

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**  
**Facultad de Ingeniería Mexicali**

Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



“Comportamiento hidrodinámico de flujos ambientales con fines de restauración, implementando un modelo bidimensional e infraestructura hidráulica, caso de estudio: Delta del Río Colorado, México”

Tesis para obtener el grado de:  
Maestro en Ingeniería

Presenta:  
**Ing. Emanuel Jarquín López**

Director: Dr. Marcelo Antonio Lomeli Banda  
Codirector: Dr. Juan Alejandro Saiz Rodríguez

Mexicali, Baja California a 16 de diciembre de 2025.



## RESUMEN

En esta investigación se desarrolló un modelo hidráulico bidimensional (2D) del tramo Vado Cebollero–Vado Carranza del Río Colorado, México, con el objetivo de analizar el comportamiento hidrodinámico del cauce bajo condiciones actuales de operación y evaluar escenarios asociados a la distribución del flujo y la superficie inundada, orientados al manejo de flujos ambientales con fines de restauración ecológica. La modelación se llevó a cabo mediante el software HEC-RAS versión 6.6, integrando información topográfica, batimétrica e hidrométrica obtenida a partir de trabajos de campo y de gabinete, así como registros instrumentales de estaciones de monitoreo dentro del área de estudio.

El Modelo Digital de Elevaciones (MDE) se generó mediante la integración de datos LiDAR correspondientes a zonas no inundables y levantamientos topo-batimétricos del cauce y áreas adyacentes, evaluando distintos métodos de interpolación para seleccionar aquel con menor error en la estimación de elevaciones. La geometría del modelo incluyó la delimitación del dominio hidráulico, la definición del eje del cauce, la incorporación de líneas de quiebre y la generación de un mallado bidimensional optimizado.

La calibración del modelo se realizó mediante el ajuste iterativo del coeficiente de rugosidad de Manning, comparando elevaciones simuladas y observadas del espejo de agua en cuatro puntos de control, empleando indicadores estadísticos. Finalmente, se evaluaron escenarios con infraestructura hidráulica existente y propuesta, analizando su efecto en la superficie inundada y aportando elementos técnicos para la gestión del recurso hídrico con fines ambientales en el Delta del Río Colorado.



## AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a mis **padres** por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi formación académica y personal. Su confianza, comprensión y acompañamiento constante representaron un pilar fundamental para la culminación de esta etapa, brindándome la fortaleza necesaria para continuar incluso en los momentos de mayor dificultad.

Asimismo, deseo agradecer de manera especial a mis hermanos, **Analaura y Raúl**, por su comprensión, apoyo y paciencia a lo largo de este proceso. Su respaldo constante y ánimo permanente fueron de gran importancia durante las distintas etapas de mi formación y en la culminación de este posgrado.

Agradezco de manera especial al **M.I. Adrián T. Salcedo Peredia** por su valioso apoyo, mentoría y amistad a lo largo de esta investigación, así como por el acompañamiento brindado durante este proceso tanto en el ámbito académico como profesional. Su orientación, disposición constante y confianza fueron determinantes para el desarrollo y consolidación de este trabajo, constituyendo además un referente profesional que valoro y respeto.

De igual forma, expreso mi sincero agradecimiento al **Dr. Marcelo A. Lomelí Banda** por su acompañamiento, mentoría, amistad y dirección durante el desarrollo de la investigación. Sus observaciones, conocimiento y experiencia contribuyeron de manera significativa al fortalecimiento del enfoque técnico y metodológico del estudio, así como a la consolidación de mi criterio profesional, dejando una influencia formativa relevante a lo largo de este proceso académico.



Al **Dr. Juan Alejandro Saiz Rodríguez**, agradezco su apoyo como codirector de esta investigación, así como sus aportaciones técnicas y comentarios académicos que contribuyeron de manera significativa al desarrollo de este trabajo, además del apoyo brindado durante la estancia de investigación realizada en la **Universidad de Sonora (UNISON)**.

Hago extensivo mi agradecimiento al **Dr. Carlos Salazar Briones**, al **Dr. José Mizael Ruiz Gibert** y al **M.I. Walter Ávila Ruiz** por su amistad, apoyo y disposición a lo largo de este proceso académico, así como por las aportaciones y comentarios que contribuyeron a mi desarrollo profesional.

A la organización **Restauramos el Colorado**, en especial al Departamento de Hidrología, agradezco el apoyo brindado durante las actividades de campo y gabinete, así como la colaboración y el acompañamiento técnico, los cuales resultaron fundamentales para la obtención y procesamiento de la información utilizada en esta investigación.

Reconozco también el apoyo de los **prestadores de servicio social** de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), pertenecientes al programa educativo de Ingeniero Civil, cuya participación en las actividades de campo fue de gran ayuda para el desarrollo de los trabajos experimentales y de medición realizados.

Al **Instituto de Ingeniería de la UABC**, agradezco el acceso a la información y al monitoreo correspondiente a los sitios DMS-10 y DMS-11, datos que resultaron esenciales para la calibración y validación del modelo hidráulico desarrollado en este estudio.

Finalmente, agradezco a la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)** por el otorgamiento de la beca nacional **No. 1290766**, la cual hizo posible la dedicación de tiempo completo a los estudios de posgrado y al desarrollo de la presente investigación.



## CONTENIDO

<i>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</i> .....	10
Justificación.....	12
Objetivos .....	13
Objetivo General.....	13
Objetivos Específicos.....	13
<i>CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES</i> .....	14
Río Colorado .....	14
Tratados y Actas.....	16
Segmentación del Área de Estudio .....	18
Manejo del agua para flujos ambientales en el Delta del Río Colorado .....	21
Modelos hidráulicos en el Delta del Río Colorado .....	24
<i>CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL</i> .....	27
Hidráulica.....	27
Hidráulica en Canales Abiertos.....	27
Clasificación de Canales .....	27
Regímenes de Flujos .....	29
Tipos de Flujo.....	31
Caudal.....	32
Coeficiente de rugosidad .....	33



Modelos Hidráulicos .....	36
Modelo Digital de Elevaciones .....	38
Hidrología.....	38
Modelos hidrológicos:.....	39
Flujo superficial.....	39
Restauración Ecológica .....	40
Flujos Ambientales.....	41
Manejo adaptativo .....	43
Corredor Ripario.....	44
<i>CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FÍSICO.....</i>	<i>45</i>
Área de estudio.....	45
Clima.....	47
Flora y fauna .....	47
Geología .....	48
Hidrología .....	48
Fuentes de abastecimiento.....	49
<i>CAPÍTULO 5. MATERIALES Y MÉTODOS .....</i>	<i>52</i>
Trabajo de Campo .....	53
Topo-batimetría.....	53
Levantamiento fotográfico .....	57
Medición de elevaciones del espejo del agua .....	58



Medición de flujos superficiales .....	61
Trabajo de Gabinete .....	66
Modelo Digital de Elevaciones .....	66
Coefficientes de rugosidad .....	68
Análisis de elevaciones del espejo del agua.....	68
Análisis de caudales .....	70
Modelo hidráulico .....	72
Propuesta de infraestructura hidráulica.....	76
<i>CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</i> .....	<i>77</i>
Modelo Digital de Elevaciones .....	77
Análisis de series temporales hidrométricas .....	79
Fuentes de abastecimiento.....	79
Puntos de monitoreo dentro del cauce .....	80
Modelo hidráulico .....	86
Calibración .....	86
Definición del paso de tiempo.....	92
Propuesta de infraestructura hidráulica.....	92
<i>CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES</i> .....	<i>100</i>
<i>CAPITULO 8. RECOMENDACIONES</i> .....	<i>102</i>
<i>BIBLIOGRAFÍA</i> .....	<i>104</i>



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	1	Segmentación del Río Colorado	.....	19
Tabla	2	Tipos de flujo según el número de Reynolds	.....	29
Tabla	3	Tipos de flujo según el número de Froude	.....	30
Tabla	4	Regímenes de flujo	.....	30
Tabla	5	Criterios y valores numéricos para el coeficiente de rugosidad mediante la ecuación de Cowan.	.....	35
Tabla	6	Resultados del posicionamiento y nivelación de RVCE-1.	.....	61
Tabla	7	Comparativa de métodos de interpolación aplicados a los datos topo-batimétricos para la generación del MDE.	.....	67



## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1</i>	<i>Cuenca del Río Colorado.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2</i>	<i>Segmentación del Río Colorado.</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3</i>	<i>Área de estudio dentro del Distrito de Riego.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 4</i>	<i>Clasificación de cauces por su morfología.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 5</i>	<i>Tipos de flujo.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 6</i>	<i>Flujo superficial sobre el Río Colorado, México.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 7</i>	<i>Sitio de restauración ecológica "El Chaussé".</i>	<i>41</i>
<i>Figura 8</i>	<i>Entrega de flujo ambiental por km 28+840 del canal Alimentador del Sur "Compuerta Central" al sitio de restauración "El Chaussé".</i>	<i>42</i>
<i>Figura 9</i>	<i>Ciclo de manejo adaptativo.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 10</i>	<i>Corredor ripario del Delta del Río Colorado.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 11</i>	<i>Área de estudio "Vado Cebollero-Vado Carranza".</i>	<i>46</i>
<i>Figura 12</i>	<i>Fuentes de abastecimiento de agua.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 13</i>	<i>Metodología implementada.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 14</i>	<i>Levantamiento topográfico con GPS GR-5.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 15</i>	<i>Localización del banco de nivel Mojo 7.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 16</i>	<i>Levantamiento batimétrico con River Surveyor S5.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 17</i>	<i>Fotografía del cauce del Río Colorado para la estimación del coeficiente de rugosidad.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 18</i>	<i>Localización de los sitios de medición de elevaciones del espejo del agua.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 19</i>	<i>Nivelación de limnímetro RVCE-1.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 20</i>	<i>Medición de flujo con FlowTracker2 en punto de abastecimiento del Km 28+840 del canal Alimentador del Sur "Compuerta Central".</i>	<i>62</i>
<i>Figura 21</i>	<i>Medición de flujo con River Surveyor S5 sitios de medición DMS-8A.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 22</i>	<i>Sitios de medición de flujos superficiales.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 23</i>	<i>Correlación elevación - tirante en el sitio de monitoreo DMS-8A.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 24</i>	<i>Correlación caudal - elevación en el sitio de monitoreo DMS-8A.</i>	<i>71</i>
<i>Figura 25</i>	<i>Paso vehicular de Vado Carranza.</i>	<i>74</i>
<i>Figura 26</i>	<i>Azolve en alcantarilla del paso vehicular de Vado Carranza.</i>	<i>74</i>
<i>Figura 27</i>	<i>Modelo digital de elevaciones.</i>	<i>78</i>



<i>Figura 28 Hidrogramas de las fuentes de abastecimiento de agua del área de estudio.</i>	80
<i>Figura 29 Monitoreo de elevación en RVCE-1.</i>	81
<i>Figura 30 Monitoreo de elevación y caudal en DMS-8A.</i>	82
<i>Figura 31 Monitoreo de elevación y caudal en DMS-10.</i>	83
<i>Figura 32 Monitoreo de elevación y caudal en DMS-11.</i>	84
<i>Figura 33 Monitoreo de elevación RVC1.</i>	85
<i>Figura 34 Monitoreo de elevación y caudal en DMS-12.</i>	86
<i>Figura 35 Relación elevación-caudal observado y simulado en el punto DMS-8A.</i>	87
<i>Figura 36 Relación elevación-caudal observado y simulado en el punto DMS-10.</i>	88
<i>Figura 37 Relación elevación-caudal observado y simulado en el punto DMS-11.</i>	89
<i>Figura 38 Relación elevación-caudal observado y simulado en el punto DMS-12.</i>	90
<i>Figura 39 Distribución de coeficiente de rugosidad.</i>	91
<i>Figura 40 Mapa de inundación con obstrucción en el sitio bordo de Esquivias a la cota 10.00 m s.n.m.</i>	93
<i>Figura 41 Mapa de inundación con obstrucción en el sitio bordo de Esquivias a la cota 10.50 m s.n.m.</i>	95
<i>Figura 42 Mapa de inundación con obstrucción en el sitio bordo de Esquivias a la cota 11.00 m s.n.m.</i>	97
<i>Figura 43 Mapa de inundación con obstrucción en el sitio bordo de Esquivias a la cota 11.50 m s.n.m.</i>	99



## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En la ingeniería hidráulica de hoy en día, la modelación es una herramienta vital y de gran utilidad para el desarrollo de proyectos, investigación y diseño. Un modelo de simulación hidráulica es una representación matemática de los procesos físicos hidráulicos (Alzahrani, 2017). Mediante este tipo de herramientas es posible Figurar fenómenos tales como la precipitación y su posterior escurrimiento, asimismo procesos hidráulicos complejos de visualizar en laboratorios (García-Salas & Chocat, 2009). Algunas de sus principales aplicaciones incluyen el análisis de canales abiertos, estructuras hidráulicas, conductos cerrados, sistemas de drenaje pluvial, esteros y estructuras costeras (Novak et al., 2018).

El recurso hídrico es fundamental del desarrollo sostenible, ya que resulta esencial para el progreso socioeconómico, la generación de energía, la agricultura, los ecosistemas y la persistencia de la humanidad. Además, es un elemento crítico para la adaptación a los efectos del cambio climático, así como un medio de enlace entre el medioambiente y la sociedad (ONU, 2022). Esto último se ha observado con la creación de espacios naturales para asentamientos humanos y una diversidad de servicios ecosistémicos, en donde hay ecosistemas relacionados con el agua. No obstante, el agua al igual que otros recursos naturales se encuentra en amenaza (ONU, 2019).

El Delta del Río Colorado (Delta) ha sufrido un deterioro en su ecosistema a partir de la década de 1930 como resultado de la construcción de presas y desviaciones de su escurrimiento natural (Flessa et al., 2013; Gerlak et al., 2013; Glenn et al., 2001; Rivera-Torres et al., 2021). Aunado a lo anterior, el incremento de la demanda agrícola y urbana en conjunto con las graves sequias y las restricciones institucionales, han representado desafíos para su restauración (Medellín-Azuara et al., 2007). Sin embargo, desde hace varios años los gobiernos de México y Estados Unidos a través de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA), han negociado



e implementado diversos acuerdos para asignar agua y recursos para la restauración del Delta (Berggren, 2018; Gerlak et al., 2013).

No fue sino hasta el año del 2012 a través del Acta 319, en la que se asignó agua por primera vez al Río Colorado con fines ambientales y de conservación. Durante este evento histórico, fueron enviados 195 Mm<sup>3</sup> de agua con el objetivo de restaurar el corredor ripario del Delta (CILA, 2017). Además, se contó con la participación de científicos de múltiples disciplinas participando en la colecta de datos en sitio con el propósito de generar nuevos instrumentos para posteriores esfuerzos de restauración y toma de decisiones (CILA, 2018).

Como resultado del monitoreo del ecosistema del Delta a través del Acta 319, se delimitó el cauce en siete Tramos (*Reaches*) a partir de su vegetación, hidrología y potencial de restauración (Nelson et al., 2017), ubicándose el área de estudio de esta investigación en los Tramos 4 y 5. Por otro lado, actualmente es complejo contar con un flujo continuo en el segmento desde la Presa Derivadora Morelos hasta el Golfo de California (Mar de Cortés). Sin embargo, ha sido posible en algunas zonas, por ejemplo, el Tramo 4, donde actualmente se encuentra la mayoría de sitios de restauración ecológica (Nagler et al., 2022), y el 84% del área de esta investigación.

Derivado de lo anterior, la presente investigación se desarrolla entre los pasos vehiculares Vado Cebollero y Vado Carranza, ubicados dentro de los tramos 4 y 5, respectivamente. El principal objetivo de este estudio consiste evaluar el comportamiento del sistema hidrodinámico del tramo Vado Cebollero – Vado Carranza del Río Colorado, mediante la simulación de sus condiciones actuales de flujo, así como de incorporación de infraestructura hidráulica, que permita optimizar el manejo del agua y obtener distintos beneficios ambientales y de restauración. Se implementarán herramientas de modelación de ríos, que permitan obtener distintas hipótesis y elementos de planeación para la toma de decisiones.



## **Justificación**

A partir del año 2014 se han llevado a cabo esfuerzos de restauración en el Delta del Río Colorado, mismos que han sido de interés binacional para México, Estados Unidos y ONG por el impacto ambiental y social que han brindado. La preservación de esta zona depende principalmente de las descargas provenientes de la red de canales aledaños al corredor ripario, y han sido gestionadas bajo distintos eventos históricos coordinados por la CILA. Sin embargo, la disminución de flujos se encuentra latente debido a la reducción inminente por la escasez de agua en la cuenca del Río Colorado, poniendo en riesgo la continuidad de envíos de agua hacia estos sitios. Es por ello que la implementación de un modelo hidráulico bidimensional calibrado mediante mediciones in-situ de gasto, rugosidad, topo-batimetría, entre otros parámetros, permitirá determinar bajo distintos escenarios de flujo e infraestructura hidráulica el comportamiento hidrodinámico del segmento del Río Colorado dentro del área de estudio, permitiendo crear elementos para llevar a cabo un adecuado manejo adaptativo mediante el uso sustentable del agua.

Actualmente los sitios de restauración en el Delta del Río Colorado dependen principalmente de los envíos de agua a través de la red de canales del Distrito de Riego 014. No obstante, los gobiernos de México y Estados Unidos, así como Organizaciones No Gubernamentales, han realizado esfuerzos para destinar volúmenes de agua con fines de restauración ecológica, incluyendo, los envíos de agua durante el flujo pulso y base en 2014, y eventos de entregas de aguas Federales durante 2021, 2022 y 2024. Sin embargo, para coadyubar a preservar el corredor ripario y los sitios que en la actualidad se encuentran en proceso de restauración, es necesario proporcionar elementos de manejo hidrológico e hidráulico para los tomadores de decisiones, mediante el uso herramientas de simulación hidráulica que faciliten a identificar las zonas de inundación bajo diferentes condiciones de flujo y frontera.



## **Objetivos**

### Objetivo General

Evaluar el comportamiento del sistema hidrodinámico del tramo Vado Cebollero – Vado Carranza del Río Colorado, mediante la simulación bidimensional de sus condiciones actuales de flujo, que permita optimizar el manejo del agua y obtener distintos beneficios ambientales y de restauración.

### Objetivos Específicos

- Realizar el levantamiento topo-batimétrico del cauce y las zonas aledañas (25 km del tramo Vado Cebollero – Vado Carranza) para definir la geometría del modelo.
- Realizar mediciones de caudal de entrada, así como de flujo y elevación dentro del cauce.
- Desarrollar y calibrar el modelo hidráulico bidimensional (2D) del tramo de estudio.
- Proponer estrategias de gestión para el uso y manejo sustentable del recurso hídrico.



## CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

### Río Colorado

El Río Colorado mide aproximadamente 2,334 km desde su inicio en las montañas rocallosas en Estados Unidos hasta su desembocadura en el Golfo de California, en México. Su cauce principal, así como los afluentes que conforman este sistema, se extienden en un área de captación de 637,137 km<sup>2</sup> en los Estados Unidos y 15,419 km<sup>2</sup> en México (Adler, 2007).

La cuenca del Río Colorado se divide física y políticamente en dos unidades, la cuenca alta y la cuenca baja (Figura 1), lo anterior a partir del Convenio del Río Colorado (*Colorado River Compact o Santa Fe Compact*) firmado en 1922, en el cual, con la intención de repartir un volumen estimado de 8,500 Mm<sup>3</sup> (15 millones de acres-pie) se dividió la cuenca y el agua estimada de manera ecuánime. Actualmente los Estados contemplados en la cuenca alta son Wyoming, Colorado, Utah y Nuevo México, mientras que en la cuenca baja se incluyen Arizona, Nevada, California, Baja California y Sonora (IMTA, 2007).

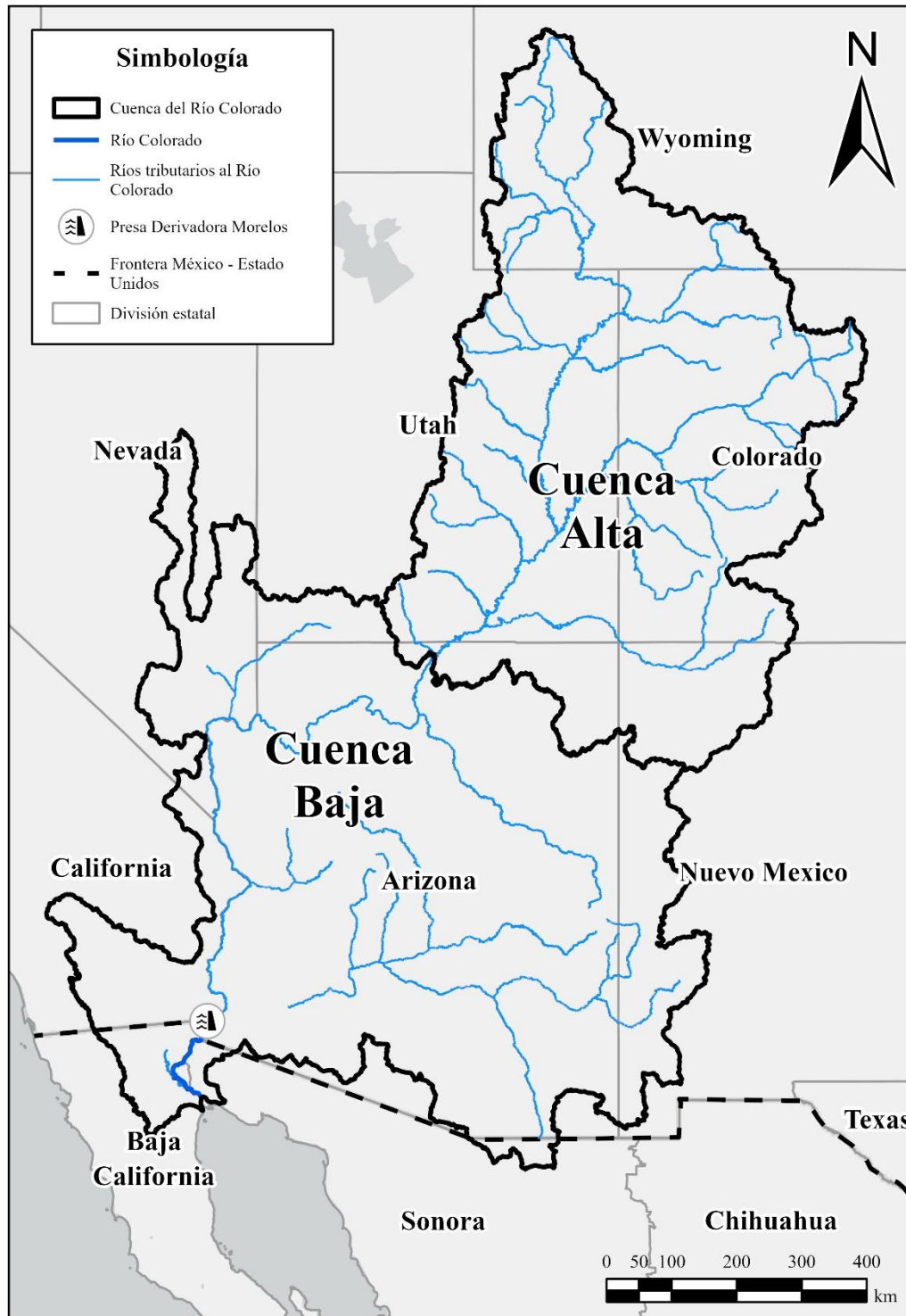
El agua potable que suministra el Río Colorado, beneficia a más de 40 millones de habitantes, y proporciona el agua para regar aproximadamente 13,000 km<sup>2</sup> de cultivos dentro de la cuenca, así como 10,000 km<sup>2</sup> fuera de la misma (Cohen et al., 2013). Hoy en día dentro de la porción Estadounidense, los Estados beneficiados de estos flujos son Wyoming, Utah, Colorado, Nevada, Nuevo México, Arizona y California; mientras que en México únicamente corresponden a Baja California y Sonora (Xiao et al., 2018).

El Delta del Río Colorado (Delta) es una región localizada en el desierto sonorense cuyo ecosistema abarca 169,000 ha y es caracterizado por estar rodeada de los biomas más secos de la ecorregión. El Delta representa un lazo entre los desiertos y los diferentes cuerpos de agua con los que converge, como lo es el Alto Golfo de California (Hinojosa-Huerta et al., 2005).



Figura 1

*Cuenca del Río Colorado.*





## **Tratados y Actas**

Como parte de las acciones binacionales para gestionar el uso del agua de la cuenca del Río Colorado, históricamente se han llevado a cabo una serie de acuerdos (Tratados y Actas) entre los gobiernos de México y Estados Unidos a través de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA en México e IBWC en Estados Unidos), la cual es un Organismo internacional integrado por las secciones de ambos países.

El Tratado sobre la Distribución de Aguas Internacionales entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América celebrado el 3 de febrero de 1944 en la ciudad de Washington, establece la distribución de los volúmenes de agua entre México y Estados Unidos de los ríos Colorado, Tijuana y Bravo. En su Artículo 10 se establece que México tiene derecho a recibir anualmente en condiciones normales el 10% del volumen de las aguas del Río Colorado (1,850.234 Mm<sup>3</sup>) así como 246 Mm<sup>3</sup> adicionales cuando existan excedentes. Dicho volumen se divide en dos puntos de entrega; a través del Lindero Internacional Norte ubicado en la Presa Derivadora Morelos en Mexicali, Baja California por donde se reciben 1,677.545 Mm<sup>3</sup>; y por otro lado, el Lindero Internacional Sur a través del Canal Sánchez Mejorada en San Luis Río Colorado, Sonora, por donde se reciben 172.689 Mm<sup>3</sup>(CILA, 1944).

Además de lo anterior, se han suscrito las Actas 306, 317, 319 y 323, las cuales han sido relevantes en el Delta del Río Colorado para fines ambientales:

Acta 306.- “Marco Conceptual entre México y Estados Unidos para el Desarrollo de Estudios que Permitan Emitir Recomendaciones Respecto a la Ecología Ribereña y del Estuario del Tramo Limítrofe del Río Colorado y su Delta”, firmada en el año 2000, establece los lineamientos en los que México y Estados Unidos repartirán los volúmenes de agua excedentes cuando se presente abundancia, así como las reducciones durante tiempos de escasez. Además, en



ella se define un marco conceptual con el propósito de iniciar estudios para generar medidas de protección de la ecología ribereña y el Delta (CILA, 2000).

En el 2010 se firmó el Acta 317.- “Marco conceptual para las conversaciones México-Estados Unidos, relativas a las acciones de cooperación sobre el Río Colorado”, la cual establece significativos precedentes para el desarrollo de proyectos e iniciativas de interés mutuo en la Cuenca del Río Colorado, incluyendo conservación y búsqueda de nuevas fuentes de agua, operación del sistema, así como búsqueda de agua para fines ambientales (CILA, 2010).

El Acta 319.- “Medidas Interinas de Cooperación Internacional en la Cuenca del Río Colorado hasta el 2017 y Ampliación de las Medidas de Cooperación del Acta 318, para atender los prolongados efectos de los sismos de abril de 2010 en el Valle de Mexicali, Baja California”. fue firmada en noviembre de 2012 con una vigencia de 5 años. En ella se dio continuidad a las medidas de cooperación en la cuenca del Río Colorado establecidas en las Actas 317 y 318. En temas ambientales, el Acta 319 en su Sección III.6, “Programa Piloto de Agua para el Ambiente y de Intercambio de ICMA a ICS (ICMA: Agua Mexicana Creada Intencionalmente; ICS: excedentes creados intencionalmente)”, se establece un volumen de 195 Mm<sup>3</sup> de agua para flujo base y flujo pulso destinados al tramo Limítrofe del Río Colorado y su Delta por medio de la participación de México, Estados Unidos y Organizaciones no Gubernamentales (CILA, 2012).

Dentro de los alcances que incluyeron la comprensión de los efectos ecológicos de los flujos del Acta 319, se creó un programa de monitoreo hidrológico intensivo y de exactitud (Lomeli-Banda & Ramírez-Hernández, 2014), considerando a lo largo del río, aforos, levantamiento de secciones transversales, monitoreo de niveles y mediciones de conductancia del agua subterránea y superficial; muestreo de sedimentos, entre otros (Rodríguez-Burgueño & Ramírez-Hernández, 2014).



Por último, en el año 2017 a unos meses de darse por concluida el Acta 319, se firmó su acuerdo sucesor, el Acta 323.- “Ampliación de las Medidas de Cooperación y Adopción de un Plan Binacional de Contingencia ante la escasez de Agua en la Cuenca del Río Colorado”, la cual, se encuentra vigente hasta el 31 de diciembre de 2026. En este acuerdo se establece, entre otros temas, un trabajo cooperativo entre los gobiernos de México y Estados Unidos para tratar preventiva y proactivamente la posible escasez de agua en el Río Colorado; permitir la continuidad a los alcances establecidos en la restauración en el Delta del Río Colorado, donde se acordó, el suministro equitativo de 259 Mm<sup>3</sup> de agua entre México, Estados Unidos y una coalición binacional de Organizaciones no Gubernamentales; así como un financiamiento destinado a la restauración ecológica y el monitoreo científico (CILA, 2017).

#### Segmentación del Área de Estudio

La longitud del Río Colorado a través del territorio mexicano es de 160 km (Adler, 2007; Meyers, 1966). Partiendo desde la presa Morelos, los primeros 30 km del cauce constituyen la frontera internacional entre el Estado de Arizona, Estados Unidos y el Estado de Baja California, México. Posteriormente, desde el puente de la carretera Federal No. 2 Mexicali – San Luis Río Colorado y hasta el puente ferroviario Mexicali – Puerto Peñasco, el cauce forma la frontera entre los Estados de Baja California y Sonora. A partir de este punto el trazo discurre totalmente por territorio del Estado de Baja California hasta su desembocadura en el Golfo de California.

La identificación de siete tramos contiguos dentro del Delta, específicamente dentro de la totalidad de los 160 km del Río Colorado que escurren por México, así como una porción del Río Hardy, se estableció a través del Acta 319, misma que destinó 195 Mm<sup>3</sup> de agua con propósitos ambientales durante su vigencia, además de generar nuevos instrumentos para posteriores esfuerzos de restauración, así como la obtención de diversos datos científicos (CILA, 2018).



Cabe mencionar que la segmentación del cauce se realizó en función de su vegetación, hidrología y potencial de restauración, todo esto con motivos ambientales, ubicándose el área de esta investigación en los Tramos 4 y 5. A continuación, se describen los siete tramos antes mencionados según Nelson et al. (2017) y estimadas.

**Tabla 1**

*Segmentación del Río Colorado.*

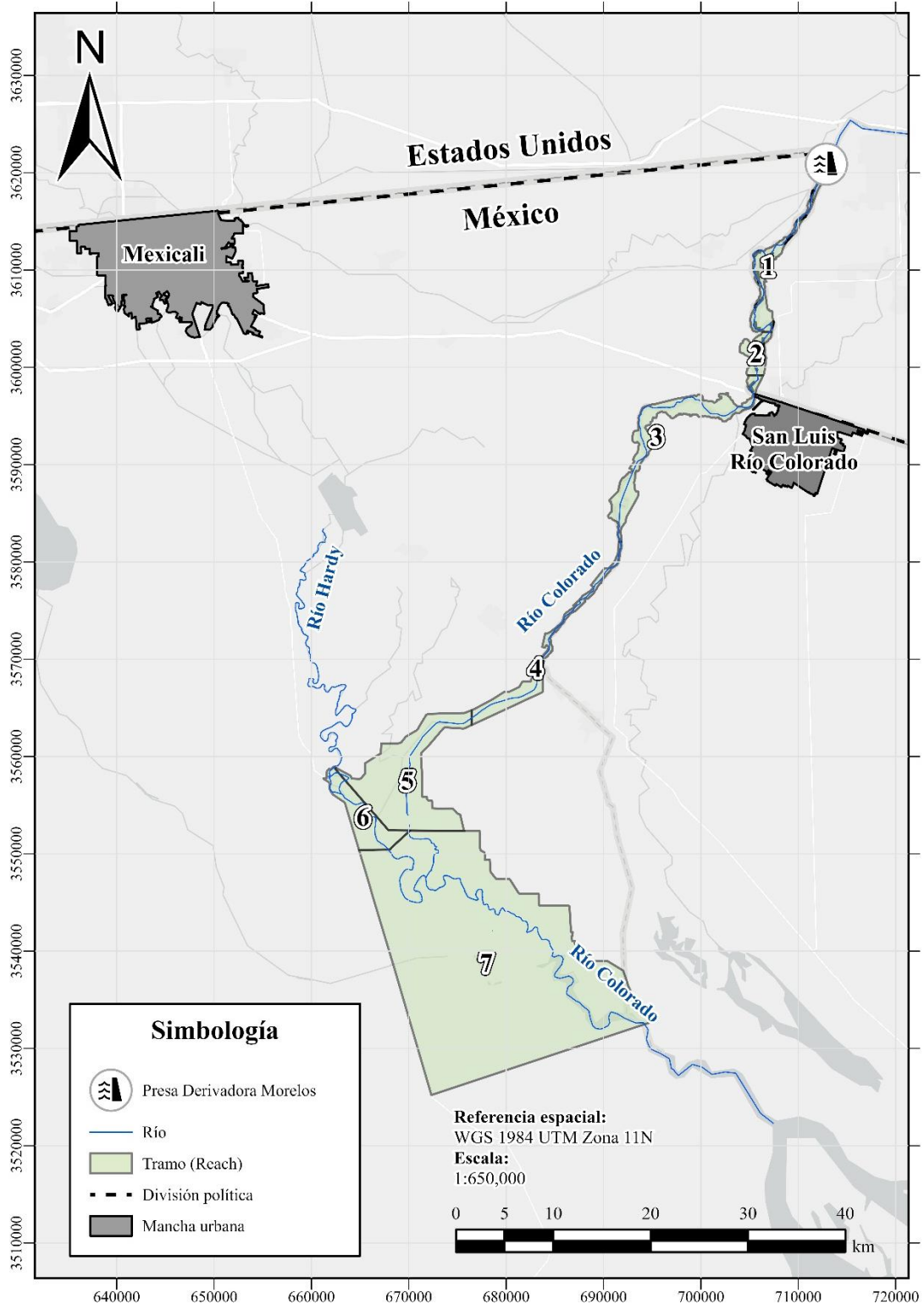
<b>Tramo (Reach)</b>	<b>Longitud o Cadenamiento</b>	<b>Descripción</b>
1	0 - 26 km	Iniciando en la Presa Derivadora Morelos se caracteriza por pertenecer al tramo limítrofe que habitualmente preservaba agua de manera superficial debido a su alto nivel freático, fugas por la Presa Derivadora Morelos y retorno agrícola.
2	26 - 31 km	Corresponde a la parte seca del tramo limítrofe, aledaños al poblado Janitzio y al ejido Guadalajara.
3	31 - 63 km	Se singulariza por haber sido un tramo seco, con poca vegetación y un nivel freático bajo a causa del bombeo de aguas subterráneas
4	63 - 90 km	Es una sección identificada por haber tenido un nivel freático poco profundo y poca agua superficial, así como una mezcla de cedros salados ( <i>Tamarix ramosissima</i> ) no nativos al igual que álamos ( <i>Populus fremontii</i> ) y sauces ( <i>Salix gooddingii</i> ) nativos.
5	90 - 106 km	Se caracterizaba por tener aguas subterráneas poco profundas, salinidad parcialmente alta y con abundante cedro salado.
6	Río Hardy: ≈ 27 km	El penúltimo segmento corresponde a un tramo del Río Hardy (RH) antes de su confluencia con el Río Colorado, identificado por contar con flujo superficial producto de retorno agrícola y efluentes tratados y por contar con bosques de mezquite ( <i>Prosopis glandulosa</i> ) y cedro salado ( <i>Tamarix ramosissima</i> ).
7	Río Colorado: 106 km – Golfo de California Río Hardy: ≈ 31 km	Desde su confluencia con el RH hasta su desembocadura en el Golfo de California una múltiple red de canales perennes y lodazales en la llanura de inundación. Además, se caracterizaba por tener aguas superficiales provenientes del Río Hardy y del drenaje agrícola Ayala, así como mezquite ( <i>Prosopis glandulosa</i> ), cedro salado ( <i>Tamarix ramosissima</i> ), pasto salado ( <i>Distichlis spicata</i> ) y planicies mareales abiertas.

En la siguiente Figura se presenta la segmentación del Río Colorado en su Delta:



Figura 2

Segmentación del Río Colorado.





## **Manejo del agua para flujos ambientales en el Delta del Río Colorado**

El agua destinada al medio ambiente en el Delta del Río Colorado se distribuye desde la Presa Derivadora Morelos hasta los puntos de descarga mediante la infraestructura del Distrito de Riego 014 Río Colorado (DR 014), ubicado en el Valle de Mexicali.

El Valle de Mexicali cuenta con una superficie de 208,263 ha y se abastece principalmente del Río Colorado (Carrillo-Guerrero et al., 2013), cuya disponibilidad está regulada bajo el marco del Tratado de Aguas de 1944 (CONAGUA, 2021). Además, se abastece de las aguas provenientes de su mismo acuífero en conjunto con el de San Luis Río Colorado (IMTA, 2020). Los flujos se distribuyen a través de la infraestructura del Distrito de Riego 014 Río Colorado, el cual se estableció en 1937 durante el gobierno del Presidente Lázaro Cárdenas como parte de su programa de reparto agrario (Cortez Lara, 2011).

Actualmente el DR 014 cuenta con una concesión total de agua de 2,135.10 Mm<sup>3</sup> , distribuida en 1,645.04 Mm<sup>3</sup> de agua superficial y 490.06 Mm<sup>3</sup> de agua subterránea (IMTA, 2020), la cual es operada con 1,669 estructuras a cargo de una Sociedad de Responsabilidad Limitada (SRL) y de los propios usuarios organizados en 19 Módulos de Riego. La SRL es responsable de la Red Mayor, que comprende 350 km de canales y 585 km de drenes principales, mientras que los Módulos de Riego gestionan la Red Menor, con 2,212 km de canales y 1,098 km de drenes agrícolas (GobBC, 2022).

El DR 014 opera la entrega y distribución del agua de riego concesionada mediante el siguiente sistema de cinco niveles:

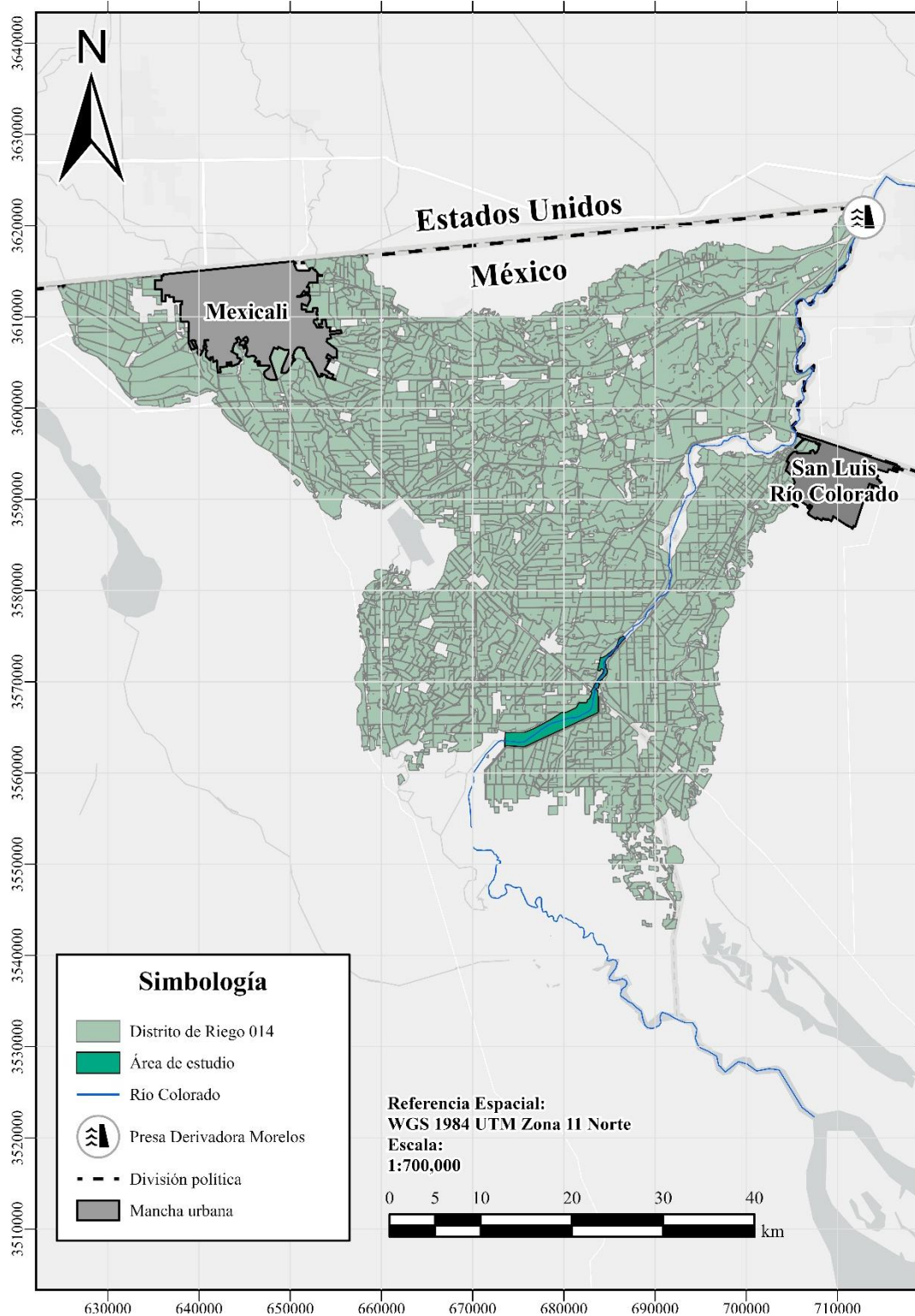


- Nivel 1, comprende la recepción de los volúmenes estipulados en el Tratado de Aguas de 1994 en los puntos de entrega de los Estados Unidos a México (Lindero Internacional Norte y Lindero Internacional Sur). La CILA es el organismo encargado de la verificación de tanto la cantidad como la calidad de los volúmenes recibidos.
- Nivel 2, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) se encarga de gestionar los volúmenes que fluyen desde la Presa Derivadora Morelos, a través del Canal Alimentador Central hasta el represo del km 27.
- Nivel 3, la SRL se responsabiliza de operar, conservar y administrar la Red Mayor de Distribución y Drenaje del Distrito, la cual comprende los Canales Independencia, Reforma, Alimentador del Sur y la red de drenaje agrícola.
- Nivel 4, los Módulos de Riego son las responsables de operar, conservar y administrar la infraestructura hidráulica concesionada, desde los puntos de control hasta las tomas en las parcelas de los usuarios (toma granjas).
- Nivel 5, corresponde a los usuarios, quienes reciben los volúmenes asignados en su toma granja y son los responsables de operar y mantener en óptimas condiciones las regaderas parcelarias e interparcelarias para regar eficientemente sus cultivos (CONAGUA, 2021).



Figura 3

Área de estudio dentro del Distrito de Riego.





### **Modelos hidráulicos en el Delta del Río Colorado**

El Delta del Río Colorado ha sido estudiado en distintos aspectos al paso del tiempo con un enfoque hidrodinámico superficial y subterráneo. No obstante, dentro de la literatura existen cuatro trabajos de investigación relevantes que incluyen modelos hidráulicos unidimensionales y bidimensionales utilizando el programa HEC-RAS.

En el 2007 se desarrolló una simulación hidráulica unidimensional de aproximadamente 12 km de cauce del Río Colorado, desde el Puente Ferroviario Mexicali-Puerto Peñasco hasta el Vado Carranza, con el objetivo de crear una herramienta que pudiera ser utilizada en estudios de caudal ecológico. La geometría del modelo fue elaborada a partir de 25 secciones topográficas obtenidas de manera transversal por la CONAGUA, mapas topográficos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), y una fotografía aérea. Por otro lado, la calibración consistió en ajustar la elevación del espejo de agua en cada sección con diferentes caudales mediante la variación del coeficiente de rugosidad. Los resultados indicaron un caudal ecológico de 5 m<sup>3</sup>/s con un área de inundación del 10% (Quezada Ayala, 2007).

En el 2016 posterior al evento de flujo pulso del 2014, en el que se liberaron 130 Mm<sup>3</sup> de agua desde el 23 de marzo hasta el 18 de mayo a través de tres puntos de entrega (Presa Derivadora Morelos, el km 27 del canal Reforma y el km 18 del canal Barrote), se simuló hidráulica y unidimensionalmente el evento en cuestión. La simulación en cumplimiento a los establecido en el Acta 319, tuvo como área de estudio el corredor ripario del Delta del Río Colorado, desde la Presa Derivadora Morelos hasta el Vado Carranza (91 km), con el objetivo de analizar el comportamiento hidráulico del evento, así como brindar una herramienta para la conservación del corredor ripario (Salcedo Peredia, 2016).



Para la simulación de los diversos caudales ocurridos, se generó un modelo geométrico del cauce inundado mediante mediciones topo-batimétricas, así como una imagen LiDAR (del inglés *light detection and ranging*), además, se estimó el coeficiente de rugosidad a través de análisis de imágenes satelitales, observaciones visuales en campo y la correlación de datos de aforos con tirantes de espejo de agua. Por último, la calibración se obtuvo tomando como parámetros los caudales aforados, así como las elevaciones del espejo de agua registradas.

En el 2019 se realizó una simulación hidráulica bidimensional de aproximadamente 74.36 km en el Río Hardy (afluente del Río Colorado), desde el punto conocido como Dren Dos Tubos donde se ubica la descarga del efluente del humedal Las Arenitas (WGS 84 / UTM zona 11N: 3,581,794.13 N, 660,717.17 E) hasta la confluencia con el Río Colorado con la finalidad de determinar su caudal ecológico. La metodología incluyó trabajos de topobatimetría para la generación del modelo geométrico; mediciones de flujo y elevaciones del espejo de agua durante un año hidrológico, estimación de la rugosidad, estimación de superficies inundadas con el análisis de imágenes satelitales desde 1999 hasta 2017; y la correlación de los avistamientos de aves con respecto a caudales registrados. Los resultados indicaron que el caudal ecológico para un año húmedo es de 1.729 m<sup>3</sup>/s con una superficie inundada de 713 ha, mientras que para un año medio, el caudal ecológico es de 1.108 m<sup>3</sup>/s con una superficie de 598 ha (García Arvizu, 2019).

Por último, en el 2022 se llevó a cabo una simulación hidráulica, bidimensional y en estado transitorio de 35 km en la zona limítrofe, específicamente desde la Presa Derivadora Morelos hasta el puente vehicular Mexicali – San Luis Río Colorado. La simulación se realizó durante los trabajos de mantenimiento en el canal Wellton-Mohawk del 5 de septiembre de 2019 al 5 de enero de 2021, con el propósito de analizar el comportamiento hidrológico y geohidrológico, así como el efecto en el hábitat ribereño producto de los flujos descargados en el área de estudio. Los resultados de



la investigación y de los escenarios de flujo simulados (5, 7 y 10 m<sup>3</sup>/s) permitieron establecer un área potencial de restauración de 421.84 ha conformada por 9 zonas, en base a los criterios del Grupo Binacional de Trabajo Ambiental del Acta 323 (Valenzuela Sarabia, 2022).



## CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

### **Hidráulica**

La palabra hidráulica proviene de la unión de dos palabras griegas: “*hydor*” (agua) y “*aulos*” (tubería). Sin embargo, en la actualidad esta palabra no se limita únicamente para referirse al flujo por medio de tuberías (Hwang et al., 2010).

Una definición más apropiada de la hidráulica es: rama de la física la cual estudia el comportamiento de los fluidos, ya sea en reposo o en movimiento (Giles, 1991; White, 2011).

Los principios relacionados con los sistemas de ingeniería hidráulica son diversos y se relacionan principalmente con la planificación, control, transporte, conservación y utilización del agua (Hwang et al., 2010).

### **Hidráulica en Canales Abiertos**

El flujo a través de canales abierto según Sotelo Ávila (2002), se produce principalmente por efecto de la gravedad y se distinguen por encontrarse expuestos a la presión atmosférica, dichos flujos se ven afectados además bajo las siguientes fuerzas: de resistencia, por presión en las fronteras del canal, por viscosidad, por tensión superficial y por fuerzas ocasionales por el transporte de sedimentos.

#### **Clasificación de Canales**

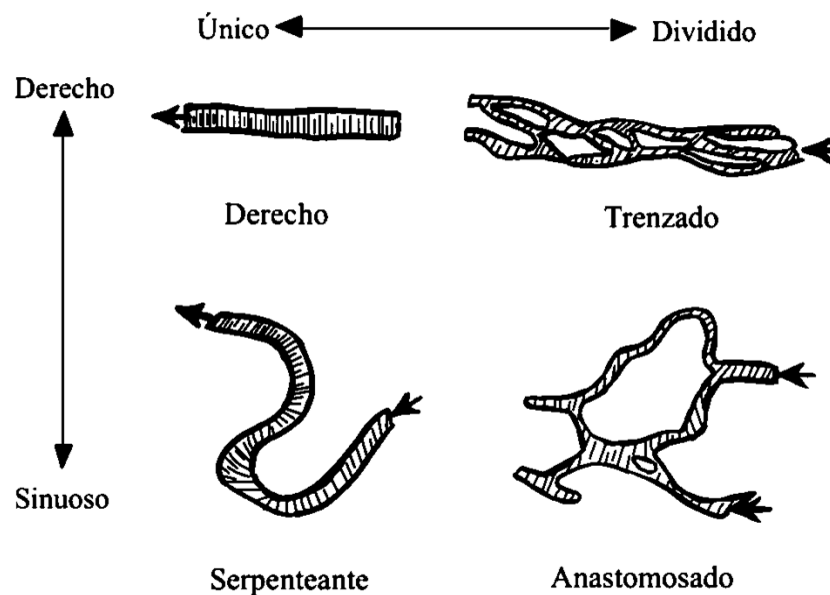
Los canales abiertos se pueden clasificar en primera instancia como artificiales al ser creados por el hombre, o naturales como lo son los ríos y arroyos, los cuales, surgen como resultado de procesos geofísicos actuantes sobre la superficie de la tierra, sin la necesidad de la intervención humana. Otra manera de clasificar de manera general los canales abiertos es entre prismáticos y no prismáticos, siendo los primeros aquellos que mantienen su forma de sección transversal e

inclinación longitudinal del fondo constante. Dichas propiedades sólo pueden tener los canales artificiales, por lo que todos los canales naturales son no prismáticos (Szymkiewicz, 2010).

Una clasificación adicional exclusiva para canales naturales es a partir de su morfología (comprendida por su tamaño, sección transversal, perfil longitudinal y forma en planta), la cual caracteriza a los cauces por el efecto de procesos de erosión, transporte y deposición de sedimentos sobre ellos. Por consiguiente se obtiene que los tipos elementales de morfología del cauce son rectos, sinuosos, meándrico, trenzados y anastomosados (Thorne et al., 1997).

#### Figura 4

*Clasificación de cauces por su morfología.*



*Nota.* Adaptado de *Classification of channel pattern based on sinuosity and degree of channel division*, Thorne et al. (1997).



## Regímenes de Flujos

Los regímenes de flujos en canales abiertos están determinados por el efecto combinado de la viscosidad y de la gravedad (Chow, 1994).

Los efectos de la viscosidad con respecto a la inercia se definen por el número de *Reynolds* de la siguiente manera:

$$R = \frac{V \cdot L}{\nu}$$

Ecuación 1

Donde:

$V =$  Velocidad del flujo (m/s)

$L =$  Radio hidráulico (m)

$\nu =$  Viscosidad cinemática (m/s<sup>2</sup>)

Una vez obtenido el resultado, es posible clasificar a los flujos como:

**Tabla 2**

*Tipos de flujo según el número de Reynolds.*

Tipo	Descripción
Flujo laminar	$R \leq 500$
Flujo en transición	$500 \leq R \leq 2000$
Flujo turbulento	$R \geq 2000$

*Nota.* Adaptado de *Hidráulica de canales abiertos*, Chow (1994).

Por otro lado, los efectos de las fuerzas de inercia sobre las fuerzas de gravedad actuantes sobre un fluido se definen por el número de *Froude* ( $F$ ) del siguiente modo:

$$F = \frac{V}{\sqrt{g \cdot D}}$$

Ecuación 2



Donde:

$V =$  Velocidad del flujo unidades (m/s)

$g =$  Aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

$D =$  Profundidad hidráulica (m)

A partir de los resultados obtenidos de la ecuación anterior es posible clasificar a los flujos como:

**Tabla 3**

*Tipos de flujo según el número de Froude.*

<b>Tipo</b>	<b>Descripción</b>
Flujo Subcrítico	$F < 1$
Flujo crítico	$F = 1$
Flujo supercrítico	$F > 1$

*Nota.* Adaptado de *Hidráulica de canales abiertos*, Chow (1994).

A continuación, se presenta la clasificación de regímenes de flujo propuesta por Chow (1994) a partir del número de *Froude* ( $F$ ) y el número de *Reynolds* ( $R$ ).

**Tabla 4**

*Regímenes de flujo.*

<b>Tipo</b>	<b>Descripción</b>
Subcrítico-laminar	$F < 1$ y $R \leq 500$
Supercrítico-laminar	$F > 1$ y $R \leq 500$
Subcrítico-turbulento	$F < 1$ y $R \geq 2,000$
Supercrítico-turbulento	$F > 1$ y $R \geq 2,000$

*Nota.* Adaptado de *Hidráulica de canales abiertos*, Chow (1994).



En canales abiertos, la vegetación y obstrucciones modifican notoriamente el régimen de flujo, alterando la distribución de velocidades, esfuerzos y sedimentación (Ben Meftah, 2022).

### **Tipos de Flujo**

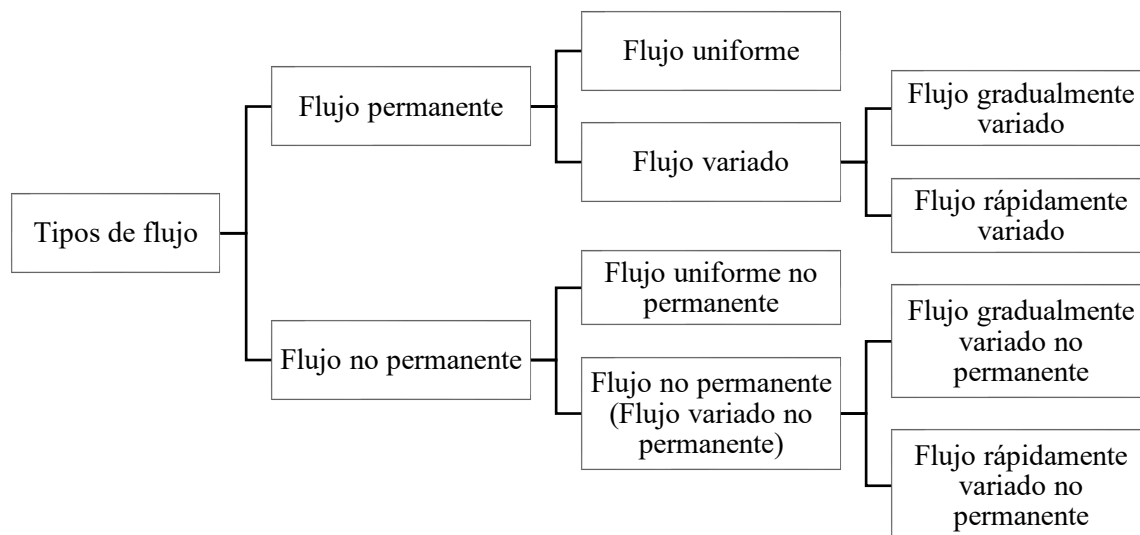
Existen diversas maneras de describirse y clasificarse los flujos en canales abiertos. Chow (1994), presentó una clasificación basada en el cambio de la profundidad del flujo con respecto al tiempo y el espacio. Al tomarse como criterio el tiempo, el flujo puede considerarse permanente si la profundidad de este no cambia o puede suponerse constante durante un intervalo de tiempo, mientras que se considera no permanente si la profundidad cambia a través del tiempo.

Por otro lado, al tomarse como criterio el espacio, se dice que el flujo es uniforme si la profundidad permanece constante en cada sección de un canal, en tanto el flujo se considera variado si la profundidad cambia a través del canal.

A continuación, se presenta a manera de diagrama la clasificación antes descrita.

**Figura 5**

*Tipos de flujo.*



*Nota.* Adaptado de *Hidráulica de canales abiertos*, Chow (1994).



## Caudal

Se le denomina caudal o gasto a la cantidad de agua que pasa a través de una cierta sección en un lapso tiempo (Cengel & Boles, 2002; Chanson, 2004; Mays, 2019; Mott, 2006). Para calcular dicho gasto en un conducto se aplica la siguiente ecuación (White, 2011) formulada matemáticamente por Leonhard Euler, desarrollada por Daniel Bernoulli (Chow, 1994).

$$Q = A \cdot v$$

Ecuación 3

Donde:

$Q = \text{Caudal (m}^3/\text{s)}$

$A = \text{Área (m}^2\text{)}$

$v = \text{Velocidad promedio (m/s)}$

Una manera más precisa y compleja para calcular el caudal es la ecuación de Manning modificando la formula Chézy (Mays, 2019).

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}}\sqrt{s}$$

Ecuación 4

Donde:

$n = \text{Coeficiente de rugosidad (adimensional)}$

$A = \text{Área hidráulica (m}^2\text{)}$

$R = \text{Radio hidráulico (m)}$

$s = \text{Pendiente (adimensional)}$

Originalmente la ecuación de Manning fue desarrollada para flujos uniformes en los que el perfil de la superficie del agua y el gradiente de energía son paralelos al fondo del cauce; mientras que el área, el radio hidráulico y la profundidad no cambian. Sin embargo, se supone que la



ecuación es también válida para los tramos no uniformes como se presentan en los canales naturales, esto debido ante la falta de formulaciones mas precisas (Barnes, 1967). Debido a su simplicidad y a su admisible grado de precisión, la fórmula de flujo uniforme de Manning es comúnmente utilizada en el mundo (Subramanya, 2009).

### **Coefficiente de rugosidad**

Hinojosa Rivera y Reyes Melo (2001), definen técnicamente como rugosidad desde la perspectiva de la ingeniería de materiales como “el conjunto de particularidades geométricas naturales o artificiales que caracterizan una superficie”, siendo la disciplina que estudia la rugosidad de las superficies, la Topometría.

El coeficiente de rugosidad ( $n$ ) es un parámetro que representa los efectos integrados de la resistencia de la sección transversal del canal (Subramanya, 2009). El valor del coeficiente de rugosidad depende en mayor medida de la rugosidad de la superficie, la presencia de vegetación y la irregularidad del cauce, mientras que en menor grado de la socavación, la sedimentación y la alineación del cauce (Chaudhry, 2008).

Dentro de las diversas variables que conforman la fórmula de Manning el coeficiente de rugosidad es la única que debe estimarse debido a la imposibilidad de medirse. Lo anterior por tratarse de un proceso subjetivo, la correcta selección de un valor de rugosidad depende de experiencia y juicio técnico. En la actualidad existen herramientas que facilitan la selección de un correcto valor de rugosidad para un tipo de canal determinado reduciendo así en cierto grado la subjetividad en la selección. La importancia de una adecuada estimación del valor de rugosidad en los cauces naturales, radica en gran medida en los cálculos de remanso, caudal, trazado y en la gestión (Subramanya, 2009).



Žic et al. (2009), menciona que, debido a la importancia del coeficiente de rugosidad dentro de la hidráulica de canales y su complejidad de estimación, es que existen diversos métodos para su determinación, los cuales se enlistan a continuación:

- Método SCS (*Soil Conservation Service*).
- Método Ven Te Chow.
- Método de la evaluación del coeficiente de rugosidad por medio de fotografías.
- Método Empírico y fórmulas para la determinación del Coeficiente de Rugosidad.
- Método de evaluación del Coeficiente de Rugosidad basado en los datos de medición de caudales.

Para efectos de esta investigación fueron considerados como referencia los valores de coeficiente de rugosidad ( $n$ ) establecidos con la ecuación de Cowan por Salcedo Peredia (2016), ecuación definida de la siguiente manera:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m_5$$

Ecuación 5

Donde los valores de la Tabla 1 están en función del material, irregularidades, variación de la sección transversal, efecto de las obstrucciones, vegetación y meandros.



**Tabla 5**

*Crterios y valores numéricos para el coeficiente de rugosidad mediante la ecuación de Cowan.*

Condiciones del cauce			Valores
Material considerado	Tierra	$n_0$	0.020
	Corte en roca		0.025
	Grava fina		0.024
	Grava gruesa		0.028
Grado de irregularidad	Suave	$n_1$	0.000
	Menor		0.005
	Moderado		0.010
	Severo		0.020
Variación de la sección transversal	Gradual	$n_2$	0.000
	Ocasionalmente alterado		0.005
	Frecuentemente alternante		0.010-0.015
Efecto de las obstrucciones	Insignificante	$n_3$	0.000
	Menor		0.010-0.015
	Apreciable		0.020-0.030
	Severo		0.040-0.060
Vegetación	Baja	$n_4$	0.005-0.010
	Media		0.010-0.025
	Alta		0.025-0.050
	Muy alta		0.050-1.000
Cantidad de meandros	Menor	$m_5$	1.000
	Apreciable		1.150
	Severa		1.300



## **Modelos Hidráulicos**

En la hidráulica el término “modelo” hace referencia a una simulación física o matemática de un prototipo o de una situación a escala real. Esto es posible mediante un procesamiento de datos de entrada (geometría, condiciones de frontera, fuerza, etc.) y una posterior entrega de datos de salida (caudales, niveles, presiones, etc.). Los modelos hidráulicos son entonces, herramientas útiles dentro de la ingeniería civil para el diseño, predicción de sus efectos y generación de soluciones técnicas (Novak et al., 2018). Además, son útiles para el uso, manejo y control del agua, esto como consecuencia de sus altos niveles de confiabilidad por los avances recientes en el desarrollo de la tecnología digital (Fattorelli & Fernández, 2011).

Según menciona Chadwick et al. (2013), en la práctica los tipos de modelos comúnmente utilizados pueden clasificarse de la siguiente manera en orden creciente por su complejidad:

- Enrutamiento simple de crecidas: Usado comúnmente para estudios hidrológicos con hidrogramas múltiples, basado en las ecuaciones unidimensionales inestables de Saint Venant.
- Flujo permanente unidimensional (1D): Aplica la ecuación de flujo unidimensional gradualmente variado principalmente para la modelación de crecidas por obras civiles.
- Flujo unidimensional no permanente: Utilizado habitualmente para estimar el nivel del agua, así como el caudal en diversos puntos, resolviendo las ecuaciones inestables unidimensionales de Saint Venant.
- Flujo cuasi bidimensional (2D) permanente y no permanente: Empleado habitualmente para determinar los niveles de agua y los caudales durante eventos de inundaciones en cauces compuestos. Consiste en la unión de un modelo unidimensional sobre el cauce principal.



- Flujo bidimensional permanente y no permanente: Al igual que los modelos cuasi bidimensionales (2D) permanente y no permanente los modelos de flujo bidimensional permanente y no permanente son implementados para analizar los niveles y volúmenes de agua que circulan en cauces compuestos durante eventos de crecida. Por otro lado, estos modelos hacen uso de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (*RANS* por sus siglas en inglés) por lo que se obtienen mejores aproximaciones.
- Flujo tridimensional (3D) no permanente: Utilizados en escenarios de baja escala y flujo, resolviendo las ecuaciones *RANS* 3D.

### Modelo HEC-RAS

Uno de los programas más utilizados en el modelado de aguas superficiales es HEC-RAS, por sus siglas en inglés *Hydrologic Engineering Center's – River Analysis System*. Fue creado por el cuerpo de ingenieros de la armada de los EE.UU. (*US Army Corps of Engineers*) (Brunner, 2023) para el análisis de ríos y en la actualidad es utilizado ampliamente para modelar aguas superficiales por su fácil aprendizaje y manejo (Bladé Castellet, 2005). El HEC-RAS contiene los siguientes cuatro componentes de análisis de flujo en ríos: (1) Cálculo unidimensional de perfil de la superficie de flujo de agua constante; (2) Simulación de flujo variable unidimensional y/o bidimensional; (3) Cálculo del transporte de sedimentos; y (4) Análisis unidimensional de calidad de agua (Brunner, 2023).



## **Modelo Digital de Elevaciones**

Un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) es una representación tridimensional de la superficie terrestre mediante una malla regular de celdas georreferenciadas (Guth et al., 2021), siendo en un modelo hidráulico bidimensional la base geométrica del dominio computacional sobre la cual se desarrolla la simulación del comportamiento del flujo.

## **Hidrología**

La hidrología es una ciencia geofísica cuantitativa basada en las leyes de la físicas (Dingman, 2015), la cual estudia la circulación del agua y sus diversos componentes a través del ciclo hidrológico, es decir, su aparición, circulación y distribución, sus propiedades químicas y físicas y su reacción con el medio ambiente, incluida su relación con los seres vivos. Dentro de los componentes mencionados se encuentran: las precipitaciones, la evaporación, la infiltración, el flujo de aguas subterráneas, la escorrentía, el caudal de los arroyos y el transporte de sustancias disueltas o suspendidas en el agua (Custodio & Llamas, 1983; Maidment, 1993).

Esta ciencia se divide en:

- Hidrología superficial: Se encarga del estudio de los fenómenos y procesos hidrológicos producidos sobre la superficie de la tierra (WMO, 2012), como resultado de las precipitaciones y el deshielo (Viessman & Lewis, 1996). Este estudio es esencial para la gestión de recursos hídricos (Maidment, 1993).
- Hidrología subterránea: Corresponde al estudio del agua dentro de las formaciones geológicas, abarcando su almacenamiento, circulación y distribución considerando sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones con el medio físico y biológico y sus reacciones a la acción del ser humano (Custodio & Llamas, 1983).



### Modelos hidrológicos:

Los modelos hidrológicos son instrumentos esenciales para analizar y predecir el comportamiento del ciclo hidrológico dentro de una cuenca, mediante la representación matemática de las distintas variables meteorológicas involucradas (Maidment, 1993). Su aplicación es indispensable para la gestión y planificación de los recursos hídricos así como el diseño de infraestructura hidráulica (Singh & Woolhiser, 2002).

Según Beven (2012), los modelos hidrológicos pueden clasificarse de manera general acorde a su estructura:

- Conceptuales, representan los procesos por medio de relaciones empíricas y observaciones.
- Determinísticos, describen los procesos hidrológicos a través de ecuaciones diferenciales que expresan las leyes de conservación de masa, energía y movimiento.
- Estocásticos, basan la viabilidad natural de los procesos mediante formulaciones probabilísticas.

### **Flujo superficial**

Hwang et al. (2010), menciona que para que el agua de la precipitación se considere flujo superficial, debe cumplir tres circunstancias en el suelo: 1] la interceptación (agua captada por vegetación o estructuras); 2] el almacenamiento en depresión (charcos o humedales) y, 3] la reposición de la humedad del suelo (agua en espacios porosos). Una vez que se satisfacen estas demandas, el agua que sobra se llama exceso de precipitación. La parte de este exceso que fluye sobre la superficie hasta el cauce más cercano se llama escorrentía superficial. El resto, puede unirse a la escorrentía de otras formas, como a través de la infiltración o el interflujo, que es el agua que llega al arroyo desde el suelo por encima de la capa freática.



La comprensión del movimiento del flujo superficial es fundamental para la gestión de recursos hídricos así como para la restauración de ecosistemas (Dunne & Leopold, 1978).

## Figura 6

*Flujo superficial sobre el Río Colorado, México.*



## Restauración Ecológica

La Sociedad para la Restauración Ecológica (*SER*, por sus siglas en inglés) define a la restauración ecológica como el proceso de ayudar al restablecimiento de un ecosistema que se ha degradado, dañado o destruido (Clewel et al., 2004). Dentro de la restauración ecológica según Holl and Aide (2011), existen dos enfoques principales en los cuales se implementan acciones con el propósito de eliminar los factores que perturban al ecosistema: la restauración pasiva y la restauración activa. En esta última, además, la intervención humana acelera el proceso de restauración. Sin embargo, el éxito de la restauración ecológica no depende únicamente de las



acciones implementadas, sino también del contexto social, económico y político en el que se lleva a cabo (Menz et al., 2013).

Uno de los principales casos de éxito de restauración activa dentro del área de estudio, se ve reflejado en el sitio denominado El Chaussé (Figura 8), un sitio que inició en 2015 y se caracteriza por un manejo hidrológico que emula el régimen natural del Río Colorado.

### **Figura 7**

*Sitio de restauración ecológica “El Chaussé”.*



### **Flujos Ambientales**

A partir de las medidas de cooperación internacional en la cuenca del Río Colorado entre los gobiernos de México y Estados Unidos con el objetivo de preservar la ecología ribereña y de estuario del tramo limítrofe del Río Colorado y su Delta, se definen como flujos ambientales a los volúmenes de agua destinados para beneficio ambiental, específicamente para generar y mantener sitios de restauración y mejorar las condiciones de flora y fauna en la zona (CILA, 2012).



Otros autores como Dyson et al. (2003), definen como flujo ambiental al régimen hídrico otorgado a un río, humedal o zona costera para conservar los ecosistemas y sus beneficios sociales en caso de haber usos del agua que compitan entre sí y cuando los caudales estén regulados.

### **Figura 8**

*Entrega de flujo ambiental por km 28+840 del canal Alimentador del Sur “Compuerta Central” al sitio de restauración “El Chaussé”.*





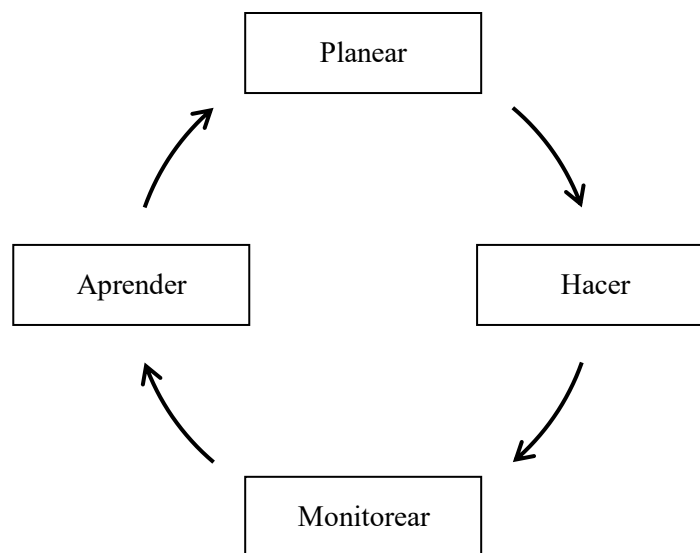
## Manejo adaptativo

De manera general, el manejo adaptativo se define como una estrategia de mejora en la gestión a partir del continuo aprendizaje sustentado por monitoreo y evaluación de resultados (Holling, 1978). Por lo tanto, es un proceso iterativo que reevalúa un plan en cada iteración (Varady et al., 2016), generando conocimiento y así disminuir la incertidumbre (Summers et al., 2015).

En cuanto a la restauración, el manejo adaptativo hace posible comprender la respuesta de los ecosistemas a los esfuerzos realizados (NASEM, 2017).

### **Figura 9**

*Ciclo de manejo adaptativo.*



*Nota.* Adaptado de *Principles for monitoring, evaluation, and adaptive management of environmental water regimes*, Webb et al. (2017).



## **Corredor Ripario**

Se conoce como corredor ripario al área que incluye el cauce del arroyo, así como la fracción del paisaje terrestre que va desde el espejo de agua hasta las tierras altas en donde la vegetación puede verse influenciada por la elevación del nivel freático o las inundaciones y por la capacidad de los suelos para retener el agua (Naiman et al., 1993).

Los corredores riparios proporcionan hábitats para diversas especies animales y vegetales (Naiman & Decamps, 1997), además, ayudan en la regulación del ciclo del agua, siendo así parte esencial en la conservación del ambiente (Meyer & Wallace, 2001).

### **Figura 10**

*Corredor ripario del Delta del Río Colorado.*





## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FÍSICO

### Área de estudio

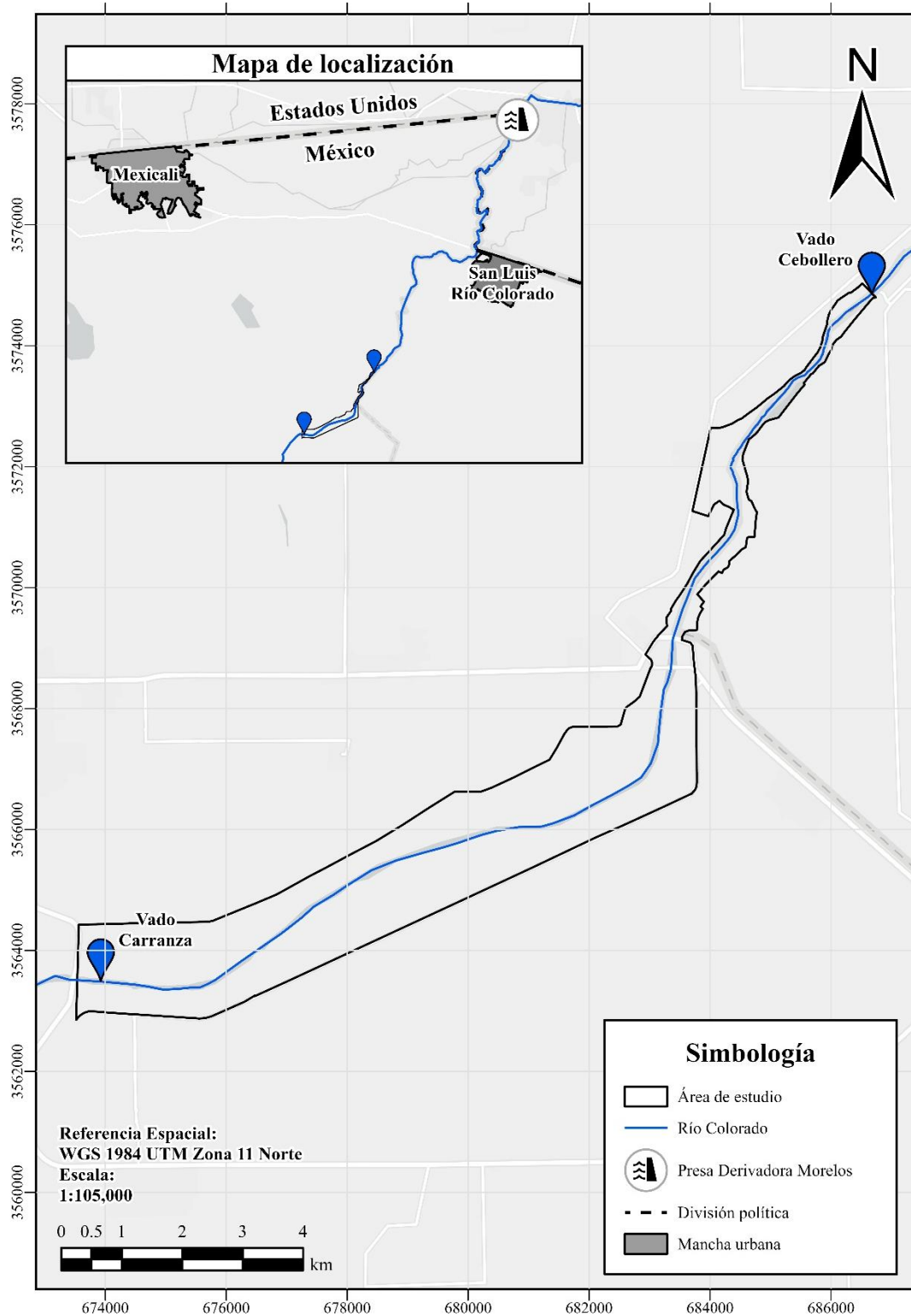
El área de estudio cuenta con una longitud de 19.67 km y abarca una superficie de 20.6962 km<sup>2</sup> dentro del corredor ripario del Delta del Río Colorado. Este segmento se extiende de noroeste a sureste, iniciando en el paso vehicular Vado Cebollero ubicado geográficamente en las coordenadas UTM WGS 84 Zona 11 Norte: 3,574,982.90 Norte y 686,808.50 Este y concluyendo en el paso vehicular Vado Carranza con coordenadas UTM WGS 84 Zona 11 Norte: 3,563,533.60 Norte y 673,480.20 Este (Figura 11).

La zona de interés corresponde al cauce principal del Río Colorado, el cual se encuentra delimitado en ambas márgenes por taludes que permiten la continuidad de los flujos superficiales durante los eventos de descargas extraordinarias (Carrillo-Guerrero et al., 2013), siendo el talud de la margen derecha el canal Alimentador del Sur y el de la margen izquierda el canal Barrote. Además de lo anterior, este estudio incluye las llanuras de inundación adyacentes, delimitadas dentro de los límites del cauce, así como los sitios de restauración existentes.



Figura 11

Área de estudio “Vado Cebollero-Vado Carranza”.





## Clima

La clasificación climática de Köppen, la más empleada a nivel mundial (Kottek et al., 2006; Peel et al., 2007), categoriza los climas en todo el mundo a partir de observaciones empíricas de temperatura y de precipitación (Chen & Chen, 2013). Dicha clasificación está dividida en cinco grupos principales: tropical, seco, templado, frío y polar, que a su vez, cada uno de ellos se divide también en grupos y subgrupos (Köppen & Geiger, 1930).

Según el sistema de clasificación climática modificada de Köppen (García, 2004), el área de estudio se encuentra ubicada en una zona tipo BW(h), considerada seca desértica. El clima de la región es cálido, con una temperatura media anual de 22.3 °C, registrando mínimas por debajo de 0 °C y máximas de hasta 50 °C. El periodo con mayor temperatura abarca los meses de julio, agosto y septiembre, mientras que diciembre y enero son los meses con menor temperatura.

En cuanto a la precipitación, entre 1969 y 1999 la precipitación media anual fue de 82.9 mm y la evaporación potencial promedio fue de 2,316 mm al año (CONAGUA, 2024).

## Flora y fauna

En los desiertos, los corredores ribereños resultan esenciales para la diversidad de especies de flora y fauna (Poff et al., 1997). Previamente al control de los flujos del Río Colorado, el Delta constituía un hábitat biodiverso, albergando más de 200 especies de plantas y más de 350 especies de aves (Ezcurra et al., 1988), así mismo sostenía 400,000 ha de bosques riparios y humedales, creando dentro del continente una de las regiones de mayor valor para la fauna (Sykes, 1937).

En la actualidad, la cobertura vegetal se ha reducido en el corredor ripario del Delta del Río Colorado debido a la reducción de flujos superficiales (IMTA, 2007). Sin embargo, el tramo ubicado dentro del área de estudio se encuentra cubierto parcialmente por álamos (*Populus*



*fremontii*) y sauces (*Salix gooddingii*) (Gómez-Sapiens et al., 2020; Hinojosa-Huerta et al., 2013), lo cual es esencial para numerosas especies de aves ribereñas y otros animales silvestres (Zamora-Arroyo et al., 2005), como lo son el palmoteador de Yuma (*Rallus longirostris yumanensis*), el chipe amarillo (*Dendroica petechia*), el coyote (*Canis latrans mearnsi*), el gato montés (*Lynx rufus baileyi*), mapache (*Procyon lotor pallidus*), entre otros (CONANP, 2007).

### Geología

El Delta del Río Colorado se ubica entre las placas del Pacífico y Norteamérica (Chanes-Martínez et al., 2014), lo que la hace una de las áreas sísmicas más activas del mundo (CONANP, 2007). Morfológicamente, presenta características típicas de un delta, influenciado principalmente por las mareas y con existencia de depósitos de sedimento arenoso al centro (Huh et al., 2007).

A su vez, el área de estudio está localizado en la en la Subprovincia de Mexicali, dentro de la Provincia Geológica de Baja California, cuya columna geológica incluye rocas metamórficas basales, unidades volcánicas y volcanoclásticas, sobre las que se depositan sedimentos Terciarios y Cuaternarios, así como depósitos aluviales y fluviales. Asimismo, por la región cruza un sistema de fallas de desplazamiento lateral derecho con orientación noroeste-sureste (CONAGUA, 2024).

### Hidrología

En cuanto a la hidrología superficial, el Tramo 4 de la segmentación del Río Colorado, en donde se encuentra la mayor parte del área de estudio, presenta agua perenne proveniente del retorno agrícola, así como por la similitud del nivel freático con la elevación del cauce (Gómez-Sapiens et al., 2020). Adicionalmente se abastece de las descargas de flujo provenientes del Acta 323 (CONAGUA, 2021). Respecto a la precipitación, según datos de CONAGUA (2024) entre



1969 y 1999 la precipitación media anual fue de 82.9 mm y la evaporación potencial promedio fue de 2316 mm al año. Aunado a lo anterior, la alta permeabilidad del suelo sedimentario limitan la disponibilidad del agua en el Delta (CONANP, 2007).

Por otro lado, de acuerdo con la información existente acerca del acuífero del área de estudio, la hidrogeología del sitio se define como un sistema abierto, cuyas recargas principales provienen de tres flujos horizontales de norte a sur: 1] desde el Valle de Yuma hacia el Valle de San Luis; 2] desde el Valle de Yuma al Valle de Mexicali y; 3] una recarga originada por los escurrimientos del Canal Todo Americano. Las aportaciones son de 50 Mm<sup>3</sup>, 70 Mm<sup>3</sup> y 100 Mm<sup>3</sup> respectivamente. Adicionalmente, un aporte estimado de 500 Mm<sup>3</sup>, es el del agua proveniente de sobre riego así como de canales de conducción y distribución sin revestir, el cual varía dependiendo del cultivo en cada temporada (CONAGUA, 2021).

#### Fuentes de abastecimiento

El área de estudio dispone de múltiples puntos de abastecimiento de agua por ambas márgenes del Río Colorado; no obstante, en el presente estudio se consideraron los tres puntos utilizados estratégicamente durante el 2024 para descargar flujos ambientales hacia el cauce del Río Colorado en el Delta. Su localización y operación van en función a un diseño detallado en búsqueda de maximizar la eficiencia en la distribución del agua con fines de restauración. A continuación, se describe cada uno de ellos;

- Km 12+960 del canal Barrote “Vado Cebollero”: Es una estructura compuesta de dos compuertas deslizantes verticalmente con capacidad de descarga de hasta 6 m<sup>3</sup>/s, instrumentada con telemetría y con precisión de medición de caudal de aproximadamente  $\pm 2.5\%$ .

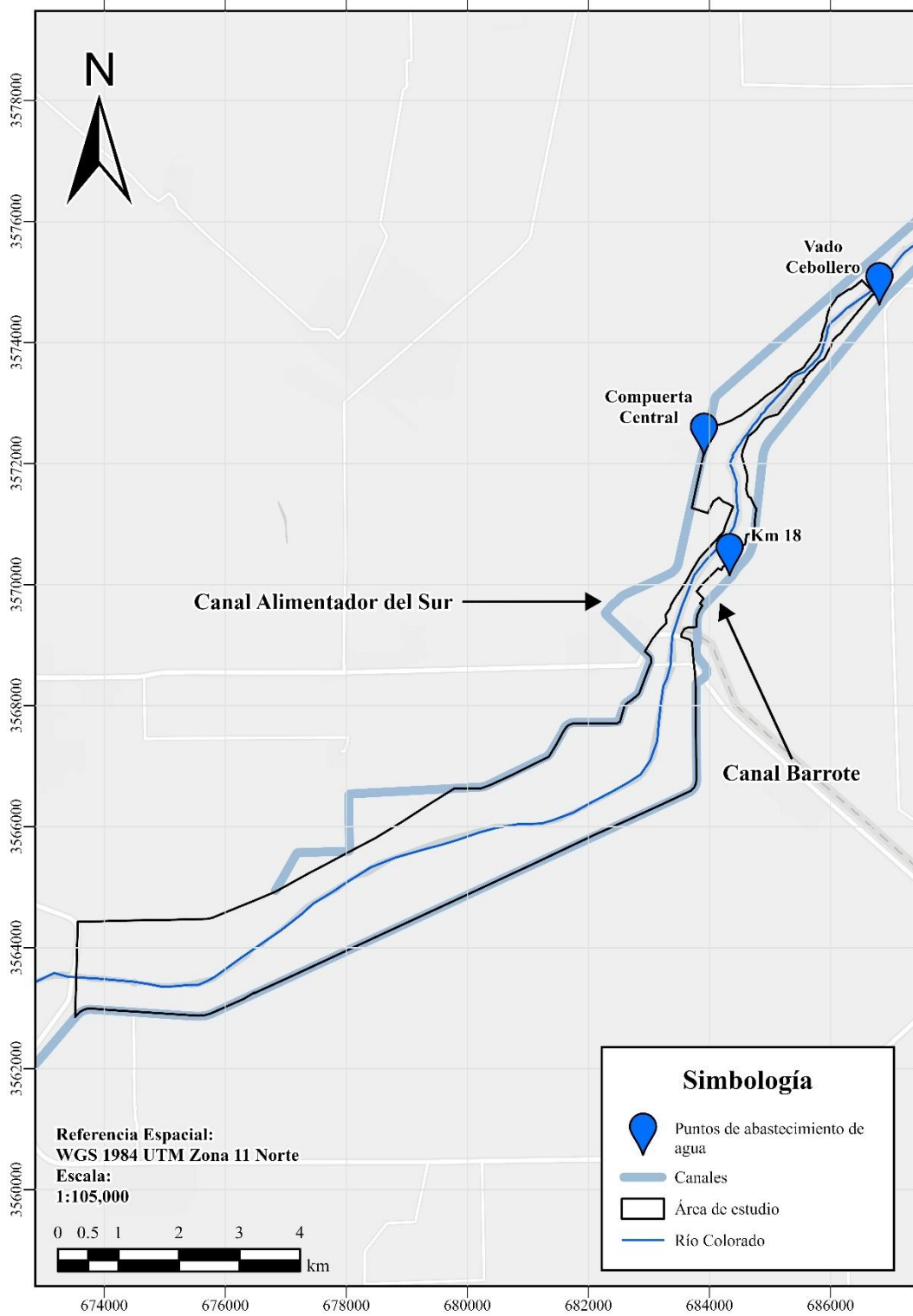


- Km 28+840 del canal Alimentador del Sur “Compuerta Central”: Es una estructura conformada por 3 compuertas hidráulicas deslizantes vertical en condiciones de descarga ahogada, dos que controlan el área hidráulica y otra más que controla la diferencia de cargas hidráulicas. Las dimensiones de las compuertas que controlan el área hidráulica son de 1.20 m y 0.60 m de ancho y abertura de hasta 1.00 m y 0.80 m respectivamente, mientras que las dimensiones de la compuerta que controla la diferencia de cargas hidráulicas son de 1.20 m de ancho y abertura de hasta 1.00 m, la capacidad máxima de descarga es de 2.50 m<sup>3</sup>/s
- Km 18 del canal Barrote: Es una estructura construida como desfogue de la red mayor del DR014. Es compuerta hidráulica con hoja radial en condiciones de descarga libre, sus dimensiones hidráulicas son 3.50 m de ancho y una abertura de hasta 2.00 m, con una capacidad de descarga de más 10 m<sup>3</sup>/s.



Figura 12

Fuentes de abastecimiento de agua.



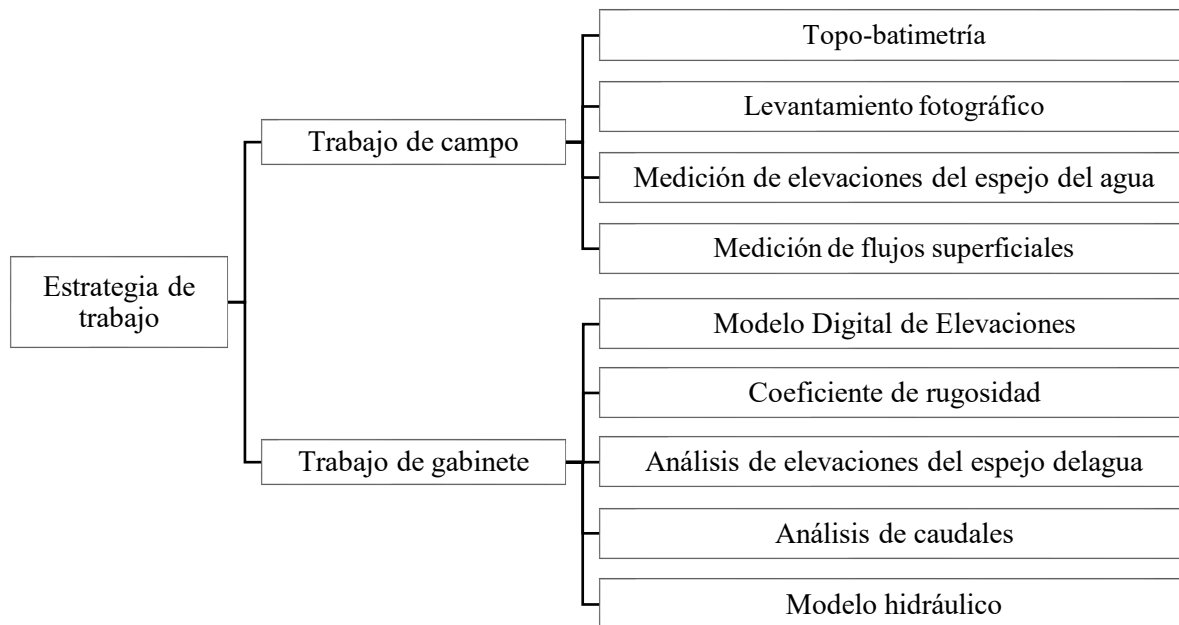


## CAPÍTULO 5. MATERIALES Y MÉTODOS

Con el propósito de alcanzar los objetivos establecidos en la presente investigación las actividades se dividieron en: trabajo de campo y trabajo de gabinete. Esto debido a la complejidad que resulta la recopilación de datos de campo y su respectivo postproceso para la correcta calibración del modelo hidráulico. En la siguiente Figura se muestra de manera sintetizada la estrategia de trabajo seguida.

**Figura 13**

*Metodología implementada.*





## **Trabajo de Campo**

Los trabajos de campo comprendieron a partir del paso vehicular Vado Cebollero ubicado en las coordenadas UTM WGS 84 Zona 11 Norte: 3,574,982.90 Norte y 686,808.50 Este y finalizando en el paso vehicular Vado Carraza ubicado en las coordenadas UTM WGS 84 Zona 11 Norte: 3,563,533.60 Norte y 673,480.20 Este. Las actividades fueron desarrolladas de octubre de 2023 a octubre de 2024. A continuación, se describe a detalle la metodología dividida en cuatro etapas (topo-batimetría, coeficiente de rugosidad, medición de flujo y mediciones de elevaciones del espejo del agua):

### Topo-batimetría

Para caracterizar la geometría actual del área de estudio se llevaron a cabo diversas campañas de levantamiento topo-batimétrico, para las cuales, se utilizó un Sistema de Posicionamiento Global (*GPS*, por sus siglas en inglés) Diferencial Topcon modelo GR-5 y un Perfilador Acústico Doppler (*ADP*, por sus siglas en inglés) *SonTek* modelo *River Surveyor S5*. El levantamiento consistió en la obtención de secciones transversales del cauce con un distanciamiento promedio de 100 m.

El equipo Topcon GR-5 recibe la señal de tres sistemas de posicionamiento satelital: GPS, GLONASS y Galileo; además, cuenta con una precisión en RTK (del inglés *Real Time Kinematic*) horizontal de 5 mm + 0.5 ppm y verticalmente de 10 mm + 0.8 ppm (Topcon, 2016).

Por otro lado, el dispositivo *River Surveyor S5* es un equipo de alta precisión diseñado específicamente para medir la descarga fluvial, las corrientes de agua tridimensionales, las profundidades, así como la batimetría desde una embarcación en movimiento o estacionaria. Cuenta con un rango de medición de profundidad de 0.20 a 15 m, con una precisión del 1% y una resolución de 0.001 m (SonTek, 2022).



En las zonas sin presencia de agua, se utilizó el equipo Topcon GR-5 tomando como referencia el banco de nivel Mojo 7 localizado en las coordenadas UTM WGS 84 Zona 11 Norte: 3,572,028.936 Norte y 683,875.775 Este a una altura ortométrica de 20.477 m s. n. m. (Figura 15). En él, se colocó la base receptora para la transmisión y recopilación de información satelital, que permitió corregir los puntos levantados con el equipo móvil en modo RTK (Figura 16).

#### **Figura 14**

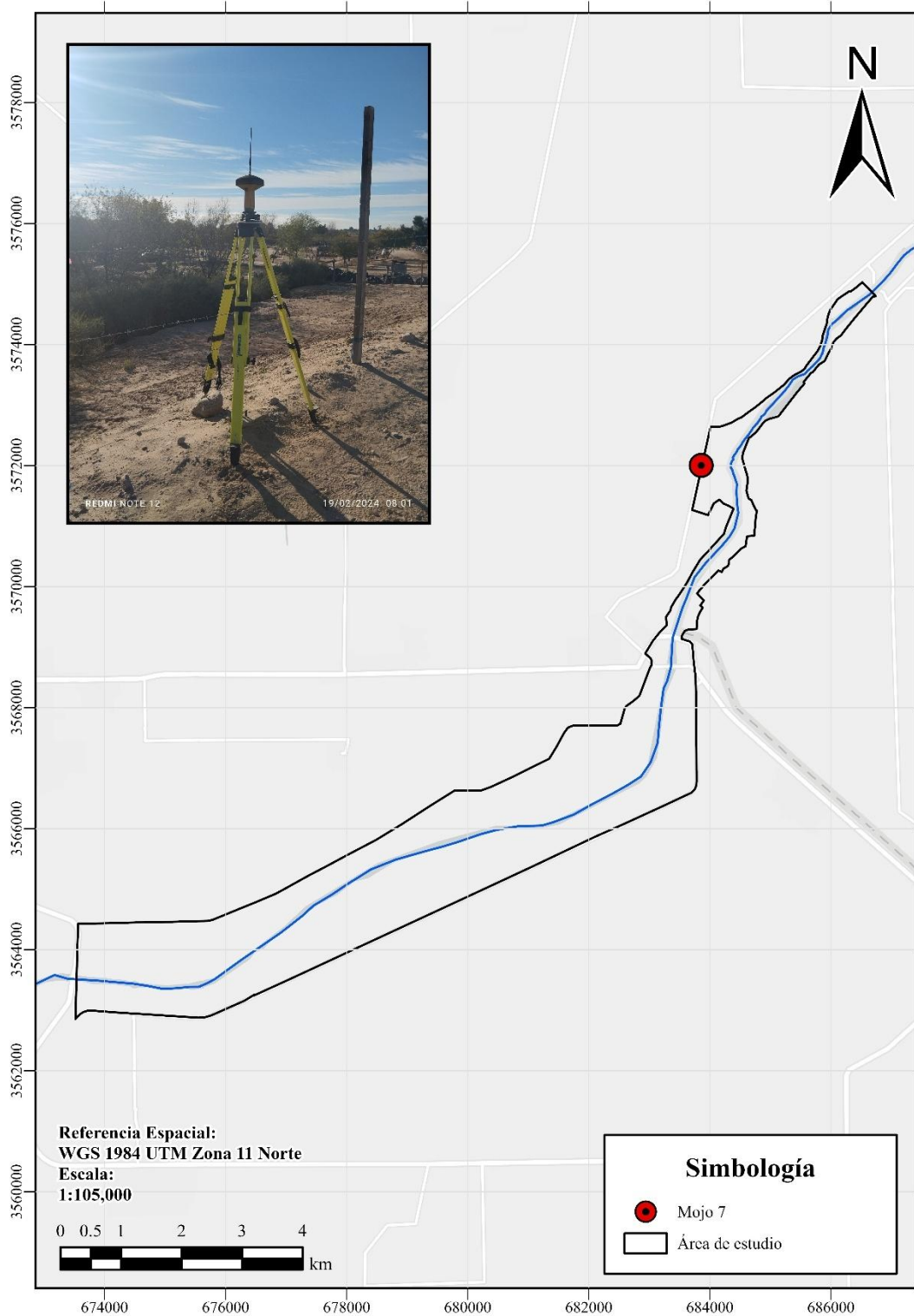
*Levantamiento topográfico con GPS GR-5.*





Figura 15

Localización del banco de nivel Mojo 7.





Por otro lado, en los sitios con presencia de agua, el levantamiento fue realizado con el equipo *River Surveyor S5*, una vez obtenida la elevación del espejo del agua. Esta última obtenida colocando la base receptora en el banco de nivel Mojo 7 y el móvil en modo RTK, mismo que registró la elevación del espejo de agua a partir de un promedio de 100 mediciones. Los transectos dentro de los cuerpos de agua se realizaron de manera perpendicular al eje del cauce con un distanciamiento de 100 m, obteniendo las profundidades georreferenciadas por medio del haz acústico vertical (ecosonda) y el GPS integrado.

### **Figura 16**

*Levantamiento batimétrico con River Surveyor S5.*





### Levantamiento fotográfico

Se llevaron a cabo 15 jornadas de levantamiento fotográfico con el propósito de documentar y caracterizar las condiciones actuales del tramo de estudio del río Colorado. Estas actividades consistieron en recorridos paralelos al cauce, durante los cuales se realizó la captura de fotografías georreferenciadas y la descripción in situ de las condiciones observadas. El registro se concentró principalmente en los puntos donde se identificaron cambios significativos en las características que inciden en la rugosidad del cauce, tales como la densidad y tipo de vegetación, la dirección y geometría del canal, la topografía local, el material del lecho y la presencia de obstrucciones (Chow, 1994).

### **Figura 17**

*Fotografía del cauce del Río Colorado para la estimación del coeficiente de rugosidad.*



Nota. Fotografía tomada en las coordenadas UTM WGS 84 Zona 11 Norte: 3,566,734.15 Norte y 682,604.47 Este.



### Medición de elevaciones del espejo del agua

El monitoreo de la elevación del espejo de agua se realizó en seis sitios distribuidos dentro del área de estudio, cuatro de ellos en los sitios de medición de flujo DMS-8A, DMS-10, DMS-11 y DMS-12, y el resto en los sitios RVCE-1 y VC-1, estos últimos permitiendo a su vez auxiliar a los sitios DMS-8A y DMS-12, respectivamente. La instrumentación requerida consistió en la instalación, posicionamiento y nivelación de dos tipos de dispositivos: medidores puntuales (limnímetros) y medidores automáticos de presión de columna de agua (limní-grafos).

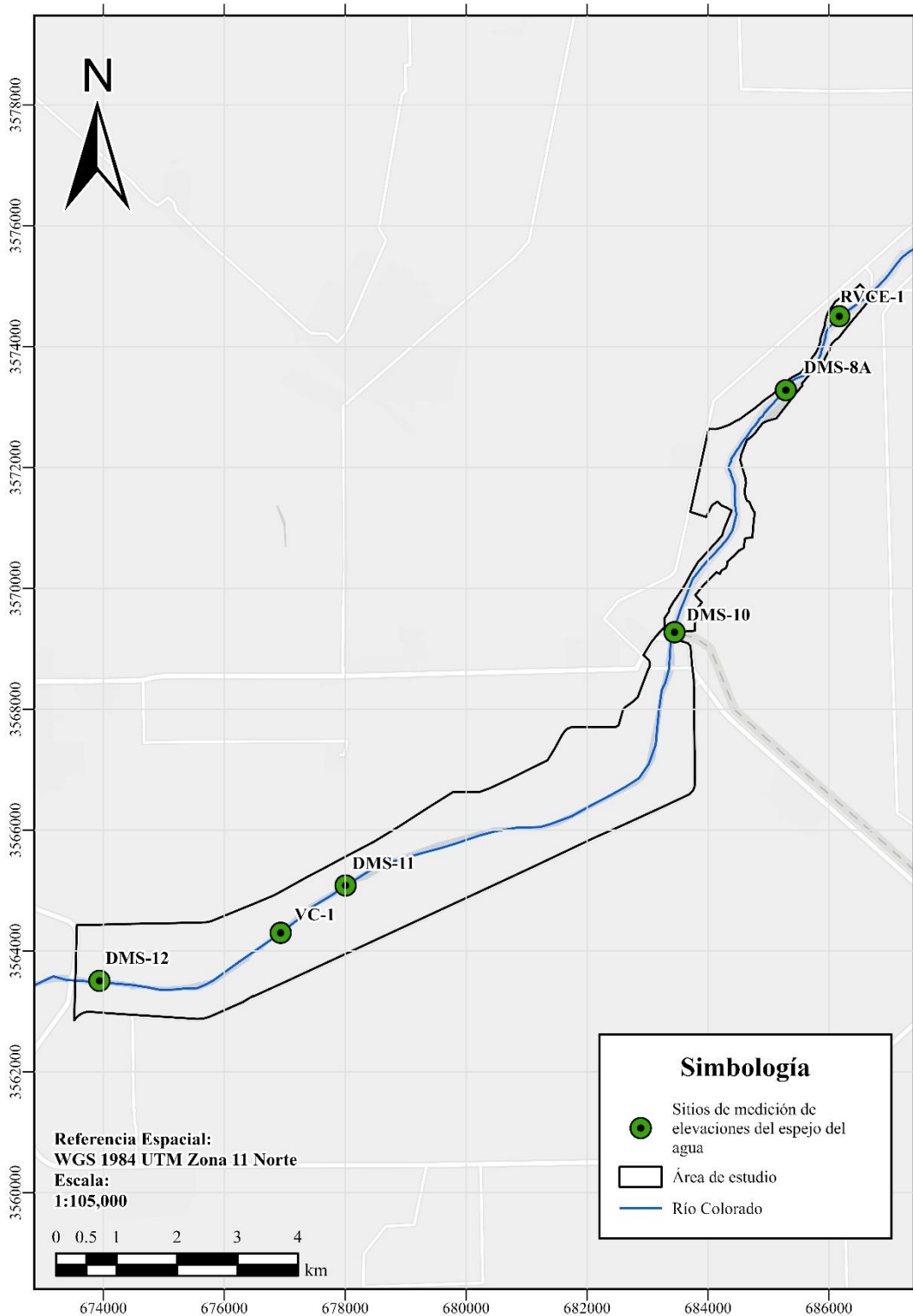
Con la instrumentación antes mencionada se registraron las fluctuaciones del nivel del espejo de agua en el Río Colorado y posteriormente se realizó una correlación entre elevación-caudal, esto con la finalidad de conocer las fluctuaciones horarias durante las entregas de agua y en la distribución en los diferentes sitios de medición, y así poder generar hidrogramas continuos y una mayor precisión en la estimación de volúmenes de agua, además de que es una variable relevante en la calibración del modelo hidráulico.

Es importante señalar que la operación, supervisión y procesamiento de los sitios de medición de elevaciones del espejo del agua DMS-10 y DMS-11 estuvieron a cargo del Instituto de ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California.



Figura 18

Localización de los sitios de medición de elevaciones del espejo del agua.





Para lograr lo anteriormente descrito, se hicieron mediciones puntuales con limní-metros y mediciones automatizadas con limní-grafos. Las mediciones puntuales se realizaron conforme a la disponibilidad operativa, sin adherirse a un intervalo de tiempo constante. Por otro lado, las mediciones continuas se hicieron de forma horaria a través de la programación de los sensores.

A lo largo de todo el cauce del Río Colorado dentro del área de estudio, a excepción del primer kilómetro frente al sitio de restauración ecológica Vado Cebollero, ya se encontraba previa a esta investigación la instrumentación antes descrita. Por lo anterior, se instrumentó un punto de monitoreo de elevación del espejo de agua, denominado RVC-1, con un limní-metro de 2.00 m y un limní-grafo marca HOB0 modelo U20-001-01-Ti, los cuales se nivelaron mediante un GPS marca High Target, modelo V60, implementando el método estático con una duración mínima de 30 minutos.

El equipo en cuestión es un sistema global de navegación por satélite (*GNSS*, por sus siglas en inglés), el cual capta señal de los siguientes sistemas de posicionamiento satelital: GPS, GLONASS, SBAS, Galileo y BDS, además cuenta con una precisión en modo estático horizontal de 2.5 mm + 0.5 ppm y verticalmente de 5 mm + 0.5 ppm (Hi-Target, 2019).

El procedimiento para el posicionamiento y nivelación de la instrumentación realizada fue tomando como referencia el banco de nivel denominado Mojo 7 ubicado en las coordenadas WGS 84 / UTM zona 11N: 3,572,028.94 N y 686,875.78 E con una elevación de 20.477 m s. n. m., en el cual se colocó la base receptora para la transmisión y recopilación de información satelital para la corrección de los limní-metros nivelados con el equipo móvil en modo estático (ver Figura 19).

Las coordenadas obtenidas del posicionamiento y nivelación se muestran en la tabla siguiente.



**Tabla 6**

*Resultados del posicionamiento y nivelación de RVCE-1.*

Sitio	Norte	Este	Elevación
RVCE-1	3,574,751.8378	686,539.5641	13.5549

**Figura 19**

*Nivelación de limnímetro RVCE-1.*



### Medición de flujos superficiales

Las mediciones de flujo (aforos) fueron divididas en dos partes, la primera consistió en realizar mediciones diarias durante la presencia de descargas de flujos en tres fuentes abastecimiento (Km 12+960 del canal Barrote “Vado Cebollero”, Km 28+840 del canal Alimentador del Sur “Compuerta Central” y Km 18 del canal Barrote); mientras que la segunda consistió en aforar mensualmente los sitios DMS-8A, DMS-10, DMS-11 y DMS-12. Se siguió la metodología establecida dentro de la ISO 748 (2021), la cual especifica diversos métodos para



determinar la velocidad y el área de la sección transversal del agua que fluye en canales abiertos, así como el cálculo de la descarga empleando dispositivos de medición de velocidad puntual.

Se utilizaron los equipos ultrasónicos *FlowTracker2* y *RiverSurveyor S5*, que funcionan midiendo la velocidad del flujo fundamentándose en un principio físico nombrado desplazamiento Doppler, que establece la existencia de un cambio en la frecuencia de una onda como consecuencia del movimiento relativo entre emisor y receptor.

El *FlowTracker2* es un Velocímetro Acústico Doppler (*ADV*, por sus siglas en inglés) de alta precisión utilizado para medir las tres componentes del vector de velocidad. Algunas de sus características más sobresalientes son su rango de velocidad de  $\pm 0.001$  a 4.0 m/s, resolución de velocidad de 0.0001 m/s, exactitud de velocidad de  $\pm 1\%$  del valor medido y sensor de presión con un rango de 0 a 10 m con exactitud de  $\pm 0.1\%$  de la escala total (SonTek, 2015).

### **Figura 20**

*Medición de flujo con FlowTracker2 en punto de abastecimiento del Km 28+840 del canal Alimentador del Sur “Compuerta Central”.*





Por otro lado, el ADP *River Surveyor S5*, es un equipo diseñado específicamente para medir la descarga fluvial, las corrientes de agua tridimensionales, las profundidades y la batimetría desde una embarcación en movimiento o estacionaria. Cuenta con un rango de distancia de medición de 0.06 a 40.00 m; un rango de velocidad de  $\pm 20$  m/s; una precisión de  $\pm 0.20$  cm/s; una resolución de 0.001 m/s, así como un máximo de 128 celdas de 0.02 a 4.0 m (SonTek, 2022).

### Figura 21

*Medición de flujo con River Surveyor S5 sitios de medición DMS-8A.*



En los puntos de abastecimiento de agua correspondientes a Compuerta Central y Km 18, se dispuso de instrumentación para la medición de la carga hidráulica, lo que permitió procesar la información obtenida y establecer la correlación carga-caudal. A partir de dicha relación fue posible generar hidrogramas continuos de caudal para ambos sitios. En el caso de Vado Cebollero, este procedimiento no fue necesario, ya que la compuerta cuenta con tecnología de medición automática de caudal, proporcionando directamente registros continuos.



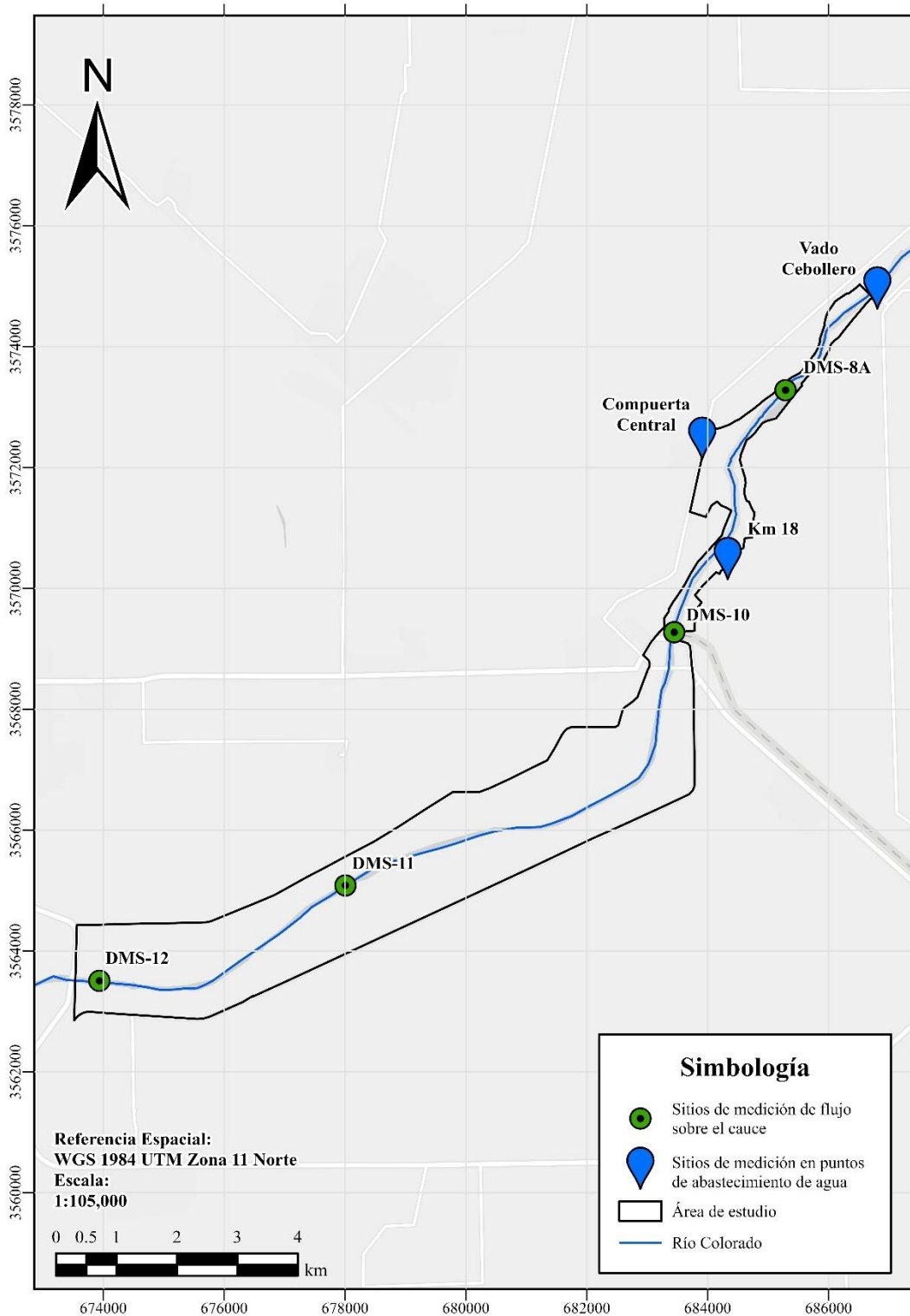
Por otro lado, en los sitios de medición dentro del cauce, se aplicó de manera similar la correlación anteriormente descrita; sin embargo, en estos puntos la relación se estableció a partir de los datos registrados por sensores de medición de la elevación del espejo del agua.

En la Figura siguiente se muestra la ubicación espacial de los puntos de medición de flujo superficial utilizados para la presente investigación.



Figura 22

*Sitios de medición de flujos superficiales.*





## Trabajo de Gabinete

Los trabajos de gabinete comprenden el conjunto de actividades realizadas posterior a la obtención de la información de campo, con el propósito de procesar, analizar y organizar los datos necesarios para la creación del modelo hidráulico.

A continuación, se detalla la metodología empleada, la cual se estructuró en las siguientes etapas:

### Modelo Digital de Elevaciones

El Modelo Digital de Elevaciones se elaboró a partir de la integración de dos superficies. La primera corresponde al levantamiento LiDAR realizado en 2014, el cual abarca las zonas terrestres o no inundadas; mientras que la segunda se generó mediante la interpolación de datos topo-batimétricos obtenidos durante el desarrollo de esta investigación.

Previo a la interpolación, los datos topo-batimétricos obtenidos a base de puntos georreferenciados fueron depurados, mediante la verificación de coordenadas, eliminación de valores atípicos y revisión de coherencia altimétrica (fuera de los rangos de elevación en la zona) entre diferentes campañas de levantamiento. Por otro lado, todos los puntos fueron georreferenciados en un mismo sistema de coordenadas (UTM WGS 84 Zona 11 Norte), garantizando su compatibilidad con las demás capas geospaciales utilizadas dentro del modelo.

Para determinar el método de interpolación más adecuado, se realizó un análisis exploratorio comparativo entre 20 métodos de interpolación a través de ArcGIS Pro. Entre los métodos evaluados se incluyeron técnicas determinísticas, así como métodos geoestadísticos y se consideraron criterios de evaluación estadística como lo son el error cuadrático medio (*RMSE* por sus siglas en inglés) y el error medio (*ME* por sus siglas en inglés). En la tabla siguiente se muestra el resultado del análisis exploratorio.



**Tabla 7**

*Comparativa de métodos de interpolación aplicados a los datos topo-batimétricos para la generación del MDE.*

<b>Método de interpolación</b>	<b>Error cuadrático medio</b>	<b>Error medio</b>
Kriging simple – Optimizado	0.248	-0.017
Funciones de base radial - Placa delgada	0.25	-0.012
Kriging universal – Predeterminado	0.264	-0.009
Kriging universal – Optimizado	0.265	-0.011
Kriging bayesiano empírico - Predeterminado	0.282	-0.006
Kriging bayesiano empírico - Avanzado	0.282	-0.011
Funciones de base radial - Multicuadrática	0.285	-0.013
Kriging ordinario – Optimizado	0.290	-0.024
Kriging ordinario – Predeterminado	0.291	-0.024
Interpolación de kernel	0.342	0.033
Kriging simple – Tendencia	0.346	-0.017
Distancia inversa ponderada - Optimizado	0.392	-0.045
Kriging simple – Tendencia y transformación	0.399	0.031
Distancia inversa ponderada - Predeterminado	0.420	-0.046
Funciones de base radial - Spline completamente regularizado	0.441	-0.031
Funciones de base radial - Spline con tensión	0.445	-0.032
Kriging simple – Predeterminado	0.515	0.026
Funciones de base radial - Multicuadrática inversa	0.521	-0.046
Interpolación polinómica global – Tercer orden	0.880	-0.00006
Interpolación polinómica global – Segundo orden	0.883	-0.00002



Se seleccionó el método Kriging simple optimizado para la generación del MDE ya que presentó un *RMSE* de 0.248, además de ofrecer el mejor equilibrio entre precisión, suavidad de la superficie y realismo geomorfológico. La resolución espacial del MDE generado fue de 1 m incluyendo zonas inundables y zonas no inundables dentro del área de estudio.

Finalmente, el MDE interpolado, fue exportado en formato GeoTIFF e importado al entorno RAS Mapper del software HEC-RAS, donde se empleó para definir la geometría del terreno y la generación de la malla computacional. Este modelo se utilizó como base para la simulación hidráulica bidimensional del flujo, con el objetivo de representar con precisión la interacción entre el relieve y la dinámica del agua en el tramo de estudio.

#### Coeficientes de rugosidad

El coeficiente de rugosidad se obtuvo mediante la información fotográfica recabada en campo durante las jornadas de levantamiento, en conjunto, con la estimación de los coeficientes de rugosidad identificados por Salcedo Peredia (2016), dentro del Corredor Ripario del Delta del Río Colorado. El procedimiento consistió en actualizar estos valores y su extensión geográfica mediante el uso de SIG, imágenes satelitales e información recabada durante los levantamientos en sitio. Una vez delimitados los nuevos polígonos, se caracterizaron en función de las condiciones observadas y se ajustaron siguiendo la ecuación desarrollada por Cowan (1956).

#### Análisis de elevaciones del espejo del agua

Para el análisis de las elevaciones del espejo de agua, se estableció una correlación entre los datos puntuales obtenidos mediante las lecturas de los limní-metros y los registros continuos generados por los sensores instalados en los seis sitios de monitoreo de elevación del espejo del

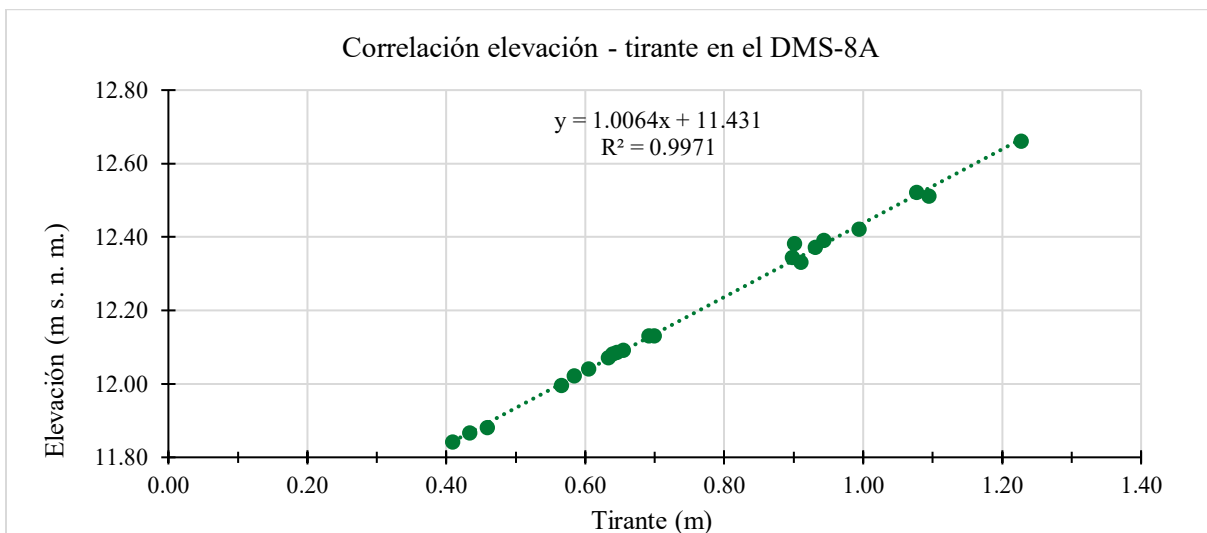


agua. Este proceso consistió en ajustar diferentes funciones matemáticas con el propósito de identificar la relación que mejor representara el comportamiento del espejo del agua conjugando ambas fuentes de información. La selección de la función matemática se realizó evaluando el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de cada ajuste, eligiéndose aquella función que presentó el menor valor de  $R^2$ , ya que esta condición permitió minimizar la discrepancia entre los datos observados y los calculados, asegurando así una representación adecuada del nivel del agua.

Como ejemplo del procedimiento aplicado en los seis puntos de monitoreo, en la Figura 22 se presenta la correlación obtenida para el sitio DMS-8A. En este caso, la relación entre el tirante medido y la elevación del espejo de agua se ajustó mediante una función lineal del tipo  $y = 1.0064x + 11.431$ , la cual mostró un  $R^2 = 0.9971$ , evidenciando una concordancia entre los valores puntuales registrados con el limnímetro y los datos continuos proporcionados por el sensor.

### Figura 23

Correlación elevación - tirante en el sitio de monitoreo DMS-8A.





### Análisis de caudales

Para el análisis de los caudales, se estableció una correlación entre los datos puntuales obtenidos a partir de aforos realizados en campo y los registros continuos generados mediante la instrumentación instalada en los distintos puntos de medición.

En los puntos de entrega de agua Compuerta Central y Km 18, el análisis se realizó a partir de mediciones continuas de la carga hidráulica del canal, obtenidas mediante instrumentación instalada en estas estructuras hidráulicas, lo que permitió correlacionar dicha variable con los caudales aforados y así definir relaciones carga-caudal. En el caso del punto Vado Cebollero, esta relación no fue necesaria, ya que la infraestructura cuenta con tecnología de medición automática de caudal.

Por otro lado, para el análisis de caudales dentro del cauce del Río Colorado, el procedimiento se llevó a cabo en los sitios de monitoreo utilizando la carga hidráulica o elevación correspondiente al propio cauce del río, determinada a partir de mediciones continuas de la elevación del espejo de agua. Estas mediciones se correlacionaron con los caudales puntuales obtenidos durante los aforos realizados en cada sitio, permitiendo establecer funciones matemáticas representativas de la relación entre la elevación y el caudal circulante.

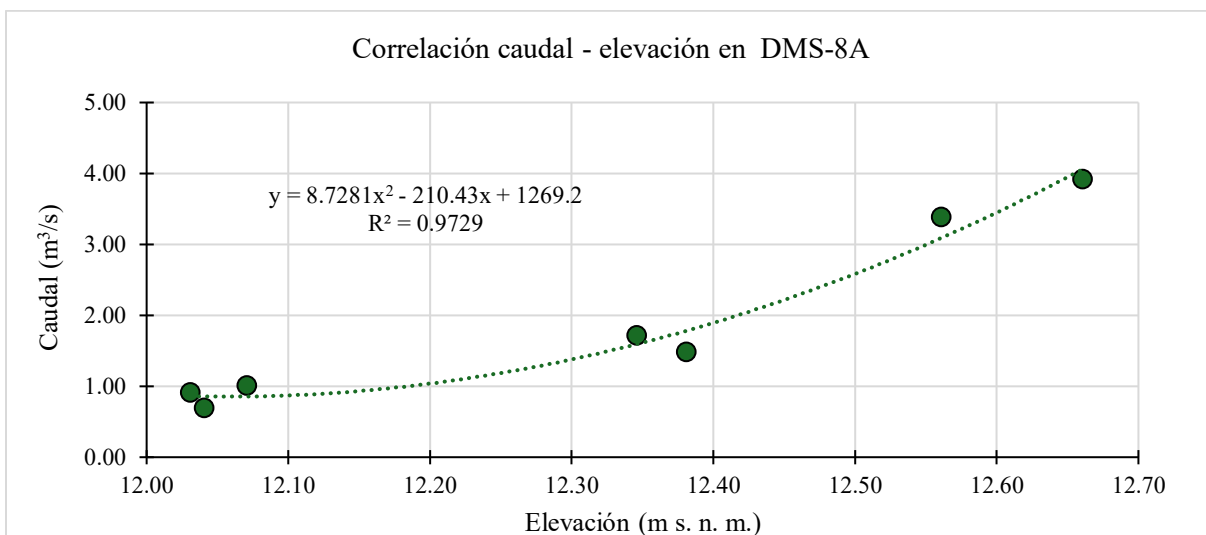
En todos los casos, el procedimiento consistió en ajustar diferentes funciones matemáticas y evaluar su desempeño mediante el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), con el objetivo de identificar la relación que mejor representara el comportamiento hidráulico observado. La selección de la función matemática se realizó considerando el mayor valor de  $R^2$ , ya que esta condición permitió minimizar la discrepancia entre los caudales observados y los caudales estimados. Como resultado, se generaron series continuas de caudal tanto en los puntos de entrega de agua como en los sitios ubicados dentro del cauce del Río Colorado.



A continuación, se presenta el ejemplo del procedimiento aplicado en el sitio de monitoreo DMS-8A. En la Figura 23 se muestra la correlación entre la elevación del espejo de agua (m s. n. m.) y el caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), obtenida a partir de los aforos puntuales y las mediciones continuas de carga hidráulica del cauce del Río Colorado. La figura incluye la curva de ajuste seleccionada, correspondiente a una función polinómica de segundo orden con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.9729$ , lo que indica una adecuada representación de la relación caudal–elevación y del comportamiento hidráulico observado en el sitio.

**Figura 24**

*Correlación caudal - elevación en el sitio de monitoreo DMS-8A.*





### Modelo hidráulico

El modelo hidráulico desarrollado en el presente estudio fue implementado mediante el software HEC-RAS versión 6.6, empleando el módulo bidimensional (2D) para la simulación del flujo no permanente. Este modelo permite representar de forma espacialmente distribuida el comportamiento hidráulico del tramo de estudio, considerando las variaciones topográficas y geométricas del cauce y las áreas adyacentes incluidas dentro del dominio de simulación.

La configuración bidimensional del modelo se basó en la discretización del área de estudio en una malla computacional, sobre la cual se resolvieron las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento que gobiernan el flujo superficial. A través de este enfoque, fue posible simular la evolución temporal de variables hidráulicas como la elevación del espejo de agua, el tirante y el caudal, bajo condiciones de flujo no permanente.

El modelo hidráulico incluyó la definición de la geometría, la asignación de parámetros hidráulicos, como el coeficiente de rugosidad, así como la incorporación de condiciones de frontera e iniciales consistentes con el comportamiento hidrológico del sistema. Asimismo, se establecieron los parámetros de cálculo necesarios para la ejecución de las simulaciones, los cuales se describen en los subapartados correspondientes. Este esquema metodológico permitió integrar de manera coherente los distintos elementos que conforman el modelo hidráulico empleado en la investigación.

### Modelo geométrico

El modelo geométrico fue construido a partir de la integración del MDE, el cual fue importado al entorno de HEC-RAS para su asociación con la geometría del modelo hidráulico. A partir de este insumo, se definió el polígono correspondiente al área de estudio, el cual delimitó el



dominio espacial de la simulación. Con el fin de evitar problemas asociados a la cuadrangulación de la malla, se aplicó un suavizado en las esquinas del polígono, permitiendo una transición geométrica más adecuada durante la generación del mallado.

Posteriormente, se incorporó el eje del cauce como referencia para la alineación del flujo y la correcta representación de la dirección principal del escurrimiento. De manera complementaria, se añadieron líneas de quiebre para definir las zonas de mayor complejidad geométrica y topográfica dentro del modelo, tales como el cauce principal y áreas con variaciones abruptas de pendiente, asegurando una representación más precisa del relieve.

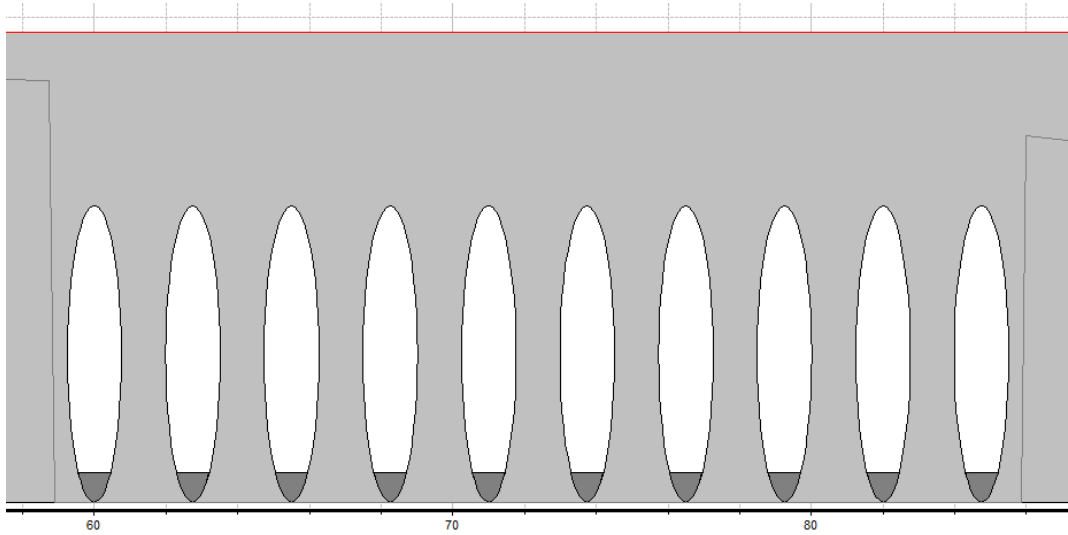
Con base en esta información, se llevó a cabo la generación de la malla computacional, estableciendo un tamaño de celda de  $5 \times 5$  m en las zonas de mayor interés hidráulico. Asimismo, se realizó un refinamiento de la malla en áreas identificadas como no inundables, donde el tamaño de celda fue incrementado hasta 20 m, con el objetivo de optimizar el desempeño computacional. Posteriormente, se efectuó una revisión y corrección del mallado, ajustando aquellas celdas con más de siete lados para mejorar la calidad geométrica y la estabilidad del cálculo.

Finalmente, se incorporó la infraestructura hidráulica existente sobre el cauce del Río Colorado, correspondiente al paso vehicular de Vado Carranza (Figura 24). Esta estructura fue representada dentro del modelo considerando la presencia de diez alcantarillas localizadas bajo el paso vehicular, cada una con un diámetro de 60 pulgadas, lo que permitió incluir de manera explícita su efecto hidráulico en las simulaciones realizadas. Adicionalmente, con base en una visita de campo, se consideró un azolvamiento uniforme de 15 cm en el interior de cada tubo, condición que fue incorporada en la geometría del modelo para representar de forma más realista el estado actual de la infraestructura (ver Figura 26).



**Figura 25**

*Geometría en HEC-RAS del paso vehicular de Vado Carranza.*



**Figura 26**

*Azolve en alcantarilla del paso vehicular de Vado Carranza.*





## Calibración

Los valores finales del coeficiente de rugosidad se determinaron mediante un proceso iterativo dentro del modelo hidráulico en HEC-RAS. Dicho proceso consistió en la modificación gradual y sistemática dicho parámetro hasta reproducir de manera cercana los tirantes observados en campo. En cada iteración, se incrementó el coeficiente de rugosidad cuando fue necesario aumentar el tirante de agua simulado y, de manera inversa, se redujo cuando se requería disminuirlo. Este procedimiento permitió identificar el valor de rugosidad que ofreció la mejor congruencia entre los resultados modelados y las condiciones hidráulicas reales del área en estudio.

## Definición del paso de tiempo

En los modelos hidráulicos bidimensionales desarrollados en HEC-RAS, la definición del paso de tiempo de cálculo es un aspecto fundamental para garantizar la estabilidad numérica y la calidad de la simulación. De acuerdo con el manual técnico del software, el intervalo de tiempo debe seleccionarse en función del tamaño de celda, la velocidad del flujo y el número de Courant, ya que valores excesivos de este último pueden generar inestabilidades y soluciones no físicas, mientras que valores demasiado pequeños incrementan innecesariamente el costo computacional (Brunner, 2023).

HEC-RAS permite establecer el paso de tiempo mediante distintas opciones, incluyendo un intervalo constante definido por el usuario, esquemas de ajuste automático, o su definición a partir del criterio del número de Courant. El manual recomienda que, para simulaciones bidimensionales en régimen no permanente, el número de Courant se mantenga generalmente cercano o menor a la unidad, con el fin de asegurar que la información hidráulica no se propague más de una celda por paso de tiempo (Brunner, 2023).



Por los motivos antes mencionados, en la presente investigación se definió el paso de tiempo en función del número de Courant, el cual se expresa como:

$$C = \frac{V_w \Delta T}{\Delta x}$$

Ecuación 6

Donde:

$C$  = Número de Courant

$V_w$  = Velocidad de propagación de la onda

$\Delta T$  = Paso de tiempo

$\Delta x$  = Dimension de la celda

#### Propuesta de infraestructura hidráulica

Como parte del desarrollo del modelo hidráulico, se llevó a cabo la evaluación de distintas ubicaciones potenciales de infraestructura dentro del cauce, con el propósito de identificar aquella que generara el mayor beneficio hidráulico en términos de superficie inundada. Dicho análisis se realizó mediante simulaciones hidráulicas, comparando la respuesta del sistema ante diferentes configuraciones espaciales dentro del dominio modelado.

El criterio principal de selección se basó en maximizar la extensión de la superficie inundada con una intervención mínima sobre el cauce, buscando de esta manera reducir la necesidad de obras adicionales y limitar las modificaciones estructurales requeridas.



## CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Modelo Digital de Elevaciones

El análisis exploratorio de los veinte métodos de interpolación permitió compararlos y reconocer sus diferencias. Los resultados indicaron que los métodos basados en Kriging fueron los más precisos, al presentar los valores más bajos de RMSE. En particular, el Kriging simple optimizado mostró el mejor ajuste, con un RMSE de 0.248 y un ME cercano a cero (-0.0168), lo que evidencia su capacidad para representar con fidelidad los datos topo-batimétricos.

Por el contrario, los métodos polinómicos globales de segundo y tercer orden obtuvieron los mayores valores de error ( $RMSE > 0.87$ ), lo que refleja su limitada capacidad para capturar la variabilidad local del terreno. Las técnicas determinísticas, como la Ponderación Inversa de la Distancia (IDW) y las Funciones de Base Radial, presentaron un desempeño intermedio, con valores de RMSE entre 0.25 y 0.52.

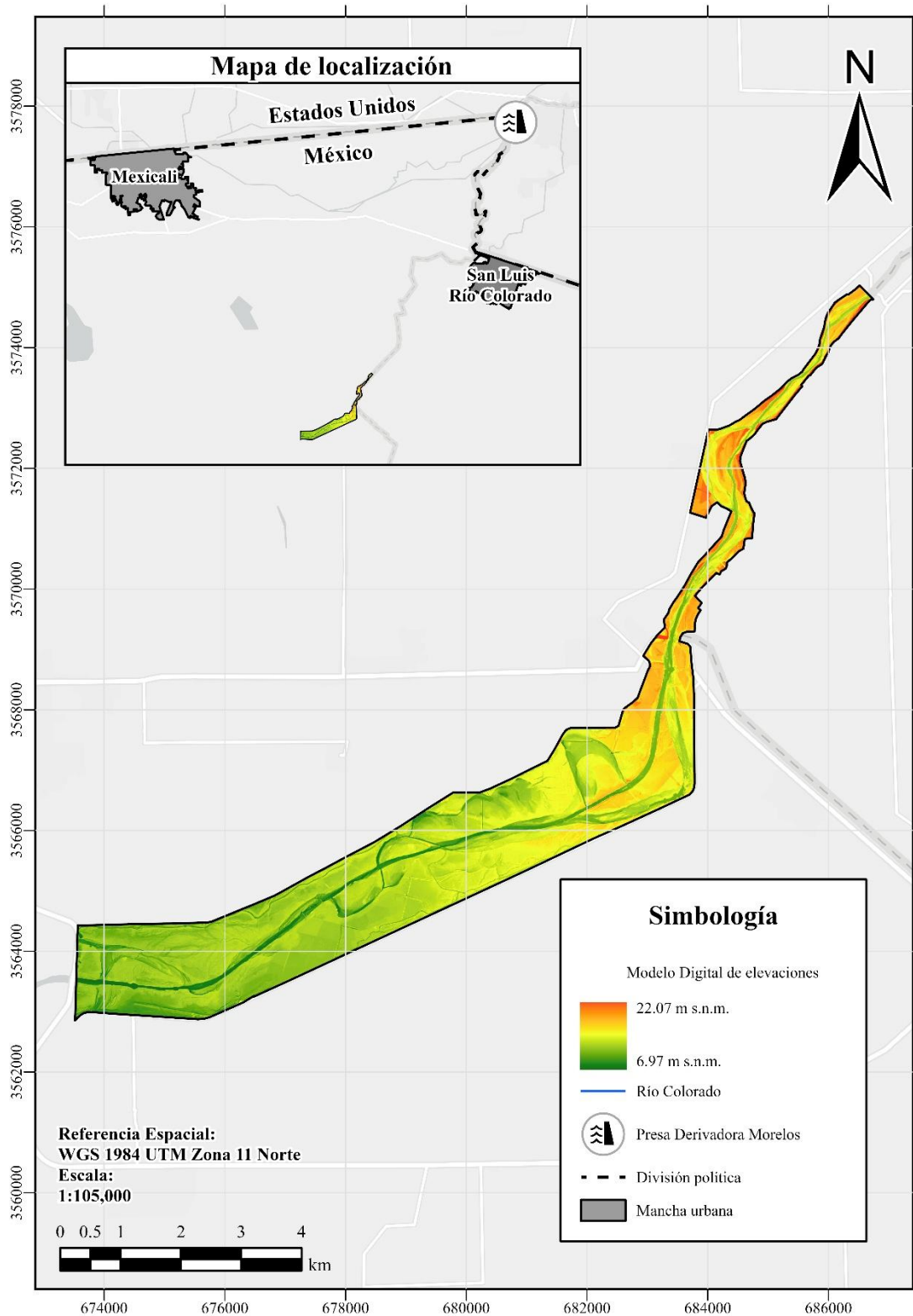
A partir de estos resultados, se seleccionó el método Kriging simple optimizado para la generación del MDE del área de estudio, ya que ofreció el mejor equilibrio entre precisión, suavidad de la superficie y congruencia geomorfológico. Este modelo se utilizó como base para construir el dominio computacional en HEC-RAS 2D, garantizando una representación detallada y confiable del relieve topo-batimétrico del área de estudio.

La Figura 25 muestra el MDE obtenido, el cual representa de forma continua la distribución espacial de las elevaciones del área de estudio, con valores que oscilan entre 6.97 y 22.07 m s. n. m. Espacialmente, las elevaciones más altas se localizan principalmente hacia el norte y aguas arriba del área de estudio, mientras que los valores más bajos se concentran aguas abajo y dentro del cauce principal, reflejando de manera coherente el gradiente longitudinal y la morfología natural del río.



Figura 27

Modelo digital de elevaciones.





### **Análisis de series temporales hidrométricas**

El análisis de series temporales hidrométricas se desarrolló a partir del estudio de los registros continuos de caudal y elevación del espejo de agua o carga hidráulica, obtenidos en los distintos puntos de monitoreo del área de estudio. Para la presente investigación, el periodo de análisis comprendió del 21 de marzo al 10 de octubre de 2024, intervalo durante el cual se evaluaron los aportes de caudal en los puntos de abastecimiento de agua y la respuesta hidráulica observada en el cauce del Río Colorado. Los resultados derivados de este análisis se presentan a continuación mediante la descripción de los hidrogramas y series temporales asociadas.

#### **Fuentes de abastecimiento**

El punto de abastecimiento Vado Cebollero presenta la mayor variabilidad y los valores de caudal más elevados entre los sitios analizados. El caudal máximo registrado fue de  $4.156 \text{ m}^3/\text{s}$ , ocurrido el 30 de junio de 2024, mientras que el caudal mínimo fue de  $0.426 \text{ m}^3/\text{s}$ , registrado el 7 de septiembre de 2024.

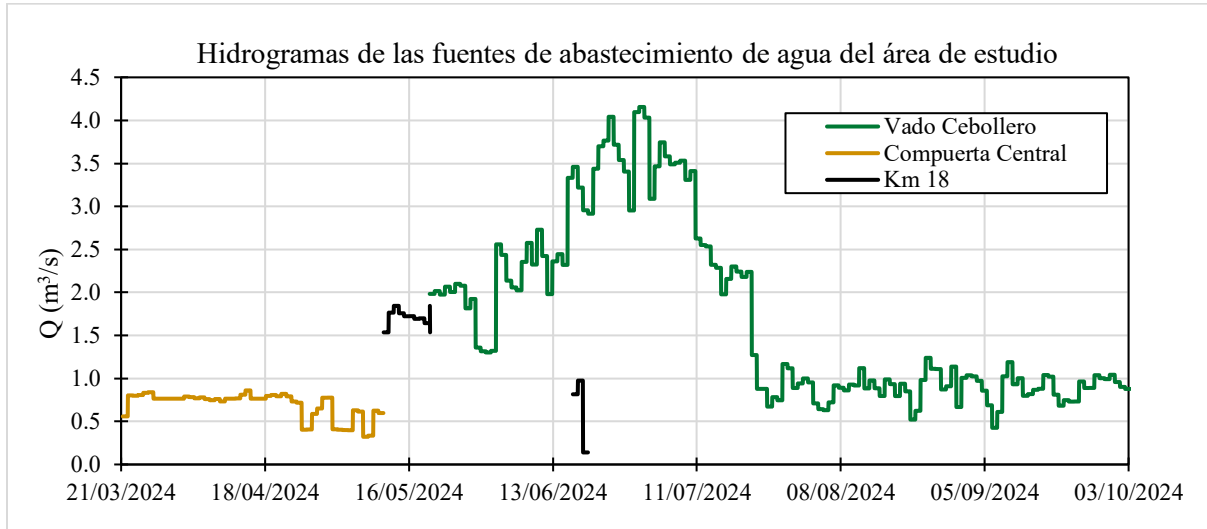
En el caso de Km 18, el hidrograma evidencia aportaciones de menor magnitud en comparación con Vado Cebollero. El caudal máximo alcanzó  $1.844 \text{ m}^3/\text{s}$  el 13 de mayo de 2024, mientras que el caudal mínimo fue de  $0.140 \text{ m}^3/\text{s}$ , registrado el 19 de junio de 2024.

Por su parte, la Compuerta Central presenta los valores de caudal más bajos entre los puntos de abastecimiento monitoreados. El caudal máximo fue de  $0.861 \text{ m}^3/\text{s}$ , registrado el 14 de abril de 2024, mientras que el caudal mínimo fue de  $0.322 \text{ m}^3/\text{s}$ , correspondiente al 7 de mayo de 2024.



**Figura 28**

*Hidrogramas de las fuentes de abastecimiento de agua del área de estudio.*



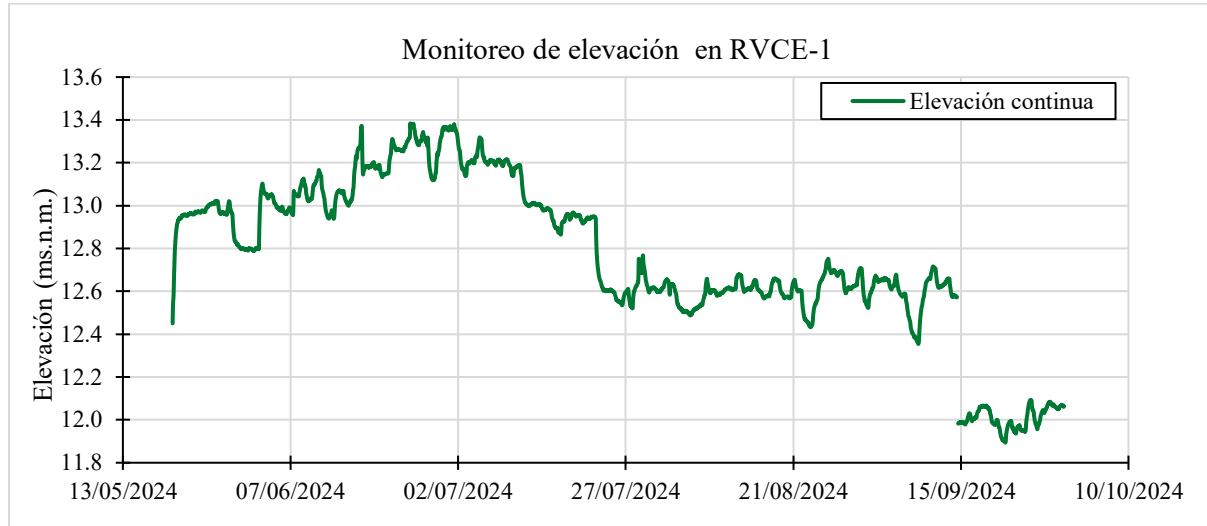
Puntos de monitoreo dentro del cauce

La Figura 27 presenta la variación temporal de la elevación del espejo de agua registrada en el sitio RVCE-1 durante el periodo comprendido entre el 20 de mayo y el 30 de septiembre de 2024. A lo largo de toda la serie se registran elevaciones entre un valor mínimo aproximado de 11.89 m s. n. m., observado el 21 de septiembre de 2024, y un valor máximo cercano a 13.38 m s. n. m., alcanzado el 24 de junio de 2024, lo que representa una variación total del orden de 1.49 m.



**Figura 29**

*Monitoreo de elevación en RVCE-1.*



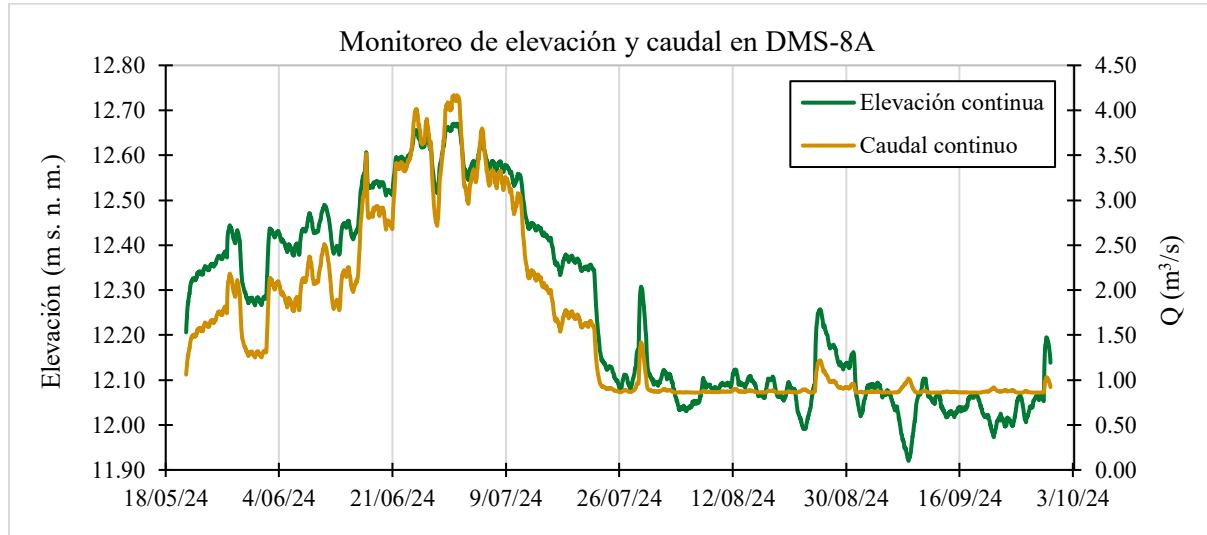
En el sitio de monitoreo DMS-8A se registra una evolución conjunta de la elevación del espejo de agua y el caudal continuo durante el periodo comprendido entre el 21 de mayo y el 30 de septiembre de 2024. A lo largo de este intervalo, la elevación presenta un rango entre 11.92 y 12.67 m s. n. m., mientras que el caudal varía desde valores cercanos a 0.860 m<sup>3</sup>/s hasta máximos del orden de 4.17 m<sup>3</sup>/s.

Los valores más elevados de ambas variables se concentran hacia principios de julio de 2024, posteriormente, los registros muestran una reducción gradual, manteniéndose durante agosto y septiembre elevaciones cercanas a 12.05–12.15 m s. n. m. y caudales del orden de 1.0 m<sup>3</sup>/s, con fluctuaciones de menor magnitud.



**Figura 30**

*Monitoreo de elevación y caudal en DMS-8A.*



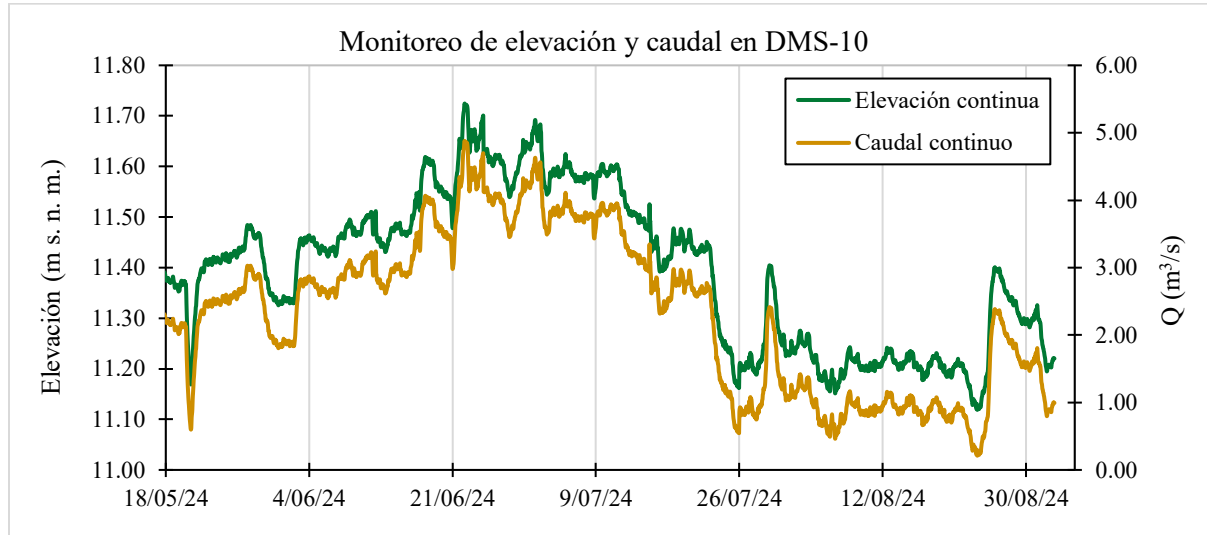
Los registros continuos obtenidos en el sitio DMS-10 permiten analizar la relación temporal entre la elevación del espejo de agua y el caudal durante el periodo comprendido entre el 18 de mayo y el 2 de septiembre de 2024. En este intervalo, la elevación presenta un rango aproximado de 11.10 a 11.72 m s. n. m., mientras que el caudal varía desde valores de 0.09 m<sup>3</sup>/s hasta máximos del orden de 4.88 m<sup>3</sup>/s.

La mayor elevación se alcanza el 23 de junio de 2024, cuando la elevación se aproxima a 11.72 m s. n. m., coincidiendo con caudales de 4.88 m<sup>3</sup>/s. Posteriormente, se observa una disminución gradual, de manera que durante el mes de agosto las elevaciones se mantienen en torno a 11.20 m s. n. m., con caudales predominantemente entre 1.0 y 1.5 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 31**

*Monitoreo de elevación y caudal en DMS-10.*

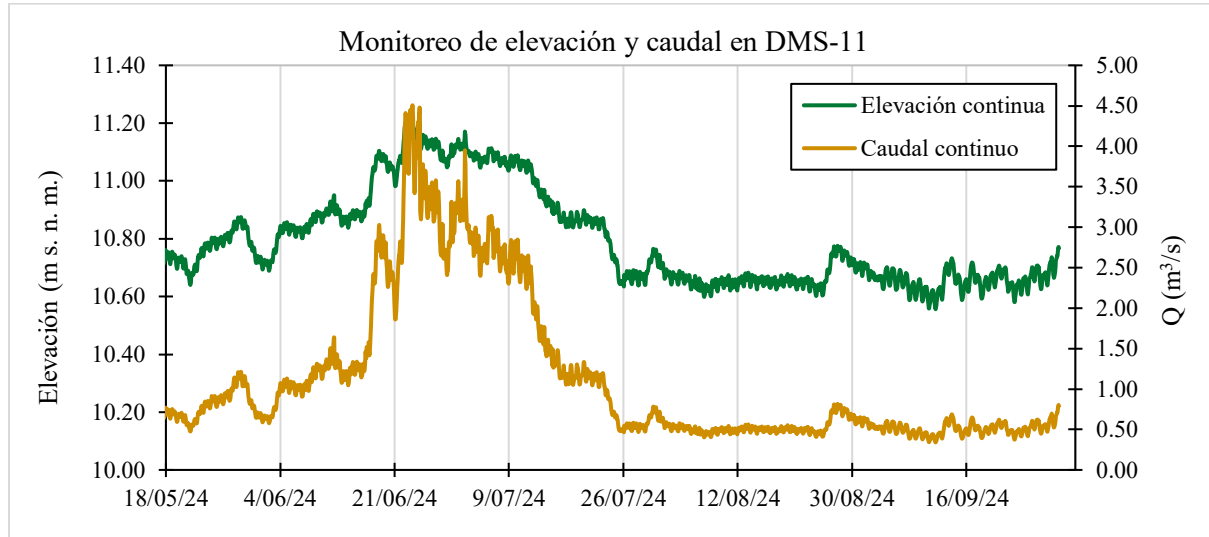


En el sitio DMS-11, la elevación del espejo de agua y el caudal continuo se registran de manera simultánea durante el periodo comprendido entre el 18 de mayo y el 30 de septiembre de 2024. La elevación varía aproximadamente entre 10.11 m s. n. m. y 11.20 m s. n. m., mientras que el caudal oscila entre 0.06 m³/s y valores máximos cercanos a 4.5 m³/s. Los valores máximos de ambas variables se presentan el 24 de junio de 2024. Posteriormente, se observa una disminución sostenida, manteniéndose entre agosto y septiembre elevaciones del orden de 10.60–10.70 m s. n. m. y caudales predominantemente entre 0.5 y 0.7 m³/s.



**Figura 32**

*Monitoreo de elevación y caudal en DMS-11.*

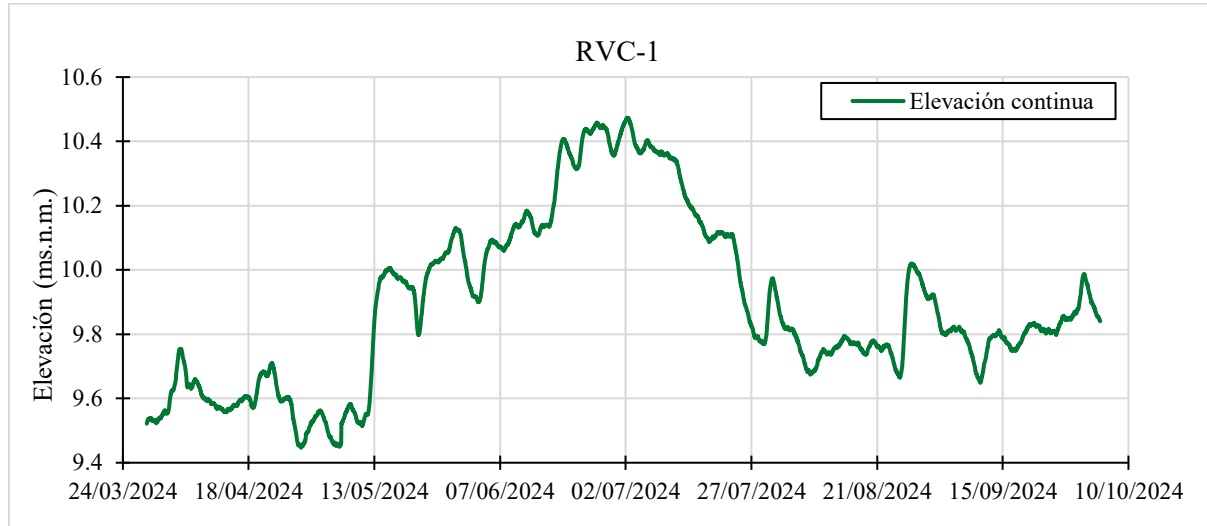


En el sitio RVC-1, la elevación del espejo de agua se registró de manera continua entre el 28 de marzo y el 4 de octubre de 2024. Durante este periodo, los niveles variaron aproximadamente entre 9.45 m s. n. m., alcanzado el 28 abril y el 6 de mayo de 2024, y un máximo de 10.45 m s. n. m., observado entre el 2 de julio de 2024, lo que representa una amplitud total cercana a 1.00 m. Posteriormente, a partir de finales de julio, las elevaciones disminuyen y se mantienen durante agosto y septiembre en valores cercanos a 9.7–9.9 m s. n. m.



**Figura 33**

*Monitoreo de elevación RVC1.*

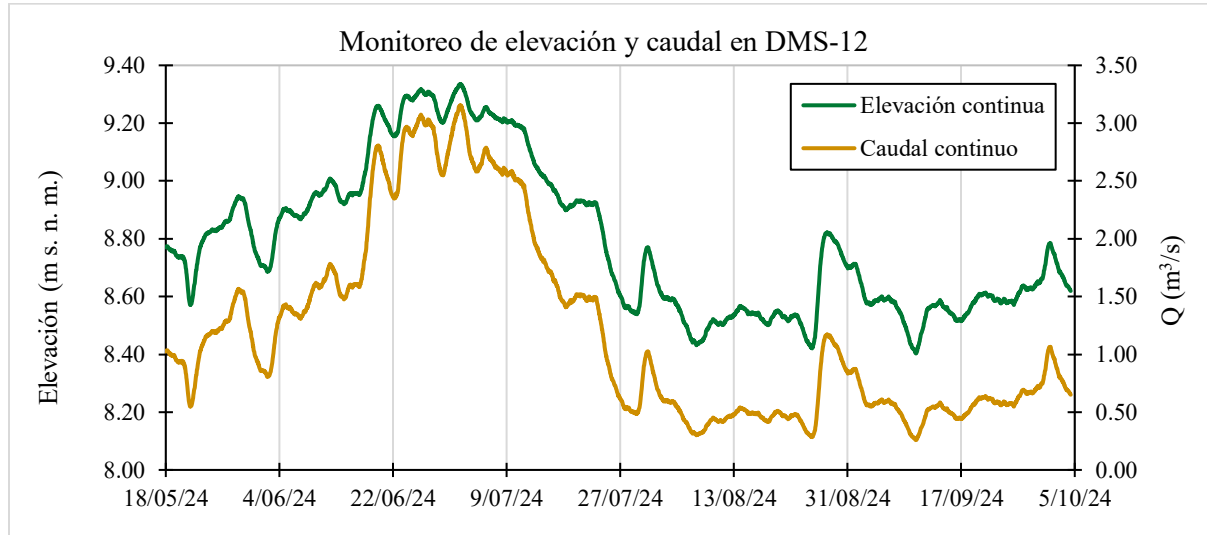


En el sitio de monitoreo DMS-12, el punto más aguas abajo del área de estudio, se registraron de forma continua la elevación del espejo de agua y el caudal durante el periodo comprendido entre el 18 de mayo y el 5 de octubre de 2024. La elevación presentó valores aproximados entre 8.18 y 9.34 m s. n. m., mientras que el caudal osciló entre 0.27 m<sup>3</sup>/s y máximos cercanos a 3.15 m<sup>3</sup>/s. A partir de finales de julio, los niveles disminuyen de manera sostenida, manteniéndose durante agosto y septiembre elevaciones cercanas a 8.30 m s. n. m. y caudales predominantemente entre 0.4 y 0.8 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 34**

*Monitoreo de elevación y caudal en DMS-12.*



## **Modelo hidráulico**

### **Calibración**

La calibración del modelo hidráulico se llevó a cabo a partir de la comparación de elevaciones del espejo de agua simuladas con HEC-RAS y elevaciones de referencia obtenidas mediante curvas de ajuste en los cuatro puntos de monitoreo estratégicamente distribuidos a lo largo del tramo de estudio.

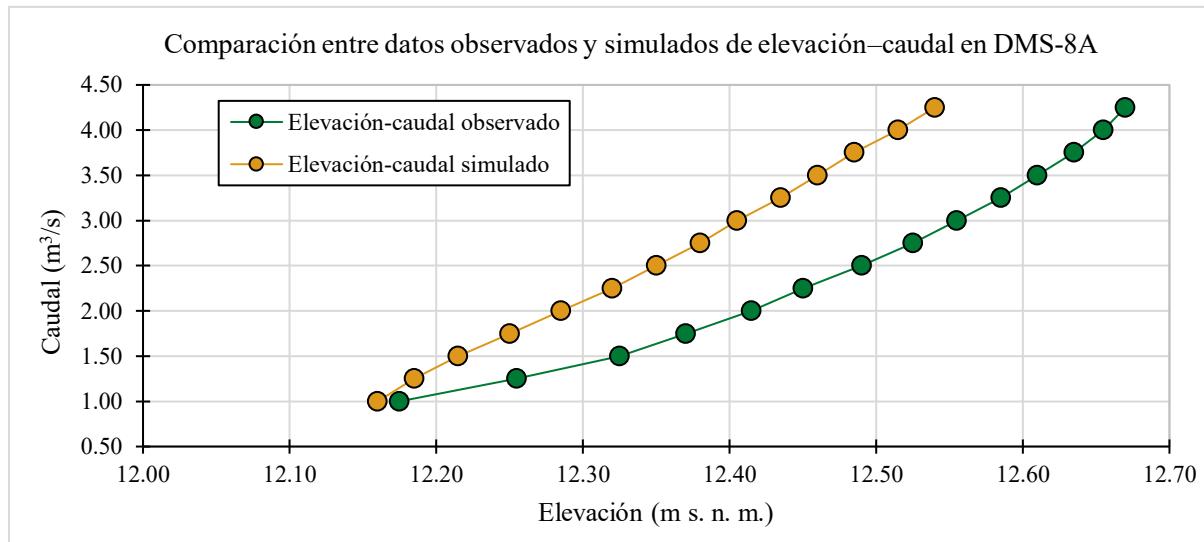
El punto DMS-8A, ubicado en el extremo aguas arriba del tramo modelado, fue evaluado mediante la comparación entre elevaciones observadas y elevaciones simuladas en HEC-RAS para 14 condiciones de caudal, comprendidas entre 1.0 y 4.25 m<sup>3</sup>/s. Las elevaciones ajustadas varían de 12.175 a 12.670 m s. n. m., mientras que las elevaciones simuladas presentan un rango de 12.160 a 12.540 m s. n. m. El análisis estadístico muestra un ME de -0.12 m, un RMSE de 0.13 m y un



$R^2 = 0.28$ . Las diferencias puntuales entre ambas series se mantienen, en general, dentro de un intervalo aproximado de 0.10 a 0.15 m a lo largo del rango de caudales evaluado.

### Figura 35

*Relación elevación-caudal observado y simulado en el punto DMS-8A.*

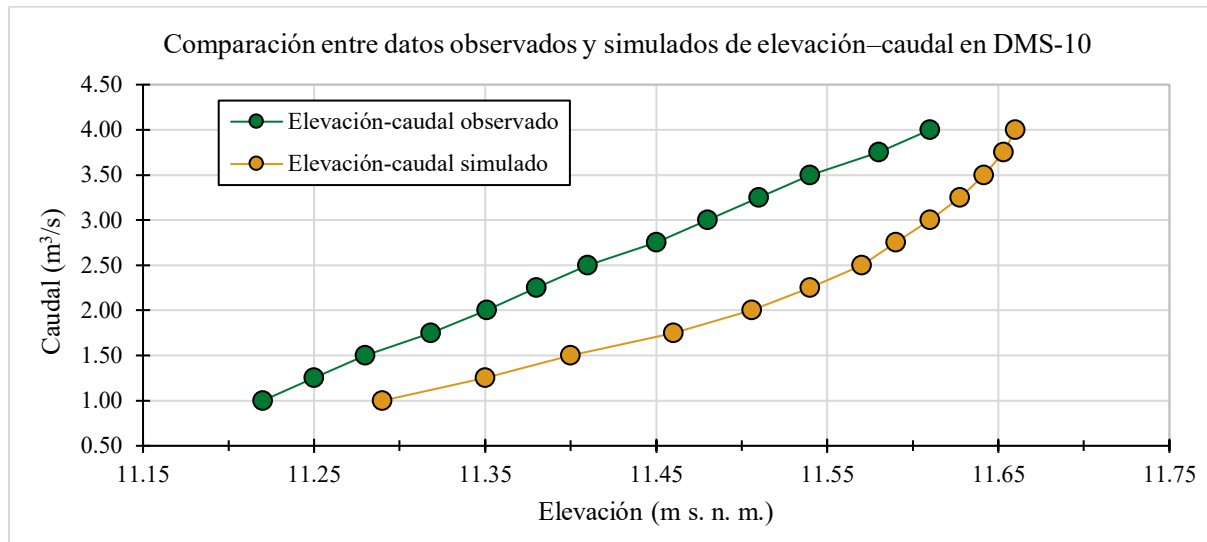


El punto DMS-10 fue evaluado mediante la comparación entre las elevaciones ajustadas y las elevaciones simuladas en HEC-RAS para 13 condiciones de caudal, comprendidas entre 1.0 y 4.0 m<sup>3</sup>/s. Las elevaciones ajustadas presentan un rango de 11.22 a 11.61 m s. n. m., mientras que las elevaciones simuladas varían entre 11.29 y 11.66 m s. n. m. El análisis estadístico arroja un ME de 0.12 m, un RMSE de 0.12 m y un  $R^2 = -0.004$ . Las diferencias puntuales entre ambas series se mantienen, en general, dentro de un intervalo aproximado de 0.10 a 0.15 m a lo largo del rango de caudales evaluado.



Figura 36

Relación elevación-caudal observado y simulado en el punto DMS-10.

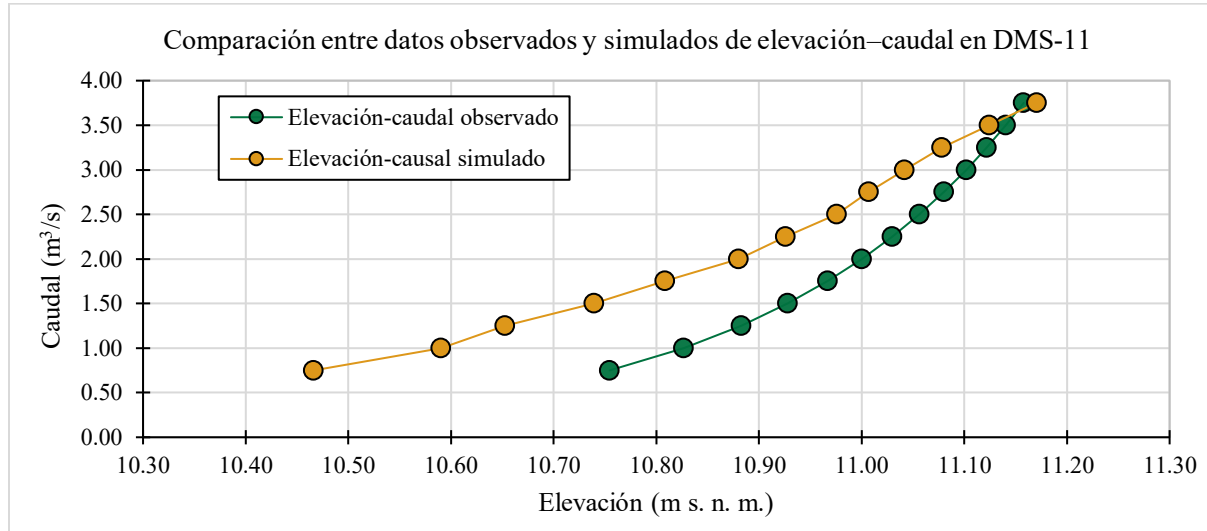


Para el sitio DMS-11, se realizó la comparación entre las elevaciones ajustadas y las elevaciones simuladas en HEC-RAS considerando 13 condiciones de caudal comprendidas entre 0.75 y 3.75 m³/s. Las elevaciones ajustadas presentan un rango de 10.75 a 11.16 m s. n. m., mientras que las elevaciones simuladas varían entre 10.47 y 11.17 m s. n. m. El análisis estadístico arrojó  $ME = -0.12$  m,  $RMSE = 0.15$  m y  $R^2 = -0.52$ , con diferencias puntuales concentradas principalmente en un intervalo aproximado de 0.10 a 0.20 m a lo largo del rango evaluado.



Figura 37

Relación elevación-caudal observado y simulado en el punto DMS-11.

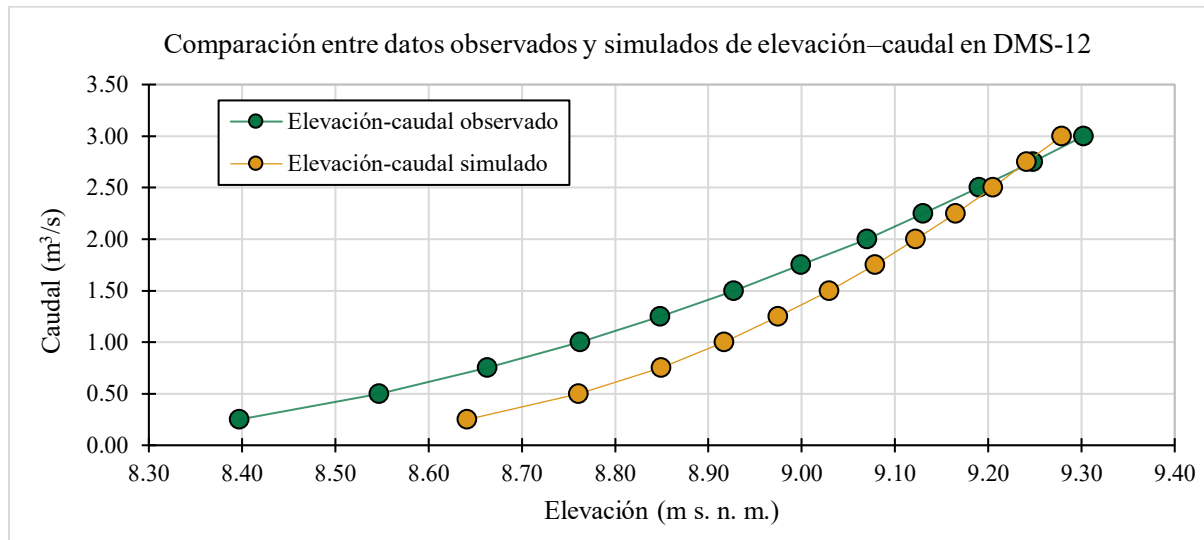


En el punto DMS-12 se evaluó la correspondencia entre las elevaciones ajustadas y las elevaciones simuladas en HEC-RAS a partir de 12 escenarios de caudal, con valores comprendidos entre 0.25 y 3.00 m<sup>3</sup>/s. Las elevaciones ajustadas cubren un intervalo de 8.40 a 9.30 m s. n. m., mientras que las elevaciones simuladas se sitúan entre 8.64 y 9.28 m s. n. m. Los indicadores estadísticos obtenidos fueron ME = +0.10 m, RMSE = 0.13 m y R<sup>2</sup> = 0.78, con discrepancias individuales que se concentran principalmente en el rango de 0.05 a 0.20 m en todo el intervalo de caudales analizado.



**Figura 38**

*Relación elevación-caudal observado y simulado en el punto DMS-12.*

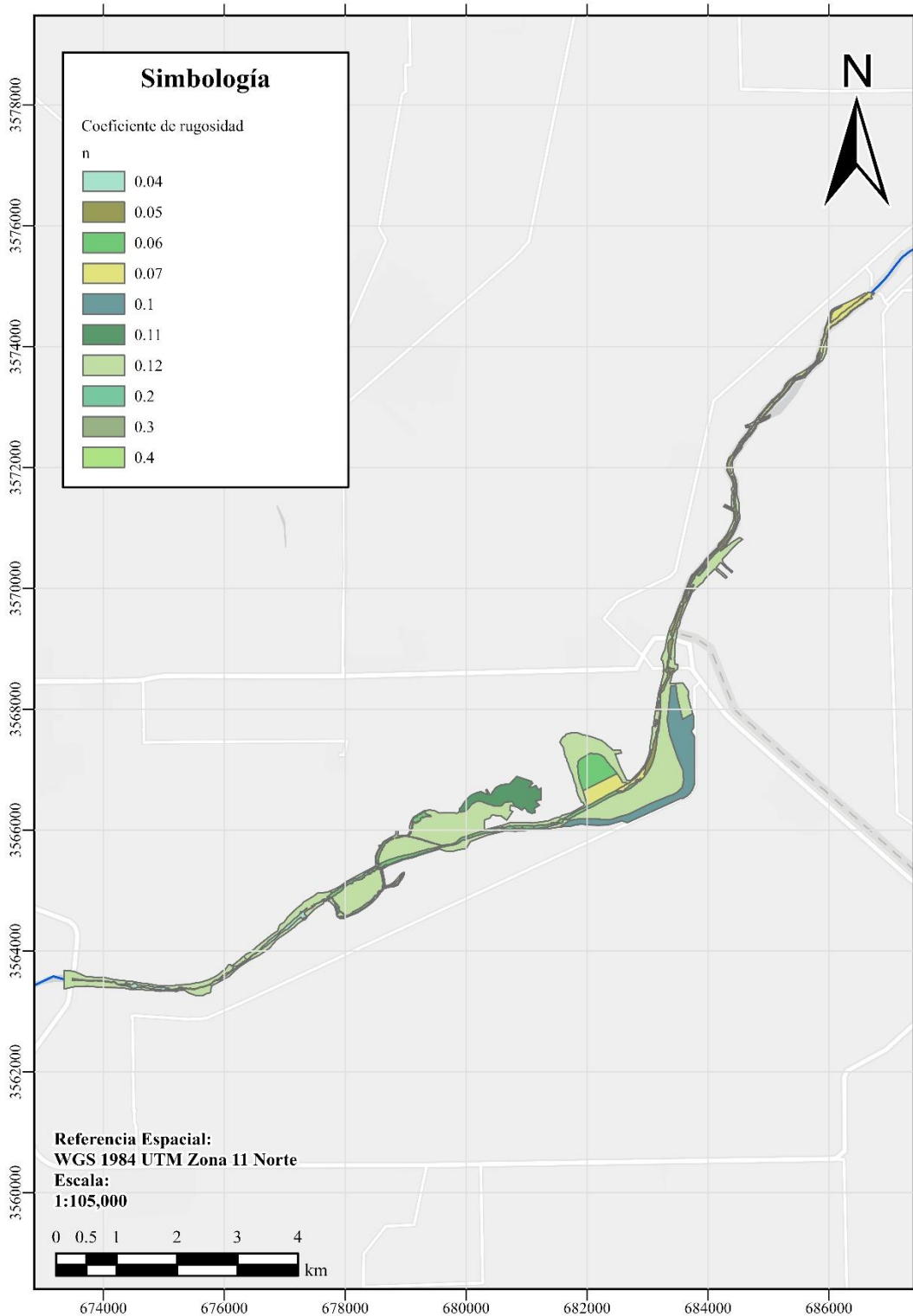


La Figura 39 muestra la distribución espacial de los valores finales del coeficiente de rugosidad de Manning ( $n$ ) asignados al cauce del Río Colorado dentro del dominio de simulación. Esta zonificación es resultado del proceso de calibración hidráulica del modelo bidimensional, en el cual se definieron valores de rugosidad comprendidos entre 0.04 y 0.40, con una concentración predominante en rangos de 0.06 a 0.13, así como valores puntuales de 0.08, 0.10 y 0.11, y valores mayores de 0.20, 0.30 y 0.40 asociados a condiciones hidráulicas específicas. La variabilidad espacial de estos valores refleja las diferencias geomorfológicas e hidráulicas a lo largo del tramo de estudio, relacionadas con cambios en la geometría del cauce, presencia de meandros, zonas de ensanchamiento, vegetación y características del lecho, permitiendo representar de manera más realista la resistencia al flujo en el modelo.



Figura 39

*Distribución de coeficiente de rugosidad.*





### Definición del paso de tiempo

En este estudio se consideró la resolución mínima del mallado en las zonas refinadas del cauce ( $\Delta X = 5$  m) y una velocidad de propagación representativa de  $V_w = 0.3434$  m/s, obtenida de simulaciones preliminares. Adoptando un valor objetivo de  $C = 1.0$ , se obtuvo un paso de tiempo calculado de 9.70 s, por lo que se definió un intervalo de 10 s para las simulaciones. Esta selección es consistente con las recomendaciones del manual de HEC-RAS y permitió mantener la estabilidad numérica del modelo, sin comprometer la eficiencia computacional ni la precisión.

### Propuesta de infraestructura hidráulica

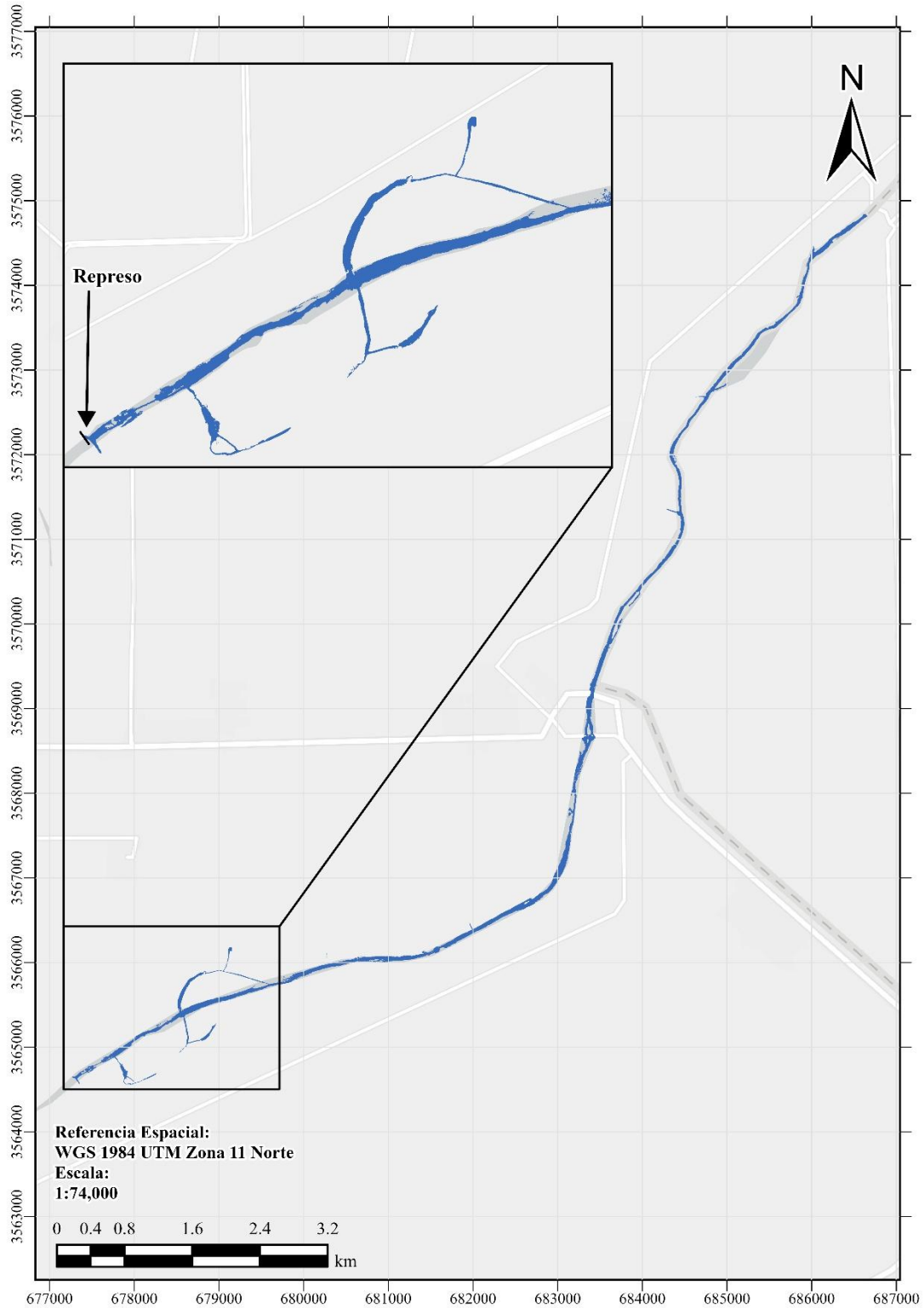
Los mapas de inundación presentados corresponden a la evaluación de distintos escenarios de propuesta de infraestructura hidráulica en el Bordo de Esquivias (WGS 84 / UTM zona 11N: 3,564,621 N, 677,292 E), modelados mediante el esquema bidimensional en HEC-RAS. Cada escenario considera una obstrucción hidráulica a una cota específica, permitiendo analizar su efecto sobre la extensión de la superficie inundada, el tiempo previo al desbordamiento y el volumen de agua descargado, bajo un caudal constante de 1,800 l/s proveniente de Vado Cebollero.

El escenario correspondiente a una obstrucción hidráulica hasta la cota 10.00 m s. n. m. presenta el desbordamiento del sistema a las 83 horas de operación, con un volumen descargado de 537,840 m<sup>3</sup> y una superficie inundada de 743,629.50 m<sup>2</sup>. En el mapa se observa que la mancha de inundación se concentra principalmente a lo largo del cauce principal del Río Colorado, manteniendo una franja relativamente estrecha y continua. En las zonas ampliadas se identifica una propagación limitada hacia meandros adyacentes y depresiones cercanas, particularmente aguas arriba del punto represado, sin una expansión lateral significativa hacia áreas más alejadas del eje del cauce.



**Figura 40**

*Mapa de inundación con obstrucción en el sitio bordo de Esquivias a la cota 10.00 m s. n. m.*



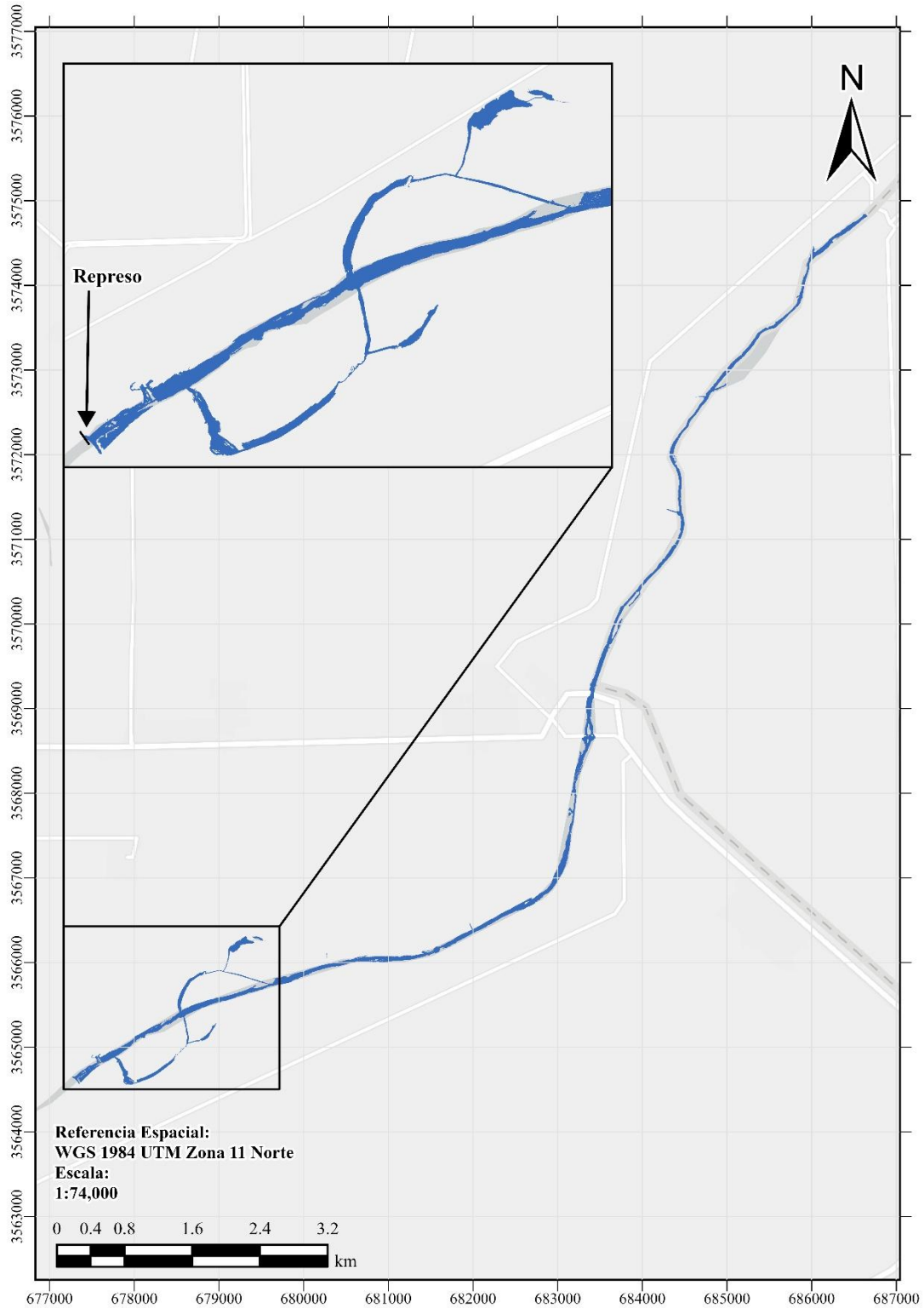


Para el escenario con obstrucción hasta la cota 10.50 m s. n. m., el desbordamiento ocurre a las 98 horas, registrándose un volumen descargado de 635,040 m<sup>3</sup> y una superficie inundada de 844,790.37 m<sup>2</sup>. El mapa asociado muestra una ampliación clara de la mancha de inundación respecto al escenario anterior, con una mayor ocupación lateral del cauce. En los recuadros de detalle se aprecia una activación más evidente de meandros naturales y trazos antiguos del canal, lo que refleja un incremento en la conectividad hidráulica del sistema, especialmente en los tramos próximos al represamiento y en sectores de curvatura marcada del cauce.



**Figura 41**

*Mapa de inundación con obstrucción en el sitio bordo de Esquivias a la cota 10.50 m s. n. m.*



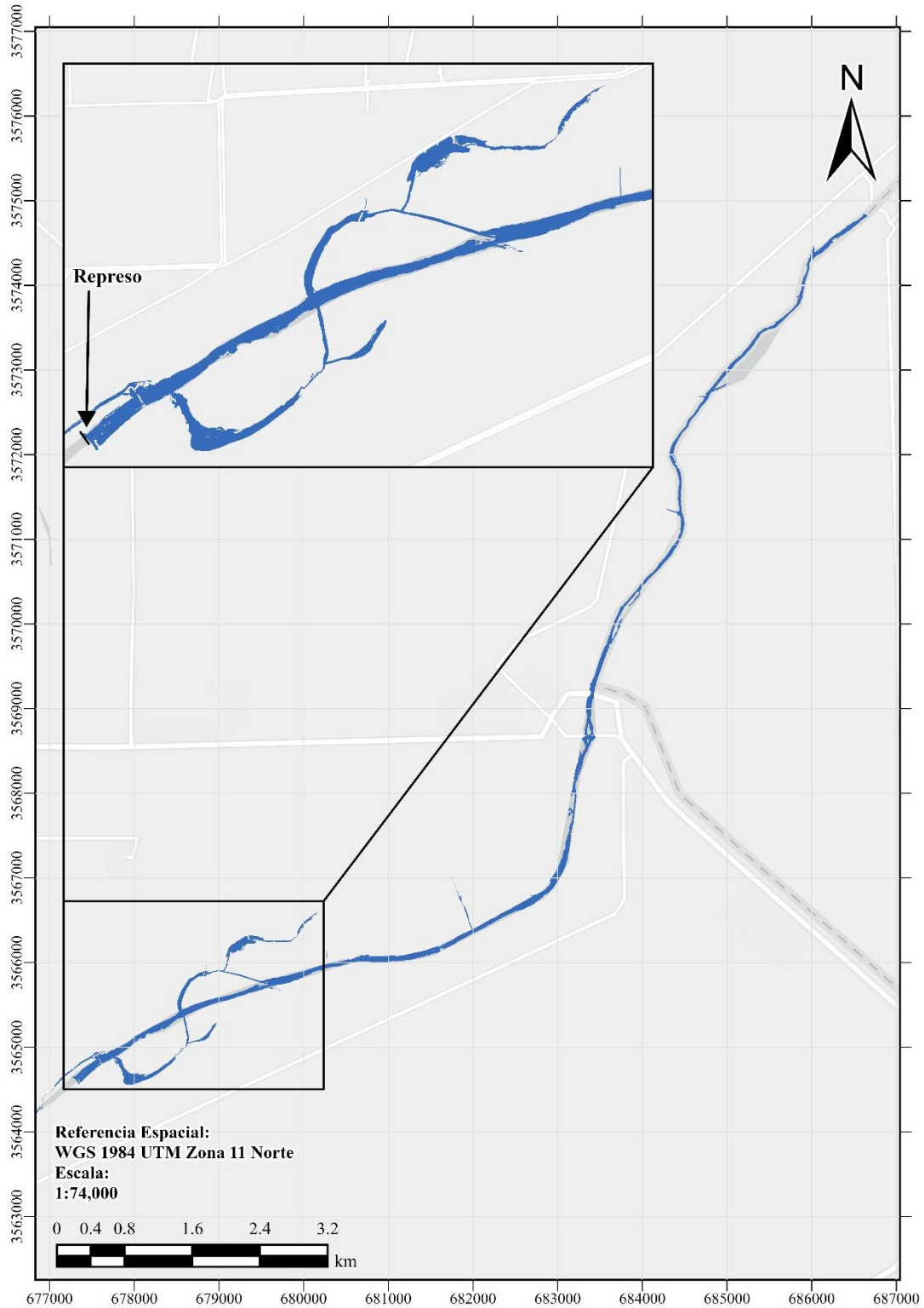


El escenario con obstrucción hasta la cota 11.00 m s. n. m. alcanza el desbordamiento a las 136 horas, con un volumen descargado de 881,280 m<sup>3</sup> y una superficie inundada de 990,929.61 m<sup>2</sup>. En el mapa se identifica una expansión sustancial de la mancha de inundación tanto en sentido longitudinal como transversal al cauce. Las áreas ampliadas evidencian una mayor ocupación de meandros activos, meandros abandonados y planicies laterales, mostrando una continuidad hidráulica más marcada entre el cauce principal y las zonas adyacentes. Esta distribución espacial refleja una mayor acumulación de agua dentro del sistema previo al desbordamiento.



**Figura 42**

*Mapa de inundación con obstrucción en el sitio bordo de Esquivias a la cota 11.00 m s. n. m.*



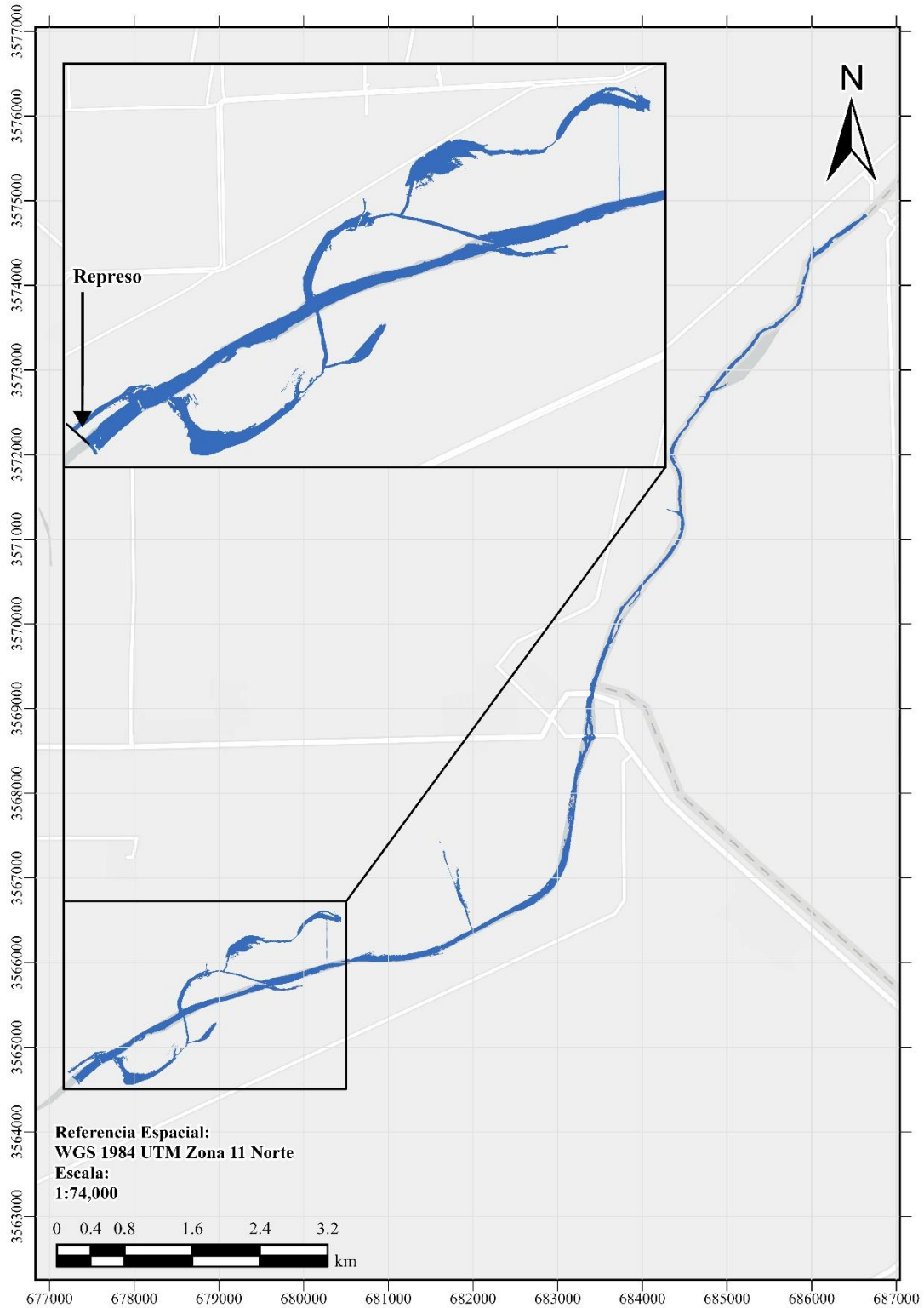


Finalmente, el escenario con obstrucción hasta la cota 11.50 m s. n. m. presenta la mayor respuesta hidráulica entre los casos evaluados, alcanzando el desbordamiento a las 181 horas, con un volumen descargado de 1,172,880 m<sup>3</sup> y una superficie inundada de 1,157,437.73 m<sup>2</sup>. El mapa correspondiente muestra la máxima extensión de la inundación dentro del dominio modelado, con una activación generalizada de meandros, antiguos trazos del cauce y planicies de inundación. En los recuadros ampliados se observa una propagación continua del flujo hacia múltiples ramales meándricos, evidenciando un comportamiento hidráulico completamente desarrollado bajo esta condición de obstrucción.



**Figura 43**

*Mapa de inundación con obstrucción en el sitio bordo de Esquivias a la cota 11.50 m s. n. m.*





## CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

- La presente investigación permitió evaluar de manera integral el comportamiento hidrodinámico del tramo Vado Cebollero–Vado Carranza del Río Colorado mediante el desarrollo e implementación de un modelo hidráulico bidimensional (2D) en HEC-RAS versión 6.6. La integración de información topo-batimétrica, hidrométrica y geométrica obtenida en campo y gabinete dio como resultado una herramienta robusta para analizar la distribución espacial del flujo y la respuesta hidráulica del cauce bajo las condiciones actuales de operación, aportando elementos técnicos para la optimización del manejo del agua con fines ambientales y de restauración ecológica.
- La generación del Modelo Digital de Elevaciones (MDE), a partir de la combinación de información LiDAR de zonas no inundadas y levantamientos topo-batimétricos del cauce y áreas adyacentes, permitió una representación consistente de la geometría del dominio hidráulico. La evaluación comparativa de distintos métodos de interpolación facilitó la selección del método con mejor desempeño, reduciendo los errores en la estimación de elevaciones y fortaleciendo la coherencia geométrica del modelo hidráulico desarrollado.
- El análisis de las series temporales de elevación del espejo de agua y de caudales, tanto en los puntos de entrega como dentro del cauce, permitió caracterizar la dinámica no permanente del flujo durante los periodos de descarga. La instrumentación hidráulica instalada resultó fundamental para la obtención de registros continuos y confiables, así como para la adecuada definición de las condiciones de frontera empleadas en el proceso de modelación.



- La calibración del modelo hidráulico se realizó de manera satisfactoria mediante la comparación entre las elevaciones del espejo de agua simuladas con HEC-RAS y las elevaciones de referencia obtenidas en cuatro puntos de monitoreo estratégicamente distribuidos a lo largo del tramo de estudio. El ajuste iterativo del coeficiente de rugosidad de Manning permitió minimizar las discrepancias entre valores simulados y observados, garantizando una respuesta hidráulica coherente en todo el dominio. Los valores de rugosidad obtenidos reflejan la heterogeneidad hidráulica y morfológica del cauce.
- La evaluación de escenarios con infraestructura hidráulica existente y su localización estratégica dentro del cauce permitió analizar su efecto sobre la extensión de la superficie inundada bajo distintos regímenes de flujo. Los resultados evidencian que la maximización de la superficie inundada puede lograrse mediante intervenciones mínimas sobre el cauce, reduciendo la necesidad de obras adicionales y aprovechando las condiciones hidráulicas actuales, lo que incrementa la eficiencia espacial del uso del agua con fines ambientales y de restauración.



## CAPITULO 8. RECOMENDACIONES

- Se recomienda la actualización periódica de los valores del coeficiente de rugosidad de Manning, considerando que la morfología del cauce del Río Colorado es dinámica y sujeta a cambios derivados de procesos de sedimentación, erosión, variaciones en la cobertura vegetal y modificaciones en la geometría del canal. La revisión sistemática de este parámetro permitiría mantener la representatividad hidráulica del modelo y mejorar la confiabilidad de sus resultados ante futuras condiciones de operación.
- Se sugiere la actualización continua de la información batimétrica, dado que el lecho del cauce experimenta modificaciones temporales que influyen directamente en la distribución del flujo y en la extensión de la superficie inundada. La incorporación de levantamientos batimétricos periódicos fortalecería la calidad del Modelo Digital de Elevaciones y permitiría una mejor interpretación de la respuesta hidráulica del sistema.
- Resulta conveniente ampliar la red de instrumentación hidrométrica, incorporando sensores adicionales de nivel y caudal en tramos estratégicos del cauce y manteniendo registros continuos por periodos más prolongados. Esto permitiría reducir las incertidumbres asociadas a la calibración y validación del modelo hidráulico.
- Se recomienda evaluar escenarios hidrológicos adicionales, que consideren variaciones en los caudales de entrada, condiciones extremas y diferentes esquemas de operación, con el fin de analizar la respuesta del sistema ante situaciones contrastantes y fortalecer los procesos de planeación y toma de decisiones.



- Se sugiere la actualización y mantenimiento del modelo hidráulico como herramienta de gestión, integrándolo a procesos de manejo adaptativo del recurso hídrico con fines ambientales y de restauración ecológica. Su uso continuo permitiría evaluar de forma espacialmente explícita los efectos de nuevas condiciones hidrológicas, operativas o de infraestructura en el Delta del Río Colorado.
- Se recomienda considerar, en futuras aplicaciones del modelo hidráulico desarrollado, la incorporación de procesos hidrológicos actualmente no representados, tales como la evaporación, la infiltración, los retornos agrícolas y la presencia de agua en el dominio como condición inicial. La inclusión de estos componentes permitiría una representación más integral del balance hídrico y del comportamiento hidrodinámico del sistema, particularmente en escalas temporales mayores y bajo condiciones de operación más complejas. Asimismo, su integración contribuiría a reducir incertidumbres en la simulación y a mejorar la capacidad del modelo para reproducir escenarios reales de manejo del agua en el Delta del Río Colorado.
- Finalmente, se recomienda extender el dominio de simulación a tramos adyacentes del Río Colorado, con el objetivo de analizar la conectividad hidráulica a mayor escala y evaluar efectos acumulativos derivados del manejo del agua y de la infraestructura existente, fortaleciendo así la visión integral del sistema fluvial.



## BIBLIOGRAFÍA

- Adler, R. W. (2007). *Restoring Colorado River ecosystems: a troubled sense of immensity*. Island Press.
- Alzahrani, A. S. (2017). *Application of two-dimensional hydraulic modeling in riverine systems using HEC-RAS* [University of Dayton].
- Barnes, H. H. (1967). *Roughness characteristics of natural channels*. US Government Printing Office.
- Ben Meftah, M. (2022). Flow hydrodynamic in open channels: A constantly evolving topic. In (Vol. 14, pp. 4120): MDPI.
- Berggren, J. (2018). Utilizing sustainability criteria to evaluate river basin decision-making: the case of the Colorado River Basin. *Regional environmental change*, 18(6), 1621-1632.
- Beven, K. J. (2012). *Rainfall-runoff modelling: the primer*. John Wiley & Sons.
- Bladé Castellet, E. (2005). *Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado con esquemas en volúmenes finitos en una y dos dimensiones*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Brunner, G. W. (2023). *HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic User's Manual. Version 6.3*.
- Carrillo-Guerrero, Y., Glenn, E. P., & Hinojosa-Huerta, O. (2013). Water budget for agricultural and aquatic ecosystems in the delta of the Colorado River, Mexico: Implications for obtaining water for the environment. *Ecological engineering*, 59, 41-51.

- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2002). Thermodynamics: an engineering approach. *Sea*, 1000(8862), 287-293.
- Chadwick, A., Morfett, J., & Borthwick, M. (2013). *Hydraulics in civil and environmental engineering*. Crc Press.
- Chanes-Martínez, J. J., González-Escobar, M., Suárez-Vidal, F., & Gallardo-Mata, C. G. (2014). Structural geometry of a sector of the Colorado River delta, Baja California, Mexico, based on seismic reflections. *Pure and applied geophysics*, 171(7), 1107-1127.
- Chanson, H. (2004). *Hydraulics of open channel flow*. Elsevier.
- Chaudhry, M. H. (2008). *Open-channel flow* (Vol. 523). Springer.
- Chen, D., & Chen, H. W. (2013). Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: An example for 1901–2010. *Environmental Development*, 6, 69-79.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill.
- CILA. (1944). *Tratado sobre Distribución de aguas internacionales entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América*.
- CILA. (2000). *Marco Conceptual entre México y Estados Unidos para el Desarrollo de Estudios que Permitan Emitir Recomendaciones Respecto a la Ecología Ribereña y del Estuario del Tramo Limitrofe del Río Colorado y su Delta*.
- CILA. (2010). *Acta 317. Marco conceptual para las conversaciones México-Estados Unidos, relativas a las acciones de cooperación sobre el Río Colorado*.
- CILA. (2012). *Acta 319. Medidas Interinas de Cooperación Internacional en la Cuenca del Río Colorado hasta el 2017 y Ampliación de las Medidas de Cooperación del Acta*

318, para atender los prolongados efectos de los sismos de abril de 2010 en el Valle de Mexicali, Baja California.

CILA. (2017). *Acta 323: Ampliación de las Medidas de Cooperación y Adopción de un Plan Binacional de Contingencia ante la escasez de Agua en la Cuenca del Río Colorado.*

Clewell, A., Aronson, J., & Winterhalder, K. (2004). Principios de SER International sobre la restauración ecológica. *Sociedad Internacional para la restauración ecológica. Tucson, Arizona, Estados Unidos de América.*

Cohen, M., Christian-Smith, J., & Berggren, J. (2013). Water to supply the land. *Pac. Inst.*

CONAGUA. (2021). *Programa Hídrico Regional 2021-2024 Región Hidrológico-Administrativa I Península De Baja California.*

CONAGUA. (2024). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero valle de Mexicali (0210), estado de Baja California

CONANP. (2007). Programa de Conservación y Manejo Reserva de la Biosfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado.

Cortez Lara, A. (2011). Gestión y manejo del agua: el papel de los usuarios agrícolas del Valle de Mexicali. *Problemas del desarrollo*, 42(167), 71-95.

Cowan, W. L. (1956). Estimating hydraulic roughness coefficients. *Agricultural engineering*, 37(7), 473-475.

Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología subterránea* (Vol. 1). Omega Barcelona.

Dingman, S. L. (2015). *Physical hydrology*. Waveland press.

Dunne, T., & Leopold, L. B. (1978). *Water in environmental planning*. Macmillan.

Dyson, M., Bergkamp, G., & Scanlon, J. (2003). Flow: The essentials of environmental flows. *IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK*, 20.

- Ezcurra, E., Felger, R. S., Russell, A. D., & Equihua, M. (1988). Freshwater islands in a desert sand sea: the hydrology, flora and phytogeography of the Gran Desierto oases of northwestern Mexico.
- Fattorelli, S., & Fernández, P. (2011). *Diseño Hidrológico*, 2º Edición en español, WASA-GN. *Francia*.
- Flessa, K. W., Glenn, E. P., Hinojosa-Huerta, O., de la Parra-Rentería, C. A., Ramírez-Hernández, J., Schmidt, J. C., & Zamora-Arroyo, F. A. (2013). Flooding the Colorado River delta: A landscape-scale experiment. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 94(50), 485-486.
- García-Salas, J.-C., & Chocat, B. (2009). La modelación en el campo de la Ingeniería Hidráulica: Reflexiones y discusión sobre las causas de error y sus consecuencias. *Aqua-LAC*, 1(1), 52-62.
- García Arvizu, E. (2019). Determinación del caudal ecológico para el río Hardy.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gerlak, A. K., Zamora-Arroyo, F., & Kahler, H. P. (2013). A delta in repair: Restoration, binational cooperation, and the future of the Colorado River Delta. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 55(3), 29-40.
- Giles, R. V. (1991). *Mecánica de los Fluidos e Hidráulica*.
- Glenn, E. P., Zamora-Arroyo, F., Nagler, P. L., Briggs, M., Shaw, W., & Flessa, K. (2001). Ecology and conservation biology of the Colorado River delta, Mexico. *Journal of arid Environments*, 49(1), 5-15.
- GobBC. (2022). *Programa Sectorial de Desarrollo Agropecuario y Rural 2022-2027*.

- Gómez-Sapiens, M. M., Jarchow, C. J., Flessa, K. W., Shafroth, P. B., Glenn, E. P., & Nagler, P. L. (2020). Effect of an environmental flow on vegetation growth and health using ground and remote sensing metrics. *Hydrological processes*, 34(8), 1682-1696.
- Guth, P., Van Niekerk, A., Grohmann, C., Muller, J., Hawker, L., Florinsky, I., Gesch, D., Reuter, H., Herrera-Cruz, V., & Riazanoff, S. (2021). Digital Elevation Models: Terminology and Definitions, *Remote Sens.*, 13, 3581. In.
- Hi-Target. (2019). V60 SISTEMA GNNS RTK. In.
- Hinojosa-Huerta, O., Briggs, M., Carrillo-Guerrero, Y., Glenn, E. P., Lara-Flores, M., & Román-Rodríguez, M. (2005). Community-based restoration of desert wetlands: the case of the Colorado River Delta. In: Ralph, C. John; Rich, Terrell D., editors 2005. Bird Conservation Implementation and Integration in the Americas: Proceedings of the Third International Partners in Flight Conference. 2002 March 20-24; Asilomar, California, Volume 1 Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-191. Albany, CA: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station: p. 637-645,
- Hinojosa-Huerta, O., Nagler, P. L., Carrillo-Guerrero, Y. K., & Glenn, E. P. (2013). Effects of drought on birds and riparian vegetation in the Colorado River Delta, Mexico. *Ecological engineering*, 51, 275-281.
- Hinojosa Rivera, M., & Reyes Melo, M. E. (2001). La rugosidad de las superficies: Topometría. *Ingenierías*, 4(11), 27-33.
- Holl, K. D., & Aide, T. M. (2011). When and where to actively restore ecosystems? *Forest ecology and management*, 261(10), 1558-1563.
- Holling, C. S. (1978). *Adaptive environmental assessment and management*. John Wiley & Sons.

- Huh, O. K., Coleman, J. M., & Braud, D. (2007). The Colorado River Delta: regional geomorphology and sedimentary processes. *Journal of Coastal Research*, 23(6), 1355-1358.
- Hwang, N. H., Houghtalen, R. J., Akan, A. O., & Hwang, N. H. (2010). *Fundamentals of hydraulic engineering systems*. Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.
- IMTA. (2007). *Monografía del río Colorado 2007*.
- IMTA. (2020). EL AGUA EN EL VALLE DE MEXICALI, BAJA CALIFORNIA: Origen, uso y destino
- ISO. (2021). ISO 748: Hydrometry — Measurement of liquid flow in open channels — Velocity area methods using point velocity measurements. In: International Standards Organization.
- Köppen, W., & Geiger, R. (1930). *Handbuch der klimatologie* (Vol. 1). Gebrüder Borntraeger Berlin.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated.
- Lomeli-Banda, M., & Ramírez-Hernández, J. (2014). Variables clave para mediciones de flujo superficial en el delta del Río Colorado utilizando un Velocímetro Doppler Acústico. *AVANCES EN INVESTIGACION AMBIENTAL EN LA UABC*, 36.
- Maidment, D. R. (1993). *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill.
- Mays, L. W. (2019). *Water resources engineering*. John Wiley & Sons.
- Medellín-Azuara, J., Lund, J. R., & Howitt, R. E. (2007). Water supply analysis for restoring the Colorado River Delta, Mexico. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 133(5), 462-471.

- Menz, M. H., Dixon, K. W., & Hobbs, R. J. (2013). Hurdles and opportunities for landscape-scale restoration. *Science*, 339(6119), 526-527.
- Meyer, J., & Wallace, J. (2001). Lost linkages and lotic ecology: rediscovering small streams.
- Meyers, C. J. (1966). The Colorado River. *Stanford Law Review*, 1-75.
- Mott, R. L. (2006). *Applied fluid mechanics* (Vol. 1). Pearson Educación.
- Nagler, P., Sall, I., Barreto-Muñoz, A., Gómez-Sapiens, M., Nouri, H., Chavoshi Borujeni, S., & Didan, K. (2022). Effect of restoration on plant greenness and water use in relation to drought in the riparian corridor of the Colorado River delta. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 58(5), 746-784.
- Naiman, R. J., & Decamps, H. (1997). The ecology of interfaces: riparian zones. *Annual review of Ecology and Systematics*, 28(1), 621-658.
- Naiman, R. J., Decamps, H., & Pollock, M. (1993). The role of riparian corridors in maintaining regional biodiversity. *Ecological applications*, 3(2), 209-212.
- NASEM. (2017). *Effective monitoring to evaluate ecological restoration in the Gulf of Mexico*. National Academies Press.
- Nelson, S. M., Ramírez-Hernández, J., Rodríguez-Burgueño, J. E., Milliken, J., Kennedy, J. R., Zamora-Arroyo, F., Schlatter, K., Santiago-Serrano, E., & Carrera-Villa, E. (2017). A history of the 2014 Minute 319 environmental pulse flow as documented by field measurements and satellite imagery. *Ecological engineering*, 106, 733-748.
- Novak, P., Guinot, V., Jeffrey, A., & Reeve, D. E. (2018). *Hydraulic modelling—an introduction: principles, methods and applications*. CRC Press.
- ONU. (2019). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2019*.
- ONU. (2022). *Desafíos Globales: Agua*. <https://www.un.org/es/global-issues/water>

- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences*, 11(5), 1633-1644.
- Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., & Stromberg, J. C. (1997). The natural flow regime. *BioScience*, 47(11), 769-784.
- Quezada Ayala, N. (2007). Simulación hidráulica unidimensional del Río Colorado en el tramo Puente ferroviario-Vado Carranza, Mexicali, BC.
- Rivera-Torres, M., Gerlak, A. K., & Jacobs, K. L. (2021). Lesson learning in the Colorado River basin. *Water International*, 46(4), 567-577.
- Rodríguez-Burgueño, J., & Ramírez-Hernández, J. (2014). Monitoreo hidrológico del flujo pulso: Río Colorado, México. *AVANCES EN INVESTIGACION AMBIENTAL EN LA UABC*, 36.
- Salcedo Peredia, A. T. (2016). *Simulación Hidráulica del Flujo Pulso (2014) en el Corredor Ripario del Delta del Río Colorado*. Universidad Autónoma de Baja California].
- Singh, V. P., & Woolhiser, D. A. (2002). Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of hydrologic engineering*, 7(4), 270-292.
- SonTek. (2015). *FlowTracker2*.
- SonTek. (2022). *RiverSurveyor S5/M9 System Manual Software Version 4.2 Firmware Version 4.10*
- Sotelo Ávila, G. (2002). *Hidráulica de canales*. Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- Subramanya, K. (2009). *Flow in open channels*. Tata McGraw-Hill.

- Summers, M., Holman, I., & Grabowski, R. (2015). Adaptive management of river flows in Europe: a transferable framework for implementation. *Journal of Hydrology*, 531, 696-705.
- Sykes, G. (1937). The Colorado River Delta. Publication no. 460. In: Carnegie Institution of Washington, DC.
- Szymkiewicz, R. (2010). *Numerical modeling in open channel hydraulics* (Vol. 83). Springer Science & Business Media.
- Thorne, C., Hey, R., & Newson, M. (1997). *Applied fluvial geomorphology for river engineering and management*. John Wiley and Sons Ltd.
- Topcon. (2016). *GR-5 Operator's manual*.
- Valenzuela Sarabia, M. R. (2022). *Análisis hidrológico de caudales ambientales para el hábitat ribereño de la zona limítrofe del Río Colorado* [Universidad Autónoma del Estado de Baja California].
- Varady, R. G., Zuniga-Teran, A. A., Garfin, G. M., Martín, F., & Vicuña, S. (2016). Adaptive management and water security in a global context: definitions, concepts, and examples. *Current opinion in environmental sustainability*, 21, 70-77.
- Viessman, W., & Lewis, G. L. (1996). Introduction to hydrology. *4th edition*.
- Webb, J. A., Watts, R. J., Allan, C., & Warner, A. T. (2017). Principles for monitoring, evaluation, and adaptive management of environmental water regimes. In *Water for the Environment* (pp. 599-623). Elsevier.
- White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics 7th Edition*.
- WMO. (2012). International glossary of hydrology. *World meteorological organization Geneva Switzerland*, 471.

- Xiao, M., Udall, B., & Lettenmaier, D. P. (2018). On the causes of declining Colorado River streamflows. *Water Resources Research*, 54(9), 6739-6756.
- Zamora-Arroyo, F., Pitt, J., Cornelius, S., Glenn, E., Hinojosa-Huerta, O., Moreno, M., García, J., Nagler, P., de la Garza, M., & Parra, I. (2005). Conservation priorities in the Colorado river delta, Mexico and the United States. *Tucson, AZ: Sonoran Institute/Environmental Defense/University of Arizona/Pronatura Noroeste/CIAD/WWF*.
- Žic, E., Vranješ, M., & Ožanić, N. (2009). Methods of roughness coefficient determination in natural riverbeds. *Proceedings of the International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, Ohrid, Macedonia.*