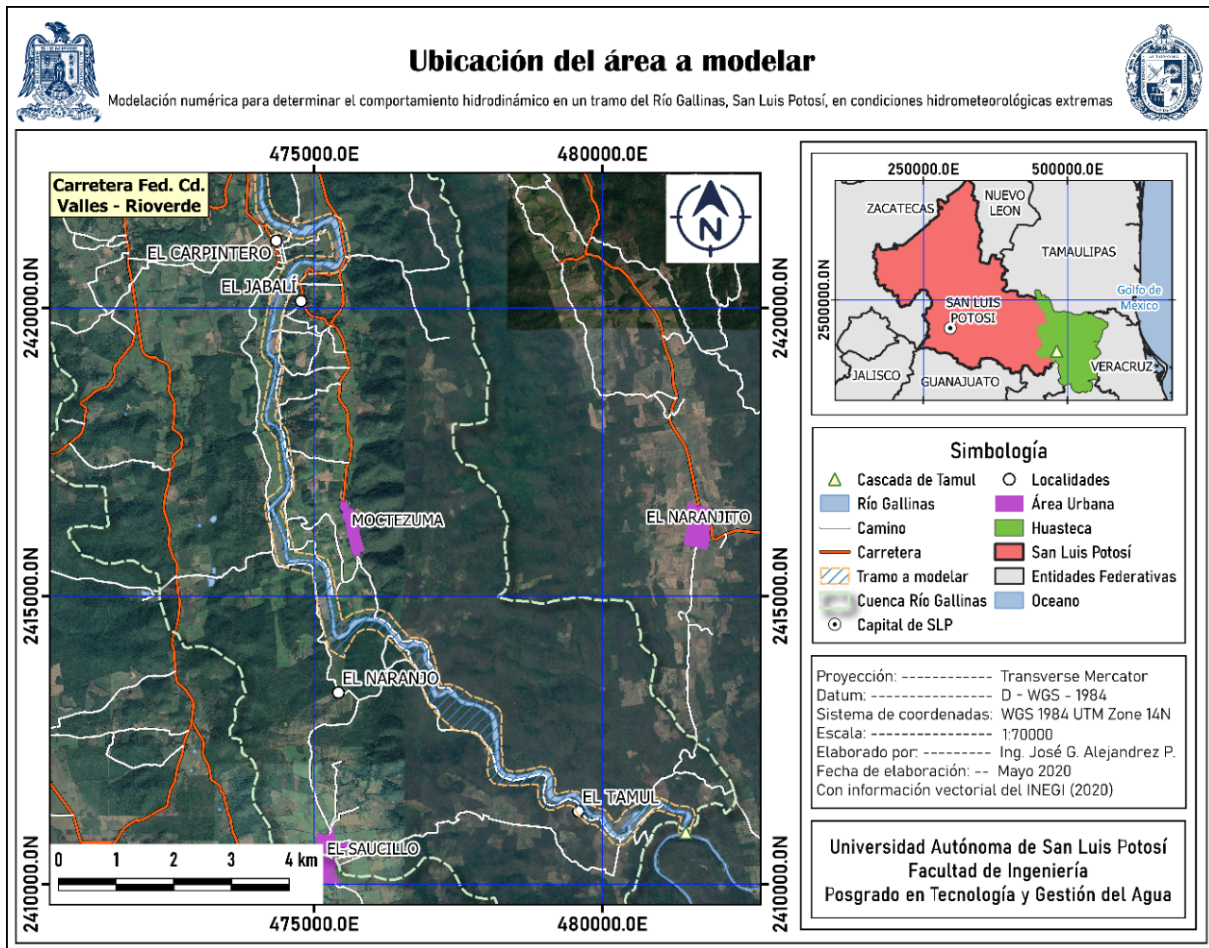


Figura 7. Ubicación espacial del tramo a modelar.

c. Objetivos

Objetivo general

Determinar el comportamiento hidrodinámico de un tramo del Río Gallinas bajo diferentes escenarios hidrometeorológicos extremos, utilizando modelaciones numéricas.

Objetivos específicos

- Determinar las condiciones hidrológicas de la cuenca del Río Gallinas para obtener los escenarios hidrometeorológicos extremos.
- Obtener la topografía del tramo a modelar mediante fotogrametría para caracterizar la superficie del cauce en el modelo numérico.
- Validar el modelo numérico utilizando los datos obtenidos en las campañas de medición.
- Evaluar la respuesta hidráulica en un tramo del Río Gallinas ante el caudal del periodo de retorno de 25 años mediante modelos numéricos para identificar las áreas inundables.
- Determinar las condiciones hidráulicas que permitan un flujo constante sobre la cascada de Tamul para un escenario crítico durante la temporada de estiaje.

d. Hipótesis

La disminución de los gastos del Río Gallinas durante la temporada de estiaje es influenciada por las actividades humanas, las infiltraciones del cauce, así como a la variabilidad climática presente en la zona de estudio, ocasionando que el cauce se seque en algunos tramos.

El cauce presentará desbordamientos en puntos específicos, donde debido a la sinuosidad del cauce y a la falta de capacidad hidráulica del mismo, causará desbordamientos e inundaciones en algunos tramos del río.

Capítulo 1. Antecedentes y descripción del área de estudio

1. Antecedentes y descripción del área de estudio

Los cambios que la humanidad ha realizado al medio ambiente han ocurrido desde el origen mismo de ésta. Por su parte el clima, definido como el ambiente atmosférico constituido por una serie de estados de la atmosfera sobre un lugar determinado (Campos Aranda, 1984), también ha variado de diversas maneras desde el inicio de la historia del planeta. Sin embargo, las alteraciones en el último siglo y medio, tanto en la naturaleza como en el clima, no tienen precedentes por la velocidad con la que ocurren, poniendo en riesgo el propio futuro de la sociedad (SEMARNAT, 2008).

La climatología, el estudio del clima, implica el conocimiento de los elementos de la atmósfera tales como su temperatura, humedad y dinámica, mientras que la hidrometeorología estudia los procesos atmosféricos que afectan los recursos hidráulicos de la tierra (OMM, 2012).

Para lograr la medición del clima, esto es, asociarle números al clima de una localidad, región o un país, es necesario medir diariamente las variables de temperatura, lluvia, humedad y viento, además de observar las condiciones de nubosidad, de las masas de aire frío y la trayectoria de los huracanes etc.

Para ello, es necesario conocer durante varios años el estado del tiempo, realizar mediciones y observaciones que permitan concluir por ejemplo, que el promedio de temperatura en el verano de México es de 26 °C y, que llueve durante esa estación unos 370 mm de lluvia, donde, los especialistas en el clima consideran que se precisa tener por lo menos 30 años de registros y observaciones para hablar con seguridad del clima (OMM, 2018; SEMARNAT, 2011).

La variabilidad climática global provoca entre otras cosas, la intensificación de la variabilidad climática natural. Los fenómenos hidrometeorológicos extremos dañan los bienes y la integridad física de las personas, en una cadena compleja de impactos que afectan prácticamente a todas las dimensiones del desarrollo humano. (SEMARNAT, 2008).

La gestión integral del recurso hídrico, dada la complejidad de las variables hidrometeorológicas, es un tema que cobra cada vez más vigencia y reviste gran importancia a escala global, requiriendo entre otros aspectos, entender en cierto nivel

los diferentes fenómenos en los que participa el agua de una cuenca. Por tanto, urge avanzar en la generación, consolidación e implementación de diferentes tipos de herramientas para una óptima gestión del agua. Siendo una de las herramientas más importantes en este contexto la modelación de la dinámica del agua (IDEAM, 2018).

La modelación es empleada como un medio para evaluar, desde las cuestiones más amplias de nuestra capacidad de analizar, hasta la planificación de acciones para hacer frente a los problemas actuales y de largo alcance asociados al agua. Las capacidades técnicas de los modelos varían mucho entre los diferentes temas relacionados con el recurso hídrico, sin embargo, se ha encontrado que los modelos capaces de analizar muchos de los temas relevantes en esta área, están actualmente disponibles y con un potencial significativo para aumentar la exactitud y la eficacia de la información generada para los administradores, tomadores de decisiones y científicos (Friedman *et al.*, 1984).

1.1. Marco teórico

1.1.1. Fenómenos hidrometeorológicos

En México, la variabilidad climática se asocia a fenómenos con importantes impactos socioeconómicos y ambientales. El fenómeno de *El Niño* explica una buena parte de la variabilidad climática interanual, relacionándose con la ocurrencia de sequías severas en verano al norte del país; o con lluvias intensas de invierno en el noroeste.

El Niño es el término originalmente usado para describir la aparición, de tiempo en tiempo, de aguas superficiales relativamente más cálidas de lo normal en el pacífico tropical central y oriental, frente a las costas del norte de Perú, Ecuador y sur de Colombia. Dicho fenómeno cubre grandes extensiones del océano pacífico y por su magnitud afecta el clima en diferentes regiones del planeta (Montealegre, 2007). Por el contrario, en años de La Niña las lluvias parecen estar por encima de lo normal en la mayor parte del país, afectando a nuestra región con huracanes en verano (Magaña Rueda & Gay García, 2002).

Si los efectos de este extremo climático incrementan, nuestro país será propenso a eventos de desastre de origen hidrometeorológico, al respecto, se estima que en

México cerca de 8 millones de personas están expuestas a los efectos adversos de ciclones tropicales, aproximadamente 6 millones a inundaciones y cerca de 8 millones pueden sufrir daños por sequías; de éstos últimos 5.6 millones viven bajo condiciones de alta y muy alta marginación. Bajo este panorama, la planeación y la acción frente a los riesgos hidrometeorológicos cobran gran relevancia (SEMARNAT, 2008).

El Servicio Meteorológico Nacional es la institución responsable en México de poseer esos datos y observaciones al día. Dicho Servicio recolecta diariamente y en todo el país las mediciones obtenidas en miles de estaciones climatológicas esparcidas en todo el territorio Mexicano (SEMARNAT, 2011).

La dificultad de establecer si hoy se presentan más episodios meteorológicos extremos y de mayor intensidad, tiene que ver también con los cambios sociales y económicos. Por ejemplo, muchos aumentos en el número de inundaciones son resultado de una mayor e inadecuada presión humana sobre las márgenes fluviales, más que un incremento de los episodios de lluvias torrenciales, mientras que las repetidas sequías actuales están relacionadas con el aumento del consumo de agua. Incrementando así, la vulnerabilidad y la exposición de muchas sociedades ante el peligro natural (Vide, 2008).

1.1.1.1. Sequías

Una sequía se caracteriza por ser un prolongado periodo de tiempo anormalmente seco y que, como consecuencia produce serios desequilibrios hidrológicos. La severidad de la sequía se determina en función de la intensidad, duración y extensión geográfica del episodio específico. La intensidad se refiere al grado de disminución de la precipitación y/o a la gravedad de los impactos asociados. En cuanto a la duración, las sequías usualmente requieren un mínimo de dos a tres meses para que se las considere establecidas, aunque pueden extenderse a lo largo de varios años consecutivos (Camilloni *et al.*, 2020).

La sequía es un fenómeno complejo, al que resulta difícil darle un enfoque genérico, que contemple todos sus aspectos y satisfaga todas las expectativas; es más bien, una particularidad del clima y del medio ambiente, que cuenta con múltiples facetas (Gutiérrez *et al.*, 2005). Como tal, no existe una definición aceptada universalmente,

sus definiciones dependen del enfoque científico, así como de la actividad económica que se afecta, comúnmente se identifican cuatro tipos de sequías (Figura 1.1) las cuales Camilloni *et al.*, (2020) las describe como:

Sequía meteorológica. Escasez de precipitación, frecuentemente agravada por altas temperaturas que inducen altas tasas de evapotranspiración. Este tipo de sequía está basada en datos climáticos y se expresa mediante la desviación de la precipitación respecto a la media durante un periodo de tiempo determinado.

Sequía hidrológica. Hace referencia a una deficiencia en el caudal o volumen de aguas superficiales o subterráneas (ríos, embalses, lagos, etc.). La frecuencia y severidad de una sequía hidrológica es usualmente definida sobre la base de su influencia en cuencas hidrográficas.

Sequía agrícola. Se produce cuando no hay suficiente humedad en el suelo para permitir el desarrollo de un determinado cultivo en cualquiera de sus fases de crecimiento. La demanda hídrica de una planta depende de condiciones meteorológicas, características biológicas específicas de la planta, su etapa de crecimiento y, de propiedades físicas y biológicas del suelo.

Sequía socioeconómica. Ocurre cuando la disponibilidad de agua disminuye, hasta el punto de producir daños (económicos o sociales) a la población afectada por la escasez de lluvias, o cuando la demanda de agua excede la disponibilidad afectando de esta forma a una comunidad. La sequía socioeconómica asocia el suministro y demanda de algún bien económico o servicio con la sequía meteorológica, hidrológica y agrícola.

A diferencia de otros desastres asociados a fenómenos naturales cuyos impactos son locales y de corto plazo (como los ocasionados por tornados, huracanes o terremotos), las sequías abarcan grandes áreas geográficas, tienen un inicio lento en la naturaleza, no presentan un epicentro ni trayectorias definidas, sus daños acumulativos son no estructurales, y sus consecuencias pueden prevalecer por varios años, con un efecto negativo en la calidad de vida y en el desarrollo de las poblaciones afectadas (Ortega-Gaucin & Velasco, 2013).

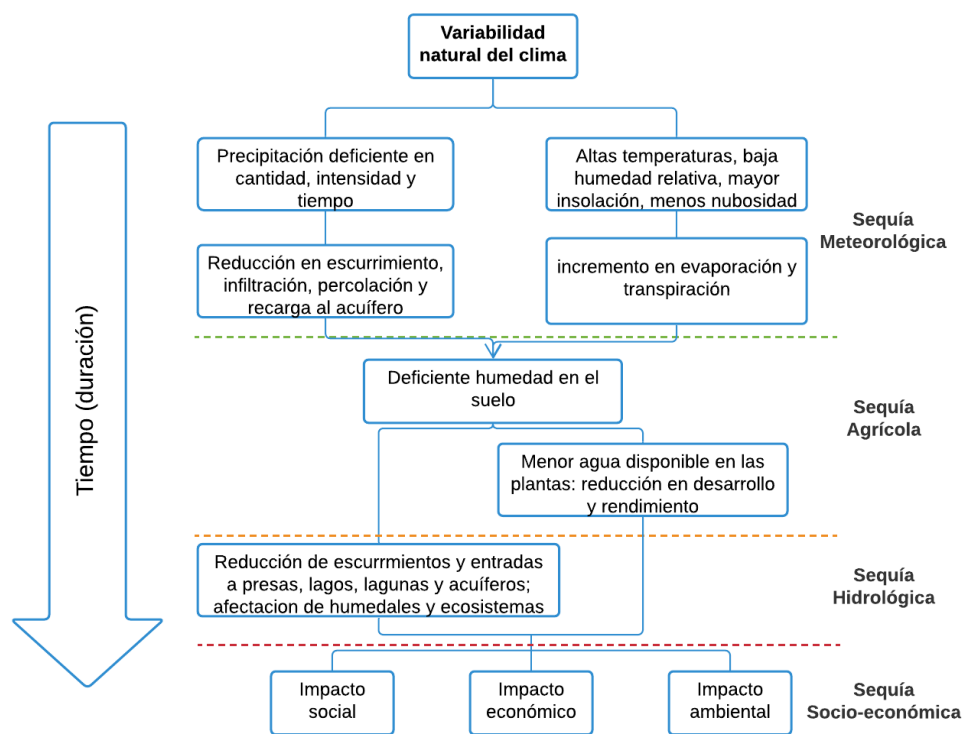


Figura 1.1. Interrelación entre los tipos de sequía, principalmente en función del tiempo.
Adaptado de (Gutiérrez et al., 2005)

Se estima que las sequías que enfrentará el país en el futuro serán más frecuentes y prolongadas derivado del cambio climático, y probablemente, sea uno de los fenómenos hidrometeorológicos que tendrá mayor impacto sobre la población y la economía, derivados de la escasez de agua, problemas en el sector primario, desabasto de alimentos, entre otros, por lo que identificar los grupos y sectores más vulnerables para el diseño e implementación de medidas de adaptación resulta inminente (Calderillo Granados, 2014).

Existe la costumbre de confundir *sequía* con *aridez*, debido a que las regiones más secas son usualmente aquéllas donde la variabilidad de la precipitación es más alta, y por tanto es más probable de presentarse una sequía.

La aridez se define como un estado climático permanente; la cual limita seriamente la sobrevivencia o el crecimiento de una economía debido a las condiciones del uso del agua. La gran diferencia es que la sequía desaparece durante algunas temporadas, en cambio, una región es considerada árida o semiárida, cuando la cantidad de agua disponible representa una variable crítica que limita de forma la economía de la región, tanto en planeación, como en su desarrollo de manera constante (CENAPRED, 2014).

1.1.1.2. Inundaciones

El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) define la inundación como el rebase de los límites normales de confinamiento de una corriente, cuerpo de agua, o la acumulación de esta sobre áreas que por lo general no están sumergidas. Las inundaciones son una fuente de riesgo, porque en la mayor parte de las áreas donde ocurren, es un espacio poblado u ocupado por actividades productivas. En muchos casos, particularmente en Latinoamérica, el riesgo aumenta porque en estas zonas se asientan poblaciones con alto grado de vulnerabilidad (Field *et al.*, 2012).

Salas & Jimenes (2019) en el Fascículo de Inundaciones, definen a la inundación como: aquel evento que, debido a la precipitación, oleaje, marea de tormenta, o falla de alguna estructura hidráulica provoca un incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos o el mar mismo, generando invasión o penetración de agua en sitios donde usualmente no la hay generando daños en la población, agricultura, ganadería e infraestructura.

La presencia de asentamientos cercanos a los márgenes del río es una problemática que se tiene desde la aparición del hombre en la tierra, y que, con el inicio de la globalización se presenta un crecimiento descontrolado de la población, las ciudades empiezan a crecer y los asentamientos humanos llegan a ubicarse en las llanuras de inundación de los ríos, trayendo consigo problemas de inundaciones al desbordar una corriente. Además, la degradación del medio ambiente, como la deforestación, la erosión, etc., modifica la respuesta hidrológica en cuencas, incrementando la ocurrencia y magnitud de las inundaciones (CENAPRED, 2014).

La modificación del terreno en las cuencas (cambio en los usos del suelo), produce daños cada vez más considerables por efecto de las inundaciones, debido a que:

- Se producen crecientes mayores que las que habían ocurrido (avenidas históricas) cuando las cuencas eran naturales o la degradación del medio ambiente era mínima.

- El tiempo que debe transcurrir para que los efectos de una inundación sean percibidos por la población ha disminuido, provocando que en ocasiones la respuesta de las autoridades y de la población se vea comprometida.

A nivel mundial las inundaciones están aumentando más rápidamente que ningún otro desastre. De acuerdo con la Cruz Roja Internacional, durante el periodo de 1919-2004, han colaborado con ayuda en más eventos de inundaciones que de cualquier otro tipo, en gran medida porque el acelerado desarrollo de las comunidades modifica los ecosistemas locales, incrementando el riesgo de inundación al que están expuestas muchas poblaciones (CENAPRED, 2019).

En México han ocurrido, por efecto de desastres, alrededor de 10,000 muertes, de 1980 a 1999, aproximadamente 500 cada año. Las pérdidas económicas calculadas alcanzan 9,600 millones de dólares, con un monto promedio anual cercano a los 500 millones de dólares (Bitrán Bitrán *et al.*, 2021).

Las inundaciones y la evolución de estas se pueden presentar con diferentes situaciones, siendo clasificadas por Salas & Jiménez (2019) de acuerdo con su origen y tiempo en que presentan efectos, mismas que son descritas a continuación.

1.1.1.2.1. Inundaciones según su origen

Pluviales. Son consecuencia de la precipitación, se presentan cuando el terreno se ha saturado y el agua de lluvia excedente comienza a acumularse, pudiendo permanecer horas o días.

Su principal característica es que el agua acumulada es de lluvia precipitada debido a la presencia de huracanes o frentes fríos, que traen consigo la presencia de lluvias intensas que genera el incremento del nivel del agua en ciertas zonas.

Inundaciones fluviales. Se generan cuando el agua que se desborda de los ríos queda sobre la superficie de terreno cercano a ellos. A diferencia de las pluviales, el agua que se desborda sobre los terrenos adyacentes, corresponde a precipitaciones registradas en cualquier parte de la cuenca tributaria y no necesariamente a lluvia sobre la zona afectada.

La acumulación del caudal a través de los ríos, junto a la presencia de lluvias intensas en ciertas zonas de la cuenca, trae consigo avenidas importantes siendo

rebasada la capacidad hidráulica del cauce, por lo que pueden presentarse desbordamientos en zonas vulnerables.

Inundaciones costeras. Se presentan cuando el nivel medio del mar asciende debido a la marea y permite que éste penetre tierra adentro, en las zonas costeras, generando el cubrimiento de grandes extensiones de terreno.

La presencia de tormentas genera vientos que aumentan el nivel de la marea, incrementando el oleaje, empujando el agua hacia las costas, lo que ocasiona daños a la propiedad, erosión de las playas, bloqueo de caminos, representando una amenaza para poblaciones costeras.

Inundaciones por fallas de infraestructura hidráulica. Este tipo de inundaciones ocurre por diferentes razones, entre ellas se encuentra un diseño escaso, que por falta de información, criterios o metodologías inadecuadas se realiza el diseño de obras, provocando fallas en el funcionamiento hidráulico de las estructuras; la mala operación de las estructuras, como la abertura excesiva puede generar inundaciones aguas abajo del río, así como no abrir lo suficiente una compuerta puede sobrepasar la capacidad de una cortina ocasionando una falla en la presa; un mal mantenimiento o el término de la vida útil de la obra, así mismo los azolves o filtraciones son indicios de posibles fallas que deben revisarse.

1.1.1.2.2. Inundaciones según el tiempo que tardan en presentarse sus efectos

Inundaciones lentas. Las inundaciones lentas se presentan cuando el agua proveniente de lluvias o del desbordamiento de una corriente de agua cubre poco a poco zonas cercanas a su cauce, llenando de agua las planicies y valles que rodean el río, así como a las viviendas, construcciones, terrenos y cultivos, entre otros.

Cuando principalmente en época de tormentas, las lluvias fuertes y prolongadas caen sobre llanuras y planicies, el agua puede ser absorbida inicialmente por el suelo a manera de una esponja. Si continúa la lluvia, el suelo se saturará de agua facilitando el encharcamiento, y luego, la inundación.

Inundaciones súbitas. Son el resultado de lluvias repentinas e intensas que ocurren en áreas específicas. Ocasionando que pequeñas corrientes se transformen, en cuestión de minutos, en violentos torrentes capaces de causar grandes daños.

Se pueden presentar en zonas montañosas con pendientes elevadas, así como zonas con deforestación o poca cubierta vegetal, presentando altos índices de escurrimientos.

La diferencia entre inundaciones lentas e inundaciones súbitas es el tiempo que tardan en manifestarse los efectos desde que comienza a llover hasta que se genera el escurrimiento. Una manera de caracterizar este tiempo es mediante el llamado *tiempo de concentración*, que es una característica de cada cuenca.

1.1.2. Modelos numéricos

Un modelo es una abstracción de la realidad, en la que se establecen relaciones para tratar de entender el comportamiento de un fenómeno. La representación de un sistema real a través de un modelo parte de ciertas inferencias, y emplea información a diferentes escalas para entender el comportamiento del fenómeno de interés. El nivel de resolución de los datos y la información requerida, así como el grado de complejidad del modelo a emplear, depende básicamente de los objetivos del estudio (Fondo Adaptación, 2015). Existen varias maneras de llevar a cabo la evaluación del recurso hídrico de una cuenca hidrográfica o de una determinada zona; la selección de una en particular está condicionada por las necesidades de cada estudio. Una representación simplificada de un modelo se presenta en la (Figura 1.2).

Los modelos son también una representación simplificada de un proceso o un sistema. El comportamiento hidrológico, hidráulico, hidrogeológico, sedimentológico y de calidad de agua puede ser muy complejos y un modelo suministra una vista simplificada, permitiendo reducir esta complejidad a la par de resolver problemas específicos. El desacople y análisis de un sistema complejo por componentes y procesos facilitan el desarrollo de un modelo. Un buen modelo debe tener en cuenta las relaciones entre los diferentes procesos involucrados en el fenómeno estudiado, además de caracterizar, asimilar la incertidumbre y de permitir hacer una adecuada interpretación de los resultados (IDEAM, 2018).

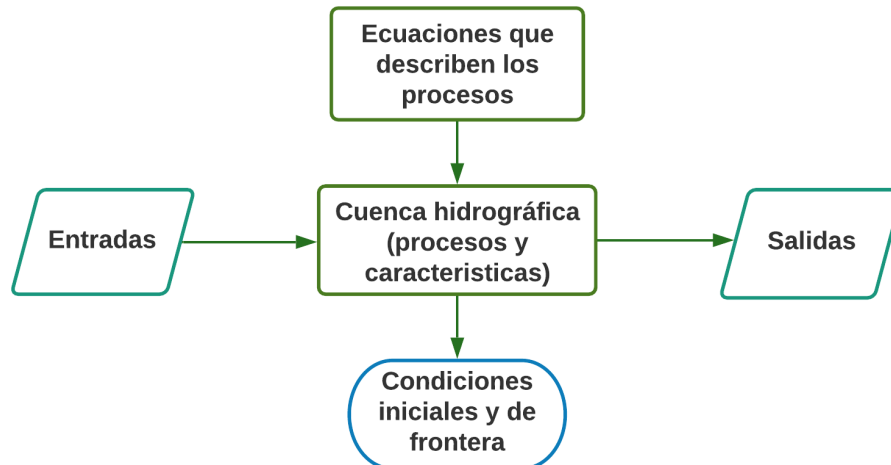


Figura 1.2. Componentes de un modelo.

Adaptado de (Singh, 1995)

1.1.2.1. Etapas de la modelación hidrodinámica del agua

La gestión integrada de los recursos hídricos es un prerequisite para la preservación medioambiental y del desarrollo económico. Sin embargo, las acciones comúnmente propuestas se encuentran con dificultades de implementación por la falta de datos necesarios, y por el desconocimiento de las interacciones entre los componentes hidrológicos y ecológicos (Dimitriou & Zacharias, 2006; Torres-Bejarano *et al.*, 2016).

Actualmente, existen una gran cantidad de modelos numéricos (algunos más complejos que otros) que proporcionan resultados adecuados. Sin embargo, en la selección de un modelo se acoge al más simple que suministre las respuestas suficientemente precisas para satisfacer las necesidades (Ministère du développement durable, 2014). Esto debido a que, un mayor nivel de complejidad se asocia a requerimientos de datos e información que no están necesariamente disponibles, y en ocasiones requiere de una mayor capacidad de cálculo o recursos para la elaboración de del modelo.

A continuación, son descritos de manera general los procesos y consideraciones requeridas en la elaboración de modelos hidrodinámicos según el *Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica* del IDEAM (Figura 1.3).

Así mismo, posteriormente en el Capítulo 4 de esta tesis, son descritas las principales ecuaciones que intervienen en la modelación hidrodinámica, y los softwares

más importantes disponibles para interpretar las características hidráulicas e hidrodinámicas en flujos a superficie libre.

Definición de los objetivos de la modelación. El primer paso para llevar a cabo una modelación consiste en definir los objetivos, su alcance y el nivel de detalle requerido. Estableciendo unos objetivos razonables, que deben tener presente las implicaciones de no contar en ocasiones con la suficiente información para resolver con un alto grado de certeza la pregunta formulada. En este punto, es clave identificar el tipo de salidas que se requieren, gráficas, mapas, valores puntuales, valores distribuidos, entre otros.

Datos e información para la modelación. Parte de la identificación del tipo y cantidad de datos e información disponibles en la zona de estudio y de conocer el nivel de representatividad de estos (escalas y resoluciones); frecuentemente, se debe recurrir a estimaciones, interpolaciones o regionalizaciones, cuando no se dispone de la información necesaria para llevar a cabo la modelación.

Definición de escalas características. La escala hace referencia a la longitud o tiempo característico de un proceso, observación o modelo (Blöschl & Sivapalan, 1995). Así, la dimensión escalar hace referencia al rango de longitudes o tiempos característicos del proceso o medio analizado (Puricelli, 2003).

La generación de escurrimiento superficial es un fenómeno donde elementos tales como suelos, topografía y precipitación están caracterizados, cada uno de ellos, por su propia dimensión escalar (Wood *et al.*, 1988). Todos los procesos que se dan en el ciclo hidrológico se dan en una gama de escalas.

En términos de la escala, los procesos, eventos y entidades se rigen por el principio de correspondencia espacio temporal, donde los eventos de pequeña extensión son frecuentes y rápidos mientras que los eventos de gran extensión son lentos y poco frecuentes (Del río San José, 2010).

Análisis de la calidad de los datos y la información. Una vez recopilados los datos y la información, se hace un análisis de calidad; en esta etapa, se busca reducir en la medida de lo posible el error y la incertidumbre asociada a los datos y la información del modelo, contribuyendo al proceso de calibración y a la obtención de resultados con una mayor certidumbre. Los datos e información disponibles (es decir, aquellos que

superan la etapa de análisis en cantidad y calidad) constituyen uno de los mayores condicionantes en la selección del modelo a emplear.

Evaluación de incertidumbre. Abordar el tema de la incertidumbre es fundamental, ya que los resultados de las modelaciones se emplean en la toma de decisiones y por tanto éstos deben ir acompañados de su respectiva incertidumbre asociada; es igualmente importante documentar todo el proceso, en especial el tratamiento de los datos e información, así como las estimaciones, inferencias y supuestos adoptados.

Es necesario tener presente que la calidad de los resultados depende de una gran cantidad de factores, entre ellos la cantidad y calidad de la información, el modelo seleccionado, una adecuada calibración y la evaluación y asimilación de la incertidumbre.

Construcción del modelo conceptual. En este punto, es clave formular las preguntas adecuadas y parte básicamente de los objetivos trazados, de los datos e información disponible. En esta etapa se define el área de estudio (cuenca, subcuenca, cuerpo de agua, entre otros), las condiciones límite, iniciales, de frontera entre otros.

Selección del modelo. Teniendo en cuenta que existe una variedad de procesos según el tipo de modelo, la selección de alguno está condicionado principalmente a los objetivos del estudio y a la disponibilidad de la información. Otros criterios que inciden en la selección del modelo son: los recursos económicos, técnicos, computacionales y el tiempo disponible para llevar a cabo el estudio. Al momento de seleccionar el modelo es importante tomar en cuenta los siguientes aspectos mencionados por Velez, (2008):

- La estructura del modelo;
- Las condiciones para las cuales fue creado;
- Datos de entrada requeridos;
- Parámetros requeridos;
- Rango de aplicabilidad e;
- Incertidumbre.

Análisis de sensibilidad. Previo a la calibración del modelo, se hace un análisis de sensibilidad que consiste en identificar los parámetros más sensibles ante cambios pequeños en sus valores; con esto se logra ser más eficiente en la calibración.

Selección de los criterios de desempeño. Los criterios de desempeño no son más que relaciones que muestran la capacidad del modelo para representar adecuadamente la realidad; se emplean en un contexto de calibración, validación, optimización y evaluación de incertidumbre.

Existe una gran gama de estas métricas, algunas ampliamente conocidas como el RMSE (error cuadrático medio) y el índice NASH; sin embargo, debe tenerse precaución al seleccionarlas ya que no se deben emplear los mismos indicadores de desempeño, por ejemplo, en inundaciones lentas que en crecientes súbitas, dadas las implicaciones que cada una presenta (IDEAM, 2018). Las evaluaciones gráficas también son ampliamente empleadas y comprenden, entre otras, inspección de los hidrogramas, curvas de duración de caudales y comparación de las series de datos observados – simulados.

Calibración del modelo. En esta etapa se evalúa la capacidad del modelo para representar el o los fenómenos de interés; para esto, se emplean los datos históricos y la información previamente procesada. En esta tarea se recurre a los criterios anteriormente mencionados, con el objeto de evaluar el desempeño del modelo comparando valores observados y simulados.

Validación del modelo. El término de *validación* no necesariamente expresa la representación exacta de los fenómenos estudiados. En realidad, indica el establecimiento de legitimidad brindada en términos de argumentos, métodos y del análisis. La validación permite corroborar el desempeño del modelo en un contexto espacio – temporal diferente al de la calibración; ésta puede ser espacial (en un punto diferente de donde se calibró), temporal (empleando series con un periodo de tiempo diferente) y espacio – temporal (en un punto y en un periodo diferente a los empleados en la calibración); en todos los casos anteriores, se corre el modelo ya calibrado.

Simulación. Una vez que las etapas de calibración y validación han sido superadas satisfactoriamente, se procede a realizar la simulación, definida como el proceso que utiliza un programa informático, para reproducir o representar fenómenos reales mediante un modelo numérico (OMM, 2012).

Presentación y análisis de los resultados. Las salidas del modelo constan de los valores arrojados por métricas de desempeño, y sus salidas (que dependen del modelo empleado), pueden comprender datos estadísticos, gráficos, mapas o índices; los cuales deben ser revisados preferiblemente por un experto.

El análisis de resultados reviste gran importancia, ya que no sólo logra identificar su nivel de consistencia, sino que también permite llegar a conclusiones acerca de la bondad del modelo (capacidad de representar los diferentes procesos estudiados), contribuye al análisis de incertidumbre y a generar conclusiones respecto de los escenarios modelados.

Actualización del modelo. Cuando se emplea un modelo para determinados objetivos, por ejemplo, evaluación de amenaza por inundación, se requiere hacer la actualización del modelo cuando se tienen nuevos datos, información reciente o en los casos donde ha cambiado la topología del modelo, por ejemplo, a la presencia de nuevas estructuras hidráulicas.

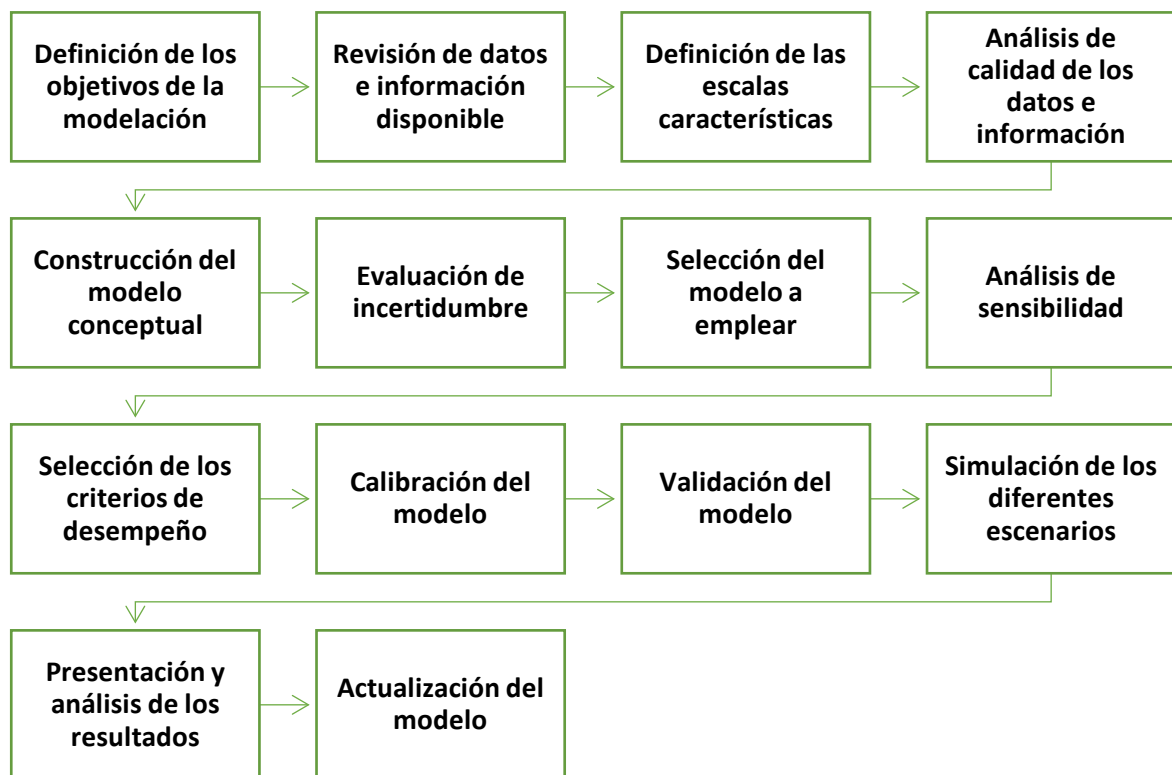


Figura 1.3. Etapas de la modelación dinámica del agua.

Adaptada de (IDEAM, 2018).

1.1.3. Estudios previos en la zona de estudio

La Huasteca es una región heterogénea en su configuración geográfica y social, consecuencia de los fenómenos geológicos, meteorológicos y climáticos, que dieron como resultado la conformación de un territorio con valor natural, cultural y paisajístico. La Huasteca Potosina ha sido escenario del desarrollo de actividades agrícolas que reemplazaron las grandes porciones de selva en las mesetas; existen además actividades de ganadería extensiva y el procesamiento, transformación e industrialización de la caña de azúcar en ingenios (Luna Vargas *et al.*, 2017).

Sin embargo, en la Huasteca como en otras regiones tropicales de México, coexisten procesos económicos, sociales y geográficos que convergen y aceleran el empobrecimiento de los ecosistemas, incrementando la vulnerabilidad de las poblaciones y los sectores productivos ante el cambio climático, enfrentando un grave peligro ante las sequías, ondas de calor, e inundaciones (Luna Vargas *et al.*, 2017).

La Huasteca Potosina es una de las regiones más productivas de San Luis Potosí, además de ser un atractivo turístico obligado. No obstante, debido a la variabilidad climática actual y a las afectaciones presentes al valor natural, económico y cultural, se han realizado una serie de estudios en la región, con la finalidad de conocer las condiciones actuales, así como los posibles escenarios y afectaciones. A continuación, son mencionados algunos estudios previos, que analizan distintas problemáticas encontradas en la región.

1.1.3.1. Modelación hidrodinámica para conocer el diagnóstico hidráulico del Río Gallinas, estado de San Luis Potosí, México

Para obtener el grado de Maestro, Robles Aguilar realizó en el 2019 un modelo hidrodinámico con la finalidad de generar un diagnóstico hidráulico en un tramo del Río Gallinas, donde fueron ejecutadas diversas campañas de aforo de caudales sobre el río, con el propósito de evaluar las pérdidas y aportaciones de caudal en el cauce. Además de realizar la caracterización de la topo-batimetría del río (Figura 1.4) en un tramo que inicia en la localidad de El Carpintero y culmina 8 kilómetros aguas abajo, esto con la finalidad de proyectar la superficie del cauce en el modelo numérico.

Las campañas de aforo de caudales realizadas por Robles confirmaron la hipótesis planteada, donde muestra que las infiltraciones ocurridas en el Río Gallinas influyen en las variaciones del caudal, quedando evidenciadas durante la temporada de estiaje debido a la disminución del gasto con respecto al temporal de lluvias.

Así mismo, las campañas de aforo de caudales realizadas por Robles fueron consideradas para la validación del modelo numérico de flujo a superficie libre desarrollado en esta tesis, el cual inicia en el puente *El Carpintero* y culmina en la *cascada de Tamul*.

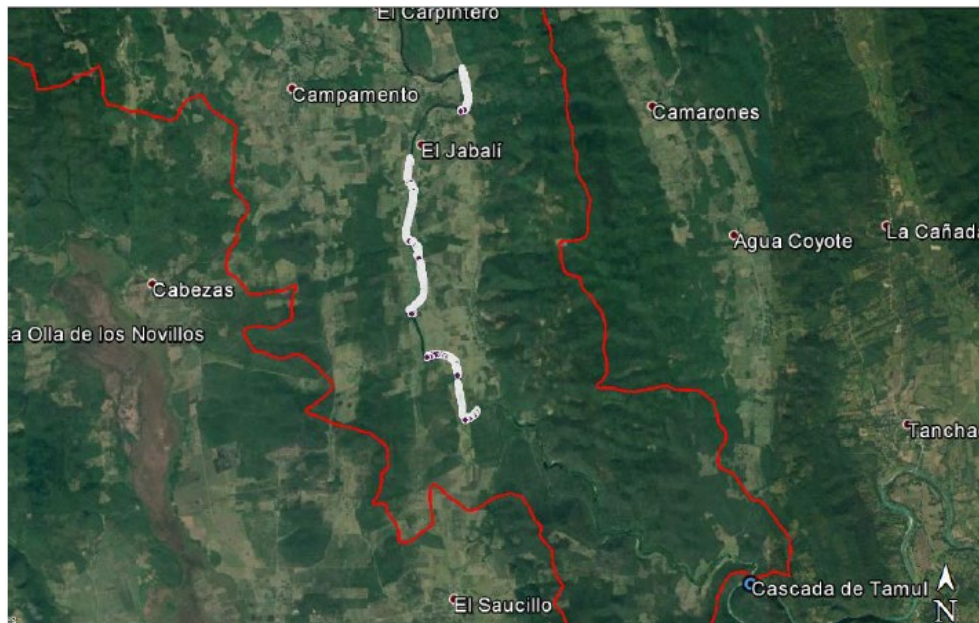


Figura 1.4. Batimetría procesada de campañas de medición.

Fuente: (Robles Aguilar, 2019).

1.1.3.2. Modelación numérica de la calidad del agua en el Río Gallinas, estado de San Luis Potosí, México

En el 2019, Villota López realizó un modelo hidrodinámico en otro tramo del Río Gallinas, con la finalidad de simular el comportamiento que presentan los contaminantes del río y su capacidad de asimilación. Donde por contaminantes se refiere a las descargas de aguas residuales tanto domésticas como las agroindustriales, producto de la industria cañera a gran escala presente en la Huasteca Potosina.

Para cumplir con la finalidad del proyecto fueron realizadas campañas de medición topo-batimétricas al tramo de interés, entre las localidades de *Rascón* y *El Jabali* (Figura

1.5) así mismo, fue necesario caracterizar la calidad del agua en distintos puntos espaciales y épocas del año, identificando principalmente el pH, la temperatura y oxígeno disuelto en el agua, así como las concentraciones de fosfatos, nitratos y coliformes totales entre otros presentes.

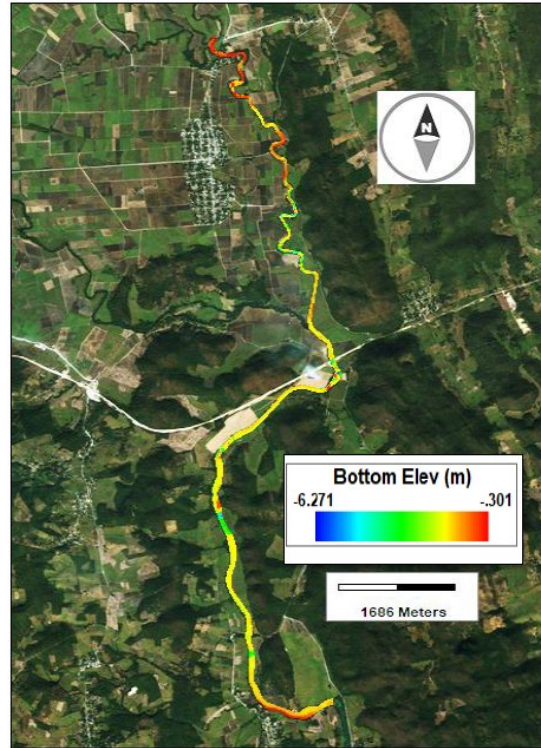


Figura 1.5. Batimetría del modelo numérico para la calidad del agua en el Río Gallinas.

Fuente: (Villota López, 2019)

1.1.3.3. Variabilidad del impacto del cambio climático en el régimen hidrológico de dos cuencas de la región Huasteca

En el año 2020, Velázquez Zapata *et al.*, realizaron un estudio con la finalidad identificar el impacto del cambio climático al régimen hidrológico de dos cuencas vecinas, la cuenca del Río Gallinas y la cuenca del Río Valles.

En dicha investigación, el análisis de los efectos asociados al cambio climático sobre los recursos hídricos se realizó, con base en la cadena de modelación hidroclimática ilustrada en la Figura 1.6, que consiste en simulaciones provenientes de un modelo climático, mediante el uso de los valores del modelo hidrológico. Donde, partir de simulaciones hidrológicas (en el periodo de referencia y en periodos futuros) se evaluaron diversos índices hidrológicos (Muerth *et al.*, 2013; Velázquez Zapata *et al.*, 2020).

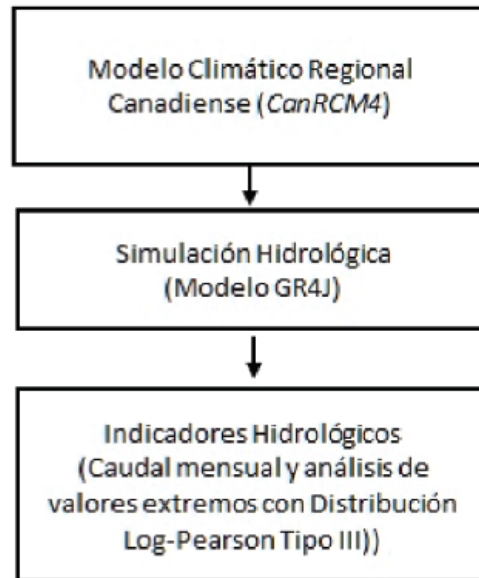


Figura 1.6. Cadena de modelación hidro-climática utilizada por Velázquez Zapata *et al.*

Los datos climatológicos implementados en el área de estudio fueron extraídos de la base de datos CLICOM (2016) del Servicio Meteorológico Nacional. Así mismo del Banco Nacional de datos de Aguas Superficiales (BANDAS) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) se obtuvieron los datos hidrométricos.

Los resultados muestran que los cambios proyectados de precipitación y temperatura tendrían un impacto en los caudales medios y extremos de las cuencas de estudio. Para lo cual, fueron considerados dos escenarios de emisión y dos horizontes de proyección, lo que ocasiona que exista una gran variabilidad en el impacto del cambio climático estimado, principalmente para el horizonte 2071-2100.

Si bien los resultados de este estudio estiman una variabilidad importante para el impacto del cambio climático en los indicadores hidrológicos, es necesario tener en cuenta, que el posible grado de afectación a la población no está dado solamente por la intensidad de los eventos hidrometeorológicos, sino que el riesgo es el punto donde el evento extremo y la vulnerabilidad social se interceptan (Velázquez Zapata *et al.*, 2020).

1.1.3.4. Vulnerabilidad al cambio climático en sitios turísticos estudio de caso: la Huasteca Potosina, México

Luna Vargas *et al.*, en el 2017 evaluaron la vulnerabilidad de los sitios turísticos ubicados en poblaciones ribereñas de la Huasteca Potosina, abordando el fenómeno

turístico desde un enfoque de cuenca, debido a que esto hace posible la ejecución de evaluaciones con técnicas de análisis multicriterio, que permiten la toma de decisiones de las organizaciones e instituciones involucradas en la actividad turística, ya que el cambio climático habrá de modificar los patrones de la demanda turística (SECTUR, 2014), así como las condiciones de vida de las comunidades locales.

Los 15 principales sitios turísticos de la Huasteca Potosina (Figura 1.7) se encuentran en cuatro subcuencas: Río Gallinas, Río Naranjos, Río Tampaón y Río Axtla, las cuales son el motor económico y biológico de la región; además albergan las formas del relieve (geoformas) más atractivas, por su valor científico, estético, cultural y, principalmente, socioeconómico (Brilha, 2005; Luna Vargas *et al.*, 2017).

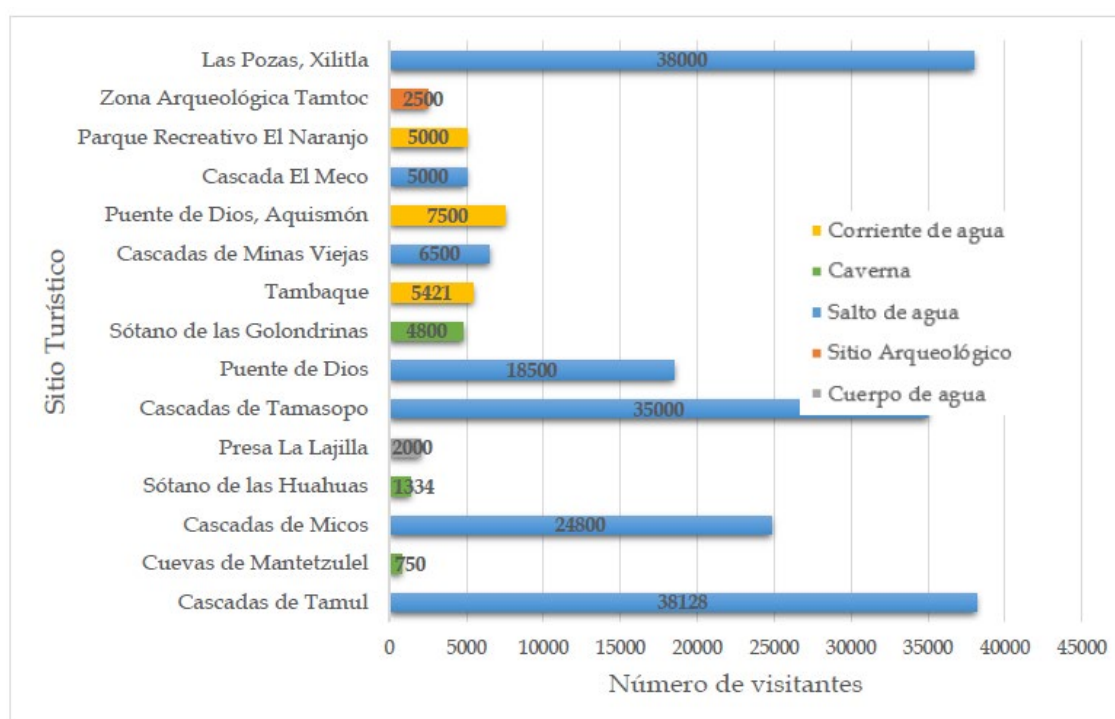


Figura 1.7. Flujo de visitantes a la Huasteca Potosina en temporada de semana santa 2016

Fuente:(Luna Vargas *et al.*, 2017; SECTUR SLP, 2016)

El objetivo de este trabajo fue diseñar un sistema de indicadores de sustentabilidad en la actividad turística, que provea a su vez herramientas para la evaluación de la vulnerabilidad ante el cambio climático de los sitios turísticos de las subcuencas hidrográficas de la Huasteca Potosina, para identificar las condiciones que limitan y fortalecen el desarrollo de las comunidades rurales que hacen uso aprovechando los recursos naturales destinados al ocio y la recreación de los visitantes.

En lo que se refiere al análisis de resultados, es relevante interpretar los indicadores diseñados en el trabajo de investigación, a fin de definir la vulnerabilidad y adaptación al entorno de las comunidades turísticas ante el cambio climático en la Huasteca Potosina. Estimando la vulnerabilidad de los cinco sitios turísticos más importantes de acuerdo con el número de visitantes y sus atractivos naturales, que son administrados por pobladores de las comunidades rurales de la región (Luna Vargas *et al.*, 2017).

Se determinó que las comunidades ribereñas son más vulnerables al cambio climático en la región, en especial las de la subcuenca alta del río Los Naranjos (El Meco y Minas Viejas) y la subcuenca baja del Río Gallinas (Cascada de Tamul), ya que la franja con mayor precipitación de San Luis Potosí (1500 a 2000 mm al año) es el área en donde se ubican los principales sitios turísticos de la Huasteca Potosina.

La exposición de estos sitios a inundaciones, afectan la permanencia de la actividad turística, sobre todo en los meses de junio y julio; repercutiendo en gran medida en el ingreso económico de las localidades, ya que en el periodo vacacional, la llegada de visitantes se reduce considerablemente, debido a que la frecuencia e intensidad de las crecidas fluviales causa el cierre temporal de estos sitios por parte de Protección Civil (Sánchez, 2017), hecho que afecta directamente a los prestadores de servicios de los lugares ubicados en los márgenes de los ríos, que se define en una marcada estacionalidad de la demanda turística.

De acuerdo con los datos de las encuestas, son las inundaciones y las sequías los fenómenos meteorológicos a los que con mayor frecuencia se enfrentan los prestadores de servicios turísticos en los últimos años, quienes atribuyen, como principales detonantes, al *desmonte* de las porciones de selva en la región y a la quema de caña de azúcar.

En este caso, El Meco, Minas Viejas y Tamul son los sitios turísticos más vulnerables a los fenómenos meteorológicos, pues tienen menor capacidad de retornar al equilibrio ante la exposición a algún riesgo, que se refleja en una menor probabilidad de acceder a oportunidades laborales y al incremento de las desigualdades sociales que impiden el progreso económico (Luna Vargas *et al.*, 2017).

1.1.3.5. La escasez de agua en la Huasteca Potosina (México): conflictos locales

En el 2016, Pereda & Padilla abordaron la problemática de la escasez del agua en la Huasteca Potosina desde un punto de vista administrativo y de su gestión.

El artículo, resalta el problema en la región de la Huasteca, derivado de la sobreexplotación de los acuíferos, ocasionando serias implicaciones que afectan mayormente a las poblaciones que en ella habitan. Tradicionalmente, en esta región se ha considerado al agua como un elemento de gran relevancia a nivel cultural socioeconómico, debido a que desde principios del siglo XX, comenzaron a surgir propuestas de utilización de los ríos de esta región, para la realización de proyectos hidráulicos como el Pujal-Coy, el Coy o el más actual de Monterrey VI (Pereda & Padilla, 2016).

En el cual, debido a las deficiencias cometidas en buena medida por las instituciones reguladoras de la administración y gestión del agua, aparecen en esta región discursos y prácticas cruzadas que desembocan en el surgimiento de múltiples conflictos a escala local. La escasa atención que han recibido por parte de las entidades municipales y estatales ha propiciado la articulación de las demandas que giran en torno al derecho al agua, lo que ha movilizó a los usuarios locales al considerar insuficiente la respuesta de las autoridades gubernamentales ante tal problemática (Pereda & Padilla, 2016).

1.1.3.6. Vulnerabilidad social y sequía en las regiones Media y Huasteca Potosina

El estudio de vulnerabilidad social y sequía fue realizado por Calderillo Granados, en el 2014 con la finalidad de obtener el grado de maestría. En dicho estudio se determina el grado de vulnerabilidad social de 1334 localidades de la zona Media y Huasteca Potosina en relación con la sequía.

A partir de 33 variables obtenidas del censo de población y vivienda 2010 y otras instituciones oficiales, se calcularon 20 indicadores socioeconómicos. Donde mediante un análisis por componentes principales (ACP), utilizando el programa estadístico SPSS 15.0, se obtuvieron los factores más representativos de la vulnerabilidad,

agregados en un índice de vulnerabilidad social (IVS). Además, con los datos mensuales de precipitación de las 44 estaciones meteorológicas, se calculó el índice de precipitación estandarizado (SPI – 12) por región climática. Con ello se identificaron y caracterizaron en términos de intensidad, duración y frecuencia los eventos de sequía ocurridos en el periodo de 1961-2010.

Finalmente fueron obtenidos siete componentes de la vulnerabilidad social, de los que fragilidad física y las deficiencias en la vivienda, falta de educación y debilidades de la población con base a su estructura social, mostraron el mayor peso dentro del análisis. Los resultados indican que existen 492 localidades (37.3%) de alta y muy alta vulnerabilidad ubicadas principalmente en las regiones Huasteca Centro – Sur y en los límites de las regiones Media y Huasteca, 563 (42.2%) con un nivel medio y 183 (13.7%) en bajo ubicadas predominantemente hacia la Media Oeste (Figura 1.8).

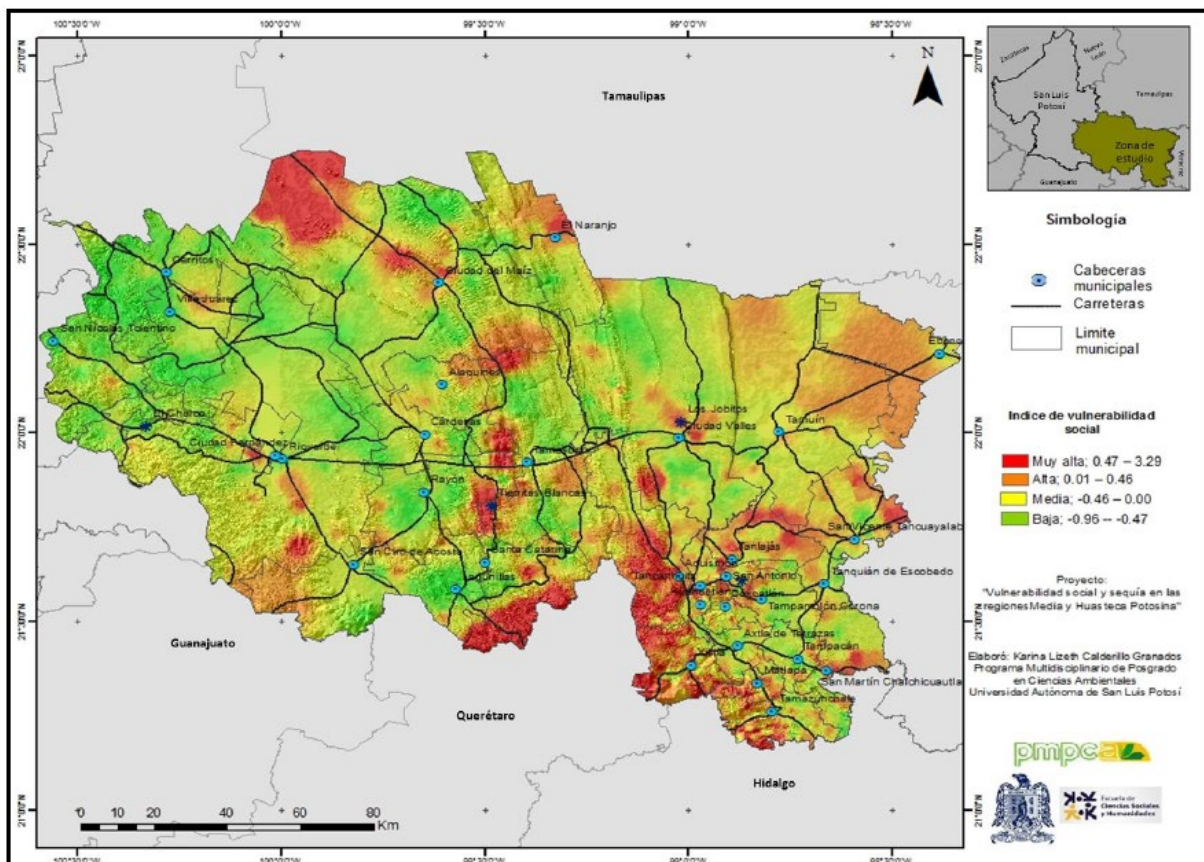


Figura 1.8. Índice de Vulnerabilidad Social en la Huasteca y Zona Media.

Fuente: (Calderillo Granados, 2014)

La región Media es más vulnerable a sequías extremas, pero de cortas duraciones, sin embargo, su impacto en la población puede ser poco debido a que la vulnerabilidad social es baja, en comparación con las poblaciones ubicadas en la región Huasteca que presentan una mayor vulnerabilidad y se encuentran expuestas a sequías moderadas de larga duración, lo que puede tener mayor impacto en las comunidades y sectores que dependen del agua. Este análisis sirve como un elemento más para la toma de decisiones para el desarrollo, incluyendo medidas de adaptación ante amenazas naturales (Calderillo Granados, 2014).

1.2. Marco metodológico

En este proyecto se llevarán a cabo diversas actividades de manera ordenada, secuencial y efectiva para poder cumplir con los objetivos propuestos, dichas actividades desarrolladas son mencionadas a continuación.

1.2.1. Recopilación de información

En la recopilación de información se identifican principalmente dos tipos de información a obtener, la primera de ellas consiste en una extensa revisión bibliográfica tanto de investigaciones realizadas en la zona de estudio, así como de los diversos métodos existentes para las metodologías que se aplicarán en la generación de información, como el análisis hidrológico, la topografía del cauce y sus zonas aledañas, así como los distintos modelos numéricos de flujo a superficie libre existentes.

La segunda consiste en toda la información vectorial y climatológica de la cuenca del Río Gallinas, siendo necesario buscar y descargar todos los datos vectoriales, como los usos y tipos de suelo, cuerpos de agua, curvas de nivel, carreteras, áreas urbanas, modelos digitales de terreno (MDT), entre otros que permiten caracterizar la cuenca. Así mismo, se solicita ante la CONAGUA los datos registrados de las estaciones climatológicas e hidrométricas que influyen en la respuesta hidrológica de la cuenca.

1.2.2. Análisis hidrológico

Consiste en determinar las condiciones de las diversas variables que interactúan en el ciclo hidrológico, donde a partir de la caracterización de la cuenca y el análisis de las variables climatológicas registradas se pueden suponer diversos escenarios

hidrometeorológicos en la cuenca, siendo de interés para las simulaciones del tramo de estudio los escenarios considerados como extremos. Dicho análisis se realiza en tres etapas fundamentales.

1.2.2.1. Caracterización de la cuenca

La caracterización de la cuenca se realiza con los de datos vectoriales existentes, siendo el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) la principal fuente debido a que en el portal web del INEGI, se puede acceder a las cartas topográficas, fisiográficas, edafológicas, geológicas, hidrográficas entre otras, así como los modelos digitales de terreno (MDT). Con esta información, y apoyados de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) es posible delimitar y caracterizar la cuenca del Río Gallinas.

1.2.2.2. Análisis de datos climatológicos

Una vez adquiridos los datos de las estaciones climatológicas, las cuales incluyen precipitaciones diarias, medias anuales y máximas en 24 horas, así como las temperaturas máxima, mínima y media, es necesario completar mediante métodos estadísticos los datos faltantes. Una vez completados los datos registrados, son analizados para determinar la homogeneidad e independencia de los registros y con esto definir qué estaciones cumplen en cantidad y calidad de información, descartando aquellas estaciones que no cumplen con alguna de las condiciones.

1.2.2.3. Determinación de escenarios hidrometeorológicos

Mediante la caracterización de la cuenca y con la información climatológica procesada se pueden determinar los escenarios hidrometeorológicos correspondientes al área de estudio. Donde, a partir de la aplicación de métodos semi empíricos y estadísticos se establece el balance hidrológico superficial de la cuenca, el caudal ecológico del Río Gallinas y las avenidas máximas extraordinarias. Siendo los escenarios hidrometeorológicos extremos (para sequía e inundaciones) aquellos que serán utilizados como condiciones de entrada del modelo numérico.

1.2.3. Topografía del tramo a modelar

Con la finalidad de implementar un modelo numérico que simule el comportamiento hidrodinámico del río, es necesario caracterizar la superficie del cauce y sus zonas

aledañas mediante campañas de medición al tramo de estudio, utilizando técnicas modernas como lo son: la fotogrametría y batimetría, descritas en el Capítulo 3 de esta tesis. A partir de dichas campañas se logrará representar el relieve del tramo de proyecto con gran detalle.

1.2.4. Aforo de caudales

El aforo de una corriente consiste en determinar a través de mediciones el gasto que atraviesa una sección dada, el valor del gasto se obtiene al conocer el área de la sección y la velocidad del flujo.

La finalidad del aforo consiste en registrar los caudales y velocidades en distintos tiempos y puntos del Río Gallinas para posteriormente, mediante la réplica de dichas condiciones en el modelo numérico se pueda calibrar y validar los resultados de este.

Actualmente, existen una gran variedad de metodologías que permiten caracterizar el área de una sección perpendicular al cauce, así como para determinar la velocidad promedio del agua, las cuales son detalladas en el capítulo 3.

1.2.5. Construcción del modelo numérico de flujo a superficie libre

Una vez concluidos todos los puntos anteriormente mencionados, inicia la implementación del modelo numérico, donde a partir la caracterización de la cuenca y de las campañas de medición para obtener la superficie del tramo a modelar son determinadas las condiciones iniciales y de contorno del modelo numérico.

Así mismo, las condiciones de entrada, varían según el proceso que se esté realizando, ya que para la calibración y validación del modelo se utilizan diferentes escenarios producto de los valores registrados durante las campañas de aforo de caudales, mientras que en las condiciones de salida son consideradas las infiltraciones identificadas en las campañas de aforo realizadas por Robles Aguilar, (2019).

Una vez completa la calibración y validación del modelo, son simuladas las condiciones de los escenarios hidrometeorológicos extremos establecidos en el análisis hidrológico.

1.2.6. Presentación y análisis de resultados

Finalmente, con la simulación de las condiciones hidrometeorológicas extremas, se procede a observar los valores de las variables hidráulicas calculadas por el modelo hidrodinámico. Debido a que los modelos numéricos son únicamente una herramienta, donde la calidad de los resultados logrados equivale a la calidad de la información introducida en él, resulta indispensable analizar la consistencia e incertidumbre de estos previo a generar conclusiones respecto a los escenarios modelados.

De la simulación, se puede obtener el comportamiento de las diferentes variables hidráulicas del río, como lo pueden ser: velocidades, caudales o tirantes de agua, los cuales están comprendidos en datos vectoriales, tablas o gráficas, siendo de gran utilidad para la interpretación la elaboración de mapas temáticos con la información generada, puesto que simplifican la comprensión de resultados.

1.3. Caracterización de la zona de estudio

1.3.1. Unidades climáticas

Los diversos tipos de clima se originan a partir de procesos de interacción océano – atmósfera – continente, dado que elementos como la temperatura, la presión atmosférica, el viento y la precipitación, son influenciados por factores como la latitud, el relieve y la continentalidad. En este contexto, la República mexicana se encuentra situada en una zona de transición - intertropical y subtropical (Hernández-Cerda & Carrasco-Anaya, 2004).

Entre los fenómenos de incidencia para el país se encuentran, los ciclones tropicales que se desarrollan en la porción sur del Océano Atlántico Norte, por lo general de junio a octubre, que, al entrar en contacto con la barrera montañosa de los estados de Tamaulipas, San Luis Potosí y Veracruz, disminuyen su velocidad, o bien, finalizan su trayectoria. Los ciclones de latitudes medias generan frentes fríos en invierno, algunos logran alcanzar latitudes bajas convirtiéndose en frentes “Norte”; que ocurren por lo regular de octubre a mayo y generan vientos de hasta 30 m/s, descensos de temperatura, nubosidad y, en ocasiones, precipitación (Carrisoza & Pérez, 2004)

En adición, a raíz de estos fenómenos y según la distribución general de los grupos climáticos de Wladimir Köppen, los grupos A, B y C están representados en amplias zonas de México; pero los climas D no existen en este territorio y los de tipo E se encuentran sólo en áreas muy reducidas (García de Miranda, 1989)

En el caso de la cuenca del Río Gallinas, el grupo de climas cálidos (A) se distribuyen en la totalidad de la cuenca, los cuales se caracterizan por ser un clima caliente y húmedo con la temperatura media del mes más frío superior a los 18°C. Así mismo, se identifican tres tipos de climas donde resalta la presencia de abundantes lluvias en verano en casi la totalidad de la cuenca de estudio, siendo expuestos en la Tabla 1.1 y Figura 1.9.

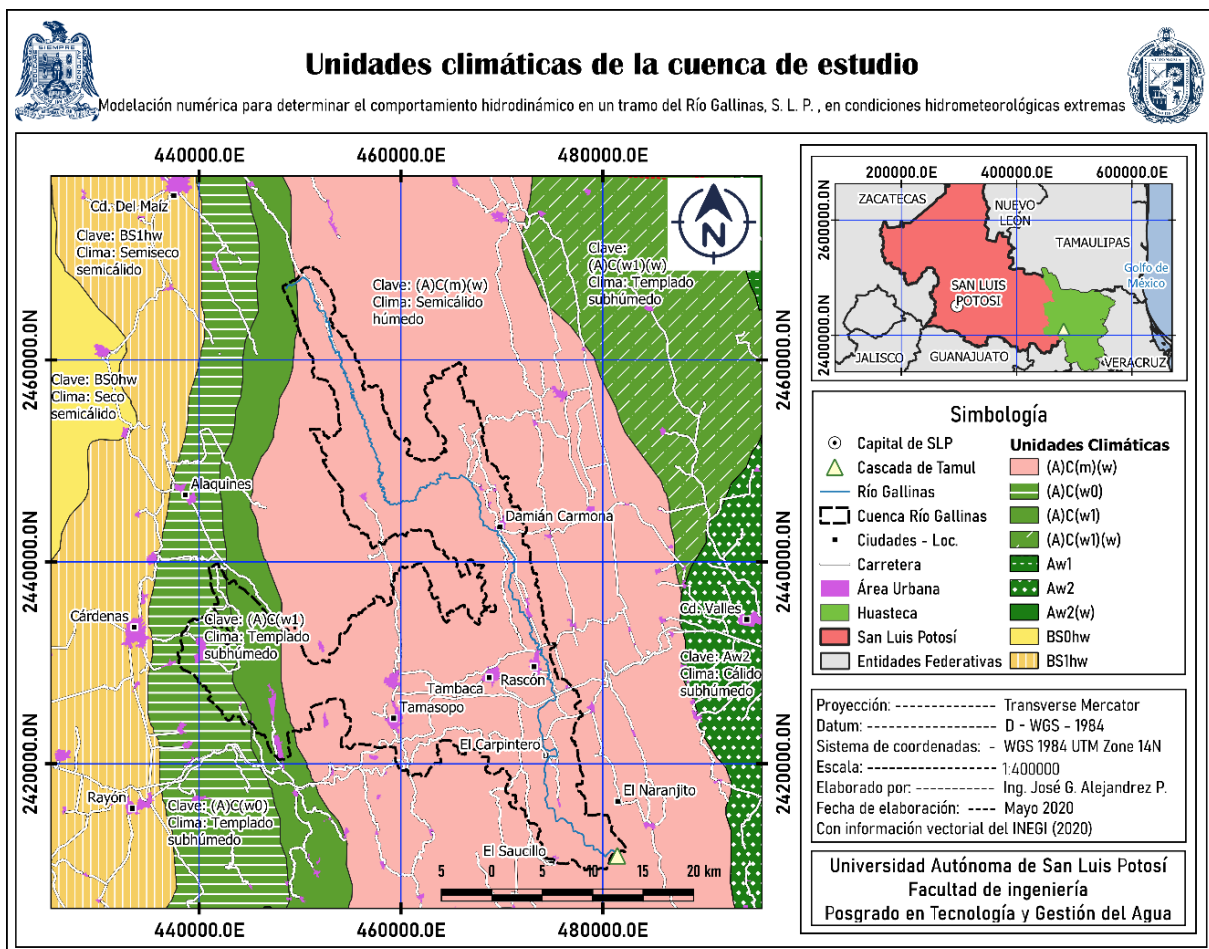


Figura 1.9. Mapa de las unidades climáticas.

Tabla 1.1. Unidades climáticas de la zona de estudio.

Clasificaciones climáticas	Descripción	Área (km ²)	Influencia (%)
(A)C(m)(w)	Semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano y precipitación invernal menor al 5%.	747.224	86.82 %
(A)C(w0)	Semicálido subhúmedo de humedad baja, con lluvias en verano y precipitación invernal entre el 5% y 10.2 %	47.256	5.49 %
(A)C(w1)	Semicálido subhúmedo de humedad media, con lluvias en verano y precipitación invernal entre el 5% y 10.2 %	66.146	7.69 %
Total		860.636	100.0 %

1.3.2. Edafología

La palabra edafología proviene de las raíces *edafos*, suelo y *logos*, estudio, por lo tanto, es el estudio de los suelos. Podemos definir al suelo como la capa más superficial de la corteza terrestre, que encuentra soporte la cubierta vegetal natural y gran parte de las actividades humanas. El suelo está formado por horizontes o capas y es el resultado de la interacción de varios factores del ambiente y fundamentalmente de los siguientes: clima, material parental o tipo de roca a partir de la cual se originan los suelos, vegetación y uso del suelo, relieve y tiempo (INEGI, 2004a).

Los suelos tienen procesos de desarrollo diferentes dependiendo del medio físico en el que se encuentran ubicados, y esos procesos determinan una serie de características que los hacen más o menos fértiles desde el punto de vista agrícola o pecuario. Asimismo, el suelo tiene algunas propiedades físicas que permiten un mejor o peor drenaje interno (infiltración); este aspecto es necesario conocerlo al decidir el tipo de prácticas que habrán de llevarse a cabo, si se quiere aprovechar este elemento de manera racional (INEGI, 2004a).

La clasificación de los tipos de suelo y subsuelo se realiza mediante las capas vectoriales del INEGI, que proporcionan la información de los principales tipos de suelo y subsuelo dominantes, así como como sus texturas. En la cuenca de estudio se aprecian suelos del tipo *Feozem*, *Litosol*, *Rendzina* y *Vertisol*, con los subsuelos *Háplico*, *Calcárico* y *Pélico*, descritos en la Tabla 1.2 y Tabla 1.3 mientras que la distribución de suelos en la cuenca se observa en la Tabla 1.4 y Figura 1.10.

Tabla 1.2. Tipos de suelos de la cuenca del Río Gallinas.

Tipo de suelo	Descripción
Feozem (H)	Del griego <i>phaeo</i> : pardo; y del ruso <i>zemljá</i> : tierra. Literalmente, tierra parda. Suelos que se pueden presentar en cualquier tipo de relieve y clima, excepto en regiones tropicales lluviosas o zonas muy desérticas. Es el cuarto tipo de suelo más abundante en el país. Se caracteriza por tener una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes, semejante a las capas superficiales de los Chernozems y los Castañozems, pero sin presentar las capas ricas en cal con las que cuentan estos dos tipos de suelos. Los Feozems son de profundidad muy variable. Cuando son profundos se encuentran generalmente en terrenos planos y se utilizan para la agricultura de riego o temporal, de granos, legumbres u hortalizas, con rendimientos altos.
Litosol (I)	Del griego <i>lithos</i> : piedra. Son los suelos más abundantes del país. Se encuentran en todos los climas y con muy diversos tipos de vegetación, en todas las sierras de México, barrancas, y en algunos terrenos planos. Se caracterizan por su profundidad menor de 10 centímetros, limitada por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido. Su fertilidad natural y la susceptibilidad a la erosión es muy variable dependiendo de otros factores ambientales. El uso de estos suelos depende principalmente de la vegetación que los cubre. En bosques y selvas su uso es forestal; cuando hay matorrales o pastizales se puede llevar a cabo un pastoreo más o menos limitado y en algunos casos se destinan a la agricultura, en especial al cultivo de maíz o el nopal, condicionado a la presencia de suficiente agua. No tiene subunidades.
Rednzina (E)	Del polaco <i>rzedzic</i> : ruido. Connotativo de suelos someros que producen ruido con el arado por su pedregosidad. Estos suelos se presentan en climas semiáridos, tropicales o templados. Se caracterizan por tener una capa superficial abundante en materia orgánica y muy fértil que descansa sobre roca caliza o materiales ricos en cal. Generalmente las rendzinas son suelos arcillosos y poco profundos -por debajo de los 25 cm, pero llegan a soportar vegetación de selva alta perennifolia. Si se desmontan se pueden usar en la ganadería con rendimientos bajos a moderados, pero con gran peligro de erosión en laderas y lomas. El uso forestal de estos suelos depende de la vegetación que presenten. Son moderadamente susceptibles a la erosión, no tienen subunidades.
Vertisol (V)	Del latín <i>vertere</i> , voltear. Literalmente, suelo que se revuelve o que se voltea. Suelos de climas templados y cálidos, especialmente de zonas con una marcada estación seca y otra lluviosa. La vegetación natural va de selvas bajas a pastizales y matorrales. Se caracterizan por su estructura masiva y su alto contenido de arcilla, la cual es expandible en húmedo formando superficies de deslizamiento llamadas facetas, y que por ser colapsables en seco pueden formar grietas en la superficie o a determinada profundidad. Su color más común es el negro o gris oscuro en la zona centro a oriente de México y de color café rojizo hacia el norte del país. Su uso agrícola es muy extenso, variado y productivo. Son muy fértiles pero su dureza dificulta la labranza. En estos suelos se produce la mayor parte de caña, cereales, hortalizas y algodón. Tienen baja susceptibilidad a la erosión y alto riesgo de salinización.

Adaptado de: (INEGI, 2004b)

Tabla 1.3. Subunidades de suelos de la cuenca del Río Gallinas.

Subunidades de suelo	Descripción
Calcárico	Del latín <i>calcareum</i> : calcáreo. Suelos ricos en cal y nutrientes para las plantas. Unidades de suelo: Feozem, Fluvisol, Gleysol y Regosol.
Háplico	Del griego <i>haplos</i> : simple. Suelos que no presentan características de otras subunidades existentes en ciertos tipos de suelo. Unidades de suelo: Castañozem, Chernozem, Feozem, Xerosol y Yermosol.
Pélico	Del griego <i>pellos</i> : gnsaceo. Subunidad exclusiva de los Vertisoles. Indican un color negro o gris oscuro.

Adaptado de: (INEGI, 2004b)

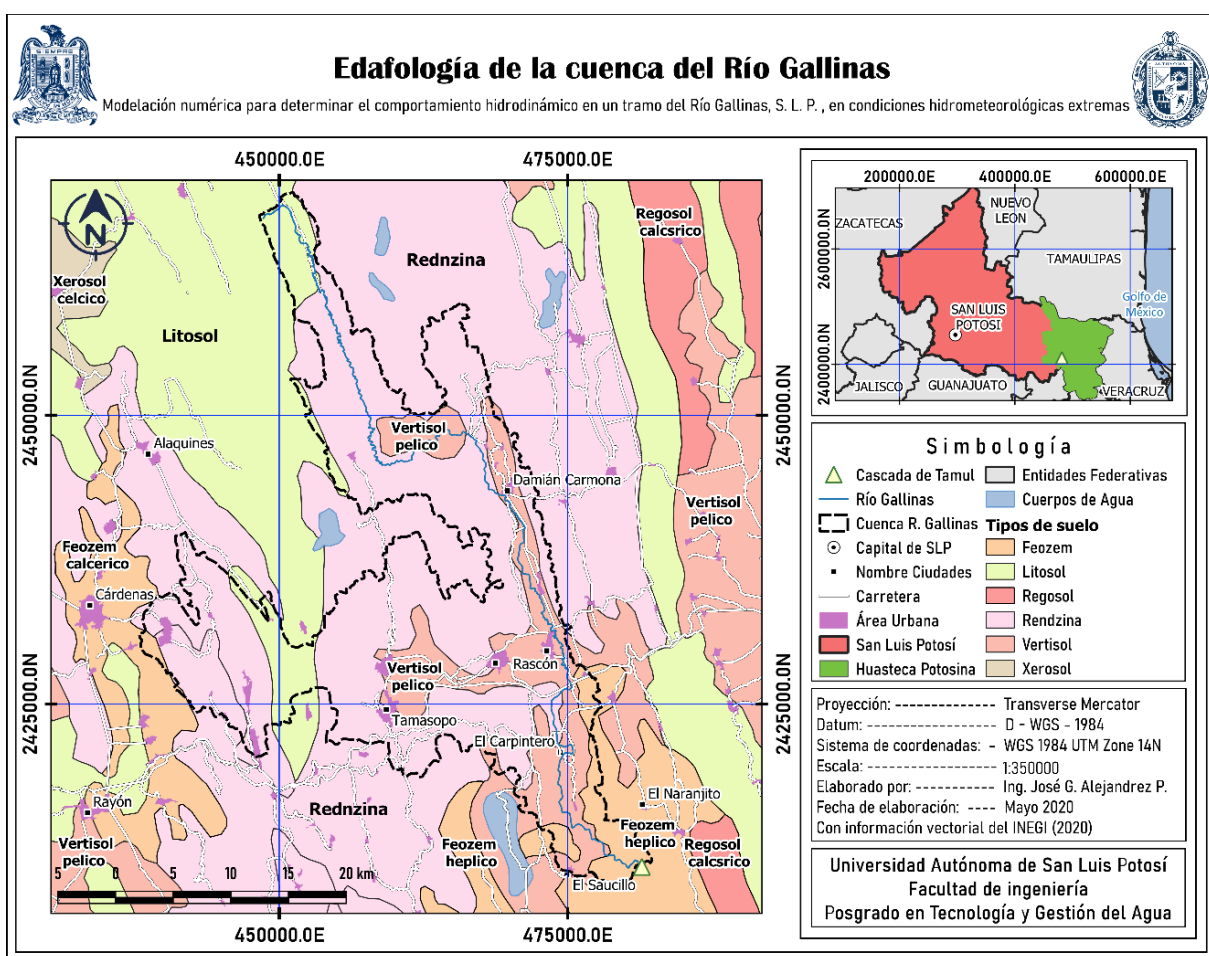


Figura 1.10. Mapa de la edafología en la zona de estudio.

Tabla 1.4. Edafología de la cuenca del Río Gallinas.

Nombre suelo 1	Nombre subsuelo1	Textura	Fase física	Clave	Área (km ²)	Porcentaje
Feozem	Háplico	Fina	Lítica	Hh+E+l/3/L	40.577	4.71%
Feozem	Calcárico	Media	Petroc	Hc+Vp/2/PC	3.778	0.44%
Litosol	---	Media	---	I+E+Rc/2	65.934	7.66%
Rendzina	---	Fina	Lítica	E+Hh+l/3/L	480.959	55.88%
Rendzina	---	Media	Lítica	E+l/2/L	73.795	8.57%
Vertisol	Pélico	Fina	Lítica	Vp+E/3/L	195.594	22.73%
Total					860.636	100.0%

Adaptado de: (INEGI, 2004b)

1.3.3. Uso de suelo y vegetación

Las plantas constituyen uno de los elementos del paisaje con propiedades físicas únicas; éstas varían en su morfología y modo de asociación según su latitud, altura y posición con respecto al continente (A. Strahler, 1986).

Entre los beneficios que ofrece la cobertura vegetal, se encuentran la disminución de la escorrentía y, de la capacidad erosiva de los flujos; además, la estabilidad en laderas y taludes, disminuyendo la amenaza en vidas humanas, bienes e infraestructura, por remoción y depósitos en masa. En suma, podría decirse que la vegetación atenúa el impacto de eventos negativos en el desarrollo social y económico de las comunidades (Castañeda Camacho *et al.*, 2018; Palacio *et al.*, 2007)

La caracterización del uso de suelo y vegetación en la cuenca se realizó mediante la capa vectorial del mismo nombre proporcionada por el INEGI en el año 2013, la cual fue actualizada de acuerdo con lo observado en imágenes satelitales, donde la zona de estudio queda cubierta principalmente por *bosques, selvas y área agrícola*, así mismo y en un menor porcentaje se encuentran las *áreas urbanas*. A continuación, son descritas las características de los principales usos de suelo presentes en la cuenca de estudio (Tabla 1.5) y (Figura 1.11).

Tabla 1.5. Uso del suelo de la cuenca del Río Gallinas.

Entidad	Tipo (área y %)	Descripción
Área Agrícola	Agricultura de Riego (119.168 km ² 13.85%)	Áreas de producción de cultivos, obtenidos para su utilización por el ser humano ya sea como alimentos, forrajes, ornamental o industrial siendo el suministro de agua utilizada para su desarrollo obtenida por fuentes externas, un pozo, una presa, etcétera.
	Agri de Temporal (153.685 km ² 17.85%)	Áreas de producción de cultivos, obtenidos para su utilización por el ser humano donde el agua necesaria para el desarrollo vegetativo es suministrada por la lluvia.
Bosque	Bosque de Encino (319.078 km ² 37.07%)	Constituido por especies de Quercus entre 6 y 10 m de altura. Asentado sobre un estrato calizo presenta elementos de baja estatura con troncos sinuosos, delgados y ramificados.
	Bosque mesófilo de Montaña (18.359 km ² 2.13%)	De escasa distribución, deviene de gran importancia por la diversidad de especies que concentra; se desarrolla en las laderas de las montañas donde prevalece alto grado de humedad. Concentra individuos en un estrato superior de 20 a 35 m de altura, de 3 a 6 m en el medio y en el inferior de 0.4 a 0.8 m.
Otros	Palmar (2.777 km ² 0.32%)	Los palmares pueden formar bosques aislados cuyas alturas varían desde 5 hasta 30m. Se desarrollan en climas cálidos húmedos y subhúmedos. Se les puede encontrar formando parte de las selvas o como comunidades puras.
Pastizal	Pastizal Cultivado (5.307 km ² 0.62%)	Especie introducida mediante labores de cultivo en terrenos agrícolas. Constituido por plantas herbáceas y gramíneas de crecimiento denso y de alto contenido nutritivo para el ganado.
	Pastizal Inducido (18.572 km ² 2.16%)	Este pastizal crece al ser eliminada la cubierta vegetal original; por ello, se considera de tipo secundario, se mantiene a través del tiempo mediante la acción periódica del fuego y pastoreo extensivo del ganado. Contiene un elevado número de especies herbáceas acompañantes.
Selva	Selva Baja Caducifolia (159.332 km ² 18.51%)	Poco más del 75% de este grupo pierde sus hojas en la época seca del año. Los árboles entre 4 y 15 metros de altura son de troncos cortos, ramificados cerca de la base, algunos de corteza escamosa, sus copas no son densas, sí muy abiertas.
	Selva Mediana Subperennifolia (51.038 km ² 5.93%)	Comparte muchas características fisonómicas con la Selva Alta Perennifolia; sin embargo, aproximadamente una cuarta parte de los elementos arbóreos de este grupo pierde sus hojas durante la época seca del año.
Sin Vegetación	Área Urbana (13.181 km ² 1.53%)	Conglomerado demográfico, considerando dentro del mismo los elementos naturales y las obras materiales que lo integra.
		Cuerpo de Agua (0.138 km ² 0.02%) Extensión con cubierta de agua interior perenne.

Adaptado de (Castañeda Camacho et al., 2018; INEGI, 2012)

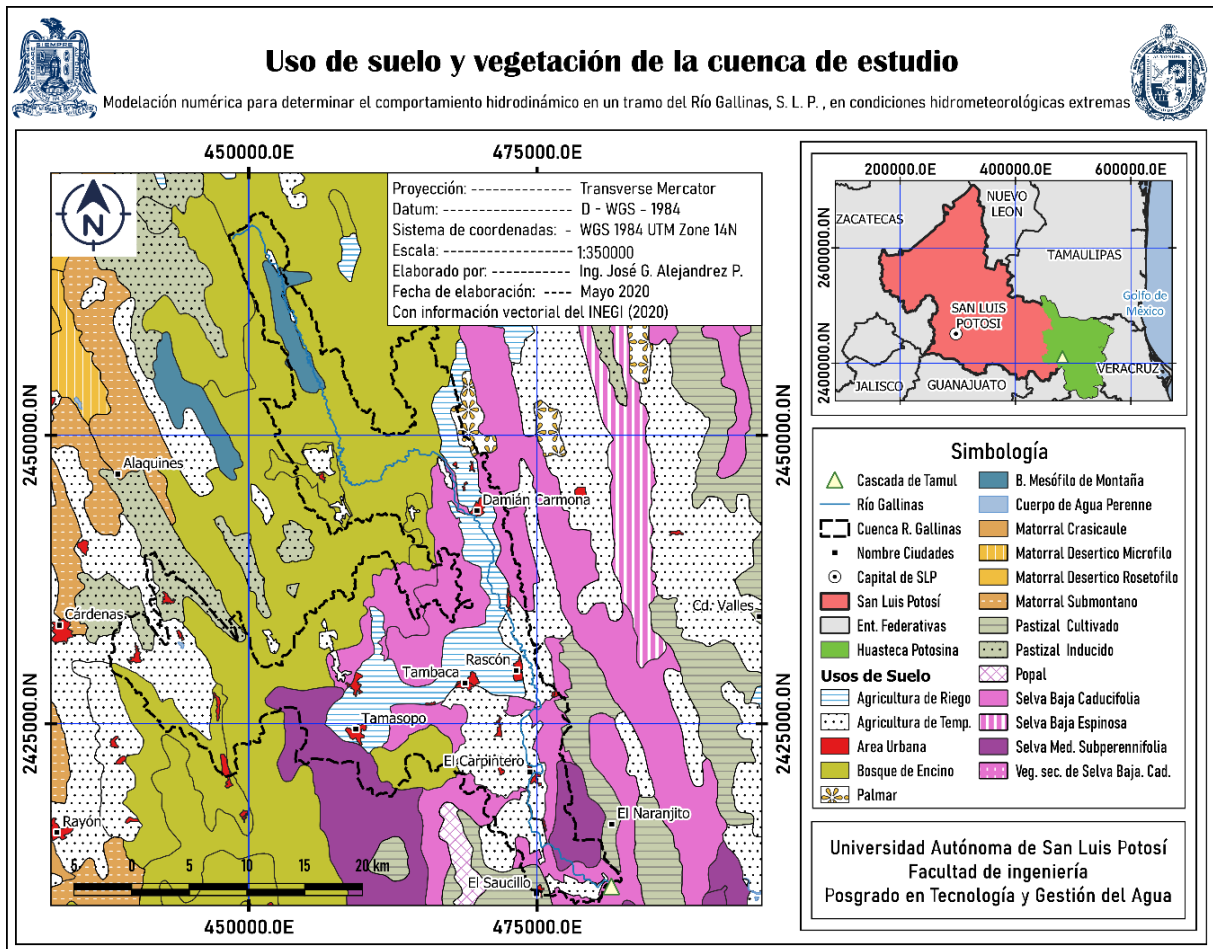


Figura 1.11. Mapa con usos de suelo y vegetación en la cuenca del Río Gallinas.

1.3.4. Fisiografía

La fisiografía comprende el estudio de las formas del relieve y la litósfera. Así, una provincia fisiográfica puede ser conceptualizada como una región natural constituida por una o más unidades climáticas y por conjuntos de unidades genéticas de relieve, con relaciones de parentesco de tipo geológico, topográfico y espacial (Villota, 1997).

En este sentido, la República mexicana presenta un terreno eminentemente montañoso donde sobresalen tres grandes cadenas orográficas: Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental y el Sistema Neovolcánico Transversal (Castañeda Camacho *et al.*, 2018).

Debido a que las delimitaciones orográficas son extensas, estas son divididas con base a la información topográfica, geológica y climatológica de cada zona, identificando diferentes unidades establecidas por el INEGI, mencionadas a continuación:

- *Provincia Fisiográfica.* Conjunto estructural de origen geológico unitario, con morfología propia y distintiva.
- *Subprovincia.* Subregiones de una provincia fisiográfica con características distintivas.
- *Sistema de Topoformas.* Conjunto de formas del terreno asociadas según algún patrón o patrones estructurales y/o degradativos.

Apoyados de la información vectorial del INEGI, se determinó que la cuenca del Río Gallinas se encuentra inmerso en la provincia fisiográfica nombrada *Sierra Madre Oriental* y las subprovincias *Gran Sierra Plegada Con Bajas* y *Carso Huasteco*, las cuales son descritas en la Tabla 1.6, y se aprecian junto con las topoformas de la cuenca en la Tabla 1.7 y Figura 1.12.

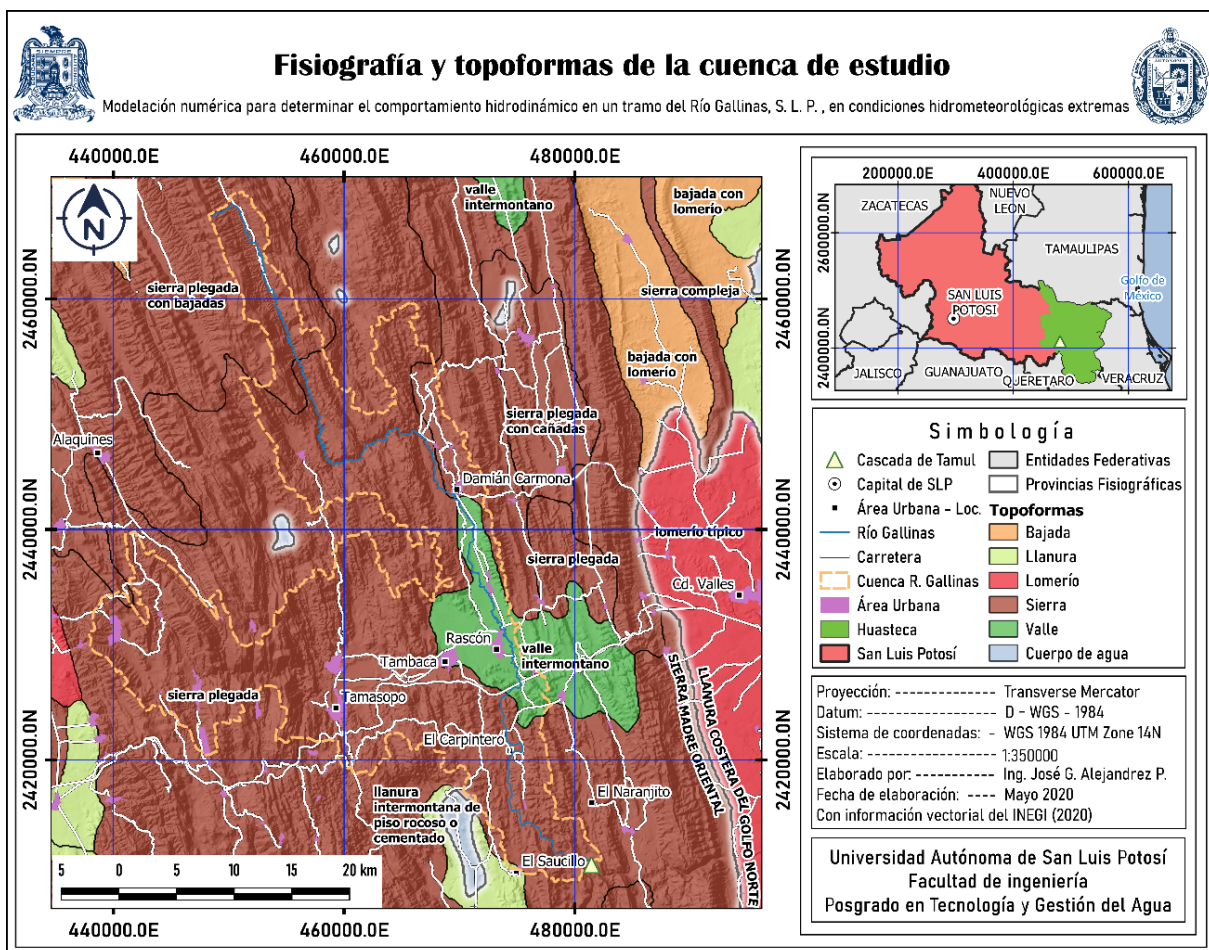


Figura 1.12. Mapa con topoformas y provincias fisiográficas en la cuenca del Río Gallinas.

Tabla 1.6. Características de las subprovincias presentes en la cuenca de estudio.

Provincia	Subprovincia	Principales características
Sierra Madre Oriental	Gran Sierra Plegada	Dominan estratos plegados de rocas calizas marinas con importantes rasgos de carsificación; en gran parte el drenaje es subterráneo. Sobresalen prominentes ejes estructurales de tipo anticlinal y sinclinal y, con orientación norte-sur, tienen lugar grandes fallas, además de algunos afloramientos de rocas volcánicas. Las cumbres exceden los 1000 msnm y los sistemas de topoformas representativos son las sierras pliegue, mesetas, lomerío con bajadas y valles intermontanos.
	Carso Huasteco	Por la acción de los ríos presenta un fuerte grado de disección, incluso desarrollo de cañones, además de un mayor grado de expresión del carso. En su mayor parte se constituye por sierras, aunque también se encuentran algunos cañones, valles y llanuras. Con orientación de noroeste-sureste y de origen volcánico y sedimentario las sierras son de diversos tipos: alta de laderas abruptas, de laderas convexas, calcárea con dolinas y baja. Los valles intermontanos se presentan hacia las partes planas y de pendiente moderada, también están presentes los valles de laderas tendidas.

Adaptado de: (Castañeda Camacho et al., 2018; INEGI, 2002)

Tabla 1.7. Fisiografía y topoformas en la cuenca del Río Gallinas.

Provincia fisiográfica	Subprovincia fisiográfica	Topoforma	Descripción	Área (km)	%
Sierra Madre Oriental	Gran Sierra Plegada	Sierra	Sierra plegada con bajadas	103.945	12.08%
	Carso Huasteco	Sierra	Sierra plegada	672.539	78.14%
	Carso Huasteco	Valle	Valle intermontano	83.604	9.71%
	Carso Huasteco	Llanura	Llanura intermontana de piso rocoso o cementado	0.413	0.05%
	-	-	Cuerpo de agua	0.135	0.02%
	Total			860.636	100.0%

1.3.5. Regiones hidrológicas y cauce principal

La cuenca hidrográfica es un concepto geográfico e hidrológico que se define como el área de la superficie terrestre por donde el agua de lluvia, nieve o deshielo escurre a través de una red de corrientes que fluyen hacia una corriente principal, y por ésta hacia un punto común de salida. Éste puede ser un almacenamiento de agua interior, como un lago, laguna o el embalse de una presa, en cuyo caso se llama cuenca

endorreica. Caso contrario, cuando las descargas llegan a un cauce o hasta el mar se le denomina cuenca exorreica, adquiriendo normalmente la cuenca el nombre de la corriente principal.

Por su parte Campos Aranda (1984), expresa que la cuenca es la totalidad del área drenada por una corriente o sistema interconectado de cauces, tales que todo el escurrimiento originado en tal área es descargado a través de una única salida.

Con el objetivo de disponer de una cartografía única de cuencas hidrográficas, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), el INEGI y la CONAGUA unieron esfuerzos y establecieron de manera conjunta criterios topográficos e hidrográficos comunes para la delimitación de cuencas hidrográficas en México (SEMARNAT, 2013). Dando como resultado la delimitación de 1,471 cuencas hidrográficas que, con propósitos administrativos, la CONAGUA ha agrupado en 731 cuencas hidrológicas, que a su vez conforman 37 regiones hidrológicas para finalmente ser nuevamente agrupadas en 13 regiones hidrológico – administrativas (RHA).

La cuenca de estudio denominada por la CONAGUA como, subcuenca *RH26Cg* de nombre *Río Gallinas*, se encuentra inmersa dentro de la cuenca del *Río Tamuín*, ubicada en la subregión hidrológica *Bajo Panuco*, pertenece a la *Región Hidrológica #26* de nombre *Panuco*. Dicha región hidrológica es administrada por la *RHA Golfo Norte (IX)* (Figura 1.13).

Como se menciona anteriormente, el nombre del cauce principal normalmente da origen al nombre de la cuenca y en este caso no es la excepción. El Río Gallinas es el cauce principal debido a que se encuentra en la salida de la cuenca además de ser el de mayor orden.

El Río Gallinas nace al norte de la cuenca, a 1600 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) en lo que se identifica como parte de la sierra plegada con bajadas, 15 kilómetros al sureste de la Ciudad del Maíz. El cauce inicia con una dirección de flujo sureste, donde, 4 kilómetros aguas abajo adopta el nombre de arroyo Llanitos cauce de tercer orden. El arroyo sigue su recorrido durante varios kilómetros hasta cambiar de rumbo al noreste, donde debido a la inclusión de corrientes pasa a ser un cauce de orden cinco, llamado San Nicolás.

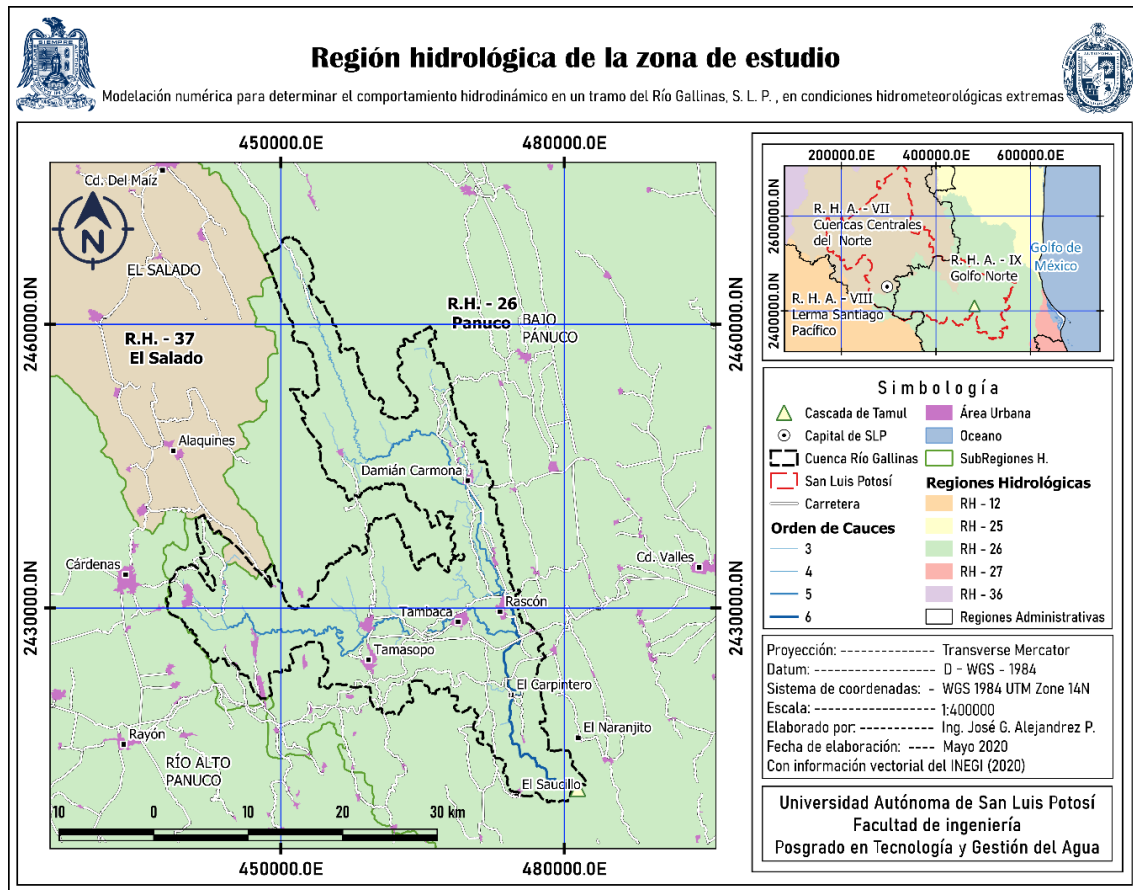


Figura 1.13. Región hidrológica de la cuenca del Río Gallinas.

Aguas abajo, este vuelve a recuperar el rumbo inicial y cruza la localidad Damián Carmona, rebasando posteriormente la localidad de El Chino, donde adopta el nombre de Río Gallinas, y al superar la bifurcación con el arroyo Valladares se convierte en un cauce de orden 6. El Río Gallinas continúa descendiendo y se le incorpora el caudal del río Tamasopo, y posteriormente pasa las localidades de El Carpintero y El Jabalí, para finalmente llegar a la cascada de Tamul, siendo esta la boquilla de la cuenca donde desemboca sobre el Río Santa María.

En la unión de ambos cauces, adquiere una dirección de flujo hacia el este y el nombre de Río Tampaón, posteriormente, aguas abajo y a partir de la unión con el Río Moctezuma se idéntica como Panuco, el cual desemboca sobre el Golfo de México. El comportamiento y evolución del Río Gallinas se aprecia en la Figura 1.14, página 53.

1.3.6. Hidrografía

La hidrografía, es una rama de la geografía dedicada caracterizar los cuerpos de agua, principalmente los ubicados sobre la masa continental. La hidrografía se encuentra estrechamente relacionada con la orografía, debido a que esta, caracteriza el relieve de una región, dicho en otras palabras, al conjunto de elevaciones que constituyen la superficie, haciendo posible determinar los cuerpos de agua y escurrimientos, estableciendo la dirección del flujo de los cuerpos de agua.

De acuerdo con el portal del INEGI, los datos vectoriales descargados referentes a la hidrografía nos proporciona información estructurada a modo de un sistema lineal que interpreta el drenaje de la precipitación a través de arroyos y ríos en cada cuenca hidrográfica, en la Figura 1.14 se observa la orografía y red hidrográfica de la cuenca de estudio.

1.3.7. Geología

La historia y dinámica de la Tierra se interpreta a través del estudio de las rocas (De Cserna *et al.*, 2002). Una roca es un conjunto, a veces consolidado de minerales definidos. Entonces, según los minerales que las constituyen y el proceso que las origina se clasifican en tres tipos: ígneas, sedimentarias y metamórficas (Castañeda Camacho *et al.*, 2018).

Las rocas ígneas pueden ser intrusivas, también conocidas como plutónicas (granito, cuarzo, gabro, diorita, sienita), o extrusivas, denominadas volcánicas (basalto, riolita, andesita, piedra pómez, obsidiana, tobas). Las primeras, se forman por lento enfriamiento en el interior de la Tierra; las segundas, por enfriamiento rápido en el exterior de ésta (Castañeda Camacho *et al.*, 2018).

Por otra parte, las rocas sedimentarias (calizas, lutitas, areniscas) dispuestas en forma de capas o estratos, están conformadas por sedimentos de rocas que fueron afectadas por diversos procesos erosivos. En su formación también pueden intervenir procesos químicos cuyo resultado se manifiesta, por mencionar algunos ejemplos, en la formación de la sal común, la gema, el carbón, la caliza y el yeso (Castañeda Camacho *et al.*, 2018; EOM, 2000).

Las rocas metamórficas fueron en su origen ígneas o sedimentarias, y su conformación responde a cambios operados en las rocas primitivas por acción de un aumento de temperatura, presión o humedad. Este grupo puede ser clasificado en metamórficas exfoliadas (pizarra, esquistos, mica) o metamórficas no exfoliadas (cuarcita y mármol) (Castañeda Camacho *et al.*, 2018; EOM, 2000).

En cuanto a los movimientos tectónicos horizontales y verticales, Según Lugo-Hubp (1990), además de ser una intensa actividad volcánica han intervenido en la formación del relieve de la República mexicana. Así, en su territorio, las rocas sedimentarias (de la era paleozoica, mesozoica y principios de la cenozoica) son el primer grupo de importancia por la magnitud de su cobertura (64%); el segundo corresponde a las rocas ígneas (intrusivas y extrusivas) de los periodos terciario y cuaternario (32%); por último, las rocas metamórficas ocupan una mínima proporción (4%) (Castañeda Camacho *et al.*, 2018; EOM, 2000).

Para el análisis de las características geológicas, se obtuvieron las capas vectoriales de las fallas y fracturas en la zona, así como la clasificación del tipo de roca y su periodo geológico. Al utilizar la superposición de las capas vectoriales geológicas con la de la cuenca, es posible observar que los límites de ésta, coincide con la presencia cercana de pliegues del tipo anticlinal. Esto tiene sentido debido a que estas, son estructuras geológicas originadas por fuerzas de compresión, sobre las capas de rocas de la corteza terrestre; el cual consiste en un pliegue convexo hacia arriba (elementos topográficos elevados), por el contrario un pliegue sinclinal, es una estructura geológica originada también por compresión, pero que está formado por un pliegue convexo hacia abajo (depresiones topográficas) (INEGI, 2005).

Dentro de la cuenca se pueden identificar diversas estructuras geológicas, tales como pliegues principalmente sinclinales, además de dolinas (depresión topográfica desarrollada a causa de la disolución de la caliza y que comunica a la superficie el drenaje subterráneo; *cenote*), fallas (ruptura de la corteza con desplazamiento entre los bloques) y fracturas (ruptura de la corteza sin desplazamiento entre los bloques). Resaltando la presencia tanto de dolinas como de fracturas en el Río Gallinas.

Mientras que, el tipo de roca predominante sobre la cuenca de estudio corresponde al tipo caliza, mostrándose a continuación los periodos geológicos (Tabla 1.8), y en Tabla 1.9 y Figura 1.15 se observa la geología de la cuenca del Río Gallinas.

Tabla 1.8. Eras y periodos geológicos.

Era	Periodo	Edad en millones de años
Cenozoica (C)	Cuaternario (Q)	1.8 – Presente
	Terciario (T)	65 – 1.8
Mesozoica (M)	Cretácico (K)	145 - 65
	Jurásico (J)	213 – 145
	Triásico (Tr)	248 – 213
Paleozoica (P)	Pérmico (Pe)	286 – 248
	Pensilvánico (Pn)	325 – 286
	Misisípico (Mi)	360 – 325
	Devónico (D)	410 – 360
	Silúrico (S)	440 – 410
	Ordovícico (O)	505 – 440
	Cámbrico (ε)	544 – 505
	Pe	4500 – 544
Precámbrico (Pe)	Pe	4500 – 544

Adaptado de (Castañeda Camacho et al., 2018; INEGI, 2005)

Tabla 1.9. Tipos y clases de rocas presentes en la cuenca de estudio.

Era	Periodo (Roca)	Descripción	Área (Km²)	%
(M)	Ki(cz)/ Cretácico inferior (Caliza)	Mesozoica / Sedimentaria / Caliza: De origen marino, se extiende en estratos de medianos a masivos. Forma los pliegues anticlinales, sinclinales y recumbentes de la Sierra Madre Oriental.	603.493	70.12%
(M)	Ks(cz-lu)/ Cretácico superior (Caliza-Lutita)	Mesozoica / Sed. / Caliza-lutita: De origen marino, depositados en aguas someras, se presenta en capas delgadas y contiene concreciones calcáreas.	56.688	6.59%
(M)	Ks(lu)/ Cretácico superior (Lutita)	Mesozoica / Sedimentaria / Lutita: Roca de tipo calcáreo y físil, se presenta en estratos medianos y gruesos.	20.545	2.39%
(M)	Ks(lu-ar)/ Cretácico superior (Lutita-Arenisca)	Mesozoica / Sed. / Lutita-arenisca: Presente en estratos de medianos a gruesos, algunos afloramientos de intenso plegamiento.	47.328	5.50%
(C)	Q(al)/ Cuaternario (Suelo Aluvial)	Cenozoica / Sed. / Suelo aluvial: Suelo formado por el depósito de materiales sueltos (gravas y arenas) provenientes de rocas preexistentes, que han sido transportados por corrientes superficiales de agua. Incluye depósitos que ocurren en llanuras de inundación y valles de los ríos.	86.411	10.04%
(C)	Q(B)/ Cuaternario (Basalto)	Cenozoica / Ígnea extrusiva / Basalto: De composición básica y estructura vesicular con relleno de calcita. Presente en bloques acordonados con intemperismo esferoidal o en coladas lávicas.	6.061	0.70%
(C)	Q(la)/ Cuaternario (Suelo Lacustre)	Cenozoica / Sed. / Suelo Lacustre: Es un suelo integrado por depósitos recientes que ocurre en lagos. Generalmente está formado por arcillas y sales.	1.193	0.14%
(C)	Ts(cg)/ Terciario superior (Conglomerado)	Cenozoica / Sed. / Conglomerado: Constituido de fragmentos de caliza, arenisca y basalto; su matriz es areno-arcillosa y débilmente cementada y su grado de concentración varía.	35.782	4.16%
S/D	Área sin información.		2.986	0.35%
H2O	Cuerpo de agua perenne.		0.147	0.02%
	Total		860.636	100%

Adaptado de: (Castañeda Camacho et al., 2018; INEGI, 2005)



Orografía y Red Hidrográfica de la cuenca de estudio

Modelación numérica para determinar el comportamiento hidrodinámico en un tramo del Río Gallinas, San Luis Potosí, en condiciones hidrometeorológicas extremas

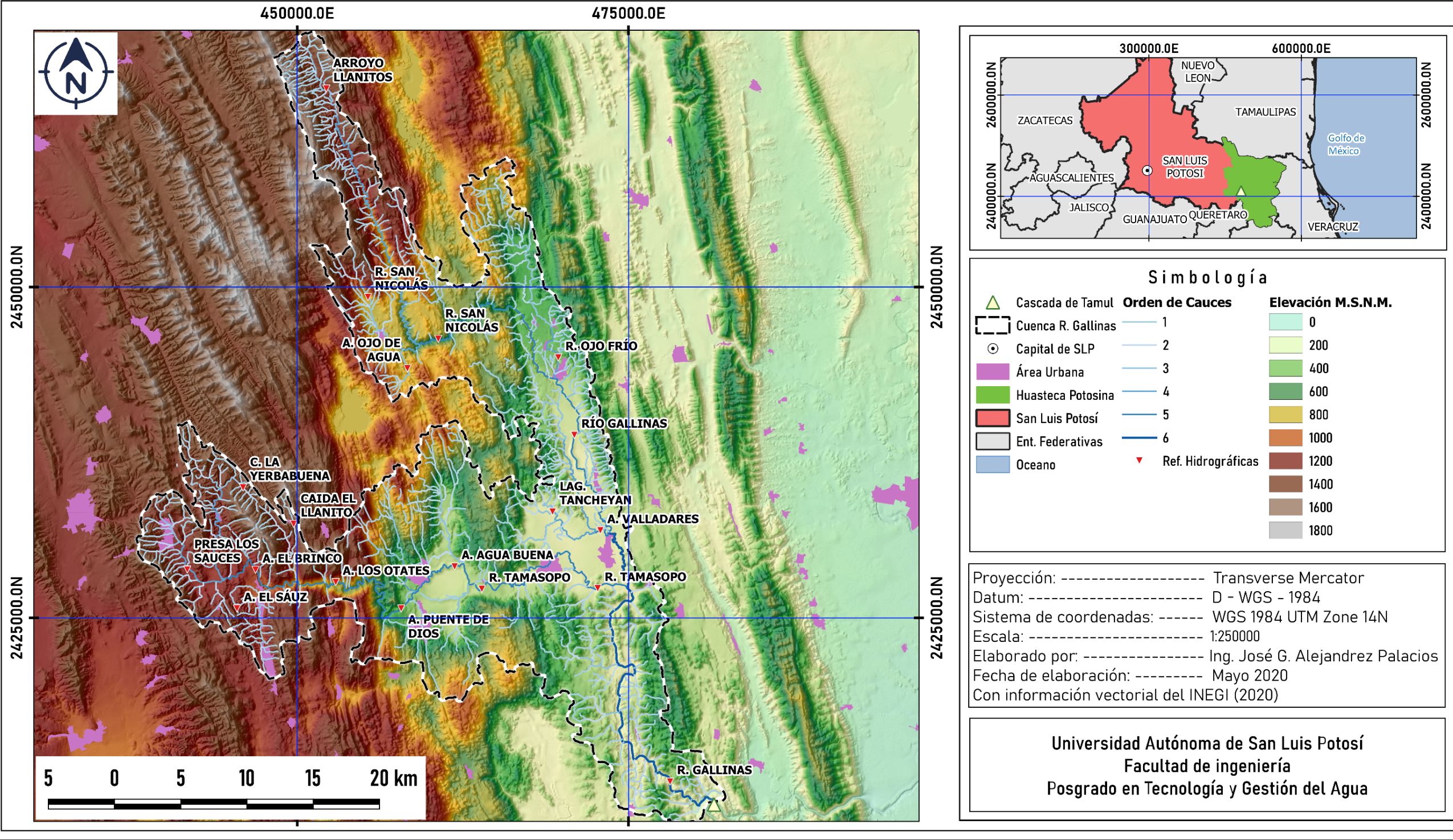


Figura 1.14. Orografía y Red hidrográfica de la cuenca del Río Gallinas.



Geología de la cuenca de estudio

Modelación numérica para determinar el comportamiento hidrodinámico en un tramo del Río Gallinas, San Luis Potosí, en condiciones hidrometeorológicas extremas

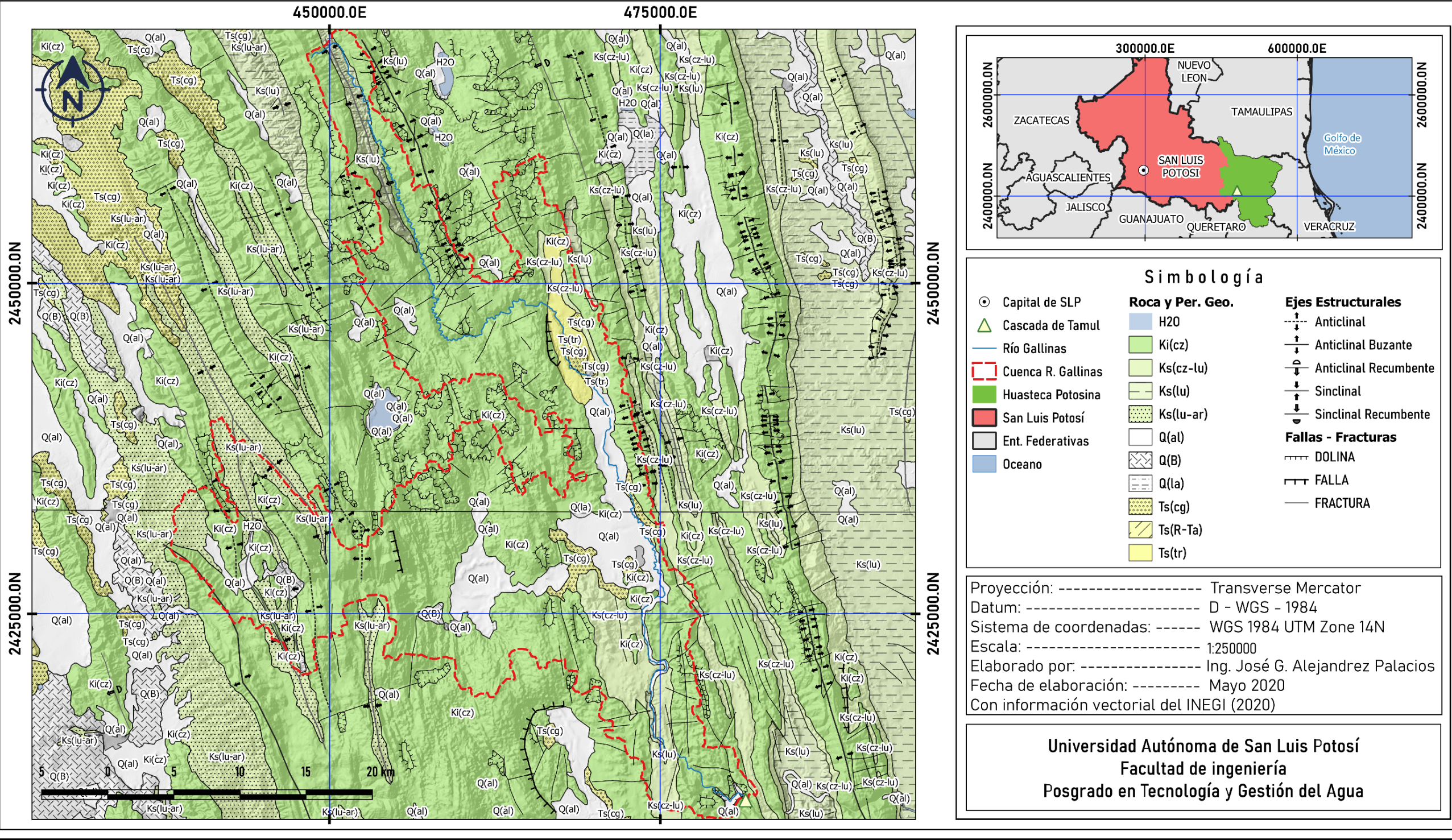


Figura 1.15. Geología de la cuenca del Río Gallinas.

Capítulo 2. Análisis hidrológico de la cuenca del Río Gallinas

2. Análisis hidrológico de la cuenca del Río Gallinas

2.1. Introducción

La Hidrología, según Dingman (1994) es la ciencia que se enfoca en el ciclo hidrológico global y a los procesos involucrados en la parte continental de dicho ciclo.

Por su parte Chow *et al.*, (1994), indica que la hidrología es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación, y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos. En una forma estricta, puede definirse como el estudio del ciclo hidrológico, es decir, la circulación ininterrumpida del agua entre la tierra y la atmósfera

2.1.1. Ciclo hidrológico del agua

El ciclo hidrológico, es un término descriptivo aplicable a la circulación general del agua en la tierra, definido como: la sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la atmósfera a la tierra y volver a la atmósfera; precipitación, escurrimiento, acumulación en el suelo o masas de agua, evaporación desde el suelo, el mar o aguas continentales, condensación de nubes (Figura 2.1) (Campos Aranda, 1984).

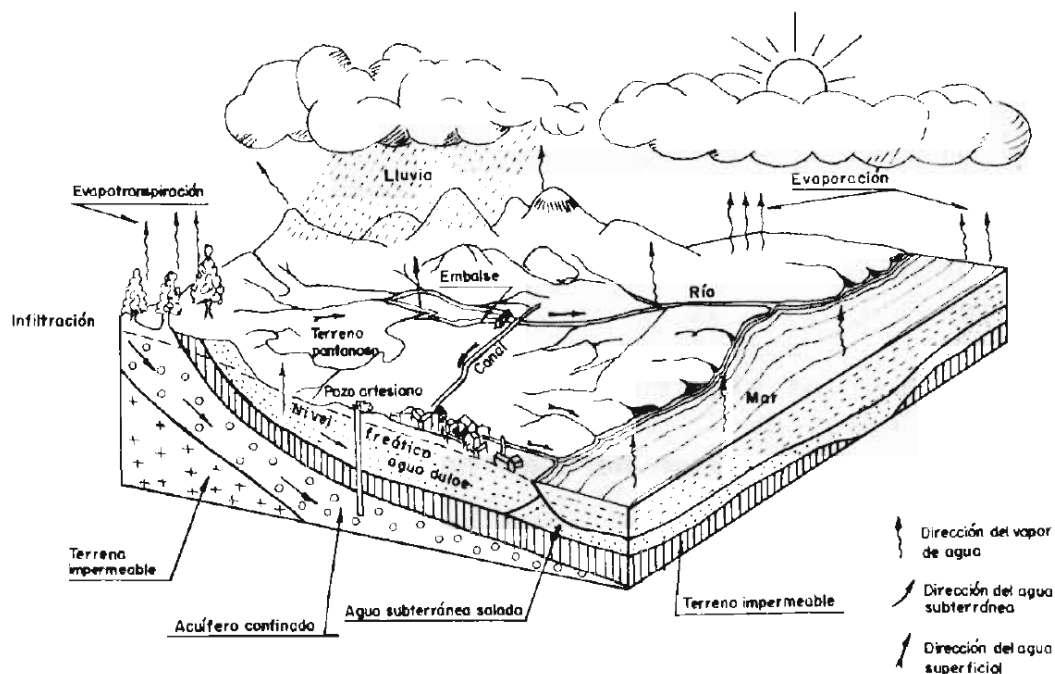


Figura 2.1. Representación esquemática del ciclo hidrológico.

Fuente: (Campos Aranda, 1984)

El ciclo del agua es un modelo conceptual de diferentes variables, relacionadas entre sí mediante procesos hidrológicos. Los estudios relacionados con el agua tienen que enmarcarse en el contexto del ciclo hidrológico, definiendo el espacio geográfico en primera instancia, siendo la cuenca hidrológica este espacio natural (Díaz Delgado *et al.*, 1999).

2.1.2. Precipitación

La precipitación se entiende como la caída del agua sobre la superficie terrestre en cualquiera de sus formas como lluvia, nieve y granizo. La formación de precipitación requiere la elevación de una masa de agua en la atmósfera de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense. Los tres mecanismos principales para la elevación de masas de aire son: la *elevación frontal*, donde el aire caliente es elevado sobre aire frío por un pasaje frontal; la *elevación orográfica*, mediante la cual una masa de aire se eleva para pasar por encima de una cadena montañosa; y la *elevación convectiva*, donde el aire se arrastra hacia arriba por una acción convectiva, como ocurre en el centro de una celda de una tormenta eléctrica (Chow *et al.*, 1994).

La precipitación es uno de los componentes primarios del ciclo hidrológico que corresponden a las entradas del balance hídrico (Llanos *et al.*, 2010). Los aparatos más usuales para registrar la lluvia en México son el pluviómetro y los pluviógrafos.

2.1.3. Evapotranspiración

La evaporación es un proceso esencial del ciclo hidrológico, pues se estima que aproximadamente el 75% de la precipitación total anual que ocurre sobre los continentes retorna a la atmósfera en forma de vapor, directamente por evaporación o, a través de las plantas, por transpiración. Representando una gran pérdida para directa en los almacenamientos superficiales (embalses) y subterráneos (acuíferos), de manera que su estimación es necesaria para todos los análisis hidrológicos (Campos Aranda, 1984).

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay forma sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Por ello es necesario introducir el concepto de la evapotranspiración, que surge de la combinación de los dos procesos anteriores, donde el agua cambia de estado líquido a gaseoso y directamente a través de las

plantas vuelve a la atmósfera en forma de vapor. La evapotranspiración depende del aporte de energía, del gradiente de presión de vapor y de la velocidad del viento, por esto la radiación, temperatura, humedad atmosférica y viento deben ser considerados en su determinación (Franco, 2008).

2.1.4. Escorrentía

De acuerdo con el ciclo hidrológico, el escurrimiento se puede definir como la porción de la precipitación pluvial que ocurre en una zona o cuenca hidrológica y, que circula sobre o debajo de la superficie terrestre, llegando a una corriente para ser drenada hasta la salida de una cuenca (Breña & Jacobo, 2006).

De acuerdo con la porción de la superficie terrestre en la que se origina el escurrimiento, éste se puede dividir en: escurrimiento superficial, escurrimiento subsuperficial y escurrimiento subterráneo (Chow *et al.*, 1994).

El escurrimiento superficial, es la parte del escurrimiento que viaja sobre el suelo y después por los cauces. El flujo subsuperficial, es aquel que se infiltró en el terreno y que se mueve lateralmente en los horizontes superiores del suelo hacia las corrientes. Una parte de este tipo de escurrimiento, aparece rápidamente en los cauces y otra es percolada hasta alcanzar el agua subterránea, cuya descarga produce el escurrimiento subterráneo (Campos Aranda, 1984).

Los factores que intervienen en el comportamiento del escurrimiento son los referentes a la precipitación, el clima, las características geomorfológicas de la cuenca, así como los usos y tipo de suelo presentes.

2.1.5. Infiltración

La parte de la precipitación que alcanza la superficie del suelo puede seguir dos caminos: infiltrarse o bien, llenar las depresiones y posteriormente escurrir sobre el terreno, dependiendo de la intensidad de la lluvia, pues si no se excede la capacidad del suelo para absorber el agua, no habrá posibilidad de escurrimiento. La porción de la precipitación que se infiltra, incrementará el contenido de humedad de los suelos y podrá llegar a recargar a los acuíferos de la zona (Campos Aranda, 1984).

Entonces, la infiltración se define como el movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia dentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares (Aparicio Mijares, 2015).

La cantidad de agua que atraviesa la superficie del terreno por unidad de tiempo, que se desplaza al subsuelo, recibe el nombre de tasa de infiltración. Si el agua infiltrada continua adentrándose a una mayor profundidad, entonces ocurre la percolación (Breña P. & Jacobo V., 2006).

El terreno puede estar formado por un medio poroso (como son los suelos), por roca consolidada fracturada, o por una combinación de ambos. Las características particulares de cada uno de los medios que constituyen un terreno, influyen de forma directa sobre el comportamiento del flujo de agua (Breña P. & Jacobo V., 2006).

2.2. Geomorfología de la cuenca

Antes de hablar de geomorfología, es importante definir el concepto de morfología, la cual, comprende el estudio de las formas superficiales, y en ese sentido la geomorfología estudia y pretende cuantificar determinados rasgos propios de la superficie terrestre (Gray *et al.*, 1970).

Por su parte, la cuenca hidrográfica se puede definir como un gran colector que recibe las precipitaciones y las transforma en escurrimientos. Durante este proceso se encuentran pérdidas, producto de numerosos factores complejos, entre los que predominan el clima y la configuración del terreno.

Como resultado, las características geomorfológicas de la cuenca condicionan la respuesta hidráulica constituida por la precipitación. Dichas características se clasifican en dos: aquellas que condicionan *el volumen del escurrimiento*, el área de la cuenca y el tipo de suelo, y las que condicionan *la velocidad de respuesta*, como el orden de corrientes, la pendiente de la cuenca y de los cauces (Aparicio Mijares, 2015).

Para la caracterización de la cuenca y sus condiciones geomorfológicas, así como las características de los cauces dentro de la zona de estudio; se utilizaron SIG (Sistemas de Información Geográfica) a partir de los datos vectoriales descargados del portal del INEGI, donde se incluyen las cartas topográficas escala 1:50,000, la

fisiografía, geología, usos y tipos de suelo, así como el MDT (Modelo Digital de Terreno) en el que se encuentra inmersa la cuenca del Río Gallinas.

2.2.1. Delimitación de la cuenca

Para iniciar con la delimitación de la cuenca, es necesario conocer inicialmente el punto de salida de ésta, ubicada en la parte topográfica más baja, donde los escurrimientos convergen en un punto sobre el cauce principal. Para el caso de estudio, la boquilla queda determinada por la cascada de Tamul.

Una vez determinada la boquilla, y apoyados tanto de la información vectorial topográfica de la zona, como con los modelos digitales de elevación, se procedió a delimitar el parteaguas correspondiente a la cuenca del Río Gallinas.

El parteaguas, una línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico que separa una cuenca de otras, se delimitó a partir de la comparación de la propuesta existente por la red hidrográfica mexicana, con las elevaciones establecidas en el modelo digital del terreno, y las curvas de nivel del INEGI.

2.2.2. Área y perímetro de la cuenca

El área de la cuenca y su perímetro, corresponden al área y perímetro de la proyección horizontal delimitada por el parteaguas (Aparicio Mijares, 2015), usualmente expresada en km².

De conformidad con la delimitación de la cuenca de estudio, la cuenca del Río Gallinas tiene un área de aportación de 860.636 km² y un perímetro de 343.36 km, siendo considerada como una *cuenca intermedia grande* (Tabla 2.1) con base a la clasificación propuesta por los autores I-Pai Wu y R. Springall G (Campos Aranda, 1984).

Tabla 2.1. Clasificación propuesta para cuencas.

Unidad hidrológica	Área (km ²)	Descripción
Microcuenca	< 25	Muy pequeña
Microcuenca - Subcuenca	25 a 250	Pequeña
Subcuenca	250 a 500	Intermedia – pequeña
Cuenca	500 a 2500	Intermedia – grande
Cuenca	2500 a 5000	Grande
Cuenca	> 5000	Muy grande

Fuente: Campos Aranda (1984).

2.2.3. Forma de la cuenca

Establecer la forma de la cuenca, permite conocer de manera generalizada la capacidad de reacción de la corriente principal, ante la presencia de fenómenos de flujo máximo. En la bibliografía existen diversos coeficientes y relaciones, donde, a partir de la relación existente, normalmente entre el área y perímetro de la cuenca, se analiza la posible respuesta hidráulica de la cuenca, a continuación, se determinan algunos factores de forma.

2.2.3.1. Factor de forma (Kf)

El factor de forma (Kf) propuesto por Graveluis, indica la relación entre el área (A) de la cuenca y el cuadrado de la longitud del cauce principal (l). Este parámetro, mide la tendencia de la cuenca conforme a las crecidas, rápidas y muy intensas o, lentas y sostenidas, según la tendencia del valor, del factor de forma (Tabla 2.2) (Perez, 1979).

El factor de forma (Kf) está determinado por la ecuación (2.1), donde sus unidades son en kilómetros.

$$Kf = \frac{A}{l^2} = \frac{\text{Área de la cuenca}}{\text{Longitud del cauce principal}^2} \quad 2.1$$

Tabla 2.2. Clasificación del factor de forma (Kf).

Kf	Característica
<1	Tiende a ser una cuenca alargada, baja susceptibilidad a las avenidas
>1	Tiende a ser achatada, tendencia a ocurrencia de avenidas

Fuente: (Perez, 1979)

La longitud del cauce principal es de 104.891 km y como se mencionó anteriormente, el área de la cuenca corresponde a 860.634 km². Sustituyendo dichos valores en la ecuación 2.1, se obtiene un factor de forma de 0.078, indicando que la cuenca, tiende a ser alargada con una respuesta lenta ante la crecida de avenidas.

2.2.3.2. Coeficiente de compacidad (Cc)

El coeficiente de compacidad se define, como el cociente adimensional entre el perímetro de la cuenca (P) y la circunferencia de un círculo con el mismo área de la cuenca (Pc) (Campos Aranda, 1984). Dicho coeficiente queda determinado por la

ecuación (2.2), donde al acercarse al valor unitario, indica que la cuenca adopta una figura circular, mientras que, al tener valores de mayor magnitud, indica que la cuenca se vuelve alargada o asimétrica (Tabla 2.3).

$$Cc = \frac{P(km)}{Pc(km)^2} = 0.285 \frac{\text{Perímetro de la cuenca}}{\sqrt{\text{Área de la cuenca}}} \quad 2.2$$

Tabla 2.3. Clasificación del factor de forma (Cc).

Forma	Índice de compacidad	Forma de la cuenca
Clase I	1.0 – 1.25	Casi redonda -
Clase II	1.25 – 1.5	Oval – oblonga
Clase III	> 1.5	Oval – oblonga rectangular

Fuente: (Campos Aranda, 1984)

El valor del coeficiente de compacidad de la cuenca corresponde a 3.3, estableciendo, que la forma de la cuenca al ser clase III, muestra una forma alargada, donde los escurrimientos presentan una respuesta más lenta, ósea mayor tiempo.

2.2.4. Curva hipsométrica y elevación mediana de la cuenca

La curva hipsométrica es una forma gráfica de representar el relieve de una cuenca, observando en esta, las elevaciones del terreno en función de las superficie correspondiente, donde con propósito de comparar entre cuencas, resulta conveniente utilizar el porcentaje de área total en lugar de su magnitud (Figura 2.2) (Campos Aranda, 1984; A. N. Strahler, 1957).

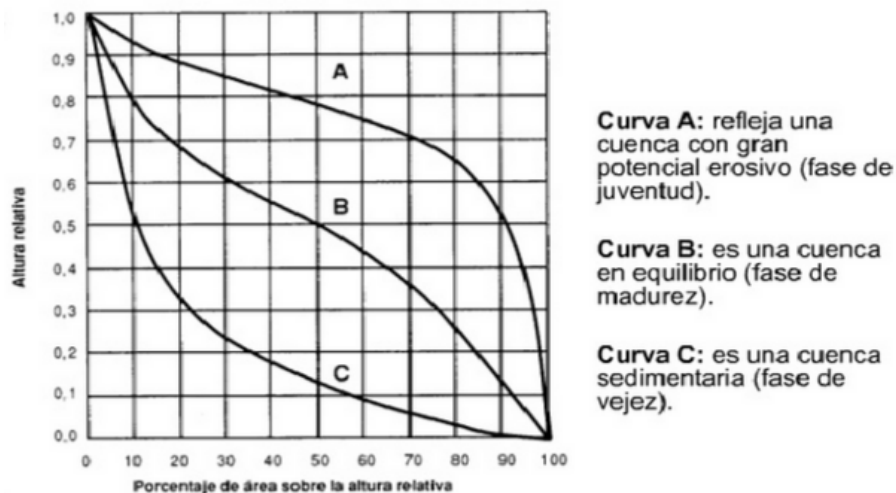


Figura 2.2. Características de la curva hipsométrica.

Fuente: (Campos Aranda, 1984)

La curva hipsométrica de la cuenca se determinó a partir de herramientas de los SIG, clasificando al MDE en 28 clases, tomando como referencia las elevaciones de este. Posteriormente, los atributos son exportados y graficados (Tabla 2.4).

Del análisis de la curva hipsométrica en la cuenca del Río Gallinas (Figura 2.3) se concluye que se presenta una curva de tipo B, lo que indica que la cuenca se encuentra en una fase de equilibrio y madurez.

Tabla 2.4. Datos para obtención de la curva hipsométrica de la cuenca del Río Gallinas.

No.	Cotas (m.s.n.m.)			Área Km ²			
	Min	Max	Promedio	Área entre curvas	Acumulada	% Acumulado	% entre curvas
1	100	160	130	0.074	860.638	100.0%	0.01%
2	161	220	190.5	2.464	860.565	100.0%	0.29%
3	221	280	250.5	24.253	858.101	99.7%	2.82%
4	281	340	310.5	118.133	833.848	96.9%	13.73%
5	341	400	370.5	82.100	715.715	83.2%	9.54%
6	401	460	430.5	64.031	633.614	73.6%	7.44%
7	461	520	490.5	52.036	569.584	66.2%	6.05%
8	521	580	550.5	42.939	517.548	60.1%	4.99%
9	581	640	610.5	36.413	474.609	55.1%	4.23%
10	641	700	670.5	38.493	438.196	50.9%	4.47%
11	701	760	730.5	38.254	399.703	46.4%	4.44%
12	761	820	790.5	46.349	361.448	42.0%	5.39%
13	821	880	850.5	31.041	315.099	36.6%	3.61%
14	881	940	910.5	24.238	284.058	33.0%	2.82%
15	941	1000	970.5	19.187	259.820	30.2%	2.23%
16	1001	1060	1030.5	18.557	240.633	28.0%	2.16%
17	1061	1120	1090.5	25.930	222.076	25.8%	3.01%
18	1121	1180	1150.5	35.324	196.146	22.8%	4.10%
19	1181	1240	1210.5	36.334	160.822	18.7%	4.22%
20	1241	1300	1270.5	37.419	124.488	14.5%	4.35%
21	1301	1360	1330.5	28.563	87.069	10.1%	3.32%
22	1361	1420	1390.5	22.155	58.505	6.8%	2.57%
23	1421	1480	1450.5	14.372	36.350	4.2%	1.67%
24	1481	1540	1510.5	9.729	21.978	2.6%	1.13%
25	1541	1600	1570.5	6.971	12.250	1.4%	0.81%
26	1601	1660	1630.5	3.760	5.278	0.6%	0.44%
27	1661	1720	1690.5	1.318	1.519	0.2%	0.15%
28	1721	1780	1750.5	0.201	0.201	0.0%	0.02%
	Total			860.6 km²			100%

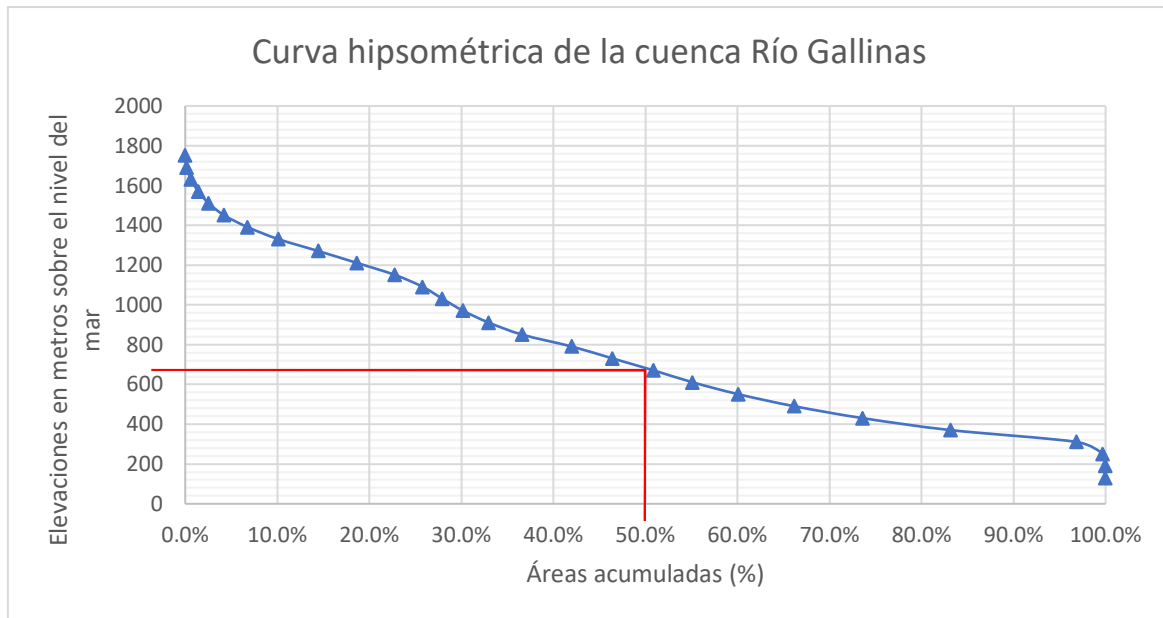


Figura 2.3. Curva hipsométrica de la cuenca Río Gallinas

2.2.5. Elevación mediana de la cuenca

Se denomina elevación mediana de una cuenca hidrográfica, aquella que determina la cota de la curva de nivel, que divide la cuenca en dos zonas de igual área. Debido a que el área de la cuenca en la curva hipsométrica está en porcentaje, es posible determinar la elevación mediana, apoyados de está (Figura 2.3), donde al trazar una línea perpendicular a la intersección del 50% con la curva, nos indica que la elevación mediana de la cuenca es igual a 680 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.).

2.2.6. Elevación media de la cuenca

Se entiende como la elevación promedio de la cuenca, y su importancia deriva de la relación existente entre la variación altitudinal de la cuenca hidrográfica, con el clima, por lo tanto, sobre el régimen hidrológico.

Para la estimación de la elevación media, fueron promediadas las elevaciones en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), de las coordenadas equidistantes a cada 2,000 metros, comprendidas dentro de la cuenca, y obtenidas del MDT como se muestra en la Figura 1.14 y Tabla 2.5, siendo la elevación media de la cuenca igual a 767.67 m.s.n.m.

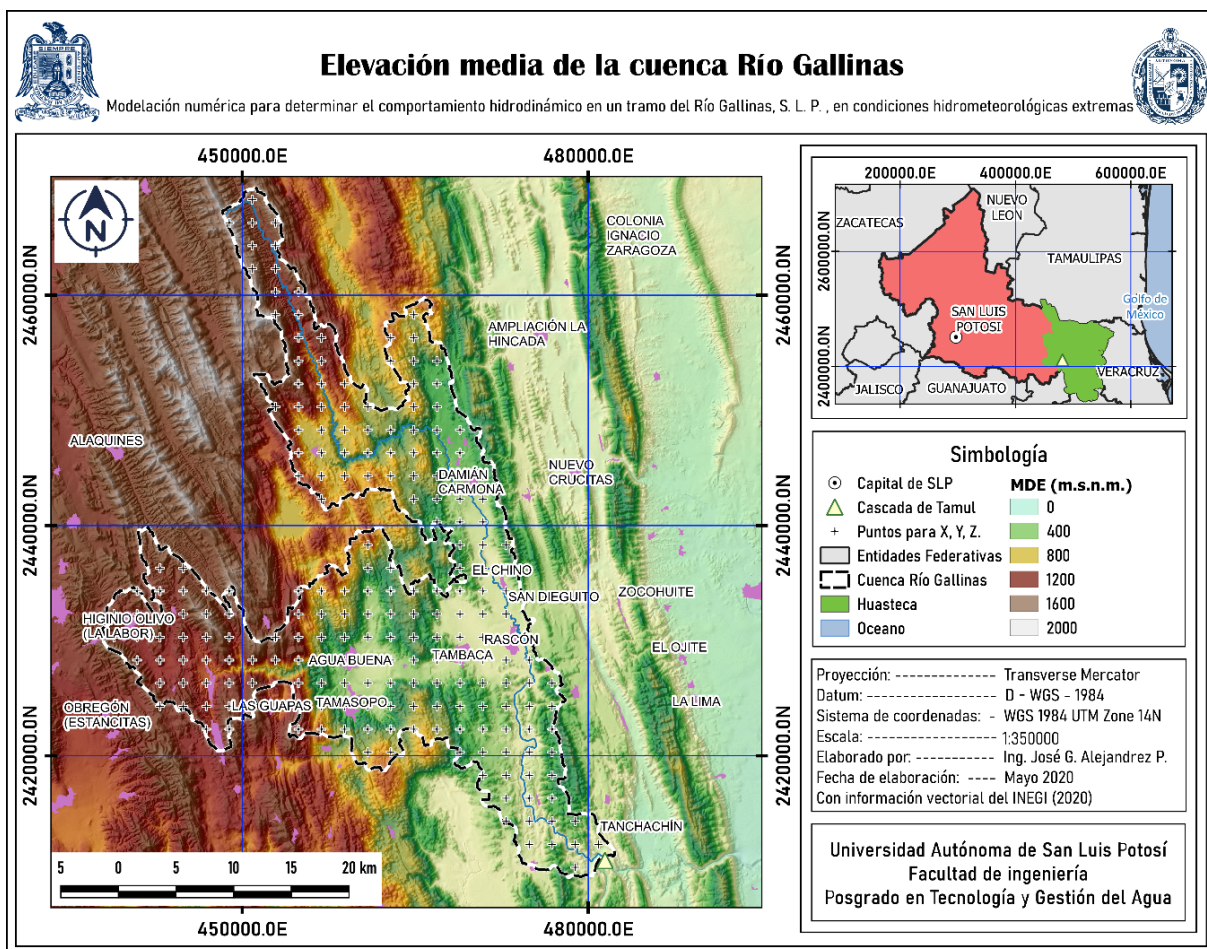


Figura 2.4. Puntos para la elevación media de la cuenca Río Gallinas.

Tabla 2.5. Valores para la elevación media de la cuenca.

X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
438876	2432305	1270	454876	2450305	994	462876	2446305	780	468876	2426305	506
438876	2430305	1386	454876	2448305	851	462876	2444305	825	468876	2424305	400
440876	2434305	1444	454876	2446305	1009	462876	2436305	587	468876	2422305	545
440876	2432305	1200	454876	2444305	1110	462876	2434305	583	468876	2420305	533
440876	2430305	1155	454876	2434305	1249	462876	2432305	574	470876	2444305	429
440876	2428305	1290	454876	2432305	1046	462876	2430305	524	470876	2442305	334
442876	2436305	1349	454876	2430305	1263	462876	2428305	346	470876	2440305	309
442876	2434305	1292	454876	2428305	841	462876	2426305	478	470876	2438305	300
442876	2430305	1357	454876	2426305	1123	462876	2424305	550	470876	2436305	282
442876	2428305	1214	454876	2422305	1249	462876	2422305	685	470876	2434305	316
442876	2426305	1132	456876	2456305	1249	462876	2420305	800	470876	2432305	301
442876	2424305	1389	456876	2454305	1143	464876	2458305	742	470876	2430305	281
444876	2436305	1437	456876	2452305	827	464876	2456305	774	470876	2428305	283
444876	2434305	1441	456876	2450305	962	464876	2454305	648	470876	2426305	472
444876	2432305	1272	456876	2448305	814	464876	2452305	749	470876	2424305	563

Continuación Tabla 2.5. Valores para la elevación media de la cuenca.

X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
444876	2430305	1213	456876	2446305	774	464876	2450305	911	470876	2422305	415
444876	2428305	1143	456876	2444305	862	464876	2448305	495	470876	2420305	397
444876	2426305	1223	456876	2442305	1024	464876	2446305	788	470876	2418305	441
444876	2424305	1301	456876	2434305	786	464876	2444305	682	472876	2438305	640
446876	2434305	1399	456876	2432305	740	464876	2442305	716	472876	2436305	410
446876	2432305	1592	456876	2430305	670	464876	2434305	741	472876	2434305	307
446876	2430305	1314	456876	2428305	639	464876	2432305	644	472876	2432305	297
446876	2428305	1051	456876	2426305	619	464876	2430305	583	472876	2430305	286
446876	2426305	1011	456876	2424305	707	464876	2428305	470	472876	2428305	331
446876	2424305	1101	456876	2422305	1022	464876	2426305	507	472876	2426305	427
446876	2422305	1174	458876	2452305	927	464876	2424305	739	472876	2424305	406
448876	2466305	1720	458876	2450305	989	464876	2422305	812	472876	2422305	349
448876	2434305	1563	458876	2448305	811	466876	2454305	573	472876	2420305	343
448876	2432305	1405	458876	2446305	788	466876	2452305	456	472876	2418305	342
448876	2430305	1304	458876	2444305	888	466876	2450305	461	472876	2416305	361
448876	2428305	1221	458876	2434305	853	466876	2448305	444	472876	2414305	363
448876	2426305	1261	458876	2432305	833	466876	2446305	424	474876	2430305	368
448876	2424305	1339	458876	2430305	553	466876	2444305	574	474876	2428305	286
448876	2422305	1390	458876	2428305	444	466876	2442305	521	474876	2426305	285
450876	2468305	1377	458876	2426305	386	466876	2440305	447	474876	2424305	381
450876	2466305	1348	458876	2424305	381	466876	2434305	574	474876	2422305	278
450876	2464305	1472	458876	2422305	667	466876	2432305	479	474876	2420305	280
450876	2462305	1598	460876	2450305	756	466876	2430305	425	474876	2418305	325
450876	2428305	1343	460876	2448305	735	466876	2428305	312	474876	2416305	297
450876	2426305	1405	460876	2446305	714	466876	2426305	511	474876	2414305	301
450876	2424305	1375	460876	2444305	941	466876	2424305	645	474876	2412305	300
452876	2466305	1498	460876	2438305	946	466876	2422305	751	476876	2426305	464
452876	2464305	1330	460876	2436305	669	468876	2448305	459	476876	2424305	390
452876	2462305	1203	460876	2434305	395	468876	2446305	421	476876	2422305	559
452876	2460305	1258	460876	2432305	348	468876	2444305	400	476876	2420305	515
452876	2458305	1622	460876	2430305	355	468876	2442305	364	476876	2418305	540
452876	2450305	1398	460876	2428305	317	468876	2440305	379	476876	2416305	478
452876	2430305	1476	460876	2426305	341	468876	2438305	495	476876	2414305	278
452876	2428305	1201	460876	2424305	394	468876	2436305	511	476876	2412305	492
454876	2460305	1241	460876	2422305	603	468876	2434305	348	478876	2414305	481
454876	2458305	1220	460876	2420305	761	468876	2432305	284	478876	2412305	283
454876	2456305	1099	462876	2456305	952	468876	2430305	299	478876	2410305	417
454876	2454305	1226	462876	2454305	827	468876	2428305	320	480876	2412305	284
454876	2452305	1430	462876	2448305	693						

2.3. Características de la red de drenaje

Se conoce como red de drenaje, al sistema de cauces por el que fluyen los escurrimientos superficiales, subsuperficiales y subterráneos (Campos Aranda, 1984). Para el caso de este análisis hidrológico superficial, las principales características exploradas son: los tipos y orden de corrientes, así, como la densidad de drenaje.

El sistema de drenaje está constituido por un cauce principal, corriente de mayor orden que pasa por la salida de una cuenca, y las corrientes tributarias, las cuales en algún punto descargan sobre el cauce principal.

2.3.1. Tipo de corrientes y cauce principal

Las corrientes son clasificadas en base a la constancia del escurrimiento, identificando tres tipos: *perennes*, aquellos escurrimientos que conducen agua en todo momento, excepto durante las sequías extremas; *intermitentes*, siendo los escurrimientos que llevan agua la mayor parte de tiempo, principalmente en temporada de lluvias y las corrientes *efímeras*, que conducen el agua producto de las precipitaciones (Aparicio Mijares, 2015).

Siendo el Río Gallinas, un escurrimiento del tipo perenne, ya que en condiciones naturales lleva agua, sin embargo, ante la presencia de sequías extremas, así como a la interferencia antropogénica, recientemente algunos tramos se han secado.

El cauce principal, con una longitud de 104.89 km, nace en localidad Llanitos a una elevación de 1,613 m.s.n.m., y desciende, previo al salto de la cascada de Tamul a los 160 m.s.n.m.

2.3.2. Orden de corrientes

El orden de corrientes es una clasificación que refleja el grado de ramificación o bifurcación dentro de una cuenca. Dicho esto, el orden de la corriente principal será un indicador de la magnitud de la ramificación y de la extensión de la red de drenaje dentro de la cuenca (Campos Aranda, 1984).

El grado de ramificación que existente en una cuenca, corresponde al orden del cauce principal a la salida de ésta, donde una corriente de orden 1 (el de menor rango), es aquel que no presenta ninguna ramificación; mientras que, una corriente de orden

2, se origina a partir de la bifurcación de dos corrientes de orden 1, así mismo, un escurrimiento de orden 3 queda determinado por la bifurcación de dos de orden 2, y así sucesivamente.

El cauce principal se convierte en un escurrimiento de orden 6, ante la bifurcación de dos ríos de orden 5, el Río Gallinas y el río Tamasopo, continuando dicho orden hasta la salida en la cascada de Tamul.

2.3.3. Densidad de drenaje

La densidad de drenaje (Dd), es definida como la longitud total de todos los cauces dentro de la cuenca (km), entre el área total de drenaje (km²), quedando expresada por la ecuación 2.3.

$$Dd \left(\frac{1}{km} \right) = \frac{L (km)}{A (km)^2} = \frac{\text{Longitud de los cauces}}{\text{Área de la cuenca}} \quad 2.3$$

La densidad de drenaje es un indicador de la respuesta de la cuenca ante la presencia de precipitaciones, por la relación entre la infiltración y la escorrentía, por lo tanto, condiciona la forma del hidrograma resultante en el desagüe de la cuenca. Donde a mayor densidad de drenaje, más dominante es el flujo en el cauce frente al flujo en ladera, lo que se traduce en un menor tiempo de respuesta de la cuenca y por tanto, un menor tiempo al pico del hidrograma (Campos Aranda, 1984).

Mediante el uso de los SIG, y a partir de los datos vectoriales de la red hidrográfica del INEGI, se determinó, que la longitud total de los escurrimientos dentro de la cuenca es igual a 1,309.4 km, mientras que el área de la cuenca es igual a 860.634 km², dejando la densidad de drenaje igual a 1.52 (1/km).

2.3.4. Pendiente del cauce principal

La pendiente de un tramo de río es la relación que existe entre los extremos inicial y final y la distancia horizontal de dicho tramo. Ahora bien, la pendiente de la corriente principal representa un valor medio, ya que cada tramo de río tiene una pendiente propia. En consecuencia, la pendiente media del cauce principal se aproximará más al real, mientras mayor sea el número de tramos seleccionados a lo largo del cauce (Breña P. & Jacobo V., 2006).

La influencia de la configuración topográfica en el proceso de erosión de una cuenca, y en la formación de descargas altas, se presenta de acuerdo con los mayores o menores grados de pendiente (López Cadenas & Gonzalo Fernández, 1998), las son clasificadas según el tipo de terreno (Tabla 2.6.).

Tabla 2.6. Tipo de terreno según la pendiente del cauce principal.

Pendiente en porcentaje	Tipo de Terreno
< 2	Llano
2 < 5	Suave
5 < 10	Accidentado medio
10 < 15	Accidentado
15 < 25	Fuertemente accidentado
25 < 50	Escarpado
50 <	Muy escarpado

Adaptado de: Campos Aranda, 1984.

La ecuación (2.4) representa la forma más sencilla de obtener la pendiente media del cauce, en donde, únicamente se obtiene el cociente del desnivel, entre el inicio, el final y la longitud del cauce. Donde, al tomar únicamente un tramo, no se considera adecuado obtener la pendiente por dicho método.

$$S \text{ (adm)} = \frac{H \text{ (m)}}{L \text{ (m)}} = \frac{\text{Desnivel entre extremos del cauce}}{\text{Longitud del río}} \quad 2.4$$

Sin embargo, una forma precisa de calcular la pendiente, es mediante el criterio de Taylor y Schwartz, que considera al río formando una serie de canales de pendiente uniforme, en los cuales el tiempo de recorrido del agua es igual al del río, (Campos Aranda, 1984; Taylor & Schwarz, 1952). Dicho método queda expresado en la ecuación (2.5).

$$S_{TS} = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_m}{\sqrt{S_m}}} \right]^2 \quad 2.5$$

Dónde:

- S , es la pendiente media de la corriente de mayor orden;
- m , es el número de segmentos en que se divide el cauce principal;
- L , es la longitud horizontal del cauce principal, desde su nacimiento como corriente de orden uno hasta la salida de la cuenca;
- l_m , es la longitud horizontal de los tramos en que se subdivide el cauce principal;
- S_m , Pendiente de cada segmento, en que se divide el cauce principal.

En la Tabla 2.7, se muestra el cálculo realizado para obtener la pendiente de Taylor – Schwartz, analizando la distancia, el desnivel y la pendiente de cada tramo, resultando la pendiente del cauce igual 0.5%, así mismo, el perfil longitudinal del cauce se muestra en la Figura 2.5.

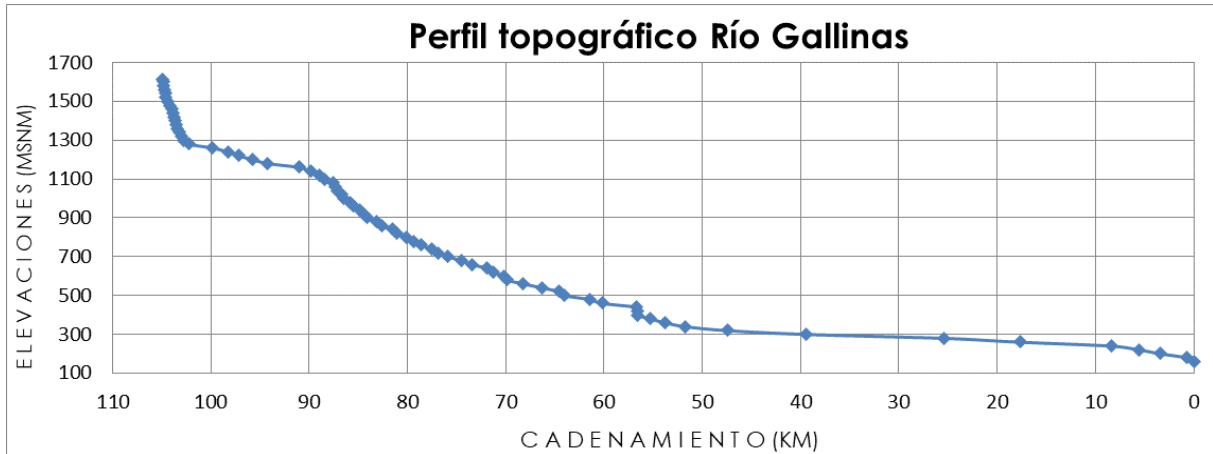


Figura 2.5. Perfil topográfico del Río Gallinas.

Tabla 2.7. Valores para el cálculo de la pendiente Taylor – Schwartz.

No.	Distancia del tramo (m)	Estación (Km)	Desnivel (m)	Sm	Raíz S	L/Raíz s
1	735.19	0.735	20	0.027	0.165	4457.456
2	2666.49	3.402	20	0.008	0.087	30788.873
3	2146.90	5.549	20	0.009	0.097	22243.404
4	2836.08	8.385	20	0.007	0.084	33772.407
5	9236.98	17.622	20	0.002	0.047	198509.025
6	7806.82	25.428	20	0.003	0.051	154239.845
7	13968.39	39.397	20	0.001	0.038	369151.401
8	8063.34	47.460	20	0.002	0.050	161903.834
9	4269.00	51.729	20	0.005	0.068	62369.738
10	2036.22	53.765	20	0.010	0.099	20545.696
11	1556.49	55.322	20	0.013	0.113	13731.073
12	1250.59	56.572	20	0.016	0.126	9889.056
13	33.19	56.606	20	0.603	0.776	42.764
14	80.28	56.686	20	0.249	0.499	160.846
15	3515.54	60.201	20	0.006	0.075	46609.258
16	1261.83	61.463	20	0.016	0.126	10022.740
17	2567.80	64.031	20	0.008	0.088	29095.496
18	511.09	64.542	20	0.039	0.198	2583.612
19	1770.99	66.313	20	0.011	0.106	16665.143
20	1877.94	68.191	20	0.011	0.103	18197.321
21	1670.84	69.862	20	0.012	0.109	15271.652
22	327.96	70.190	20	0.061	0.247	1328.040
23	1108.14	71.298	20	0.018	0.134	8248.570
24	583.49	71.882	20	0.034	0.185	3151.600
25	1541.31	73.423	20	0.013	0.114	13530.730
26	1053.57	74.476	20	0.019	0.138	7646.814

Continuación Tabla 2.7. valores para el cálculo de la pendiente de Taylor – Schwarz.

No.	Distancia del tramo (m)	Estación (Km)	Desnivel (m)	Sm	Raíz S	L/Raíz s
27	1371.74	75.848	20	0.015	0.121	11360.394
28	975.22	76.823	20	0.021	0.143	6809.823
29	735.40	77.559	20	0.027	0.165	4459.323
30	1031.86	78.591	20	0.019	0.139	7411.631
31	772.03	79.363	20	0.026	0.161	4796.652
32	750.63	80.113	20	0.027	0.163	4598.565
33	925.48	81.039	20	0.022	0.147	6295.600
34	479.36	81.518	20	0.042	0.204	2346.793
35	1101.96	82.620	20	0.018	0.135	8179.671
36	494.54	83.115	20	0.040	0.201	2459.166
37	1031.62	84.146	20	0.019	0.139	7409.135
38	318.27	84.465	20	0.063	0.251	1269.608
39	419.81	84.884	20	0.048	0.218	1923.383
40	590.24	85.475	20	0.034	0.184	3206.445
41	379.74	85.854	20	0.053	0.229	1654.687
42	608.99	86.463	20	0.033	0.181	3360.512
43	180.07	86.643	20	0.111	0.333	540.297
44	429.93	87.073	20	0.047	0.216	1993.349
45	257.33	87.331	20	0.078	0.279	923.035
46	234.42	87.565	20	0.085	0.292	802.580
47	888.43	88.453	20	0.023	0.150	5921.303
48	545.94	88.999	20	0.037	0.191	2852.350
49	866.74	89.866	20	0.023	0.152	5705.867
50	1143.65	91.010	20	0.017	0.132	8648.221
51	3189.06	94.199	20	0.006	0.079	40269.841
52	1511.92	95.711	20	0.013	0.115	13145.479
53	1482.36	97.193	20	0.013	0.116	12761.886
54	1054.25	98.247	20	0.019	0.138	7654.226
55	1601.51	99.849	20	0.012	0.112	14331.146
56	2426.48	102.275	20	0.008	0.091	26726.925
57	462.65	102.738	20	0.043	0.208	2225.138
58	256.96	102.995	20	0.078	0.279	921.065
59	202.72	103.198	20	0.099	0.314	645.409
60	217.03	103.415	20	0.092	0.304	714.922
61	103.42	103.518	20	0.193	0.440	235.164
62	137.52	103.656	20	0.145	0.381	360.611
63	103.76	103.759	20	0.193	0.439	236.327
64	59.87	103.819	20	0.334	0.578	103.582
65	116.70	103.936	20	0.171	0.414	281.882
66	234.35	104.170	20	0.085	0.292	802.224
67	259.02	104.429	20	0.077	0.278	932.144
68	162.23	104.592	20	0.123	0.351	462.060
69	47.37	104.639	20	0.422	0.650	72.894
70	57.68	104.697	20	0.347	0.589	97.953
71	73.94	104.771	20	0.270	0.520	142.173
72	82.47	104.853	20	0.243	0.492	167.456
73	37.53	104.891	13	0.346	0.589	63.778
Suma	104890.63	Desnivel	1453		Suma=	1482439.07
	S=	0.0050		S%=	0.50063	

2.3.5. Tiempos de concentración

El tiempo de concentración se define como el tiempo que tarda el escurrimiento de una tormenta en viajar desde el punto hidráulicamente más alejado de la cuenca hasta el punto de salida (Franco, 2008).

Para la estimación del tiempo de concentración, existen diversas expresiones, que están relacionadas principalmente con la longitud, pendiente o desnivel del cauce principal (Tabla 2.9).

El tiempo de concentración (T_c) se calculó con los métodos de Rowe, Kirpich y USSCS (*U. S. Soil Conservation Service*), debido a que los comúnmente recomendados por la CONAGUA, además de contar con el valor de las variables involucradas, como se aprecia en la Tabla 2.8, donde:

- T_c , es el tiempo de concentración en horas;
- D , Corresponde al desnivel presente entre la elevación inicial y final del cauce en metros;
- l , es la longitud del cauce principal en metros;
- L , es la longitud del cauce principal en kilómetros;
- S , es la pendiente (adimensional) del cauce principal.

Tabla 2.8. Tiempos de concentración del cauce principal.

Método	Expresión	T_c
Rowe	$T_c = \left(\frac{0.87L^3}{D} \right)^{0.385}$	12.39 horas
Kirpich	$T_c = 0.0003245 \left(\frac{l}{S^{1/2}} \right)^{0.77}$	18.31 horas
USSCS	$T_c = \frac{l^{1.15}}{3085D^{0.38}}$	12.10 horas

2.3.6. Principales características geomorfológicas

En la Tabla 2.9 son expuestas las principales características geomorfológicas de la cuenca del Río Gallinas y su cauce principal.

Tabla 2.9. Características geomorfológicas de cuenca y cauce.

Descripción	Unidad	Cantidad
Área de la cuenca	m ²	860,635,958.01
	Km ²	860.636
Tamaño de la cuenca	Intermedia Grande	
Perímetro de la cuenca	m	343,361.62
	km	343.362
Parámetro de forma (Pf)	1/km	0.399
Longitud del cauce	m	104,890.63
	km	104.891
Longitud de la cuenca (Lb)	m	65,422.28
	km	65.422
Densidad de drenaje (Dd)	1/km	1.521
Factor de forma (Kf)	Adm	0.078
Coeficiente de Compacidad (Cc)	Adm	3.302
Desnivel del cauce principal	m	1453
Pendiente del cauce principal		
a) Método aritmético		0.013852524
	%	1.39%
b) Método de Taylor-Schwartz		0.005006333
	%	0.50%
Tiempo de concentración (Tc)		
Rowe	Horas	12.3935
	Minutos	743.609
Kirpich	Horas	18.3175
	Minutos	1099.052
USSCS	Horas	12.1041
	Minutos	726.244

2.4. Análisis de la precipitación

En un análisis hidrológico, se pretende determinar la respuesta hidráulica de la cuenca, en otras palabras, ver el comportamiento del ciclo hidrológico para un área de estudio particular. El análisis, involucra diversas variables y condiciones únicas del área de estudio, entre las que se destacan, la geomorfología de la cuenca y su cauce principal, así como la climatología de la zona de estudio.

Según la CONAGUA un elemento climatológico, es aquella propiedad o condición de la atmósfera, que define el estado físico del tiempo o del clima, de un lugar

determinado, para un momento o un período de tiempo dados. Entre los cuales, destacan la temperatura, humedad, viento, nubosidad, precipitación entre otras.

El valor de las variables se determina a partir de estaciones climatológicas, que se encuentran distribuidas en todo el país y, mediante uno o varios instrumentos de medición, registran los valores de precipitación, temperatura, viento, etc., siendo la CONAGUA, el organismo encargado del control y mantenimiento de dichas estaciones.

2.4.1. Estaciones climatológicas

El análisis de la precipitación inicia con la recopilación de información, ante la Comisión Nacional del Agua, de las estaciones distribuidas dentro y alrededor de la cuenca de estudio con al menos treinta años de registro, siendo solicitados los datos de 23 estaciones climatológicas.

A causa de que los registros de las estaciones climatológicas comúnmente presentan valores faltantes o irregularidades, es necesario completar los datos faltantes mediante métodos estadísticos, así como determinar la homogeneidad y consistencia de la precipitación registrada.

2.4.2. Deducción de datos faltantes

Para completar los datos faltantes de precipitación existen diversos métodos, algunos de los cuales, consisten en realizar las estimaciones a partir de las estaciones climatológicas cercanas, sin embargo, producto del relieve de la cuenca y a que las estaciones cercanas se encuentran entre la Zona Media y la Huasteca Potosina, los registros de precipitación presentan grandes variaciones entre una estación y otra, por lo tanto, se consideró adecuado realizar el completado de datos, mediante el método racional deductivo.

2.4.2.1. Método racional deductivo

El método racional deductivo, permite estimar los datos faltantes mensuales, por medio de un promedio aritmético entre los valores contenidos en el registro para los datos faltantes (Campos Aranda, 1984), a partir de la ecuación (2.6).

$$Pi = \left[\frac{\sum P}{1200 - \sum Si} \right] Si \quad \mathbf{2.6}$$

Donde:

- i , representa cada uno de los meses desconocidas, donde por año máximo pueden ser once;
- P_i , es la precipitación mensual desconocida en cada año incompleto, en mm;
- ΣP , es la sumatoria de las precipitaciones mensuales conocidas en los años incompletos, en mm;
- ΣS_i , es la sumatoria de los porcentajes promedio de los meses cuya precipitación se desconoce, en porcentaje;
- S_i , es el porcentaje promedio asignado a cada uno de los meses desconocidos o faltantes.

Cuando en el registro de lluvias mensuales, de una determinada estación existen uno o más meses incompletos, el método racional deductivo permite estimar los registros mensuales faltantes (como máximo once), apoyándose de en la información que brindan los años completos (Campos Aranda, 1984). En aquellos casos, donde se presentaron años completos faltantes (doce meses), se procede a completar un mese de la temporada de lluvias de dicho año, mediante el método de regresión lineal y, posteriormente se estiman los demás meses con el método racional deductivo. Para la aplicación de ambos métodos, se considera lo establecido por Campos Aranda, 1984.

2.4.2.2. Regresión lineal

El método de regresión lineal, comúnmente utilizado para completar registros, se implementó con la finalidad de estimar el dato faltante para un mes, de aquellos años que no presentarán ningún registro, siempre y cuando el coeficiente de correlación fuese igual o mayor a 0.80.

2.4.3. Análisis de homogeneidad e independencia

Al completar los datos faltantes de las estaciones, se procede a analizar la información resultante mediante criterios estadísticos que permitan identificar y evaluar los posibles errores sistemáticos, ya sea por causas naturales u ocasionados por la intervención del hombre.

Desde un punto de vista estadístico, una serie de datos es homogénea, cuando la muestra es una población única, y por lo tanto será factible obtener resultados de ella,

ocurriendo lo contrario, si la muestra resulta no ser homogénea. Por su parte, la independencia, significa que el resultado de la precipitación o escurrimiento en un año no depende del valor de la precipitación o escurrimiento de años anteriores. Siendo necesario, demostrar mediante los límites de Anderson (Aparicio *et al.*, 2010; Cahuana Andía & Yugar Morales, 2009), que la serie de datos está compuesta por variables aleatorias.

Las pruebas estadísticas implementadas a los registros de las estaciones climatológicas son: *Helmert*, *T student* y *Secuencias*, para determinar la homogeneidad, y los *Limites de Anderson*, para la independencia de los valores registrados, con base a las metodologías propuestas por (Aparicio *et al.*, 2010; Campos Aranda, 1984; Monsalve Sáenz, 1999).

2.4.4. Selección de estaciones

Antes de proceder a cualquier ajuste de funciones de distribución, es necesario, con base a los resultados obtenidos de las pruebas estadísticas de homogeneidad e independencia (Tabla 2.10), seleccionar las estaciones que presentan valores consistentes, y descartar aquellas que no (Figura 2.6).

De las 23 estaciones analizadas, cinco fueron descartadas; de las cuales, las estaciones 24016 – Abritas, 24043 – Micos, 24047 – Ojo de Agua y 24088 – Tantizohuiche, a causa de la inconsistencia de los datos (homogeneidad e independencia), mientras que la estación 24174 – Puerto de Lobos, debido a que en el registro original presento muchos años faltantes.

Tabla 2.10. Estaciones climatológicas analizadas.

Estación	Nombre	Altitud m.s.n.m.	Municipio, Estado	Deducción de datos faltantes	Homogeneidad /independencia	P. media
24001	AGUA BUENA	777	Tamasopo, S.L.P.	MRD y RL Corr. = 94%	Homogéneo Independiente	1846.2
24006	CARDENAS	1215	Cárdenas, S.L.P.	MRD y RL Corr. = 87%	Homogéneo Independiente	576.3
24011	CIUDAD DEL MAIZ	1267	Cd. del Maíz, S.L.P.	MRD	Homogéneo Independiente	596.6
24013	COL. ALVARO OBREGON	1146	Cd. del Maíz, S.L.P.	MRD y RL Corr. = 85%	Homogéneo Independiente	407.2
24014	DAMIAN CARMONA	491	Tamasopo, S.L.P.	MRD	Homogéneo Independiente	1551.7
24016	ABRITAS	987	El Naranjo, S.L.P.	MRD	No Homogéneo Dependiente	1805.8
24031	GALLINAS	314	Aquismón, S.L.P.	MRD	Homogéneo Independiente	1674.4
24035	LAGUNILLAS	924	Lagunillas, S.L.P.	MRD y RL Corr. = 89%	Homogéneo Independiente	681.0
24039	MAITINEZ	287	El Naranjo, S.L.P.	MRD y RL Corr. = 91%	Homogéneo Independiente	1305.1
24043	MICOS	253	Cd. Valles, S.L.P.	MRD	Homogéneo Dependiente	1469.3
24047	OJO DE AGUA	1379	Alaquines, S.L.P.	MRD y RL Corr. = 81%	Homogéneo Dependiente	1127.6
24049	PAPAGAYOS	1000	Cd. del Maíz, S.L.P.	MRD	Homogéneo Independiente	1399.9
24060	RAYON	972	Rayón, S.L.P.	MRD y RL Corr. = 90%	Homogéneo Independiente	626.9
24064	SAN DIEGUITO	346	Cd. Valles, S.L.P.	MRD y RL Corr. = 91%	Homogéneo Independiente	1491.0
24072	SANTA CRUZ	58	Aquismón, S.L.P.	MRD	Homogéneo Independiente	1872.3
24076	SANTA ROSA	81	Cd. Valles, S.L.P.	MRD	Homogéneo Independiente	1249.2
24088	TANTIZOHUICHE	43	Cd. Valles, S.L.P.	MRD y RL Corr. = 89%	Homogéneo Dependiente	1456.8
24136	TANLU	386	Sta. Catarina, S.L.P.	MRD	Homogéneo Independiente	917.1
24137	VEINTE DE NOVIEMBRE	276	Tamasopo, S.L.P.	MRD	Homogéneo Independiente	1488.6
24173	PRESA ALVARO OBREGON	1170	Alaquines, S.L.P.	MRD	Homogéneo Independiente	414.3
24174	PUERTO DE LOBOS	1325	Cd. del Maíz, S.L.P.	MRD y RL Corr. = 80%	Homogéneo Independiente	652.2
24028	EL TIGRE	154	Cd. Valles, S.L.P.	MRD	Homogéneo Independiente	1253.3
24079	SANTIAGUILLOS	90	Cd. Valles, S.L.P.	MRD	Homogéneo Independiente	1437.3

Donde; MRD, es método racional deductivo; RL, regresión lineal; Corr, la correlación lograda.

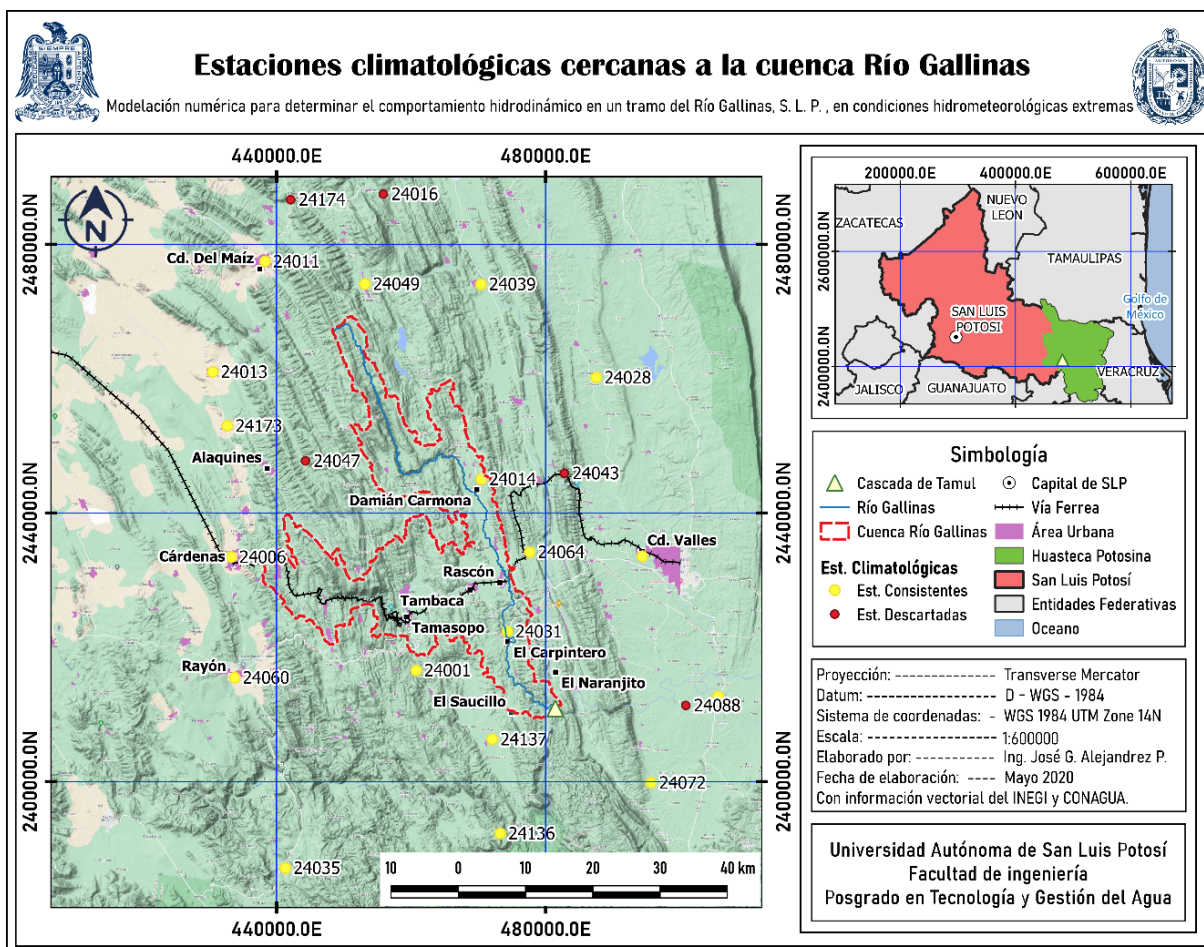


Figura 2.6. Estaciones climatológicas analizadas en la cuenca del Río Gallinas.

2.4.5. Precipitación media

Establecidas las estaciones climatológicas que cumplen estadísticamente, se procede a analizar las variables registradas en estas, buscando determinar la precipitación media y máxima en 24 horas, así como la temperatura media, entre otras.

En el caso de la precipitación media de una cuenca, existen comúnmente tres métodos implementados, como lo son la media aritmética, polígonos de thiessen e isoyetas, siendo este último considerado el método con mayor exactitud (Breña P. & Jacobo V., 2006; Franco, 2008).

Para la cuenca del Río Gallinas, la precipitación media se determinó mediante el método de isoyetas, apoyados de los sistemas de información geográfica, donde son importadas las estaciones climatológicas, con su valor de la precipitación media anual

y, a partir de las herramientas hidrológicas para el análisis espacial de datos, se determinan las curvas isoyetas y el área entre estas (Figura 2.3, Tabla 2.11).

Posteriormente, la precipitación promedio sobre un área, se evalúa mediante la sumatoria del valor ponderado de la precipitación entre isoyetas sucesivas por el área entre isoyetas, como se expresa en la ecuación 2.7 (Campos Aranda, 1984).

$$P = \sum \left[\frac{A_i}{A} \right] P_i \quad 2.7$$

Donde:

- P , es la precipitación promedio en la cuenca (en milímetros);
- A_i , el área entre cada dos isoyetas dentro del parteaguas de la cuenca, km²;
- A , el área total de la cuenca, en km²;
- P_i , precipitación media entre cada dos isoyetas, (en milímetros).

Tabla 2.11. Precipitación media anual de la cuenca Río Gallinas.

Isoyeta (mm)	Promedio (mm)	Área (Km ²)	%Área	Precipitación (mm/año)
700 - 800	750	5.60	0.7%	4.88
800 - 900	850	22.89	2.7%	22.61
900 - 1000	950	28.75	3.3%	31.74
1000 - 1100	1050	27.61	3.2%	33.68
1100 - 1200	1150	79.43	9.2%	106.14
1200 - 1300	1250	80.20	9.3%	116.49
1300 - 1400	1350	80.81	9.4%	126.76
1400 - 1500	1450	112.31	13.1%	189.23
1500 - 1600	1550	171.81	20.0%	309.42
1600 - 1700	1650	197.36	22.9%	378.38
1700 - 1800	1750	53.70	6.2%	109.19
1800 - 1900	1850	0.17	0.02%	0.36
Totales		860.64	100.0%	1428.86

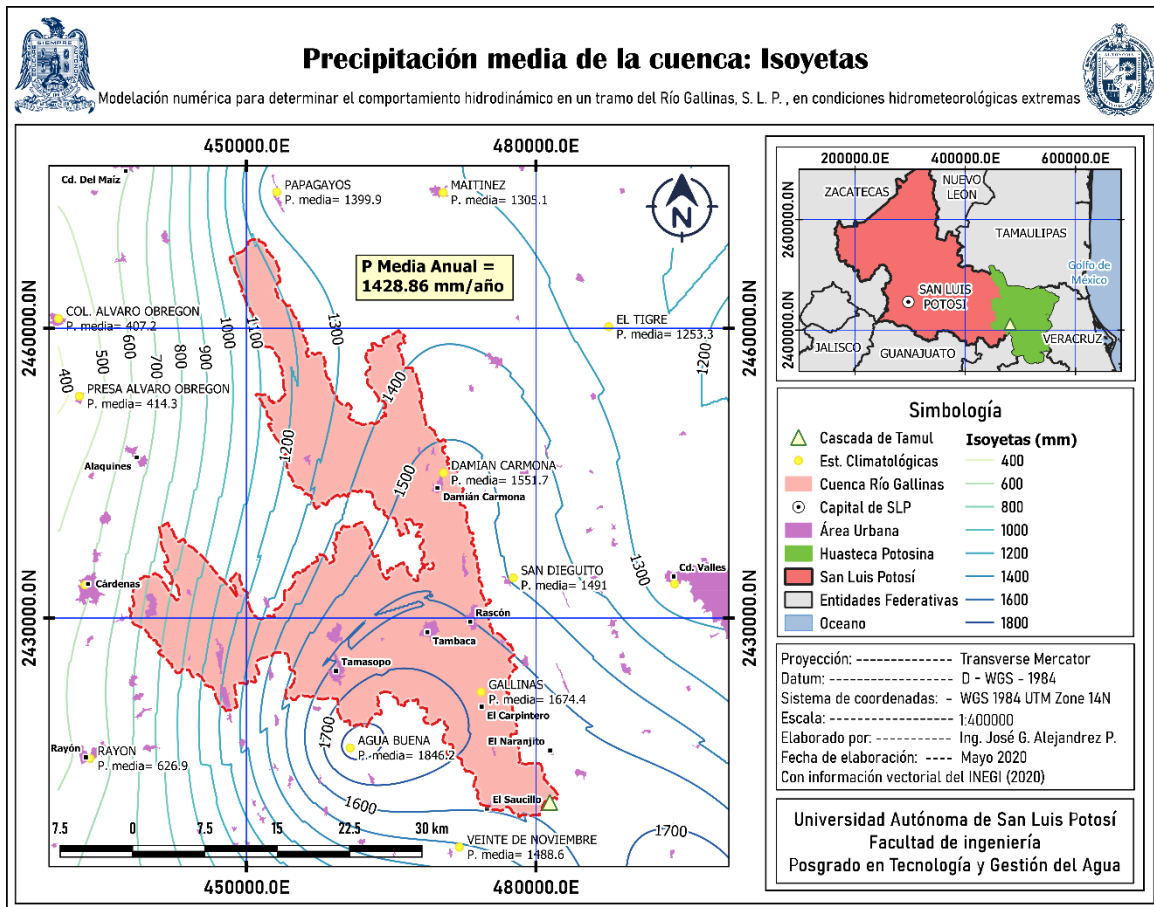


Figura 2.7. Isoyetas con la precipitación media anual en la cuenca de estudio.

2.4.6. Precipitación máxima 24

Continuando el análisis de la precipitación, ahora con la máxima en 24 horas, es necesario determinar la estación base de la cuenca, donde a los valores registrados en dicha estación, una vez aplicado un factor de transporte, pasan a ser los valores representativos de la cuenca de estudio.

2.4.6.1. Estación base

La estación base, es aquella que se encuentra próxima al centroide de la cuenca, preferentemente dentro de la esta (Campos-Aranda, 2015).

Para la cuenca de estudio se determinó como estación base, la estación 24014 – Damián Carmona, debido a que la estación se encuentra dentro de la cuenca, en el Municipio de Tamasopo, y destaca por contar con un registro de datos consistentes de 1961 al 2018 (57 años), con una precipitación media anual 1551.7 mm/año, valor que se aproxima a la precipitación media de la cuenca.

2.4.6.2. Factor de transporte

Al determinar la estación base de la cuenca, se procede a obtener el factor de transporte, el cual, es un ajuste implementado para reubicar la estación base, en una ficticia al centro de gravedad de la cuenca. Dicho factor se obtiene mediante el cociente de la precipitación media anual de la cuenca (PMA), entre la PMA de la estación base, presentando para el caso de estudio un factor de transporte de 0.921 como se muestra en la ecuación 2.8.

$$F_t = \frac{P_{media\ de\ la\ cuenca}}{P_{media\ de\ la\ estacion}} = \frac{1428.8\ (mm/año)}{1551.7\ (mm/año)} = 0.921 \quad 2.8$$

2.4.6.3. Precipitación máxima 24 horas en la cuenca

Las precipitaciones máximas en 24 horas de la cuenca resultan del producto del factor de transporte, y las precipitaciones máximas en 24 horas registradas en la estación climatológicas 24014 – Damián Cardona, mostradas en la Figura 2.3 y Tabla 2.12.

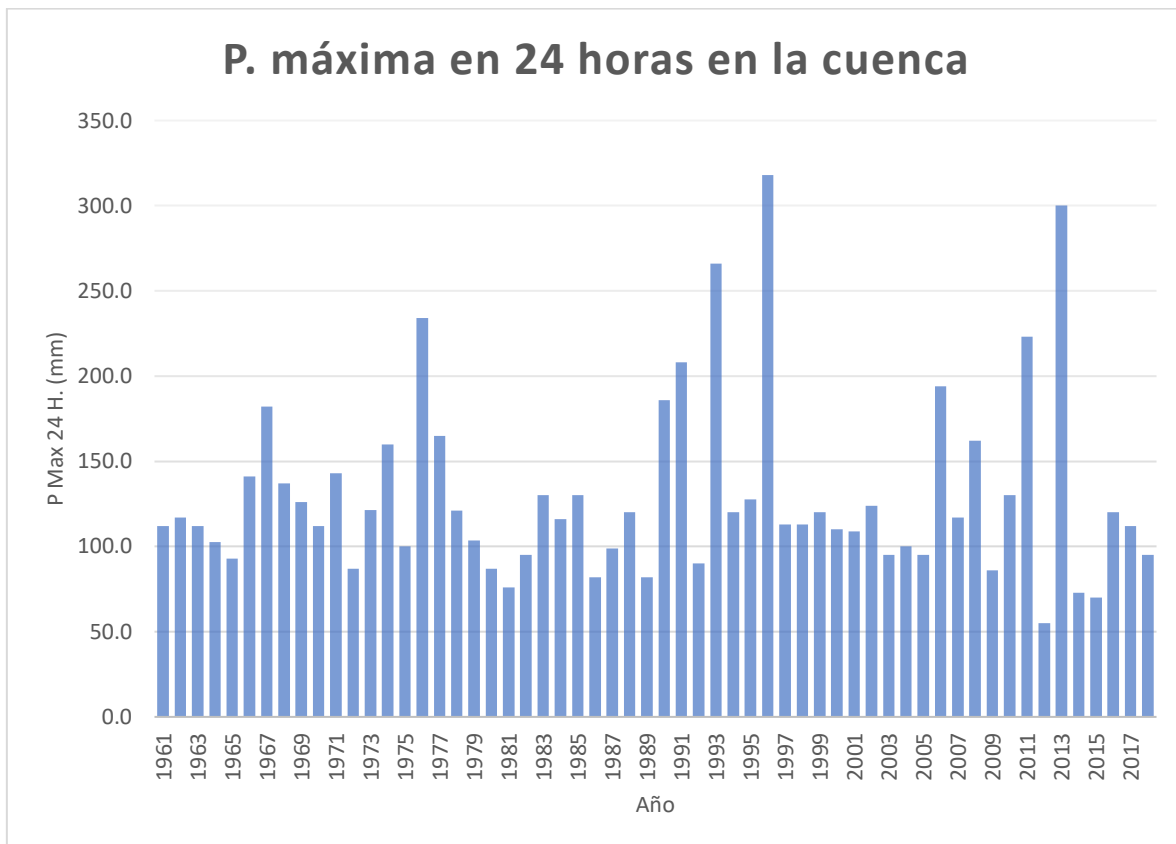


Figura 2.8. Precipitaciones máximas en 24 horas en la cuenca del Río Gallinas.

Tabla 2.12. Precipitaciones máximas en 24 horas en la cuenca del Río Gallinas

Año	Estación 24014	24014 FT	Año	Estación 24014	24014 FT
1961	112.0	103.1	1990	186.0	171.3
1962	117.0	107.7	1991	208.0	191.5
1963	112.0	103.1	1992	90.0	82.9
1964	102.5	94.4	1993	266.0	244.9
1965	93.0	85.6	1994	120.0	110.5
1966	141.0	129.8	1995	127.5	117.4
1967	182.0	167.6	1996	318.0	292.8
1968	137.0	126.2	1997	113.0	104.1
1969	126.0	116.0	1998	113.0	104.1
1970	112.0	103.1	1999	120.0	110.5
1971	143.0	131.7	2000	110.0	101.3
1972	87.0	80.1	2001	109.0	100.4
1973	121.5	111.9	2002	124.0	114.2
1974	160.0	147.3	2003	95.0	87.5
1975	100.0	92.1	2004	100.0	92.1
1976	234.0	215.5	2005	95.0	87.5
1977	165.0	151.9	2006	194.0	178.6
1978	121.0	111.4	2007	117.0	107.7
1979	103.5	95.3	2008	162.0	149.2
1980	87.0	80.1	2009	86.0	79.2
1981	76.0	70.0	2010	130.0	119.7
1982	95.0	87.5	2011	223.0	205.3
1983	130.0	119.7	2012	55.0	50.6
1984	116.0	106.8	2013	300.0	276.3
1985	130.0	119.7	2014	73.0	67.2
1986	82.0	75.5	2015	70.0	64.5
1987	99.0	91.2	2016	120.0	110.5
1988	120.0	110.5	2017	112.0	103.1
1989	82.0	75.5	2018	95.0	87.5

2.4.7. Análisis de frecuencias en hidrológica

El análisis de frecuencias es un procedimiento para estimar la probabilidad de ocurrencia de eventos pasados o futuros (Monsalve Sáenz, 1999), a esta probabilidad se le conoce como periodo de retorno (T_r), siendo determinada comúnmente por la fórmula de Weibull, ecuación 2.9 (Campos Aranda, 1984).

$$P(X \leq x) = \frac{m}{n+1} 100 \quad 2.9$$

Donde:

- $P(X \leq x)$, es la probabilidad de no excedencia en porcentaje;
- m , es el número de orden del dato;
- n , es el número total de eventos en el registro.

En cuanto al análisis de frecuencias, actualmente existen diversas funciones de distribución, debido a esto, es necesario trabajar con aquellas que presentan un mejor ajuste para el fenómeno analizado, siendo en este caso la precipitación, y a partir del análisis de cada función, seleccionar aquella que interpreta mejor al fenómeno.

2.4.8. Funciones de distribución

En el campo de la hidrología, algunas de las funciones que destacan son la: Normal y Log normal, Exponencial, Gamma y Gumbel, comúnmente utilizadas para el análisis de las variables de precipitación, temperatura y escurrimiento, tanto para sus valores medios como críticos (máximos y mínimos) (Cahuana Andia & Yugar Morales, 2009; Campos Aranda, 1984).

2.4.8.1. Normal y Log-normal

La función de distribución normal es una función simétrica, mientras que la log-normal, una asimétrica con sesgo hacia la derecha. Ambas están regidas por dos parámetros estadísticos, con la diferencia de la aplicación logarítmica a la variable, en este caso, de la precipitación máxima en 24 horas, quedando expresadas por las ecuaciones 2.10 y 2.11 (Aparicio *et al.*, 2010; Campos Aranda, 1984).

$$\text{Normal} \rightarrow X = \bar{X} + k (S) \quad 2.10$$

$$\text{Log Normal} \rightarrow \log X = \overline{\log X} + k (S) \quad 2.11$$

Donde:

- $\bar{X}$, es igual a la media aritmética de la variable independiente (mm);
- S, es la desviación estándar de x;
- k, es una variable, determinada en función de la probabilidad de ocurrencia de la (Tabla 2.13).

Tabla 2.13. Factores de frecuencia K de la distribución normal y log normal.

P(X≤x)%	Tr (años)	K	P(X≤x)%	Tr (años)	K
99.9	1,000	+3.0902	50.0	2.0	0.0000
99.8	500	+2.8782	20.0	1.25	-0.8416
99.0	100	+2.3264	10.0	1.111	-1.2816
98.0	50	+2.0538	5.0	1.053	-1.6449
95.0	20	+1.6449	2.0	1.020	-2.0538
90.0	10	+1.2816	1.0	1.010	-2.3264
80.0	5	+0.8416	0.1	1.001	-3.0902

2.4.8.2. Exponencial

Algunas secuencias de eventos hidrológicos, como la ocurrencia de precipitación, ocurren de manera instantánea e independientemente en un horizonte de tiempo, o a lo largo de una línea. El tiempo entre tales eventos, está descrito por una distribución exponencial a partir de la tasa media de ocurrencia de los eventos (*Chow et al.*, 1994). La función exponencial queda expresada por la ecuación 2.12 (*Aparicio et al.*, 2010; *Chow et al.*, 1994).

$$F(x) = \gamma e^{-\gamma x} \quad \mathbf{2.12}$$

$$\text{Donde; } \gamma = 1/\bar{X} \quad \mathbf{2.13}$$

Donde:

- $\bar{X}$, igual a la media aritmética de la variable independiente.

2.4.8.3. Gamma dos parámetros

La distribución Gamma, es una función flexible de dos parámetros definidas por las ecuaciones 2.14 y 2.15 (*Chow et al.*, 1994).

$$a = (\bar{X})^2 / S^2 \quad \mathbf{2.14}$$

$$X = u (S) \quad \mathbf{2.15}$$

Donde:

- X ; es el valor estimado de precipitación (mm);
- $\bar{X}$, es igual a la media aritmética de la variable independiente;
- S , es la desviación estándar de la precipitación registrada;
- a , factor de forma;
- u , variable reducida, obtenida a partir de “a”.

Calculado el valor de (a), se interpolan los valores del factor de forma (Anexo I de esta tesis), y se obtienen los valores de la variable reducida (u), para posteriormente sustituirse en la ecuación 2.15.

2.4.8.4. Gumbel

Esta distribución es de tipo exponencial ya que, al crecer x, converge a una función exponencial, esta función también es conocida como una distribución de valores extremos tipo I. V.T. Chow (1954), demostró que básicamente es un caso especial de

la distribución Log-normal, pues en la función Gumbel se tiene un coeficiente de asimetría (Cv) constante e igual a 1.139, formulándose su ecuación como se muestra a continuación.

$$X = \bar{x} + \left(\frac{y - \bar{y}n}{\sigma n} \right) S \quad 2.16$$

$$y = -\text{Ln}[-\text{Ln } P(X \leq x)] \quad 2.17$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad 2.18$$

Donde:

- X , es el valor buscado de una determinada probabilidad o periodo de retorno;
- $\bar{X}$, S , son la media y desviación típica de los datos;
- $\bar{y}n$, σn , son constantes teóricas, en función del tamaño de la muestra (n), obtenidas a partir de los valores presentes en el Anexo I de esta tesis.
- y , es la variable reducida, función de la probabilidad.

2.4.8.5. Selección de función de distribución

Realizado el análisis de las precipitaciones máximas en 24 horas, mediante diversas funciones de distribución, es necesario determinar el ajuste de los resultados estimados, haciendo uso del error mínimo cuadrático, se estimó el error estándar de ajuste de cada función de probabilidad.

Para los valores registrados de la cuenca de estudio, la función Exponencial, presenta el mejor ajuste con un error cuadrático de 9.93. La comparación de los resultados de las distintas funciones se aprecia en la Tabla 2.14, en la Figura 2.9 y Figura 2.10, mientras que, en la Tabla 2.15 se observan los valores obtenidos mediante la función exponencial, asociando la precipitación máxima diaria o precipitación efectiva (H_p), con diferentes periodos de retorno.

Tabla 2.14. Comparación de la precipitación registrada con la estimada mediante las funciones de distribución.

#	Tr (años)	P($X \leq x$)	Valor registrado	Normal	Log Normal	Exponencial	Gamma	Gumbel
1	60.00	0.983	292.8	223.6	235.0	271.4	246.5	253.7
2	30.00	0.967	276.3	209.1	211.8	237.1	223.5	226.6
3	20.00	0.950	244.9	199.7	198.0	217.1	209.5	210.6
4	15.00	0.933	215.5	192.6	188.2	202.8	199.3	199.2
5	12.00	0.917	205.4	186.8	180.5	191.8	191.2	190.3
6	10.00	0.900	191.5	181.7	174.1	182.8	184.3	182.9
7	8.57	0.883	178.6	177.3	168.7	175.2	178.4	176.6

Continuación Tabla 2.14. Comparación de la precipitación registrada con la estimada mediante las funciones de distribución.

#	Tr (años)	P(X≤x)	Valor registrado	Normal	Log Normal	Exponencial	Gamma	Gumbel
8	7.50	0.867	171.3	173.3	163.9	168.6	173.2	171.1
9	6.67	0.850	167.6	169.6	159.6	162.7	168.5	166.2
10	6.00	0.833	151.9	166.2	155.7	157.5	164.2	161.7
11	5.45	0.817	149.2	163.0	152.2	152.8	160.3	157.7
12	5.00	0.800	147.3	160.0	149.0	148.5	156.6	153.9
13	4.62	0.783	131.7	157.1	145.9	144.5	153.2	150.5
14	4.29	0.767	129.8	154.3	143.1	140.9	149.9	147.2
15	4.00	0.750	126.2	151.7	140.4	137.5	146.8	144.1
16	3.75	0.733	119.7	149.2	137.8	134.3	143.9	141.2
17	3.53	0.717	119.7	146.7	135.4	131.3	141.1	138.5
18	3.33	0.700	119.7	144.3	133.1	128.5	138.4	135.9
19	3.16	0.683	117.4	141.9	130.9	125.8	135.8	133.3
20	3.00	0.667	116.0	139.6	128.8	123.2	133.3	130.9
21	2.86	0.650	114.2	137.4	126.7	120.8	130.9	128.6
22	2.73	0.633	111.9	135.2	124.7	118.5	128.6	126.3
23	2.61	0.617	111.4	133.0	122.8	116.3	126.3	124.1
24	2.50	0.600	110.5	130.9	120.9	114.2	124.1	122.0
25	2.40	0.583	110.5	128.8	119.1	112.2	121.9	119.9
26	2.31	0.567	110.5	126.7	117.3	110.3	119.8	117.9
27	2.22	0.550	110.5	124.6	115.6	108.4	117.7	115.9
28	2.14	0.533	107.7	122.5	113.9	106.6	115.6	114.0
29	2.07	0.517	107.7	120.4	112.2	104.9	113.6	112.1
30	2.00	0.500	106.8	118.4	110.5	103.2	111.6	110.2
31	1.94	0.483	104.1	116.3	108.9	101.6	109.6	108.4
32	1.88	0.467	104.1	114.2	107.3	100.0	107.7	106.6
33	1.82	0.450	103.1	112.2	105.7	98.5	105.8	104.8
34	1.76	0.433	103.1	110.1	104.2	97.0	103.8	103.0
35	1.71	0.417	103.1	108.0	102.6	95.6	101.9	101.2
36	1.67	0.400	103.1	105.9	101.1	94.2	100.0	99.5
37	1.62	0.383	101.3	103.7	99.5	92.8	98.1	97.7
38	1.58	0.367	100.4	101.5	98.0	91.5	96.2	96.0
39	1.54	0.350	95.3	99.3	96.5	90.2	94.3	94.2
40	1.50	0.333	94.4	97.1	94.9	89.0	92.4	92.5
41	1.46	0.317	92.1	94.8	93.4	87.7	90.4	90.7
42	1.43	0.300	92.1	92.5	91.8	86.6	88.5	89.0
43	1.40	0.283	91.2	90.1	90.2	85.4	86.5	87.2
44	1.36	0.267	87.5	87.6	88.7	84.3	84.5	85.4
45	1.33	0.250	87.5	85.0	87.1	83.1	82.5	83.5
46	1.30	0.233	87.5	82.4	85.4	82.1	80.5	81.6
47	1.28	0.217	87.5	79.6	83.8	81.0	78.4	79.7
48	1.25	0.200	85.6	76.8	82.0	80.0	76.2	77.8
49	1.22	0.183	82.9	73.7	80.3	78.9	74.0	75.7
50	1.20	0.167	80.1	70.5	78.5	77.9	71.6	73.6
51	1.18	0.150	80.1	67.1	76.6	77.0	69.2	71.4
52	1.15	0.133	79.2	63.4	74.6	76.0	66.7	69.1
53	1.13	0.117	75.5	59.4	72.5	75.1	64.0	66.6
54	1.11	0.100	75.5	55.0	70.2	74.1	61.1	64.0
55	1.09	0.083	70.0	50.0	67.7	73.2	57.9	61.0
56	1.07	0.067	67.2	44.1	64.9	72.3	54.4	57.7
57	1.05	0.050	64.5	37.0	61.7	71.5	50.2	53.8
58	1.03	0.033	60.8	27.7	57.7	70.6	45.1	48.9
59	1.02	0.017	50.7	13.1	52.0	69.7	37.9	41.8
	Error	Ajuste	Estándar =	21.96	15.82	9.93	15.56	13.71

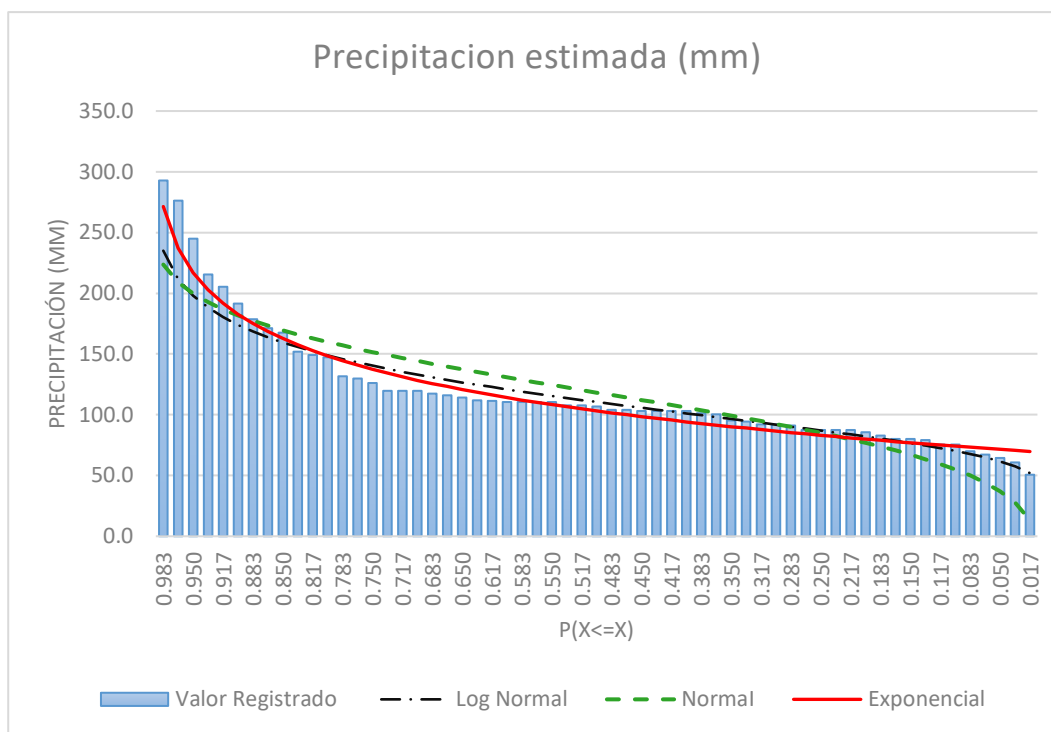


Figura 2.9. Precipitación registrada vs funciones de distribución I.

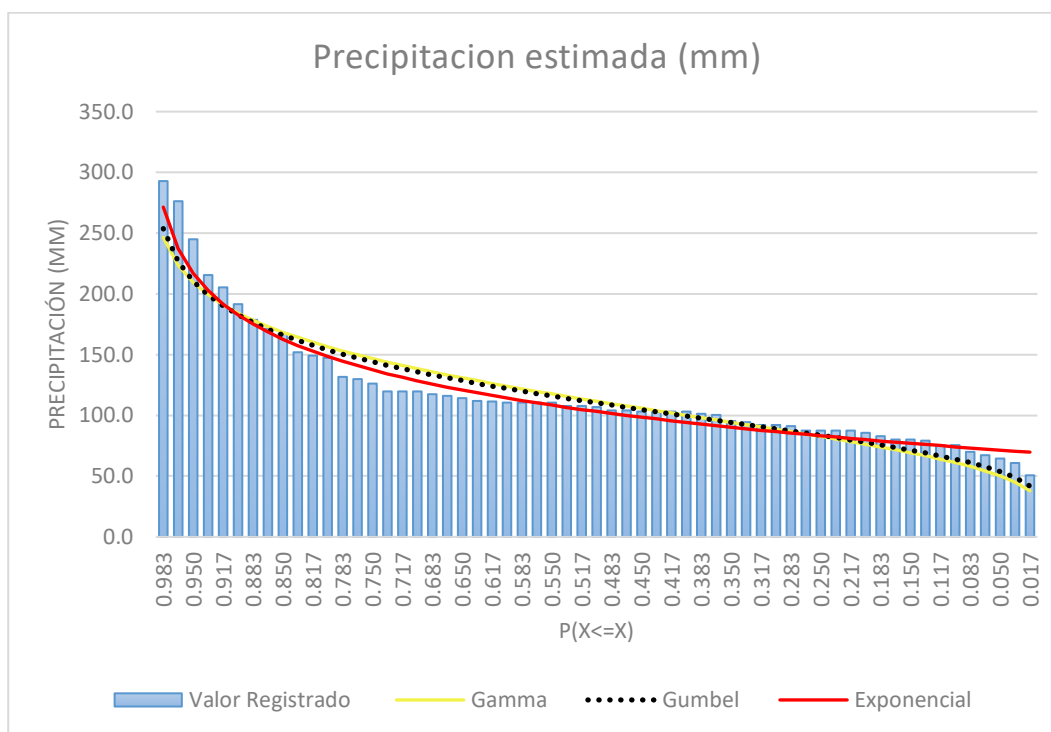


Figura 2.10. Precipitación registrada vs funciones de distribución II

Tabla 2.15. Precipitación máxima diaria asociada a un periodo de retorno (Tr).

TR (años)	Hp (mm)
2	103.19
5	148.50
10	182.78
25	228.09
50	262.37
100	296.65
200	330.92
500	376.23
1000	410.51
2000	444.79
5000	490.10
10000	524.37

2.5. Curvas I – D – Tr

La precipitación, está definida por tres variables: la magnitud de la lluvia o lamina, su duración y la frecuencia con la que ocurre dicho fenómeno. Una forma de establecer la magnitud es mediante la intensidad, que consiste en la cantidad de agua caída (lámina) en milímetros por unidad de tiempo. Mientras que la duración, es el tiempo transcurrido entre el principio y el final de la tormenta y, finalmente, la frecuencia, es el intervalo de tiempo en años en el cual, el evento puede ser igualado o excedido (Tr) (Campos Aranda & Gómez de Luna, 1990).

Las curvas intensidad-duración-periodo de retorno (I – D – Tr), se caracterizan por ser una gráfica en la que se concentran las características de las tormentas de una región, donde para el caso de la cuenca del Río Gallinas se determinó mediante la metodología propuesta por Chen.

Chen en (1983), presenta en una metodología general de intensidad de lluvia-duración-periodo de retorno, útil para estimaciones dentro del intervalo de 5 minutos a 24 horas y periodos de retorno mayores a un año (Campos Aranda & Gómez de Luna, 1990), partiendo de las precipitaciones máximas diarias asociadas a distintos periodos de retorno, como se aprecia en la Tabla 2.15.

Para la aplicación de la fórmula de Chen, se convierte la precipitación máxima diaria a precipitación máxima de 24 horas, usando lo establecido por Weis (ecuación 2.19) y, posteriormente, son estimados los cocientes *lluvia – duración* (R, ecuación 2.20) y *lluvia – período de retorno* (F, ecuación 2.21).

$$P_{1440}^T = (P_{diaria}^T) \quad (1.13) \quad \mathbf{2.19}$$

$$R = \frac{P_{60}^T}{P_{1440}^T} \quad \mathbf{2.20}$$

$$F = \frac{P_{1440}^{100}}{P_{1440}^{10}} \quad \mathbf{2.21}$$

Donde:

- P_t^{Tr} ; es la precipitación (mm), para determinado periodo de retorno (Tr) con una duración de (t) minutos, siendo los valores en las demás expresiones como 60 y 1440 la cantidad de minutos y, 100 y 10 el Tr en años.

Determinado el valor promedio de R , con los cocientes lluvia – duración correspondiente a distintos periodos de retorno (Tabla 2.16), y dependiendo del rango en el que se encuentre el valor de R , son estimados los parámetros a , b y c , mediante las siguientes ecuaciones (Campos Aranda, 2010).

Si $0.10 \leq R \leq 0.60$:

$$a = -2.297536 + 100.0389 \cdot R - 432.5438 \cdot R^2 + 1256.228 \cdot R^3 - 1028.902 \cdot R^4 \quad \mathbf{2.22}$$

$$b = -9.845761 + 96.94864 \cdot R - 341.4349 \cdot R^2 + 757.9172 \cdot R^3 - 598.7461 \cdot R^4 \quad \mathbf{2.23}$$

$$c = -0.06498345 + 5.069294 \cdot R - 16.08111 \cdot R^2 + 29.09596 \cdot R^3 - 20.06288 \cdot R^4 \quad \mathbf{2.24}$$

Si $0.20 \leq R \leq 0.70$:

$$a = 21.03453 - 186.4681 \cdot R + 825.4915 \cdot R^2 - 1,084.846 \cdot R^3 + 524.06 \cdot R^4 \quad \mathbf{2.25}$$

$$b = 3.487775 - 68.13976 \cdot R + 389.4625 \cdot R^2 - 612.4041 \cdot R^3 + 315.8721 \cdot R^4 \quad \mathbf{2.26}$$

$$c = 0.2677553 + 0.9481759 \cdot R + 2.109415 \cdot R^2 - 4.827012 \cdot R^3 + 2.459584 \cdot R^4 \quad \mathbf{2.27}$$

Finalmente, calculadas las constantes requeridas, son sustituidas en la fórmula de Chen (ecuación 2.28, Tabla 2.17), obteniendo la precipitación para diferentes periodos de retorno (Tr) y diversas duraciones (t), (Tabla 2.18), con lo cual son generadas las curvas I – D – Tr (Figura 2.11).

$$P_t^{Tr} = \frac{a \cdot P_{60}^{10} \log(10^{2-F \cdot Tr^{F-1}}) t}{60(t+b)^c} \quad \mathbf{2.28}$$

Donde:

- P_t^{Tr} ; es la precipitación (mm), para determinado periodo de retorno (Tr) con una duración de (t) minutos.
- a , b , c y F ; son los parámetros y factores estimados previamente.

Tabla 2.16. Relación lluvia – duración (R) para la zona de estudio.

Tr (años)	Hp 24 horas (mm)	P 1440	P 60 min	R
2	103.2	116.6	70.0	0.60
5	148.5	167.8	92.9	0.55
10	182.8	206.5	109.9	0.53
25	228.1	257.7	132.4	0.51
50	262.4	296.5	149.4	0.50
100	296.6	335.2	166.4	0.50
200	330.9	373.9	183.4	0.49
500	376.2	425.1	205.9	0.48
1000	410.5	463.9	223.0	0.48
2000	444.8	502.6	240.0	0.48
5000	490.1	553.8	262.5	0.47
10000	524.4	592.5	279.5	0.47

Tabla 2.17. Parámetros y variables de la fórmula de Chen para la zona de estudio.

Constantes método de Chen	
R promedio	0.507
F	1.623
a	32.924
b	10.693
c	0.837
Tp (min)	717.000

Tabla 2.18. Intensidad (mm) – Duración (min) – para distintos periodos de retorno.

Duración min (Intensidad) – precipitación en mm											
Tr (años)	5	10	15	20	30	45	60	80	100	120	717
2	203.6	161.5	134.8	116.1	91.7	70.5	57.7	46.9	39.7	34.5	8.2
5	293.0	232.5	193.9	167.1	131.9	101.5	83.1	67.4	57.1	49.7	11.8
10	360.7	286.1	238.7	205.7	162.4	124.9	102.3	83.0	70.2	61.1	14.5
25	450.1	357.0	297.9	256.6	202.7	155.8	127.6	103.6	87.7	76.3	18.1
50	517.7	410.7	342.6	295.2	233.1	179.2	146.8	119.2	100.8	87.7	20.8
100	585.4	464.3	387.4	333.8	263.6	202.7	166.0	134.7	114.0	99.2	23.6
200	653.0	518.0	432.1	372.3	294.0	226.1	185.1	150.3	127.2	110.7	26.3
500	742.4	588.9	491.3	423.3	334.3	257.0	210.5	170.9	144.6	125.8	29.9

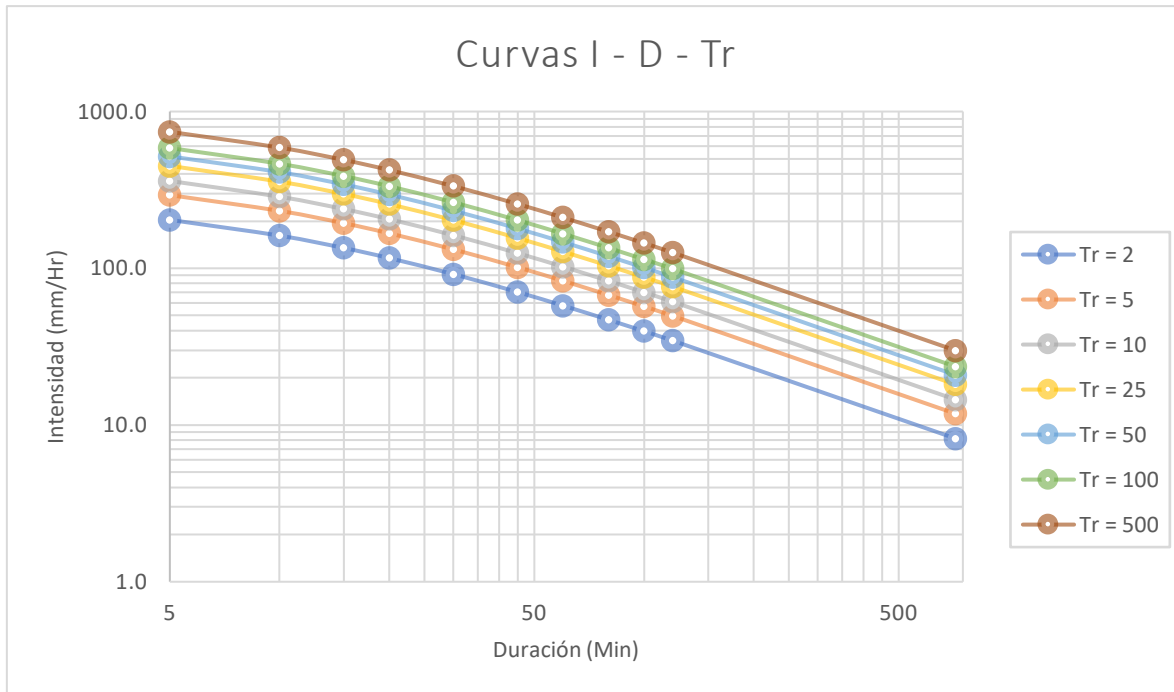


Figura 2.11. Curvas I - D - Tr, de la cuenca Río Gallinas.

2.6. Número de escurrimiento (N)

El número de escurrimiento, es un parámetro hidrológico implementado para describir mediante un valor numérico la composición específica del suelo, conocida como complejo hidrológico, suelo – cobertura (Campos Aranda, 2010; CONAGUA, 1987; Mockus, 1972).

Los valores del número de escurrimiento varían principalmente por el uso y tipo de suelo, entendiéndose por tipo de suelo, a la clasificación del este, el cual consiste en la caracterización del suelo y subsuelo a partir de sus condiciones físico – químicas, resaltando la capacidad para absorber la humedad e infiltrarse o escurrir.

En la *Soil Conservation Service* (SCS), propusieron clasificar el suelo en 4 grupos (A, B, C y D), donde los suelos del grupo A, presentan una alta capacidad de infiltración, la cual va disminuyendo, hasta los suelos del grupo D, que exhiben una mayor capacidad de escurrimiento (Campos Aranda, 2010).

Determinar el uso de suelo correspondiente, es necesario debido a que no presentan la misma capacidad de infiltración o escurrimiento, un suelo con cobertura vegetal, que permite la retención e infiltración del agua, al suelo de un área urbana, con infraestructura impermeable.

Para establecer el número de escurrimiento (N) de la cuenca de estudio, fueron implementadas y actualizadas las capas vectoriales del INEGI, referentes a la edafología (Figura 1.10), así como al uso de suelo y cobertura vegetal (Figura 1.11), apoyados de los SIG. Una vez determinados los usos y tipos de suelo de la cuenca, se ponderó con el área de cada tipo hasta estimar un valor de 78.72, como el número de escurrimiento en la cuenca (Tabla 2.19).

En el Anexo II de esta tesis, se aprecian las tablas con la clasificación de suelo, así como los valores de N , para los distintos usos y tipos de suelo.

Tabla 2.19. Número de escurrimiento de la cuenca Río Gallinas.

Clasificación del Suelo	Uso del Suelo	Tipo de Suelo	Valor de N	Área (Km ²)	% de Superficie	Número de Escurrimiento
Feozem Calcárico	Agricultura de Temporal	C	83	1.603	0.19%	0.15
	Bosque de Encino	C	73	2.174	0.25%	0.18
	Agricultura de Temporal	C	73	6.569	0.76%	0.56
	Área Urbana	C	83	0.245	0.03%	0.02
Feozem Háptico	Pastizal Cultivado	C	79	3.019	0.35%	0.28
	Selva Baja Caducifolia	C	77	16.147	1.88%	1.44
	Selva Mediana Subperennifolia	C	77	14.597	1.70%	1.31
	Agricultura de Temporal	D	86	1.144	0.13%	0.11
Litosol	Bosque de Encino	D	79	53.146	6.18%	4.88
	Bosque Mesófilo de Montaña	D	79	5.682	0.66%	0.52
	Pastizal Inducido	D	79	3.187	0.37%	0.29
	Selva Mediana Subperennifolia	D	77	2.775	0.32%	0.25
Rendzina	Agricultura de Temporal	C	83	90.893	10.56%	8.77
	Agricultura de Riego	C	83	53.857	6.26%	5.19
	Área Urbana	C	83	6.023	0.70%	0.58
	Bosque de Encino	C	73	238.219	27.68%	20.21
	Bosque Mesófilo de Montaña	C	73	12.677	1.47%	1.08

Continuación Tabla 2.19. Número de escurrimiento de la cuenca Río Gallinas.

	Uso del suelo	Tipo de suelo	Valor de N	Área (Km ²)	% de superficie	Número de escurrimiento
Vertisol Pélico	Cuerpo de Agua Perenne interior	C	100	0.138	0.02%	0.02
	Palmar	C	77	0.593	0.07%	0.05
	Pastizal Inducido	C	79	15.385	1.79%	1.41
	Selva Baja Caducifolia	C	77	106.534	12.38%	9.53
	Selva Mediana Subperennifolia	C	77	30.433	3.54%	2.72
	Agricultura de Temporal	D	86	53.463	6.21%	5.34
	Agricultura de Riego	D	86	65.312	7.59%	6.53
	Área Urbana	D	83	6.926	0.80%	0.67
	Bosque de Encino	D	79	25.538	2.97%	2.34
	Palmar	D	83	2.184	0.25%	0.21
	Pastizal Cultivado	D	84	2.288	0.27%	0.22
	Selva Baja Caducifolia	D	83	36.650	4.26%	3.53
	Selva Mediana Subperennifolia	D	83	3.233	0.38%	0.31
Totales				860.635	100.00%	78.72

2.7. Modelos lluvia - escurrimiento

Durante el análisis de la cuenca del Río Gallinas, fueron clasificados diversos aspectos geomorfológicos e hidrometeorológicos, de los cuales, en la estimación de escurrimiento resaltan: el área de la cuenca, la longitud y pendiente del cauce principal, el tiempo de concentración, el coeficiente o número de escurrimiento, así como la altura de la precipitación. Donde, apoyado de métodos empíricos e hidrológicos, se estima el escurrimiento máximo asociado a determinados periodo de retorno.

A partir de la precipitación máxima diaria (Hp, Tabla 2.15), se obtiene la precipitación media de diseño (Hpd) y, posteriormente se calcula la lluvia en exceso o escurrimiento, para finalmente estimar los gastos asociados a diferentes periodos de retorno mediante los métodos: *Racional*, *Hidrograma Unitario Triangular (H. U. T.)*, *Chow* y *Snyder*.

2.7.1. Estimación de lluvia en exceso

Para el cálculo de la precipitación de diseño (Hpd) en la cuenca de estudio, se utilizó la fórmula de *Emil Kuishiling* y *C.E. Gransky* (CONAGUA, 1987), la cual considera que, el tiempo de concentración de la cuenca debe ser igual o mayor al de la tormenta para que ocurra un escurrimiento máximo (Qmax), así mismo se considera la distribución de la tormenta en el tiempo. Este método sugiere las siguientes expresiones 2.29 y 2.30.

$$Hpd = \frac{KTC^{1-e}}{(1-e)} \quad 2.29$$

$$\text{Dónde: } K = \frac{Hp(1-e)}{24^{1-e}} \quad 2.30$$

Para apegar la distribución de la tormenta a la forma de la curva de máxima intensidad, el método sugiere emplear un factor (e), que depende del tiempo de concentración y, cuyo valor oscila entre 0.45 y 0.80, siendo para el caso de estudio igual a 0.583. En la tabla (Tabla 2.20), se muestran los rangos en función del tiempo de concentración para la selección del valor de (e).

Tabla 2.20. Valores recomendados para el parámetro (e) en la ecuación de Kuischling.

Rango de e	Descripción de la cuenca
0.45 a 0.50	Muy grandes con Tc >= 48h
0.50 a 0.55	Grandes con 24 h < Tc < 48 h
0.55 a 0.60	Medianas con 6 h < Tc <= 24 h
0.60 a 0.70	Chicas con 1 h < Tc < 6 h
0.70 a 0.80	Muy pequeñas con Tc < 1 h

Una vez conocida la precipitación de diseño para la zona de estudio, se procede a estimar la precipitación en exceso (He), mediante el método propuesto por el *Soil Coservation Service*, donde, se relacionan las condiciones del suelo (número de escurrimiento) con la lámina Hpd, mediante la ecuación 2.31. Los resultados estimados se aprecian en la Tabla 2.21.

$$He = \frac{10 \left[\frac{Hpd}{10} - \frac{508}{N} + 5.08 \right]^2}{\left[\frac{Hpd}{10} - \frac{2032}{N} - 20.32 \right]} \quad 2.31$$

Donde:

- He; es la precipitación efectiva (mm);
- N; el número de escurrimiento;

- H_{pd} ; la precipitación de diseño (mm).

Tabla 2.21. Valores de H_p , H_{pd} y H_e ; en la cuenca Río Gallinas.

Tr (años)	H_p Max (mm)	H_{pd} (mm)	H_e (mm)
2	103.2	97.9	46.4
5	148.5	140.9	82.6
10	182.8	173.4	111.7
25	228.1	216.4	151.4
50	262.4	249.0	182.1
100	296.6	281.5	213.1
200	330.9	314.0	244.4
500	376.2	357.0	286.1
1000	410.5	389.5	317.8

2.7.2. Método Racional

El método Racional es utilizado para obtener caudales a partir de la intensidad de lluvia (I), la cual comienza de manera instantánea y continúa indefinidamente, mientras que el escurrimiento va incrementado hasta llegar al tiempo de concentración (T_c), cuando toda la cuenca está contribuyendo al flujo en su salida. Por lo anterior, la intensidad tiene una duración igual al T_c y corresponde al periodo de retorno de la creciente o gasto máximo que se estima (Campos Aranda, 2010).

El método racional queda determinado por la ecuación 2.32, y los gastos obtenidos para distintos periodos de retorno se muestran en la Tabla 2.22.

$$Q = 0.278 C I A \quad 2.32$$

$$C_e = \frac{H_e}{H_{pd}} \quad 2.33$$

$$I = \frac{K}{(1-e)T_c^e} \quad 2.34$$

Donde:

- C_e ; es el Coeficiente de escurrimiento (adm, ecuación 2.33);
- I , es la intensidad (mm), determinado por la ecuación 2.34;
- A , T_c y K , son el área (km²), tiempo de concentración (horas) y número de Kuischling, valores determinados previamente (Tabla 2.9 y ecuación 2.30);
- H_e y H_{pd} , son la precipitación en exceso y la precipitación de diseño en mm.

Tabla 2.22. Gastos máximos por el método Racional.

Tr (años)	He (mm)	Ce	I (mm)	Qmax (m³/s)
2	30.8	0.40	6.4	608.0
5	57.5	0.52	9.2	1137.5
10	79.5	0.58	11.4	1571.8
25	109.9	0.64	14.2	2172.2
50	133.5	0.68	16.3	2639.4
100	157.6	0.71	18.4	3114.5
200	181.9	0.73	20.6	3595.3
500	214.4	0.76	23.4	4237.7
1000	239.2	0.78	25.5	4727.4

2.7.3. Método del Hidrograma Unitario Triangular

El hidrograma unitario triangular se ha desarrollado para determinar parámetros fundamentales del hidrograma como, el caudal pico (Qp), tiempo base (tb) y el tiempo en que se produce el caudal pico (tp). Las características del hidrograma unitario se determinaron mediante las siguientes ecuaciones, mientras que los gastos calculados se observan en la Tabla 2.23.

$$Q = \frac{0.556 (He) (A)}{n(Tp)} \quad 2.35$$

$$Tp = 0.60Tc + D/2 \quad 2.36 \quad n = 2 + \frac{area-250}{1583.33} \quad 2.37$$

Donde:

- Tp y Tc , tiempo pico y tiempo de concentración en horas;
- D , es la duración o intervalo de análisis (horas);
- He , es la lluvia en exceso en el intervalo (mm);
- n , parámetro adimensional obtenido de la ecuación 2.37.

Tabla 2.23. Gastos máximos por el método H. U. T.

Tr (años)	He (mm)	Qmax (m³/s)
2	30.8	574.4
5	57.5	1074.5
10	79.5	1484.9
25	109.9	2052.0
50	133.5	2493.4
100	157.6	2942.2
200	181.9	3396.4
500	214.4	4003.2
1000	239.2	4465.9

2.7.4. Método de Ven Te Chow

El método propuesto por Chow, fue deducido con base en los conceptos de hidrogramas unitarios e hidrogramas unitarios sintéticos, donde predominan las características de la cuenca con respecto a las del cauce. En su aplicación el escurrimiento está gobernado por tres factores: climatológicos, físicos y geométricos de la cuenca, quedando expresados por las siguientes ecuaciones (Campos Aranda, 2010; CONAGUA, 1987).

$$Q = AXYZ \quad \mathbf{2.38}$$

Siendo:

$$X = \frac{He}{Tc} \quad \mathbf{2.39} \quad \text{Factor de Escurrimiento}$$

$$Y = 0.278 \quad \mathbf{2.40} \quad \text{Factor Climático adm}$$

$$Z = 1.89 \left(\left(\frac{D}{tr} \right)^{0.23} \right) - 1.23 \quad \mathbf{2.41} \quad \text{Factor de Reducción adm}$$

$$D = tr = 0.005 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.64} \quad \mathbf{2.42} \quad \text{Tiempo de retraso hr.}$$

$$A \quad \text{Área de la cuenca km}^2.$$

Donde:

- He , lluvia en exceso (mm);
- Tc y tr , tiempo de concentración y tiempo de retraso ambas en horas;
- n , parámetro adimensional obtenido de la ecuación 2.37;
- D , duración de la tormenta estimada (horas);
- L y S , longitud (m) y pendiente del cauce (%).

De los cuales, el área (860.636 km²), el factor climático (0.278) y el factor de reducción (0.732), son valores constantes, quedando pendiente estimar el factor de escurrimiento y el escurrimiento para cada periodo de retorno, como se aprecia en la Tabla 2.24.

Tabla 2.24. Gastos máximos por el método de Ven Te Chow,

Tr (años)	He (mm)	X	Qmax (m³/s)
2	30.8	2.5	444.8
5	57.5	4.8	832.2
10	79.5	6.6	1149.9
25	109.9	9.1	1589.2
50	133.5	11.0	1931.0
100	157.6	13.0	2278.6
200	181.9	15.0	2630.4
500	214.4	17.7	3100.3
1000	239.2	19.8	3458.6

2.7.5. Método de Snyder

Snyder en 1938, desarrolla un método basado igualmente en el comportamiento del hidrograma unitario, que puede ser implementado en cuencas de gran tamaño (Philip *et al.*, 2013), la ecuación desarrollada por Snyder queda expresada en las ecuaciones 2.43, 2.44 y 2.45.

$$Q = \frac{650 (C_p) (A)}{T_p} \quad \mathbf{2.43}$$

$$t_p = C_t ((L)(L_c))^{0.3} \quad \mathbf{2.44} \quad C_t = \frac{1.65}{(\sqrt{i})^{0.38}} \quad \mathbf{2.45}$$

Donde:

- Q, es el gasto pico para el hidrograma unitario de Snyder (cfs);
- C_t , es un coeficiente de forma (adm) determinado por la ecuación 2.45;
- C_p , Coeficiente de almacenamiento (adm), entre 0.4 a 0.8;
- t_p , es el tiempo de retraso de la cuenca (hrs);
- A, es el área en millas;
- L y L_c , son la longitud del cauce y la longitud del cauce desde la boquilla de, hasta el punto sobre el cauce más cercano al centroide de la cuenca (millas);
- i ; es la pendiente del cauce (%).

Para obtener los caudales de distintos periodos de retorno, las unidades de las características geomorfológicas de la cuenca fueron convertidas del sistema internacional de unidades (SI) a sistema inglés, para posteriormente regresar los caudales resultantes al SI (m³/s), como se muestra en la Tabla 2.25.

Tabla 2.25. Gastos máximos por el método de Snyder.

Tr (años)	He (mm)	Qmax (m³/s)
2	30.8	344.8
5	57.5	645.0
10	79.5	891.4
25	109.9	1231.8
50	133.5	1496.8
100	157.6	1766.2
200	181.9	2038.9
500	214.4	2403.2
1000	239.2	2680.9

2.7.6. Comparación y selección de escurrimientos de diseño

Los métodos aplicados, en la estimación de las avenidas de diseño, tienen como objetivo la reconstrucción matemática del fenómeno de la formación del escurrimiento. Donde, a partir de una lluvia de duración y periodo de retorno determinado, así como de las características geomorfológicas de la cuenca, se calcula el escurrimiento generado en un punto de la corriente estudiada.

Para la cuenca del Río Gallinas, se optó por los escurrimientos estimados por el método de Snyder, debido a que los demás métodos, comúnmente usados en México, se han generado a partir de la experimentación con cuencas pequeñas, las cuales van desde los 25 hasta los 250 km², mientras que el método de Snyder es implementado en cuencas grandes, aplicando al caso de estudio.

Tabla 2.26. Comparación de avenidas máximas por distintos métodos.

Tr	Racional (m³/s)	H. U. T (m³/s)	V. T. Chow (m³/s)	Snyder (m³/s)
2	608.0	574.4	444.8	344.8
5	1137.5	1074.5	832.2	645.0
10	1571.8	1484.9	1149.9	891.4
25	2172.2	2052.0	1589.2	1231.8
50	2639.4	2493.4	1931.0	1496.8
100	3114.5	2942.2	2278.6	1766.2
200	3595.3	3396.4	2630.4	2038.9
500	4237.7	4003.2	3100.3	2403.2
1000	4727.4	4465.9	3458.6	2680.9

2.8. Balance hidrológico superficial

Realizar un balance hidrológico superficial de una cuenca, consiste en determinar el volumen y comportamiento del agua en sus diferentes estados o fases, dentro de un espacio denominado cuenca.

Campos Aranda (1984), define la ecuación de balance hidrológico de forma simplificada, como la diferencia entre las entradas y las salidas de agua, sin embargo, la complejidad deriva de la falta de registros de las variables que, interactúan en el ciclo hidrológico.

La ecuación del balance hidrológico superficial (ecuación 2.46), pretende identificar el volumen de agua presente en la cuenca en forma de, precipitación (P), evapotranspiración (ET), escurrimiento superficial (R) e infiltración (I), por su parte, para conocer el comportamiento hídrico subterráneo, a las variables antes mencionadas se le suman el escurrimiento subterráneo (G), así como el almacenamiento de agua (S) (Campos Aranda, 1984).

$$\Delta S = P - R - ET - I \quad \mathbf{2.46}$$

El balance hidrológico superficial de la cuenca se realizó a partir de las características geomorfológicas, así como de los registros de precipitación y temperaturas, a través de los cuales, fueron estimadas las variables de escurrimiento, evapotranspiración e infiltración.

A continuación, se describe el análisis y los criterios considerados en el desarrollo del balance hídrico superficial de la cuenca del Río Gallinas.

2.8.1. Precipitación media anual de la cuenca

La precipitación media anual (mm) de la cuenca se calculó por el método de isoyetas (ecuación 2.7, página 79) apoyados de los SIG, a partir de la precipitación registrada en las estaciones climatológicas que cumplieron satisfactoriamente con las pruebas estadísticas de homogeneidad e independencia.

El método de isoyetas fue implementado para cada año con datos de precipitación, desde 1961 hasta el 2018 pudiendo observar la precipitación media anual de la cuenca en la Tabla 2.27.

2.8.2. Evapotranspiración real y potencial

La evaporación y transpiración son dos conceptos independientes entre sí, sin embargo, dado que ambos procesos se realizan de forma simultánea, y debido a que su medición por separado es muy compleja, conviene analizarlos como una variable denominada evapotranspiración (ET) (Campos Aranda, 1984).

Para el análisis de la evapotranspiración existen principalmente dos conceptos, la evapotranspiración potencial y real. Thornwaite (1948), denominó evapotranspiración potencial (ETP), a la generada cuando la humedad del suelo y la cobertura vegetal se encuentran en condiciones óptimas, quedando su análisis expresada en la ecuación 2.47, por el contrario, la evapotranspiración real (ETR), se produce a partir de las condiciones presentes en la zona de estudio, y se obtiene a partir de las fórmulas semi empíricas de Coutagne y Turc ecuaciones 2.51 y 2.53 (Campos Aranda, 1984).

Evapotranspiración potencial.

$$ETP = 16 \left[\frac{10t}{I} \right]^a \left[\frac{(Ns)(d)}{(12)(30)} \right] \quad 2.47$$

Siendo:

$$I = \sum i \quad 2.48 \quad i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514} \quad 2.49$$

$$a = 6.75 \times 10^{-7} (I^3) - 7.71 \times 10^{-5} (I^2) + 1.792 \times 10^{-2} (I) + 0.49239 \quad 2.50$$

Donde:

- Ns , es el número máximo de horas de sol (Apéndice III);
- d , número de días del mes;
- t , temperatura media mensual, para cada año de cada mes (°C);
- I , índice de calor anual (ecuación 2.48);
- ETP , evapotranspiración (mm/mes), siendo necesario realizar la suma por año para obtener ETP anual. Para aquellos meses que presenten una temperatura media mensual igual o superior a los 26.5°C, el valor de la ETP se obtiene a través de la tabla en el Apéndice III.

Formula de Coutagne.

$$ETR_{Coutagne} = P - X P^2 \quad 2.51$$

Donde:

- ETR , es la evapotranspiración real (metros/año);
- P , es la precipitación (metros/año);
- t , Temperatura media anual (°C);
- X , variable en función de la temperatura, $X = 1/(0.8 + 0.14t)$

Para el correcto funcionamiento de la formula, la precipitación (metros/año) debe cumplir con la siguiente hipótesis:

$$\frac{1}{8X} < P < \frac{1}{2X} \quad \mathbf{2.52}$$

Formula de Turc.

$$ETR_{Turc} = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad \mathbf{2.53}$$

Donde:

- ETR , es la evapotranspiración real (mm/año);
- P , es la precipitación (mm/año);
- t , Temperatura media anual (°C);
- L , variable en función de la temperatura, $L = 300 + 25t + 0.05t^3$.

Los resultados obtenidos para la ETP y ETR, se pueden observar en la Tabla 2.27.

2.8.3. Escurrimiento

Continuando con el desarrollo del balance hídrico, es necesario estimar el escurrimiento medio anual de la cuenca, a partir de las condiciones de esta, en concreto del número de escurrimiento (N) y la precipitación media anual.

Así mismo, para determinar el escurrimiento anual de la cuenca es necesario estimar la precipitación en exceso (He) mediante de la ecuación (2.31), no obstante, es importante resaltar que el escurrimiento que interesa en este análisis es el medio anual, no el producido por una tormenta de diseño, por lo tanto, la precipitación en exceso queda en función de la precipitación media anual (P_{ma} , en mm).

Finalmente, el escurrimiento medio anual, se obtiene del producto de la precipitación media anual y el coeficiente de escurrimiento (Ce), estimado para cada

año a partir de la ecuación 2.33, con base en los valores anuales de precipitación y precipitación en exceso.

Además, se estimó el escurrimiento a partir de los métodos sugeridos por Turc y Coutagne, los cuales, consisten en restar a la precipitación media anual, la evapotranspiración anual estimado.

2.8.4. Infiltración

La rigurosidad en la estimación de la infiltración varía dependiendo del enfoque del estudio (superficial o subterráneo), donde para fines de este análisis superficial se obtiene a partir de la ecuación hidrológico superficial (2.46). Es decir, a partir del equilibrio hidrológico, quedando determinado por la diferencia entre las entradas (precipitación), menos las salidas (escurrimiento, evapotranspiración e infiltración), siendo la infiltración el único valor desconocido.

2.8.5. Balance hídrico de la cuenca

En la Tabla 2.27, se aprecian los valores estimados para las variables involucradas en el balance hidrológico superficial de la cuenca.

Destacando a manera de resumen, que la *precipitación* (P , mm/año), se obtiene a partir de isoyetas con los registros de las estaciones, la *temperatura* ($^{\circ}\text{C}$), es la temperatura media anual considerando todas las estaciones. Así mismo, la *evapotranspiración* (ET , mm/año) y el *escurrimiento* (R , mm/año) se estimaron a partir de métodos semi empíricos, y la *infiltración* (I , mm/año) se obtiene del balance hídrico.

Es necesario aclarar que, para el caso de la evapotranspiración, así como el escurrimiento, la estimación se realizó por varios métodos con la finalidad de analizar el comportamiento y las condiciones que mejor se ajustan al entorno de la cuenca.

Debido a que, la cuenca se encuentra inmersa en climas húmedos, el método de Turc, presenta una mejor interpretación al estimar la ETR en la cuenca. Mientras que, para el escurrimiento, se considera adecuada la estimación a partir del coeficiente de escurrimiento, puesto que, en ella son consideradas las condiciones del uso y tipo de suelo, a diferencia de los demás métodos empíricos, basados principalmente en la evapotranspiración estimada previamente.

Tabla 2.27. Balance hidrológico superficial por años de la cuenca Río Gallinas.

Año	P media anual (mm/año)	Temperatura media anual (°C)	ETP (mm/año)	ETR (mm/año) Coutagne	ETP Turc (mm/año)	R Turc (mm/año)	R Coutagne (mm/año)	R SCS (mm/año)	R+ETR Neto (ce) (mm/año)	R directo	Infiltración
1961	1424.8	22.7	1160.0	914.0	1043.1	381.7	510.8	347.1	1345.6	302.5	79.2
1962	1444.2	23.3	1208.3	930.3	1073.0	371.3	513.9	355.7	1365.0	292.0	79.3
1963	1098.1	22.9	1190.4	796.7	909.2	188.9	301.4	218.4	1019.8	110.6	78.3
1964	1262.0	22.7	1179.1	861.5	980.7	281.3	400.5	279.3	1183.2	202.5	78.8
1965	1253.0	22.7	1148.6	857.7	975.7	277.3	395.3	275.8	1174.2	198.5	78.8
1966	1726.0	21.6	1077.4	947.4	1081.8	644.2	778.6	491.7	1646.3	564.5	79.7
1967	1652.0	22.3	1140.8	956.3	1097.0	555.0	695.7	453.9	1572.3	475.3	79.6
1968	1444.2	21.9	1091.2	903.9	1017.8	426.5	540.4	355.7	1365.0	347.2	79.3
1969	2036.9	22.3	1110.7	979.3	1177.8	859.1	1057.5	667.0	1956.7	778.9	80.1
1970	1682.5	21.5	1047.8	939.1	1065.6	616.9	743.4	469.3	1602.8	537.2	79.7
1971	1745.8	22.5	1112.3	974.7	1131.2	614.7	771.1	502.1	1666.1	534.9	79.8
1972	1694.8	23.0	1179.8	980.6	1141.8	552.9	714.2	475.6	1615.1	473.2	79.7
1973	1690.8	22.7	1168.0	971.6	1124.8	566.1	719.3	473.5	1611.1	486.4	79.7
1974	1813.2	22.6	1139.4	983.3	1150.3	662.9	829.9	538.2	1733.3	583.0	79.9
1975	1725.7	22.5	1140.3	972.5	1126.6	599.1	753.2	491.5	1645.9	519.4	79.7
1976	1890.1	21.6	1063.1	954.3	1111.6	778.5	935.8	580.9	1810.1	698.5	80.0
1977	1077.4	22.4	1132.2	782.3	886.9	190.5	295.1	211.2	999.2	112.3	78.2
1978	1541.4	22.5	1138.5	939.0	1072.5	469.0	602.5	400.1	1462.0	389.5	79.4
1979	1020.3	22.2	1120.2	753.6	852.6	167.7	266.7	192.0	942.3	89.7	78.0
1980	917.4	22.8	1178.1	706.4	806.2	111.2	211.0	159.7	839.9	33.6	77.5
1981	1565.6	22.0	1102.7	934.7	1061.3	504.4	631.0	411.6	1486.2	424.9	79.5
1982	768.6	22.8	1181.0	620.6	708.6	60.1	148.1	118.2	692.0	0.0	60.1
1983	1522.3	22.7	1157.8	939.1	1075.4	446.9	583.2	391.2	1442.9	367.5	79.4
1984	1694.3	22.3	1115.2	961.5	1106.0	588.3	732.8	475.3	1614.6	508.6	79.7
1985	1322.4	22.5	1135.0	879.1	997.7	324.7	443.3	303.6	1243.4	245.8	79.0
1986	1250.1	22.6	1156.6	856.4	974.1	276.0	393.6	274.6	1171.3	197.2	78.8
1987	1074.6	21.8	1088.2	775.1	871.8	202.8	299.5	210.2	996.4	124.6	78.2
1988	1458.4	22.3	1123.6	915.7	1039.2	419.2	542.6	362.0	1379.1	339.9	79.3
1989	1049.6	22.4	1144.1	770.1	874.1	175.6	279.5	201.8	971.5	97.4	78.1
1990	1695.3	22.6	1124.1	971.2	1150.0	571.2	724.1	475.8	1615.6	491.5	79.7
1991	1730.6	22.9	1184.1	983.3	1146.5	584.1	747.4	494.1	1650.9	504.4	79.8
1992	1590.1	21.4	1032.5	925.1	1041.4	548.8	665.1	423.4	1510.6	469.2	79.5
1993	1999.7	22.3	1098.0	980.8	1173.6	826.0	1018.9	644.6	1919.6	745.9	80.1
1994	1024.7	22.9	1176.3	762.9	871.7	153.0	261.8	193.5	946.7	75.0	78.0
1995	1472.8	22.7	1148.6	927.6	1060.7	412.1	545.3	368.5	1393.5	332.8	79.3
1996	1107.3	22.2	1112.4	793.7	897.4	209.9	313.6	221.6	1029.0	131.6	78.3
1997	1048.8	22.6	1145.2	771.1	876.9	171.9	277.7	201.5	970.7	93.8	78.1
1998	1304.8	23.8	1262.7	892.2	1032.9	271.9	412.6	296.4	1225.9	192.9	78.9
1999	1313.1	22.5	1140.1	877.2	996.6	316.5	435.9	299.8	1234.1	237.5	78.9
2000	1460.9	22.7	1176.0	924.8	1057.5	403.4	536.0	363.1	1381.6	324.1	79.3
2001	1387.3	22.9	1187.8	907.0	1038.0	349.3	480.3	330.9	1308.2	270.2	79.1
2002	1425.3	22.7	1183.9	914.6	1044.3	381.0	510.6	347.3	1346.0	301.8	79.2
2003	1409.0	23.1	1214.2	917.7	1055.1	353.9	491.3	340.2	1329.8	274.8	79.2
2004	1259.2	22.5	1161.4	858.5	975.0	284.3	400.8	278.2	1180.4	205.4	78.8
2005	1176.6	22.7	1188.3	828.4	942.6	233.9	348.2	246.6	1098.0	155.4	78.6
2006	1091.4	22.9	1224.0	794.4	907.4	184.0	297.0	216.0	1013.2	105.7	78.3
2007	1717.5	22.3	1130.8	964.8	1112.3	605.2	752.7	487.3	1637.8	525.5	79.7
2008	2176.6	22.3	1139.7	981.3	1203.9	972.7	1195.3	754.4	2096.3	892.4	80.3
2009	1082.3	23.1	1201.1	791.6	906.0	176.3	290.7	212.9	1004.0	98.1	78.2
2010	1739.8	21.9	1107.9	955.8	1097.1	642.7	784.0	498.9	1660.0	563.0	79.8
2011	1208.0	23.0	1220.3	844.6	965.3	242.7	363.4	258.4	1129.3	164.0	78.7
2012	1163.8	22.6	1157.6	822.5	935.3	228.4	341.3	241.9	1085.2	149.9	78.5
2013	1658.1	22.5	1169.1	961.9	1107.3	550.8	696.2	456.9	1578.4	471.1	79.6
2014	1423.4	22.4	1147.0	908.1	1030.9	392.5	515.3	346.5	1344.2	313.3	79.2
2015	1224.1	22.5	1156.3	844.6	958.2	266.0	379.6	264.6	1145.4	187.3	78.7
2016	1208.5	22.5	1149.4	839.3	953.1	255.4	369.2	258.6	1129.8	176.7	78.7
2017	1261.1	22.8	1166.6	863.2	984.9	276.3	397.9	279.0	1182.3	197.4	78.8
2018	1064.2	22.5	1161.0	777.9	884.1	180.1	286.3	206.7	986.0	101.9	78.2
Promedio	1406.2	22.5	1152.1	880.1	1009.9	396.3	526.1	352.4	1327.2	318.4	77.8

Observando el escurrimiento y la evapotranspiración se aprecia que ambos valores son elevados, y esto se debe a que es un análisis anual, donde una parte de la precipitación evapotranspira rápidamente, otra fracción primero escurre y luego se va a la atmósfera y, en menor proporción hay un volumen que únicamente escurre.

Finalmente, aquellos años donde se registran escurrimientos pequeños o nulos, no indica que el cauce deja de drenar agua todo el año, sino que, la mayor parte del agua inicialmente escurre y después evapotranspira o se infiltra, siendo para ese año en el balance anual, igual o casi igual, la precipitación y la evapotranspiración.

2.9. Caudal ecológico

El manejo del recurso hídrico en México ha estado enfocado al consumo humano y sus actividades económicas, olvidándose de los requerimientos de volumen de agua, para el funcionamiento de los ecosistemas y los servicios ambientales. Debido a esto y al desconocimiento de la variabilidad espacio-temporal del agua, se vuelve cada vez más compleja la gestión del recurso hídrico (de la Lanza Espino *et al.*, 2018; Díez Hernández & Burbano Burbano, 2006).

El concepto de caudal o flujo ecológico, se encuentra ampliamente desarrollado en la literatura, pero de manera general se puede definir como *calidad, cantidad y régimen del flujo o variación de los niveles de agua* requeridos para mantener los componentes, funciones y procesos de los ecosistemas acuáticos (Gobierno de México, 2012; Kucharsky Villarreal, 2018; Pouilly & Aguilera, 2012).

Por su parte, existe una gran variedad de metodologías para la evaluación de caudales ecológicos al nivel mundial (King, 2004), las cuales van desde métodos simplistas hasta los más complejos, así mismo, estos son agrupados según su enfoque en tres grupos: hidrológicos, hidráulicos y eco-hidráulicos.

La elección de una metodología para determinar el caudal ecológico queda definida principalmente por la información existente, los medios y recursos con los que se cuentan, así como los objetivos planteados. Para un estudio con enfoque hidrológico, comúnmente se realiza un análisis de las series de caudales (curvas de duración, registro hidrométrico); mientras que el enfoque hidráulico, busca interpretar la relación entre una variable hidráulica y el caudal (modelos hidráulicos) y; finalmente

los eco-hidráulicos, considerados modelos avanzados, determinan la relación funcional entre el hábitat físico-acuático y el caudal (Diez Hernández & Burbano Burbano, 2006).

Desde el punto de vista ecológico, las cuencas hidrográficas incluyen una rica variedad de ecosistemas acuáticos como ríos, lagos, lagunas, cenotes entre otros, donde estos tienen requerimientos hídricos específicos, y sostienen una diversidad de hábitats y especies que están física y biológicamente articulados al agua y su régimen dinámico (CONAGUA; *et al.*, 2011).

Con la finalidad de considerar el aspecto ecológico y las necesidades de cada ecosistema en México, la CONAGUA, en coordinación con la Alianza del *World Wildlife Fund* (WWF) y la Fundación Gonzalo Río Arronte (I.A.P.), identificaron y clasificaron las cuencas del país con disponibilidad de agua a partir de su riqueza biológica, importancia ecológica y presiones hídricas, surgiendo posteriormente la norma NMX-AA-159-SCFI-2012 (DOF, 2012).

Previo a dicha iniciativa, no existía ninguna norma con fines de conservación ecológica que, permitiera la reservación de un volumen de escurrimiento de cualquier cuenca en México, la cual además de clasificar la importancia ecológica y la presión del uso del agua para cada cuenca hidrográfica en el país, propone una serie de metodologías para la estimación del caudal ecológico.

La estimación del caudal ecológico de la cuenca Río Gallinas, se desarrolla mediante el método de Tennant (1976), también conocido como método de Montana, que presenta un enfoque hidrológico, debido a que establece un porcentaje del escurrimiento medio anual como régimen, asumiendo que mantendrá los atributos biológicos en ciertos niveles de conservación.

Existen varias modificaciones al método desarrollado por Tennant (1976), bajo ciertos criterios particulares de la región en México, adecuando el método a zonas tropicales, donde se considera una variación climatológica trimestral y anual, tratando de reproducir variaciones de caudal durante el año (E. García *et al.*, 1999).

La estimación del caudal ecológico en la cuenca de estudio pasa por recaudar y analizar los datos hidrométricos registrados en la estación 26267 – El carpintero, ubicada sobre el puente del mismo nombre en la carretera Rioverde – Ciudad Valles

(Figura 7, del capítulo de introducción). La estación cuenta con registros consistentes de 1958 al 2014 (56 años) con lo cual, se determinó el valor mínimo para cada mes de todos los años de registro, y se hace lo mismo con el valor máximo y promedio.

Con los valores medios mensuales, se identifica la temporada de lluvia y estiaje, además del escurrimiento medio anual (EMA) y el escurrimiento medio mensual (Qi). Así mismo, a partir de la presión del uso del agua y, la importancia ecológica de cada cuenca, la NMX-AA-159-SCFI-2012 en el anexo A, clasifica el objetivo ambiental de todas las cuencas hidrológicas, siendo considerada la cuenca Rh26Cg – Río Gallinas, una cuenca de baja importancia ecológica y baja presión de uso, concluyendo así con un objetivo ambiental B.

Finalmente, a partir de los escurrimientos medios mensuales, así como por el objetivo ambiental de la cuenca, es determinado el caudal ecológico mensual y anual (Figura 2.12), con base en los porcentajes recomendados en la Tabla 2.28, bajo la restricción, de que el límite inferior del caudal estimado no puede ser inferior al valor mínimo mensual registrado.

Además, con la intención de constatar los valores estimados y conocer el comportamiento hidráulico del caudal ecológico estimado, se lleva a cabo la modelación hidrodinámica para dicho escenario con la finalidad simular la respuesta del cauce en el capítulo 6 de esta tesis.

Tabla 2.28. Recomendación de porcentajes de caudales por objetivos ambientales.

Objetivo Ambiental	Periodo			
	Estiaje		Avenida	
	% EMA	% Qi	% EMA	% Qi
A	30	100	60	50
B	20	80	40	40
C	15	60	30	30
D	5	40	10	20

Fuente: (DOF, 2012)

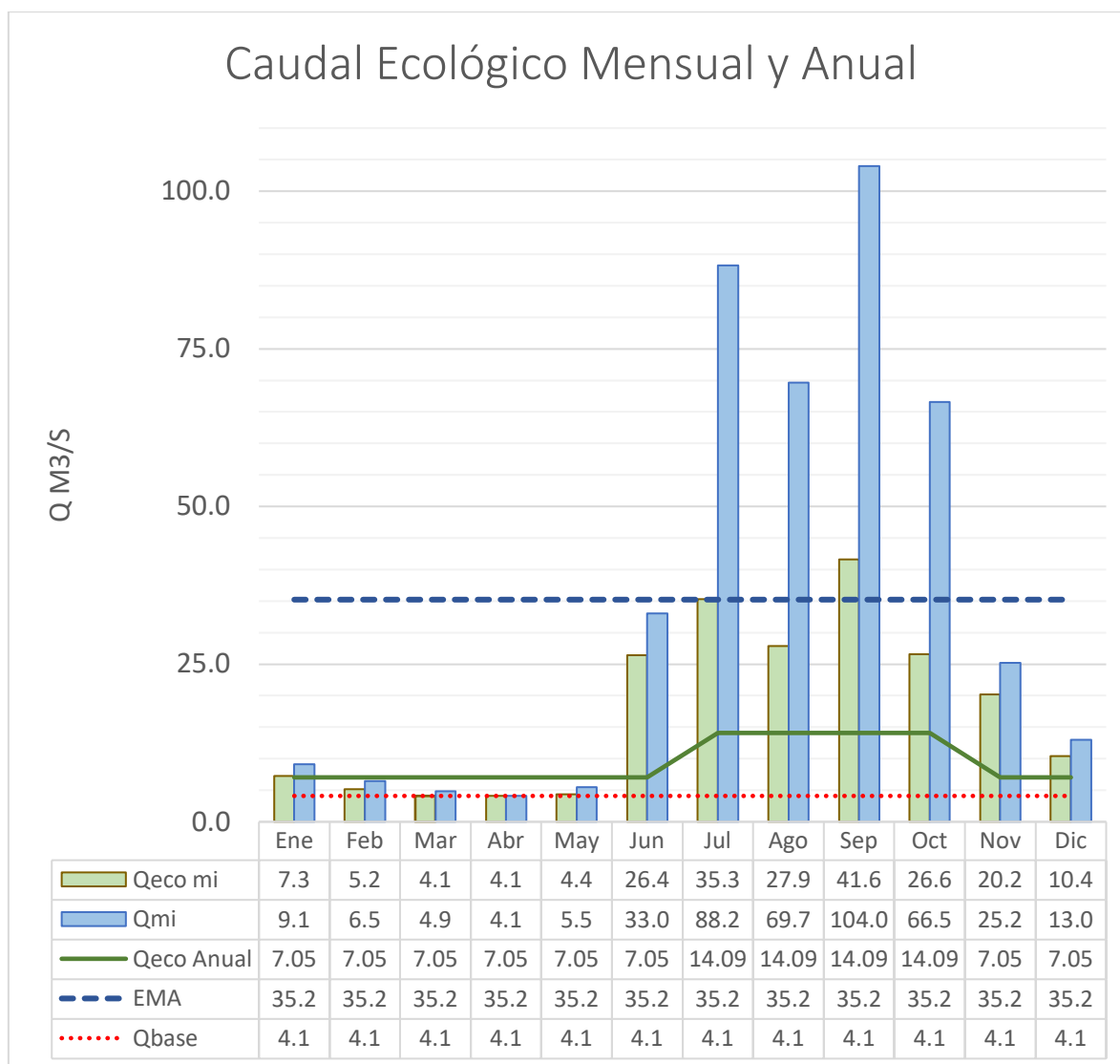


Figura 2.12. Caudal ecológico mensual y anual.

Capítulo 3. Metodología para la determinación de la topo-batimetría y aforo de caudales

3. Metodología para la determinación de la topo-batimetría y aforo de caudales

3.1. Topografía

Se define tradicionalmente a la topografía, como la ciencia y la tecnología para encontrar y determinar las posiciones relativas de puntos situados por encima y debajo de la superficie terrestre (Wolf & Ghilani, 2016).

El estudio de la Tierra como globo terrestre, en lo que concierne a su medición precisa, corresponde a la Geodesia; pero, mediante la topografía, se logra definir la posición y las formas circunstanciales del suelo; es decir, estudia en detalle la superficie terrestre y los procedimientos con los que se pueden representar los accidentes que en ella existen, sean naturales o debidos a la mano del hombre (F. García, 1994).

3.1.1. Levantamientos topográficos

Se entiende por levantamiento topográfico, al conjunto de actividades realizadas con el objeto de capturar la información necesaria, que permita representar de manera plana o tridimensional, mediante la planimetría y altimetría, donde, la primera consiste en determinar la ubicación de los puntos del terreno en el plano de proyección, y la segunda corresponde al eje vertical (F. García, 1994; Pachas, 2009).

Los levantamiento topográficos y geodésicos, se pueden diferenciar principalmente por su extensión, y se definen según García Martín *et al.* (2017) como:

Levantamientos topográficos. Se extienden sobre una porción relativamente pequeña de la superficie de la Tierra que, sin error apreciable, se considera como si fuera plana. Las dimensiones máximas de las zonas representadas en los planos topográficos, no superan en la práctica los 30 Km de lado, límites dentro de los cuales se puede hacer abstracción de la curvatura de la superficie terrestre.

Levantamientos geodésicos. Son aquellos que abarcan grandes extensiones y obligan a tomar en cuenta la forma de la Tierra, ya sea considerándola como una verdadera esfera, o más exactamente, como un esferoide de revolución.

3.1.1.1. Tipos de levantamientos

Existen diversos tipos de levantamientos especializados, que dan origen a una gran variedad de metodologías y herramientas, para llevar a cabo el cumplimiento de distintos objetivos.

Es posible encontrar diferentes clasificaciones referentes a los levantamientos topográficos, a continuación se describen brevemente algunas clasificaciones importantes, recuperadas de Reyes I. & Hernández N., (2009) y Wolf & Ghilani, (2016):

- *Levantamientos de control:* establecen una red de señalamientos horizontales y verticales que sirven como marco de referencia para otros levantamientos. Muchos levantamientos de control que se realizan actualmente utilizan instrumentos GNSS.
- *Levantamientos catastrales:* se realizan con el objetivo de fijar límites de propiedad para registro y control de bienes.
- *Levantamientos de construcción:* involucra obras como fraccionamientos, carreteras, vías férreas, canales, ductos y líneas de transmisión.
- *Levantamientos subterráneos:* enfocados en la explotación minera, construcción de túneles y lumbreras.
- *Levantamientos hidrográficos:* comprenden operaciones para obtener la información topográfica de cuerpos de agua.
- *Los levantamientos terrestres, aéreos y por satélite:* actualmente los más usados, utilizan medidas realizadas con equipo terrestre, tales como niveles automáticos e instrumentos de estación total. Los levantamientos aéreos pueden lograrse ya sea utilizando la fotogrametría o a través de percepción remota.

Para el caso de estudio, se caracterizó el tramo del cauce a modelar mediante la combinación de varios tipos de levantamientos. Esto debido a que, el objetivo consiste en caracterizar el relieve de un tramo del Río Gallinas, así como sus zonas aledañas (levantamiento terrestre e hidrográfico), todo esto principalmente mediante la fotogrametría, en un levantamiento aéreo, que requiere de puntos de control terrestre para la georreferenciación de las imágenes capturadas.

3.1.1.2. Representación gráfica del relieve del terreno

Al realizar el levantamiento topográfico, el relieve se representa en diversos formatos, los cuales, según el software implementado, satisfacen distintas necesidades, a continuación, se mencionan los principales formatos.

Curva de nivel. Línea curva en la cartografía que representa la misma cota de elevación del terreno (INEGI, 2006).

Modelo digital de elevación (MDE). La representación en formato digital (ráster), de las formas del relieve terrestre de manera estimada y simplificada, definida por la distribución espacial regular, de los valores aproximados de altura con respecto al nivel medio del mar (INEGI, 2015).

Modelo digital del terreno (MDT). Representación cuantitativa en formato digital (ráster) de la superficie terrestre, que contiene información acerca de la posición (x, y) y la altitud Z de los elementos de la superficie terrestre (IITEJ, 2003).

TIN. La red de triángulos irregulares (del inglés *Triangular Irregular Network*), es construida a partir de un conjunto de puntos espaciales, siendo cada uno de sus puntos un vértice de al menos un triángulo de la red (INEGI, 2014).

TIFF. Formato de archivos de imágenes con etiquetas (*Tagged Image File Format*), se utiliza para el almacenamiento de imágenes referenciadas (IITEJ, 2019).

X, Y, Z. Una expresión para coordenadas, con significados separados para coordenadas cartesianas y coordenadas rectangulares. En los sistemas de coordenadas rectangulares, X representa el eje este-oeste, Y al eje norte-sur, y Z al eje de altura (IITEJ, 2003).

3.1.2. Sistemas de referencia

Un sistema de referencia terrestre se define como las prescripciones y convenciones, junto con un modelo matemático de la Tierra, que se utilizan para definir en cualquier momento un sistema de ejes coordenados, para la ubicación de puntos en nuestro planeta. Una de las características de estos sistemas de referencia es que, ubican su centro lo más cerca posible al centro de gravedad de la Tierra (INEGI, 2019).

Los sistemas de referencia terrestres son sistemas ligados a la tierra. Su plano fundamental es el ecuador y, tal y como se aprecia en la Figura 3.1, el eje Z está en la dirección de eje de rotación terrestre, el X en la dirección de la intersección del meridiano de Greenwich con el Ecuador y el Y formando un triedro directo con los anteriores. Su origen es el centro de masas de la tierra (Quirós Rosado, 2014).

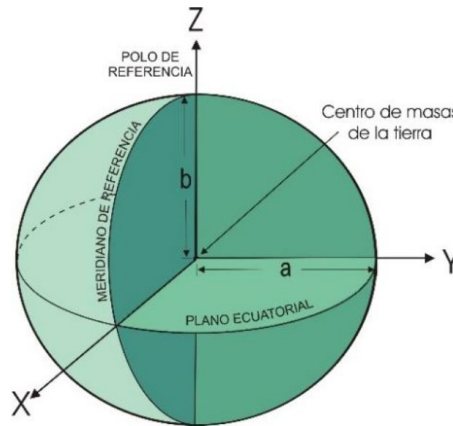


Figura 3.1. Elementos del sistema de referencia.

Fuente: (INEGI, 2019)

Los marcos de referencia son la materialización de los sistemas de referencia; esta se efectúa mediante puntos establecidos sobre la superficie terrestre, que son directamente accesibles para su ocupación u observación. Así mismo, se refleja la parametrización de las coordenadas de los puntos, que forman el marco de referencia con un sistema de coordenadas X, Y y Z (INEGI, 2019).

A continuación, son mencionados algunos marcos de referencia comúnmente utilizados (García Martín *et al.*, 2017; INEGI, 2019; Quirós Rosado, 2014), de los cuales, comentar que el WGS 84, fue implementado en la elaboración de los mapas topográficos de esta tesis, mientras que el ITRF 2008, ha sido adoptado como el marco de referencia en el INEGI, así como para la georreferenciación de los levantamientos topográficos realizados en la zona de estudio.

- *Marco de referencia terrestre internacional ITRF 2008.* El sistema de referencia se materializa a través de las coordenadas de una serie de estaciones distribuidas por todo el mundo, este marco está establecido y mantenido por la IERS.

- *Sistema y marco de referencia WGS 84 (World Geodetic System 1984).* El sistema de referencia utiliza la constelación de satélites estadounidense GPS para definir la posición y orientación del marco, este marco, además ha alineado las estaciones del WGS84 con estaciones del ITRF de manera periódica, por lo que son marcos virtualmente idénticos.
- *Marco de referencia IGS (International GNSS Service).* El marco IGS es también establecido de la ITRS, comparte recursos y datos con estaciones GPS o GLONASS permanentes en todo el mundo, al estar alineado además con el ITRF pueden a variar unos milímetros sus coordenadas.
- *Sistema y marco de referencia terrestre europeo ETRF89.* Su sistema de coordenadas es el mismo que el del ITRS, este marco de referencia se define mediante 36 estaciones del ITRS en Europa, es el más utilizado en Europa.

3.2. Puntos de Control Terrestre

El levantamiento de los puntos de control terrestre (PCT), consiste en determinar el posicionamiento (XYZ) de distintos puntos, los cuales son utilizados para georreferenciar la topografía del cauce y sus zonas aledañas.

Donde por posicionamiento se entiende, como la determinación en el espacio de objetos móviles o estáticos, en un sistema de coordenadas determinado y datum específico, para ello, son varias las técnicas que se implementadas. Pero sin duda alguna en el campo de la georreferenciación y del posicionamiento preciso en la Tierra, las técnicas apoyadas en satélites artificiales son actualmente las de mayor importancia, fundamentalmente en espacios abiertos (Berné Valero *et al.*, 2019).

Para realizar un posicionamiento, se requiere del GNSS (*Global Navigation Satellite System*) como un sistema global de posicionamiento y navegación, que engloba a los Sistemas de Navegación por Satélite, y proporcionan posicionamiento y navegación, así como el mejor sistema de definición de tiempos (PNT) con cobertura global (Berné Valero *et al.*, 2019).

Los sistemas de navegación por satélite, tienen una estructura claramente definida, que se divide en tres segmentos distintos: un segmento espacial, uno de control, y otro

de usuarios, donde sin alguno de estos tres elementos, no se tiene un GNSS (Figura 3.2) (García Álvarez, 2008; Pachas, 2009).

- *Segmento espacial.* Consiste en una o varias constelaciones de satélites, que actúan como puntos de referencia.
- *Segmento de control.* El segmento de control está constituido por una red de: estaciones maestras de control, estaciones de monitoreo e inyección de datos que analizan y procesan los datos satelitales.
- *Segmento de usuario.* Consiste en equipo (antenas receptoras), que determinan la posición del usuario a partir de las señales que recibe del segmento espacial.



Figura 3.2. Estructura de un GNSS.

Fuente: <https://precisiongps.mx/hello-world>

3.2.1. Receptores GNSS

Los Sistemas Satelitales de Navegación Global (GNSS), son constelaciones de 21 o más satélites que transmiten señales, haciendo posible determinar la posición de un receptor ubicado en cualquier parte del mundo, debido a esto y, a que permiten obtener una alta precisión en la determinación de la posición, en los últimos años las aplicaciones de los GNSS han crecido notablemente, reemplazando progresivamente a los métodos de posicionamiento convencionales (La Valle *et al.*, 2013).

En la actualidad, los GNSS comprenden dos sistemas mundiales plenamente operacionales: el Sistema Mundial de Determinación de la Posición (GPS), de los Estados Unidos, y el Sistema Mundial de Satélites de Navegación (GLONASS), de la Federación de Rusia, aunque también se tienen sistemas mundiales y regionales en evolución, como el Sistema Europeo de Navegación por Satélite (Galileo), el COMPASS/BeiDou de China, el Sistema Regional de Navegación por Satélite de la India (IRNSS) y el Sistema de satélites cuasi cenitales (QZSS) del Japón. (Naciones Unidas, 2013).

Los GNSS utilizan señales de espectro expandido de secuencia directa. Los satélites de GPS transmiten en tres frecuencias de portadora, denominadas L1, L2 y L5. Los satélites de Galileo también transmiten tres portadoras conocidas como E1, E6 y E5. Tanto en GPS como en Galileo, todos los satélites comparten las mismas bandas de frecuencia, haciendo uso de la técnica de acceso múltiple por división de código (CDMA). Por otra parte, los satélites de GLONASS utilizan acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA) y transmiten en dos bandas L1 y L2 (La Valle *et al.*, 2013).

Para obtener la solución de posición un receptor de GNSS debe recibir señales de al menos cuatro satélites. Disponer de un receptor capaz de operar con distintos GNSS, aumenta considerablemente el número de satélites visibles, y asegura la continuidad en la solución de posición, incluso bajo condiciones de funcionamiento adversas. Por otra parte, con dos frecuencias de portadora es posible medir el retardo ionosférico, logrando una importante mejora en la precisión de la solución de posición frente a los usuarios que utilizan una única portadora (Lopez La Valles *et al.*, 2011). El uso de receptores multibanda, es habitual en aplicaciones de posicionamiento diferencial de alta precisión, donde es posible alcanzar errores del orden del centímetro (Parkinson & Spilker, 1995).

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, un receptor multi constelación y multibanda, es capaz de recibir las señales de diversos GNSS y de más de una frecuencia portadora, logrando así, importantes ventajas en relación con los receptores comerciales típicos que operan con un único sistema de navegación y con una frecuencia de banda portadora.

3.2.2. Levantamiento de los PCT

Actualmente existen diversos métodos y equipos GNSS, que determinan la ubicación espacial en un sistema de coordenadas determinado, con una alta precisión de los puntos de control terrestre (PCT).

La obtención de las coordenadas planimétricas y altimétricas de los puntos de control, son necesarios para georreferenciar de forma precisa la topo-batimetría del cauce, y las zonas aledañas del tramo de estudio, a continuación, se describe el equipo utilizado, así como la metodología empleada en el levantamiento de PCT.

3.2.2.1. Equipo

El levantamiento de los PCT se llevó a cabo con la antena receptora *Trimble R8s*, el cual, es un receptor de doble frecuencia con la capacidad de recibir señales de diversas constelaciones satelitales como: GPS, GLONASS, SBAS, Galileo y BeiDou.

Mediante el equipo R8s, se puede determinar la ubicación planimétrica y altimétrica de los PCT de diversas formas, siendo el método estático rápido, el procedimiento implementado para obtener las coordenadas horizontales y verticales.

El equipo GNSS está constituido principalmente por la *antena receptora R8s*, sin embargo, para lograr el levantamiento de los PCT, es necesario disponer del *trípode* y su *triback*, así como una *extensión* que permite la unión del *triback* y la *antena* (Figura 3.3), además, se requiere un flexómetro y la *colectora TSC 3*, que permite configurar las condiciones del levantamiento.



Figura 3.3. Equipo GNSS: antena R8s, trípode, triback y colectora TSC3.

3.2.2.2. Trabajo de campo

Dado que los PCT son utilizados para la georreferenciación del levantamiento topo-batimétrico, generado mediante fotogrametría, es necesario que los puntos se ubiquen en zonas despejadas, evitando la interferencia de la señal satelital y garantizando que los puntos queden visibles en las fotografías aéreas capturadas.

En la georreferenciación de la topo-batimetría, es necesario conocer con alta precisión las coordenadas planimétricas y altimétricas de estos puntos, lo cual se logra mediante un levantamiento estático rápido.

Dicho levantamiento, consiste en determinar las coordenadas de todos los PCT a partir del procesamiento de los valores crudos registrados en la zona de estudio por la antena receptora R8s. A continuación, se menciona el procedimiento del trabajo de campo, así como el post procesamiento de los valores GNSS registrados.

Iniciar equipo. El primer paso consiste en encender el equipo, tanto la controladora TSC3 como la antena receptora R8s. Es importante esperar a que comience la recepción de señal satelital, conectando una pequeña extensión a la antena R8s que ayuda a la recepción de esta.

Desplante y nivelación de equipo. Mientras la antena se conecta a las constelaciones satelitales, se desplanta y nivela el trípode, ubicado sobre el PCT, cuyas coordenadas se pretenden conocer. Una vez desplantado, se sitúa y nivela el triback, apoyados de la burbuja de nivel, para posteriormente colocar tanto la extensión como la antena receptora R8s.

Configuración – tipo de levantamiento. Apoyados de la controladora TSC 3, se crea en el dispositivo una plantilla de trabajo, donde se establece el nombre del proyecto, el tipo de levantamiento y el sistema de referencia de la zona de estudio, siendo para el caso del Río Gallinas, un levantamiento estático rápido en el sistema de referencia ITRF 2008 y geoide mexicano, ya que estos son los implementados y recomendado por el INEGI.

Levantamiento del PCT. Una vez configurada la plantilla de trabajo, y nivelado el trípode, se conecta la controladora con la antena GNSS vía bluetooth. Donde para dar inicio al levantamiento estático rápido, la controladora requiere algunos datos de

entrada como: nombre del punto, y la altura en metros del terreno a la antena receptora.

Continuando con el levantamiento, se deja inmóvil el equipo durante un intervalo de tiempo que varía entre los 15 y 30 minutos, dependiendo del *PDOP* (por sus siglas en inglés, Dilución de Precisión de Posición) que es una relación entre el error de la posición del usuario con la posición de los satélites.

Concluido el tiempo requerido para el posicionamiento del PCT, se guarda el equipo sin apagarlo y se repite el procedimiento en todos los PCT requeridos.

Exportar datos. Al concluir con el levantamiento de los PCT y sin desconectar la controladora de la antena, se exportan los datos del levantamiento. Para esto, se introduce una memoria USB a la controladora, y en esta, se selecciona el menú *topografía general, ventana de instrumento*, para finalmente abrir la opción *se de exportar archivos GNSS*. Una vez exportados, se guardan en la memoria introducida.

Los vectores exportados, denominado como datos crudos, requieren de un post procesamiento, que ajusta y minimiza los errores del levantamiento estático, mediante la información registrada del desplazamiento de los satélites, así como con la triangulación de los PCT con la base datos de la Red Geodésica Nacional Activa del INEGI.

3.2.2.3. Post - Procesamiento de los PCT

Para procesar los PCT, Trimble cuenta con el software computacional *Trimble Business Center (TBC)*, ideal para analizar los datos de levantamientos GNSS y terrestres (estación total y nivel) registrados en campo. El software ofrece funciones exclusivas y cuenta con dos configuraciones principales, la *configuración Estándar*, diseñada para: transferir, procesar, ajustar y revisar datos de levantamientos terrestres y GPS (sólo frecuencia L1), así, como la *configuración Avanzada*, que está diseñada para transferir, procesar, ajustar y revisar datos de levantamientos terrestres y GNSS (frecuencias L1 y L2) (Trimble, 2008).

Siendo la configuración avanzada la implementada en el procesamiento de los PCT, que consiste en importar los datos crudos del levantamiento de campo, así como los archivos RINEX pertenecientes a las estaciones de la Red Geodésica Nacional

Activa (RGNA) del INEGI, logrando referenciar los proyectos geográficos al marco geodésico oficial de México a partir del ajuste de los datos levantados (antena R8s), con las estaciones de control de la RGNA en el *Trimble Business Center*.

La RGNA es el conjunto de estaciones de monitoreo continuo de datos, del GNSS con cobertura nacional (Figura 3.4), las cuales cuentan con coordenadas de la mayor exactitud posicional disponible en el marco geodésico oficial (INEGI, 2021).

Cada estación de la RGNA, ligada a un levantamiento geodésico, registra continuamente los datos del GNSS, y desempeña un papel activo al funcionar como puntos de referencia, que permiten determinar las diferencias entre sus posiciones altamente precisas, y las posiciones de nuevos puntos derivadas directamente de los datos transmitidos por el GNSS (INEGI, 2021).

En el caso de las estaciones de la Red Geodésica Nacional Activa del INEGI, dispone de los siguientes tipos de receptores geodésicos (GNSS) (INEGI, 2021):

- fase portadora y pseudorangos de la señal GPS en L1, L2 y L5.
- fase portadora y pseudorangos de la señal en L1 y L2 del sistema GLONASS.
- fase portadora y pseudorangos de la señal en E1 y E5 del sistema Galileo.



Figura 3.4. Red Geodésica Nacional Activa.

Fuente: INEGI.

A continuación, se describe el procedimiento ordenado para el procesamiento y ajuste de los PCT, con los valores registrados en la Red Geodésica Nacional Activa mediante el *Trimble Business Center*.

Antena R8s GNSS. El primer paso consiste en concentrar los datos GNSS registrados en el levantamiento topográfico de los PCT, que corresponde a los *datos crudos*, exportados desde la controladora al finalizar el levantamiento topográfico.

RGNA del INEGI. Posteriormente, es necesario descargar los datos registrados de la Red Geodésica Nacional Activa del INEGI, los cuales deben coincidir con el día y la hora del levantamiento en campo. Esto con la finalidad de enlazar los valores del levantamiento, con la información del INEGI introducida al software *TBC*, como una estación de control, que permite ajustar los PCT capturados, logrando minimizar el error, y obtener una precisión milimétrica. El proceso de la descarga de datos de la RGNA se describe a continuación:

1. Ingresar a la página web de la Red Geodésica Nacional Activa del INEGI: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/rгна/>
2. Seleccionar la estación fija de interés, que puede ser la más cercana, o aquellas que se consideren adecuadas.
3. Posteriormente se establece la fecha y hora, inicial y final, teniendo precaución que coincida con la del levantamiento de campo. Mencionar que, debido a la variación del uso horario dependiendo de la ubicación del levantamiento, el INEGI ha optado por manejar el UTC - 0 (por sus siglas en inglés, Tiempo Universal Coordinado), por lo que es necesario que la hora de inicio y final corresponda al UTC – 0. Para el caso de la zona de estudio, al encontrarse en la UTC – 6, es necesario sumar seis horas a lo registrado.
4. Finalmente, con la información completa se descarga el archivo proporcionado, en caso de requerir varias estaciones fijas o distintas fechas se repite el proceso.

Trimble Business Center (TBC). El procesamiento o ajuste de los PCT se realiza en el software TBC, que cuenta con una interfaz intuitiva que facilita el proceso. La metodología desarrollada, consiste en seleccionar un sistema de referencia e importar los datos de la antena GNSS R8s, así como los valores descargados de la RGNA,

teniendo la posibilidad de analizar el comportamiento de las sesiones entre la antena receptora con las constelaciones Satelitales, para lograr un ajuste óptimo, y determinar las coordenadas planimétricas y altimétricas de cada punto de control levantado, a continuación, se describe los pasos para el procesamiento de los PCT.

1. El primer paso consiste en abrir el software, crear y guardar un proyecto nuevo.
2. Posteriormente se introduce el sistema de coordenadas de levantamiento realizado, este se realiza en la ventana *cuadrícula* → *Sistema de coordenadas* (Figura 3.5), para el caso de estudio se trabajó con sistema ITRF 2008, así como con el modelo del geode mexicano 2010.

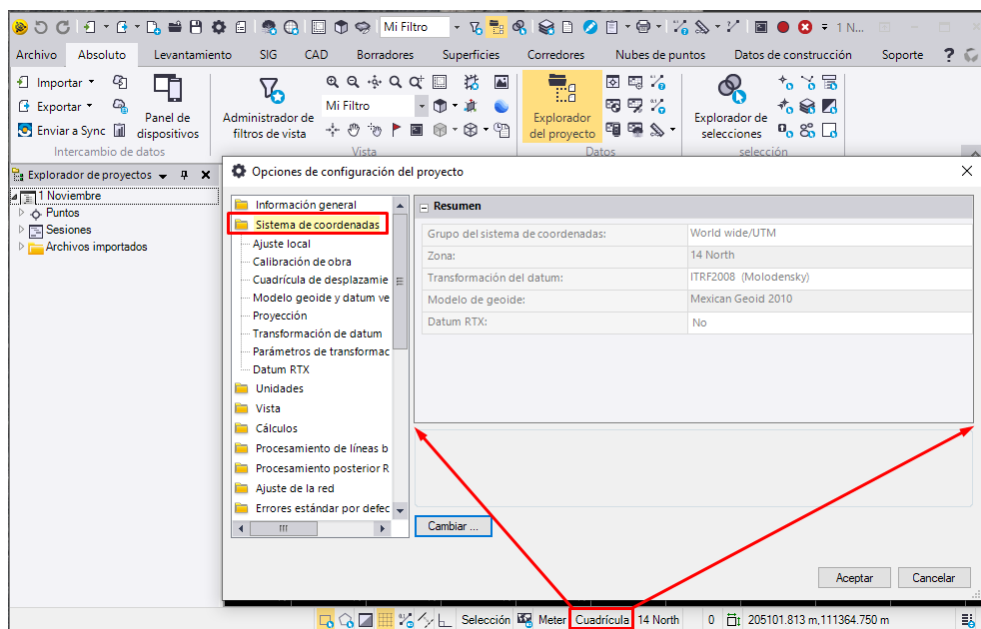


Figura 3.5. Sistema de referencia de los PCT.

3. Establecido el sistema de referencia, se procede a importar los datos del levantamiento de campo. Para importarlos, se pueden arrastrar los archivos, o simplemente buscar la carpeta en la opción *importar* (Figura 3.6).

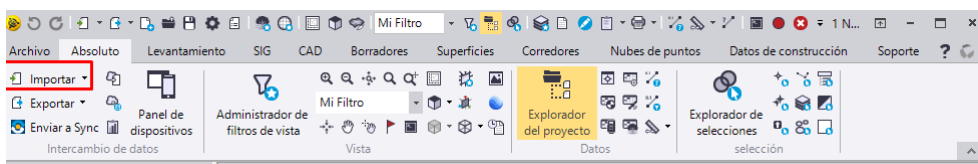


Figura 3.6. Ventana para importar datos crudos y RGNA.

- Al importar los datos, se abre automáticamente una ventana con la información importada, en caso de haber algún error en las elevaciones registradas se pueden modificar manualmente previo a dar clic en aceptar (Figura 3.7).

Comprobación datos brutos del receptor

Vista de antena							
Importar	ID de punto	Nombre de archivo	Fabricante	Tipo	Método	Altura	Nº de serie
☒	75	12213062.T02	Trimble	R8s Internal	Centro de fase de la antena	1.613 m	
☒	76	12213063.T02	Trimble	R8s Internal	Centro de fase de la antena	1.598 m	
☒	77	12213064.T02	Trimble	R8s Internal	Centro de fase de la antena	1.683 m	
☒	78	12213065.T02	Trimble	R8s Internal	Centro de fase de la antena	1.637 m	
☒	79	12213066.T02	Trimble	R8s Internal	Centro de fase de la antena	1.471 m	
☒	80	12213067.T02	Trimble	R8s Internal	Centro de fase de la antena	1.696 m	
☒	81	12213068.T02	Trimble	R8s Internal	Centro de fase de la antena	1.581 m	

Punto Antena Receptor

Modelo de antena: Automático Restablecer Aceptar Cancelar

Figura 3.7. Ventana con PCT importados.

- El siguiente paso consiste en importar los datos de la estación de control descargados de la RGNA en formato RINEX (Figura 3.8), donde resulta importante revisar que coincidan las coordenadas de la antena con las indicadas en el archivo, *Calendario GPS y Coordenadas RGNA ITRF08*, disponible en el portal del INEGI.

Vista de puntos

Importar	ID de punto	Nombre de archivo	Hora de inicio	Hora final	Duración	Código de característica	Enviar a RTX-PP
☒	ISLP	ISLP306i.20o	11/1/2020 4:59:42 AM	11/1/2020 5:59:27 AM	01:00:00		☐
☒	ISLP	ISLP306m.20o	11/1/2020 5:59:42 AM	11/1/2020 6:59:27 AM	01:00:00		☐
☒	ISLP	ISLP306n.20o	11/1/2020 6:59:42 AM	11/1/2020 7:59:27 AM	01:00:00		☐
☒	ISLP	ISLP306o.20o	11/1/2020 7:59:42 AM	11/1/2020 8:59:27 AM	01:00:00		☐
☒	ISLP	ISLP306p.20o	11/1/2020 8:59:42 AM	11/1/2020 9:59:27 AM	01:00:00		☐
☒	ISLP	ISLP306q.20o	11/1/2020 9:59:42 AM	11/1/2020 10:59:27 AM	01:00:00		☐
☒	ISLP	ISLP306r.20o	11/1/2020 10:59:42 AM	11/1/2020 11:59:27 AM	01:00:00		☐
☒	ISLP	ISLP306s.20o	11/1/2020 11:59:42 AM	11/1/2020 12:59:27 PM	01:00:00		☐

Punto Antena Receptor

Modelo de antena: Automático Restablecer Aceptar Cancelar

Figura 3.8. Valores importados de la RGNA.

- Fijar al menos un punto en dirección horizontal y un punto en vertical como calidad de control, siendo el punto de control el descargado de la RGNA (Figura 3.9).
- Continuando, se descargan los datos de las estaciones de referencia o efemérides precisas, que se encuentran en la ventana *levantamiento* →

Descarga (Figura 3.10). Al dar clic en descargar emerge una ventana con las distintas efemérides disponibles, estas efemérides son los datos actualizados con la ubicación exacta de las constelaciones, que permiten minimiza el error del procesamiento.

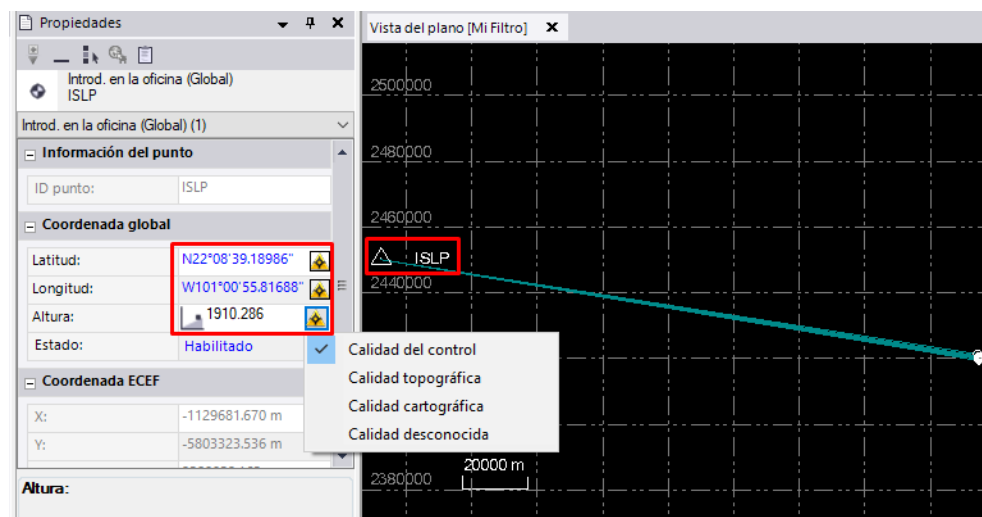


Figura 3.9. Punto de control de la RGNA.

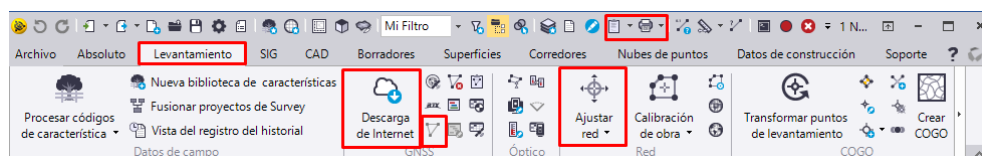


Figura 3.10. Descarga de efemérides.

8. Posteriormente al dar clic en la pestaña *levantamiento* → *Procesar líneas base*, se aprecia el ajuste alcanzado de los PCT (Figura 3.11).

Procesar líneas base						
Resultados del procesamiento						
Guar	Observación	Tipo de s	Precisión horiz. (	Precisión vert. (9	RCM	Longitud
☐	ISLP --- 77	Desacopl	0.507	0.304	0.008	184857.363
☐	ISLP --- 76	Desacopl	0.000	0.000	0.018	184897.632
☐	ISLP --- 79	Desacopl	0.000	0.000	0.013	185321.429
☐	ISLP --- 78	Desacopl	0.000	0.000	0.015	184893.333
☐	ISLP --- 75	Desacopl	0.430	0.376	0.014	184279.462
☐	ISLP --- 80	Desacopl	0.904	1.274	0.014	185742.804

Figura 3.11. Primer ajuste de líneas base.

9. Se pretende lograr el tipo de solución *Fija*, cuya precisión ronda el centímetro, para un levantamiento estático, en caso de no lograrlo, y obtener una solución desacoplada como se aprecia en la (Figura 3.11), el software, permite revisar y ajustar las sesiones entre la antena R8s con las constelaciones satelitales.

10. Al revisar las sesiones (antena receptora – constelación satelital), se pretende eliminar aquella información que introduzca *ruido* o *interferencia*, como en muchas ocasiones pueden ser los primeros minutos del levantamiento, o irregularidades apreciadas en las sesiones (Figura 3.12).

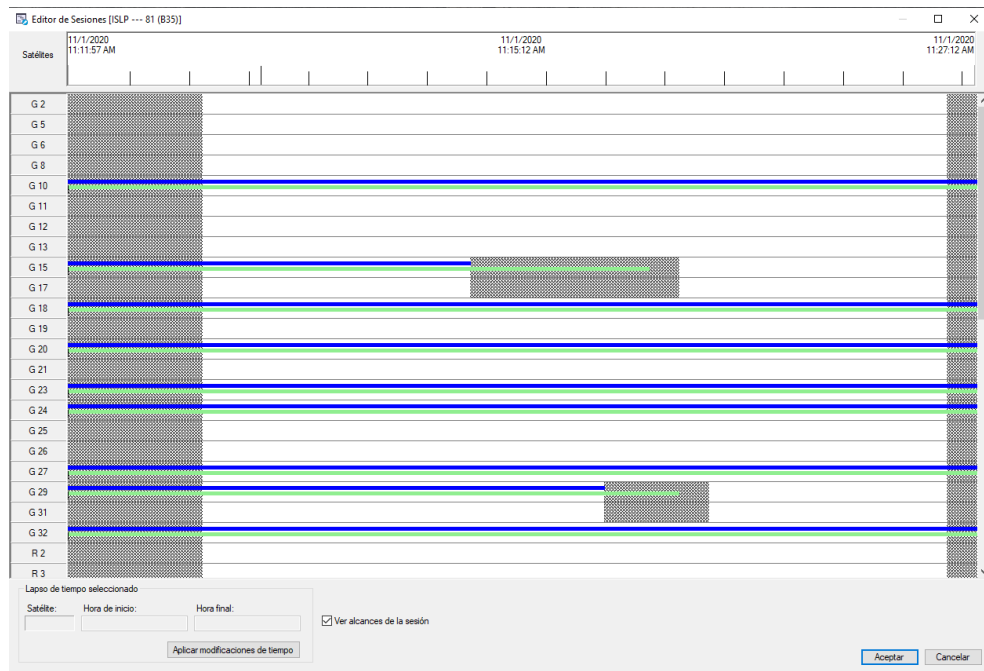


Figura 3.12. Revisión de sesión, Antena - Constelación satelital.

11. Deshabilitadas las sesiones con datos incorrectos o el satélite completo, se vuelven a procesar las líneas, esperando una solución *Fija*, en caso de no conseguirlo al primer intento, se repite el proceso hasta lograr las condiciones deseadas (Figura 3.13).

Procesar líneas base							
Resultados del procesamiento							
Guar	Observación	Tipo de s	Precisión horiz. (	Precisión vert. (9	RCM	Longitud	
▶	ISLP --- 79	Fija	0.000	0.000	0.035	185321.272	Guardar
✓	ISLP --- 80	Fija	0.059	0.093	0.034	185742.879	Cancelar
✓	ISLP --- 81	Fija	0.000	0.000	0.037	185074.815	Orden ...
✓	ISLP --- 82	Fija	0.048	0.101	0.037	185784.153	Informe
✓	ISLP --- 78	Fija	0.000	0.000	0.035	184893.416	Configuración ...
✓	ISLP --- 83	Fija	0.000	0.000	0.035	185637.829	
✓	ISLP --- 77	Fija	0.049	0.082	0.040	184857.423	
✓	ISLP --- 74	Fija	0.000	0.000	0.044	183978.232	

Figura 3.13. Procesamiento de líneas con resultado "Fijo".

12. Finalmente, logrado el ajuste de la red se procede a exportar el reporte con las coordenadas (XYZ) de cada uno de los puntos de control terrestre.

3.3. Fotogrametría

Se define a la fotogrametría como la ciencia o tecnología de obtener información precisa de objetos físicos y su entorno, mediante el proceso de exponer, medir e interpretar imágenes fotográficas, obtenidas de diversas fuentes de energía electromagnética y otros fenómenos (ASPRS, 1990; McGlone *et al.*, 2004). Etimológicamente la palabra fotogrametría deriva de las palabras griegas *φωτος* (*fotos*), que significa luz; *γραμα* (*gram*), que significa lo que está dibujado o escrito; y *μετρον* (*metrón*), que significa medir. Usando en conjunto esas palabras, fotogrametría significa medir gráficamente por medio de la luz (Alvarado, 2016).

Desde sus inicios y hasta la actualidad, la fotogrametría ha evolucionado a la par de la tecnología. Empezando con la fotogrametría analógica, que surge en la década de los años treinta, basadas en la restitución de tipo óptico o mecánico, y pasando a la fotogrametría analítica, que aparece en 1957 como un desarrollo natural de la interrelación entre restituidores analógicos, y el surgimiento de las primeras computadoras. Posteriormente, ha llegado lo que actualmente conocemos como la fotogrametría digital, encontrándose y desarrollándose a la par de las nuevas tecnologías de la información geoespacial (Blachut *et al.*, 2988)

La fotogrametría es una disciplina que resulta de la convergencia de la óptica, la fotografía y las matemáticas aplicadas (geometría proyectiva), para realizar levantamientos principalmente de carácter cartográfico.

A lo largo de su evolución se han desarrollado métodos ópticos que se adaptan a los diferentes campos de aplicación. Esto ha conllevado al desarrollo de equipos, diseñados para realizar tareas específicas. Las técnicas y equipos en torno a su aplicación clasifican a la fotogrametría en terrestre y aérea (McGlone *et al.*, 2004).

3.3.1. Clasificación de la fotogramétrica

Frecuentemente, la fotogrametría se divide en dos especialidades de acuerdo con el tipo de fotografía implementada (Herrera, 1987; Zelaya *et al.*, 2016) y estas son:

- *Fotogrametría terrestre.* Cuya principal aplicación se produce en la arquitectura y la arqueología, basada en el principio de la toma de fotografías desde la tierra.

- **Fotogrametría aérea.** Caracterizada por el uso de fotografías aéreas obtenidas desde una cámara de toma, ubicada en una plataforma especial (vehículo aéreo). Donde el eje óptico de la cámara fotográfica resulta sensiblemente perpendicular al terreno o corteza terrestre.

3.3.2. Fotogrametría aérea

La fotogrametría se ha consolidado con el pasar de los años y, su evolución va de la mano con el desarrollo de nuevas tecnologías, como los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), así como de la aparición de computadoras, con gran capacidad en la solución de procesos.

Herrera (1987), clasificó a la fotogrametría dependiendo del método empleado en tres tipos diferentes: *analógica, analítica y digital*. La fotogrametría digital, es la que más desarrollo ha presentado en los últimos años, como consecuencia de la evolución de las cámaras digitales y de la informática, realizando todos los procesos fotogramétricos mediante el uso de algoritmos computacionales (Santos Clavero, 2014) y con ello la generación automática de modelos digitales de terreno, ortomosaicos así como la visualización de modelos tridimensionales, etc. Los archivos digitales, procesados por fotogrametría digital pueden ser exportados en distintos formatos, comúnmente utilizados como información de base en los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

3.3.3. Levantamiento fotogramétrico

Actualmente, existe una gran variedad de equipo, software y metodologías que permiten realizar un levantamiento fotogramétrico con una precisión adecuada, en cuanto a los valores altimétricos y planimétrico obtenidos.

El auge de la fotogrametría se presenta principalmente por la evolución constante de los equipos, (VANT y computadoras) cuyas principales ventajas radica en la disminución de tiempo y costos, sin embargo, existen puntos endebles, mencionados a continuación.

3.3.3.1. Ventajas y desventajas de la fotogrametría

Algunas de las ventajas en la implementación de la fotogrametría sobre los levantamientos convencionales son:

- *Reducción de costos.* Relacionado con el tamaño del área a restituir. El método fotogramétrico se torna competitivo frente al método topográfico, aumentando esta competitividad a medida que el área se hace más extensa.
- *Reducción del trabajo de campo.* La reducida cantidad de puntos de control necesarios en la fotogrametría reduce la estadía en el campo.
- *Velocidad de compilación.* El tiempo requerido para realizar un mapa fotogramétrico, es mínimo comparado con el que requiere el levantamiento topográfico y su posterior trabajo de gabinete.
- *Análisis multitemporal.* Las fotos aéreas proveen un registro preciso de las características del terreno, en la fecha en que fueron tomadas, permitiendo realizar comparaciones entre fotos de otras fechas para evaluar cambios en el terreno. Las fotografías aéreas también pueden ser empleadas para otros usos diferentes al del proyecto original, ya que además de información métrica, proporcionan información de carácter cuantitativo y cualitativo.
- *Áreas de difícil acceso.* La fotogrametría se puede aplicar en regiones donde no pueden utilizarse los métodos clásicos, por ejemplo: en regiones intransitables, tales como: ciénagas, desiertos, selvas vírgenes, entre otros, evitando poner en riesgo la vida humana.
- *Resultados.* Mediante la fotogrametría, además de obtener el relieve del terreno o las curvas de nivel, es posible generar un ortomosaico de alta definición, que resulta útil debido a que facilita la representación gráfica de los resultados, principalmente en áreas de gran extensión territorial.

La obtención de un levantamiento con imágenes de alta resolución, adquiridas por medio de los VANT, tiene sus desventajas, algunas de las cuales son:

- *Superficie de terreno en cobertura vegetal densa.* En este caso, se complica ubicar la marca flotante sobre el terreno, por lo que se debe presumir una altura promedio de la vegetación con respecto al suelo. Además, la cubierta vegetal tiende a suavizar los accidentes topográficos del terreno.
- *Curvas de nivel en superficies planas.* Determinar la trayectoria de una curva de nivel en un terreno plano tiene un alto grado de dificultad debido a la gran cantidad de información y la alta precisión.

- *Inversión inicial.* La aplicación de la fotogrametría requiere una inversión económica considerable, en la adquisición de equipo y capacitación de personal.
- *Vulnerabilidad del equipo aéreo.* Los VANT, pueden resultar sensibles ante varios factores bióticos y abióticos, principalmente al clima (lluvia, corrientes de aire), así como la presencia de árboles y aves de gran tamaño.
- *Limitaciones del VANT.* Otra limitación es la capacidad del vehículo aéreo, debido al tiempo limitado que tiene para planear, entre 10 y 20 minutos a una altura por norma, de 120 metros máximo.

3.3.3.2. VANT

Un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT), es un equipo para la obtención de datos remotos desde el entorno aéreo, con una estructura normalmente de fibra de carbono, y utilizado para la captura de fotos y videos en alta calidad. Según la necesidad del levantamiento, se le incorporan diferentes tipos de cámaras o equipos de información al vehículo aéreo para la gestión de la información. (Ojeda *et al.*, 2014).

Actualmente existe una amplia variedad de tipos y modelos en cuanto vehículos aéreos se refiere, sin embargo para el levantamiento topo-batimétrico, en el tramo de del Río Gallinas y sus zonas aledañas, se utilizó el VANT Phantom 4 Pro (Figura 3.14), un vehículo aéreo de tipo rotor, compuesto por cuatro hélices y una cámara de alta definición, a continuación se mencionan las principales características que hacen del Phantom 4 pro (Tabla 3.1), unos de las mejores opciones para el levantamiento.



Figura 3.14. Vant Phantom 4 Pro con control conectado a celular vía USB.

Tabla 3.1. Características técnicas del Phantom 4 pro.

Características	Especificaciones
Aeronave	
Peso (batería y hélices incluidas)	1 388 g
Tamaño diagonal (sin hélices)	350 mm
Velocidad de ascenso máx.	Modo-P: 5 m/s (16.4 ft/s)
Velocidad de descenso máx.	modo-P: 3 m/s (9.8 ft/s)
Velocidad máx.	50 km/h (31 mph) (modo-P)
Ángulo de inclinación máx.	25° (Modo-P)
Altura máx. de servicio m.s.n.m.	6,000 m (19 685 pies)
Resistencia al viento máx.	10 m/s
Tiempo de vuelo máx.	30 minutos aprox.
Rango de temperatura de funcionamiento	De 0 a 40 °C (de 32 a 104 °F)
Sistemas de posicionamiento por satélite	GPS / GLONASS
Rango de precisión de vuelo estacionario Vertical	±0,1 m (con posicionamiento visual) ±0,5 m (con posicionamiento por GPS)
Rango de precisión de vuelo estacionario Horizontal	±0,3 m (con posicionamiento visual) ±1,5 m (con posicionamiento por GPS)
Sistema de visión	Sistema de visión frontal
Sistema de visión	Sistema de visión frontal, posterior e inferior
Rango de velocidad	≤50 km/h (31 mph) a 2 m (6.6 pies) del suelo
Rango de Altitud	0 - 10 m (0 - 33 pies)
Rango de Operación	0 - 10 m (0 - 33 pies)
Rango de detección de obstáculos	0.7 - 30 m (2 - 98 pies)
Campo de visión	Frontal: 60° (horizontal), 27° (vertical), Posterior: 60° (horizontal), 27° (vertical), Inferior: 70° (de frente y hacia atrás), 50° (a izquierda y derecha)
Frecuencia de detención	Frontal: 10 Hz, Inferior: 20 Hz, Posterior: 10 Hz
Estabilizador	
Estabilización	3-ejes (cabeceo, alabeo, guiñada)
Intervalo controlable	Inclinación -90° a + 30°
Velocidad angular máxima controlable	Cabeceo = 90°/s
Cámara	
Sensor	1"CMOS
Rango ISO	Vídeo: 100 - 3200 (Automático) - 100 - 6400 (Manual) Foto: 100 - 3200 (Automático) - 100- 12800 (Manual)
Rango ISO	100 - 3200 (Automático)
Velocidad obturador mecánico	8 - 1/2000 s
Velocidad obturador electrónico	8 - 1/8000 s
Tamaños de imagen	Proporción de imagen 3:2: 5472 x 3648 Proporción de imagen 4:3: 4864 x 3648 Proporción de imagen 16:9: 5472 x 3078

Continuación de tabla 3.1. Características técnicas del Phantom 4 pro.

Características	Especificaciones
Cámara	
Tamaño de imagen de vídeo	4096×2160(4096×2160 24/25/30/48/50p) 3840×2160(3840×2160 24/25/30/48/50/60p) 2720×1530(2720×1530 24/25/30/48/50/60p) 1920×1080(1920×1080 24/25/30/48/50/60/120p) 1280×720(1280×720 24/25/30/48/50/60/120p)
Modos de fotografía	Disparo único Disparo en ráfaga: 3/5/7/10/14 fotogramas Exposición Automática en Horquillado (AEB): 3/5 horquilla de exposición a 0.7EV bias
Formato de Foto y Vídeo	Foto: JPEG, DNG (RAW), JPEG + DNG Vídeo: MP4/MOV (AVC/H.264; HEVC/H.265)
Rango de temperatura de funcionamiento	de 0 a 40 °C (de 32 a 104 °F)
Control remoto	
Potencia de transmisión (PIRE)	2.400 GHz - 2.483 GHz
Distancia de transmisión máx.	Conformidad con FCC: 7 km); conforme con CE: 3,5 km (sin obstáculos, libre de interferencias)
Corriente/Voltaje/Batería	1.2 A @7.4 V/ 6000mAh. 2S LiPo
Puerto de salida de vídeo	GL300F: USB y GL300E: HDMI
Soporte de dispositivos móviles	GL300E: tabletas y teléfonos inteligentes GL300F: Pantalla de 5,5 pulg., 1920×1080, 1000 cd/m2

Fuente: <https://www.dji.com/mx/phantom-4-pro/info>

3.3.3.3. Equipo GNSS

El equipo GNSS implementado para el levantamiento de los PCT, corresponde a la antena R8s de Trimble descrita anteriormente, mediante la cual, se obtienen las coordenadas XYZ, de los puntos de control terrestre con los que serán referenciadas las imágenes capturadas con el VANT Phantom 4 Pro, y así obtener la topo-batimetría del cauce mediante el procesamiento de las imágenes.

3.3.4. Metodología de la fotogrametría

Para el levantamiento topo-batimétrico del Río Gallinas, es necesario desarrollar una metodología, que optimice los tiempos del trabajo de campo y del procesamiento de la información capturada. Siendo importante, que la metodología permita homogeneizar procesos, para las distintas campañas de medición.

En la Figura 3.15, se muestran los distintos procesos fotogramétricos involucrados, con la finalidad de obtener los modelos digitales del terreno, incluyendo a la batimetría del cauce y las zonas aledañas a esté.

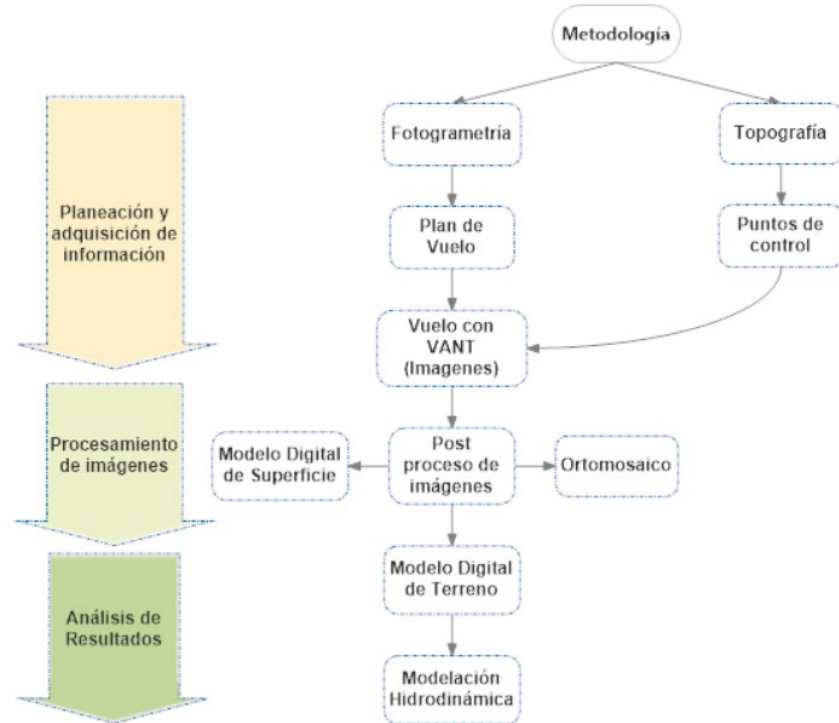


Figura 3.15. Metodología implementada para procesamiento fotogramétrico.

Adaptada de: (Jiménez J., 2016)

3.3.4.1. Planes de vuelos

Previo al trabajo de campo, se realiza la planeación de los vuelos, en donde se determina el área del vuelo y los transectos que se llevarán a cabo, además de controlar las variables involucradas en el vuelo como: el tiempo, velocidad y elevación, así como el modelo del VANT, y cantidad de baterías requeridas para el vuelo.

Durante la planeación, resulta conveniente identificar mediante imágenes satelitales o visitas de campo, las vías de acceso, edificaciones, vegetación, así como posibles zonas despejadas tanto para la colocación de los PCT, como para realizar el despegue y aterrizaje del VANT.

El plan de vuelo se desarrolla apoyados del software y aplicación *DroneDeploy* (Figura 3.16), software gratuito que permite realizar los planes, de manera intuitiva, donde a partir de la selección del modelo del VANT, la elevación y área del vuelo, optimiza las características del vuelo y los transectos. Los vuelos generados en la página web, son vinculados y descargados en la aplicación, con lo cual, durante el trabajo en campo, el VANT y la aplicación del teléfono móvil son vinculados.

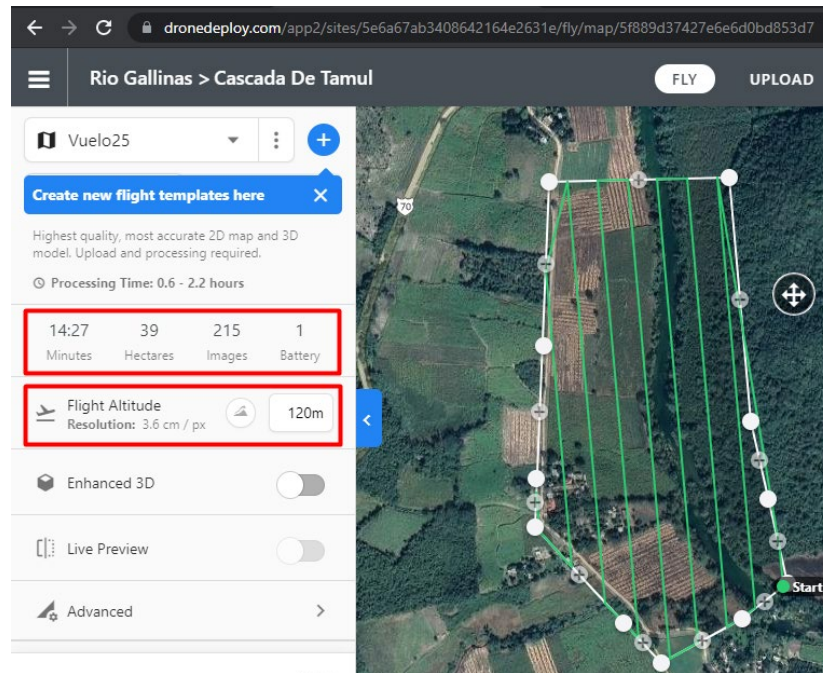


Figura 3.16. Interfaz de DroneDeploy para plan de vuelo.

Fuente: <https://www.dronedeploy.com/app2/sites/5e6a67ab3408642164e2631e/fly/map/5f889d37427e6e6d0bd853d7>

3.3.4.2. Puntos de control terrestre

El VANT Phantom 4 pro cuenta con un GPS integrado, con un rango de precisión en el eje horizontal de ± 10 metros y ± 5 metros en el vertical, sin embargo, la georreferenciación puede alcanzar una precisión vertical y horizontal de ± 0.1 m, al procesar las imágenes capturadas y contar con los PCT dentro del plan de vuelo.

3.3.4.3. Obtención de imágenes VANT

Al contar con el levantamiento de los Puntos de Control, los cuales fueron marcados para facilitar su identificación en el postproceso, se procede a realizar los vuelos del VANT, bajo las siguientes recomendaciones:

- *Ubicación.* El vehículo aéreo despegue y aterriza en el mismo punto, por lo que, se recomienda hacerlo en un área despejada, preferentemente al centro del plan de vuelo.
- *Tiempo.* Es importante considerar las condiciones del tiempo (viento, lluvia) presentes al momento de realizar el vuelo, para no arriesgar el equipo.
- *Preparación del VANT.* Colocar las hélices, batería y memoria microSD para el almacenamiento de imágenes capturadas, además de retirar el protector de la cámara.

- *Plan de vuelo.* Para vincular el plan, se conecta vía USB el celular con la aplicación *DroneDeploy* al control del VANT, este detecta automáticamente el Phantom 4 pro. Posteriormente, se selecciona el plan de vuelo a ejecutar.
- *Despegue y aterrizaje.* En la aplicación *DroneDeploy*, seleccionar la opción *start flight* (iniciar vuelo), iniciando la revisión de componentes del VANT, para posteriormente realizar el vuelo y la captura de imágenes.

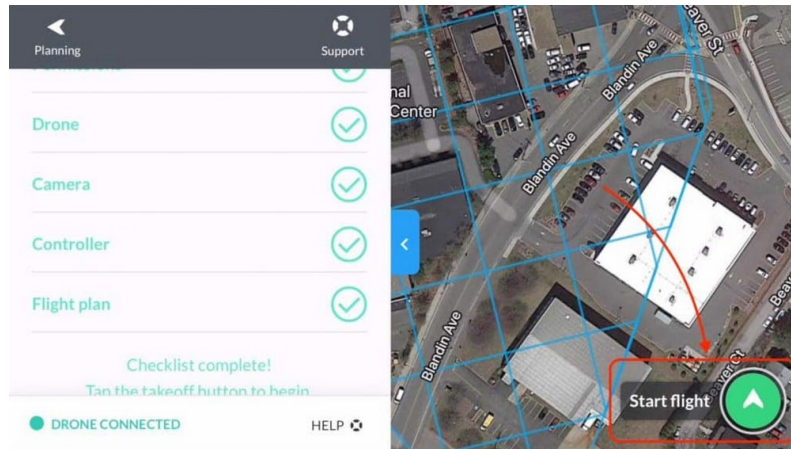


Figura 3.17. Revisión de componentes del VANT previo al vuelo.

3.3.4.4. Procesamiento fotogramétrico

Al recopilar las imágenes capturadas con los vuelos, y con las coordenadas corregidas de los puntos de control, se procede a realizar el procesamiento fotogramétrico.

Actualmente existen una gran variedad de software, con distintos enfoques, bondades y capacidades, que son utilizados para el post procesamiento fotogramétrico (Anexo IV), entre los cuales destaca el software *Agisoft Metashape* (anteriormente *Agisoft Photoscan*), un programa de fotogrametría profesional ruso utilizado para sistemas de información geográfica, documentación de patrimonio cultural, medición indirecta de objetos a diferentes escalas y generación de modelos digitales que representen el relieve captado con las imágenes aéreas.

El programa, cuenta con herramientas para generar y editar la nube de puntos obtenida a partir de una compilación de imágenes. Además de poder generar una malla 3D, que incluyen clasificaciones automáticas de la nube de puntos, para personalizar la reconstrucción de la geometría. Es decir, el software fotogramétrico puede distinguir entre diversos objetos, como edificios y árboles, logrando filtrarlos (Übel, 2021).

El software posee numerosas herramientas de medición que permiten a las empresas mineras, a los topógrafos y otros profesionales, llevar a cabo mediciones volumétricas a partir de representación del relieve (Übel, 2021).

Una vez establecido el software, es necesario adoptar una única metodología en el proceso fotogramétrico, implementado a las imágenes capturadas durante las campañas de medición al Río Gallinas y sus zonas aledañas, con la finalidad de homogenizar los resultados.

3.3.4.4.1. Análisis preliminar

De cada vuelo realizado durante las campañas de medición, fueron capturadas entre 200 – 300 imágenes (fotos), algunas de las cuales cuentan con errores. Es importante no considerar, aquellas imágenes captadas con distorsiones, desenfoques, o que no están perpendicular a la superficie terrestre (ángulo de inclinación incorrecto).

Además, se debe considerar la cantidad de vuelos (fotos) que se desean procesar simultáneamente, debido a que esta relacionado directamente con la arquitectura y capacidad de la computadora utilizada (procesador, RAM, tarjeta gráfica).

Seleccionadas las imágenes, es necesario ejecutar el software e importar las mismas. La interfaz del programa es bastante intuitiva, por su parte, el software presenta la posibilidad de seleccionar, distintas calidades de procesamiento. En cuanto a los tiempos del flujo de trabajo (Figura 3.18), varían en cada proceso, donde algunos tardan entre 6 y 8 horas, y otros como la clasificación de píxeles, creación de la nube de puntos densa y mallado, pueden demorar varios días.

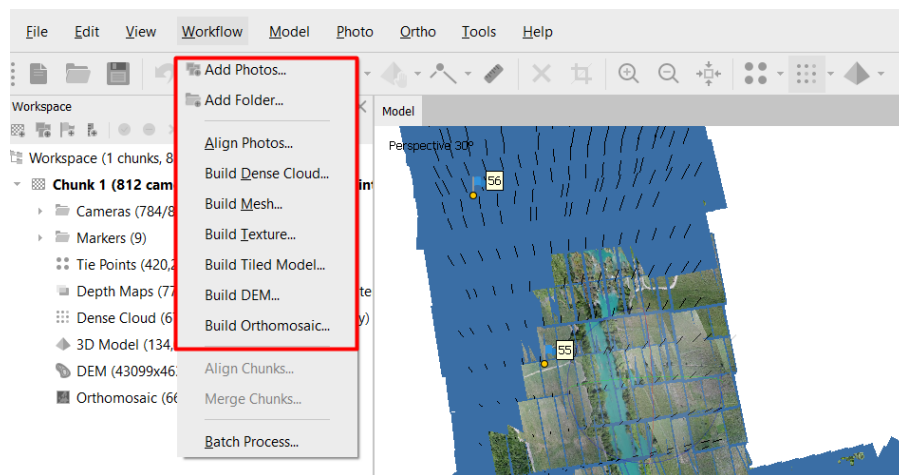


Figura 3.18. Flujo de trabajo en software fotogramétrico (procesos).

3.3.4.4.2. Orientación de imágenes.

De acuerdo con el manual de Agisoft metashape (2021), la posición de la cámara al momento de capturar las fotografías está definida, por los parámetros de orientación interna y externa de la propia cámara. Los parámetros de orientación interna incluyen: la distancia focal de la cámara, las coordenadas del punto principal de la imagen y coeficientes de distorsión del lente, mientras que los parámetros de orientación exterior definen la posición y orientación de la cámara.

Durante la orientación de la imagen, constan de 3 componentes de traslación y 3 ángulos de rotación de Euler. En muchos casos, los sistemas de levantamiento están equipados con sistemas GPS/GNSS para medir los parámetros de orientación exterior durante la captura (Agisoft LLC, 2021).

3.3.4.4.3. Georreferenciación

Para lograr la georreferenciación, el primer paso consiste en seleccionar el sistema de coordenadas con el que se desea trabajar, siendo para el área de proyecto el sistema de referencia *WGS 1984 UTM Zone 14 North*.

Las imágenes previamente importadas, se ajustan de manera automática al sistema de referencia seleccionada, debido al GPS que lleva integrado el Phantom 4 Pro, sin embargo, dicho GPS cuenta con un error de posicionamiento entre 5 y 10 metros (vertical y horizontal). Dicho error disminuye al colocar PCT, alcanzando errores hasta de 0.1 metros con el posicionamiento visual de los puntos de control levantados.

Los PCT se agregan de manera manual o pueden importarse con un archivo tipo *.xls*, donde deben incluirse el nombre del punto, y las coordenadas XYZ obtenidas en el levantamiento. Posteriormente, los puntos de control se posicionan en las imágenes donde se aprecie la marca realizada durante las campañas de medición (Figura 3.19).

Colocados todos los PCT, es necesario desactivar todas las cámaras (fotos) y activar los marcadores (Figura 3.19, esquina superior izquierda y PCT), para optimizar la georreferenciación de las imágenes capturadas.

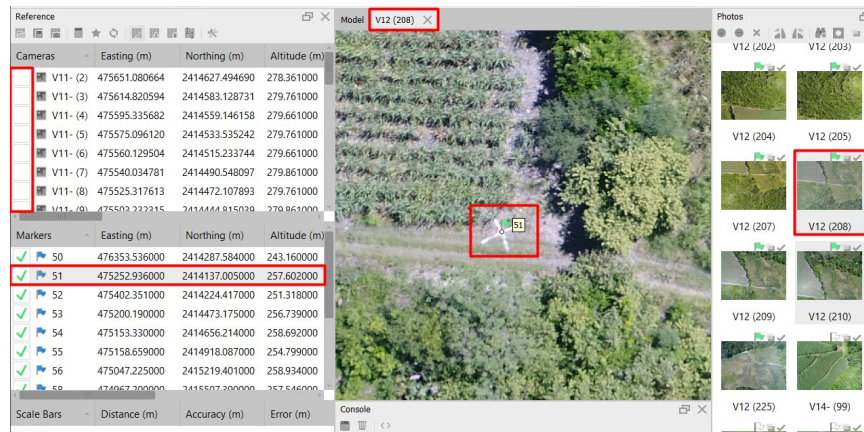


Figura 3.19. Colocación de PCT sobre imágenes – Proceso fotogramétrico.

3.3.4.4.4. Nube de puntos densa.

La generación de la nube de puntos densa está basada en los mapas de profundidad, calculados a partir de las imágenes superpuestas, considerando la orientación relativa exterior e interior. El software construye múltiples mapas de profundidad generados para cada cámara (foto) donde se fusionan para crear un nuevo mapa de profundidad combinado, utilizando información de las regiones superpuestas, para filtrar mediciones de profundidad incorrectas (Agisoft LLC, 2021).

Los mapas de profundidad combinados, generados para cada cámara, se transforman en nubes de puntos densas parciales, que luego se fusionan en una nube de puntos densa final, con un paso adicional de filtrado de ruido aplicado en regiones superpuestas (Agisoft LLC, 2021). Para cada punto de la nube de puntos densa, se registra el número de mapas de profundidad combinados y son almacenados con un valor de confianza, con lo cual, mediante la *clasificación de píxeles*, es posible diferenciar entre el terreno, vegetación, edificaciones entre otras.

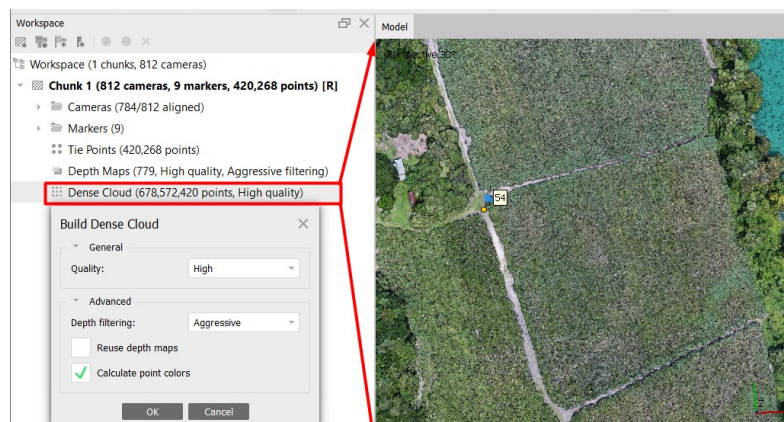


Figura 3.20. Configuración y resultado de la nube de puntos densa.

3.3.4.4.5. Clasificación de píxeles

Esta clasificación consiste en identificar mediante la agrupación de píxeles de diferentes colores, los distintos tipos de estructuras o superficies captadas, donde para el caso de la construcción del modelo digital de superficie (MDS) no es necesario realizar dicha categorización, debido a que el MDS considera la elevación de todas las superficies captadas, como la vegetación e infraestructura (viviendas).

Sin embargo, para generar un modelo digital de terreno (MDT), donde interesa determinar el relieve de la superficie terrestre sin considerar la elevación de la vegetación, viviendas, o vehículos, es necesario realizar la clasificación de píxeles e identificar únicamente el terreno (Figura 3.21).

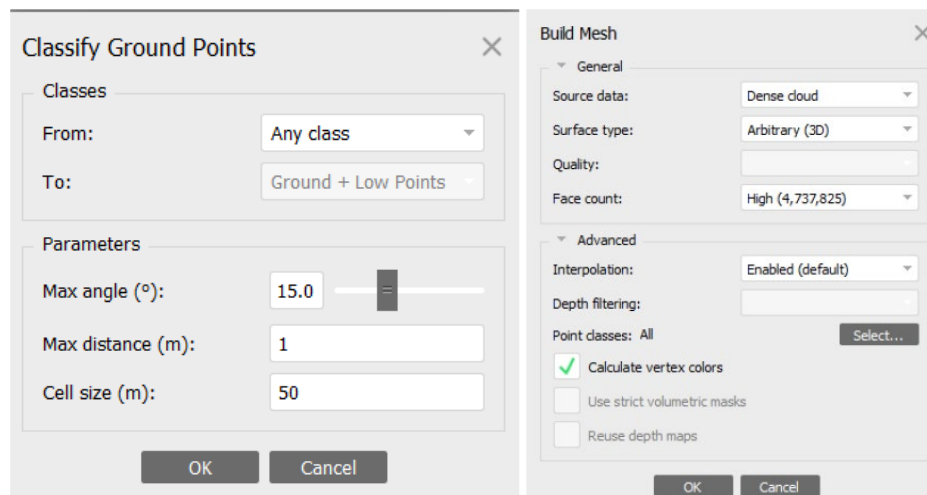


Figura 3.21. Ventana para la clasificación de píxeles y construcción del mallado.

3.3.4.4.6. Mallado

El software permite reconstruir el modelo de malla poligonal (Figura 3.21), basado en la información de la nube de puntos (nube densa, nube dispersa, nube de puntos importada de una fuente externa) o basada en los datos de los mapas de profundidad.

Donde, a partir de la nube de puntos densa es posible generar un MDS, mientras que con los mapas de profundidad y la clasificación de los píxeles se genera el MDT.

3.3.4.4.7. Resultados obtenidos

Modelo Digital de Superficie o de Terreno

El modelo digital de elevación es un modelo 2.5D de una superficie representada en forma de cuadrícula regular, con valores de altura almacenados en cada celda de

la cuadrícula (píxel). El MDT, se puede realizar a partir de una nube de puntos densa, una malla o a partir de mapas de profundidad (Agisoft LLC, 2021).

El software permite crear un modelo digital de superficie (MDS), es decir, un modelo 2.5D de la superficie de la Tierra con todos los objetos en él, y el modelo digital del terreno (MDT) (Figura 3.22), representa la superficie del suelo desnudo sin ningún objeto como vegetación y edificios (Agisoft LLC, 2021).

A partir de los modelos digitales, es posible realizar mediciones de puntos, distancias, áreas y volúmenes, además, los archivos se pueden exportar en diversos formatos (.ascii, .TIFF, .Kml, etc.), logrando manejar la información en los sistemas de información geográfica y de ser necesario generar curvas de nivel.

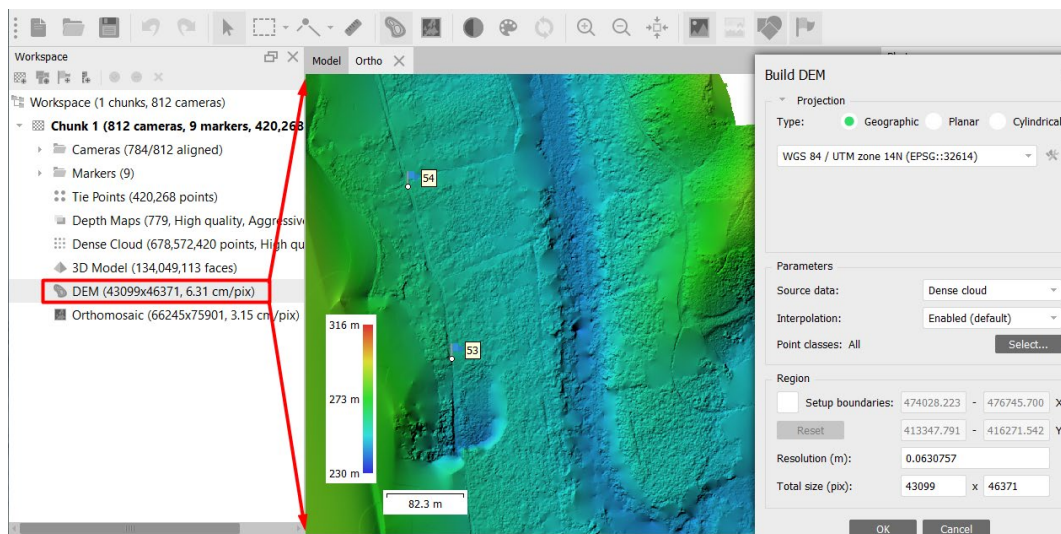


Figura 3.22. Modelo digital de terreno.

Ortomosaico

El ortomosaico es una imagen combinada creada mediante la fusión exacta de las fotos originales proyectadas en la superficie del objeto como: un modelo poligonal (malla) o un modelo digital (MDT o MDS), seleccionando cualquier superficie donde se proyectarán las imágenes. Semejante a los modelos digitales, el ortomosaico resultante (Figura 3.23), puede ser exportado en diversos formatos (.TIFF, .Kml, etc.).

El software permite utilizar las proyecciones geográfica, plana o cilíndrica, la cual, sirve para la tarea más típica de crear un ortomosaico en una coordenada geográfica (Agisoft LLC, 2021).



Figura 3.23. Ejemplo de ortomosaico con zoom en recuadro rojo.

3.4. Aforo de caudales

La hidrometría se encarga de: medir, registrar, calcular y analizar los volúmenes de agua que circulan en una sección transversal de un río, o canal por unidad de tiempo. El caudal fluvial, es la tasa a la que el agua escurre a través de una sección transversal. Dicho gasto o caudal puede ser monitoreado mediante el uso de diferentes métodos.

La exactitud en la medición del caudal dependerá del período de tiempo necesario para efectuar la medición, de la variación de la altura del agua y del caudal durante la observación. Las variaciones de las condiciones aguas abajo durante la medición pueden influir en el resultado, por lo que conviene evitarlas (OMM, 2011).

Actualmente existe una amplia variedad de metodologías para el aforo de caudales, pudiendo identificar principales dos clasificaciones: las técnicas de aforo convencionales y las técnicas de aforo modernas.

Durante el aforo de caudales sobre el Río Gallinas, se determinó el gasto y la velocidad del agua en distintos puntos del cauce, con la finalidad de registrar el comportamiento del río, para posteriormente calibrar y validar el modelo numérico.

3.4.1. Técnicas de aforo convencional

Las técnicas convencionales, resultan por practicidad los métodos comúnmente aplicados debido a que no se requiere de una inversión grande en equipamiento, así mismo los resultados obtenidos, de aplicarse correctamente la metodología, resultan aceptados y cercanos a la realidad.

Algunos de las técnicas para el aforo en ríos más utilizadas son: el Método Volumétrico, Medidor de Parshall, Método de Vertedores y Orificios, Método Químico así, así como los métodos de sección – Velocidad (Flotador y Molinete).

Estos métodos aún siguen utilizándose con regularidad, sin embargo, con el desarrollo tecnológico, han surgido técnicas innovadoras, como el Perfilador de corrientes acústico (ADCP, por sus siglas en inglés, *Acoustic Doppler Current Profiler*) que facilitan el proceso y presenta mejores resultados durante las campañas de aforo.

3.4.2. ADCP

Se denomina efecto Doppler a la variación en la longitud de onda que se produce cuando las ondas electromagnéticas se reflejan en un objeto en movimiento. Esta variación es proporcional a la velocidad del objeto. Si se denominará f_1 a la frecuencia de la onda emitida, al reflejarse en una partícula con movimiento de velocidad v y de sentido contrario al avance de la onda, la frecuencia reflejada f_2 tendrá el valor $f_2 = f_1 + v/\lambda$, donde λ es la longitud de onda emitida. Por tanto, conocida la longitud de onda λ y la frecuencia emitida f_1 , así como la frecuencia recibida f_2 , se puede conocer la velocidad de una partícula (ecuación 3.1) (Martínez Alvarez *et al.*, 2004).

$$v = (f_2 - f_1)\lambda \quad 3.1$$

Por tanto, si se instala un emisor-receptor de ondas de alta frecuencia, en una corriente, se puede relacionar el efecto Doppler producido en las ondas reflejadas por las partículas en suspensión con la velocidad del flujo en la sección (Figura 3.24).

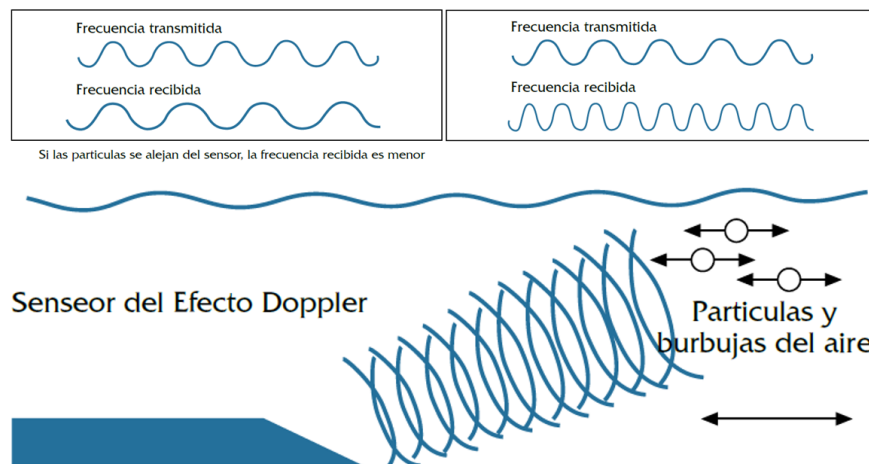


Figura 3.24. Relación efecto doppler-velocidad.

Fuente: (Martínez Alvarez *et al.*, 2004).

Por su parte, el ADCP, un perfilador acústico de efecto Doppler, es un Instrumento de medición de caudal que, implementa el principio del efecto Doppler para medir la velocidad del agua (ecuación 3.2). El perfilador acústico, emite pulsos de sonido llamados zumbidos (*pings*) que al encontrarse con las partículas transportadas por el fluido, se dispersan ondas de sonido de retorno, con una frecuencia diferente a la emitida, resultando que la velocidad del flujo es proporcional a la variación de frecuencia, según la siguiente relación (ecuación 3.2) (RD Instruments, 2008).

$$F_{doppler} = -2F_{fuente} \frac{V}{c} \quad 3.2$$

Donde:

- V , es la velocidad relativa entre la fuente y el receptor;
- $F_{doppler}$ y F_{Fuente} , es la frecuencia recibida y transmitida respectivamente;
- c , es la velocidad del sonido.

3.4.2.1. RiverRay ADCP

Para el monitoreo de caudales en el Río Gallinas, se utilizó el equipo *RiverRay ADCP* (Figura 3.25), desarrollado por la compañía *Teledyne RD Instruments*, el cual, para el aforo de caudales es montado sobre un *Hydroboard*, que permite la flotabilidad del equipo, para posteriormente vincularse de manera alámbrica o por bluetooth a una laptop y un GPS (Figura 3.26.), en el Anexo V, se observan las especificaciones técnicas del equipo.



Figura 3.25. Equipo ADCP y GPS.



Figura 3.26. Hydroboard, ADCP, GPS, lancha y caja con baterías y conexiones.

3.4.3. Metodología implementada

Para lograr una homogeneidad en los aforos, es necesario establecer una metodología y replicarla en los distintos puntos donde se realizará el aforo. Donde, a partir del desarrollo de las actividades de manera ordenada, secuencial y efectiva, se optimizan los procesos y disminuye el error durante el monitoreo de caudales.

3.4.3.1. Selección de la sección de aforo

El primer paso, consiste en identificar la sección donde será monitoreado el caudal. Se recomienda que la sección establecida para el aforo permanezca perpendicular al flujo del cauce, debido que esto disminuye el error de los valores registrados tales como la profundidad, extensión y área de la sección, así como la estimación de la velocidad y nivel del agua, logrando estimar el gasto en dicha sección.

La sección transversal debe establecerse sobre el cauce, cumpliendo preferentemente la mayoría o todos los requerimientos propuestos por Organización Meteorológica Mundial, mencionados a continuación: (OMM, 2011)

- Las velocidades en todos los puntos serán paralelas entre sí y normales a la sección transversal de la corriente;
- Las curvas de distribución de velocidades en la sección deben ser regulares en los planos vertical y horizontal;
- Las velocidades permanecen entre los rangos de 0.1 m/s y 2.5 m/s;
- La profundidad de flujo será superior a 0,3 m;

- Presenta una sección homogénea aguas arriba y aguas abajo del punto de aforo;
- La sección de control se ubicará donde el flujo de agua sea calmado y con la menor turbulencia posible.

3.4.3.2. Actividades previas

Durante las campañas de medición, es necesario realizar una serie de actividades previo al aforo, destacando el ensamble del Hydroboard, la conexión y calibración del equipo ADCP, así como el armado de la lancha en caso de ser necesaria.

3.4.3.3. Conectividades PC – Perfilador de Corrientes

Ensamblados el equipo ADCP y GPS al Hydroboard, se procede a conectar ambos dispositivos a una batería de motocicleta, para poder encender los equipos y posteriormente, vincularlos por medio del dispositivo de *bluetooth* a la laptop. A partir de esto, se podrá caracterizar, calibrar y monitorear el levantamiento del perfilador de corrientes en tiempo real con la laptop.

Al encender el dispositivo ADCP, este emite un led de color verde con la posibilidad de cambia a color azul al vincularse a la laptop, además de parpadear en el momento en que se activa el sensor y emite ondas de sonido.

3.4.3.4. Configuración Winriver

Al vincular el equipo ADCP y el GPS con el equipo portátil, se ejecuta el software *WinRiver II*, desarrollado por la empresa *Teledyne RD Instruments*. Para concluir con la conexión de los equipos dentro del software, iniciamos con la configuración de los puertos periféricos externos (equipo ADCP) abriendo la pestaña de *configurar* → *periféricos* (Figura 3.27), estableciendo la conexión y la velocidad de baudios para la transferencia de datos. En la laptop se instauró por defecto la velocidad de 115,200 baudios, pero esta podría variar dependiendo de las características de cada equipo.

En caso de no conocer la frecuencia emitida por la laptop, el procedimiento a seguir consiste en ir intercambiando la velocidad de baudios y verificar el funcionamiento del equipo, mediante la opción de *probar puerto*, el cual, al momento de darle clic emergerá una pestaña, arrojando con la palabra *CBREAK* (Figura 3.28) y comenzando a emitir la señal de pingeo (pulso acústico de frecuencia conocida), en caso de no

iniciar con CBREAK, será necesario modificar la velocidad de baudios y probar el puerto, repitiendo el proceso hasta que se realice de manera correcta.

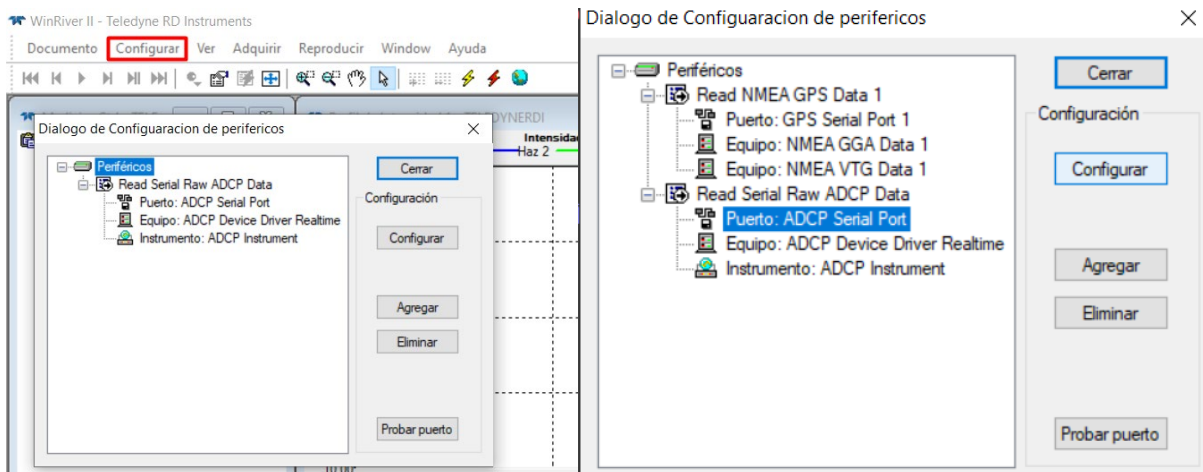


Figura 3.27. Configuración de periféricos ADCP y GPS.

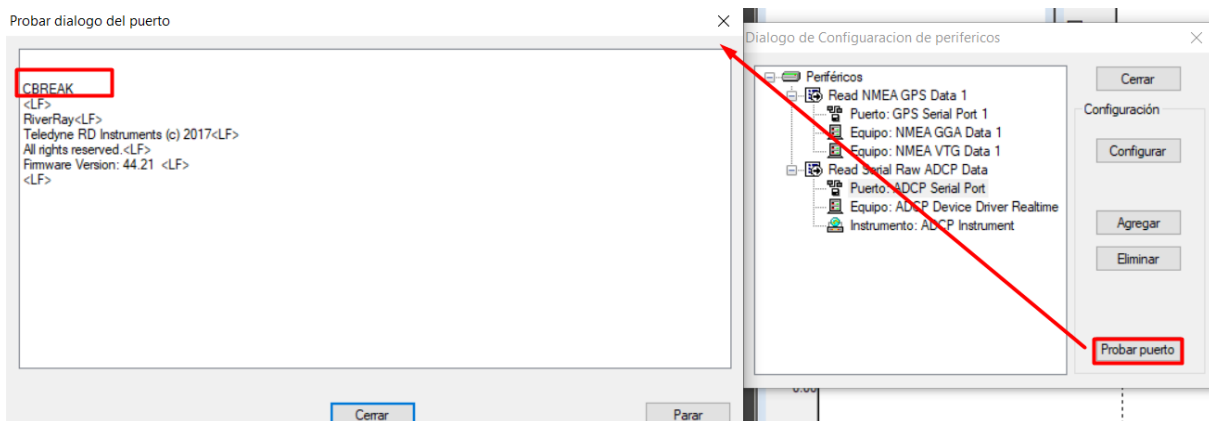


Figura 3.28. Configuración de equipo ADCP ajustando frecuencia de Baudios.



Figura 3.29. Laptop con WinRiver conectada al receptor de Bluetooth.

Al vincular los dispositivos vía bluetooth, se procede a configurar las características de la campaña de medición, siendo particularmente para el caso de estudio, el aforo de caudales mediante la configuración de perfilador de corrientes.

Por lo que se procede mediante una ventana de dialogo, configurar las características del modelo del dispositivo implementado, si se utilizará un GPS externo, así como las posibles velocidades, anchura y profundidad, máximas y mínimas esperadas en el cauce (Figura 3.30).

Figura 3.30. Requerimientos del diálogo de configuración.

3.4.3.4.1. Calibración de equipo

Posteriormente se realiza la calibración del compás del equipo, siendo necesario mantener la conexión del equipo y ejecutar el software WinRiver II, donde se abre la pestaña, *adquirir* → *Ejecutar calibración del compás*, para la calibración del equipo ADCP (Figura 3.32).

En la calibración se realizan dos tipos de movimientos, simulando el movimiento del agua. El primero de ellos consiste en rotar sobre su propio eje el dispositivo ADCP,

desde los 0° hasta los 360° , y al segundo movimiento se le agrega a la rotación una inclinación vertical (Figura 3.31). Durante la calibración, se muestra una ventana con recuadros de color rojo (Figura 3.32), donde conforme se realizan los movimientos de calibración los recuadros cambian a color, naranja, amarillo, verde y verde intenso, siendo el verde intenso lo óptimo.

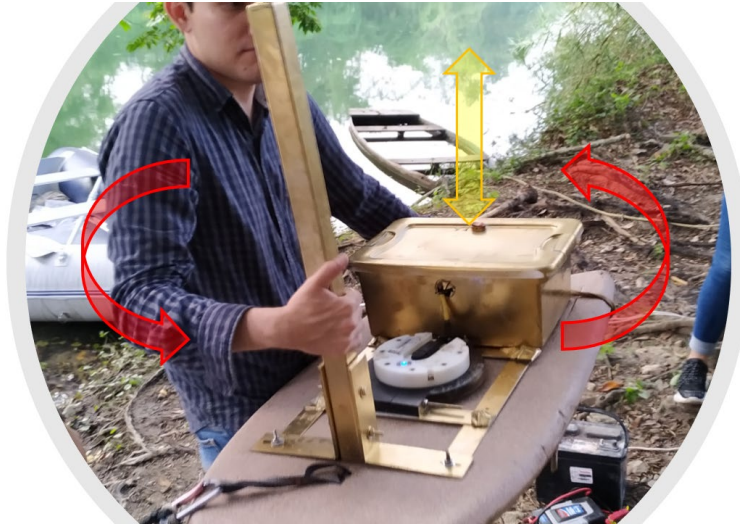


Figura 3.31. Calibración realizada previo al aforo de caudales.

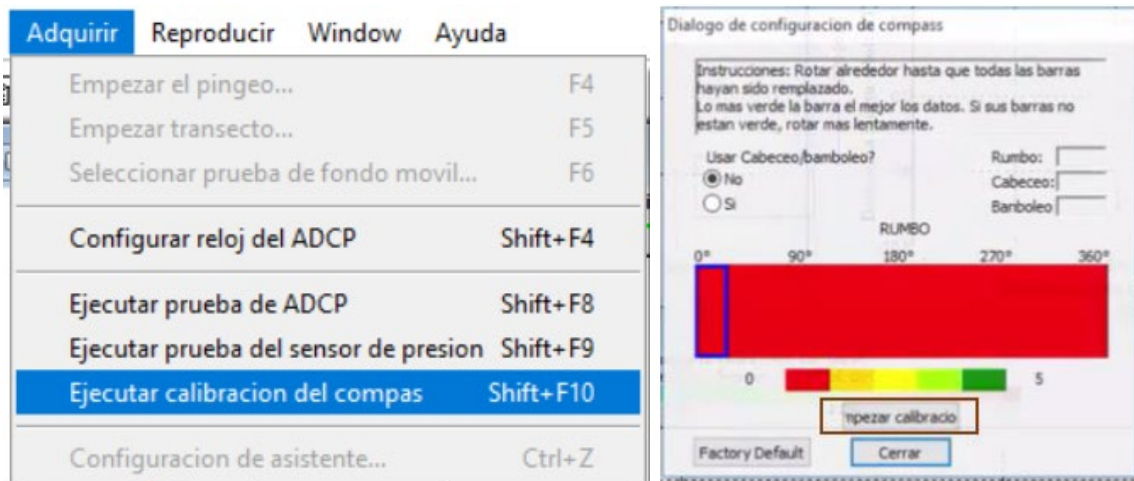


Figura 3.32. Calibración del compás, imagen de Winriver II

3.4.3.4.2. Monitoreo de caudales

Al calibrar el equipo, es posible iniciar con el monitoreo de caudales, introduciendo al *Hydroboard* con el equipo ADCP en el cauce, usando las primeras mediciones para ver el comportamiento del aforo (Figura 3.33). Es recomendable, ir analizando los resultados arrojados en tiempo real (Figura 3.34), de ahí la importancia de poder contar con una lancha, que permita trasladar todo el equipo.



Figura 3.33. Aforo de caudales en el Río Gallinas.

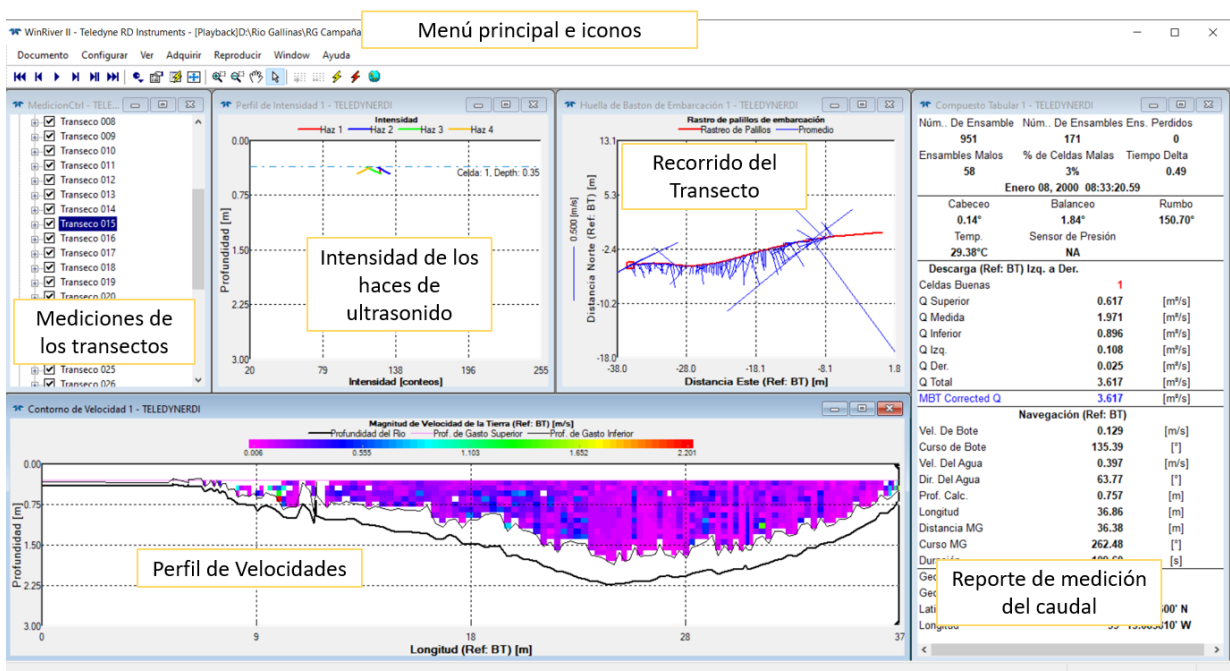


Figura 3.34. Reporte del perfilador de corrientes.

Para lograr una medición óptima se recomienda trasladar el Hydroboard a una velocidad inferior a la del flujo del agua, además de repetir el proceso para una misma sección y tiempo, diversas ocasiones. Posterior a la campaña, es posible exportar los valores registrados durante la campaña de medición en un archivo Excel, logrando compilar y procesar la información generada.

Capítulo 4. Modelos numéricos de flujo a superficie libre

4. Modelos numéricos de flujo a superficie libre

La modelación hidrodinámica de ríos es una herramienta fundamental en el estudio del comportamiento hidráulico, ante distintos escenarios. Actualmente, con el empleo de estudios hidrológicos y la modelación hidrodinámica, en diferentes dimensiones espaciales (1D, 2D y 3D), se pueden manejar escenarios, que ayudan a la prevención de catástrofes (inundaciones y sequías), y la toma de decisiones ingenieriles.

En una modelación unidimensional, habitualmente se considera al afluente de forma lineal, con una serie de puntos de cálculo, que son las secciones transversales, de manera que la geometría del cauce es una propiedad de cada punto de cálculo o sección. Por otro lado, en una modelación bidimensional, el cauce ya no se discretiza como una línea, sino como una malla formada por una serie de celdas poligonales, que representan la topografía del cauce y llanuras de inundación (Ochoa *et al.*, 2016).

La modelación numérica de la hidrodinámica de ríos, precisa del uso de la teoría hidráulica del flujo en lámina libre y de los métodos numéricos para resolver las ecuaciones de conservación. Dado que los modelos numéricos son una representación simplificada de la realidad, un aspecto fundamental de los modelos de flujo en ríos, es la representación adecuada de la topografía del cauce (Ochoa *et al.*, 2016).

4.1. Clasificación de modelos

Los modelos hidrodinámicos unidimensionales, son ampliamente usados en flujos a superficie libre o alcantarillados, estos se basan en leyes de conservación de masa y cantidad de movimiento, para calcular la evolución espacio temporal del flujo de agua. Las ecuaciones diferenciales parciales son resueltas mediante la discretización numérica, usando frecuentemente el método de diferencias finitas y, en algunos casos mediante elementos o volúmenes finitos (Timbe Castro & Willems, 2011).

Por otra parte, en los modelos bidimensionales y tridimensionales, las ecuaciones de las leyes de conservación de masa, momento y termodinámicas, son expresadas en sus dimensiones correspondientes, y los resultados se calculan en cada punto de un mallado en el dominio de solución, estos modelos pueden resolverse usando el método de elementos, diferenciar y volumen finitos (Timbe Castro & Willems, 2011).

4.1.1. Modelos unidimensionales

Para la modelación unidimensional, se implementan las ecuaciones que modelan los cambios de caudal y de nivel de un líquido, a lo largo de un espacio unidimensional, y el tiempo de manera no permanente, como en flujo de agua en un canal o tubería a superficie libre (Chow *et al.*, 1994).

En estos, las ecuaciones gobernantes son usadas para analizar situaciones de flujo típico como: la ecuación de continuidad y momento, o la ecuación de la energía. Sin embargo, la ecuación de momento se usa si el flujo tiene discontinuidades, ya que, a diferencia de la ecuación de energía, no es necesario conocer la cantidad de pérdidas en las discontinuidades (Chaudhry, 2008). Algunos modelos unidimensionales comúnmente usados se mencionan a continuación.

DYRESM. Este es un modelo para la hidrodinámica de embalses, desarrollado por el *Center for Water Research*, en Australia. El modelo unidimensional, de la dirección vertical (profundidad), proyecta los perfiles de valores de variables en la columna de agua, asumiendo uniformidad en las otras dos dimensiones. Fue desarrollado para predecir la distribución vertical de las variables de temperatura, salinidad y densidad en lagos y embalses que satisfacen la aproximación unidimensional (Arbat *et al.*, 2009).

HEC – RAS. Sistema compuesto de un interfaz gráfico de usuario (*Graphical User Interfaz – GUI*) desarrollado por el *US Army Corps of Engineer*, cuenta con componentes de análisis separados, datos de almacenamiento y capacidades de gestión, facilidad en reportes gráficos y tablas. Hec – Ras contiene cuatro componentes de análisis de canales naturales y construidos (US Army Corps of Engineers, 2016).

1. Cálculos del perfil de la superficie de agua en flujo constante;
2. Simulación de flujo inestable unidimensional y bidimensional;
3. Cálculo de transporte de sedimentos de flujo inestable o casi inestable; y
4. Análisis de calidad de agua.

4.1.2. Modelos bidimensionales

En general, para modelaciones bidimensionales y tridimensionales, existen un mayor número de modelos numéricos, la mayoría con licencias de uso comercial, que

cuentan con un respaldo y validez de sus proveedores. Estos, al contar con licencia, el soporte se encuentra dado por una institución encargada de mantener la versión del software actualizada, libre de fallas y con mejoras constantes, además de ofrecer cursos de capacitación, manuales y soporte en línea para los usuarios. A continuación, son descritos brevemente algunos de los modelos más destacados del mercado.

MIKE DHI. Es un modelo europeo desarrollado por el DHI (*Danish Hydraulic Institute*) en Dinamarca. Los modelos denominados *MIKE 21* y *MIKE 3*, para 2D y 3D respectivamente, representan posiblemente, la alternativa comercial más difundida en la consultoría internacional. La herramienta MIKE, contiene software diseñado exclusivamente para el estudio del agua, siendo *MIKE 21*, una herramienta de simulación útil para modelar flujos de superficie libre 3D y procesos asociados de calidad y sedimento en el agua; mientras que *MIKE 3*, es herramienta que suple necesidades específicas, de las cuales se encuentran: el módulo de hidrodinámica, transporte de sedimentos; y *ECOLAB* (MIKE by DHI, 2015; MIKE By DHI, 2014).

DELFT 3D. Al igual que el anterior, este es un modelo europeo desarrollado por el instituto independiente DELTARES de Holanda. Representa una de las plataformas más utilizada por la consultoría internacional, contando con cientos de estudios alrededor del mundo. *DELFT* puede simular tormentas ciclónicas, huracanes, tsunamis, flujos detallados y niveles de agua, olas, transporte y morfología de sedimentos y calidad del agua, siendo capaz de manejar las interacciones entre estos procesos. El programa está diseñado para ser utilizada tanto por expertos en el dominio como por no expertos, que pueden variar desde consultores e ingenieros o contratistas, hasta reguladores y funcionarios gubernamentales (Deltares, 2021).

CH3D-ICM. Es un modelo tridimensional de diferencias finitas, resultado del enlace del modelo hidrodinámico *CH3D* y el modelo de calidad de agua, *CE-QUAL-ICM*. Este modelo puede ser utilizado para la predicción de la respuesta del nivel de agua, velocidad de flujo, salinidad y temperatura, además del campo de velocidades en tres dimensiones en los sistemas acuáticos. El modelo *CH3D*, realiza los cálculos hidrodinámicos sobre una malla curvilínea de contornos ajustados, permitiendo, la modelación de canales profundos de navegación o de líneas de costa irregulares (Sámano Celorio, 2011).

Por su parte el modelo *ICM*, es un modelo de calidad de agua no estructurado de volumen finito que, puede ser aplicado a la mayoría de las masas de agua en una, dos o tres dimensiones, ligándolo a cualquier modelo hidrodinámico. Este modelo predice las variaciones de la concentración de los constituyentes de calidad del agua con respecto al tiempo e incluye transporte advectivo – dispersivo (Sámano Celorio, 2011).

EFDC. El *EFDC* (*Environmental Fluid Dynamics Code*) es un modelo tridimensional desarrollado a fines de los 80, para estudios de calidad de aguas en zonas costeras y estuarios, además internamente incluye un modelo de calidad, denominado *HEM3D*. *EFDC* es el modelo hidrodinámico 3D adoptado y recomendado por la EPA (*U.S. Environmental Protection Agency*), para los estudios de calidad de aguas.

Desde sus inicios, el modelo *EFDC* ha sido mejorado sistemáticamente. El cual, enlaza un modelo hidrodinámico de diferencias finitas y un modelo de calidad de agua. Cabe resaltar que el *EFDC*, es capaz de resolver las ecuaciones que describen el transporte de sedimentos suspendidos, de contaminantes tóxicos y de variables de calidad de agua (Sámano Celorio, 2011). *Dynamics Solutions*, es la empresa que tiene la tarea de actualizar, difundir, capacitar y generar herramientas de libre acceso para el pre y post proceso.

WASP5. El modelo incluye especificaciones de flujo de sedimentación para contabilizar las pérdidas, así como los aportes desde el sedimento por suspensión. Este modelo, además, presenta un compartimiento (TOXI) de transporte y destino de productos químicos orgánicos y metales para cualquier tipo de sistema acuático. Dicho compartimiento maneja explícitamente muchos de los procesos fisicoquímicos relacionados con estas sustancias, exceptuando aquellos concernientes a procesos de reducción y de precipitación-disolución. Este modelo es capaz de manejar de uno a tres químicos y de uno a tres tipos de material particulado (clases de sólidos) (Sámano Celorio, 2011).

IBER. Es un modelo matemático bidimensional español, implementado para la simulación del flujo a superficie libre y procesos de transporte en ríos y estuarios, desarrollado en colaboración por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA de la Universidad de A Coruña (UDC) y el Instituto FLUMEN, Universidad Politécnica de Catalunya, UPC, y el Centro Internacional de Métodos

Numéricos en Ingeniería, CIMNE, en el marco de un Convenio de Colaboración suscrito entre el CEDEX y la Dirección General del Agua. El modelo Iber, consta de diferentes módulos de cálculo acoplados entre sí. Iber incluye módulos hidrodinámico, de turbulencia, y de transporte de sedimentos, por carga de fondo y por carga en suspensión (Cordova Elera, 2016).

4.1.3. Modelos numéricos implementados

El flujo libre se presenta cuando los líquidos fluyen por la acción de la gravedad, y están parcialmente confinados por un contorno sólido. En la predicción de las variables de flujo para diferentes condiciones, tiene gran importancia el desarrollo de modelos y simulaciones numéricas hidrodinámicas con precisión adecuada, que permiten la correcta planificación de obras. En esta tesis, se ha realizado la modelación hidrodinámica utilizando los softwares EFCD Explorer (2D) y Hec-Ras (1D).

4.2. EFDC Explorer

El modelo EFDC, desarrollado inicialmente en el *Virginia Institute of Marine Science* y posteriormente patrocinado por la *Environmental Protection Agency de Estados Unidos (US EPA)*, tiene la capacidad de analizar la hidrodinámica de forma bidimensional y tridimensional, resolviendo las ecuaciones de movimiento (verticalmente hidrostáticas) y de superficie libre, junto con las ecuaciones de continuidad y de balance de masa, además, presenta módulos acoplados de salinidad, temperatura, sedimentos y transporte de contaminantes (Hamrick, 1992).

Se trata, de un modelo hidrodinámico y de calidad del agua, que puede aplicarse a cualquier cuerpo de agua superficial, incluidos los lagos y los ríos. El EFDC se desarrolló mediante una estructura caracterizada por: a) un modelo construido con celdas de elementos finitos; b) que es posible humedecer y secar en el procesado del contorno; c) que permite el intercambio de calor con la atmósfera, y d) que simula la calidad del agua (Torres-Bejarano *et al.*, 2016).

4.2.1. Ecuaciones implementadas

Las ecuaciones gobernantes de la mecánica de fluidos quedaron formuladas por Claude Navier (1785-1836) y George Stokes (1819 – 1903) cuando introdujeron los

términos de transporte viscoso a las ecuaciones de Euler (1707 – 1783), dando lugar a las ecuaciones de Navier – Stokes (ecuación 4.1) (Fernandez, 2012).

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \Delta u + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \Delta v + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \Delta w - \frac{\rho}{\rho_0} g\end{aligned}\quad 4.1$$

Donde:

- u, v, w , representan las componentes de velocidad en las direcciones x, y, z , respectivamente;
- ρ, ρ_0 , son la densidad y densidad de referencia respectivamente;
- p , es la presión;
- ν , es la viscosidad cinemática;
- t , escala del tiempo; y
- g , la aceleración por acción de la gravedad de la Tierra;
- f_x, f_y, f_z , son los componentes de fuerza por efecto Coriolis por unidad de masa.

4.2.1.1. Primera hipótesis

La aproximación de Boussinesq establece que, si la variación de la densidad es pequeña, la densidad puede ser tomada como constante en todos los términos, excepto en el término gravitacional (Broomans, 2003).

Debido a los remolinos de turbulencia (*Eddy viscosity*), se producen pequeñas variaciones en las velocidades de flujo y la presión. La predicción de flujos turbulentos se basa únicamente en promedios en el tiempo de propiedades turbulentas, debido a que estas varían mucho más en el espacio (Rodríguez, 2003).

Usualmente estas variaciones son muy pequeñas para ser representadas en un esquema numérico, a menos que el mallado sea muy fino. Para lidiar con este fenómeno, primeramente, se descomponen las velocidades y presiones (ecuaciones 4.2).

$$u = \bar{u} + u'; \quad v = \bar{v} + v'; \quad w = \bar{w} + w'; \quad p = \bar{p} + p' \quad 4.2$$

Donde:

- u', v', w', p' , representan la desviación de las velocidades y presión respecto de su valor promediado (fluctuaciones periódicas).
- $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{p}$, son las velocidades y presión horizontal promediadas en el tiempo.

Las ecuaciones anteriores, representan las cantidades promediadas en el tiempo, por ejemplo, $\bar{u}$ se define por la ecuación 4.3.

$$\bar{u}(t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u(t) dt \quad 4.3$$

Sustituyendo las ecuaciones 4.2 en la ecuación 4.1 y promediando las ecuaciones resultantes respecto al tiempo, se obtienen las ecuaciones Navier – Stokes promediadas con Reynolds (RANS) para flujos turbulentos como se muestran en las siguientes ecuaciones.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \bar{f}_x \quad 4.4$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \bar{f}_y \quad 4.5$$

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{w'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{w'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'w'}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} - \bar{f}_z - \frac{\rho}{\rho_0} g \quad 4.6$$

Las correlaciones entre las componentes fluctuantes de velocidad ($\overline{u'v'}, \overline{v'v'}$) son desconocidas. Dichas correlaciones son las responsables de la pérdida de *momentum* en la dirección media del flujo, y por lo tanto aparecen para actuar como esfuerzos en el fluido, conocidos como esfuerzos de Reynolds, que al ser un esfuerzo mayor que los viscosos, e desprecian los esfuerzos viscosos (Laguna Zárate, 2016).

4.2.1.2. Segunda hipótesis

Los esfuerzos de Reynold como los esfuerzos viscosos dependen de la deformación del flujo medio. Por consiguiente, los esfuerzos de Reynolds se representan mediante la ecuación 4.7.

$$\overline{u'v'} = -\nu_t \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \quad 4.7$$

Donde ν_t es la viscosidad turbulenta, creando con esto nuevas incógnitas en las expresiones anteriores.

4.2.1.3. Tercera hipótesis

La tercera hipótesis da origen las *Shallow Water Equations* e indican que la presión es hidrostática en la dirección vertical, admitiendo flujos caracterizados por órdenes de magnitud mayores en la longitud de escala horizontal que de escala vertical.

Con lo cual, es posible despreciar los términos $\frac{\partial \bar{w}}{\partial x}$ y $\frac{\partial \bar{w}}{\partial y}$. La diferencia entre las escalas horizontal y vertical, justifica una distinción entre viscosidades turbulenta horizontal (ν_t^H) y vertical (ν_t^V), sustituyendo la ecuación 4.6 por una distribución en la presión hidrostática.

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} = \rho g \quad 4.8$$

Que al ser integrada resulta:

$$\bar{p}(x, y, z, t) = g \int_z^\zeta \rho \, dz + P_a \quad 4.9$$

Donde:

- $\zeta = \zeta(x, y, z, t)$, es el nivel de la superficie libre en un plano de referencia $z=0$;
- p_a , es la presión atmosférica.

Sustituyendo este resultado en el término de la presión de la ecuación 4.4, y usando la regla de integración de Leibniz se obtiene la ecuación 4.10.

$$-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} - \frac{\rho g}{\rho_0} \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\zeta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz' - \frac{\partial p_a}{\rho_0 \partial x} \quad 4.10$$

En el lado derecho de la ecuación, el gradiente de presión horizontal es descrito por las diferencias de nivel del agua ζ , por medio del término barotrópico en el primer término, el segundo término describe las diferencias de densidad en la dirección horizontal por medio del término baroclínico y el ultimo término describe la continuación de la presión atmosférica. Al considerar ρ un valor constante, el término baroclínico equivale a cero, obteniendo la siguiente expresión.

$$\bar{p} = \rho g(\zeta - z) + P_a \quad 4.11$$

Y para el término de la expresión 4.4 se tiene:

$$-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} \quad 4.12$$

Al omitir el gradiente de presión atmosférica, el gradiente de presión horizontal reducirá el término barotrópico. Sustituyendo las ecuaciones 4.7 y 4.9 en las ecuaciones 4.4 y 4.5, considerando una densidad constante y despreciando el gradiente de presión atmosférica, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + f v + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t^H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[v_t^H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t^v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad 4.13$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - f u + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t^H \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[v_t^H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t^v \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad 4.14$$

Siendo f el parametro de Coriolis definido por la ecuacion 4.15.

$$f = 2\Omega \sin \phi \quad 4.15$$

Donde:

- Ω , es la velocidad angular de la tierra; y ϕ , la altitud.

Al considerar a la ecuación de continuidad en su forma incompresible $\frac{\partial \rho}{\partial x} = 0$, se obtiene la ecuación 4.16.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad 4.16$$

Al sistemas de ecuaciones (4.13, 4.14 y 4.15) se le conoce como *Shallow Water Equations* o ecuaciones de Saint-Venant, las cuales no tienen una solución única, por lo que se realiza una aproximación numérica. Para este fin se integra la ecuacion 4.16 a lo largo del eje vertical, resultando:

$$w(x, y, \zeta, t) - w(x, y, d, t) = - \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial u}{\partial x} dz - \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial v}{\partial y} dz \quad 4.17$$

Donde:

- $d = d(x, y)$, es la profundidad del agua debajo del plano de referencia $z = 0$.

Debido a que los cambios morfológicos del fondo son en general muy pequeños, estos pueden ser despreciados. Quedando rescrita la ecuacion 4.17, usando sustituciones de w en el fondo y en la superficie del agua. Para $z = \zeta(x, y, t)$.

$$w = \frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} \quad 4.18$$

Asi mismo se obtiene para el fondo:

$$w = -u \frac{\partial d}{\partial x} - v \frac{\partial d}{\partial y} \quad 4.19$$

Finalmente, sustituyendo las ecuaciones 4.19 y 4.18 en 4.17, y usando la regla Leibniz se obtiene la siguiente ecuación.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v dz \right) \quad 4.20$$

4.2.2. Procesos para la modelación en EFDC Explorer

La modelación numérica del Río Gallinas, permite conocer la respuesta hidráulica del cauce ante los distintos escenarios hidrometeorológicos que se pudieran presentar. Siendo necesario definir el tramo de estudio de interés, las condiciones iniciales y de frontera, así como los escenarios climatológicos por modelar. El tramo de estudio queda definido con anticipación, debido a que esté influye en procesos previos al modelo numérico, como las campañas de medición topo-batimétrica, así como para el aforo de caudales.

4.2.2.1. Interfaz del EFDC Explorer

La interfaz del software EFDC Explorer es un sistema compuesto de un interfaz gráfico de usuario (*Graphical User Interfaz – GUI*), para el procesamiento previo y posterior del código de dinámica de fluidos ambientales (*EFDC*).

Dentro del software *EFDC Explorer* destacan cinco módulos, donde se introducen las condiciones del Río Gallinas, para poder modelar el comportamiento del cauce, donde resaltan inicialmente la descripción, el dominio, los módulos implementados, los tiempos, así como las características hidrodinámicas (Figura 4.1).

4.2.2.2. Descripción del modelo

Como su nombre lo indica, en la primera pestaña se describe de manera general al modelo numérico donde, comúnmente se coloca el nombre del proyecto y el escenario a modelar, así mismo, esta pestaña presenta los módulos del modelo activados.

4.2.2.3. Dominio

En el software *EFDC Explorer*, en la pestaña de *Domain* (Dominio), se observan 4 subpestañas: *Grid*, *Initial Conditions & Bottom Roughness*, *Boundary Conditions* y *MHK*

Devices. Iniciando la configuración de las características del tramo a modelar, siendo necesario agregar la malla, las condiciones iniciales y de rugosidad, así como las condiciones de frontera (Figura 4.3).

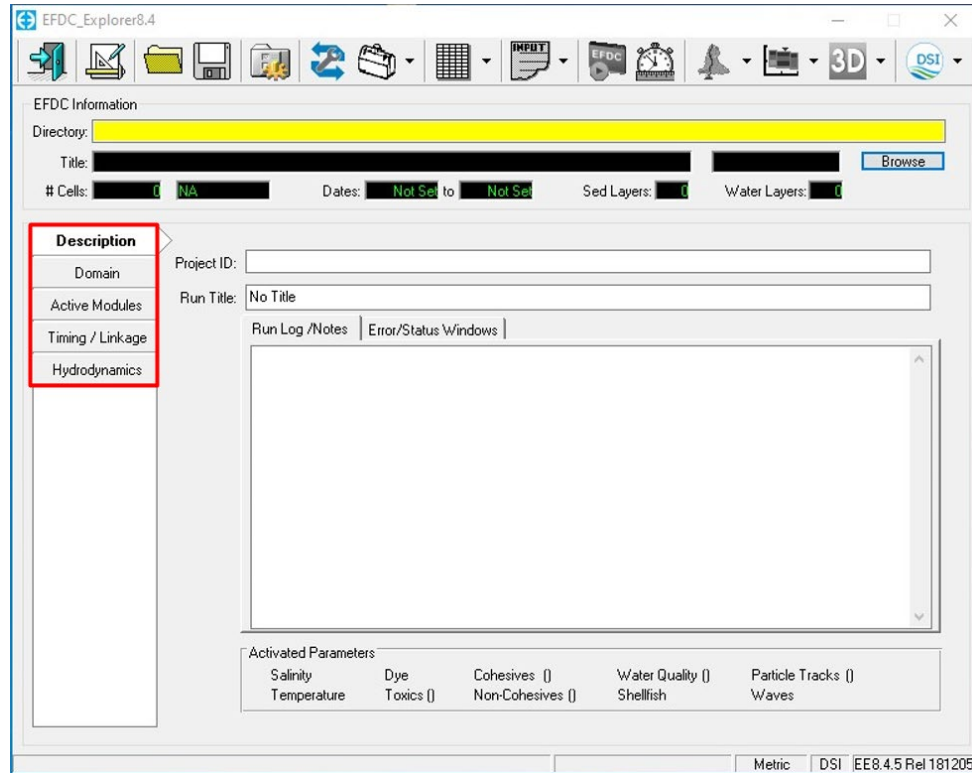


Figura 4.1. Interfaz del EFDC Explorer.

4.2.2.3.1. Malla

Para el modelo del Río Gallinas, se crearon varias mallas curvilíneas sobre el tramo de estudio, iniciando en la localidad *El Carpintero* y concluyendo aguas abajo en la *cascada de Tamul*. Las mallas curvilíneas, fueron creadas con el software *CVL Grid*, un software secundario del *EFCD Explorer*, donde se varió principalmente en el tamaño de la malla.

Se realizaron mallas de distintos tamaños: 2x2 metros, 2.5x5 metros, 3x7 metros y 5x10 metros. El tamaño final de la malla quedó definido durante el análisis de sensibilidad del modelo, donde con las primeras modelaciones, se busca optimizar el tiempo de modelación y el detalle de los resultandos, siendo las dimensiones de la malla seleccionada de 3.5x5 metros al centro del cauce y 7x5 metros en las zonas aledañas.



Figura 4.2. Imagen de malla de 3.5x5 metros al centro combinada con 7x5 metros.

4.2.2.3.2. Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales, están determinadas principalmente con los resultados de las campañas de medición, donde se introduce la topo-batimetría del cauce a partir del MDT, mediante las coordenadas XYZ exportadas en un archivo de texto, para posteriormente importar y asociar la elevación, a cada celda de la malla en el *EFDC Explorer*, configurando así, el relieve del río. Además, se agrega un tirante inicial de agua y una rugosidad de 0.04, que se ajusta a la geomorfología del Río (Figura 4.3).

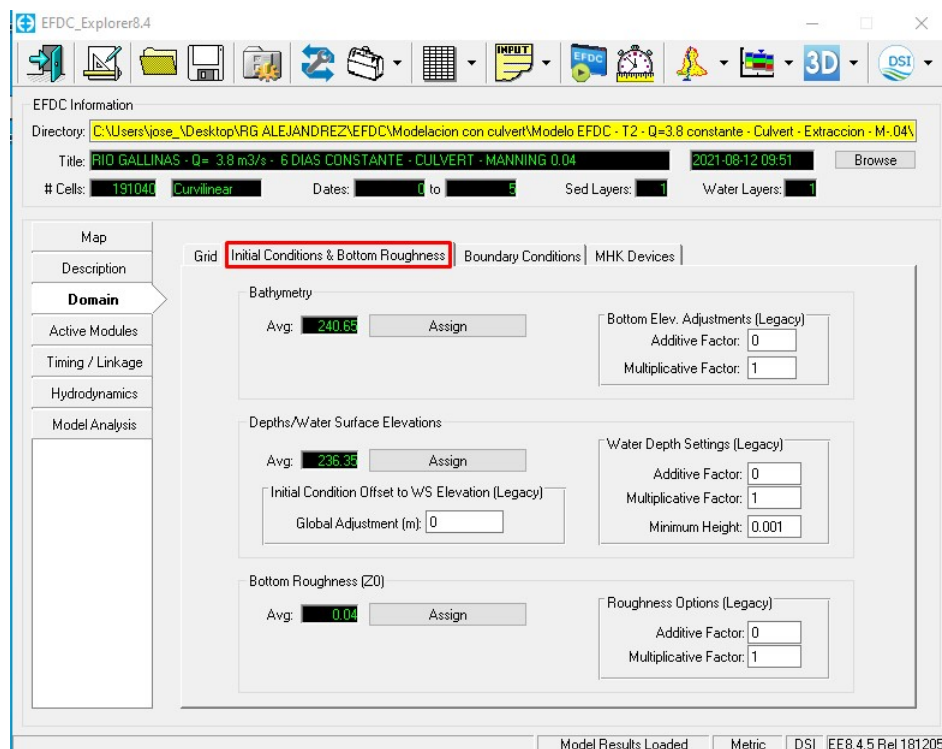


Figura 4.3. Condiciones iniciales del modelo.

4.2.2.3.3. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera (*Boundary Conditions*) están determinadas por el gasto de entrada, las salidas, e infraestructura que se encuentra sobre el área del modelo numérico (Figura 4.4).

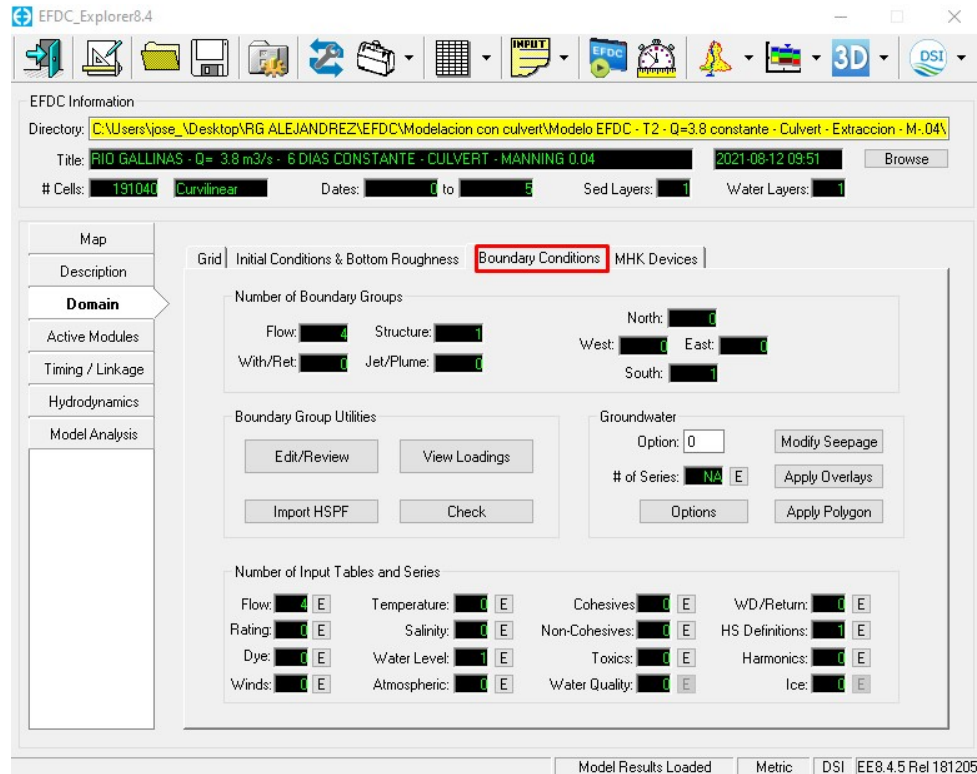


Figura 4.4. Pestaña para insertar las condiciones de frontera.

El valor de entrada varía según el escenario que se pretenda modelar y consiste en un hidrograma del caudal de entrada, establecido para los distintos escenarios hidrometeorológicos. Al no contar con incorporaciones de cauces, únicamente se cuenta con una entrada al inicio del modelo (Figura 4.5), en el puente *El Carpintero*.

Por su parte, en el modelo numérico del Río Gallinas se establecieron cuatro salidas de agua, la primera de ellas se encuentra aguas abajo, en la cascada de Tamul, espacio donde finaliza el modelo. Las otras tres salidas se encuentran distribuidas en el tramo de modelo, en las zonas donde se identificaron infiltraciones de agua (Tabla 4.1). Los valores de infiltración fueron proporcionados por Robles (2019) durante las campañas de aforo al tramo de estudio.

Finalmente, a 800 metros de la cascada de Tamul, existe un pequeño puente sobre el Río Gallinas, representado mediante la función *Culvert*, agregando las dimensiones

del puente, logrando analizar la capacidad hidráulica de la sección y el comportamiento del cauce.

Tabla 4.1. Valores de las condiciones del flujo – condiciones de frontera.

Condición	flujo (m ³ /s)
Entrada 1	Varía según escenario
infiltración 1	1.7 m ³ /s
infiltración 2	0.9 m ³ /s
infiltración 3	0.5 m ³ /s
Salida 1	Variable

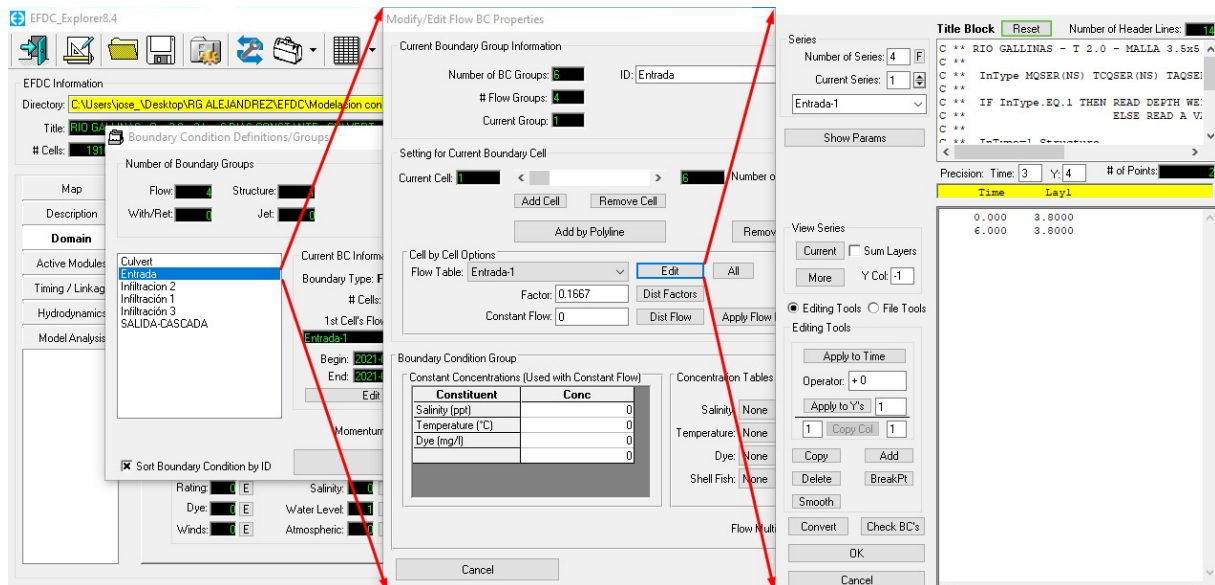


Figura 4.5. Ejemplo de condición de frontera – condición de flujo de entrada.

4.2.2.4. Timing / Linkage

En la pestaña *Timing / Linkage*, se asignan los valores del tiempo para las corridas del modelo, que varían según el escenario a modelar (Figura 4.6). En esta sección es posible establecer la fecha de inicio del modelo, los periodos y la duración de cada periodo (24 horas), entre otras opciones para el cálculo de la modelación.

Una de las principales características y ventajas presentes en el EFDC Explorer, es la opción del tiempo dinámico (*Dynamic Time Step*), que permite que el software optimice (aumente o decremente), el paso del tiempo según considere adecuado, reduciendo así los tiempos del cálculo.

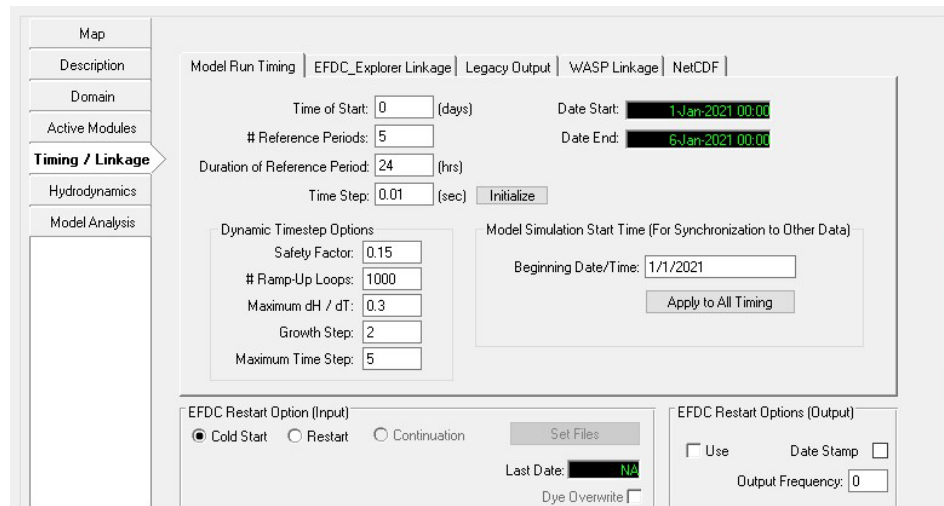


Figura 4.6. Pestaña para insertar el Timing / Linkage.

4.2.2.5. Hidrodinámica

En la pestaña *Hydrodynamics*, el software permite acceder a las configuraciones de turbulencia, mojado y celdas secas, así como la incorporación del efecto de la vegetación en el modelo numérico (Figura 4.7).

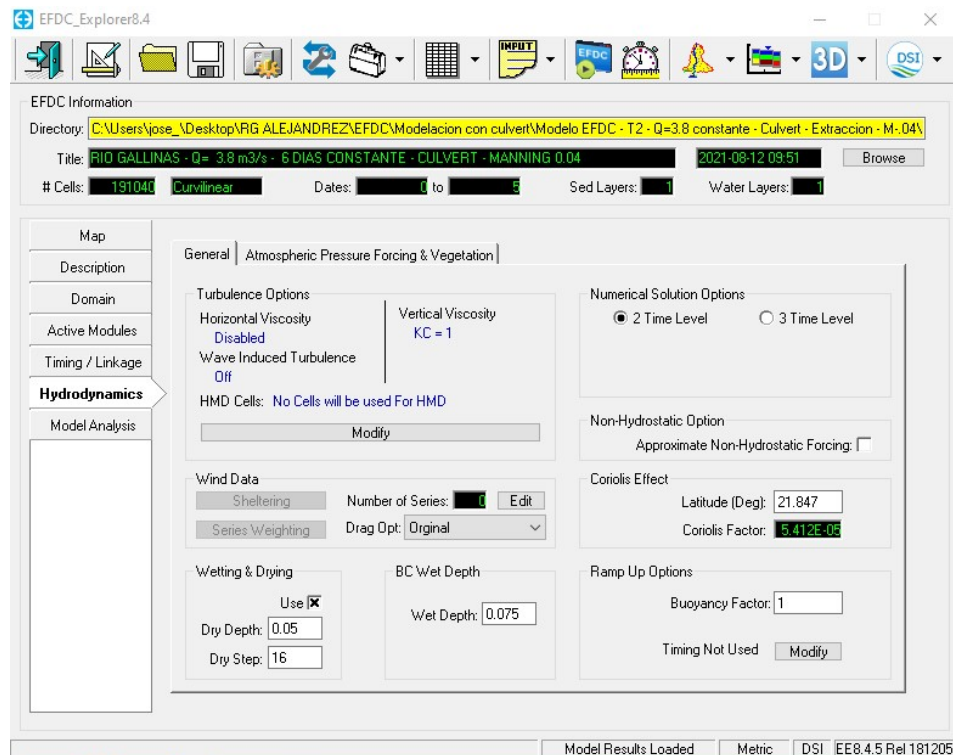


Figura 4.7. Pestaña de Hydrodynamics.

4.2.3. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad consiste en realizar diversas modelaciones, para rectificar que el comportamiento del modelo hidrodinámico sea apropiado, y represente adecuadamente el comportamiento hidráulico del Río Gallinas (Figura 4.8), es decir que el agua fluya dentro de la sección del río.

Durante dicho análisis, se pretende optimizar los tiempos de la modelación, apoyados de la configuración del *mallado* y del *timing*, logrando determinar el desempeño de los diversos escenarios, con las distintas condiciones introducidas. Mediante el análisis de sensibilidad, quedan establecidas las condiciones como: malla, relieve, condiciones iniciales y de frontera, que mejor interpretan el comportamiento hidrodinámico del cauce de forma óptima.

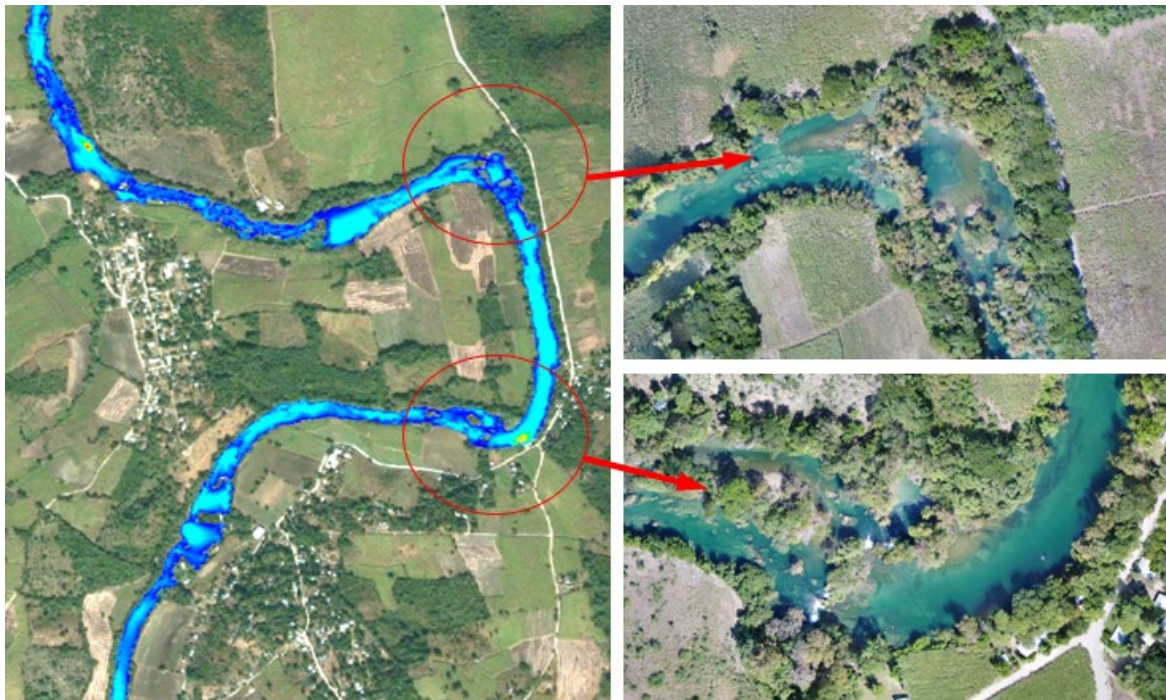


Figura 4.8. Comparación de resultados del modelo numérico e imágenes VANT.

4.2.4. Calibración y validación del EFDC

Concluido el análisis de sensibilidad, inicia el proceso de calibración y validación del modelo numérico, recurriendo al registro de escenarios existentes, introduciendo las condiciones de frontera registradas (entrada) y analizando que la respuesta del modelo numérico sea adecuada estadísticamente, conforme a los registros adquiridos

durante las campañas de medición, comparando las variables hidráulicas (velocidad o gasto), en uno o más puntos de control (Figura 4.9).

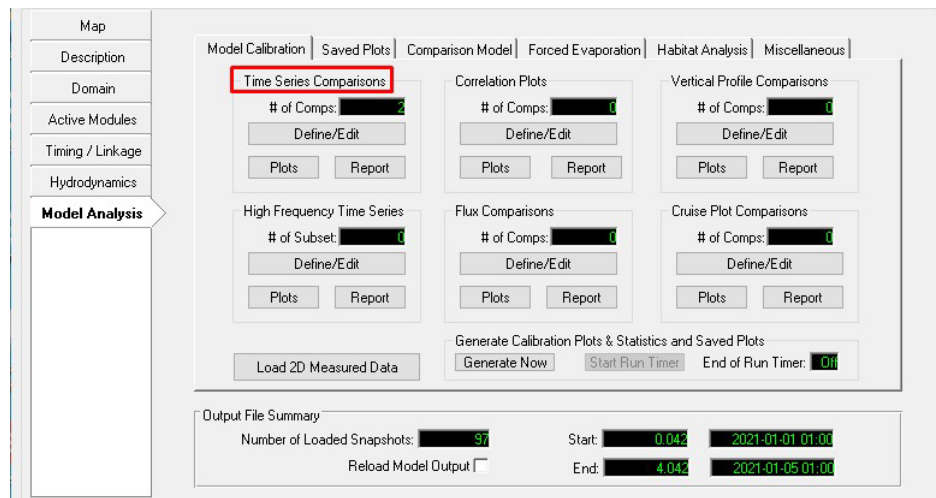


Figura 4.9. Calibración y validación del modelo.

La calibración del modelo se realizó con los registros del aforo de caudales y velocidades, obtenidos de la campaña de medición realizada en junio del 2020, mientras que el escenario para la validación se realiza con los valores registrados en la campaña de medición de marzo del 2017, recuperada de Robles (2019).

Los resultados de la calibración y validación se aprecian en el capítulo 6 de esta tesis, donde se analizan los distintos escenarios de la modelación hidrodinámica del Río Gallinas.

4.3. Hec – Ras

El sistema de Hec – Ras desarrollado por el *Hydrologic Engineering Center* del *US Army Corps of Engineers*, contiene diversas características de diseño hidráulico, basadas en el cálculo de secciones transversales, obtenidos del relieve. Hec-Ras admite perfiles de superficie de agua de flujo constante e inestable; calculando la hidrodinámica combinada unidimensional y bidimensional, transporte de sedimentos, análisis de la temperatura del agua y análisis de la calidad del agua, brindando además el mapeo espacial de muchos parámetros calculados, como son: profundidad, elevación de la superficie del agua, velocidad, etc. (US Army Corps of Engineers, 2021).

Hec – Ras está diseñado para realizar funciones unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) o combinadas y cálculos hidráulicos 2D para una red completa de canales naturales y construidos.

Si bien, Hec – Ras cuenta con diversas capacidades hidráulica, como el transporte de sedimentos y la calidad del agua, nos concentraremos en el análisis unidimensional de la hidrodinámica del flujo a superficie libre.

4.3.1. Ecuaciones implementadas

Para la solución de un flujo inestable unidimensional en el software Hec – Ras se implementan las leyes físicas que gobiernan el flujo de agua en un arroyo que son: el principio de conservación de la masa (continuidad), y el principio de conservación del momento. Conocidas comúnmente como ecuaciones de continuidad y de momento (US Army Corps of Engineers, 2021).

4.3.1.1. Ecuación de continuidad

La conservación de la masa para un volumen establece que la tasa neta de flujo en el volumen sea igual a la tasa de cambio de almacenamiento dentro del volumen.

La tasa de entrada al control el volumen puede escribirse como:

$$Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad 4.21$$

Por su parte la tasa de salida se queda expresada como:

$$Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad 4.22$$

Y la tasa de cambio en el almacenamiento se expresa:

$$\frac{\partial A}{\partial t} \Delta x \quad 4.23$$

Asumiendo que Δx representa un valor pequeño, el cambio de masa en el volumen de control queda expresado en la ecuación 4.24.

$$\rho \frac{\partial A}{\partial t} \Delta x = \rho \left[\left(Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) - \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) + Q_i \right] \quad 4.24$$

Donde:

- Q_i , es el flujo lateral que ingresa al volumen de control; y

- ρ , es la densidad del fluido.

Simplificando la ecuación y al dividir entre los campos $\rho\Delta x$, la ecuación de continuidad queda expresada en la ecuación 4.25.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_i \quad 4.25$$

4.3.1.2. Ecuación de *momentum*

La conservación de la cantidad de movimiento queda expresada mediante la segunda ley de Newton (ecuación 4.26).

$$\sum F_x = \frac{d\vec{M}}{dt} \quad 4.26$$

La conservación del *momentum* para un volumen de control establece que, la tasa neta de impulso que entra en el volumen (flujo de momento), más la suma de todas las fuerzas externas que actúan sobre el volumen, es igual a la tasa de acumulación de impulso. Esta es una ecuación vectorial aplicada en la dirección X.

El flujo de momento (MV), es la masa del fluido multiplicada por el vector de velocidad en la dirección del flujo, para lo cual son consideradas tres fuerzas: presión, gravedad y resistencia o fuerza de fricción.

4.3.1.2.1. Fuerzas de presión

Se asume que la distribución de presión es hidrostática, variando la presión linealmente con la profundidad, y la fuerza de presión total es la integral del producto del área de presión sobre la sección transversal (ecuación 4.27).

$$F_p = \int_0^h \rho g(h - y)T(y)dy \quad 4.27$$

Siendo:

- h , es la profundidad;
- y , la distancia por encima del canal; y
- T , queda en función del ancho de la sección transversal.

Si F_p es la fuerza de presión en la dirección X en el punto medio del volumen de control, la fuerza en el extremo aguas arriba del volumen de control puede escribirse:

$$F_p - \frac{\partial F_p}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad 4.28$$

Mientras que aguas abajo queda expresado como:

$$F_p + \frac{\partial F_p}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad \mathbf{4.29}$$

Por lo tanto, la suma de las fuerzas de presión para el volumen de control puede expresarse como:

$$F_{pn} = \left| F_p - \frac{\partial F_p}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right| - \left| F_p + \frac{\partial F_p}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right| + F_B \quad \mathbf{4.30}$$

Donde:

- F_{pn} , es la fuerza de presión neta para el volumen de control; y
- F_B , es la fuerza de presión ejercida en la dirección x.

Simplificando la expresión anterior queda:

$$F_{pn} = \frac{\partial F_p}{\partial x} \Delta x + F_B \quad \mathbf{4.31}$$

La cual, al integrar la ecuación de la presión transversal (ecuación 4.27) con la regla de Leibniz para posteriormente sustituir en la ecuación 4.31, resulta:

$$F_{pn} = -\rho g \Delta x \left[\frac{\partial h}{\partial x} \int_0^h T(y) dy + \int_0^h (h - y) \frac{\partial T(y)}{\partial x} dy \right] + F_B \quad \mathbf{4.32}$$

Donde la primera integral de la ecuación 4.27, representa al área de la sección transversal, y la segunda multiplicada por $-\rho g \Delta x$, representa a la fuerza de presión ejercida por el fluido, que es igual (en dirección opuesta) a la fuerza de presión F_B , por lo tanto:

$$F_{pn} = -\rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x \quad \mathbf{4.33}$$

4.3.1.2.2. Fuerza gravitacional

La fuerza debida a la gravedad sobre el fluido en el volumen de control en la dirección X es:

$$F_g = \rho g A \sin \theta \Delta x \quad \mathbf{4.34}$$

Donde:

- θ , es el ángulo que forma el canal invertido con la horizontal; y

4.3.1.2.3. Fuerzas de fricción (arrastre)

Las fuerzas entre el canal y el fluido quedan expresadas en la ecuación 4.35.

$$F_f = -\tau_0 P \Delta x \quad 4.35$$

Donde:

- τ_0 , es el esfuerzo cortante promedio que actúa sobre los límites del fluido; y
- P , es el perímetro húmedo.

El signo negativo indica que, con el flujo en la dirección x positiva, la fuerza actúa en la dirección x negativa. Donde a partir del análisis dimensional, τ_0 puede ser expresado en términos de un coeficiente de arrastre, C_D , como:

$$\tau_0 = \rho C_D V^2 \quad 4.36$$

Al relacionar el coeficiente de fricción con el coeficiente de Chezy, queda:

$$C_D = \frac{g}{C^2} \quad 4.37$$

A lo que la ecuación de Chezy se puede expresar de la siguiente manera.

$$V = C \sqrt{RS_f} \quad 4.38$$

Al sustituir las ecuaciones 4.36 – 4.38 en la ecuación 4.35, la fuerza de fricción queda expresada como:

$$F_f = -\rho g A S_f \Delta x \quad 4.39$$

Donde S_f es la pendiente de fricción, que es positiva para el flujo en la dirección x positiva. Tradicionalmente, la ecuación de Manning se utiliza predominantemente en los Estados Unidos para la estimación de la fricción, siendo la ecuación de Manning la que se utiliza en Hec – Ras, dejando finalmente la siguiente expresión.

$$S_f = \frac{Q|Q|n^2}{2.208R^{4/3}A^2} \quad 4.40$$

4.3.1.2.1. Flujo (*momentum*)

Finalmente, con los términos de fuerza definidos, solo queda estimar el flujo que ingresa y que sale, quedando establecido en las ecuaciones 4.41 y 4.42.

$$\rho \left[QV - \frac{\partial(QV)}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right] \quad 4.41$$

$$\rho \left[QV + \frac{\partial(QV)}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right] \quad 4.42$$

Por lo tanto, la tasa neta de impulso (flujo de impulso) que ingresa al volumen de control es igual a:

$$-\rho \frac{\partial(QV)}{\partial x} \Delta x \quad 4.43$$

Dado que la cantidad de movimiento del fluido en el volumen de control es $\rho Q \Delta x$, la tasa de acumulación de impulso se puede escribir como:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Q \Delta x) = \rho \Delta x \frac{\partial Q}{\partial t} \quad 4.44$$

Reafirmando el principio de conservación del momento: la tasa neta de momento (flujo de momento) que ingresa al volumen (ecuación 4.43) más la suma de todas las fuerzas externas que actúan sobre el volumen [(4.33) + (4.35) + (4.39)] es igual a la tasa de acumulación de momento (ecuación 4.44), dando origen a la ecuación 4.45.

$$\rho \Delta x \frac{\partial Q}{\partial t} = -\rho \frac{\partial(QV)}{\partial x} \Delta x - \rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x - \rho g A \frac{\partial z_0}{\partial x} \Delta x - \rho g A S_f \Delta x \quad 4.45$$

La elevación de la superficie del agua, z_s , es igual a $z_0 + h$. Por lo tanto.

$$\frac{\partial z_s}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial z_0}{\partial x} \quad 4.46$$

Donde $\partial z_s / \partial x$, es la pendiente de la superficie del agua, que al sustituir la ecuación 4.46 en la ecuación 4.45, dividir entre $\rho \Delta x$, y mover todos los términos a la izquierda, produce la forma final de la ecuación de momento:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(VQ)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z_s}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad 4.47$$

4.3.2. Procesos para la modelación en Hec – Ras

4.3.2.1. Interfaz del Hec – Ras

La interfaz del software *Hec – Ras*, consiste en un sistema gráfico de usuario (*Graphical User Interfaz – GUI*), cuya principal función es hacer intuitivos los procesos de delimitación de planicies de inundación, mediante el cálculo del nivel de agua en cada sección transversal, dentro del tramo de un río o canal artificial

El proceso de modelación inicia con la incorporación de las secciones transversales del cauce, y posteriormente se agregan las condiciones iniciales, de frontera, así como las condiciones de contorno (rugosidad), y los escenarios

hidrometeorológicos que se pretenden modelar. Al concluir la configuración del tramo de estudio, se ejecuta el modelo numérico, que, al ser un análisis unidimensional presenta los resultados casi instantáneamente.

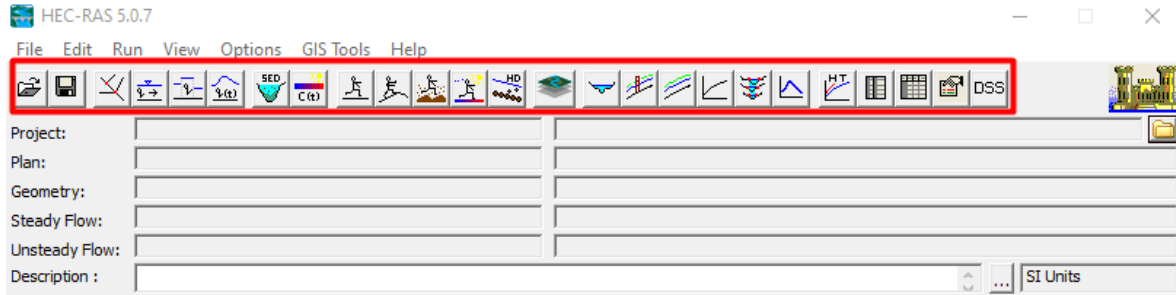


Figura 4.10. Interfaz del Hec-Ras.

4.3.2.2. Descripción del modelo

Al ejecutar Hec – Ras, se recomienda seleccionar el sistema de unidades que se pretende utilizar (Sistema Internacional), y guardar el archivo con el nombre del proyecto y la descripción de este, tomando como referencia el tramo del modelo y el escenario hidrometeorológico por modelar.

4.3.2.3. Dominio

Con las unidades establecidas, se procede a introducir las características del modelo, iniciando por importar las secciones transversales del cauce, las condiciones iniciales y de frontera.

4.3.2.3.1. Secciones transversales

Las secciones transversales fueron generadas a partir del modelo digital de terreno, obtenido durante las campañas de medición topo-batimétricas del cauce. Siendo necesario apoyarse de los softwares tipo SIG o Acad.

En ambos casos, se importa el MDT, ya sea en formato .TIFF o a partir de las coordenadas XYZ, para posteriormente crear un eje al centro del cauce y trazar un cadenamiento a una distancia equidistante (25 metros), que permita trazar y exportar las secciones transversales del cauce (Figura 4.11).

Las secciones transversales exportadas, son importadas en el software en el apartado la ventana de *datos geométricos*.

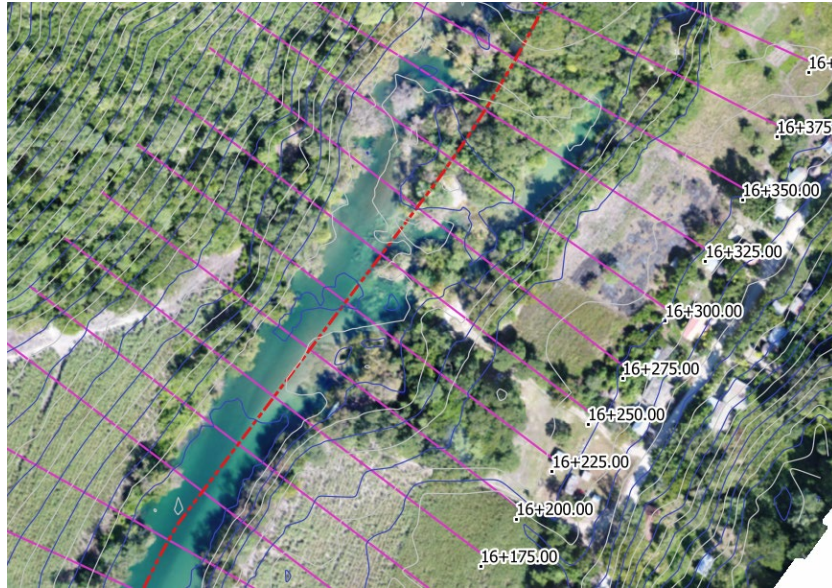


Figura 4.11. Eje y secciones transversales sobre el Río Gallinas.

4.3.2.3.2. Condiciones iniciales

Al importar las secciones transversales, queda definido el relieve del cauce en el modelo (Figura 4.12), sin embargo, es necesario reflejar las condiciones físicas del cauce en el modelo numérico, agregando la rugosidad, determinando la ubicación de los hombros y la distancia entre estaciones al centro y a las orillas del cauce (*Rob – Channel – Lob*) (Figura 4.13).

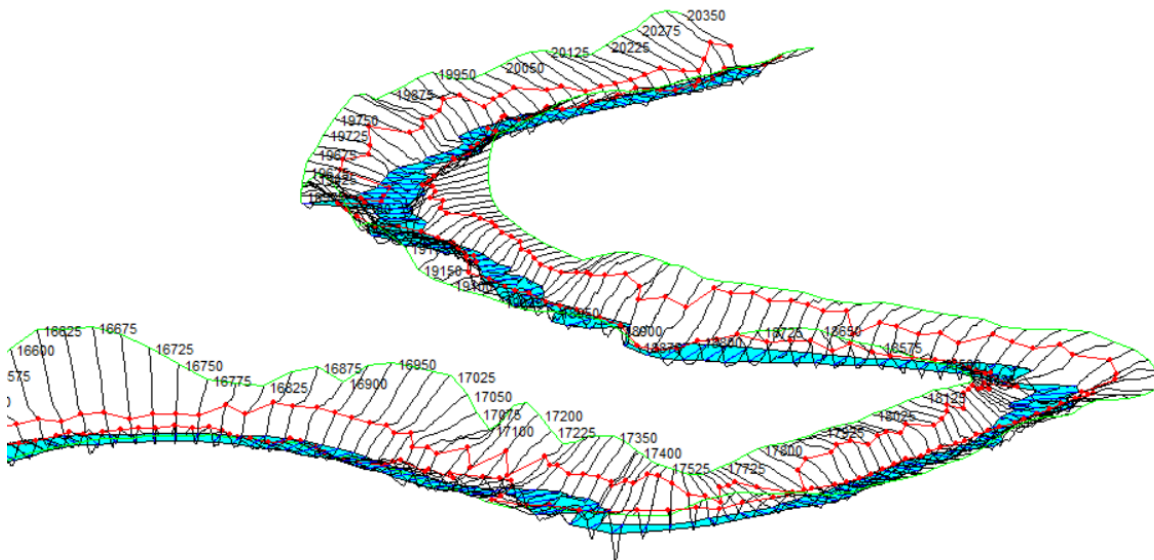


Figura 4.12. Visualización del Río Gallinas, Cadenamiento 16+600 – 20+350.

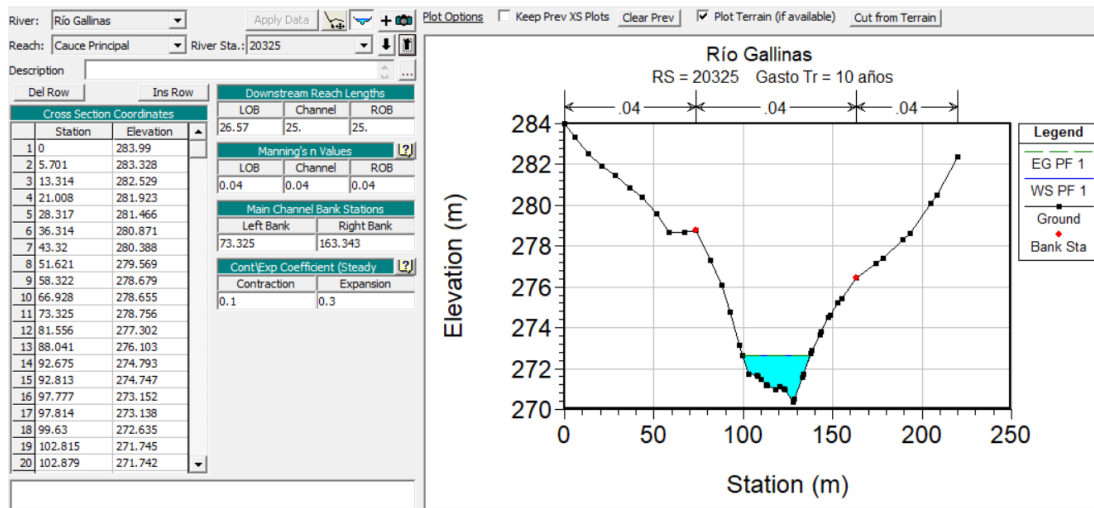


Figura 4.13. Ejemplo de sección en Hec – Ras.

4.3.2.3.3. Condiciones de frontera

Al caracterizar el relieve y las condiciones iniciales del cauce, se procede a determinar las condiciones de frontera, establecidas a partir de las condiciones de entrada y de salida. Donde para el caso del hidrograma de entrada, varía según el escenario hidrometeorológico que se pretenda modelar, mientras que las condiciones de salida e infiltraciones son las mismas reflejadas en la Figura 4.14 y Tabla 4.1, en la descripción de las condiciones de frontera del *EFDC Explorer*.

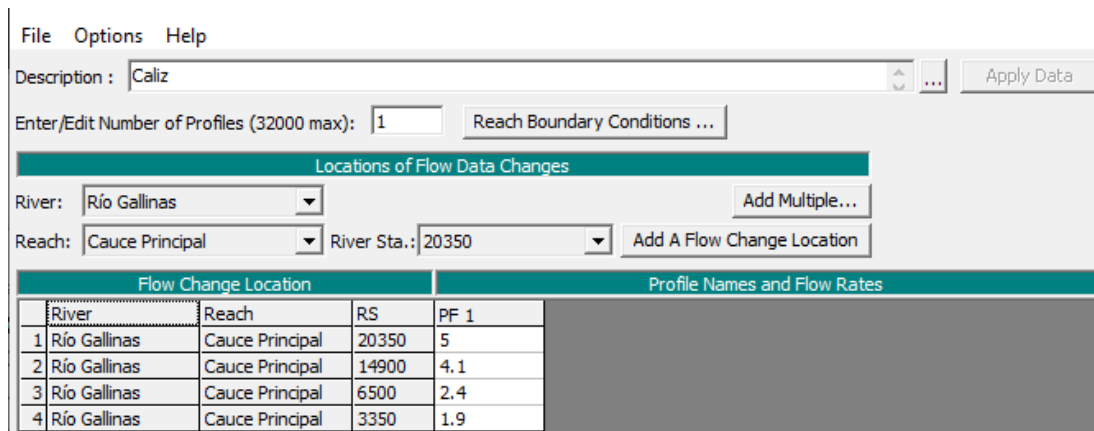


Figura 4.14. Condiciones de frontera (entrada de caudal e infiltraciones).

4.3.3. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad en *Hec – Ras*, es menos riguroso que el realizado en *EFDC Explorer*, debido al tiempo requerido durante los cálculos matemáticos, siendo el objetivo principal, rectificar que el agua fluya sobre el área del cauce (Figura 4.15).

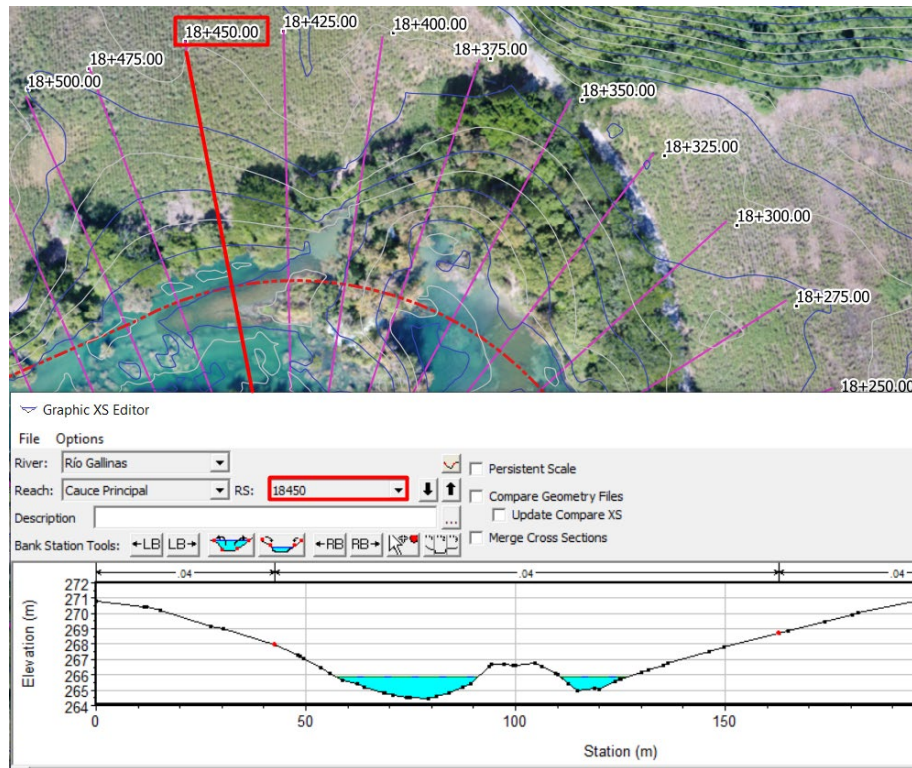


Figura 4.15. Análisis del comportamiento hidráulico del cauce y su topo-batimetría.

4.3.4. Calibración y validación del Hec – Ras

Concluido el análisis de sensibilidad, inicia el proceso de calibración del modelo numérico, para lo cual, se recurre al registro de escenarios reales registrados durante las campañas de aforo al tramo de estudio. Donde se introducen las condiciones de frontera (caudal de entrada), y se analiza que, la respuesta del modelo numérico sea adecuado estadísticamente a los registros adquiridos durante las campañas de medición, comparando las variables hidráulicas

La calibración y validación de los modelos, se aprecian en el capítulo 6 de esta tesis, así como los escenarios que forman parte de la modelación hidrodinámica del Río Gallinas.

Capítulo 5. Campañas de medición en el tramo de estudio

5. Campañas de medición en el tramo de estudio

Con la finalidad de representar la zona de estudio en los modelos numéricos, se realizaron campañas para determinar la batimetría del cauce y la topografía de las zonas aledañas en el tramo que se pretende modelar, así mismo, se efectuaron campañas para el aforo de caudales, con el propósito de registrar el comportamiento de las variables hidráulicas del cauce, al inicio y final del modelo para calibrar el modelo hidrodinámico.

5.1. Campaña topo-batimétricas

El tramo de estudio inicia 500 metro al sur del puente *El Carpintero*, localizado en el cruce de la carretera *Ciudad Valles – Rioverde* con el *Río Gallinas*, cercas de la localidad de *El Carpintero*, culminando el tramo del modelo 20.35 kilómetros aguas abajo en la *cascada de Tamul* (Figura 5.1).

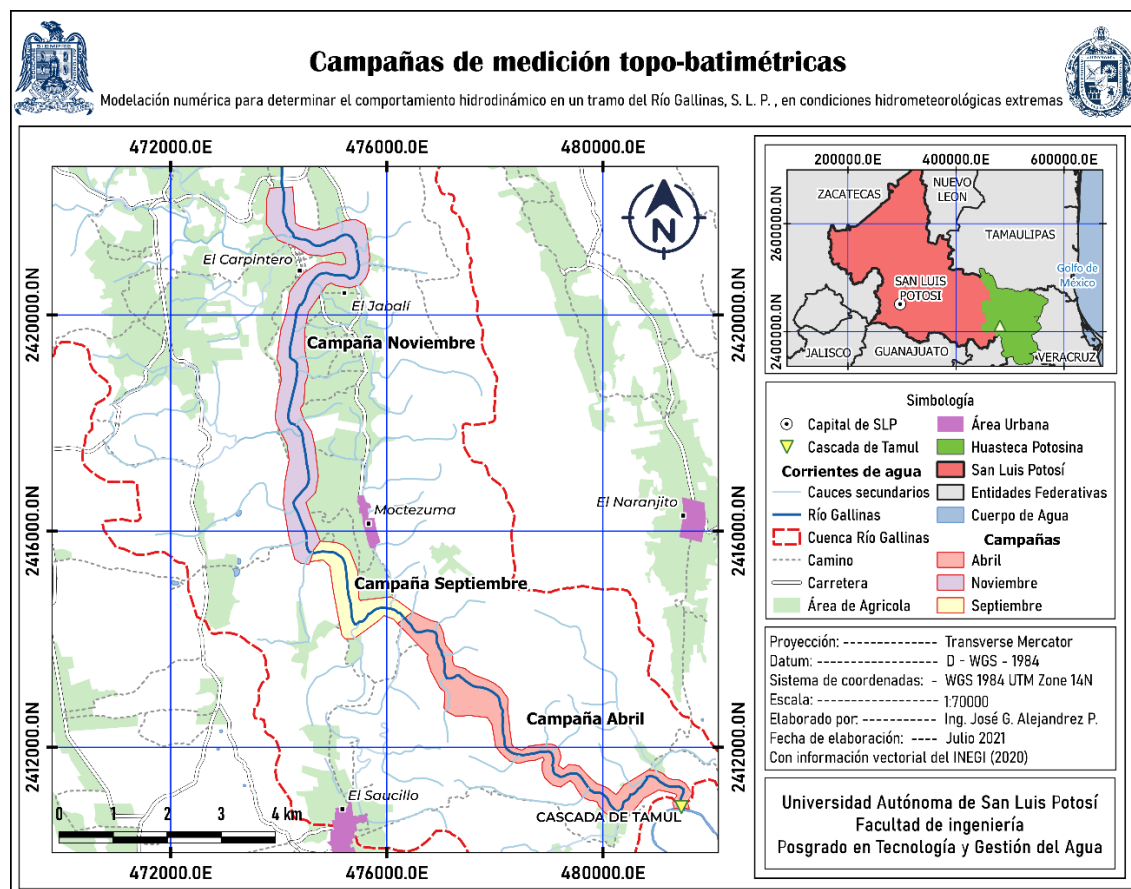


Figura 5.1. Campañas de medición topo-batimétricas.

La topo-batimetría de tramo de modelo se generó mediante el procesamiento fotogramétrico de las imágenes capturadas con el VANT Phantom 4 pro, referenciando las imágenes con los puntos de control terrestres obtenidos con la antena GNSS R8s de Trimble, cuya metodología fue descrita anteriormente.

En las campañas topo-batimétricas se identifican principalmente cuatro etapas: actividades preliminares, trabajo de campo, procesamiento de información y análisis de resultados.

5.1.1. Actividades preliminares

Con la finalidad de conocer el tramo de estudio se analizaron imágenes satelitales, identificando las vías de acceso, localidades, infraestructura, así como aquellas zonas con vegetación densa y áreas despejadas, para establecer el área topo-batimétrica, los planes de vuelos y la posible ubicación de los PCT

Para el levantamiento del tramo del modelo se generaron 24 planes de vuelo, algunas de los cuales durante las campañas de medición fueron ajustados a las condiciones físicas del río. Los planes creados se levantaron durante tres campañas de medición distintas, cada plan de vuelo abarca un área promedio de 36 hectáreas, a una elevación de 120 metros y duración de 15 minutos de vuelo.

5.1.2. Trabajo de campo

Las campañas de medición se realizaron durante tres etapas distintas, siendo del 8 al 10 de abril la primera campaña, en septiembre la segunda y finalmente en noviembre culminaron las campañas medición topo-batimétrica.

El trabajo de campo inicia con el posicionamiento de los puntos de control terrestres, mediante el equipo GNSS Trimble R8s, colocando y marcando de tres a cuatro PCT por cada vuelo en zonas totalmente despejadas (Figura 5.2), levantado en total durante las tres campañas de medición 57 PCT (Tabla 5.1) y más de 5,000 imágenes (Figura 5.4 y Figura 5.5).



Figura 5.2. Posicionamiento de los PCT.

Al levantar los PCT, se identifica preferentemente una zona despejada al centro del plan de vuelo, para armar y vincular el VANT Phantom 4 pro al celular (Figura 5.3). Posteriormente se ejecutan los planes de vuelo, logrando el levantamiento fotográfico con el vehículo aéreo.

Tabla 5.1. PCT y planes de vuelo realizados durante las campañas de medición.

Campaña de medición	PCT	Planes de vuelo	Imágenes capturadas
Abril	24	9	1,907
Septiembre	9	4	814
Noviembre	24	11	2,689
Total	57	24	5,410



Figura 5.3. VANT Phantom 4 pro.



Figura 5.4. Río Gallinas sobre localidad El Jabalí. Imagen capturada con VANT.



Figura 5.5. Imagen capturada con VANT durante la campaña de Abril.

5.1.3. Procesamiento de información

Posterior al trabajo de campo, se respalda, analiza y procesa la información generada del levantamiento, iniciando por el post-procesamiento de los PCT, en donde, apoyados de software computacional se ajusta y minimiza el error de posicionamiento de los puntos de control, obteniendo las coordenadas XYZ, como se muestra en la Tabla 5.2 y Figura 5.6.

Tabla 5.2. Coordenadas ajustadas de los PCT.

Campaña	ID	Este (X)	Norte (Y)	MSNM (Z)	#
Abril	rg01	476340.67	2414330.45	239.90	1
	rg02	476557.40	2414076.67	244.71	2
	rg03	476846.90	2413936.24	241.42	3
	rg04	476847.06	2413573.84	250.61	4
	rg05	476870.81	2413495.19	248.07	5
	rg06	476967.38	2413196.73	251.56	6
	rg07	477174.90	2412937.56	254.00	7
	rg08	477167.02	2412699.01	268.06	8
	rg09	477299.25	2412677.14	275.94	9
	rg10	477580.55	2412667.15	271.91	10
	rg11	478084.41	2412354.51	217.81	11
	rg12	478154.05	2412047.80	214.51	12
	rg13	478191.68	2411922.05	217.21	13
	rg14	478342.46	2411812.61	214.93	14
	rg15	478732.78	2411867.61	209.61	15
	rg16	479012.35	2411757.95	206.30	16
	rg17	479012.51	2411448.22	205.39	17
	rg18	479350.28	2411454.19	200.65	18
	rg19	479708.46	2411143.19	196.48	19
	rg20	480004.68	2411009.88	194.38	20
Septiembre	rg21	480331.68	2410782.95	192.05	21
	rg22	480609.19	2411032.11	188.42	22
	rg23	480973.57	2411348.17	184.90	23
	rg24	481309.11	2411249.54	176.88	24
	rg50	476353.54	2414287.58	243.16	25
	rg51	475252.94	2414137.01	257.60	26
	rg52	475402.35	2414224.42	251.32	27
	rg53	475200.19	2414473.18	256.74	28
	rg54	475153.33	2414656.21	258.69	29
	rg55	475158.66	2414918.09	254.80	30
Noviembre	rg56	475047.23	2415219.40	258.93	31
	rg58	474967.20	2415507.39	257.55	32
	rg59	474701.61	2415544.89	255.07	33
	rg60	474388.05	2415521.17	263.11	34
	rg61	474282.28	2415781.72	267.69	35
	rg62	474271.55	2416282.00	258.43	36
	rg63	474279.29	2416634.26	258.41	37
	rg64	474206.42	2416965.84	274.46	38
	rg65	474266.31	2417303.08	269.11	39
	rg66	474226.82	2417725.67	263.31	40
	rg67	474033.83	2418295.87	268.95	41
	rg68	474058.37	2418490.96	269.51	42
	rg69	474120.38	2418928.51	267.24	43
	rg70	474105.93	2419231.92	271.12	44
	rg71	475144.96	2421331.78	277.22	45
	rg72	474550.16	2421221.14	277.13	46
	rg73	473852.15	2422286.07	284.31	47
	rg74	473863.71	2421910.65	287.97	48
	rg75	474096.17	2421448.64	273.87	49
	rg76	474400.00	2419470.22	267.89	50
	rg77	474428.24	2419884.76	262.98	51
	rg78	474515.07	2420189.69	262.66	52
	rg79	475016.19	2420605.75	267.00	53
	rg80	475453.16	2420668.41	269.23	54
	rg81	474750.50	2420506.16	264.24	55
	rg82	475535.48	2420921.48	268.76	56
	rg83	475473.09	2421463.92	269.43	57

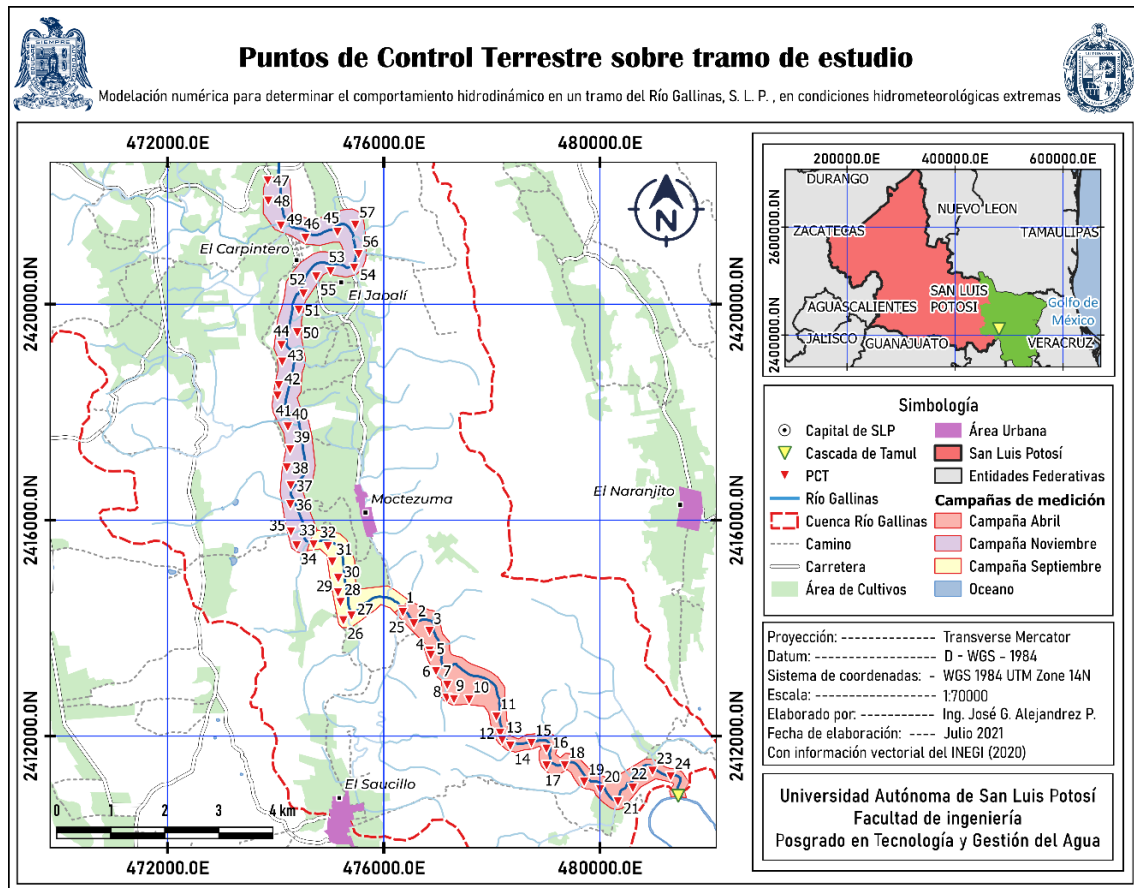


Figura 5.6. Puntos de control terrestre levantados.

Al contar con las coordenadas corregidas de los PCT, inicia el proceso fotogramétrico, donde las imágenes capturadas pasan por una sucesión de procesos como la selección, orientación y georreferenciación de cámaras (imágenes), para posteriormente a partir de estas, generar la nube de puntos densa, identificar la clasificación de píxeles y el mallado, obteniendo como resultado el modelo digital de superficie, el modelo digital de terreno y el ortomosaico del tramo de estudio.

Debido a la cantidad de imágenes capturadas, es necesario realizar por partes y repetir el postproceso fotogramétrico, donde para el tramo de estudio fueron generados en bloques de 1,000 imágenes aproximadamente, obteniendo cinco MDT, y cinco ortomosaico, los cuales, posteriormente fueron unificados mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica.

5.1.4. Análisis de resultados obtenidos durante la campaña

Al obtener el modelo digital de terreno, es necesario examinar que las elevaciones presentes sean congruentes con lo existente en físico, comparando el MDT, ortomosaico y los valores de elevación del INEGI (Figura 5.7 y Figura 5.8).

Al comparar el ortomosaico con el MDT, se busca que los puntos de mayor elevación correspondan con la ubicación de los cerros, así mismo, se espera que los puntos de menor elevación coincidan, con la batimetría del Río Gallinas (sección transversal).

Al rectificar que los resultados del modelo digital son congruentes con lo existente en campo, se procede a exportar la información vectorial generada. Si bien, tanto los modelos digitales como el ortomosaico, cuentan con una resolución de 0.05 metros por píxel, no se exporta la información con dicha resolución, debido a lo complejo y tardado que puede resultar la modelación numérica, al trabajar con dicha resolución.

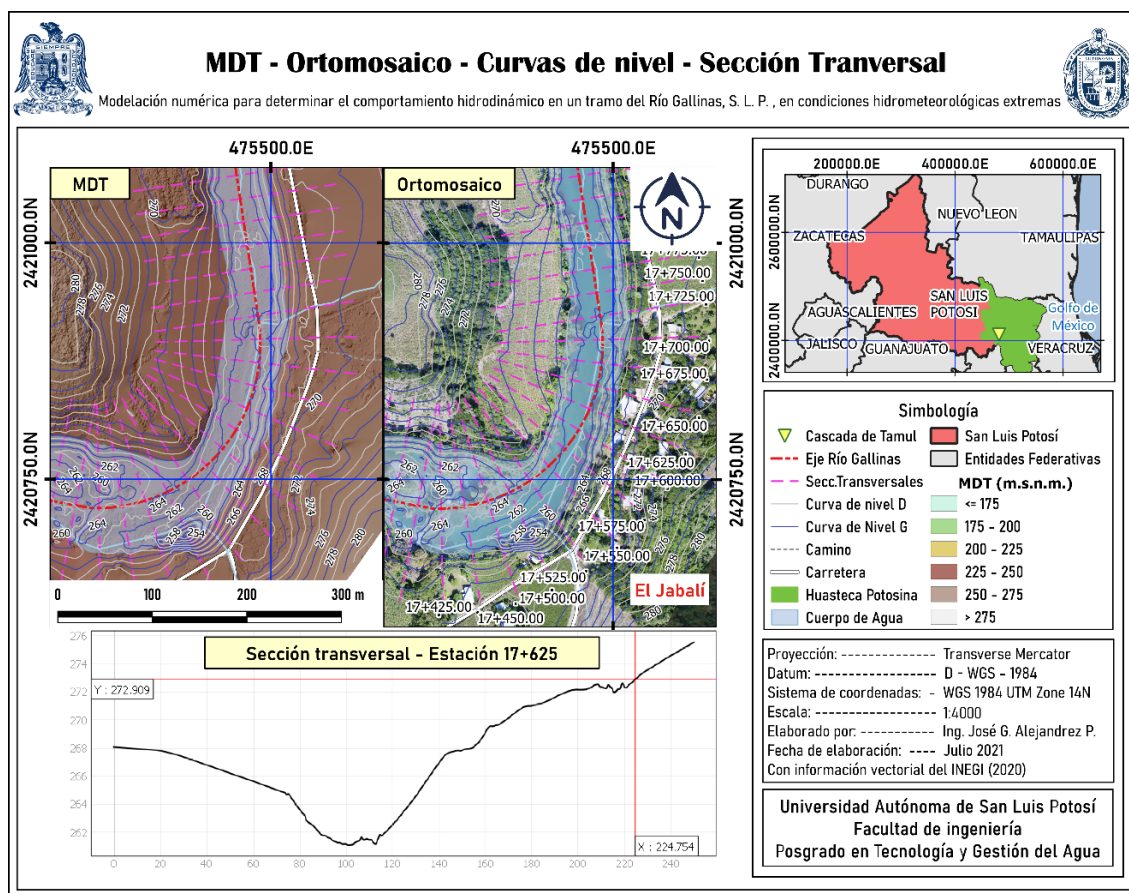


Figura 5.7. Análisis de sección transversal 17+625.

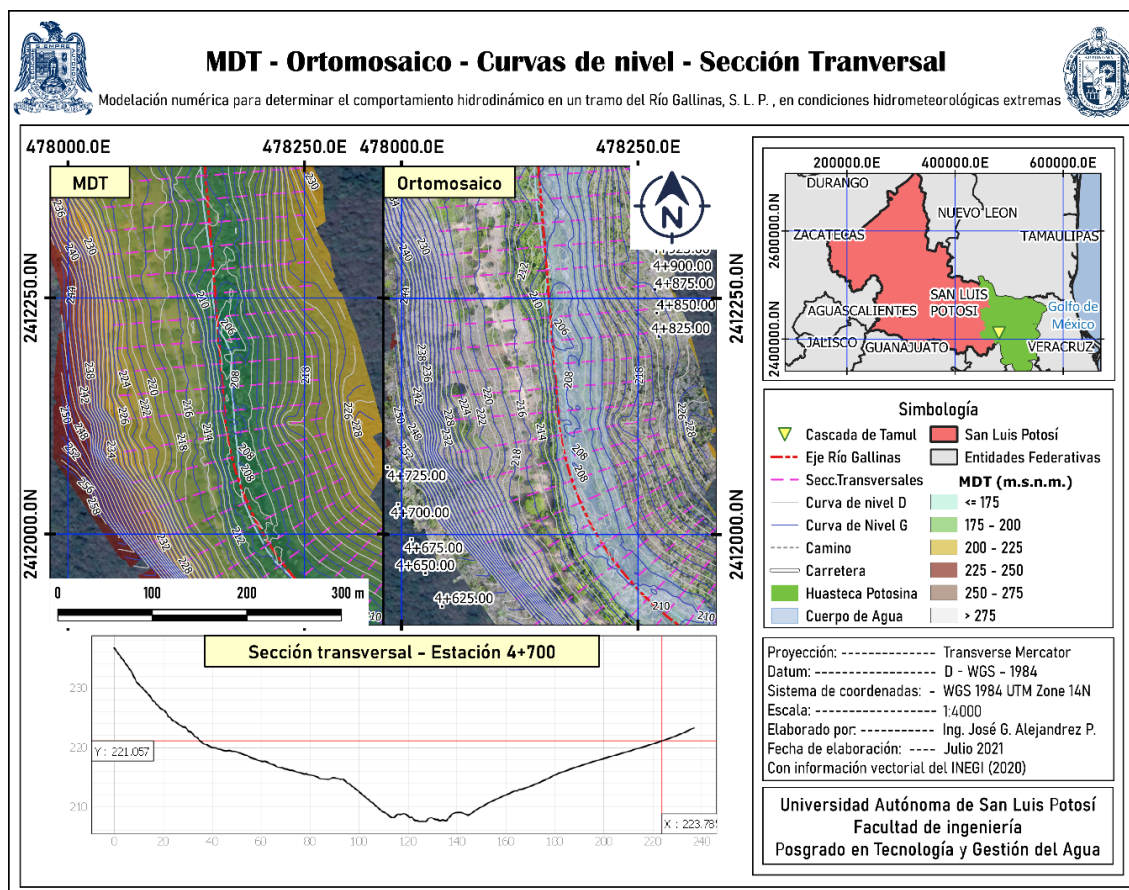


Figura 5.8. Análisis de sección transversal 4+700.

El ortomosaico se exportó con una resolución de 0.1 metros en formato Tiff y Kml, mientras que los modelos digitales se exportaron en formato Tiff, con una resolución de 0.5 metros al centro del cauce y 2.0 metros en las zonas aledañas.

5.2. Campaña de aforo de caudales

Las campañas para el aforo de caudales permiten registrar el comportamiento de las variables hidráulicas del Río Gallinas, las cuales, al representar dichos escenarios en el modelo numérico proporcionan respaldo y validez a los resultados obtenidos en la simulación de los distintos escenarios.

El aforo del caudal se realizó aprovechando el efecto Doppler, apoyados del equipo RiverRay ADCP, que mediante ondas sonoras genera el perfil de la sección transversal del cauce y determina las velocidades y el caudal presente en el Río Gallinas.

5.2.1. Actividades previas

Durante el aforo de caudales existen diversas consideraciones y actividades preliminares que deben realizarse de manera secuencial. La primera de ellas consiste en determinar los sitios donde se realizará el monitoreo de caudales. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) establece que la sección transversal a monitorear debe colocarse en un tramo preferentemente recto, con una profundidad mayor a los 0.3 metros, y que el flujo del agua sea calmado con velocidades inferiores a 2.5 m/s.

En la campaña de medición se realizó el monitoreo de caudales en dos puntos estratégicos, el primero de ellos ubicado en el puente *El Carpintero* (Figura 5.9), debido a que el modelo numérico inicia en dicho punto, siendo posible replicar el escenario a partir del hidrograma de entrada registrados durante la campaña. Por su parte, la segunda sección de aforo se localiza al finalizar el tramo del modelo (cascada de Tamul) en el cadenamiento 0+800 (Figura 5.10).

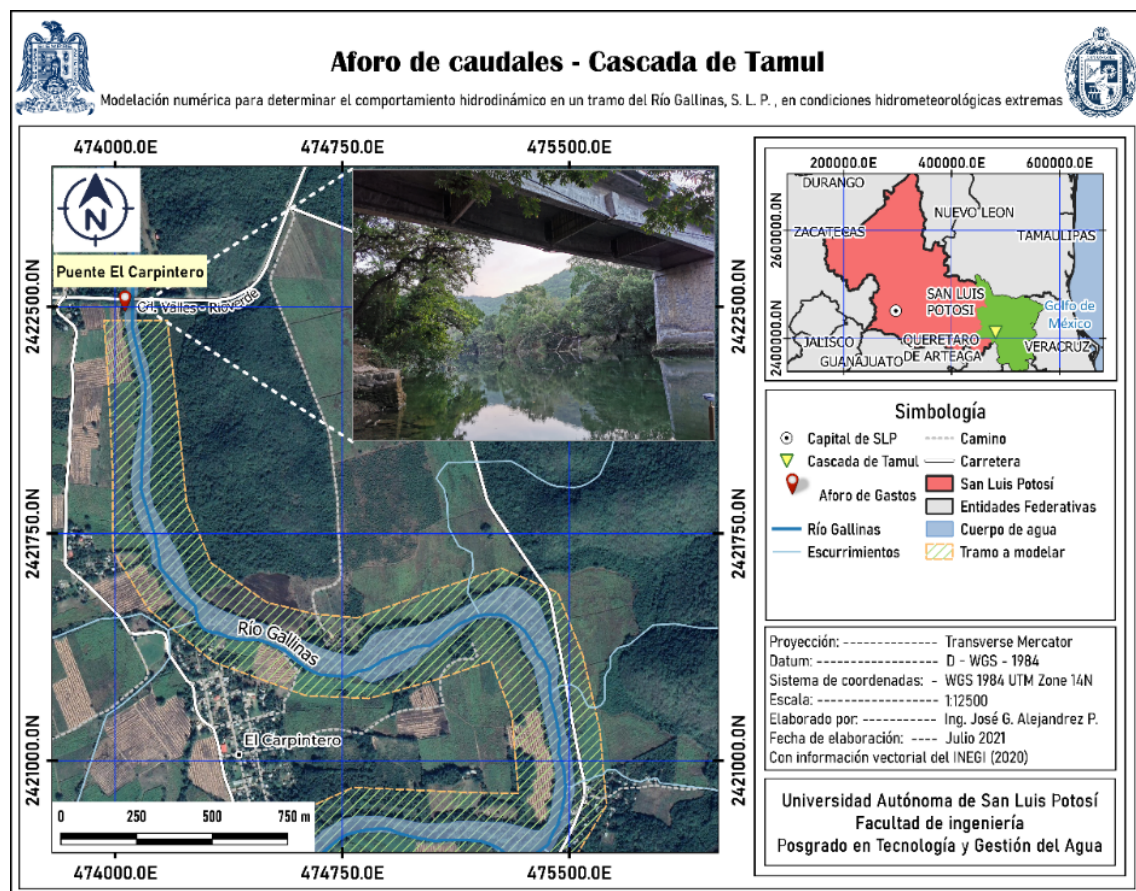


Figura 5.9. Monitoreo de caudales, ubicación puente "El Carpintero".

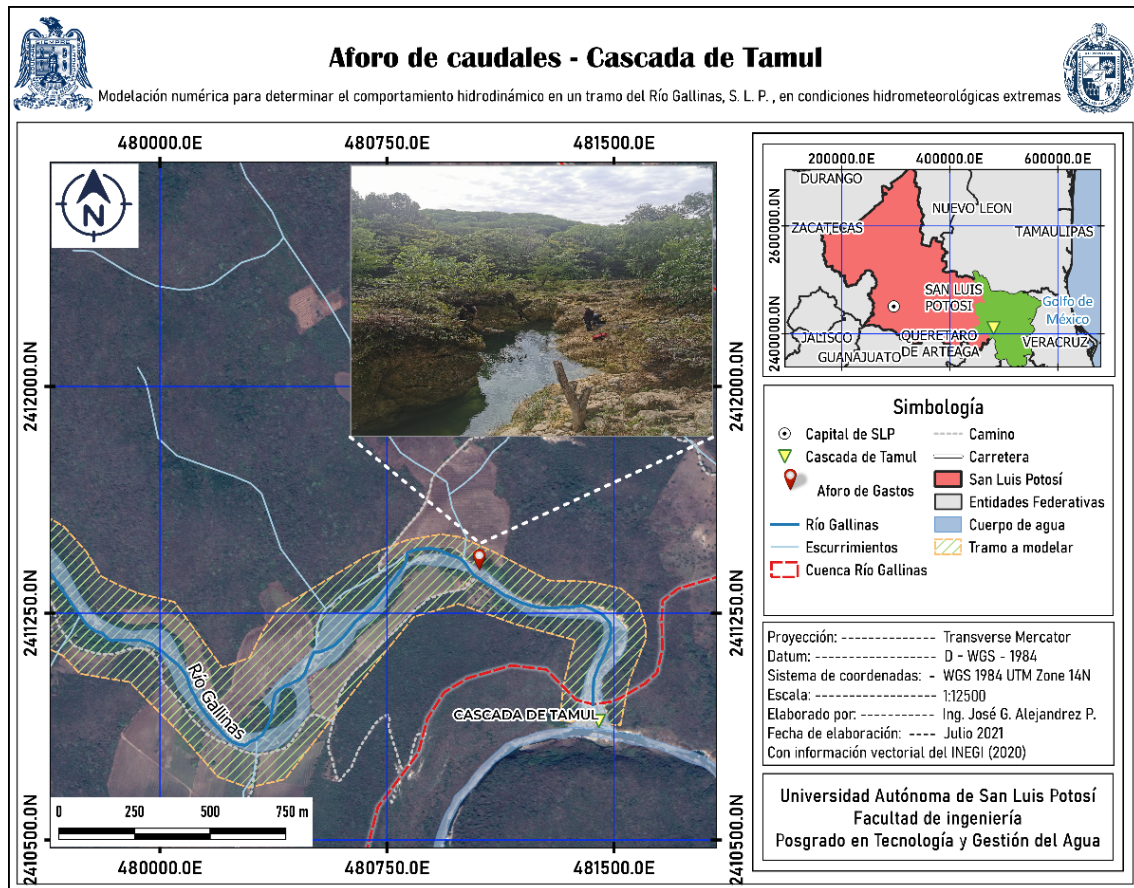


Figura 5.10. Monitoreo de caudales, ubicación "cascada de Tamul".

Al establecer las secciones de control, se realizan las actividades preliminares, que consisten en armar, conectar y calibrar el equipo RiverRay ADCP, vincular a la computadora y al GPS, para posteriormente configurar el archivo Winriver, que permite monitorear y almacenar las variables hidráulicas registradas durante el aforo de caudales.

5.2.2. Monitoreo de caudales

El aforo de caudales inicia con algunas mediciones preliminares, para calibrar el proceso del monitoreo, una vez analizados los resultados de las primeras mediciones en el cauce, inicia la campaña de monitoreo de caudales sobre el Río Gallinas.

Debido a que el objetivo en este punto consiste en caracterizar el comportamiento del cauce y sus variables hidráulicas, el aforo de caudales se realizó cada media hora, logrando obtener un hidrograma de entrada a cada 30 minutos de las 8:00 a las 19:00 horas.

El aforo del cauce consiste en trasladar el *Hydroboard* y la lancha con el perfilador de corrientes ADCP, GPS y Laptop, del margen izquierdo al margen derecho del cauce y viceversa, repitiendo el proceso cuatro veces cada media hora, esto con la finalidad de contar con varios registros, que disminuyen la presencia de errores en el aforo.

Además, con la finalidad de evitar mediciones erróneas, es indispensable que la velocidad con la que se desplaza el equipo sea menor a la velocidad presente en el flujo de agua, debido a que, durante el movimiento del equipo, este genera cierta turbulencia, que puede generar errores en la medición.



Figura 5.11. Aforo de caudales en los distintos puntos seleccionados.

5.2.3. Procesamiento de información

Al concluir el trabajo de campo, se exportan a Excel los valores registrados durante las campañas de medición, siendo posible compilar y analizar las velocidades y el caudal obtenidos durante el aforo de caudales.

De la campaña de medición, se generó un hidrograma con un intervalo a cada media hora, el cual, fue implementado como hidrograma de entrada (Figura 5.12), al modelo numérico para representar el escenario de calibración del río. Así mismo, fueron procesadas los valores de velocidad y caudal registrados en la estación 0+800 (Tabla 5.3).

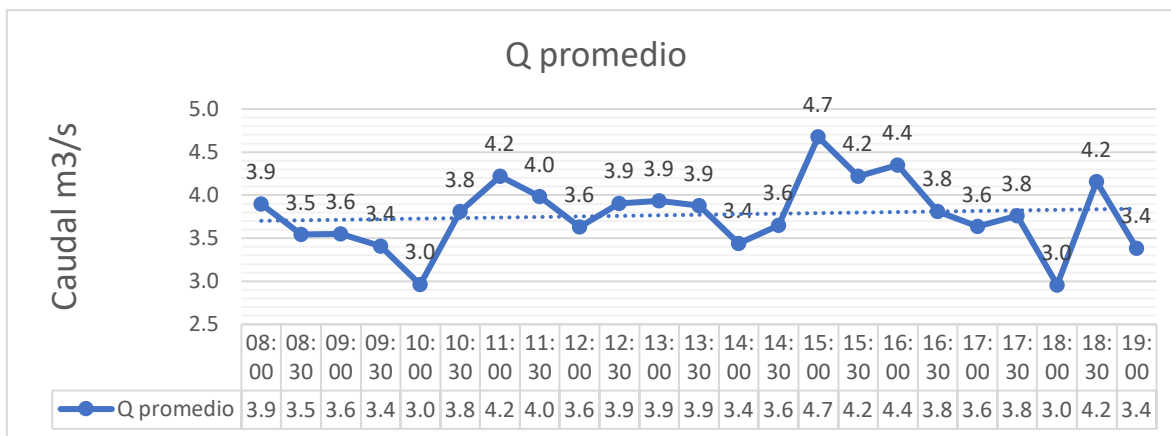


Figura 5.12. Hidrograma en puente El Carpintero registrado en campaña de aforo.

Tabla 5.3. Valores de caudal y velocidad registrados a 800m de la cascada de Tamul.

Hora	Caudal (m³/s)	Velocidad de flujo (m/s)
09:30	0.31	0.038
10:00	0.375	0.027
10:30	0.352	0.036
11:00	0.421	0.031
11:30	0.402	0.033

En resumen, durante la campaña de medición, se registró sobre el puente *El Carpintero*, un caudal promedio de $3.8 \text{ m}^3/\text{s}$ y una velocidad de 0.091 m/s , mientras que aguas abajo se presenta un caudal promedio de $0.37 \text{ m}^3/\text{s}$ y una velocidad de 0.033 m/s . Con dichas características, la cascada de Tamul presentaba un flujo constante mínimo como se aprecia en la Figura 5.13.



Figura 5.13. Cascada de Tamul.

Capítulo 6. Modelación hidrodinámica del río

6. Modelación hidrodinámica del río

Con la información generada durante las campañas de medición, se configura e implementan los modelos numéricos, adoptando las condiciones de contorno, de frontera y condiciones iniciales que mejor representen el tramo a modelar.

Además, apoyados de los valores registrados durante las campañas de aforo de caudales y del análisis de sensibilidad realizado al modelo previamente, se calibra y valida el modelo numérico. La calibración y validación numérica, se realizan con la finalidad de evaluar el error de ajuste del modelo numérico, estableciendo los parámetros del modelo, donde la serie de datos simulados concuerdan de manera óptima con los datos observados.

En la etapa de calibración y validación del modelo numérico, se pretende determinar las condiciones iniciales, de frontera y de salida, así como los parámetros hidráulicos que permitan obtener una representación que, se asemejen a los valores de velocidad o del caudal observados durante las campañas de medición.

Para analizar el ajuste estadístico entre los valores estimados y los observados, se ha utilizado la raíz cuadrada del error cuadrático, *RMSE* (*root mean square error*), estimado mediante la ecuación 6.1.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sm} - Q_i)^2}{n}} \quad 6.1$$

El RMSE, mide en valores positivos que van desde cero hasta el infinito, donde el cero, corresponde a un ajuste perfecto entre los valores observados en las campañas de medición y los estimados por el modelo numérico, por su parte, a mayor sea el valor del error cuadrático, el modelo presenta un menor ajuste. Donde una simulación con un ajuste igual o mayor a 1, representa un ajuste pobre estadísticamente hablando, mientras que un ajuste menor a 0.3, indica que el modelo presenta un buen desempeño.

En la Figura 6.1 se aprecia el modelo digital de terreno del tramo a modelar, mostrando la ubicación de los puntos con aforo de caudales, para la calibración y validación del modelo. Además, de dividir el tramo de modelo en seis secciones, que serán utilizadas en el análisis de resultados de los escenarios simulados.

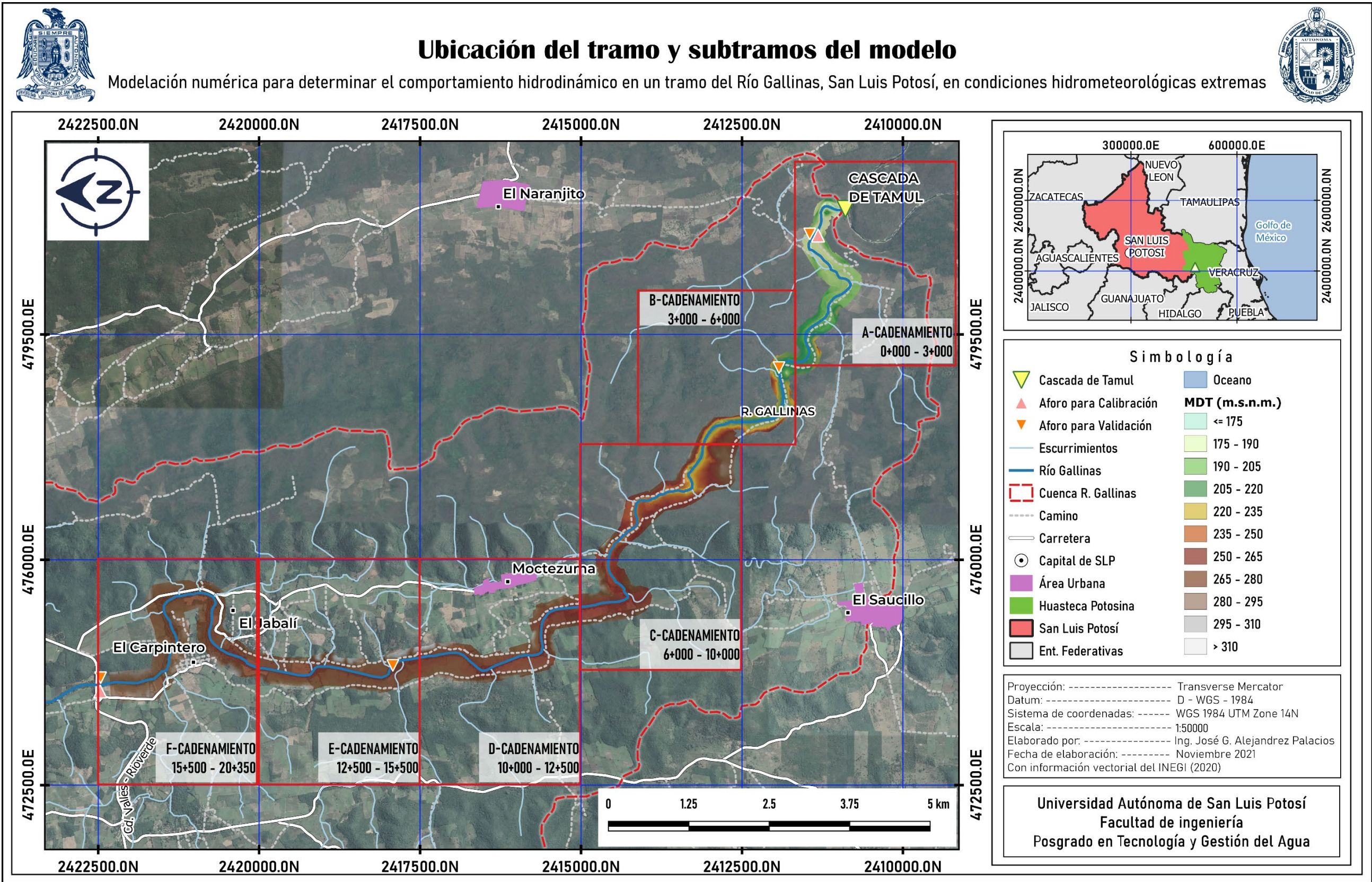


Figura 6.1. Ubicación del tramo a modelar.

En este capítulo se analizan inicialmente los resultados obtenidos durante el proceso de calibración y validación del modelo, mediante la réplica de los escenarios observados durante las campañas de medición, para posteriormente simular el comportamiento del Río Gallinas ante los escenarios hidrometeorológicos planteados, apoyados de los modelos numéricos de EFDC Explorer (2D) y Hec – Ras (1D).

6.1. EFDC Explorer

El modelo implementado en EFDC Explorer, consta de un tramo de 20.35 km de longitud, que mantiene un ancho de aproximadamente 220 metros. En dicho tramo, se implementa una malla curvilínea, cuyas dimensiones al centro de cauce (120 metros de ancho) es de 3.5x5 metros, mientras que en las zonas aledañas la malla mide 7x5 metros. En dicha malla, se incorporan los valores de elevación del modelo digital de terreno generado a partir de las campañas de medición fotogramétrica.

Así mismo, el modelo cuenta con una elevación inicial del nivel de agua del cauce de 0.4 metros y, una rugosidad con un valor de Manning de 0.04, establecida a partir del análisis del escenario de calibración, donde fue necesario modelar con distintas condiciones iniciales el mismo escenario, para adoptar aquellas condiciones que mejor ajuste presentaron en relación con los valores observados en campo.

En el tramo de modelo, se establecieron cuatro condiciones de salida, tres de ellas representan las infiltraciones presentes en el cauce, que en conjunto suman 3.1 m³/s y, la faltante pertenece a la condición de salida en la cascada de Tamul. Por su parte, la condición de entrada corresponde al hidrograma o caudal de entrada, el cual varía según el escenario que se pretenda simular.

6.1.1. Calibración del modelo

En la etapa de la calibración, se busca demostrar estadísticamente que las condiciones iniciales, de frontera y de salida, así como los parámetros hidráulicos del modelo numérico, permiten obtener una representación fiel de las velocidades o del gasto observado durante las campañas de medición

Para el escenario de la calibración, se implementó el hidrograma de entrada a la altura del puente *El Carpintero* (Figura 5.12), registrado durante la campaña de aforo

de caudal expuesto en el capítulo 5 de esta tesis. Analizando las velocidades observadas en la salida del cauce en la estación 0+800, cercas de la cascada de Tamul (Tabla 5.3 y Figura 6.2).



Figura 6.2. Monitoreo de caudales, modelo numérico y campaña de medición.

El proceso de calibración requiere de repetir la simulación, ajustando las condiciones de frontera y de dominio que permitan alcanzar una representación adecuada de las variables hidráulicas del modelo numérico.

Para el caso de estudio, con las condiciones expuestas al inicio de este capítulo, se obtuvo un error cuadrático medio en la salida del modelo de 0.01, donde la velocidad aforada equivale a 0.033 m/s y el modelo estima una velocidad de 0.029 m/s.

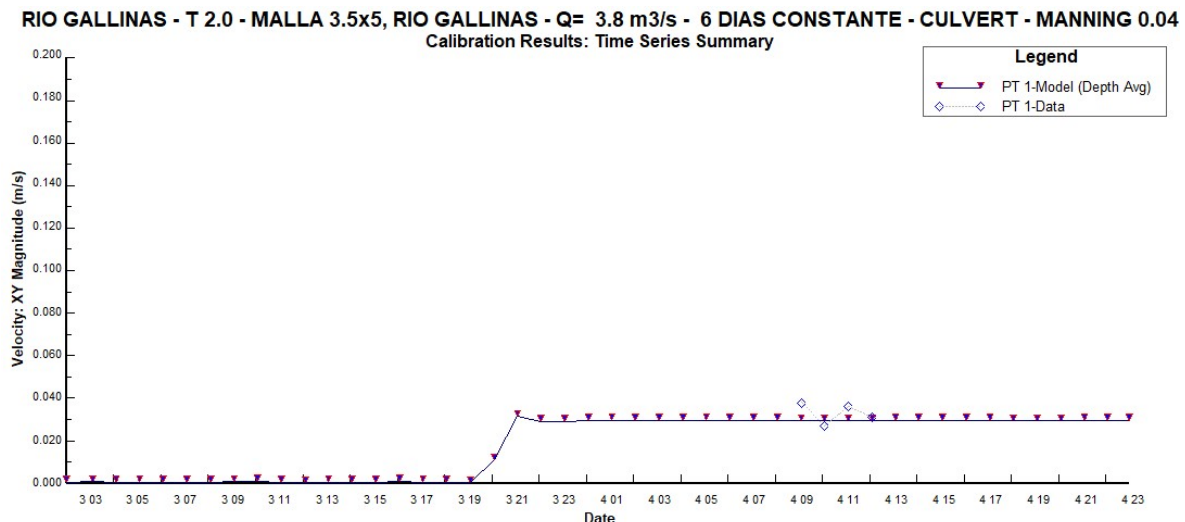


Figura 6.3. Velocidad de salida registrada en el modelo numérico vs campaña de aforo.

EFDC Model Run - Time Series Statistics												
RÍO GALLINAS - T 2.0 - MALLA 3.5x5, RÍO GALLINAS - Q= 3.8 m3/s - 6 DIAS CONSTANTE - CULVERT - MANNING 0.04 C:\Users\jose\Desktop\RG ALEJANDRE\EFDC\Modelacion con culvert\Modelo EFDC - T2 - Q=3.8 constante - Culvert - Extraccion - M-.04\ Current Date: 2021-08-12 10:08												
Station ID	Parameter	Layer/ Type	Starting Date/Time	Ending Date/Time	# Pairs	Data Average	Model Average	Range of Data Min Max	Range of Model Min Max	RMS Error		
PT 1	XY Magnitude (m/s)	Depth Avg	2021-01-04 10:00	2021-01-04 13:00	4	0.033	0.029	0.027 0.038	0.029 0.029	0.006		
PT 2	XY Magnitude (m/s)	Depth Avg	2021-01-01 02:34	2021-01-01 13:27	92	0.091	0.091	0.074 0.108	0.091 0.091	0.008		
Composite Statistics												
Parameter	# Pairs	Avg Obs	Avg Model	RMS Error								
XY Magnitude (m/s)	96	0.088	0.088	0.008								
Prepared by EFDC_Explorer(c), developed by Dynamic Solutions-Intl, LLC												

Figura 6.4. RMSE estimado con EFDC.

Al presentar el modelo numérico, una representación adecuada de los valores observados durante las campañas de medición se concluye que, este se encuentra calibrado, dando inicio al proceso de validación del modelo.

6.1.2. Validación del modelo

La validación del modelo consiste en replicar otro escenario registrado previamente, sin modificar las condiciones de iniciales establecidas durante el proceso de calibración y lograr que el error cuadrático (RMSE) permanezca por debajo de 0.3.

Para la validación del modelo, se recurrió a la campaña de medición realizada en marzo de 2017 por Robles (2019), donde se monitorearon varios puntos, de los cuales, cuatro se ubican en el tramo de modelo. En dicha campaña se registra un caudal de 2.95 m³/s en el puente *El Carpintero* y va disminuyendo producto de las infiltraciones y extracciones, presentando un caudal igual a cero en la *cascada de Tamul* (Figura 6.5).



Figura 6.5. Campaña de medición de caudales, recuperada de Robles (2019).

A partir de los distintos sitios de aforo de caudal, fueron colocados los puntos en el modelo numérico para analizar la respuesta hidráulica y que el comportamiento del cauce se asemeje a los valores observados durante el aforo. Los puntos de las campañas de aforo y los implementados en el modelo se aprecian en la Figura 6.6.

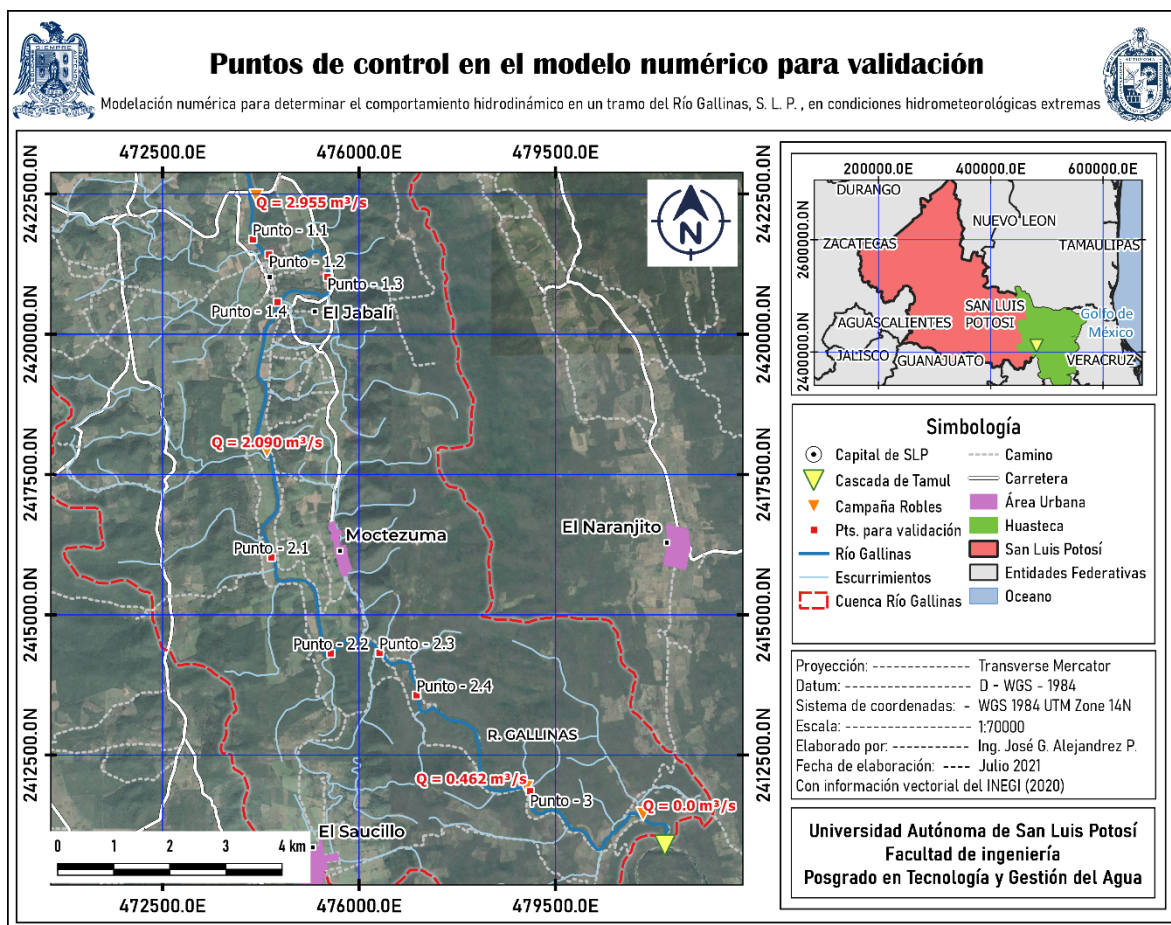


Figura 6.6. Ubicación de puntos de control y campaña de aforo para validación del modelo.

En el tramo del modelo, el error cuadrático (RMSE) presente en los distintos puntos, se mantuvo en el rango de 0.01 y 0.12 (Tabla 6.1 y Figura 6.7) que, al ser valores inferiores a 0.3, se consideran adecuados, completando la validación del modelo numérico. A continuación, en las Figura 6.8 a Figura 6.10, se aprecia la respuesta de algunos de los puntos observados.

MODELACIÓN NUMÉRICA PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO EN UN TRAMO DEL RÍO GALLINAS, SAN LUIS POTOSÍ, EN CONDICIONES HIDROMETEOROLÓGICAS EXTREMAS

EFDC Model Run - Time Series Statistics

RIO GALLINAS - T 2.0 - MALLA 3.5x5, RIO GALLINAS - Q= 2.9 m³/s - 10 DIAS CONSTANTE - CULVERT - MANNING 0.04
C:\Users\jose\Desktop\RG ALEJANDREZ\EFDC\Modelacion RG Escenarios VALIDADOS\Modelo RG - ESCENARIO 1 - Q=2.9 constante - Culvert - Extraccion con tiempo - M-.04\
Current Date: 2021-08-12 11:18

Station ID	Parameter	Layer/ Type	Starting Date/Time	Ending Date/Time	# Pairs	Data Average	Model Average	Range of Data Min Max	Range of Model Min Max	RMS Error
1.1	Discharge (m³/s)	Depth Avg	2021-01-06 18:00	2021-01-06 19:55	4	2.950	2.956	2.940 2.960	2.946 2.973	0.012
1.2	Discharge (m³/s)	Depth Avg	2021-01-06 18:00	2021-01-06 19:55	4	2.950	2.956	2.940 2.960	2.946 2.973	0.012
1.3	Discharge (m³/s)	Depth Avg	2021-01-06 18:00	2021-01-06 19:55	4	2.950	2.959	2.940 2.960	2.951 2.968	0.009
1.4	Discharge (m³/s)	Depth Avg	2021-01-06 18:00	2021-01-06 19:55	4	2.950	2.960	2.940 2.960	2.959 2.962	0.013
2.1	Discharge (m³/s)	Depth Avg	2021-01-06 18:00	2021-01-06 19:55	4	2.090	2.060	2.088 2.092	2.062 2.068	0.031
2.2	Discharge (m³/s)	Depth Avg	2021-01-06 18:00	2021-01-06 19:55	4	2.090	2.060	2.088 2.092	2.065 2.065	0.030
2.3	Discharge (m³/s)	Depth Avg	2021-01-06 18:00	2021-01-06 19:55	4	2.090	2.060	2.088 2.092	2.065 2.061	0.030
2.4	Discharge (m³/s)	Depth Avg	2021-01-06 18:00	2021-01-06 19:55	4	2.090	2.066	2.088 2.092	2.051 2.089	0.028
3.4	Discharge (m³/s)	Depth Avg	2021-01-06 21:07	2021-01-06 22:48	4	0.462	0.344	0.461 0.463	0.324 0.379	0.120

Composite Statistics
Parameter # Pairs Avg Obs Avg Model RMS Error
Discharge (m³/s) 36 2.251 2.269 0.032

Prepared by EFDC_Explorer(c), developed by Dynamic Solutions-Intl, LLC

Figura 6.7. RMSE estimado durante validación del modelo numérico.

Tabla 6.1. Valores de RMSE para validación del modelo numérico.

ID	Caudal registrado (m³/s)	Caudal Estimado (m³/s)	RMS Error
1.1	2.95	2.956	.012
1.2	2.95	2.956	.012
1.3	2.95	2.959	.009
1.4	2.95	2.060	.013
2.1	2.090	2.060	.031
2.2	2.090	2.060	.030
2.3	2.090	2.060	.030
2.4	2.090	2.060	.028
3.4	.462	.344	.120

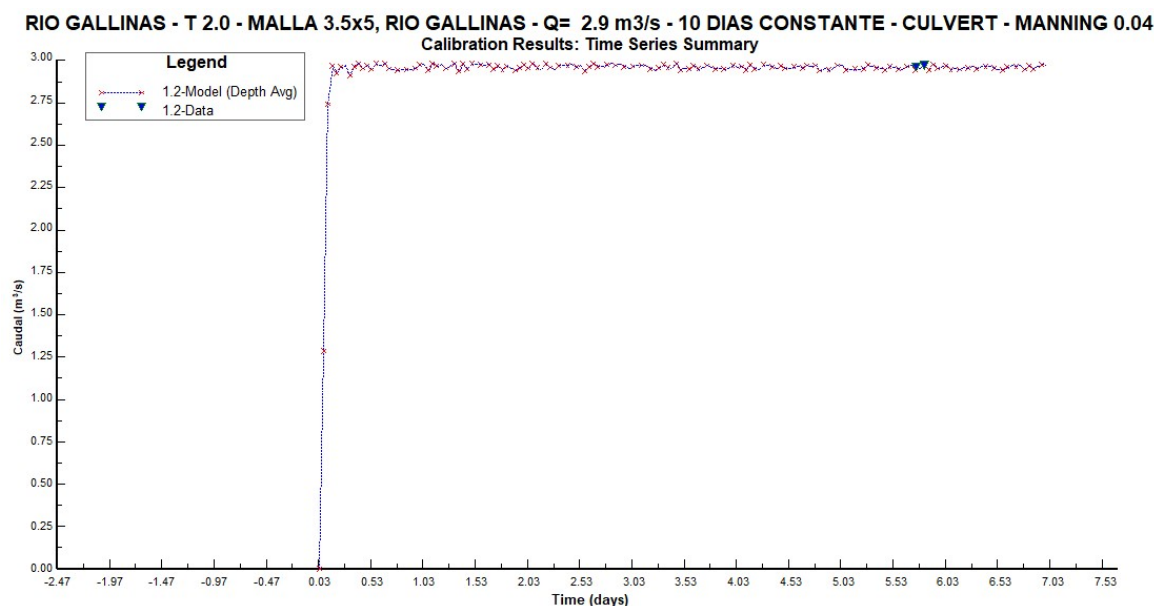


Figura 6.8. Caudal simulado punto 1.2 y caudal aforado.

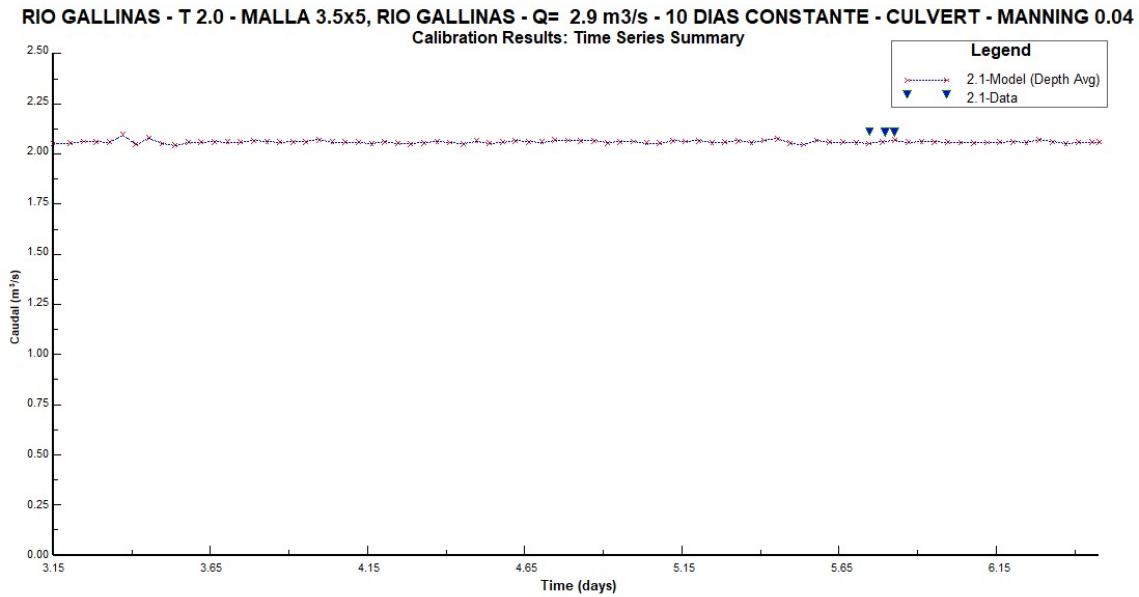


Figura 6.9. Caudal simulado punto 2.1 y caudal aforado.

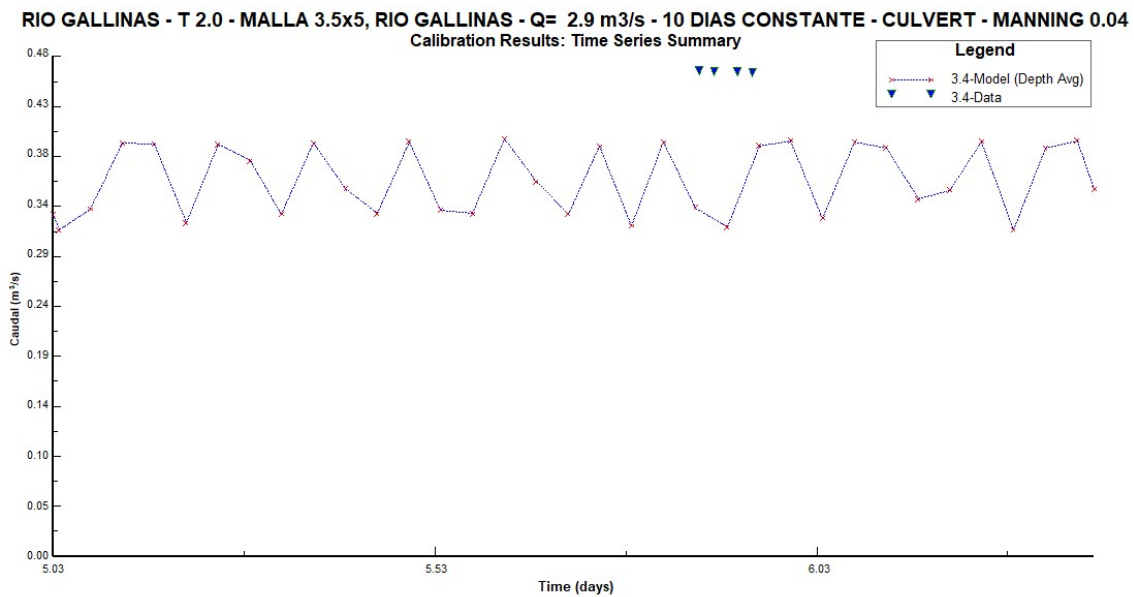


Figura 6.10. Caudal simulado Punto 3.4 y caudal aforado.

6.1.3. Caudal Tr de 25 años

Al calibrar y validar el modelo numérico, se procede simular el comportamiento del Río Gallinas ante los escenarios planteados. Siendo el primero de ellos, determinar la respuesta hidrodinámica del cauce ante la presencia de precipitaciones máximas extraordinarias, asociadas a un incremento del escurrimiento en el cauce.

El gasto seleccionado corresponde a un periodo de retorno de 25 años, estimado en el capítulo 2, por el método de Snyder (Tabla 2.25), el cual, presenta un caudal pico

igual a 1231.8 m³/s. En el modelo numérico, se establece la condición de entrada, seleccionando los valores resultantes del hidrograma unitario estimado por el método de Snyder (Figura 6.11) para el periodo de retorno correspondiente.

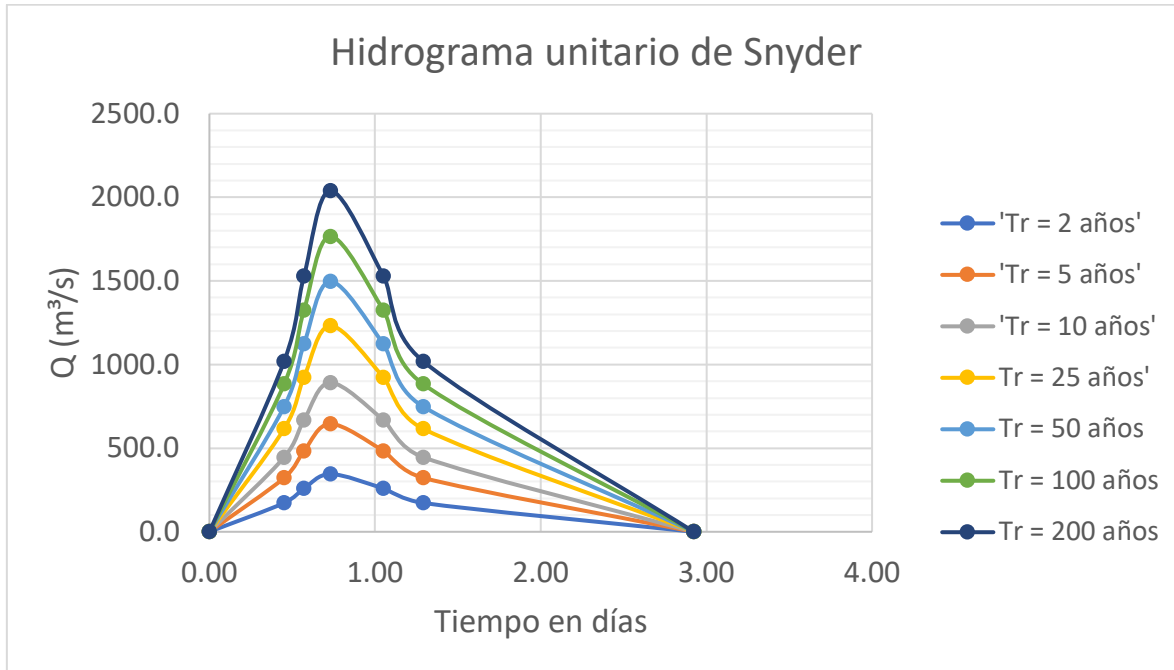


Figura 6.11. Hidrograma unitario por el método de Snyder para diferentes periodos de retorno.

En la simulación se puede apreciar como con el gasto de 1231.8 m³/s, el cauce presenta desbordamientos en diversos puntos al presentarse el caudal pico sobre el tramo de estudio.

La simulación presenta una tendencia a desbordar aguas arriba del tramo del modelo, entre los cadenamientos 10+000 al 20+350, observándose varias áreas inundables sobre las localidades de El Carpintero y El Jabalí, así como de las parcelas agrícolas presentes en las zonas aledañas al cauce.

Si bien el desbordamiento del cauce se debe a la falta de área hidráulica que permita la conducción completa del agua, existen diversos factores que contribuyen como: la sinuosidad del río, las curvas cerradas del cauce, así como la presencia de asentamientos y áreas agrícolas, en las planicies alrededor del cauce.

Contrario a la parte alta del tramo del modelo, aguas abajo, las posibles afectaciones por desbordamiento son menores, debido a la presencia de cuerpos

cerriles y un incremento en la pendiente general del cauce, que ocasiona un incremento en la velocidad del agua.

A continuación, en las siguientes figuras se puede apreciar los resultados de velocidad y nivel de agua, con un flujo de norte a sur (aguas arriba – aguas abajo) arrojados por el modelo numérico EFDC.

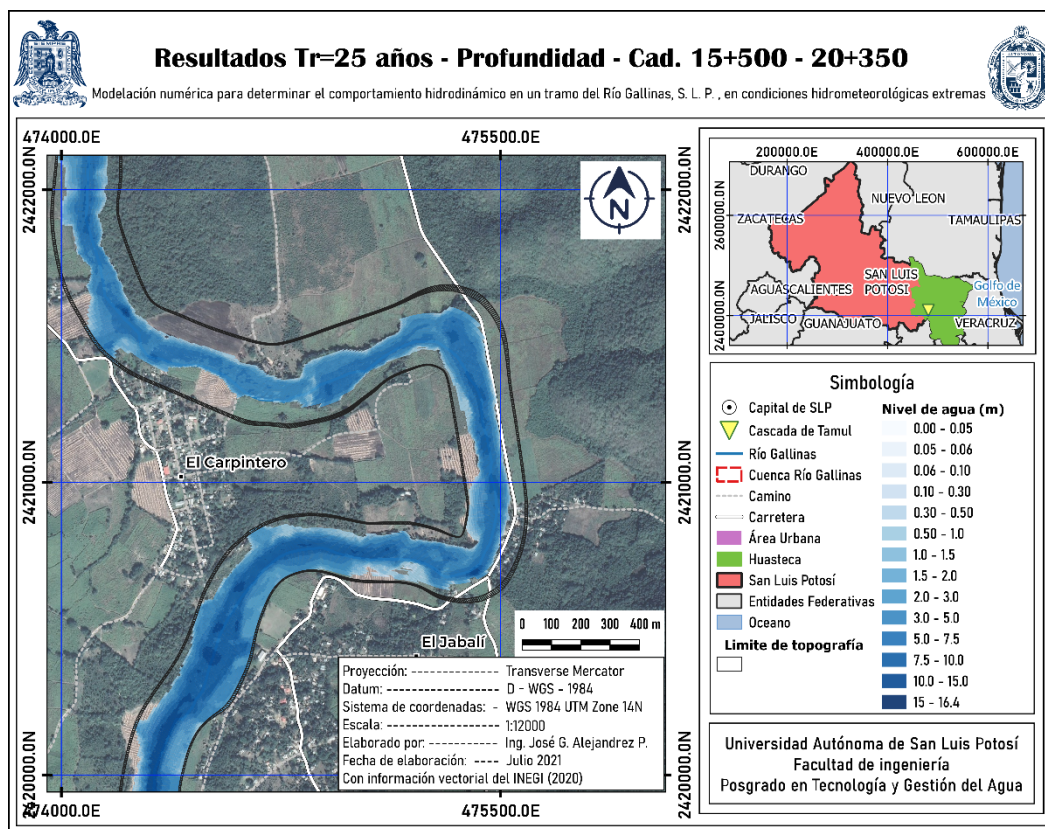


Figura 6.12. Nivel del agua (m) para Tr de 25 años (F).

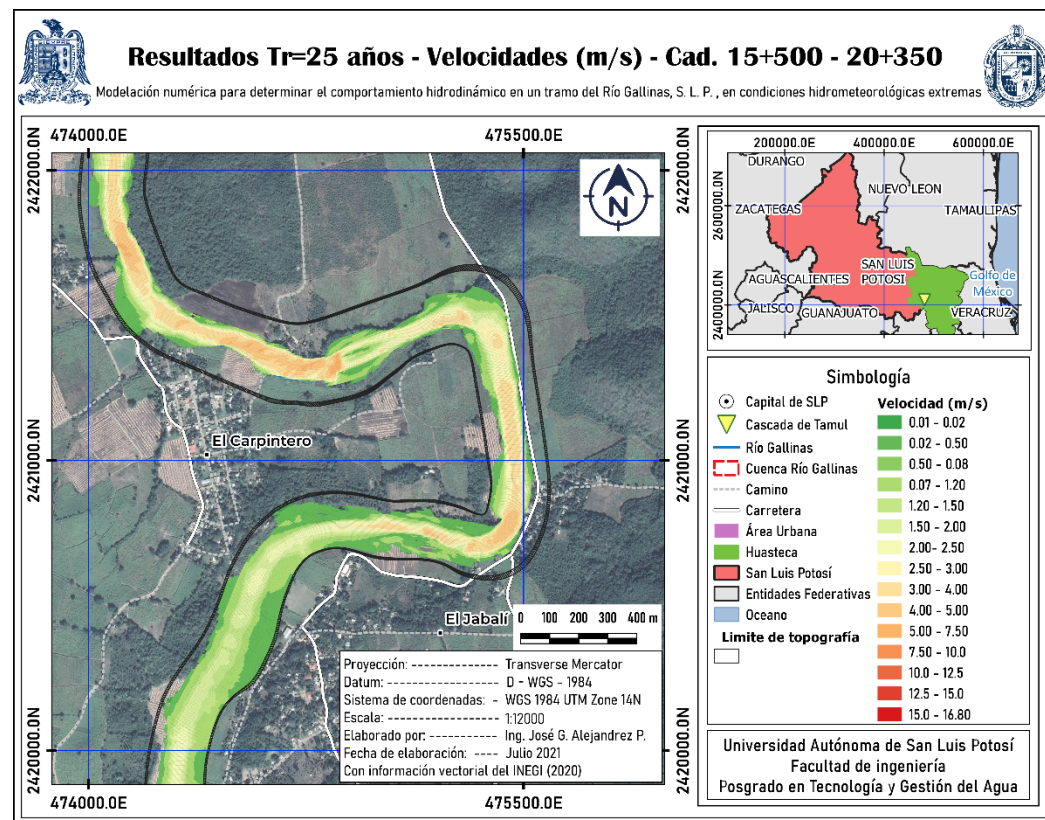


Figura 6.13. Velocidades (m/s) para Tr de 25 años (F).

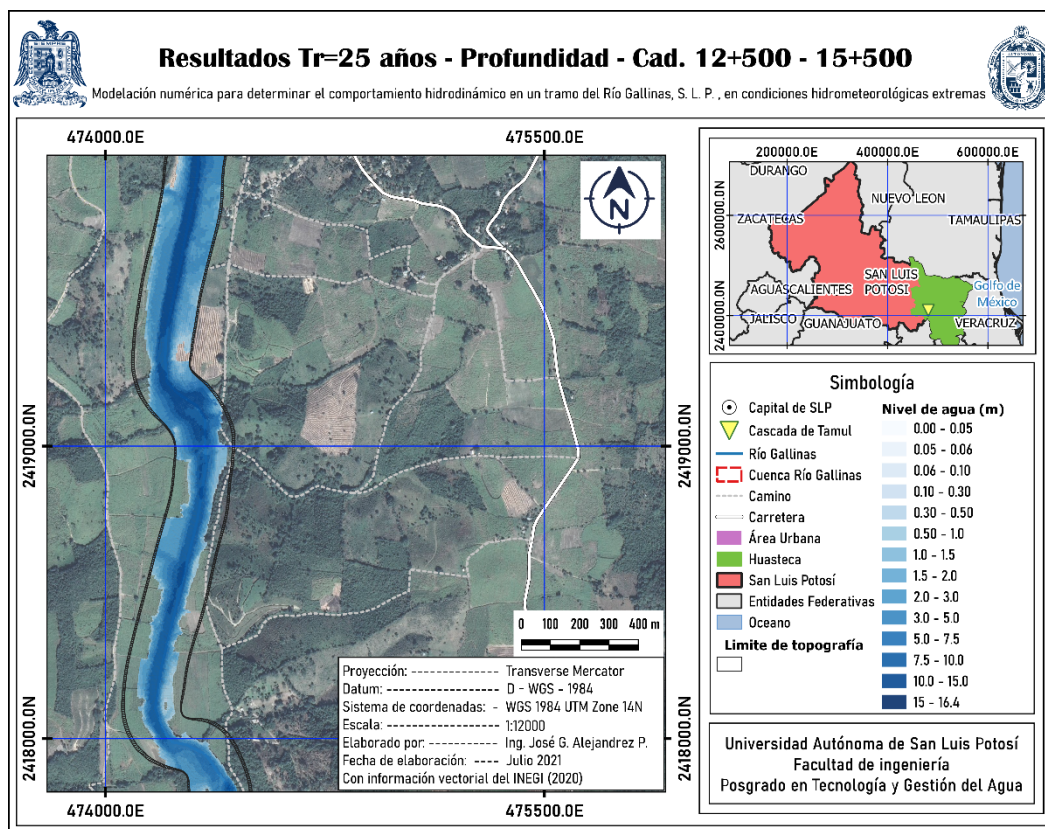


Figura 6.14. Nivel del agua (m) para Tr de 25 años (E).

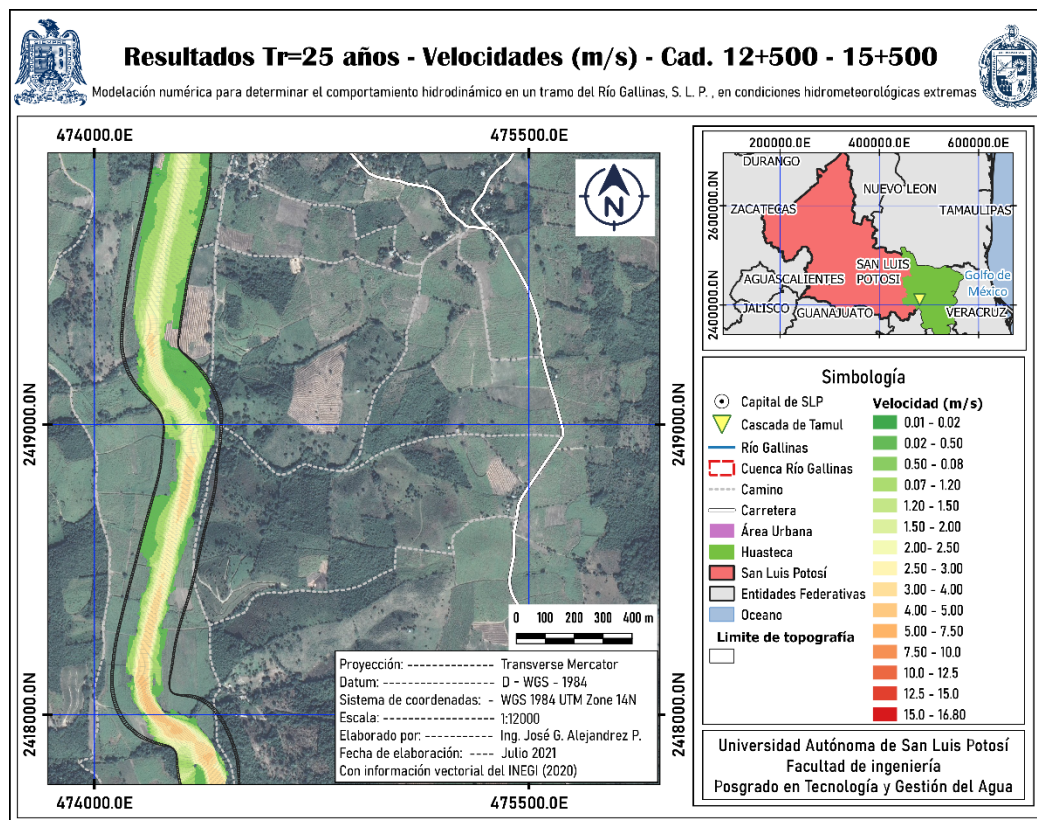


Figura 6.15. Velocidades (m/s) para Tr de 25 años (E).

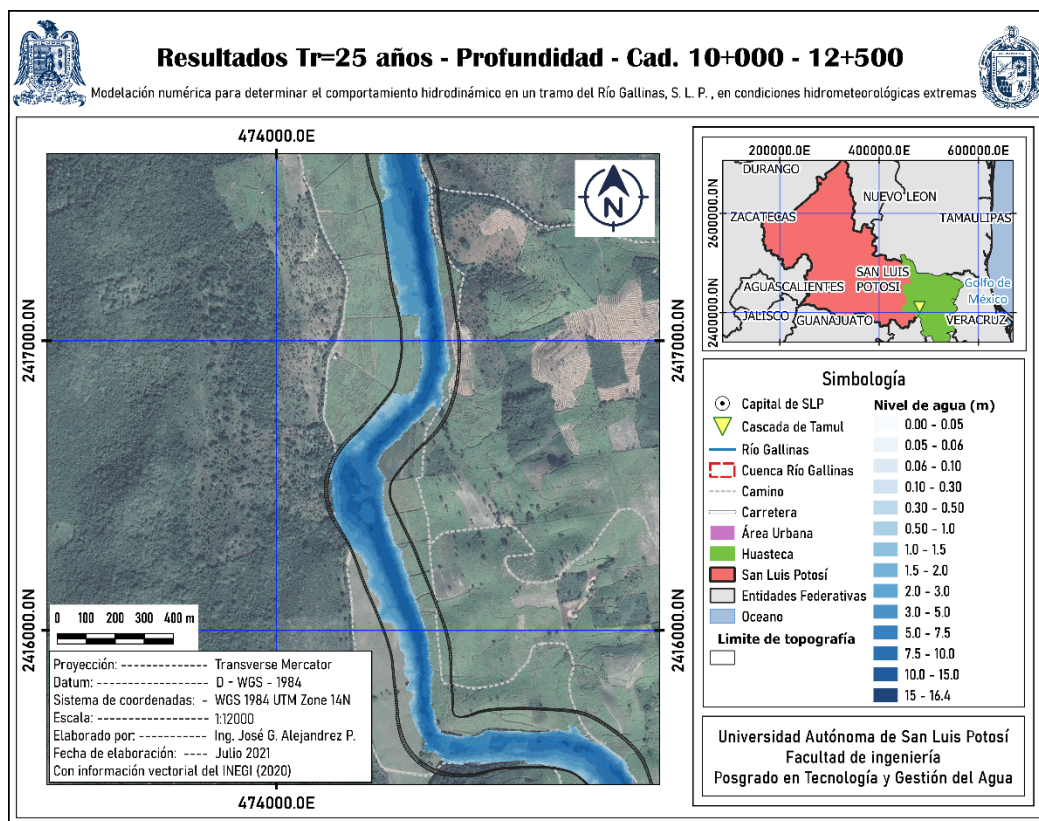


Figura 6.16. Nivel del agua (m) para Tr de 25 años (D).

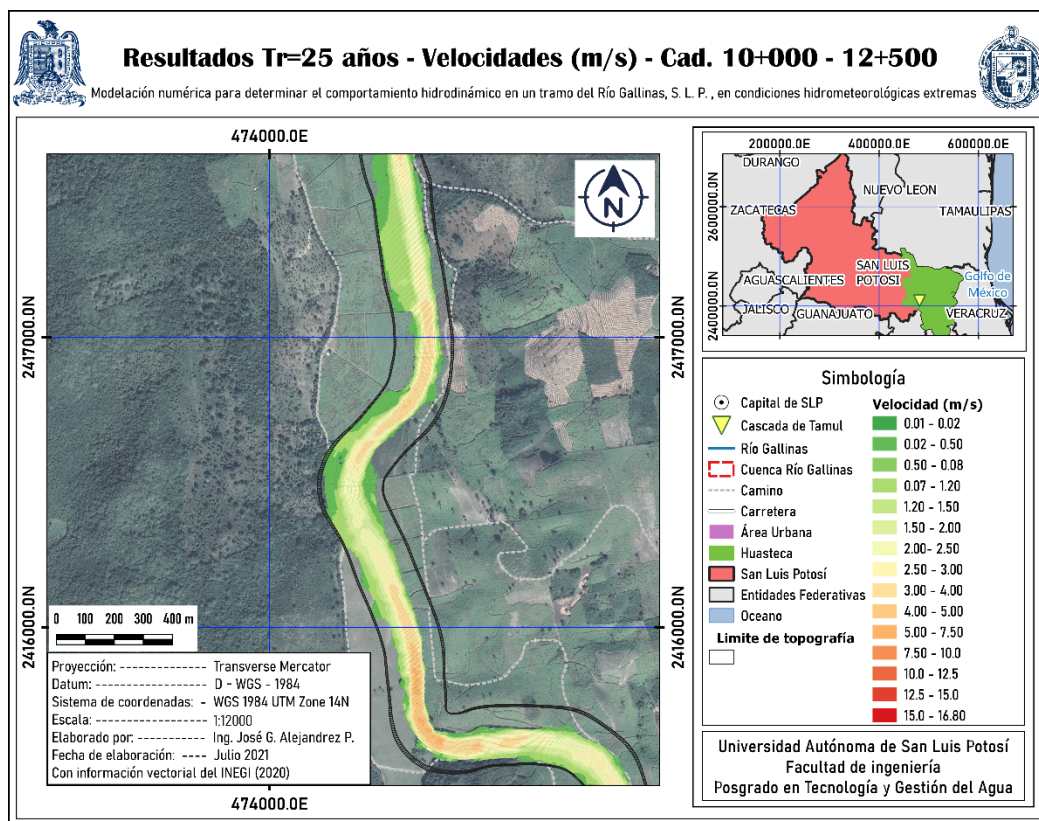


Figura 6.17. Velocidades (m/s) para Tr de 25 años (D).

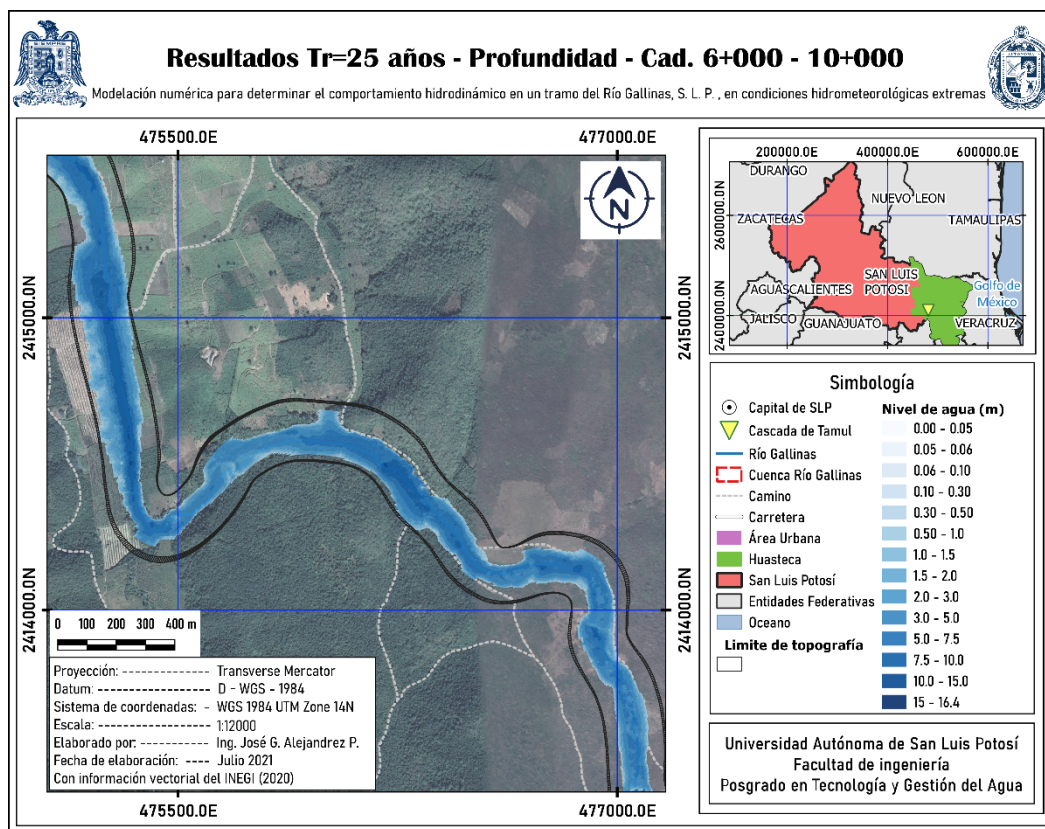


Figura 6.18. Nivel del agua (m) para Tr de 25 años (C).

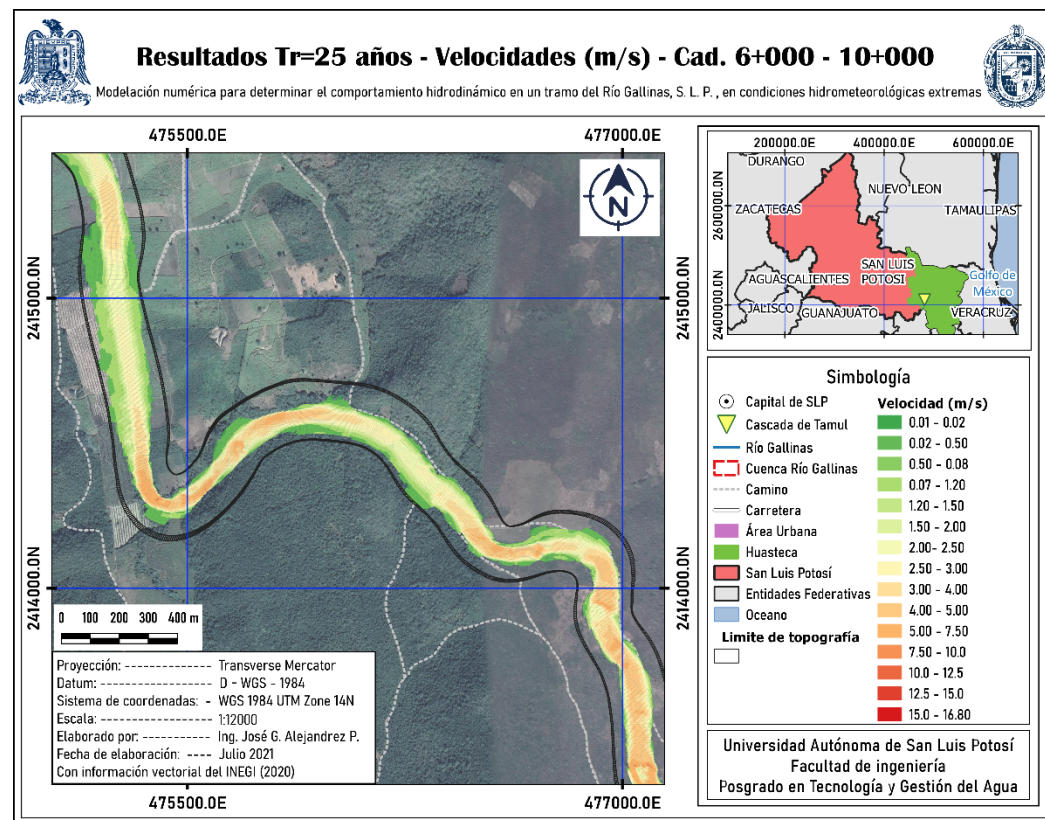


Figura 6.19. Velocidades (m/s) para Tr de 25 años (C).

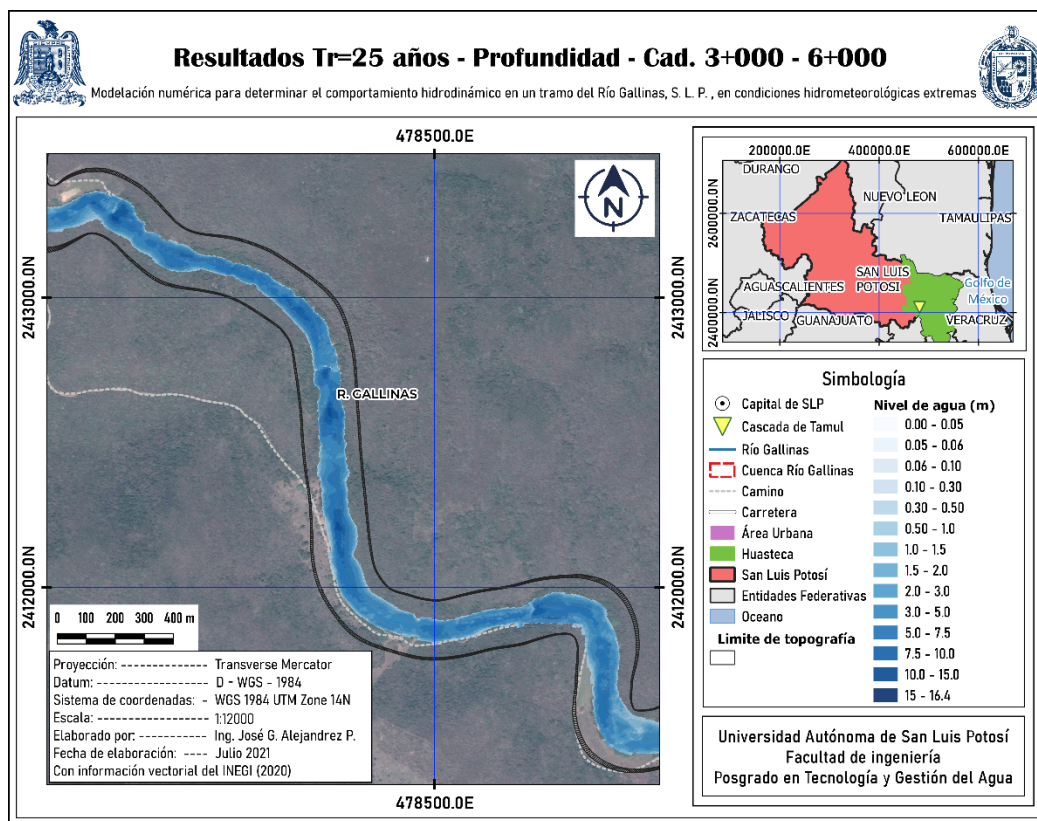


Figura 6.20. Nivel del agua (m) para Tr de 25 años (B).

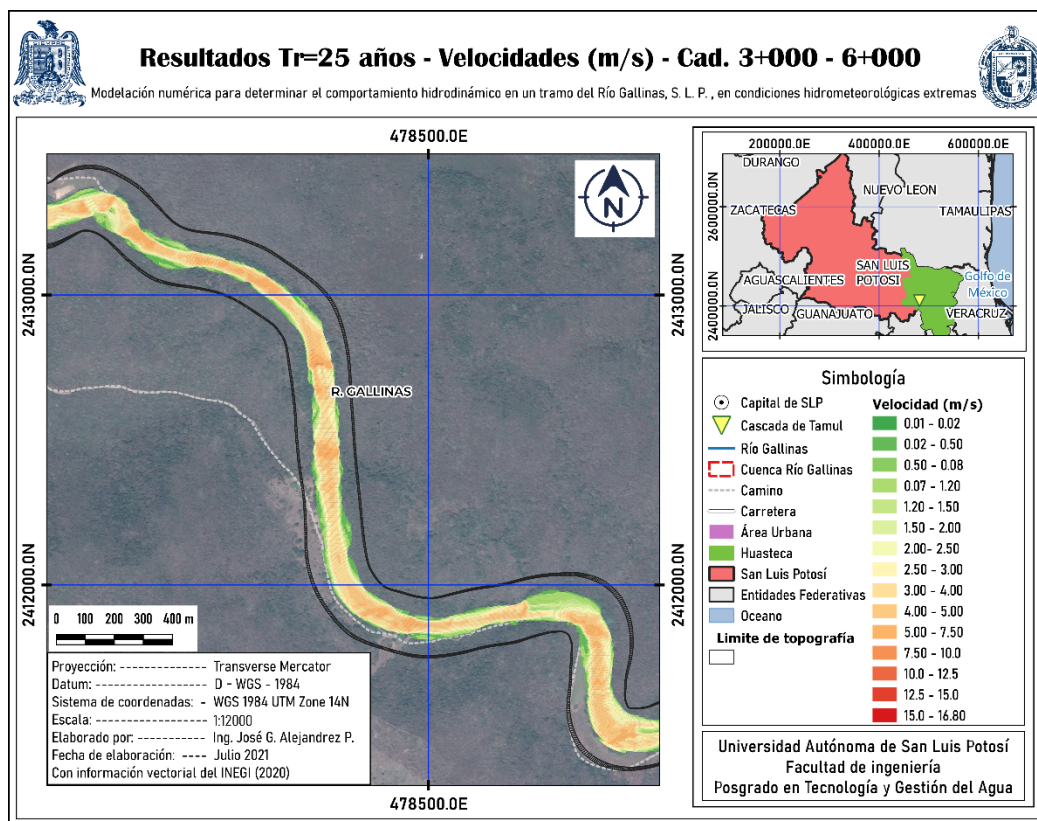


Figura 6.21. Velocidades (m/s) para Tr de 25 años (B).

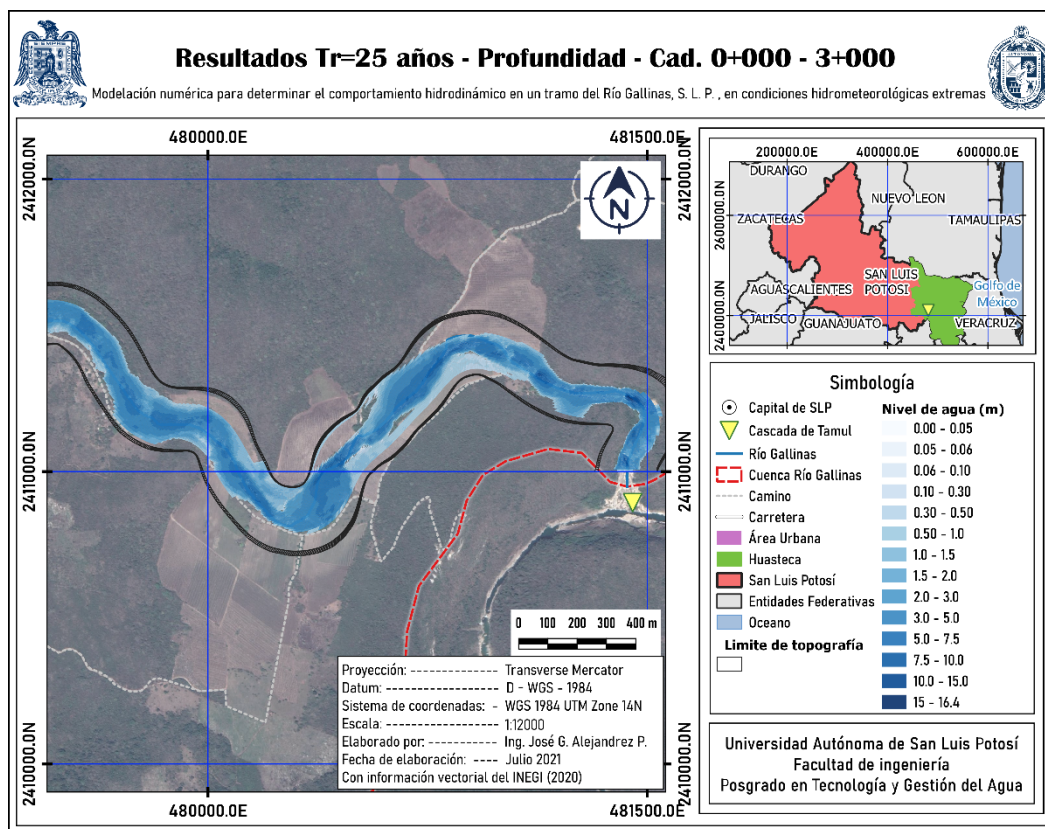


Figura 6.22. Nivel del agua (m) para Tr de 25 años (A).

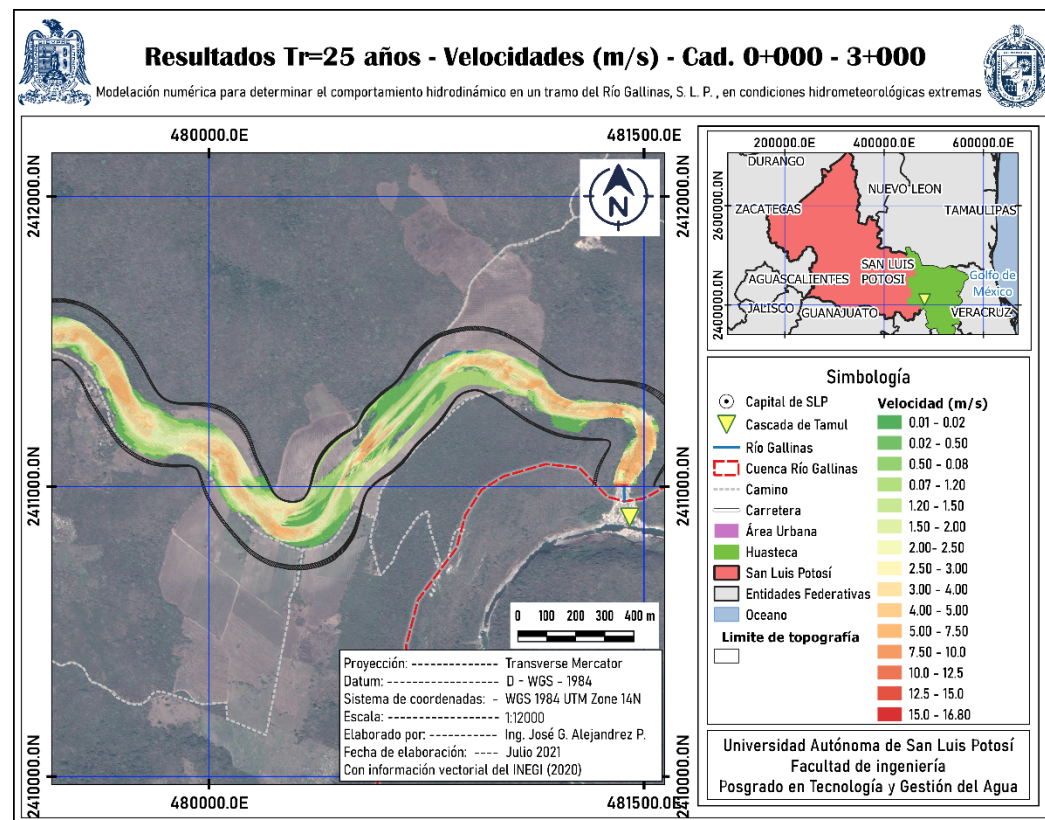


Figura 6.23. Velocidades (m/s) para Tr de 25 años (A).

6.1.4. Flujo de caudal ecológico

Con la intención de determinar las condiciones que permitan un flujo constante del caudal ecológico sobre el Río Gallinas y la cascada de Tamul, se realizó una simulación que contempla la infiltración presente en el Río Gallinas.

El valor de la infiltración queda establecido a partir de lo observado durante las campañas de aforo de caudales, de donde se obtiene una infiltración aproximada a los $3.1 \text{ m}^3/\text{s}$. Debido a la infiltración y al caudal ecológico estimado ($4.1 \text{ m}^3/\text{s}$), se introdujo en el modelo numérico un caudal de entrada constante de $7.2 \text{ m}^3/\text{s}$.

De dicha simulación se puede concluir que, al contar con un gasto de $7.2 \text{ m}^3/\text{s}$ en la estación hidrométrica *El Carpintero* (26267), se espera un caudal de salida constante que garantiza en cantidad. el flujo del caudal ecológico a la altura de la cascada de Tamul.

En la Figura 6.24 se aprecia el caudal de salida estimado con el modelo numérico EFDC Explorer, presente en la cascada de Tamul, así mismo, a continuación, se muestra el comportamiento general del cauce con un gasto inicial de $7.2 \text{ m}^3/\text{s}$.

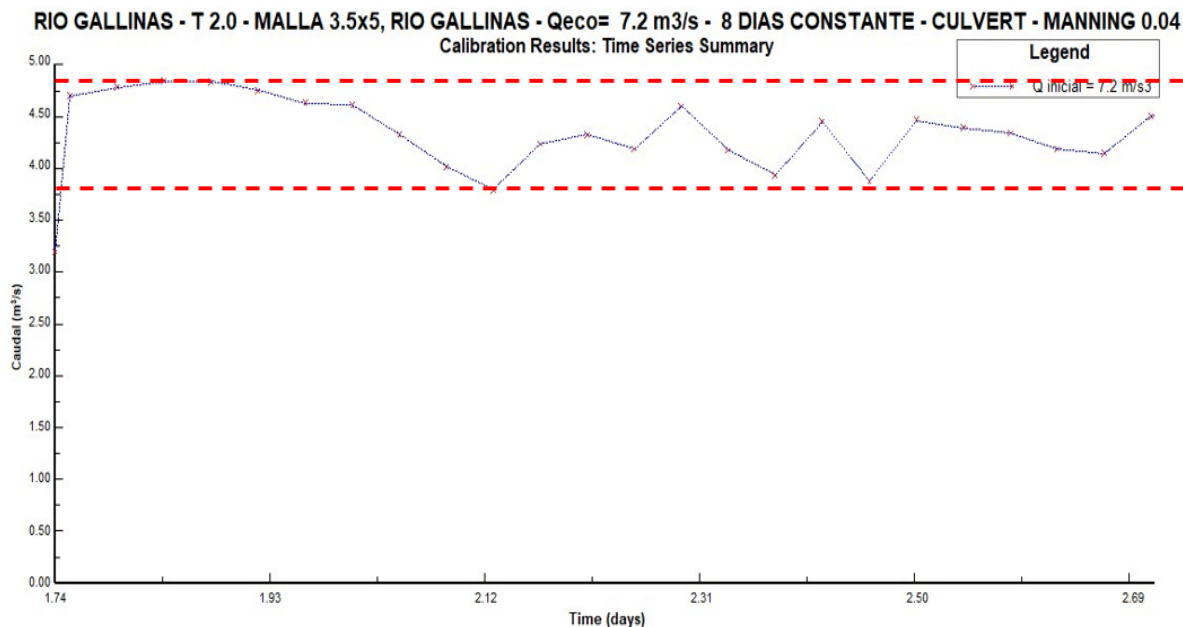


Figura 6.24. Comportamiento del caudal a la salida del modelo.

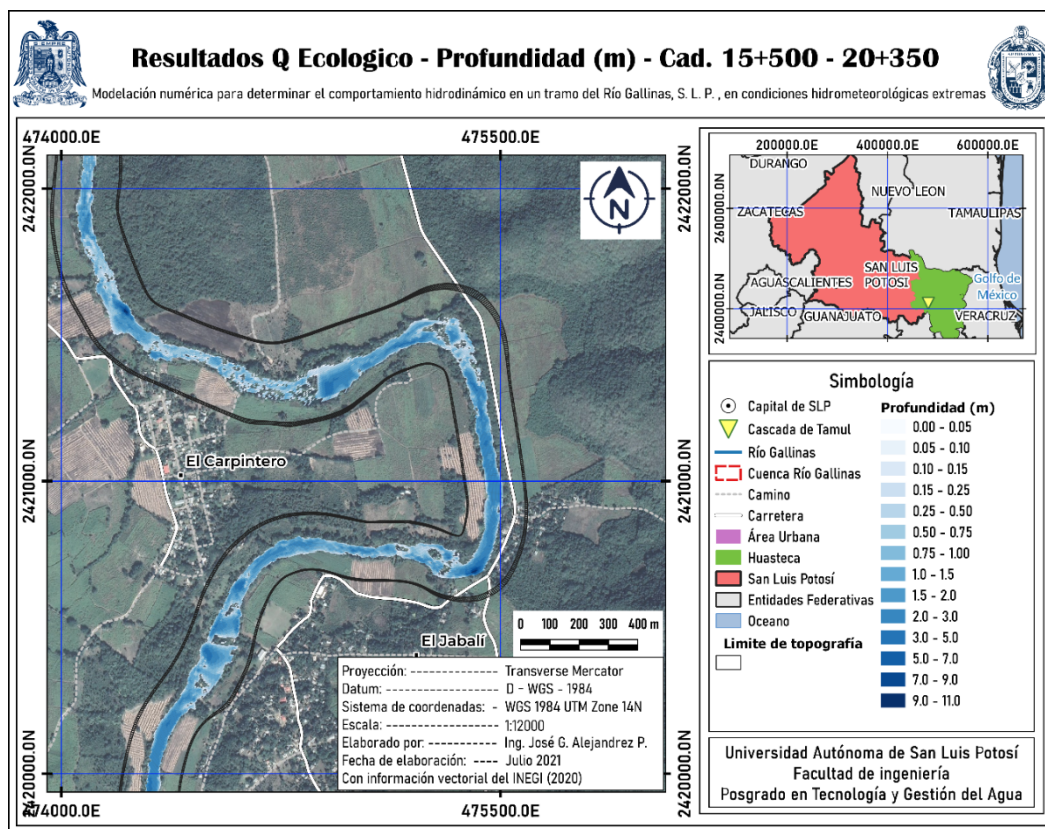


Figura 6.25. Nivel del agua (m) para caudal ecológico (F).

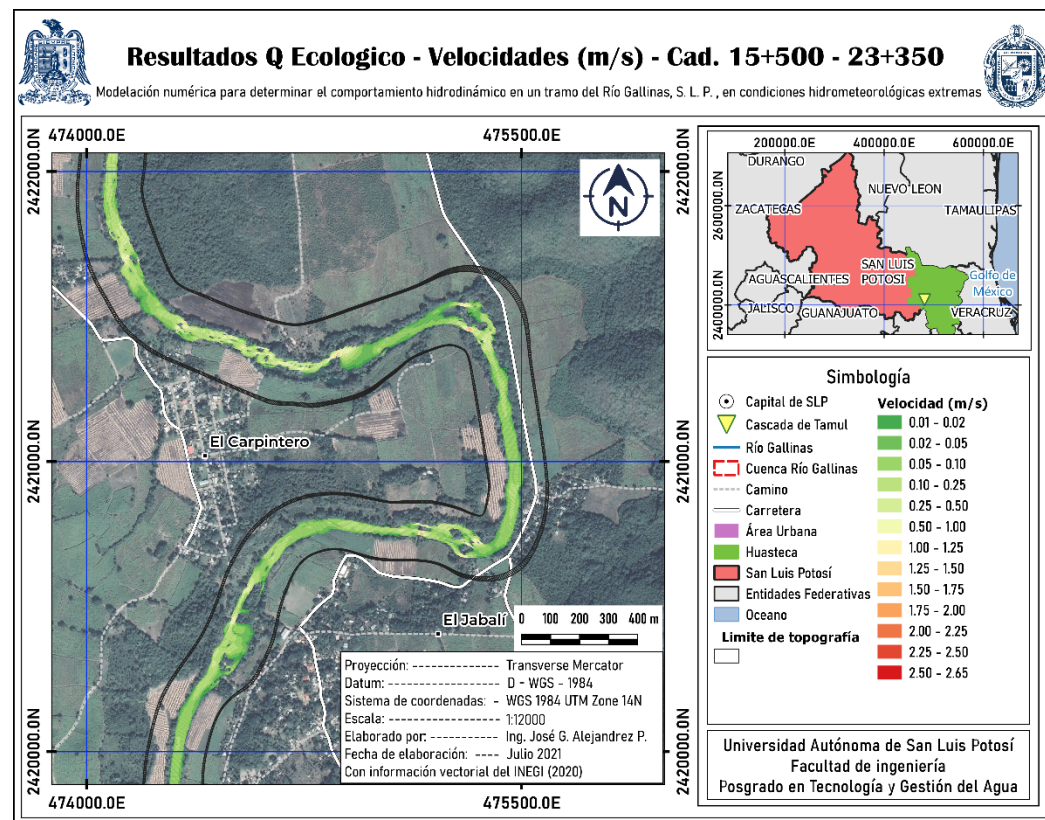


Figura 6.26. Velocidades (m/s) para caudal ecológico (F).

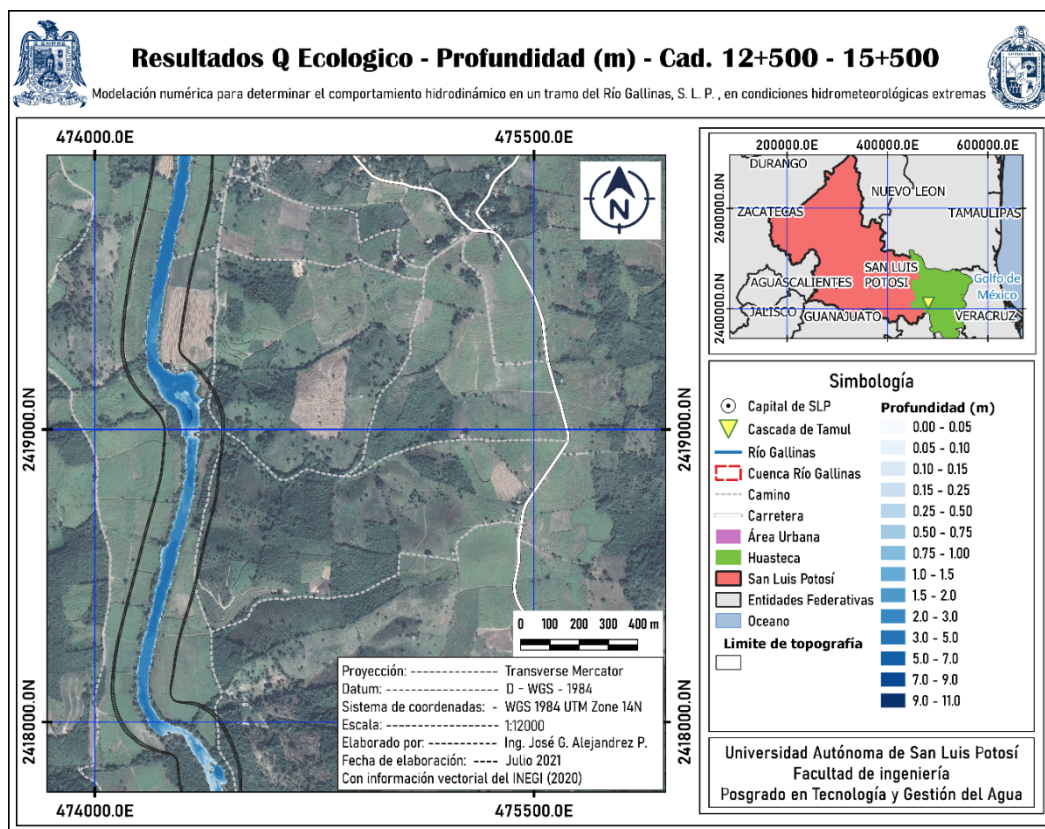


Figura 6.27. Nivel del agua (m) para caudal ecológico (E).

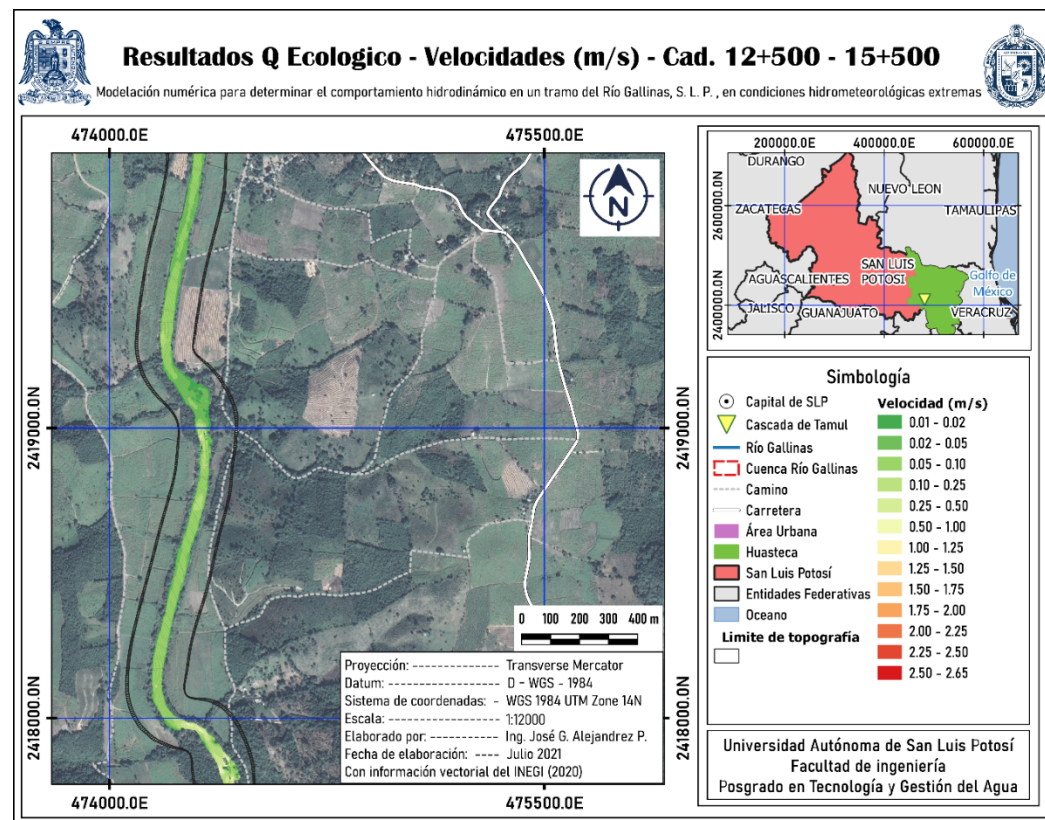


Figura 6.28. Velocidades (m/s) para caudal ecológico (E).

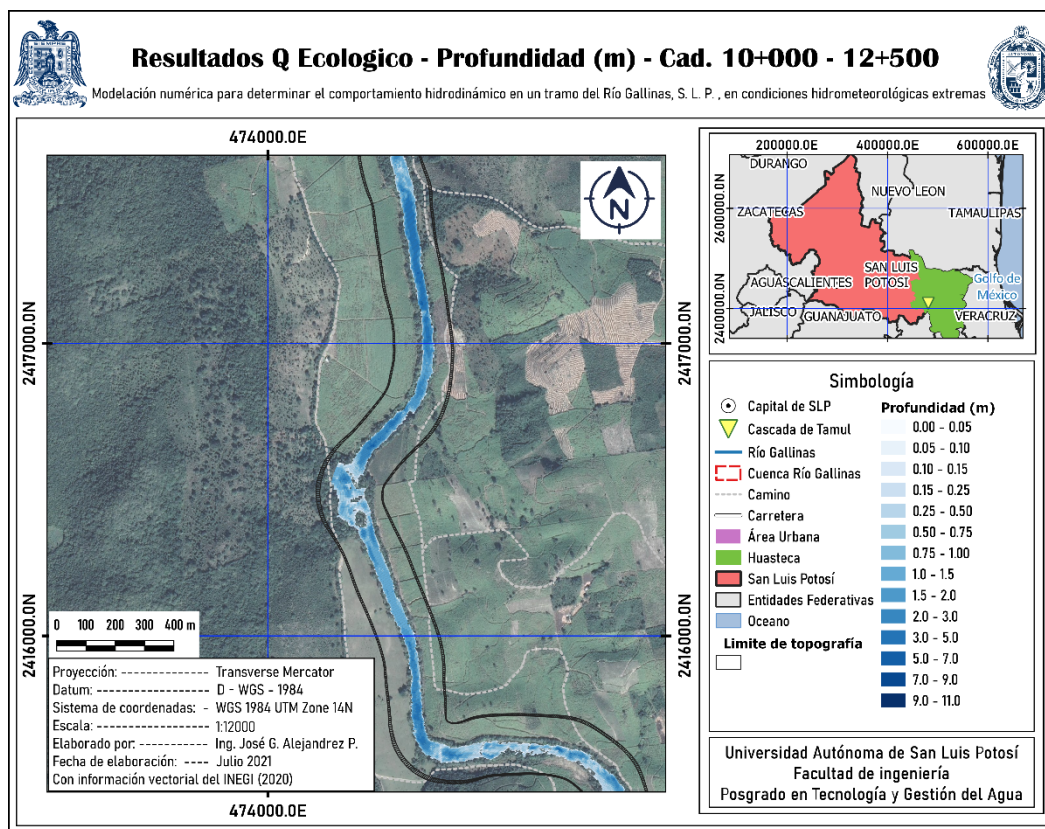


Figura 6.29. Nivel del agua (m) para caudal ecológico (D).

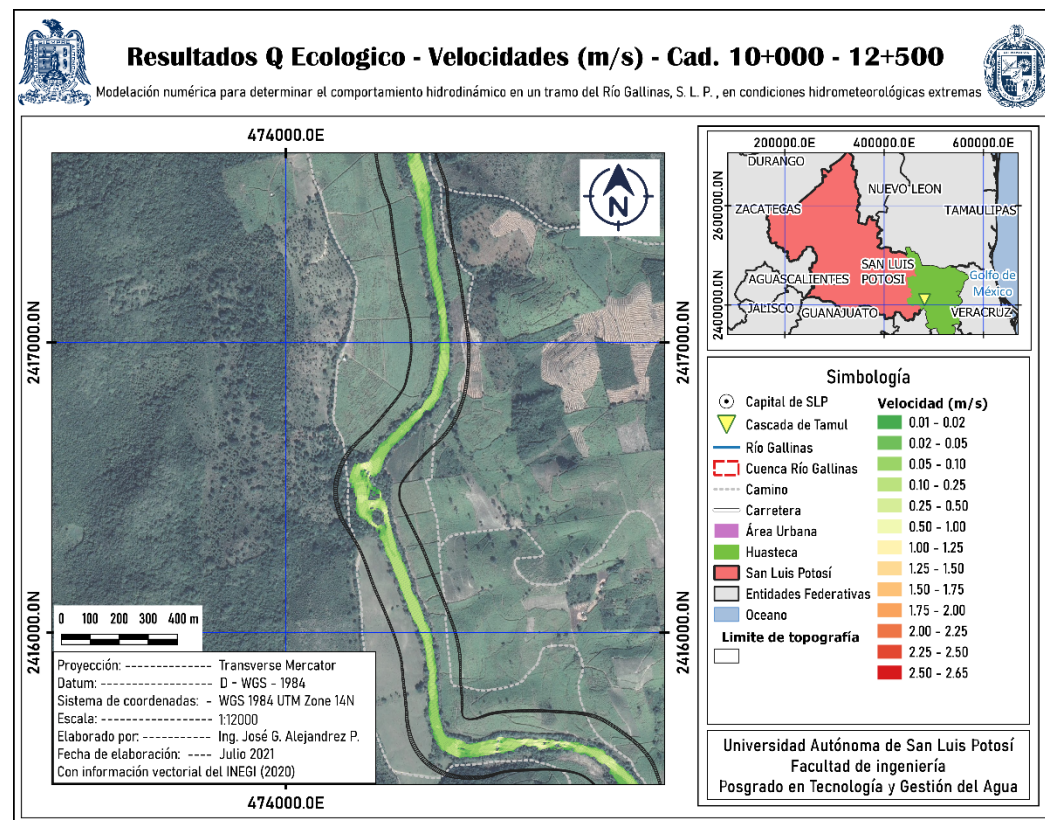


Figura 6.30. Velocidades (m/s) para caudal ecológico (D).

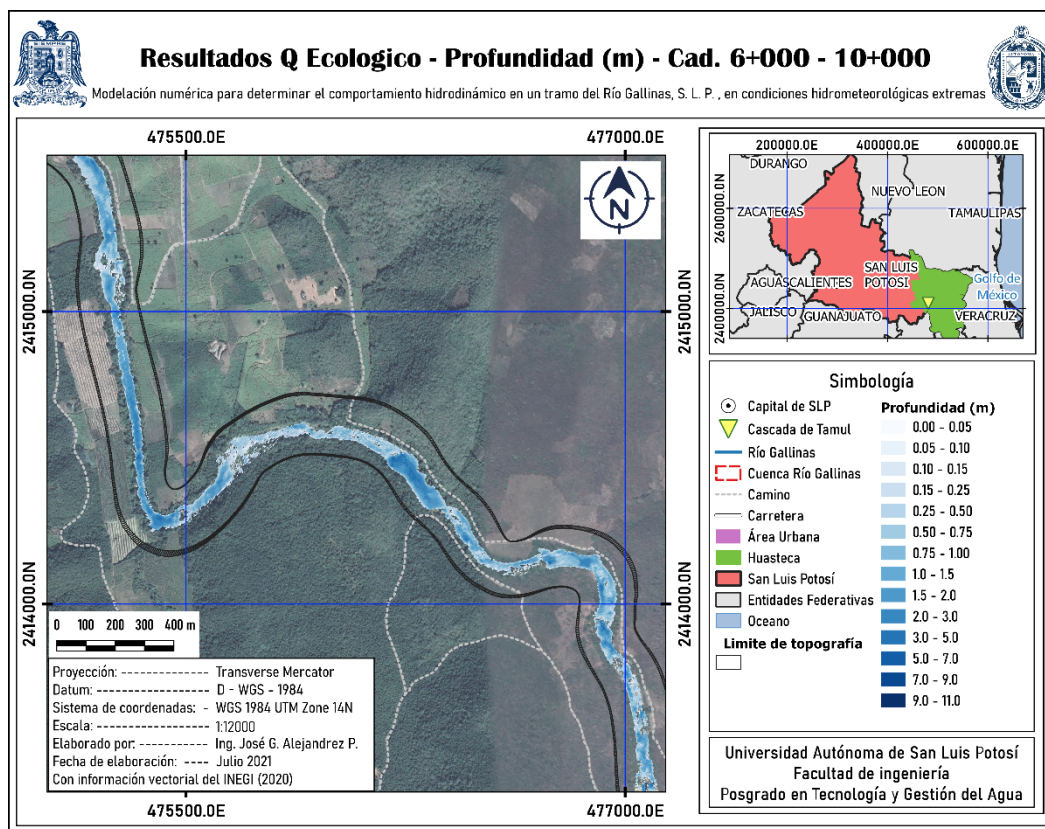


Figura 6.31. Nivel del agua (m) para caudal ecológico (C).

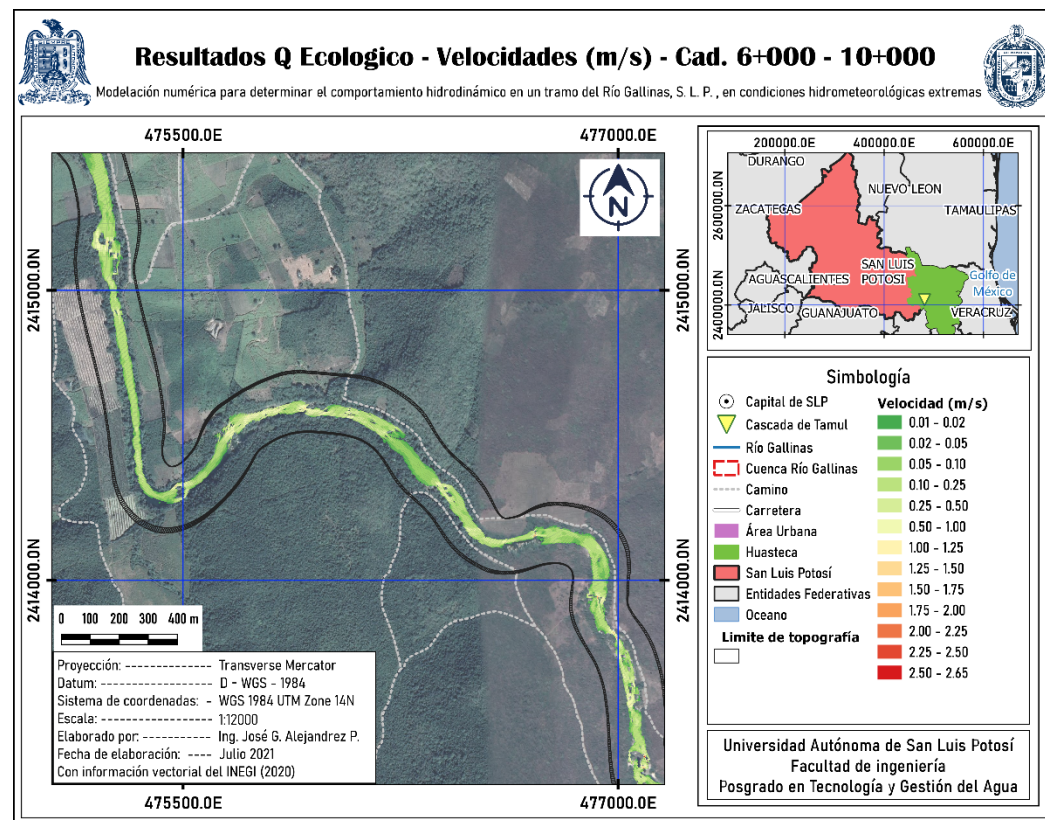


Figura 6.32. Velocidades (m/s) para caudal ecológico (C).

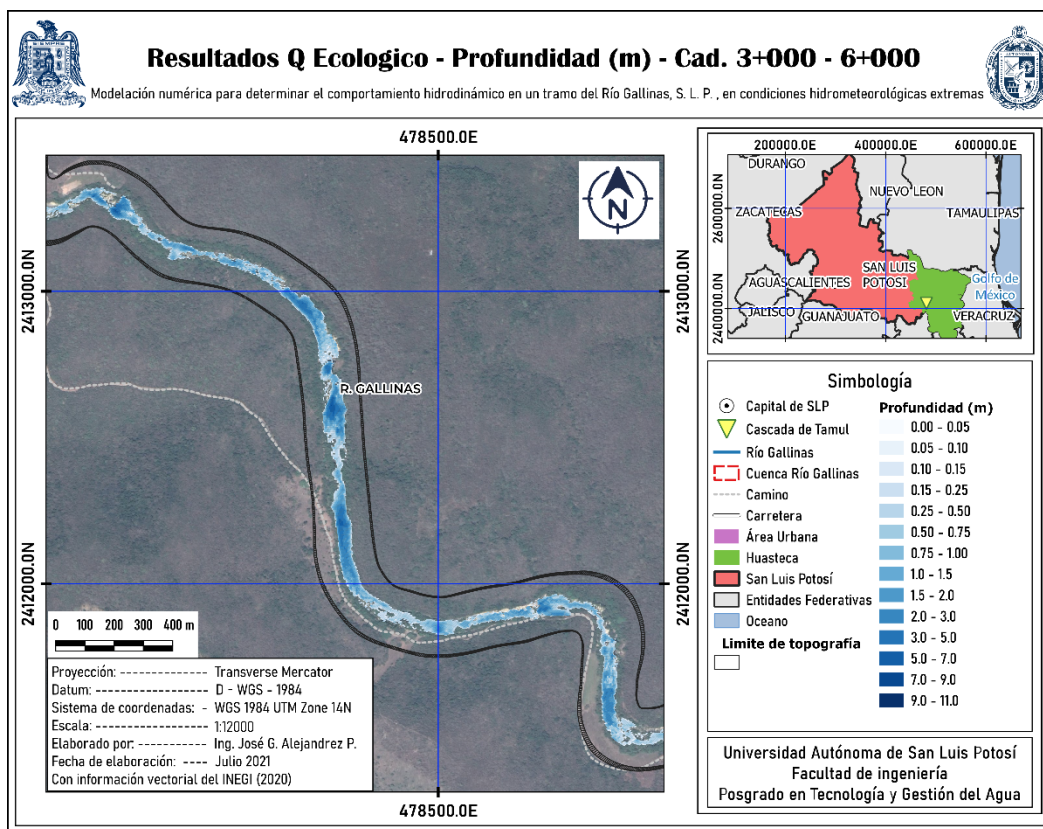


Figura 6.33. Nivel del agua (m) para caudal ecológico (B).

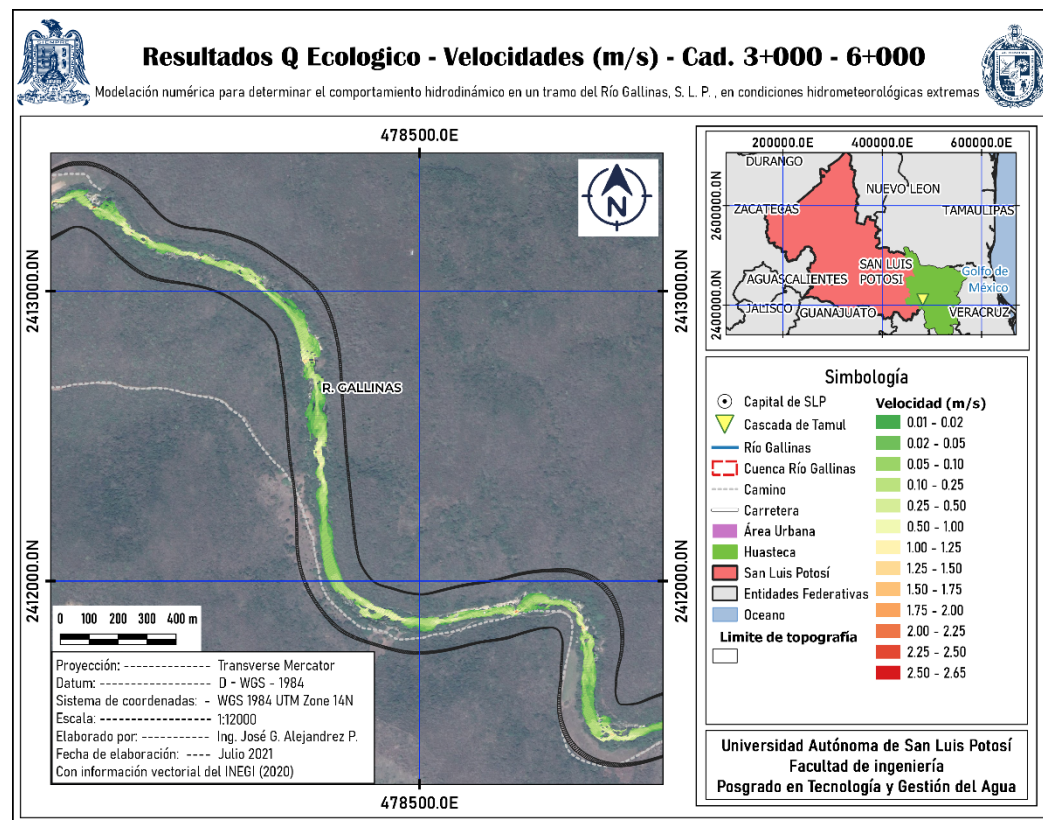


Figura 6.34. Velocidades (m/s) para caudal ecológico (B).

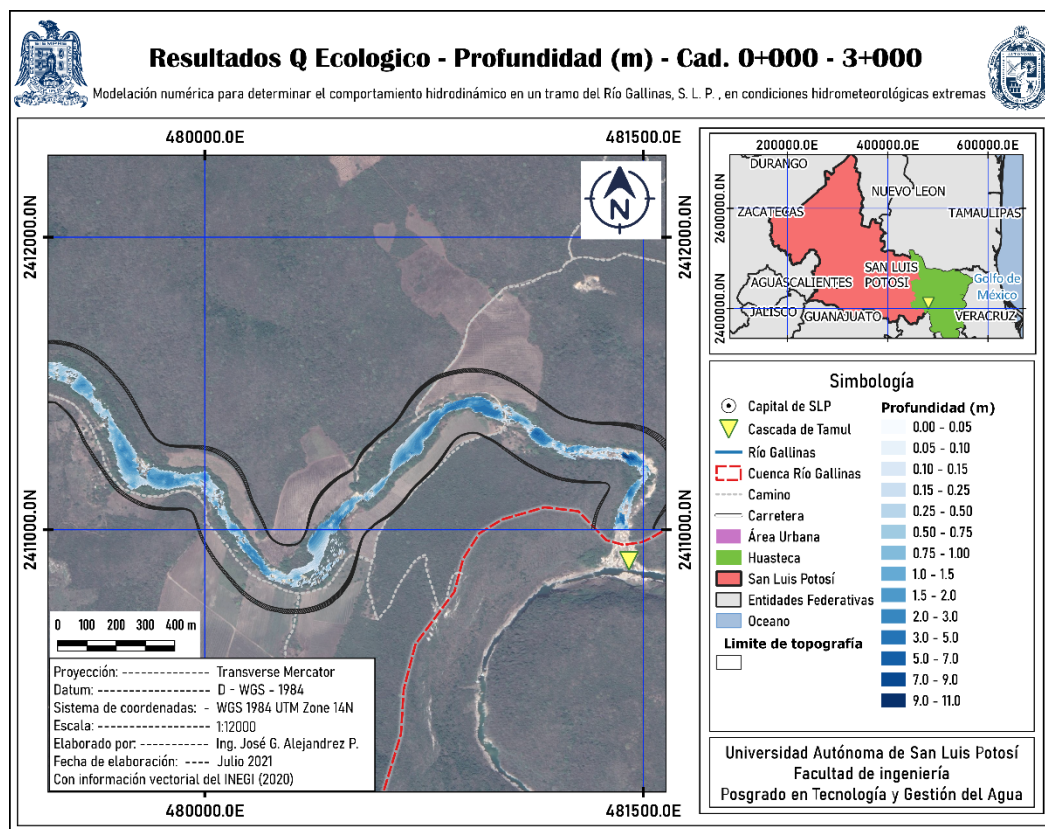


Figura 6.35. Nivel del agua (m) para caudal ecológico (A).

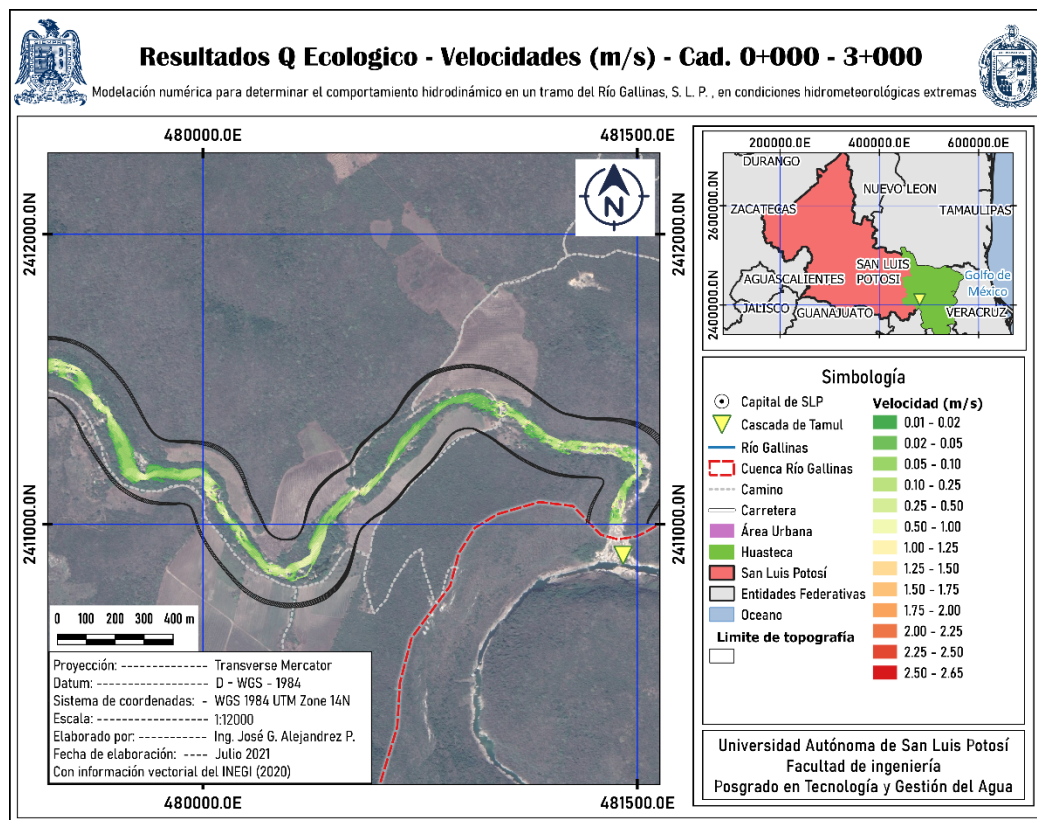


Figura 6.36. Velocidades (m/s) para caudal ecológico (A).

6.2. Hec – Ras

El modelo unidimensional Hec – Ras, está conformado por 815 secciones transversales de 220 metros de ancho cada sección (cadenamiento 0+000 a 20+350). Las secciones transversales fueron creadas mediante el software Autocad, que permite crear un eje de proyecto y secciones equidistantes a cada 25 metros, para generar y exportar las secciones transversales a partir del modelo digital de terreno generado del tramo de estudio.

Con las secciones transversales importadas en Hec – Ras, es necesario revisar que la topografía del cauce este correctamente representada, ajustando la ubicación de los hombros del cauce en cada sección, las distancias entre secciones al centro y en los hombros del cauce (*LOB y ROB, left and right over bank*), la rugosidad representativa del cauce, así como las condiciones iniciales y de salida del modelo.

El modelo numérico unidimensional, quedo determinado con una rugosidad de Manning igual 0.04, mientras que, las condiciones de entrada varían según el escenario planteado y las condiciones de salida, corresponden a una condición de salida en la cascada de Tamul (estación 0+000) y a las tres infiltraciones identificadas en distintos puntos del tramo del modelo.

6.2.1. Escenario de calibración del modelo

La calibración del modelo Hec – Ras, consiste en analizar la respuesta hidráulica del Río Gallinas, replicando el escenario de la campaña de aforo de caudal realizada en dos puntos, al inicio del modelo en el puente El Carpintero (estación 20+350) y aguas abajo, cercano a la Cascada de Tamul en la estación 0+800.

El primer punto aforado corresponde al caudal representativo de la condición de entrada en el modelo numérico, cuyo gasto promedio equivale a $3.8 \text{ m}^3/\text{s}$, y que va disminuyendo aguas abajo, producto de las infiltraciones presentes. Mientras que, en el segundo punto, ubicado en la estación 0+800, se espera que la simulación registre una velocidad de flujo semejante a los valores observados durante la campaña de medición, entre 0.027 m/s y 0.038 m/s , *Tabla 5.3. Valores de caudal y velocidad registrados a 800m de la cascada de Tamul.*

La velocidad estimada por Hec – Ras en la estación 0+800 fue de 0.04m/s, cuya magnitud, al ser comparada estadísticamente con los valores observados durante la campaña de medición, presenta un error cuadrático (RMSE) de 0.01, siendo esto un indicador de que el comportamiento de los resultados obtenidos durante la simulación es adecuado.

A continuación, se muestran los resultados extraídos de Hec – Ras (Tabla 6.2), así como las estaciones cercanas al punto de aforo (Figura 6.37).

Tabla 6.2. Resultados Río Gallinas en Hec – Ras para escenario de calibración.

Estación	Q Total (m ³ /s)	Elev. Min. Terreno Natural (m)	Elevación del Nivel del Agua (m)	Velocidad del canal (m/s)	Área Hidráulica (m ²)	Ancho de superficie del agua (m)	Froude # Chl
1000	1.2	179.67	179.88	1.14	1.05	8.12	1.01
975	1.2	178.74	179.72	0.28	4.3	8.44	0.12
950	0.7	177.92	179.72	0.05	13.8	14.32	0.02
925	0.7	178.55	179.72	0.05	13.61	19.1	0.02
900	0.7	178.96	179.72	0.12	5.92	13.29	0.06
875	0.7	179.42	179.66	1.02	0.69	6.77	1.02
850	0.7	178.48	179.62	0.05	13.91	26.13	0.02
825	0.7	178.45	179.62	0.03	22.67	37.26	0.01
800	0.7	177.88	179.62	0.04	19.98	18.76	0.01
775	0.7	179.07	179.61	0.34	2.07	6.64	0.19
750	0.7	179.29	179.47	1.11	0.63	5.12	1.01
725	0.7	177.9	178.3	0.53	1.32	5.82	0.36
700	0.7	177.89	178.23	0.38	1.85	9.33	0.27
675	0.7	177.65	178.08	0.81	0.87	3.9	0.55
650	0.7	177.41	177.62	0.86	0.82	10.1	0.96
625	0.7	172.41	177.48	0.01	133.32	45.66	0
600	0.7	174.13	177.48	0.01	84.14	42.45	0
575	0.7	176.25	177.48	0.05	15.48	23.39	0.02
550	0.7	176.86	177.48	0.09	7.55	19.91	0.05
525	0.7	177.14	177.4	1.09	0.64	5.43	1.01
500	0.7	175.05	176.26	0.07	10.04	16.15	0.03
475	0.7	174.73	176.26	0.04	16.61	26.73	0.02
450	0.7	175.28	176.26	0.22	3.21	11.73	0.13
425	0.7	175.81	176.21	0.63	1.11	5.45	0.45
400	0.7	175.47	176.2	0.14	5.08	19.81	0.09
375	0.7	175.95	176.13	0.98	0.71	7.37	1.01
350	0.7	174.63	174.89	1.29	0.54	4.23	1.15
325	0.7	170.72	172.18	0.1	7.14	10.92	0.04
300	0.7	161.79	172.18	0.01	135.49	31.14	0
275	0.7	166.88	172.18	0.01	105.79	40.98	0
250	0.7	170.41	172.18	0.03	23.66	25.96	0.01

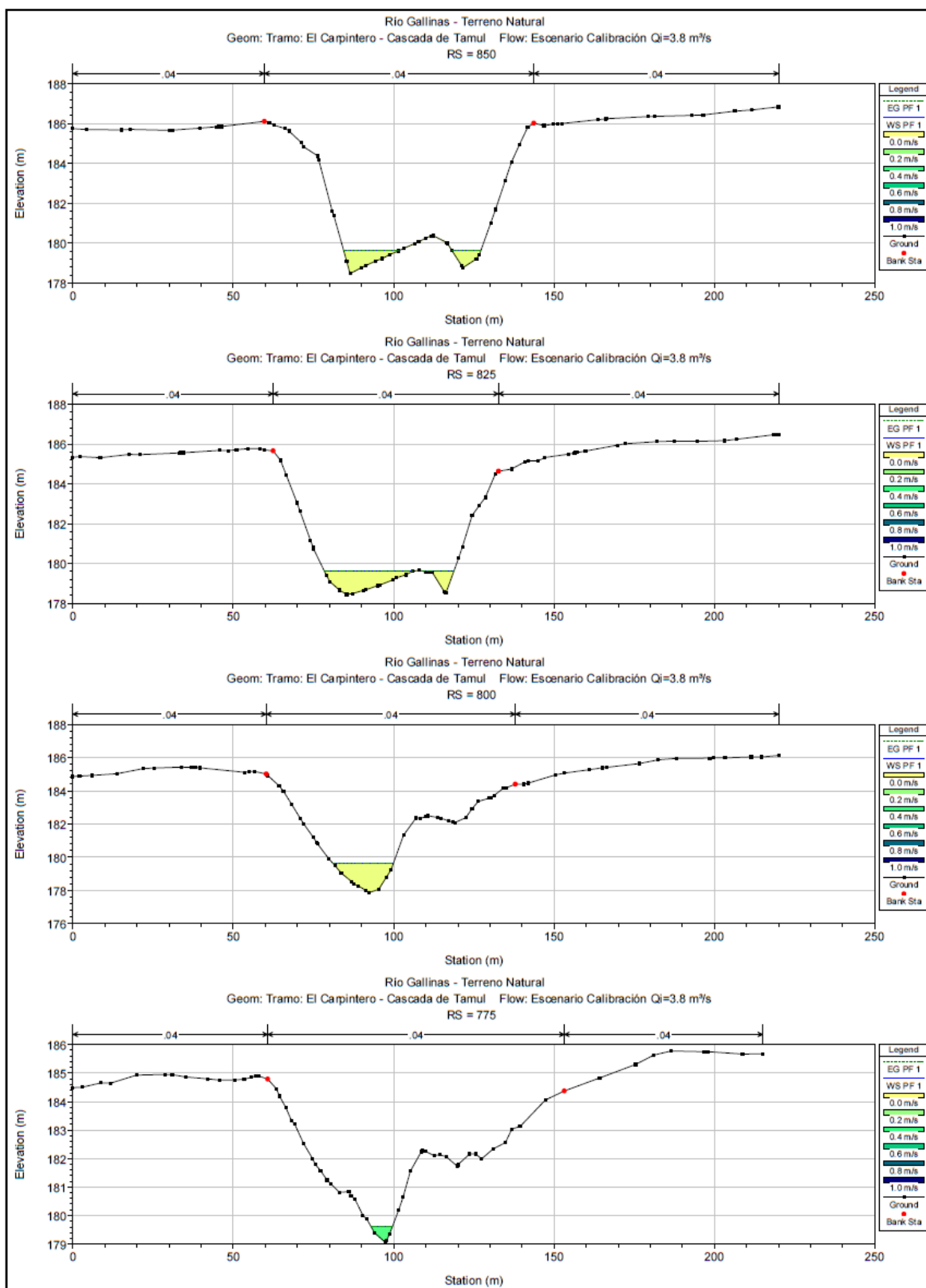


Figura 6.37. Secciones transversales con velocidades (estaciones 0+775 - 0+850).

6.2.2. Caudal Tr de 25 años

Con el modelo Hec – Ras calibrado, se procede a simular el comportamiento del Río Gallinas antes los escenarios planteados, siendo uno de ellos el comportamiento del cauce ante un caudal atípico, correspondiente a un gasto máximo igual a $1231.8 \text{ m}^3/\text{s}$ asociado a un periodo de retorno de 25 años.

La simulación analiza el comportamiento de las variables hidráulicas del tramo del modelo desde la estación 20+350 a la estación 0+000, con secciones transversales a cada 25 metros.

De los perfiles extraídos del modelo unidimensional, se aprecia que aguas arriba del tramo del modelo, constantemente se ve rebasado o está al límite la capacidad hidráulica del cauce, desbordando en distintos puntos, e inundando principalmente áreas agrícolas y asentamientos cercanos.

En la parte baja del modelo, al incrementar la pendiente del terreno natural del cauce, aumenta la velocidad del flujo de manera general, además debido a la presencia de cuerpos cerriles, aumenta una capacidad hidráulica, dejando de presentar puntos de desbordamientos en la mayoría de las secciones.

A continuación, se presentan los perfiles del terreno natural, los hombros del cauce y el tirante de agua para el caudal de $1231.8 \text{ m}^3/\text{s}$, en tramos de 5 kilómetros, así como las variables hidráulicas de las secciones transversales a cada 250 metros (Tabla 6.3).

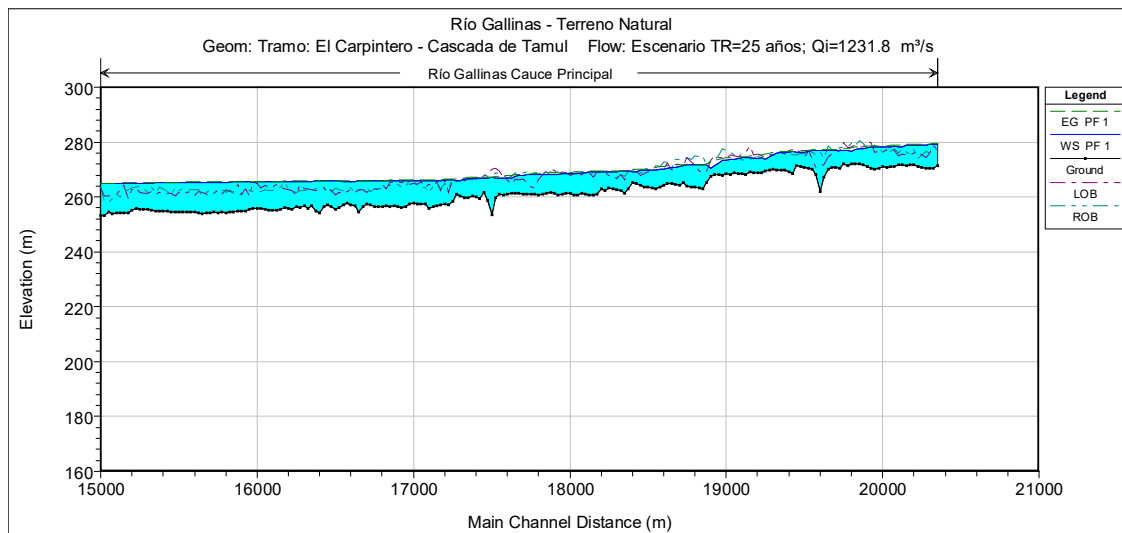


Figura 6.38. Perfil del tirante de agua; $Q=1231.8 \text{ m}^3/\text{s}$ – cadenamiento 15+000 – 20+350.

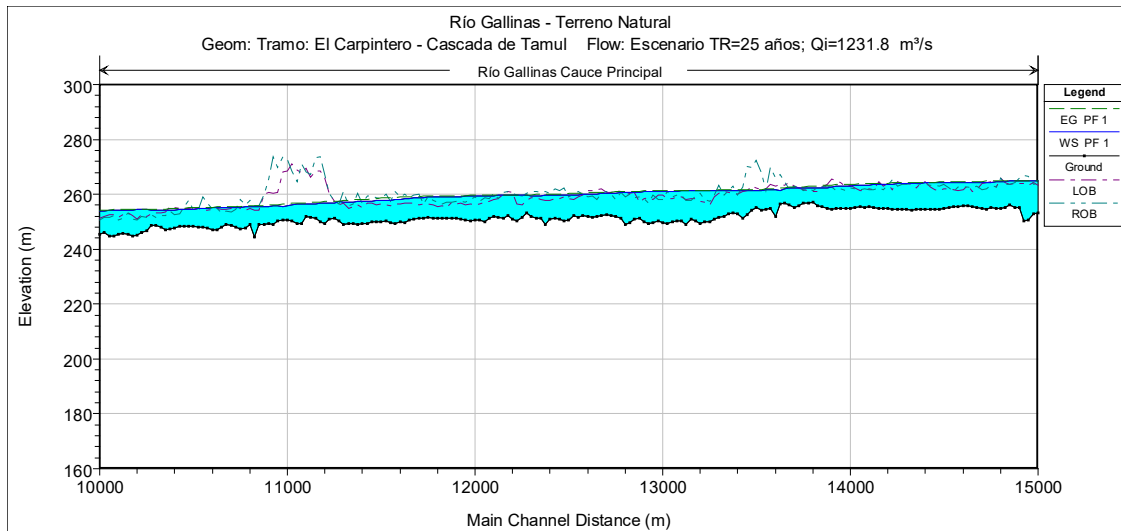


Figura 6.39. Perfil del tirante de agua; $Q=1231.8 \text{ m}^3/\text{s}$ – cadenamiento 10+000 – 15+000.

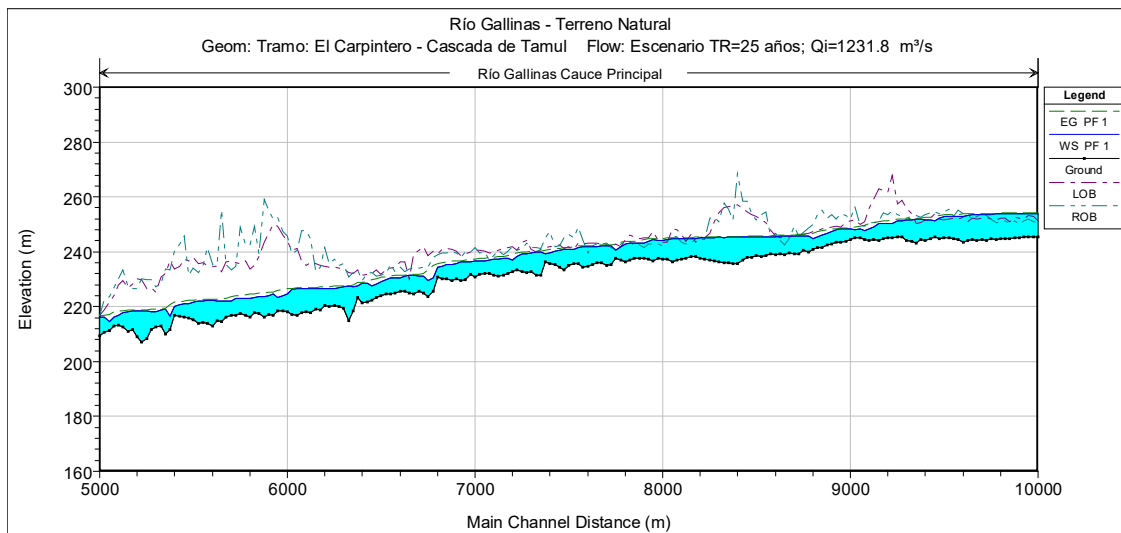


Figura 6.40. Perfil del tirante de agua; $Q=1231.8 \text{ m}^3/\text{s}$ – cadenamiento 5+000 – 10+000.

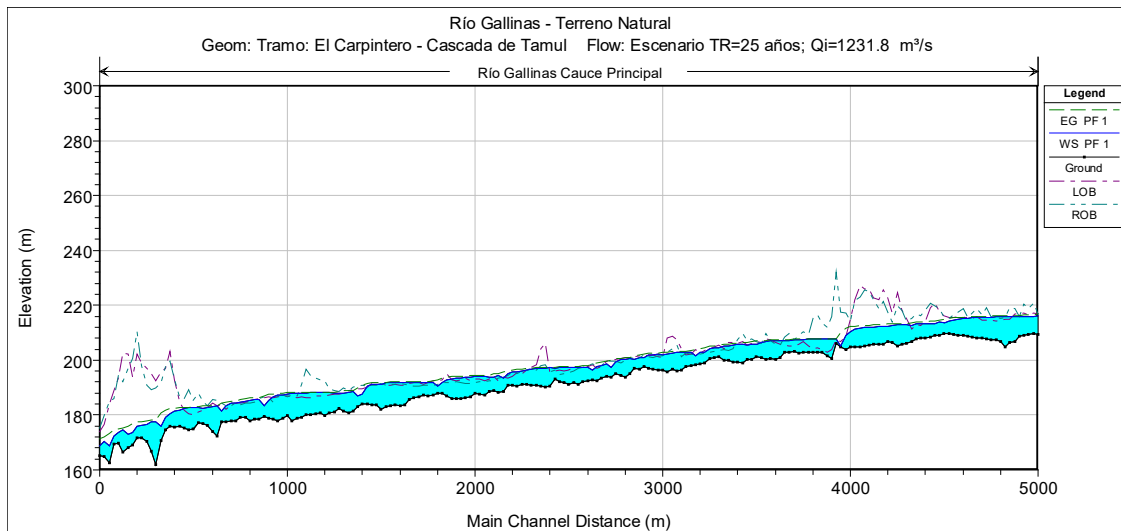


Figura 6.41. Perfil del tirante de agua; $Q=1231.8 \text{ m}^3/\text{s}$ – cadenamiento 0+000 – 5+000.

Tabla 6.3. Reporte de variables hidráulicas a cada 250 metros $Q=1231.8\text{m}^3/\text{s}$.

Estación (m)	Q Total (m^3/s)	Elev. Min. Terreno Nat. (m)	Elevación del Nivel del Agua (m)	Velocidad del canal (m/s)	Área Hidráulica (m^2)	Ancho de la superficie del agua (m)	Froude # Chl
20+350	1231.8	271.28	279.09	2.6	517.76	152.04	0.35
20+250	1231.8	270.85	278.8	3.29	466.84	147.46	0.42
20+000	1231.8	271.13	278.34	2.38	552.75	165.84	0.34
19+750	1231.8	271.98	276.97	3.15	391.38	114.21	0.54
19+500	1231.8	270.66	276.36	3.57	375.84	127.54	0.57
19+250	1231.8	269.53	273.81	6.19	199.09	65.99	1.14
19+000	1231.8	268.48	273.37	4.07	302.78	90.65	0.71
18+750	1231.8	263.84	271.67	1.76	701.33	145.07	0.26
18+500	1231.8	263.72	269.83	3.2	388.25	135.45	0.58
18+250	1231.8	263.23	269.24	2.05	603.55	146.64	0.32
18+000	1231.8	261.28	268.54	2.78	458.89	146.9	0.41
17+750	1231.8	261.12	268.03	2.72	513.12	138.4	0.39
17+500	1231.8	253.63	267.06	2.05	599.59	124.77	0.3
17+250	1231.8	258.53	266.23	1.96	630.07	152.62	0.29
17+000	1231.8	257.78	265.96	1.87	668.02	158.65	0.27
16+750	1231.8	256.44	265.74	2.35	626.56	162.49	0.28
16+500	1231.8	255.46	265.74	1.17	1205.42	220	0.13
16+250	1231.8	256.36	265.67	1.35	1035.11	187.51	0.15
16+000	1231.8	255.82	265.47	1.99	700.63	175.66	0.24
15+750	1231.8	254.14	265.36	1.71	868.27	204.21	0.19
15+500	1231.8	254.63	265.24	1.79	821.09	195.59	0.2
15+250	1231.8	255.62	264.87	2.73	483.79	102.76	0.32
15+000	1231.8	253.25	264.98	0.97	1329.08	220	0.11
14+750	1230.9	255.03	264.41	2.93	427.39	95.43	0.41
14+500	1230.9	254.99	264.25	2.27	638.59	158.39	0.28
14+250	1230.9	254.6	263.82	2.65	469.8	118.28	0.39
14+000	1230.9	254.91	263	3.71	334.77	72.99	0.5
13+750	1230.9	256.74	262.44	2.6	497.31	198.29	0.47
13+500	1230.9	255.2	261.31	2.93	420.31	103.89	0.46
13+250	1230.9	249.84	261.37	1.63	922.39	191.71	0.18
13+000	1230.9	249.71	261.06	2.43	597.88	158.03	0.28
12+750	1230.9	251.89	260.42	3.06	418.52	93.86	0.41
12+500	1230.9	250.72	259.73	3.22	401.04	126.76	0.46
12+250	1230.9	251.6	259.63	1.22	1034.14	193.4	0.16
12+000	1230.9	250.67	259.35	2.28	596.96	145.01	0.3
11+750	1230.9	251.49	258.95	2.7	515.96	151.8	0.37
11+500	1230.9	249.89	257.73	4.18	308.67	95.63	0.63
11+250	1230.9	251.32	256.94	3.46	376.38	123.04	0.57
11+000	1230.9	250.77	255.74	3.91	315.18	103.88	0.72
10+750	1230.9	247.49	255.27	2.67	461.58	133.08	0.45
10+500	1230.9	248.37	254.67	3.06	403.8	107.07	0.48

Continuación de Tabla 6.3. Reporte de variables hidráulicas a cada 250 metros $Q=1231.8\text{m}^3/\text{s}$.

Estación (m)	Q Total (m^3/s)	Elev. Min. Terreno Nat. (m)	Elevación del Nivel del Agua (m)	Velocidad del canal (m/s)	Área Hidráulica (m^2)	Ancho de la superficie del agua (m)	Froude # Chl
10+250	1230.9	246.87	254.37	1.41	906.86	187.81	0.19
10+000	1230.9	245.37	253.97	2.55	556.33	157.07	0.32
9+750	1230.9	244.77	253.7	2.42	552.18	150.52	0.32
9+500	1230.9	245.1	252.84	3.48	392.79	107.04	0.5
9+250	1230.9	245.48	251.3	3.22	381.96	93.28	0.51
9+000	1230.9	244.34	248.26	2.93	420.38	158.18	0.57
8+750	1230.9	240.63	245.87	3.09	398.68	124.71	0.55
8+500	1230.9	238.45	245.36	2.45	502	109.48	0.37
8+250	1230.9	237.15	245.23	1.71	717.78	133.54	0.24
8+000	1230.9	237.38	244.23	3.79	341.6	88.48	0.55
7+750	1230.9	237.63	240.48	6.91	178.13	103.72	1.68
7+500	1230.9	234.92	240.84	3.83	321.06	87.28	0.64
7+250	1230.9	232.78	239.18	3.7	332.91	92.57	0.62
7+000	1230.9	230.69	236.55	4	307.87	100.4	0.73
6+750	1230.9	223.51	229.47	8.66	142.12	71.64	1.96
6+500	1230.9	223.84	229.24	5.38	228.94	78.09	1
6+250	1230.9	220.52	226.71	3.81	322.71	86.05	0.63
6+000	1230.9	218.05	224.72	5.95	206.94	57.99	1.01
5+750	1230.9	217.38	223.09	4.48	274.74	67.7	0.71
5+500	1230.9	215.27	221.72	3.75	328.04	79.54	0.59
5+250	1230.9	208.53	218.45	2.78	442.76	88.23	0.4
5+000	1230.9	209.4	216.26	2.96	415.49	102.09	0.47
4+750	1230.9	207.36	215.65	2.88	433.07	98.23	0.4
4+500	1230.9	209.6	213.73	5.03	244.58	95.29	1
4+250	1230.9	205.23	212.98	2.6	472.71	90.88	0.36
4+000	1230.9	204.83	210.48	5.76	213.71	63.22	1
3+750	1229.2	202.84	207.52	1.47	625.97	151.93	0.29
3+500	1229.2	201.23	205.79	4.78	257.7	88.49	0.88
3+250	1229.2	200.73	204.08	4.48	286.27	148.01	0.96
3+000	1229.2	196.37	201.91	4.29	298.32	110.08	0.75
2+750	1229.2	195.05	199.29	4.95	248.35	99.42	1
2+500	1229.2	191.11	197.38	2.21	588.19	200.63	0.35
2+250	1229.2	191.3	196.15	3.73	346.77	138.19	0.68
2+000	1229.2	188.01	193.98	2.74	519.42	194.52	0.43
1+750	1229.2	186.8	191.88	2.61	478.3	152.84	0.46
1+500	1229.2	181.95	191.34	3.47	437.76	218.12	0.46
1+250	1229.2	181.05	188.09	2.55	489.55	173.61	0.45
1+000	1229.2	179.67	187.69	3	470.18	203.57	0.44
0+750	1228.7	179.29	184.72	4.54	288.98	177.07	0.86
0+500	1228.7	175.05	182.66	2.35	544.91	140.76	0.36
0+250	1228.7	170.41	176.47	5.33	230.67	59.54	0.86
0+000	1228.7	165.25	168.66	7.43	165.39	82.16	1.67

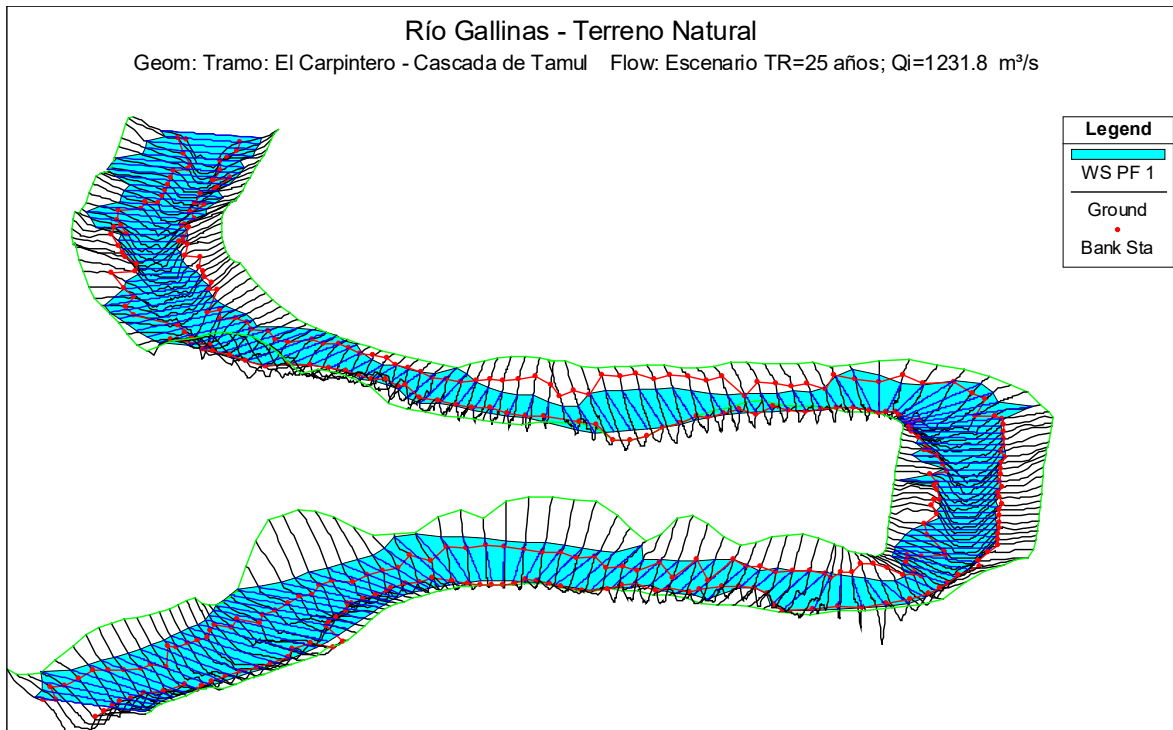


Figura 6.42. Imagen tridimensional; $Q=1231.8 \text{ m}^3/\text{s}$ – Cadenamiento 17+000 – 20+350.

6.2.3. Flujo de caudal ecológico

Al simular el modelo numérico Hec – Ras con un gasto de entrada igual a $7.2 \text{ m}^3/\text{s}$, se logra un flujo constante de al menos $4.1 \text{ m}^3/\text{s}$, al final del tramo del modelo en la cascada de Tamul, equivalente al caudal ecológico estimado para el Río Gallinas.

Debido a que el tramo de modelo presenta infiltraciones distribuidas espacialmente, el caudal transportado en el modelo presenta variaciones según el cadenamiento que se analizó.

De la modelación numérica, a continuación, se muestra el perfil del terreno natural con el tirante de agua y los hombros del cauce, en cadenamientos de 5 kilómetros, además se muestra una imagen tridimensional del cadenamiento 0+000 (cascada de Tamul) al cadenamiento 2+000 (Figura 6.47), y las variables hidráulicas estimadas a cada 250 metros (Tabla 6.4).

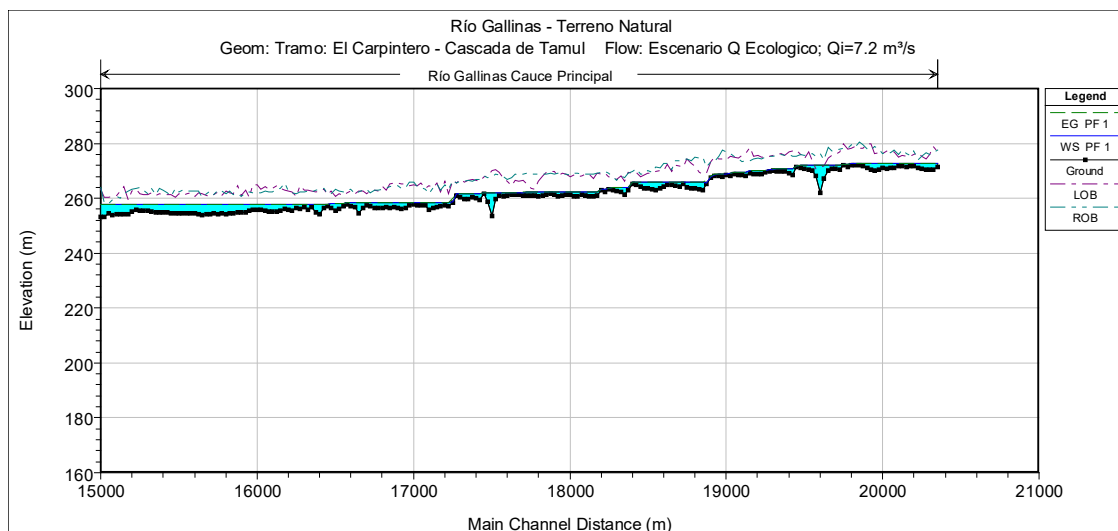


Figura 6.43. Perfil del tirante de agua; Q ecológico – cadenamiento 15+000 – 20+350.

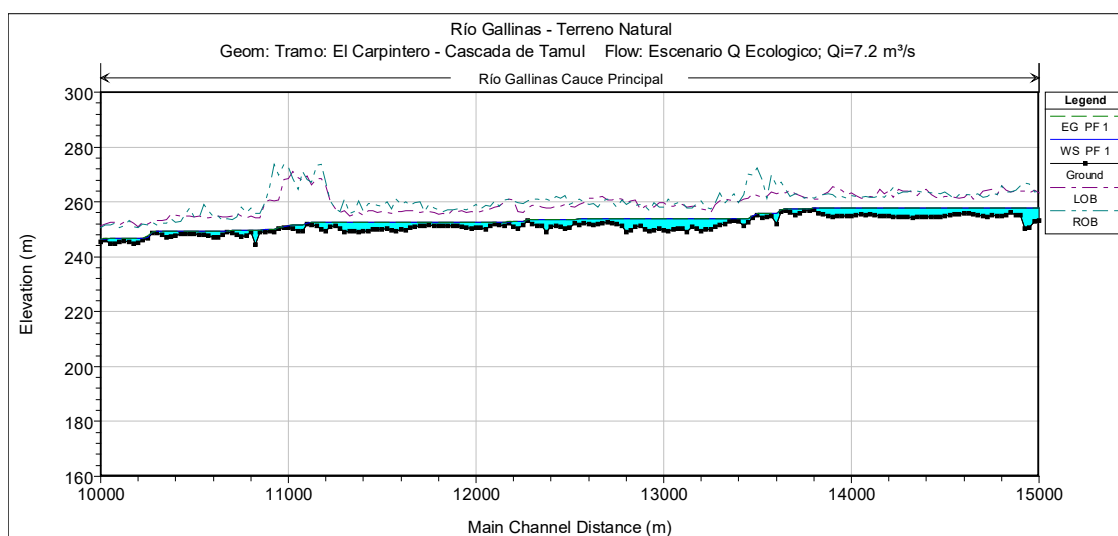


Figura 6.44. Perfil del tirante de agua; Q ecológico – cadenamiento 10+000 – 15+00.

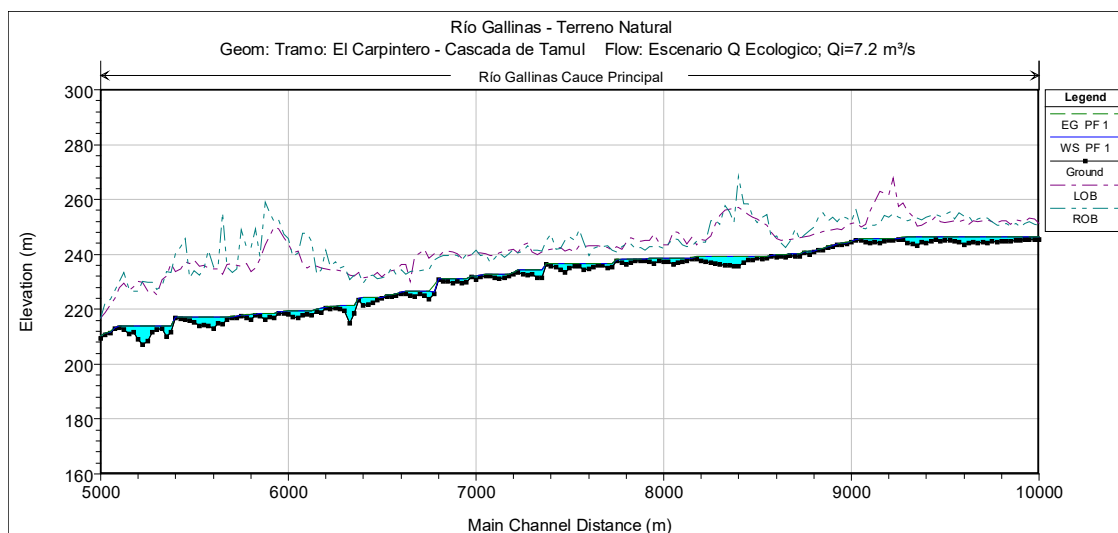


Figura 6.45. Perfil del tirante de agua; Q ecológico – cadenamiento 5+000 – 10+000.

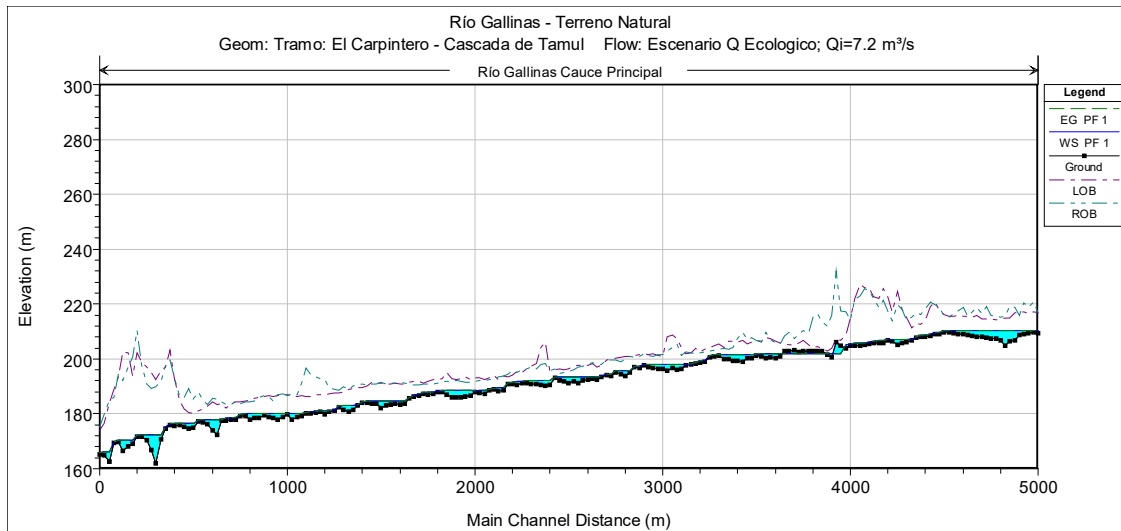


Figura 6.46. Perfil del tirante de agua; Q ecológico – cadenamiento 0+000 – 5+000.

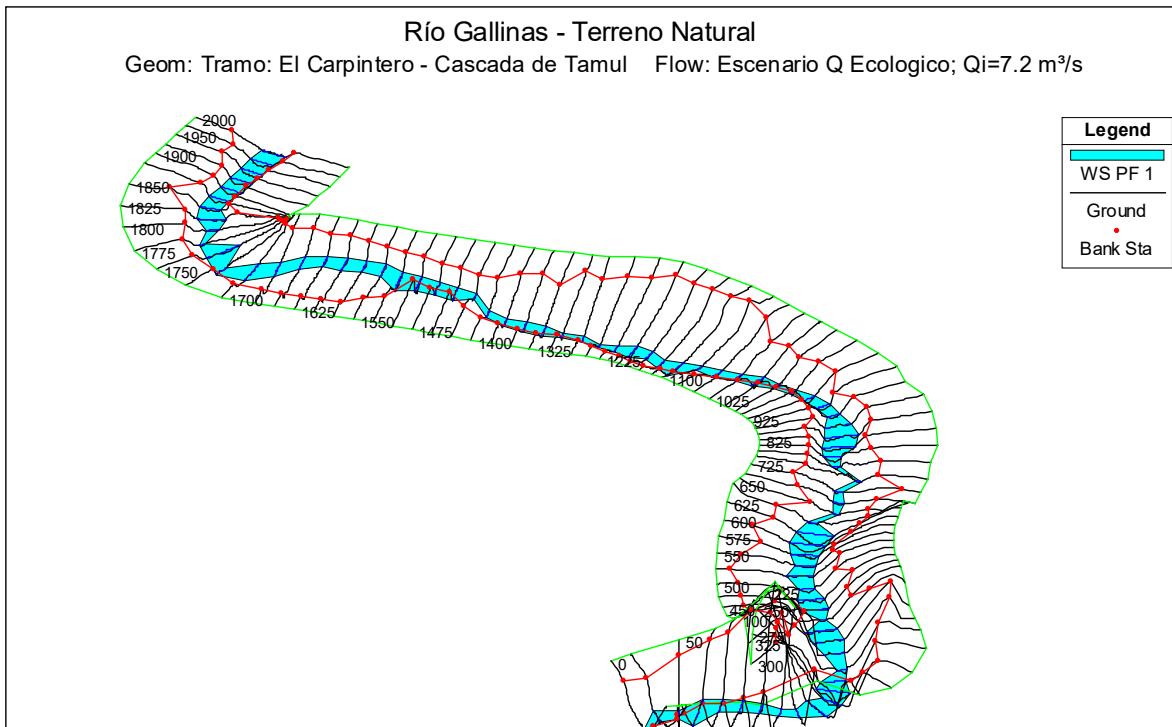


Figura 6.47. Imagen tridimensional; Q ecológico – Cadenamiento 0+000 – 2+000.

Tabla 6.4. Reporte de variables hidráulicas a cada 250 metros Q ecológico.

Estación	Q Total (m^3/s)	Elev. Min. Terreno Nat. (m)	Elevación del Nivel del Agua (m)	Velocidad del canal (m/s)	Área Hidráulica (m^2)	Ancho de la superficie del agua (m)	Froude # Chl
20+350	7.2	271.28	272.78	0.16	44.02	40.26	0.05
20+250	7.2	270.85	272.78	0.19	37.22	28.3	0.05
20+000	7.2	271.13	272.74	0.17	41.7	45.85	0.06
19+750	7.2	271.98	272.34	1.48	4.87	22.05	1
19+500	7.2	270.66	271.93	0.18	39.69	42.99	0.06
19+250	7.2	269.53	270.06	1.37	5.27	25.24	0.96
19+000	7.2	268.48	268.98	1.49	4.82	21.96	1.02
18+750	7.2	263.84	266	0.08	85.19	62.87	0.02
18+500	7.2	263.72	265.98	0.15	48.63	58.27	0.05
18+250	7.2	263.23	263.66	1.3	5.54	32.02	1
18+000	7.2	261.28	262.29	0.42	17.03	38.51	0.2
17+750	7.2	261.12	262.23	0.25	29.1	41.05	0.09
17+500	7.2	253.63	261.99	0.05	157.48	42.97	0.01
17+250	7.2	258.53	258.82	4.83	1.49	8.47	3.68
17+000	7.2	257.78	258.52	0.37	19.51	37.55	0.16
16+750	7.2	256.44	258.51	0.15	48.78	38.83	0.04
16+500	7.2	255.46	257.97	0.06	111.35	88.74	0.02
16+250	7.2	256.36	257.69	0.15	46.51	57.75	0.06
16+000	7.2	255.82	257.69	0.11	65.57	43.48	0.03
15+750	7.2	254.14	257.69	0.06	128.99	47.47	0.01
15+500	7.2	254.63	257.69	0.06	123.87	49.55	0.01
15+250	7.2	255.62	257.68	0.12	57.72	41.77	0.03
15+000	7.2	253.25	257.68	0.05	157.86	95.16	0.01
14+750	6.3	255.03	257.68	0.1	63.65	33.47	0.02
14+500	6.3	254.99	257.68	0.08	82.33	39.3	0.02
14+250	6.3	254.6	257.68	0.08	81.54	36.55	0.02
14+000	6.3	254.91	257.68	0.08	75.38	37.14	0.02
13+750	6.3	256.74	257.41	0.8	7.87	17.25	0.38
13+500	6.3	255.2	255.76	1.5	4.2	18.63	1.01
13+250	6.3	249.84	253.73	0.06	112.41	46.4	0.01
13+000	6.3	249.71	253.73	0.07	84.31	34.28	0.02
12+750	6.3	251.89	253.73	0.14	46.39	33.05	0.04
12+500	6.3	250.72	253.7	0.14	46.46	31.43	0.04
12+250	6.3	251.6	252.75	0.21	29.7	41.84	0.08
12+000	6.3	250.67	252.46	0.13	47.31	42.11	0.04
11+750	6.3	251.49	252.45	0.2	31.23	41.02	0.07
11+500	6.3	249.89	252.44	0.14	44.59	28.46	0.04
11+250	6.3	251.32	252.44	0.2	31.32	56.49	0.09
11+000	6.3	250.77	251.41	1.46	4.33	20.87	1.02
10+750	6.3	247.49	249.56	0.18	34.6	32.28	0.06
10+500	6.3	248.37	249.24	0.25	25.63	51.78	0.11
10+250	6.3	246.87	247.14	2.94	2.14	14.53	2.44

Continuación de Tabla 6.3. Reporte de variables hidráulicas a cada 250 metros Q ecológico.

Estación	Q Total (m³/s)	Elev. Min. Terreno Nat. (m)	Elevación del Nivel del Agua (m)	Velocidad del canal (m/s)	Área Hidráulica (m²)	Ancho de la superficie del agua (m)	Froude # Chl
10+000	6.3	245.37	246.49	0.31	20.57	28.45	0.11
9+750	6.3	244.77	246.48	0.18	35.99	31.09	0.05
9+500	6.3	245.1	246.46	0.39	16.43	24.06	0.15
9+250	6.3	245.48	245.89	0.81	7.78	31.31	0.52
9+000	6.3	244.34	244.83	1.33	4.75	27.54	1.02
8+750	6.3	240.63	241.03	1.61	3.92	15.18	1.01
8+500	6.3	238.45	239.3	0.41	15.39	37.23	0.2
8+250	6.3	237.15	239.28	0.07	96.72	69.35	0.02
8+000	6.3	237.38	238.51	0.27	23.1	31.09	0.1
7+750	6.3	237.63	238.03	1.57	4.01	16.37	1.01
7+500	6.3	234.92	236.72	0.16	40.49	51.12	0.06
7+250	6.3	232.78	234.46	0.19	33.64	38.15	0.06
7+000	6.3	230.69	232.21	0.4	15.56	28.07	0.17
6+750	6.3	223.51	226.62	0.29	21.79	15.12	0.08
6+500	6.3	223.84	224.33	2.01	3.14	15.41	1.42
6+250	6.3	220.52	221.07	1.48	4.27	14.85	0.88
6+000	6.3	218.05	219.3	0.61	10.34	16.23	0.24
5+750	6.3	217.38	217.81	1.53	4.11	17.54	1.01
5+500	6.3	215.27	217.29	0.16	40.54	45.42	0.05
5+250	6.3	208.53	213.82	0.06	108.65	50.25	0.01
5+000	6.3	209.4	210.46	0.36	17.52	26.05	0.14
4+750	6.3	207.36	210.41	0.07	88.93	46.21	0.02
4+500	6.3	209.6	210.17	1.48	4.26	20.06	1.02
4+250	6.3	205.23	207.18	0.1	64.13	47.2	0.03
4+000	6.3	204.83	205.44	1.21	5.19	14.4	0.65
3+750	4.6	202.84	201.81	0	93.38	35.22	0
3+500	4.6	201.23	201.72	0.7	6.55	29.41	0.48
3+250	4.6	200.73	201.13	1.37	3.36	18.33	1.02
3+000	4.6	196.37	198.08	0.14	32.34	39.66	0.05
2+750	4.6	195.05	195.63	1.26	3.64	22.46	1
2+500	4.6	191.11	193.51	0.05	90.17	78.81	0.02
2+250	4.6	191.3	191.84	1.42	3.23	16.27	1.02
2+000	4.6	188.01	188.42	1.32	3.48	20.2	1.02
1+750	4.6	186.8	187.9	0.25	18.19	41.41	0.12
1+500	4.6	181.95	184.78	0.1	47.19	33.97	0.03
1+250	4.6	181.05	181.4	2.67	1.72	8.81	1.93
1+000	4.6	179.67	180.07	1.57	2.94	11.79	1
0+750	4.1	179.29	179.74	1.74	2.35	7.62	1
0+500	4.1	175.05	176.64	0.25	16.54	18.69	0.08
0+250	4.1	170.41	172.48	0.13	31.63	27.64	0.04
0+000	4.1	165.25	165.78	1.63	2.51	9.51	1.01

6.3. Análisis de resultados

Los resultados alcanzados mediante la implementación del modelo numérico Hec – Ras, se consideran adecuados y cercanos a la realidad, sin embargo, el modelo numérico EFDC genera resultados con un nivel superior de detalle, debido a que el EFDC, presenta un flujo y nivel de agua sobre una superficie bidimensional, brindando resultados cada 3.5 metros en comparación con los resultados por secciones transversales a cada 25 metros del Hec – Ras.

Sin embargo, esto implica que el modelo EFDC tarde más tiempo durante la simulación de escenarios, debido a que en el análisis bidimensional deben solucionar las ecuaciones involucradas para cada celda planteada, siendo necesario una mayor capacidad computacional.

El comportamiento de ambos modelos para el gasto de $1231.8 \text{ m}^3/\text{s}$, presenta un comportamiento general muy similar, con pequeñas variaciones en los límites del área inundada, así como en los niveles de profundidad, donde Hec – Ras presenta un nivel de agua mayor.

De los resultados observados se puede concluir que, dependiendo de las características topográficas, los valores simulados por Hec – Ras se acercan más o menos a los generados con el EFDC. Donde al inicio del tramo del modelo, cercano a las localidades de El Jabalí y El Carpintero, así como en el tramo final del modelo numérico, próximo a la cascada de Tamul, se presentan las mayores diferencias de las áreas inundables entre ambos modelos, debido principalmente a la presencia de planicies y a las sinuosidades del cauce (Figura 6.48 y Figura 6.50).

Por su parte al centro del tramo del modelo, en ciertos tramos rectos, donde la sección transversal del cauce se encuentra bien definida y rodeada por cuerpos cerriles, se vuelve complejo diferenciar los resultados de las áreas inundables obtenidas (Figura 6.49 y Figura 6.51).

Finalmente, en la simulación del caudal ecológico, donde inicia con un caudal de $7.2 \text{ m}^3/\text{s}$ y debido a las infiltraciones concluye con $4.1 \text{ m}^3/\text{s}$, la principal diferencia observada es la falta de continuidad en el modelo unidimensional, donde en algunos tramos, carece de un flujo constante sobre el río, a diferencia del modelo bidimensional, que simula el comportamiento del flujo en cada celda (Figura 6.52 y Figura 6.53).

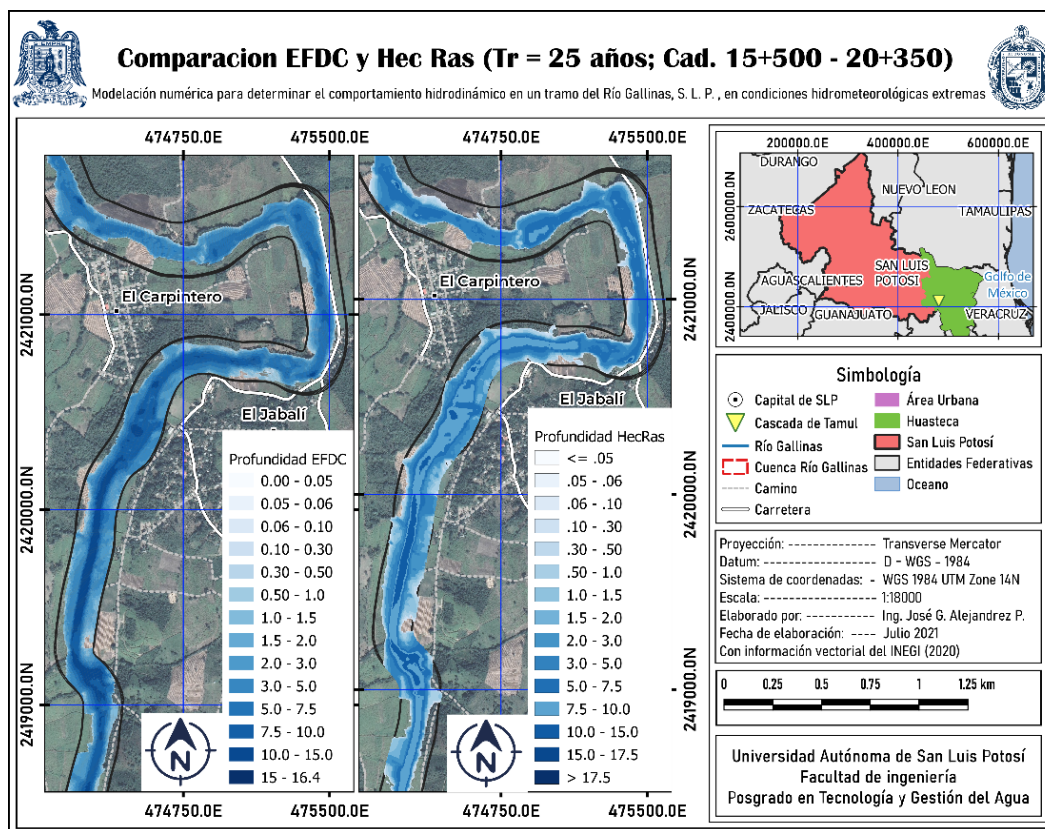


Figura 6.48. Comparación EFDC y Hec - Ras, Tr=25 años (F).

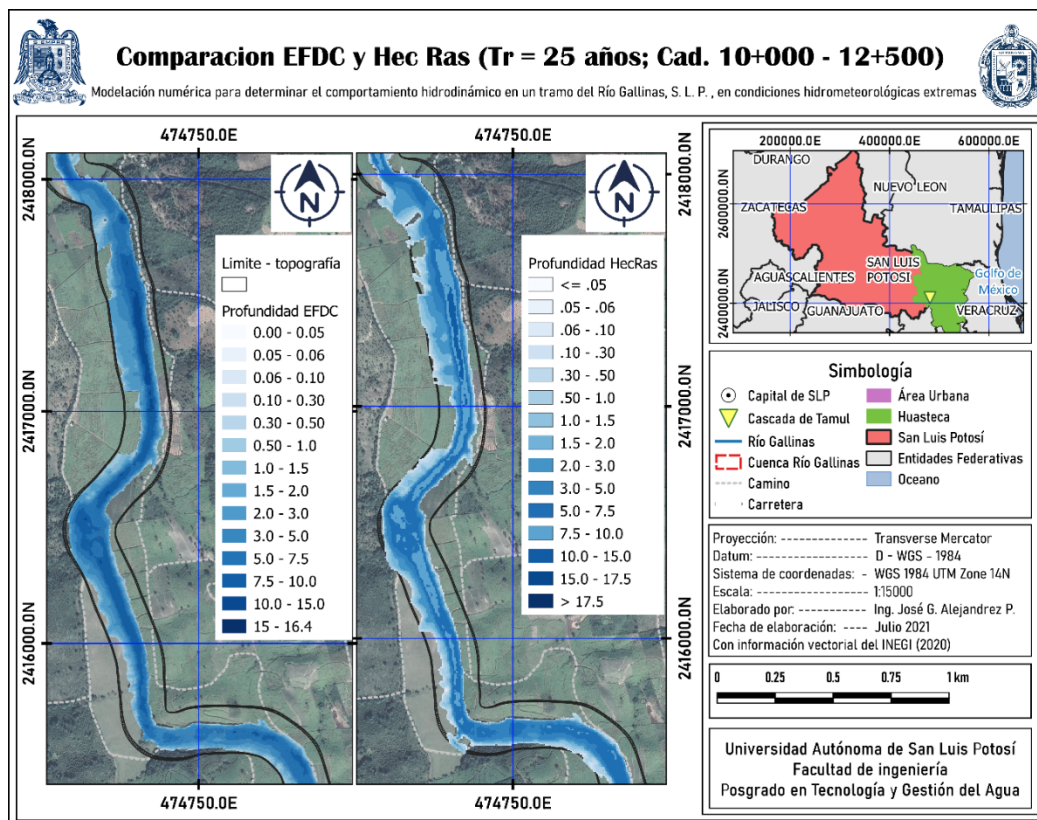


Figura 6.49. Comparación EFDC y Hec - Ras, Tr=25 años (D).

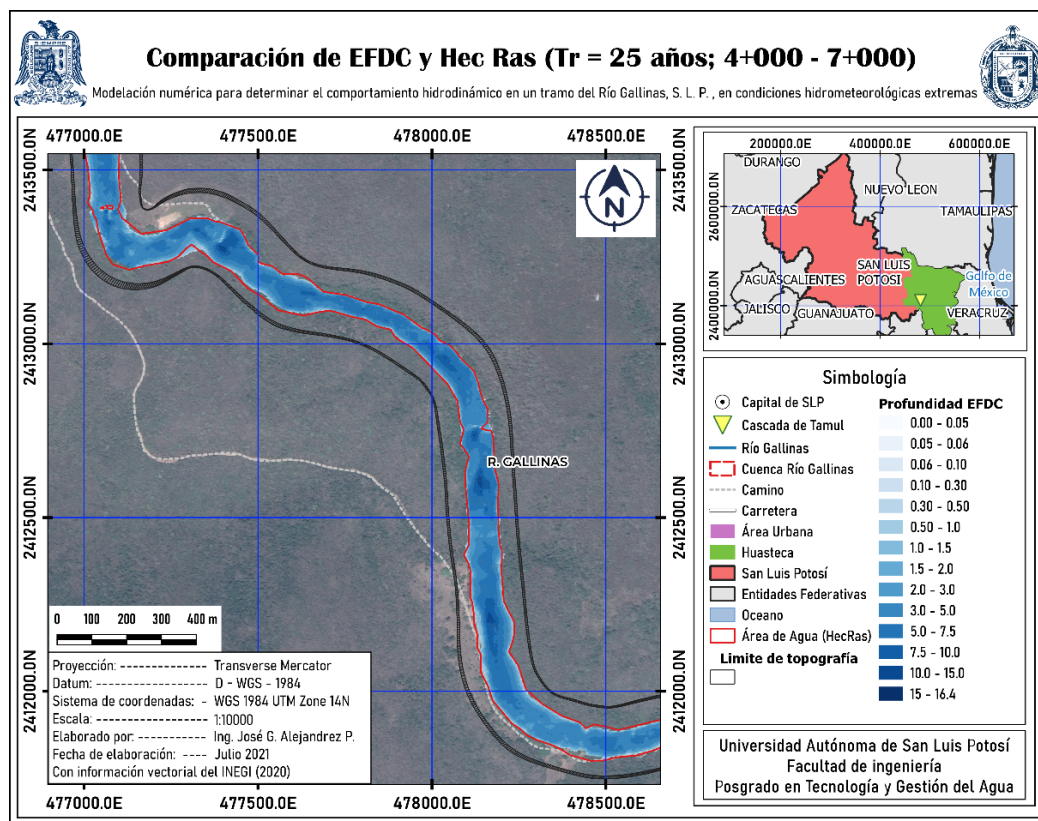


Figura 6.50. Comparación EFDC y Hec - Ras, Tr=25 años (B).

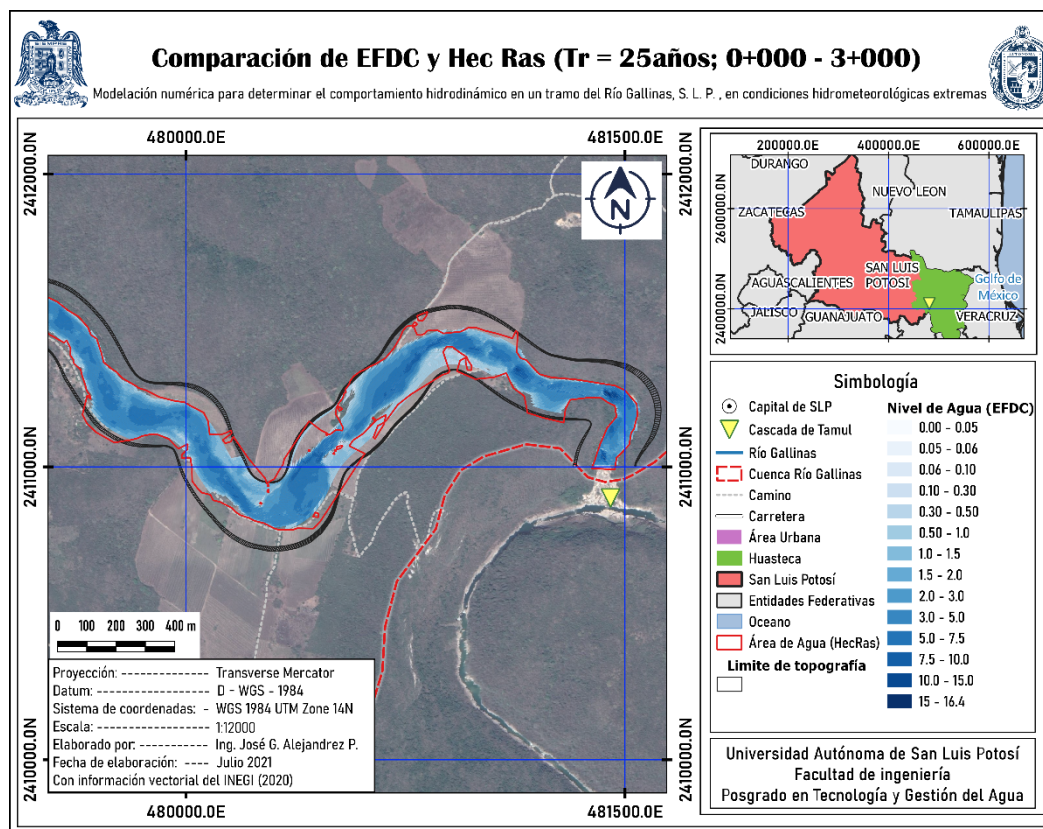


Figura 6.51. Comparación EFDC y Hec - Ras, Tr=25 años (A).

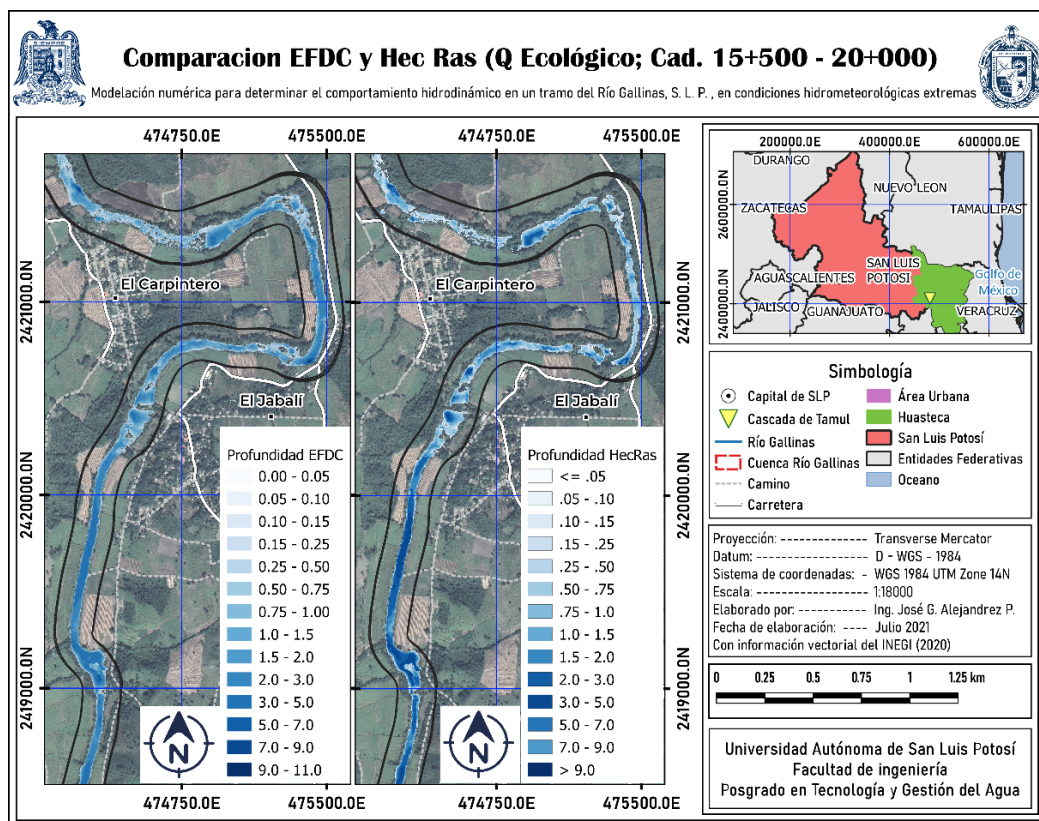


Figura 6.52. Comparación EFDC y Hec - Ras, Q Ecológico (F).

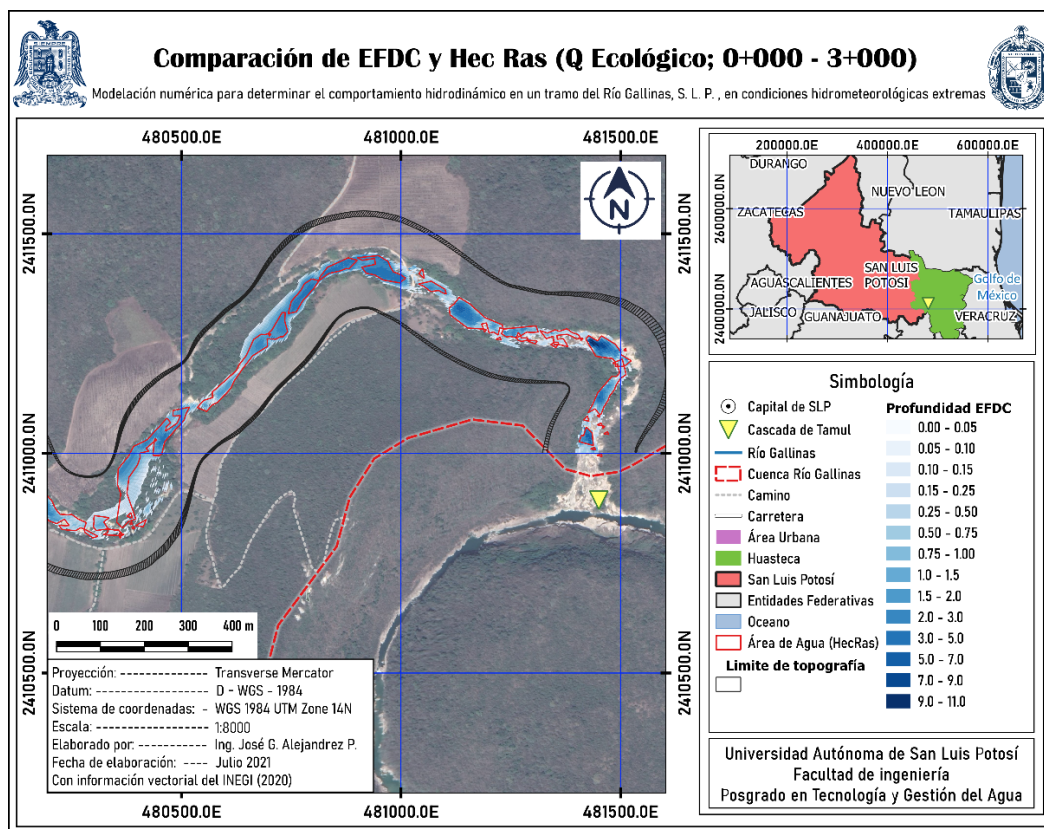


Figura 6.53. Comparación EFDC y Hec - Ras, Q Ecológico (A).

Conclusiones

Conclusiones

Para cumplir con el objetivo general de esta tesis, fue necesario realizar diversos análisis y resultados que, en conjunto permitieron implementar, calibrar y validar un modelo numérico, para posteriormente mediante la simulación de dos escenarios hidrometeorológicos extremos determinar el comportamiento hidrodinámico del Río Gallinas, en el tramo de modelo.

Análisis hidrológico

El análisis hidrológico de la cuenca del Río Gallinas, integrado por la delimitación del área de aportación, la caracterización de las condiciones geomorfológicas tanto de la cuenca como del cauce principal, así como del análisis de la información climatológica e hidrométrica involucrada en la zona de estudio, permiten estimar los caudales de diseño para los diferentes escenarios hidrometeorológicos extremos planteados. Donde por un extremo se presentan los escurrimientos máximos, seleccionado al caudal estimado para el periodo de retorno de 25 años, igual a 1231.8 m³/s y en el otro extremo, se presenta un escurrimiento crítico inferior durante la temporada de estiaje, para lo cual se estimó el caudal ecológico del cauce mediante la norma NMX-AA-159-SCFI-2012, equivalente a 4.1 m³/s durante los meses de abril y marzo.

La información implementada para el análisis hidrológico, desde los datos vectoriales usados para la caracterización geomorfológica y del uso de suelo, así como los registros climatológicos e hidrométricos solicitados, se consideran consistentes, permitiendo caracterizar adecuadamente las condiciones hidrológicas presentes en la cuenca del Río Gallinas.

Campañas de medición

Al tramo de estudio se efectuaron satisfactoriamente dos tipos de campañas de medición, la primera de ellas con el objetivo obtener la topo-batimetría del cauce y sus zonas aledañas, con la finalidad de caracterizar el relieve del tramo de interés en el modelo numérico, la otra campaña consistió en el aforo de caudales, donde el registro de las variables hidráulicas observadas hace posible la calibración y validación del modelo numérico.

La topobatimetría del cauce, generada a partir de procesamiento fotogramétrico de las imágenes capturadas con el Vehículo Aéreo No Tripulado Phantom 4 Pro y, georreferenciadas a partir de los puntos de control terrestre levantados con la antena receptora Trimble R8s, dan como resultado el levantamiento topográfico del cauce y sus zonas aledañas en alta resolución.

Debido a la complejidad que resulta procesar toda la información generada durante los levantamientos topo-batimétricos, fue necesario dividir por partes el postprocesamiento, para finalmente mediante la implementación de los Sistemas de Información Geográficas unificar los resultados en un modelo digital de terreno con resolución de 10 centímetros por píxel.

El aforo de caudales realizado mediante el efecto Doppler, permitió observar el comportamiento las variables hidráulicas de velocidad, tirante y caudal, con una mayor certeza que los métodos tradicionalmente implementados. Dicho aforo, se realiza variando espacial y temporalmente los puntos aforados con la finalidad de registrar los escenarios observados para poder calibrar el modelo numérico.

La campaña de aforo de caudales se realizó en dos puntos, el primero de ellos al inicio del modelo numérico, en el puente El Carpintero, para obtener un caudal de entrada para el modelo numérico, y el segundo, 800 metros aguas arriba de la cascada de Tamul, registro implementado en la calibración del modelo numérico.

Durante la campaña de aforo realizada en el tramo del modelo, se observó que el Río Gallinas presenta una variación del caudal, que disminuye entre el inicio del tramo del modelo en la localidad El Carpintero, y el punto final en la cascada de Tamul, producto de las infiltraciones presentes en el tramo de estudio.

De dicha campaña de aforo se concluye que, con un caudal promedio de aproximadamente $3.8\text{m}^3/\text{s}$, presentes en la estación hidrométrica 26267 – El Carpintero, se garantiza un flujo constante sobre el Río Gallinas y en la Cascada de Tamul, donde se registró un caudal promedio de salida de $0.37\text{m}^3/\text{s}$.

Modelación numérica

La modelación numérica, ha pasado de ser una herramienta novedosa a un instrumento comúnmente utilizado y casi obligado en la predicción de la respuesta

hidrodinámica del flujo a superficie libre, debido a la correcta interpretación de los resultados alcanzados con la simulación de escenarios. Sin embargo, como todo instrumento, la calidad de los resultados generados durante la simulación de escenarios es representativo de la calidad de los valores ingresados durante la implementación del modelo, tales como: las condiciones de dominio, de frontera e iniciales introducidas en el modelo numérico.

Con el objetivo de evaluar la respuesta hidrodinámica y establecer legitimidad en los resultados alcanzados en el modelo numérico bidimensional EFDC, se empleó la simulación de los escenarios observados durante las campañas de aforo de caudales al tramo de estudio, logrando mediante el ajuste de las condiciones iniciales y de frontera del modelo, representar satisfactoriamente los escenarios aforados, consiguiendo calibrar y validar del modelo numérico EFCD Explorer.

El modelo numérico unidimensional de Hec – Ras, presentó un ajuste estadístico adecuado ante la representación de los resultados logrados durante la simulación del escenario de calibración, generando una respuesta semejante de los resultados obtenidos del espejo y tirante de agua, guardando su distancia en el nivel de detalle, en relación con los resultados simulados con el EFDC Explorer.

A través de la simulación del gasto correspondiente a un periodo de retorno de 25 años ($1231.8 \text{ m}^3/\text{s}$), en el modelo bidimensional EFDC, se puede concluir que el Río Gallinas presenta desbordamientos en ambos márgenes del cauce y a lo largo del cauce simulado, principalmente, aguas arriba del tramo de estudio (cadenamientos 8+000 – 20+500), debido a la sinuosidad del río y a la presencia de una menor pendiente en el perfil longitudinal del Río Gallinas, afectando a los asentamientos humanos, vías de comunicación y a las actividades económicas de la región, como la agricultura, ganadería y turismo. Así mismo, entre los cadenamientos 3+000 y 8+000, el cauce se encuentra inmerso en cuerpos cerriles y no presenta desbordamientos. Además, el modelo numérico registra que el cauce alcanza una velocidad del flujo entre 2 m/s y 7.5 m/s.

A partir de las modelaciones numéricas, y de las condiciones de dominio, iniciales y de frontera, se concluyó que con un caudal de entrada en el puente El Carpintero igual a $7.2 \text{ m}^3/\text{s}$ se garantiza en cantidad el flujo del caudal ecológico igual a $4.1 \text{ m}^3/\text{s}$

estimado para los meses de la temporada de estiaje (abril y marzo), sobre la cascada de Tamul, beneficiando al ecosistema y a las actividades económicas de la región.

Perspectivas y futuras líneas de investigación

Si bien los objetivos planteados en el desarrollo de esta tesis se cumplieron satisfactoriamente, durante la generación de información e implementación del modelo numérico, surgieron nuevas inquietudes y necesidades que pueden ser desarrolladas con la finalidad de ampliar el conocimiento científico e interpretar los fenómenos hidrológicos que ocurren en la cuenca del Río Gallinas.

Para el caso de la simulación del escenario con caudales máximos, representa un gran aporte determinar las áreas de inundación ocasionadas por el desbordamiento del Río Gallinas, sin embargo, dicho análisis estuvo fuera de los alcances del trabajo de investigación, debido a que el modelo Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM), que representa las elevaciones del territorio continental mexicano proporcionado por el INEGI, tiene una resolución máxima de 15 metros por píxel, dicha resolución dificultó el traslape de información del CEM con el MDT generado. Lo que ofrece una oportunidad de continuar con el levantamiento fotogramétrico o generar la topografía con nuevas metodologías que mejoren la resolución del CEM, para aumentar el área de la modelación, logrando cuantificar las áreas afectadas por inundación debido al desbordamiento del Río Gallinas.

Se vuelve fundamental dar continuidad a los estudios realizados, procurando un enfoque social que busque compartir los resultados alcanzados de la simulación, para los distintos escenarios hidrometeorológicos, con los habitantes de la región. Donde a partir de la identificación de puntos críticos de desbordamiento, así como con las condiciones que permiten el flujo del caudal ecológico o un flujo mínimo constante, se puedan determinar medidas estructurales y no estructurales que ayuden a mitigar o disminuir las afectaciones en la región.

Para el escenario de los escurrimientos máximos, donde fueron identificadas áreas susceptibles a inundación, se requiere revisar la factibilidad económica y ambiental para realizar obras de protección en puntos estratégico, así como dialogar con las

personas de las localidades cercanas, señalando las zonas susceptibles a inundación y realizar planes emergentes que ayuden a prevenir los desastres naturales.

Por el contrario, en la búsqueda de garantizar el flujo constante o el flujo del caudal ecológico en el cauce y en la Cascada de Tamul, se vuelve necesario calibrar y mejorar las condiciones de la estación hidrométrica 26267 – El Carpintero, debido a que la sección transversal de la estación varía con el tiempo, producto del material azolvado por la corriente del cauce que con el tiempo modifica el área hidráulica y el registro del aforo. Aunado a esto, es considera necesario realizar un plan para la gestión eficiente de los recursos hídricos, involucrando a las diversas actividades económicas de la región como: el turismo, agricultura y ganadería, buscando la distribución optima del uso del agua del Río Gallinas ante los diversos escenarios extremos presentes durante la temporada de estiaje, donde con la estación hidrométrica calibrada, se consideren diferentes acciones y restricciones a partir del nivel de agua y gasto aforado, tomando como referencia los $7.2 \text{ m}^3/\text{s}$ para el flujo del caudal ecológico y los $3.8 \text{ m}^3/\text{s}$ para un flujo constante mínimo sobre la cascada de Tamul.

Finalmente, con un enfoque distinto y aprovechando la información generada en las diversas campañas de medición concluidas, sería un gran aporte comparar y analizar la respuesta de las variables hidráulicas simuladas con distintos modelos numéricos, buscando resaltar las diferencias y similitudes de los resultados alcanzados de las variables hidráulicas (velocidad, tirante de agua y áreas de inundación), así como del rendimiento y tiempos requeridos para la simulación de los distintos escenarios.

Referencias

Referencias

- Agisoft LLC. (2021). *Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.7*.
https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_7_en.pdf
- Alvarado, S. (2016). *Levantamientos topográficos multitemporales basados en técnicas de fotogrametría aérea*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada,.
- Aparicio, J., Gómez, J. F., & Patiño, C. (2010). *Manual de análisis de frecuencias en hidrología*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Aparicio Mijares, F. J. (2015). *Fundamentos de Hidrología de Superficie* (Limusa (ed.); Primera ed). Grupo Noriega.
- Arbat, M., Sánchez-Juny, M., Bladé, E., & Dolz, J. (2009). Modelación unidimensional del Embalse de Ribarroja de Ebro con DYRESM. *Jornadas de Ingeniería Del Agua, Madrid, 1-9*.
- ASPRS. (1990). ASPRS Accuracy standards for large-scale maps. *Annual Reports of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)*, 56, 1068–1070. http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2012/01/1990_jul_1068-1070.pdf
- Berné Valero, J. L., Anquela Julián, A. B., & Garrido Villén, N. (2019). *GNSS: GPS, GALILEO, GLONASS, BEIDOU. Fundamentos y métodos de posicionamiento*.
- Bitrán Bitrán, D., Jiménez Espinosa, M., Eslava Morales, H., Salas Salinas, M. A., Vázquez Conde, M. T., Matías Ramírez, L. G., Camacho Quintana, K. S., & Acosta Colsa, L. (2021). *IMPACTO SOCIOECONÓMICO DE LOS PRINCIPALES DESASTRES OCURRIDOS EN LA REPÚBLICA MEXICANA EN EL AÑO 2000* (CENAPRED (ed.); Versión el).
- Blachut, T., Burckhardt, R., & ASPRS. (2988). *Historical Development of Photogrammetric Methods and Instruments*. American Society for Photogrammetry & Remote Sensing.
- Blöschl, G., & Sivapalan, M. (1995). Scale issues in hydrological modelling: A review. *Hydrological Processes*, 9(3–4), 251–290.
<https://doi.org/10.1002/hyp.3360090305>
- Breña P., A. F., & Jacobo V., M. A. (2006). Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial. In U. A. Metropolitana (Ed.), *Universidad Autónoma Metropolitana*.
- Brilha, J. (2005). *Património geológico e geoconservação: a conservação da natureza na sua vertente geológica* (Palimage (ed.)).
<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/5432>
- Broomans, P. (2003). *Numerical Accuracy in Solutions of the Shallow-Water Equations*. TU Delft.
- Cahuana Andia, A., & Yugar Morales, W. (2009). *Material de apoyo didáctico para I*

aenseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrolohía CIV-233.

- Calderillo Granados, K. L. (2014). *Vulnerabilidad social y sequía en las regiones Media y Huasteca Potosina* [Universidad Autónoma de San Luis Potosí]. <http://ninive.uaslp.mx/xmlui/bitstream/handle/i/3840/MCA1CGK201401.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Camilloni, I., Barros, S., Moreiras, S., Poveda, G., & Tomasella, J. (2020). Inundaciones y sequías. In Mc-Graw-Hill (Ed.), *Adaptación frente a los riesgos del cambio climático en los países iberoamericanos - Informe RIOCCADAPT* (pp. 391–417). http://rioccadapt.com/wp-content/uploads/2020/07/10_Cap_10_CambioClimatico.pdf
- Campos-Aranda, D. F. (2015). Estimación del escurrimiento mensual en climas húmedos con base en modelos de regression. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 6(2), 113–130.
- Campos Aranda, D. F. (1984). *Procesos del Ciclo Hidrológico* (Universidad Autónoma de San Luis Potosí (ed.)).
- Campos Aranda, D. F. (2010). *Introducción a la Hidrología Urbana* (Primera Ed).
- Campos Aranda, D. F., & Gómez de Luna, R. (1990). Procedimiento para obtener curvas ID-Tr a partir de registros pluviométricos. *Ingeniería Hidráulica En México*, 2, 39–52. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Procedimiento+para+obtener+curvas+I-D-Tr+a+partir+de+registros+pluviométricos#0>
- Carrisoza, E., & Pérez, J. (2004). “El Niño y el Clima” en Los Impactos del Niño en México. *Centro de Ciencias de La Atmósfera, UNAM.*, 23–68.
- Castañeda Camacho, X., Reyes Pérez, O., Aguilar-Robedo, M., & Fortanelli-Martínez, J. (2018). *Áreas Naturales Prioritarias de Conservación con potencial turístico en el estado de San Luis Potosí*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. https://www.researchgate.net/publication/329191365_Areas_naturales_prioritarias_de_conservacion_con_potencial_turistico_en_el_estado_de_San_Luis_Potosi
- CENAPRED. (2014). Serie Fascículos, Sequías. In F. García Jimenez, O. Fuentes Mariles, & L. G. Matías Ramírez (Eds.), *Centro Nacional de Prevención de Desastres*.
- CENAPRED. (2019). Serie Fascículos, Inundaciones. In *CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES* (Version di). <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/3-FASCCULOINUNDACIONES.PDF>
- Chaudhry, M. H. (2008). *Open-Channel Flow*. Springer.
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). Hidrología aplicada. In McGRA W-HILL INTERAMERICANA (Ed.), *Potencia*.
- Código San Luis. (2017). *Frente frío número 4 desborda a los ríos Gallinas, Moctezuma*

- y Tampaón. <https://archivo.codigosanluis.com/frente-frio-numero-4-desborda-los-rios-gallinas-moctezuma-tampaon/>
- CONAGUA;, WWF;, & FGRA. (2011). *Identificación de reservas potenciales de agua para el medio ambiente en México*. Alianza World Wildlife Fund (WWF)-Fundación Gonzalo Río Arronte (FGRA)-CONAGUA.
- CONAGUA. (1987). *Instructivo de hidrología para determinar la avenida máxima ordinaria asociada a la delimitación de zona federal* (Gerencia de aguas superficiales e ingeniería de ríos (ed.)). Comision Nacional del Agua.
- Cordova Elera, Y. E. (2016). *Software libre, un instrumento en la ingeniería de los recursos hídricos*. <https://www.iagua.es/blogs/yoel-esleiter-cordova-elera/software-libre-instrumento-ingenieria-recursos-hidricos>
- CRED. (2015). The Human Cost of Natural Disasters: A Global Perspective. In CRED (Ed.), *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters CRED*.
- De Cserna, Z., Alcayde Arranca, M., & Monroy Soto, Ee. (2002). ¿Geografía sin Geología? In *Temas Selectos de geografía en México* (p. 75). México, Instituto Nacional de Geografía, UNAM.
- de la Lanza Espino, G., González Villela, R., González Mora, I. D., & Hernández Pulido, S. (2018). Caudal ecológico de ciertos ríos que descargan al Golfo de México y al Pacífico Mexicano. *Ribagua*, 5(1), 3–15. <https://doi.org/10.1080/23863781.2018.1442187>
- Del río San José, J. (2010). *Tratamiento de los datos espaciales en hidrología*.
- Deltares. (2021). *Delft3D Flexible Mesh Suite - Deltares*. <https://www.deltares.nl/en/software/delft3d-flexible-mesh-suite/>
- Díaz Delgado, C., Mamadou Bâ, K., Iturbe Posadas, A., Esteller, M., & Reyna Sáenz, F. (1999). Estimación de las características fisiográficas de una cuenca con la ayuda de SIG y MEDT: caso del curso alto del río Lerma, Estado de México. *Ciencia Ergo Sum*, 6(2), 124–134.
- Diez Hernández, J. M., & Burbano Burbano, L. (2006). Técnicas avanzadas para la evaluación de caudales ecológicos en el ordenamiento sostenible de cuencas hidrográficas. *Ingeniería e Investigación*, 26(1), 58–68. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Técnicas+avanzadas+para+la+evaluación+de+caudales+ecológicos+en+el+ordenamiento+sostenible+de+cuencas+hidrográficas#0>
- Dimitriou, E., & Zacharias, I. (2006). Quantifying the rainfall-water level fluctuation process in a geologically complex Lake catchment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 119(1–3), 491–506. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-9039-y>
- Dingman, S. L. (1994). *Physical Hydrology*. Editorial Prentice-Hall.
- DOF. (2012). Norma Mexicana Nmx-Aa-159-Scfi-2012. In *Diario Oficial de la Federación México* (p. 123).

- Domínguez Mora, R., Esquivel Garduño, G., Méndez Antonio, B., Mendoza Reséndiz, A., Arganis Juárez, M. L., & Carrizosa Elizondo, E. (2018). Manual del Modelo para pronóstico de escurrimiento. In *Información tecnológica* (Vol. 29, Issue 4). Universidad Nacional Autónoma de México. http://eias.utalca.cl/isi/publicaciones/unam/pronostico_del_escurrimiento.pdf
- EOM. (2000). *El Planeta Tierra* (E. O. de México (ed.); Encicloped). Océano Grupo Editorial.
- FAO. (2017). *The Impact of disasters and crises on agriculture and Food Security* (F. and A. O. of the U. Nations (ed.)). www.fao.org/publications
- Fernandez, J. M. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos* (Reverté (ed.)).
- Field, C. B., Barros, V., Stocker, T. F., Dahe, Q., Jon Dokken, D., Ebi, K. L., Mastrandrea, M. D., Mach, K. J., Plattner, G. K., Allen, S. K., Tignor, M., & Midgley, P. M. (2012). Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: Special report of the intergovernmental panel on climate change. In *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Vol. 9781107025). <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245>
- Fondo Adaptación. (2015). *Modelación de la amenaza de inundación en la Mojana*.
- Franco, R. (2008). *Concepción e implementación de un módulo hidroneumático para la evaluación de disponibilidad de recursos hídricos*. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Friedman, R., Ansell, C., Diamond, S., & Haimen, Y. Y. (1984). Flood inundation modelling. Model choice and proper application. *Water Resources Research*, 793–802. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/WR020i007p00793>
- Frontal Noticias. (2021). *Se seca la cascada de Tamul; es el salto de agua más grande de San Luis Potosí*. FRONTAL. <https://www.frontalnoticias.com/san-luis-potosi/se-seca-la-cascada-de-tamul-es-el-salto-de-agua-mas-grande-de-san-luis-potosi/>
- García Álvarez, D. (2008). *Sistema GNSS (Global Navigation Satellite System)*. Universidad Autónoma de Madrid.
- García de Miranda, E. (1989). *Apuntes de Climatología* (5 ta Edici). Offset Larios, S. A.
- García, E., González, R., Martínez, P., Athala, J., & Paz, G. (1999). *Guía de Aplicación de los Métodos de Cálculo de Caudales de Reserva Ecológicos en México*. (p. 190). Comisión Nacional del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- García, F. (1994). *Curso Básico De Topografía* (Árbol Editorial (ed.); Tercera re).
- García Martín, A., Rosique Campoy, M., & Torres Picazo, M. (2017). *Topografía y cartografía mineras* (Universidad Politécnica de Cartagena (ed.); Segunda Ed).
- Gobierno de México. (2012). *NORMA MEXICANA NMX-AA-159-SCFI-2012*. 113. <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2014/229246>.

pdf

- Gobierno del Estado de San Luis Potosí. (2016). *Plan Estatal de Desarrollo de San Luis Potosí 2015-2021*.
- Gray, D. M., Norum, D. I., & Wigham, J. M. (1970). Infiltration and the physics of flow of water through porous media. In *Handbook of the principles of hydrology*, Canadian National Committee for IHD.
- Gutiérrez, C., Ochoa, L., & Velasco, I. (2005). Sequía, un problema de perspectiva y gestión. *Región y Sociedad*, XVII(34), 35–71.
- Hamrick, J. M. (1992). A three dimensional environmental fluid dynamic computer code: Theoretical and computational aspects. *The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science*, 317.
- Hernández-Cerda, M., & Carrasco-Anaya, G. (2004). "Climatología" en Biodiversidad de la Sierra Madre Oriental. *Las prensas de Ciencias, Distrito Federal, México, Facultad de Ciencias, UNAM*, 63–108.
- Herrera, B. (1987). *Elementos de fotogrametría*. Limusa.
- IDEAM. (2018). *Protocolo de Modelacion Hidrológica e Hidráulica*. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023833/Protocolo_Modelacion_HH.pdf
- IITEJ. (2003). *Norma Técnica y Manuales de Procedimientos para la Delimitación y Demarcación Territorial de los Municipios del Estado de Jalisco*. Instituto de Información Territorial del Estado de Jalisco (IITEJ).
- IITEJ. (2019). *Glosario: GPS/GNSS, Geodesia, Fotogrametría, Topografía, Cartografía y Catastro* (p. 96). Instituto de Información Territorial del Estado de Jalisco (IITEJ).
- INEGI. (2002). *Síntesis de Información Geográfica del Estado de San Luis Potosí* (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (ed.)).
- INEGI. (2004a). *Guía para la interpretación de cartografía - Edafología* (p. 44).
- INEGI. (2004b). *Unidades y subunidades de suelo. Guía para la Interpretación de Cartografía* - *Edafología*. <http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/INTERNET/EdafIII.pdf>
- INEGI. (2005). *Guía para la interpretación de cartografía: Geológica*.
- INEGI. (2006). *Norma Técnica NTG013 - 2006 Edición de Cartografía Topográfica*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- INEGI. (2012). *Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México*, 204.
- INEGI. (2014). *Nacional de Información Geográfica. Glosario*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- INEGI. (2015). *Norma Técnica para la Obtención y Distribución de Imágenes Satelitales*

- con fines Estadísticos y Geográficos. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- INEGI. (2019). *Marco de referencia ITRF en México y su relación con WGS84 y NAD27* (p. 11). Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825109226.pdf
- INEGI. (2021). *Red Geodésica Nacional Activa*. https://www.inegi.org.mx/temas/geodesia_activa/
- Jiménez J., S. (2016). *Levantamiento y supervisión de infraestructura civil mediante vehículos aéreos no tripulados (VANTS)*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- King, J. (2004). Environmental Flows for Fluvial Maintenance and Conservation. *Proceedings of Fifth International Symposium on Ecohydraulics, Madrid (España), Universidad Politécnica de Madrid*, 25–37.
- Kucharsky Villarreal, T. (2018). *Guía para la elaboración de estudios de caudales ecológicos en proyectos de aprovechamiento de recursos hídricos* (Corporación Andina de Fomento (ed.)).
- Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., Mechler, R., Bouwer, L. M., Arnell, N., Mach, K., Muir-Wood, R., Brakenridge, G. R., Kron, W., Benito, G., Honda, Y., Takahashi, K., & Sherstyukov, B. (2014). Le risque d'inondation et les perspectives de changement climatique mondial et régional. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 1–28. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411>
- La Valle, R. L., Garcia, J. G., Roncagliolo, P. A., & Muravchik, C. H. (2013). An experimental L1/L2 GNSS receiver for high precision applications. *IEEE Latin America Transactions*, 11(1), 48–53. <https://doi.org/10.1109/TLA.2013.6502776>
- Laguna Zárate, L. F. (2016). *Modelación hidrológica e hidráulica del agua pluvial en una zona urbana de la ciudad de San Luis Potosí*. 246. <http://ciep.ing.uaslp.mx/tesis/tesisPDF/177201810287142655.pdf>
- Lara Lárraga, R. (2014). Caracterización multidimensional de la vivienda tradicional en la Huasteca Potosina. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*, 2014_08. https://econpapers.repec.org/RePEc:erv:rccsrc:y:2014:i:2014_08:09
- Llanos, H., Bâ, K., & Trujillo, E. (2010). Estudio de precipitaciones máximas en la Comunidad Autónoma del País Vasco. *Est. Mus. Cienc. Nat. de Álava*, 19–38.
- López Cadenas, F., & Gonzalo Fernández, T. (1998). *Restauración hidrológica forestal de cuencas y control de erosión: ingeniería medioambiental* (Ministerio de Medio Ambiente (ed.)). TRAGSA / TRAGSATEC / Ministerio de Medio Ambiente.
- Lopez La Valles, R., Garcia, J., Roncagliolo, P., & Muravchik, C. (2011). A Practical RF Front-End for High Performace GNSS Receivers. *International Conference on*

Localization and GNSS (ICLGNSS), 104–109.

- Lugo-Hubp, J. (1990). El Relieve de la república Mexicana. *Revista Del Instituto de Geología, UNAM*, IX, núm. 1, 82–111.
- Luna Vargas, S., de la Luz Valderrábano Almegua, M., Muñoz Güemes, A., Ramos Ozuna, M. R. P., & Castro Campos, J. (2017). *Vulnerabilidad Al Cambio Climático En Sitios Turísticos Estudio De Caso: La Huasteca Potosina, México*. 1–21. https://www.researchgate.net/profile/Alfonso_Gueemes/publication/343814873_VULNERABILIDAD_AL_CAMBIO_CLIMATICO_EN_SITIOS_TURISTICOS_ESTUDIO_DE_CASO_LA_HUASTECA_POTOSINA_MEXICO/links/5f4189faa6fdccc43eb1157/VULNERABILIDAD-AL-CAMBIO-CLIMATICO-EN-SITIOS-TURI
- Magaña Rueda, V. O., & Gay García, C. (2002). Vulnerabilidad y adaptación regional ante el cambio climático y sus impactos ambientales, sociales y económicos. *Gaceta Ecológica*, 65, 7–23. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53906501>
- Martínez Álvarez, V., García García, A. I., & Ayuga Téllez, F. (2004). Monitorización de dos cuencas hidrológicas en la comunidad de Madrid mediante el empleo de sensores doppler para el aforo de corrientes. *Ingeniería Del Agua*, 11(2), 201. <https://doi.org/10.4995/ia.2004.2528>
- Martínez Melgarejo, M. J. (2018). La economía de San Luis Potosí en las dos últimas décadas. Algunas referencias empíricas sobre el periodo 1990-2010. *Revista de El Colegio de San Luis*, 8(16), 311. <https://doi.org/10.21696/rcsl9162018779>
- McGlone, C., Mikhail, E., Bethel, J., & American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. (2004). *Manual of Photogrammetry* (5th ed.). American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- MIKE by DHI. (2015). *Catálogo De Software*. DHI.
- MIKE By DHI. (2014). *River Basin Management And Planning* (Mike Hydro Basin (ed.)).
- Ministère du développement durable. (2014). *GUIDE DE GESTION DES EAUX PLUVIALES*. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/pluviales/guide.htm>
- Mockus, V. (1972). Section 4: Hydrology in National Engineering Handbook. In *Hydrologic soil—cover complexes*. U. S. Soil Conservation Service.
- Monsalve Sáenz, G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería* (Segunda). Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Montealegre, J. E. (2007). Modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia. *Ideam*, 81. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/440517/Modelo+Institucional+El+Niño+-+La+Niña.pdf/232c8740-c6ee-4a73-a8f7-17e49c5edda0>
- Muerth, M. J., Gauvin St-Denis, B., Ricard, S., Velázquez, J. A., Schmid, J., Minville, M., Caya, D., Chaumont, D., Ludwig, R., & Turcotte, R. (2013). On the need for bias correction in regional climate scenarios to assess climate change impacts on river runoff. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(3), 1189–1204.

<https://doi.org/10.5194/hess-17-1189-2013>

- Murillo, J., Brufau, P., & García-Navarro, P. (2008). *Aplicación del modelo bidimensional GUAD-2D para la determinación de zonas inundables en el T.M. de fraga (Huesca)*. January 2014. https://www.researchgate.net/publication/242552710_APLICACION_DEL_MODALO_BIDIMENSIONAL_GUAD-2D_PARA_LA_DETERMINACION_DE_ZONAS_INUNDABLES_EN_EL_TM_DE_FRAGA_HUESCA/link/00b7d52dcd331218e4000000/download
- Naciones Unidas. (2013). *Sistemas mundiales de navegación por satélite* (p. 54). Organización de las Naciones Unidas.
- Ochoa, S., Reyna, T., Reyna, S., García, M., Labaque, M., & Díaz, J. M. (2016). Modelación hidrodinámica unidimensional y bidimensional del tramo medio del río Ctalamochita, provincia de Córdoba. *Revista FCEF y N*, 3(2), 95–101.
- Ojeda, W., Flores, J., & Unland, H. (2014). *Drones y sistemas de información geográfica en la ingeniería hidroagrícola* (p. 105). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- OMM. (2011). Guía de Prácticas Hidrológicas Volumen I. In *World Meteorological Organization, No. 168* (Sexta). Organización Meteorológica Mundial. http://www.wmo.int/pages/prog/hwrr/publications/guide/spanish/168_Vol_I_es.pdf
- OMM. (2012). Glosario hidrológico internacional. In Organización Meteorológica Mundial (Ed.), *IHP/OHP-Berichte* (Issue 12). http://www.wmo.int/pages/prog/hwrr/publications/international_glossary/385_IGH_2012.pdf
- OMM. (2018). *Guía de prácticas climatológicas* (p. 169). Organización Meteorológica Mundial.
- Ortega-Gaucin, D., & Velasco, I. (2013). Aspectos Socioeconómicos y ambientales de las Sequías en México. *Aqua-LAC*, 5(2), 78–90. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2013-v5-2-08>
- Pachas, R. (2009). El levantamiento topográfico: Uso del GPS y estación total. *Academia*, 8(16), 29–45. <http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/30397/1/articulo3.pdf>
- Palacio, J., Bocco, G., Velásquez, A., Mas, J., Takaki-Takaki, F., Victoria, A., Luna, L., Gómez-Rodríguez, G., López, J., Palma, M., Trejo, I., Peralta, A., Prado, J., Rodríguez, A., Mayorga, R., & González, F. (2007). Vegetación (NA VI 1 A). In *Atlas Nacional de México*.
- Parkinson, B. W., & Spilker, J. (1995). *Global Positioning System: Theory and Applications*, vol. 2. Progress in Astronautics and Aeronautics.
- Pereda, V. J., & Padilla, L. S. (2016). La escasez de agua en la Huasteca Potosina (México): conflictos locales. *Revista Universitaria de Geografía*, 25(2), 133–165.

<https://www.redalyc.org/pdf/3832/383249118006.pdf>

- Perez, J. (1979). *Fundamentos del ciclo hidrológico* (Universidad Central de Venezuela (ed.)).
- Philip, B., Wayne, H., & Baxter, V. (2013). *Hydrology and Floodplain Analysis* (Fifth Edit). Pearson Education.
- Plano Informativo. (2016). *Totalmente seca, la cascada de Tamul*. <https://planoinformativo.com/448772/totalmente-seca-la-cascada-de-tamul-slp>
- Plano Informativo. (2020). *Bajada de agua en Río Gallinas mata a turistas*. <https://planoinformativo.com/740283/-bajada-de-agua-en-rio-gallinas-mata-a-turistas>
- Pouilly, M., & Aguilera, G. (2012). Caudal ecológico: definiciones, metodologías y adaptación a la región andina. *Acta Zoológica Lilloana*, 56, 15–30.
- Pulso SLP. (2019). Cascadas de Tamul, seca. *PULSO Diario de San Luis*. <https://pulsoslp.com.mx/estado/cascadas-de-tamul-secas/1255016>
- Puricelli, M. M. (2003). *Estimación y distribución de parámetros del suelo para la modelación hidrológica* [Universidad Politécnica de Valencia.]. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/2904>
- Quirós Rosado, E. (2014). *Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil* (U. de Extremadura (ed.); 1st ed.). Universidad de Extremadura.
- RD Instruments. (2008). Water Resources, Acoustic Doppler Current Profilers. *Teledyne* RD. http://www.teledynemarine.com/Lists/Downloads/wr_ps_guide_hr.pdf
- Reyes I., M. A., & Hernández N., A. (2009). *Tratamiento de errores en levantamientos topográficos* (INEGI (ed.); 2a ed.).
- Robles Aguilar, L. F. (2019). *Modelación hidrodinámica para conocer el diagnóstico hidráulico del río gallinas, estado de San Luis Potosí, México*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Rodríguez Cuevas, C. (2003). *MODELACIÓN HIDRODINÁMICA EN 2D Y 3D PARA LAGOS. APLICACIÓN A LA LAGUNA DE COYUCA Y AL EMBALSE DE VALLE DE BRAVO*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Salamea, T. (2015). *MODELAMIENTO BIDIMENSIONAL HIDRODINÁMICO DEL FLUJO Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS A TRAVÉS DEL RÍO CALABÍ Y OBRAS HIDRÁULICAS*. Octubre -2015 Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil [UNIVERSIDAD DE CUENCA]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/23116/1/tesis.pdf>
- Sámano Celorio, M. L. (2011). *Desarrollo e integración de modelos numéricos de calidad del agua en un sistema de información geográfica*. Universidad de Cantabria.

- San Luis a Tiempo. (2017). *¡Alerta en la Huasteca! Dos muertos por inundaciones y desborde de ríos*. <http://www.sanluisatiempo.com/alerta-en-la-huasteca-dos-muertos-por-inundaciones-y-desborde-de-rios/>
- Sánchez, J. (2017). *Cierran Parajes de la huasteca. Los nacimientos, ríos, rápidos y cascadas*. El mañana de Valles, Diario Regional.
- Santos Clavero, D. (2014). *Fotogrametría usando plataforma aérea UAV (Unmanned Aerial Vehicle)*. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA.
- SDP Noticias. (2017). Se seca cascada de Tamul en SLP. *SDPnoticias.Com*. <https://www.unotv.com/noticias/estados/san-luis-potosi/detalle/se-seca-cascada-de-tamul-en-slp-161852/>
- Secretaría del Turismo. (n.d.). *Mexico mi nuevo destino, Estado de san Lus*. <http://cedocvirtual.sectur.gob.mx/janium/Documentos/>
- SECTUR. (2014). *Guía Local de Acciones de Alto Impacto en Materia de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático en Destinos Turísticos Mexicanos*. Secretaria de Turismo, México, D.F.
- SECTUR SLP. (2016). *Perfil del visitante Semana Santa 2016*. San Luis Potosí: Secretaría de Turismo del Estado de San Luis Potosí.
- SEMARNAT. (2008). *Agua y clima : elementos para la adaptación al cambio climático* (R. Landa, V. Magaña, & C. Neri (eds.)). http://www.atmosfera.unam.mx/editorial/libros/agua_y_clima/agua_y_clima.pdf
- SEMARNAT. (2011). *México y el Cambio Climático Global* (C. Conde (ed.); Cuarta rei). [https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Cecadesu/Libros/Mexico y el cambio climatico.pdf](https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Cecadesu/Libros/Mexico_y_el_cambio_climatico.pdf)
- SEMARNAT. (2013). *Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión* (SEMARNAT (ed.); primera ed).
- Singh, P. V. (1995). *Computer models of watershed hydrology*. *Water Resources Publications* (W. R. Publications (ed.)).
- Strahler, A. (1986). *Geografía física* (Omega (ed.); 8a ed.).
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913–920. <https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>
- Taylor, A. B., & Schwarz, H. E. (1952). Unit-hydrograph lag and peak flow related to basin characteristics. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 33(2), 235–246. <https://doi.org/10.1029/TR033i002p00235>
- Tennant, D. L. (1976). Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources. *Fisheries*, 1(4), 6–10.
- Thornwaite, C. W. (1948). An approach towards a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38, 55–89.

- Timbe Castro, L. M., & Willems, P. (2011). Desempeño de modelos hidráulicos 1D y 2D para la simulación de inundaciones Lus Timbe. *Maskana*, 2(1), 91–98. <https://doi.org/10.18537/mskn.02.01.07>
- Torres-Bejarano, F., Padilla Coba, J., Rodríguez Cuevas, C., Ramírez León, H., & Cantero Rodelo, R. (2016). La modelación hidrodinámica para la gestión hídrica del embalse del Guájaro, Colombia. *Revista Internacional de Metodos Numericos Para Calculo y Diseno En Ingenieria*, 32(3), 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2015.04.001>
- Trimble. (2008). *Guía del usuario, Trimble Business Center*. Trimble Navigation Limited. <https://doi.org/10.1787/9789264287877-3-es>
- Übel, M. (2021). *Los mejores programas de fotogrametría de 2021*. <https://all3dp.com/es/1/mejores-programas-fotogrametria/>
- US Army Corps of Engineers. (2016). *HEC-RAS, River Analysis System*. Institute for Water Resources - US Army Corps.
- US Army Corps of Engineers. (2021). *HEC-RAS, River Analysis sytem, Hydraulic Reference Manual*. [https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation/HEC-RAS 5.0 Reference Manual.pdf](https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf)
- Velázquez Zapata, J. A., Dávila Ortiz, R., & Algara Siller, M. (2020). Variabilidad del impacto del cambio climático en el régimen hidrológico de dos cuencas de la región Huasteca. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 21(3), 1–12. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2020.21.3.021>
- Velez, J. J. (2008). Modelación en hidrología, tendencias actuales y futuras. In *Actualidad y tendencias de la Ingeniería Civil* (Issue III Simposio Nacional).
- Vide, J. M. (2008). La nueva realidad del calentamiento global. Un decálogo del cambio climático. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 12(270 (23)). <http://www.ub.edu/geocrit/-xcol/49.htm>
- Villota, H. (1997). Una nueva aproximación a la clasificación fisiográfica del terreno. *Revista CIAF*, 15, núm. 1(Santa Fé de Bogotá, Colombia), 83–115.
- Villota López, C. I. (2019). *Modelación numérica de la calidad del agua en el río Gallinas, estado de San Luis Potosí, México*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Wolf, P., & Ghilani, C. (2016). *Topografía* (Alfaomega Grupo Editor (ed.); Decimocuar).
- Wood, E. F., Sivapalan, M., Beven, K., & Band, L. (1988). Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling. *Journal of Hydrology*, 102(1–4), 29–47. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(88\)90090-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(88)90090-X)
- Zelaya, C., Guevara, R., Pacas, A., & Nelson, R. (2016). *Aplicación de fotogrametría aérea en levantamientos topográficos mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados*. Universidad de el Salvador.

Anexos



Anexos

Anexo I – Funciones de distribución

Gamma dos parámetros - Factor de forma (a)

Parámetro de Forma a	Probabilidad (P(X≤x))								
	0.001	0.01	0.1	0.3	0.5	0.8	0.9	0.95	0.995
0.5	0	0	0	0.11	0.32	1.16	1.91	2.7	5.57
0.6	0	0	0	0.13	0.41	1.28	2.02	2.79	5.48
0.7	0	0	0	0.21	0.49	1.38	2.1	2.85	5.41
0.8	0	0	0	0.26	0.56	1.46	2.17	2.9	5.37
0.9	0	0	0	0.31	0.66	1.54	2.24	2.95	5.33
1.0	0	0	0.11	0.36	0.69	1.61	2.3	3	5.3
1.5	0	0	0.24	0.58	0.97	1.9	2.55	3.19	5.24
2.0	0	0.1	0.37	0.78	1.19	2.12	2.75	3.36	5.26
2.5	0	0.17	0.51	0.95	1.38	2.31	2.92	3.5	5.3
3.0	0.11	0.24	0.63	1.1	1.54	2.47	3.07	3.64	5.36
3.5	0.14	0.3	0.75	1.25	1.7	2.62	3.21	3.76	5.41
4.0	0.21	0.41	0.87	1.38	1.84	2.76	3.34	3.88	5.49
4.5	0.26	0.49	0.98	1.51	1.97	2.89	3.46	3.99	5.56
5.0	0.32	0.57	1.09	1.62	2.09	3.01	3.58	4.09	5.63
6.0	0.41	0.72	1.29	1.84	2.31	3.23	3.79	4.29	5.78
7.0	0.57	0.88	1.47	2.04	2.52	3.43	3.98	4.48	5.92
8.0	0.69	1.02	1.64	2.23	2.71	3.62	4.16	4.65	6.06
9.0	0.81	1.16	1.81	2.47	2.89	3.79	4.33	4.81	6.19
10.0	0.93	1.31	1.97	2.57	3.06	3.96	4.49	4.97	6.34
11.0	1.04	1.43	2.12	2.73	3.22	4.12	4.46	5.12	6.45
12.0	1.16	1.56	2.26	2.88	3.37	4.27	4.79	5.26	6.58
13.0	1.27	1.69	2.4	3.02	3.51	4.39	4.83	5.4	6.7
14.0	1.39	1.81	2.53	3.16	3.65	4.55	5.07	5.53	6.82
15.0	1.49	1.93	2.66	3.29	3.79	4.68	5.2	5.65	6.93

Gumbel - Constantes en función del tamaño de la muestra n

n	$\bar{Y}_n$	σ_n	n	$\bar{Y}_n$	σ_n	n	$\bar{Y}_n$	σ_n	n	$\bar{Y}_n$	σ_n
8	0.4843	0.9043	28	0.5343	1.1047	48	0.5477	1.1574	76	0.5561	1.1906
9	0.4902	0.9288	29	0.5353	1.1086	49	0.5481	1.159	78	0.5565	1.1923
10	0.4952	0.9497	30	0.5362	1.1124	50	0.5485	1.1607	80	0.5569	1.1938
11	0.5996	0.9676	31	0.5371	1.1159	51	0.5489	1.1623	82	0.5572	1.1953
12	0.5035	0.9833	32	0.538	1.1193	52	0.5493	1.1638	84	0.5576	1.1967
13	0.507	0.9972	33	0.5388	1.1226	53	0.5497	1.1653	86	0.558	1.198
14	0.51	1.0095	34	0.5396	1.1255	54	0.5501	1.1667	88	0.5583	1.1994
15	0.5128	1.0206	35	0.5403	1.1285	55	0.5504	1.1681	90	0.5586	1.2007
16	0.5157	1.0316	36	0.541	1.1313	56	0.5508	1.1696	92	0.5589	1.202
17	0.5181	1.0411	37	0.5418	1.1339	57	0.5511	1.1708	94	0.5592	1.2032
18	0.5202	1.0493	38	0.5424	1.1363	58	0.5515	1.1721	96	0.5595	1.2044
19	0.522	1.0566	39	0.543	1.1388	59	0.5518	1.1734	98	0.5598	1.2055
20	0.5236	1.0628	40	0.5436	1.1413	60	0.5521	1.1747	100	0.56	1.2065
21	0.5252	1.0696	41	0.5442	1.1436	62	0.5527	1.177	150	0.5646	1.2253
22	0.5268	1.0754	42	0.5448	1.1458	64	0.5533	1.1793	200	0.5672	1.236
23	0.5283	1.0811	43	0.5453	1.148	66	0.5538	1.1814	250	0.5688	1.2429
24	0.5296	1.0864	44	0.5458	1.1499	68	0.5543	1.1834	300	0.5699	1.2479
25	0.5309	1.0915	45	0.5463	1.1519	70	0.5548	1.1854	500	0.5724	1.2588
26	0.532	1.0961	46	0.5468	1.1538	72	0.5552	1.1873	1000	0.5745	1.2685
27	0.5332	1.1004	47	0.5473	1.1557	74	0.5557	1.189	∞	0.5772	1.2826

Anexo II – Clasificación de suelos y número de escurrimiento

Clasificación hidrológica de los tipos de suelo según su permeabilidad

Clave de clasificación FAO	Suelos	Tipo hidrológico de suelo	Permeabilidad	Propiedades
T	Andosoles	A	Muy alta	Arenas con poco limo y arcilla (escurrimiento mínimo)
Q	Arenosoles			
J	Fluvisoles			
O	Histosoles			
U	Ranker			
X, Y	Calcisoles (antes xerosol y yermosol)	B	Buena	Arenas finas y limos
I, E	Leptosoles (antes litosoles y rendizinas)			
Z	Solonchaks			
D	Podzoles			
F	Ferralsoles			
R	Regosoles			
H	Feozems	C	Media	Arenas muy finas, limos y bastante arcilla
K	Kastanozems			
N	Nitrosiles			
C	Chernozems			
-	Alisoles	D	Baja	Arcillas en grandes cantidades, suelos poco profundos con subhorizontes casi impermeables (escurrimiento máximo)
A	Acrisoles			
B	Cambisoles			
G	Gleysoles			
L	Luvisoles			
V	Vertisoles			
W	Planosoles			
S	Solonetz			
D	Podzoluvisoles			
-	Plintosoles			
-	Lixisoles			

Fuente: Manual del modelo para pronóstico de escurrimiento (Domínguez Mora *et al.*, 2018).

Número de escurrimiento según la cobertura del suelo

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN (INEGI)		GRUPO HIDROLÓGICO			
		A	B	C	D
AGRICULTURA (de humedad, de riego, de temporal)	Condición hidrológica mala	72	81	88	91
	Condición hidrológica regular	67	76	83	86
	Condición hidrológica buena	62	71	78	81
ÁREA SIN VEGETACIÓN APARENTE		77	86	91	94
ASENTAMIENTO HUMANO	Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc	82	88	91	93
	Condición hidrológica regular	49	69	79	84
	Condición hidrológica buena	39	61	74	80
	Residencial 50 % ó más área impermeable	77	85	90	92
	Residencial 50 % ó menos área impermeable	61	75	83	87
	Áreas comerciales de negocios (85 % impermeables)	89	92	94	95
	Distritos industriales (72 % impermeables)	81	88	91	93
	Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc	98	98	98	98
	Calles y carreteras (pavimentados con cunetas y alcantarillas)	98	98	98	98
	Calles y carreteras de grava	76	85	89	91
	Calles y carreteras de tierra	72	82	87	89
BOSQUE (cultivado, de encino, encino-pino, oyamel, pino, tascate, mesófilo de montaña)	Condición hidrológica mala	45	66	77	83
	Condición hidrológica regular	36	60	73	79
	Condición hidrológica buena	25	55	70	77
CARDONAL		54	71	80	89
CHAPARRAL (ARBUSTOS)		20	48	65	73
CUERPO DE AGUA		100	100	100	100

¹Chow, *Hidrología Aplicada*; Aparicio, M F J, *Fundamentos de Hidrología de Superficie*; Domínguez, M R, y Gracia J S, *Manual de Diseño de Obras Civiles*, Hidrotecnia, A.1.4 Pérdidas.

Fuente: Manual del modelo para pronóstico de escurrimiento (Domínguez Mora et al., 2018).

EROSIÓN		68	79	86	89
MANGLAR		100	100	100	100
MATORRAL (con izotes, con rosetófilos acaules, crasicaule, desértico micrófilo, desértico rosetófilo, espinoso, inerme, subinerme, subtropical)	Condición hidrológica mala	48	67	77	83
	Condición hidrológica regular	34	58	71	78
	Condición hidrológica buena	20	48	65	73
MEZQUITAL		68	79	86	92
NOPALERA		39	61	74	84
PALMAR		45	66	77	83
PASTIZAL (cultivado, halófilo, inducido, natural, natural-huizachal)	Condición hidrológica mala	68	79	86	89
	Condición hidrológica regular	49	69	79	84
	Condición hidrológica buena	39	61	74	80
PLANTACIÓN FORESTAL	Condición hidrológica mala	55	73	82	86
	Condición hidrológica regular	44	65	76	82
	Condición hidrológica buena	32	58	72	79
PRADERA DE ALTA MONTAÑA		30	58	71	78
SABANA		45	66	77	83
SELVA (baja caducifolia, baja caducifolia y subcaducifolia, baja espinosa, mediana subcaducifolia)		45	66	77	83
TULAR		68	79	86	92
VEGETACIÓN HALÓFILA		68	79	100	100
VEGETACIÓN SECUNDARIA		68	79	86	89
Definición de <i>condición hidrológica</i>					
Suelos agrícolas:					
Mala: tiene menos del 25 % del terreno cubierto					
Regular: tiene entre 25 y 50 % del terreno cubierto					
Buena: tiene más del 50 % del terreno cubierto.					
Uso forestal:					
Mala: tiene menos del 30% del terreno cubierto					
Regular: tiene entre 30 y 70% del terreno cubierto.					
Buena: tiene más del 70% del terreno cubierto.					

Fuente: Manual del modelo para pronóstico de escurrimiento (Domínguez Mora et al., 2018).

Anexo III – Variable de evapotranspiración potencial

Número máximo de horas al sol

Latitud N (*)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
50	8.3	9.8	11.6	13.5	15.2	16.1	15.7	14.3	12.3	10.4	8.7	7.9
48	8.6	10.0	11.6	13.4	15.0	15.8	15.5	14.1	12.3	10.6	9.0	8.2
46	8.8	10.1	11.6	13.3	14.8	15.5	15.2	14.0	12.3	10.7	9.2	8.5
44	9.1	10.3	11.6	13.2	14.6	15.3	15.0	13.8	12.3	10.7	9.4	8.7
42	9.3	10.4	11.7	13.2	14.4	15.0	14.8	13.7	12.3	10.8	9.6	9.0
40	9.5	10.5	11.7	13.1	14.2	14.8	14.6	13.6	12.2	10.9	9.7	9.2
38	9.6	10.6	11.7	13.0	14.1	14.6	14.4	13.5	12.2	11.0	9.9	9.4
36	9.8	10.7	11.7	12.9	13.9	14.4	14.2	13.4	12.2	11.1	10.1	9.6
34	10.0	10.8	11.8	12.9	13.8	14.3	14.1	13.3	12.2	11.1	10.2	9.7
32	10.1	10.9	11.8	12.8	13.6	14.1	13.9	13.2	12.2	11.2	10.3	9.9
30	10.3	11.0	11.8	12.7	13.5	13.9	13.8	13.1	12.2	11.3	10.5	10.1
28	10.4	11.0	11.8	12.7	13.4	13.8	13.6	13.0	12.2	11.3	10.6	10.2
26	10.5	11.1	11.8	12.6	13.3	13.6	13.5	12.9	12.1	11.4	10.7	10.4
24	10.7	11.2	11.8	12.6	13.2	13.5	13.3	12.8	12.1	11.4	10.8	10.5
22	10.8	11.3	11.9	12.5	13.1	13.3	13.2	12.8	12.1	11.5	10.9	10.7
20	10.9	11.3	11.9	12.5	12.9	13.2	13.1	12.7	12.1	11.5	11.0	10.8
18	11.0	11.4	11.9	12.4	12.8	13.1	13.0	12.6	12.1	11.6	11.1	10.9
16	11.1	11.5	11.9	12.4	12.7	12.9	12.9	12.5	12.1	11.6	11.2	11.1
14	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.8	12.5	12.1	11.7	11.3	11.2
12	11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.8	11.4	11.3
10	11.5	11.7	11.9	12.2	12.5	12.6	12.5	12.3	12.1	11.8	11.5	11.4
8	11.6	11.7	11.9	12.2	12.4	12.5	12.4	12.3	12.0	11.8	11.6	11.5
6	11.7	11.8	12.0	12.1	12.3	12.3	12.3	12.2	12.0	11.9	11.7	11.7
4	11.8	11.9	12.0	12.1	12.2	12.2	12.2	12.1	12.0	11.9	11.8	11.8
2	11.9	11.9	12.0	12.0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.0	12.0	11.9	11.9
0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0

(*) Para la latitud Sur, basta con calcular el complementario de 24. Por ejemplo, en Enero 60°: N° máximo de sol = 24-6.4=17.6

Fuente:(Campos Aranda, 1984)

Valores de la Evapotranspiración potencial

Valores de la evapotranspiración potencial sin corregir en milímetros, para temperatura media mensual superior a 26.5 °C (método de Thornthwaite).

T °C	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
26						135.0	135.9	136.8	137.7	138.6
27	139.5	140.3	141.2	142.0	142.9	143.7	144.5	145.3	146.2	147.0
28	147.8	148.6	149.4	150.1	150.9	151.7	152.4	153.2	153.9	154.7
29	155.4	156.1	156.8	157.5	158.2	158.9	159.5	160.2	160.8	161.5
30	162.1	162.7	163.3	164.0	164.6	165.2	165.8	166.3	166.9	167.4
31	168.0	168.5	169.1	169.6	170.2	170.7	171.2	171.7	172.1	172.6
32	173.1	173.5	174.0	174.4	174.9	175.3	175.7	176.1	176.4	176.8
33	177.2	177.6	177.9	178.3	178.6	179.0	179.3	179.6	179.9	180.2
34	180.5	180.8	181.0	181.3	181.5	181.8	182.0	182.2	182.5	182.7
35	182.9	183.1	183.2	183.4	183.5	183.7	183.8	183.9	184.1	184.2
36	184.3	184.4	184.5	184.5	184.6	184.7	184.7	184.8	184.8	184.9
37	184.9	184.9	184.9	185.0	185.0	185.0	185.0	185.0	185.0	185.0
38	185.0									

Fuente:(Campos Aranda, 1984)

Anexo IV - Softwares de procesamiento fotogramétrico

Software	Tipo	Sistema operativo	Precio
COLMAP	Aérea, terrestre	Windows, macOS, Linux	Gratuito
Meshroom	Aérea, terrestre	Windows, Linux	Gratuito
MicMac	Aérea, terrestre	Windows, macOS, Linux	Gratuito
Multi-View Environment	Aérea, terrestre	Windows, macOS	Gratuito
OpenMVG	Aérea, terrestre	Linux, Windows, MacOS	Gratuito
Regard3D	Aérea, terrestre	Windows, macOS, Linux	Gratuito
VisualSFM	Aérea, terrestre	Windows, macOS, Linux	Gratuito
3DF Zephyr	Aérea, terrestre	Windows	Versión gratuita con limitaciones y versión de pago a partir de 149€+ impuestos
Autodesk ReCap	Aérea, terrestre	Windows	Desde \$45/mes, \$340/año o 920/3 años (USD)
Agisoft Metashape	Aérea, terrestre	Windows, macOS, Linux	Para estudiantes estándar \$59, profesional \$549. Licencia estándar \$179, profesional \$3,499 (USD)
Bentley ContextCapture	Aérea, terrestre	Windows	Suscripción anual de \$3,392 - \$6,890 (USD)
Correlator3D	Aérea	Windows	Desde \$250/mes y \$2,950/año
DatuSurvey	Aérea, terrestre	Windows	A petición
DroneDeploy	Aérea	Windows, macOS, Android, iOS	Plan de vuelos gratuito, \$149/mes pro o \$449/mes negocios (+ anualidad), \$1188/año pro o \$3,588/año.
Elcovision 10	Aérea, terrestre	Windows	A petición
iWitnessPRO	Aérea, terrestre	Windows	\$2,495 USD
IMAGINE Photogrammetry	Aérea	Windows	A petición
Photomodeler	Aérea, terrestre	Windows	Cuota única de \$995 o \$59/month USD
Pix4D	Aérea	Windows, macOS, Android, iOS	Desde \$160/mes con cuota anual, \$1920/año, o \$320/mes (USD)
SOCER GXP	Aérea	Windows	A petición
Trimble TBC	Aérea, terrestre	Windows	A petición
WebODM	Aérea	Windows, macOS	Desde \$57 USD

Fuente: (Übel, 2021)

Anexo V – Especificaciones técnicas del equipo RiverRay ADCP

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Perfilación de Caudal	Modo de operación Rango de caudal Rango de perfilación Precisión Resolución Cantidad de celdas Tamaño de celda Rango de celda de superficie Modo de operación	Banda Ancha o pulso coherente, automático $\pm 5\text{m/s}$ predeterminado, $\pm 20\text{m/s}$ max. 0.4m^3 a 60m^3 $\pm 0.25\%$ del caudal relativo al ADCP, $\pm 2\text{mm/s}$ 1mm/s 25 típica, 200 max. (selección automática) 10cm min. (selección automática) 25cm^3 Broadband
Bottom Tracking	Rango de caudal Rango de profundidad Precisión Resolución	$\pm 9\text{m/s}$ 0.4m a 100m^2 $\pm 0.25\%$ del caudal relativo al ADCP, $\pm 2\text{mm/s}$ 1mm/s
Batimetría	Rango Precisión Resolución	0.3m a 100m^2 $\pm 1\%$ (con temperatura de agua y perfil de salinidad uniforme) 1mm^4
Haz Vertical	Rango Precisión Resolución	0.2m to 80m $\pm 1\%$ (con temperatura de agua y perfil de salinidad uniforme) 1mm
Sensores Estándar	Temperatura Range Precisión Resolución	Rolido y Cabeceo -5°C a 45°C $\pm 0.4^\circ\text{C}$ 0.01°C
		(Tilt) Compás $\pm 90^\circ$ $\pm 0.3^\circ$ 0.02°
		$0-360^\circ$ $\pm 2^\circ$ 0.01°
Transductor y Hardware	Frecuencia del sistema Configuración Memoria interna	600kHz Phased array (superficie plana), cuatro haces Janus para ángulo de haz de 30° 16MB
Comunicación	Estándar Opcional	RS-232 , 1200 a $115,200$ baudios. Bluetooth, $115,200$ baudios, rango de 200m . Radio modem, rango $>30\text{km}$ (a línea de vista)
Software (incluido)	- WinRiver II (estándar) para mediciones con fondo en movimiento. - SxS Pro (opcional) para mediciones estacionarias; incluye un modelo de incertidumbre para evaluación y control de calidad in situ	
Potencia	Voltaje Batería (dentro de la embarcación) Capacidad de Batería	$10.5-18\text{V}$ Consumo de potencia 1.5W típico 12V , 7A-hr celda de gel de plomo ácido (recargable) >40 hrs en operación continua
Embarcación (incluida)	Configuración Material Dimensiones Peso	Trimarán Polietileno Largo 120cm , Ancho 80cm , Altura 18cm 10kg vacío; 17kg con instrumental y batería
Integración con GPS (opcional)	Integración con GPS (provido por el usuario) a través de RS-232 a RR data stream	
Condiciones ambientales	Temperatura de operación Temperatura de almacenamiento	-5°C a 45°C -20°C a 50°C

1. Asume una celda buena (mínimo tamaño de celda) en modo de perfilación de alta precisión, rango medido desde la superficie del transductor.
2. Asume agua dulce, rango actual dependiendo de la temperatura y concentración de sólidos suspendidos.
3. Distancia medida desde el centro de la primera celda a la superficie del transductor.
4. Para datos de profundidad promedio.
5. Para una combinación de rolido $\leq \pm 7.0^\circ$ y ángulo de cabeceo $< 70^\circ$.

Fuente: TELEDYNE RD Instruments