

# INFORME INA

ANÁLISIS DE ANEGAMIENTOS POR LLUVIA  
UTILIZANDO MODELACIÓN HIDRODINÁMICA 1D/2D  
EN UNA ZONA URBANA DEFENDIDA POR  
TERRAPLENES.

**INFORME FINAL**

**Investigación científica aplicada**  
2024/ 2025

OCTUBRE de 2025

## **AUTORIDADES INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA**

**PRESIDENTE (A/C del despacho)**

Lic. Bernardo Bartolomé HEREDIA (a/c del despacho)

**GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS**

Ing. Fernando José ZÁRATE

**SUBGERENTE CENTRO REGIONAL LITORAL**

Ing. Jorge Collins (a/c del despacho)

## **PERSONAL PARTICIPANTE EN LA REALIZACIÓN DEL SIGUIENTE TRABAJO**

**SUBGERENCIA CENTRO REGIONAL LITORAL**

Ing. María Rosana MAZZON

Téc. Gerardo BARRERA (contrato año 2024)

## ANÁLISIS DE ANEGAMIENTOS POR LLUVIA UTILIZANDO MODELACIÓN HIDRODINÁMICA 1D/2D EN UNA ZONA URBANA DEFENDIDA POR TERRAPLENES.

### RESUMEN.

El estudio analiza los anegamientos pluviales en el área defendida por terraplenes en las localidades de San José del Rincón y Colastiné Norte (Santa Fe), mediante el uso combinado de modelos hidrológicos hidráulicos (SWMM) e hidráulicos bidimensionales (HEC-RAS 2D).

La zona, de 18,29 km<sup>2</sup>, se encuentra dentro del valle aluvial del Río Paraná y está circunvalada por un terraplén de más de 21 km de perímetro, lo que limita el drenaje natural y aumenta la dependencia de las estaciones de bombeo. Presenta alta vulnerabilidad hídrica debido a la interacción entre escurrimientos pluviales internos y niveles elevados del río, que requieren el uso de estaciones de bombeo para evacuar el agua y prevenir anegamientos.

Toma como referencia el evento extremo de marzo-abril 2007, donde precipitaron 566 mm en un mes, con un pico de 369 mm en 5 días, coincidiendo con un nivel alto del Paraná (5,5–6 m) que impidió la descarga por gravedad. Se desarrolló una modelación hidrodinámica combinada 1D/2D para evaluar el desempeño del sistema de bombeo y caracterizar las áreas críticas ante eventos pluviales de mediana y alta recurrencia, con duración de varios días. Para ello, se emplearon los modelos SWM (USACE) y HEC-RAS v6.1, simulando condiciones de flujo no permanente

La capacidad de bombeo en ese momento (6.000–10.000 m<sup>3</sup>/h) resultó insuficiente frente a un volumen precipitado estimado en 6,64 hm<sup>3</sup>, provocando el anegamiento de hasta el 65 % del área interna del terraplén (1800 ha) con niveles de cota hasta 15 m IGN.

Los resultados permiten identificar las zonas inundadas, los tiempos de permanencia del agua y los volúmenes a gestionar, proporcionando información clave para la planificación y mitigación de riesgos de anegamientos en áreas urbanas defendidas por terraplenes.

**Descriptor temático:** Eventos extremos, Modelación hidrodinámica, Anegamientos, Gestión de bombeo.

**Descriptor geográfico:** Área metropolitana ciudad de Santa Fe

**ÍNDICE**

1. INTRODUCCIÓN ..... 4

2. OBJETIVO ..... 5

3.-METODOLLOGIA..... 5

4.- RECOPIACION Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES..... 6

    4.1. Estudios de diagnóstico y riesgo hídrico ..... 6

    4.2.- Estudios de onfraestructura y obras Hídricas ..... 7

    4.3.- Información Hidrometeorologica y Geoespacial ..... 7

5.- DESCRIPCION SISTEMA HÍDRICO ..... 8

6.- DESCRIPCIÓN EVENTO EXTREMO DEL AÑO 2007 ..... 12

7.- MODELACIÓN MATEMÁTICA ..... 15

    7.1.- Implementación Modelo SWMM ..... 16

    7.2.- Implementación Modelo HEC-RAS ..... 25

8.- RESULTADOS DE LA MODELACIÓN BIDIMENSIONAL. EXTENSION Y PERMANENCIA DE ANEGAMIENTOS..... 31

9.- CONSIDERACIONES FINALES..... 34

## 1. INTRODUCCIÓN

Con el correr de los años la ciudad de Santa Fe y las zonas aledañas fueron avanzando sobre los terrenos inundables y espejos de agua que forma el valle de inundación del río Paraná, sin atender a los condicionamientos morfológicos del relieve del suelo y particularmente esta zona presenta un crecimiento urbanístico significativo iniciado a partir de la década de 1990 a lo largo de la ruta provincial N° 1, figura 1.

El INA, en esta zona, realizó el Plan Director de los Drenajes Pluviales de la Zona Interna del Terraplén de la Costa donde el objetivo general del proyecto consistió en la generación de una herramienta de planificación que permita evaluar, identificar acciones, obras y dar un orden de prioridad para mitigar los efectos frente a eventos pluviales.

## 2. OBJETIVO

Representar el evento hidro-meteorológico (fenómeno de precipitaciones pluviales con algunas características muy por encima de los registros ordinarios) ocurrido en abril de 2007 mediante modelación hidrodinámica 1D/2D, con el propósito de evaluar la performance de las tecnologías utilizadas (MDT/MDE y modelos matemáticos) e identificar las áreas y zonas más críticas ante lluvias de mediana y alta recurrencia.

### Objetivos Específicos:

- 1.- Recolectar y procesar la información hidrometeorológica, topográfica e hidrológica necesaria para la configuración del modelo.
2. - Configurar y calibrar los modelo hidrodinámico 1D/2D, SWMM Y HEC-RAS, utilizando datos observados del evento de 2007.
3. - Identificar áreas y zonas con mayor riesgo de inundación o afectación ante dicho escenario.

### 3. METODOLOGIA

La metodología aplicada se estructuró en dos etapas principales:

**a. Cálculo de caudales del evento 2007:**

Se estimaron los caudales generados por el evento pluvial de 2007 —los cuales debían ser conducidos, almacenados y posteriormente bombeados— para las **14 áreas de aporte** asociadas a reservorios y estaciones de bombeo (Figura 2 y Tabla 1). Para ello se utilizó el **modelo SWMM**, considerando la red pluvial, los reservorios de retención y la capacidad instalada de bombeo.

**b. Modelación hidrodinámica bidimensional (2D):**

Se implementó el **modelo HEC-RAS 2D** con el objetivo de identificar las áreas anegadas, determinar las zonas más comprometidas y calcular los tiempos de permanencia de la inundación. Esto servirá de base para evaluar diferentes escenarios y esquemas de bombeo con el fin de minimizar la duración de los anegamientos.

### 4. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

#### 4.1. Estudios de diagnóstico y riesgo hídrico

Diversos estudios previos han abordado la caracterización hidráulica e hidrogeológica del área de Colastiné Norte, Santa Fe y Rincón, proporcionando información para la planificación y gestión del riesgo hídrico:

- **Diagnóstico de la calidad del acuífero de explotación y análisis de excesos hídricos en Colastiné Norte (INA, 2003)**

Evaluación integral del acuífero y de los excesos hídricos de la zona, identificando la interacción entre el recurso subterráneo y los eventos de anegamiento superficial.

- **Delimitación de Áreas de Riesgo Hídrico en Santa Fe (INA, 2006)**

Actualización del estudio de 1992, incorporando cartas de riesgo hídrico basadas en crecidas históricas y de diseño estadístico. Este trabajo permite identificar las áreas de mayor vulnerabilidad frente a eventos de inundación.

- **Plan de Ordenamiento Hídrico de San José del Rincón – Etapa 1 (2007-2009)**

Establece la priorización de obras hidráulicas y define regulaciones para la ocupación futura del territorio, contribuyendo a una gestión integrada de riesgos y recursos hídricos.

- **Estudios de inundabilidad particulares**

Complementan la información regional mediante evaluaciones puntuales, aportando datos específicos sobre la dinámica de escurrimiento y niveles de inundación en sectores críticos.

#### 4.2. Estudios de infraestructura y obras Hídricas

Se han desarrollado diversos proyectos e investigaciones orientados a mejorar la gestión del agua y la protección de la infraestructura urbana y vial:

- **Evaluación del estado y grado de protección del Sistema de Defensa de Santa Fe y Recreo (INA – MASPMA, 2009)**

Determina la capacidad estructural y de protección de los sistemas defensivos frente a crecidas, incluyendo los anillos de la Ruta Provincial N° 1.

- **Proyectos de canales a cielo abierto en Colastiné Norte (calle Los Jazmines, Las Moras y Los Algarrobos)**

Diseños de infraestructura de drenaje destinados a mejorar la evacuación de excedentes pluviales en zonas urbanizadas.

- **Proyecto de la Ruta Provincial N° 1 – Tramo RN 168, San José del Rincón (Dirección Provincial de Vialidad, 2011)**

Estudio del impacto hidráulico de la infraestructura vial y propuesta de obras complementarias para mitigar riesgos de inundación.

- **Reformulación del procedimiento constructivo de la Ruta Provincial N° 1 (INCOCIV, 2013)**

Ajustes en el diseño y construcción de la obra vial para mejorar la respuesta hidráulica y reducir la vulnerabilidad frente a eventos de escurrimiento extremo.

#### 4.3. Información Hidrometeorológica y Geoespacial

La integración de información pluviográfica, cartográfica y fotográfica es fundamental para el análisis y modelado hidráulico:

- **Curva Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) – Ciudad de Paraná (INTA):**

Proporciona parámetros de diseño de lluvias de distintos períodos de retorno, esenciales para el dimensionamiento de obras hidráulicas.

- **Datos pluviográficos del evento de marzo/abril de 2007 (CIM - Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - FICH):**

Permite calibrar modelos hidrológicos y evaluar el comportamiento de la red de drenaje durante precipitaciones extremas.

- **Imágenes satelitales (Google) y fotografías aéreas:**

Facilitan la identificación de usos de suelo, áreas bajas, cursos de agua y posibles obstrucciones al escurrimiento superficial.

## 5. DESCRIPCIÓN SISTEMA HÍDRICO<sup>1</sup>

El estudio cubre una superficie de 18.29 Km<sup>2</sup>, se encuentra inserta en dos distritos, uno correspondiente a la Municipalidad de Santa Fe y el otro a la Municipalidad de San José del Rincón.

El área de estudio se ubica dentro del valle aluvial del río Paraná y está completamente circunvalada por un terraplén de defensa de más de 21 km de perímetro. Su extensión sigue una dirección suroeste–noreste y es atravesada en su parte central por la Ruta Provincial Nº 1, la cual se encuentra sobre-elevada respecto al terreno circundante.

Los escurrimientos pluviales se orientan principalmente hacia el este, con descarga en la Laguna Setúbal, y hacia el oeste, en dirección al Arroyo Ubajay y al río Colastiné. Este drenaje se realiza a través de un sistema de canales que conducen los caudales hacia los reservorios de las estaciones de bombeo.

Cuando el nivel del río Paraná se encuentra elevado, los escurrimientos internos generados por las lluvias deben evacuarse de manera forzada mediante bombeo. Esta condición incrementa la vulnerabilidad hídrica del área, haciéndola especialmente susceptible a anegamientos de origen tanto fluvial como pluvial.

---

<sup>1</sup> Plan Director de Drenajes Pluviales Zona Interna Terraplén de la Costa (INA 2019)

**Figura 1:** Área de estudio (distrito Colastiné y Rincón  
Área metropolitana de la ciudad de Santa Fe)



*Se identifican en el área tres amenazas que dan origen a problemas de anegamientos<sup>2,3</sup>.*

a) Crecidas del Nivel del Río

Amenaza relacionada con las inundaciones históricamente ligadas a los niveles que alcanza el río Paraná en la zona.

b) Ascenso del Nivel Freático

Esta es otra de las amenazas a la que está sometida la zona, y está íntimamente ligada a los niveles del río. Esta amenaza incrementó su grado de riesgo potencial a partir del aumento en la ocupación del suelo en zonas bajas.

c) Precipitaciones Intensas

Dentro de los regímenes normales de lluvia, en ésta zona se presentan tormentas de tipo convectiva que alcanzan intensidades importantes y que afectan fundamentalmente a las zonas más urbanizadas.

*Desde el punto de vista de las vulnerabilidades, se distinguen distintos factores fundamentalmente ligados a la ocupación del suelo.*

a) Urbanización sin Planificación ni Infraestructura

El efecto urbanizador (aumento de superficies impermeables y del tránsito), superó ampliamente las posibilidades técnicas y operativas de planificación del distrito.

b) Exposición a Inundaciones Fluviales.

En toda esta zona, la exposición de las viviendas a las inundaciones fluviales fue medianamente tenida en cuenta por los asentamientos históricos (se ubicaban en las zonas más altas). Esta prevención se dejó de lado a partir de la construcción de los terraplenes de defensa (que dan una falsa sensación de seguridad porque el riesgo hídrico sigue presente).

c) Impermeabilización y Relleno de Bajos Naturales

Dadas las características geomorfológicas de la zona, los bajos adquieren singular importancia en la retención y almacenamiento temporario de los excesos pluviales. Esta característica se ve acentuada

---

<sup>2</sup> Plan Director de Drenajes Pluviales Zona Interna Terraplén de la Costa (INA 2019)

<sup>3</sup> Bianchi, H. (2017). Gestión Integrada de Inundaciones en la Zona Interior del Terraplén de la Costa, Area Metropolitana de la ciudad de Santa Fe, Argentina. Tesis Maestría en Gestión integrada de Recursos Hídricos (FICH).

en las zonas que se encuentran dentro del anillo de defensa, toda vez que, en épocas de crecidas del río, la capacidad de evacuación de precipitación.

Dentro de este contexto y agravando aún más esta problemática, hay que destacar la creciente ocupación de terrenos bajos que se han extendido hasta espacios destinados a reservorios; y en algunos casos sobre la misma defensa.

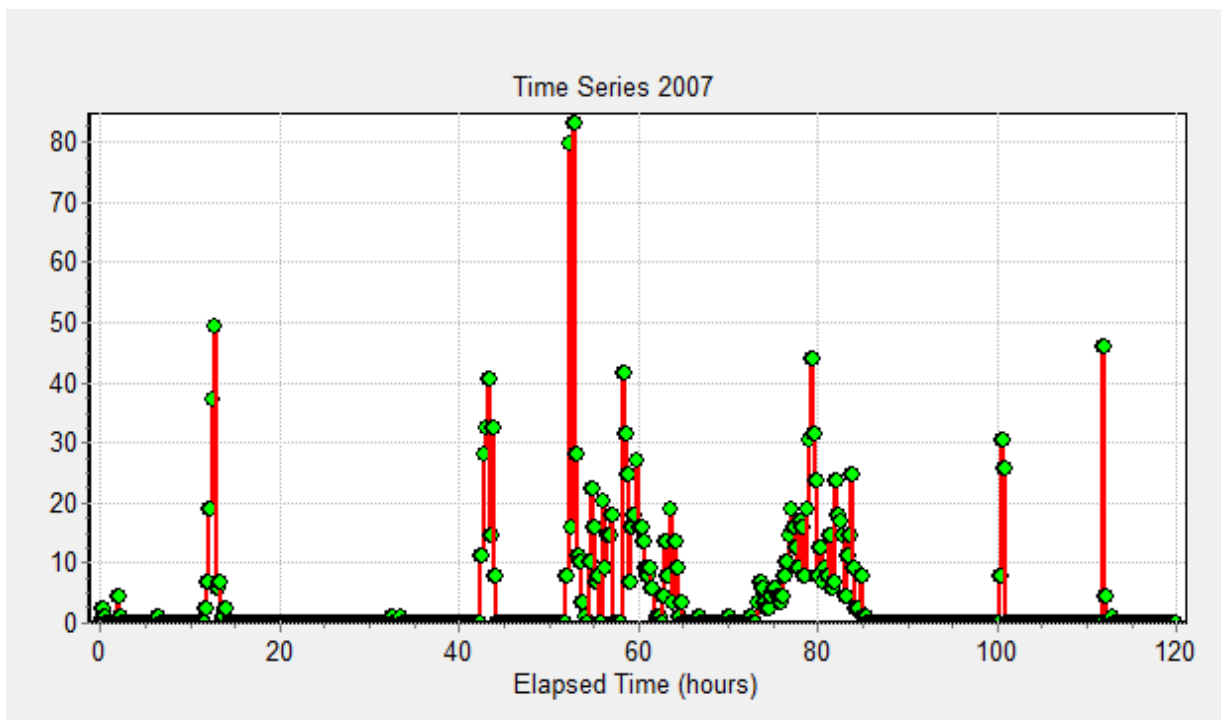
d) Aumento de Pozos Negros

La presencia de pozos negros obra como recarga en la freática dando como resultado una elevación del nivel de la misma. Esta característica hace que los volúmenes de agua provenientes de precipitaciones tengan un tiempo mayor de permanencia en superficie.

**6. DESCRIPCIÓN EVENTO EXTREMO DEL AÑO 2007**

En el año 2007 en la región de Santa Fe, y gran parte de la provincia, se dio un fenómeno de precipitaciones pluviales con algunas características muy por encima de los registros ordinarios para este tipo de eventos. Durante el mes de marzo precipitaron más de 566.4 mm, concentrando los últimos 369 mm entre el 26 y 30 de Marzo, figura 2.

**Figura 2:** Evento de 5 días en Marzo-Abril del año 2007



A su vez el Río Paraná en el hidrómetro del Puerto Santa Fe, registraba para esos días niveles de alrededor de los 5.5 – 6 metros (cota 13.70 – cota 14.20 m IGN), esta situación y en conjunto con la

precipitación ocurrida, configuró una situación hidrometeorológica de extrema gravedad. Sin considerar la distribución areal, el volumen de agua precipitado en los últimos días de marzo, en todo el anillo de defensa, fue de 6.64 hm<sup>3</sup> (369 mm en 1800 has).<sup>4</sup>

Debido a la imposibilidad del sistema de regular el volumen acumulado por medios naturales —ya que la infiltración y la evaporación estaban prácticamente anuladas por el elevado nivel freático y las precipitaciones antecedentes—, y ante la imposibilidad de descargar por gravedad debido a los altos niveles del río, la evacuación debió realizarse exclusivamente mediante estaciones de bombeo.

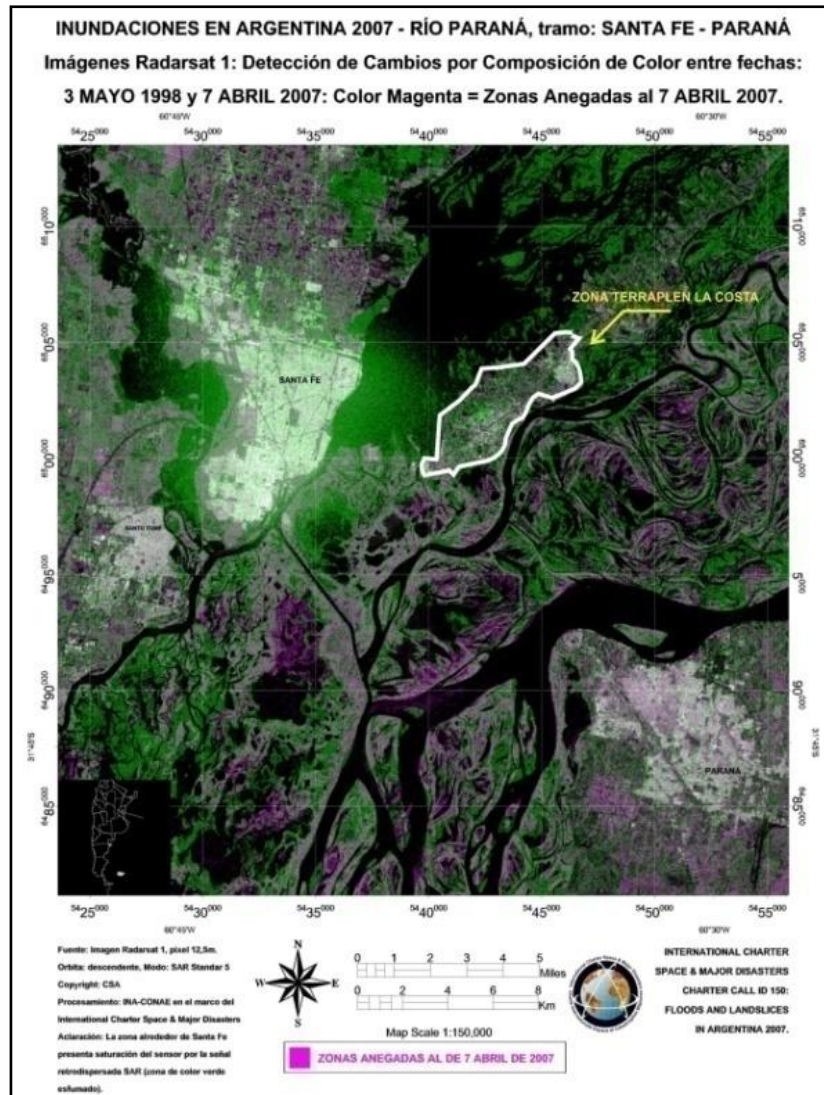
En 2007, la capacidad instalada de bombeo era de aproximadamente 6.000 m<sup>3</sup>/h, la cual se incrementó progresivamente hasta alcanzar 10.000 m<sup>3</sup>/h en los días siguientes. A pesar de este aumento, la capacidad resultó insuficiente para evacuar el volumen generado por el evento, provocando una acumulación significativa de agua en superficie. Esto derivó en anegamientos extensos y afectaciones prolongadas que se mantuvieron durante varios días.

En este caso se estimó que el nivel de equilibrio fue alcanzado, de acuerdo a la reconstrucción realizada a partir de testimonios de distintos pobladores y relevamientos realizados en esa época, en cotas cercanas a los 15,0 IGN. En Imagen Radarsat del día 7 de Abril de 2007, procesada por CONAE – INA, se advierte la magnitud de las áreas afectadas luego de seis días de ocurrido el evento, figura 3.

---

<sup>4</sup> Plan Director de Drenajes Pluviales Zona Interna Terraplén de la Costa (INA 2019)

**Figura 3:** Imagen Radarsat del día 7 de Abril de 2007, procesada por CONAE – INA



La Figura 4 compara la imagen procesada con el sombreado de las superficies bajo la cota 15,0 m IGN. Se identifican zonas más claras en los tramos próximos a la Ruta Provincial Nº 1 (km 2–4) y en el centro de San José del Rincón, coincidentes con las áreas más elevadas y no afectadas por el evento.

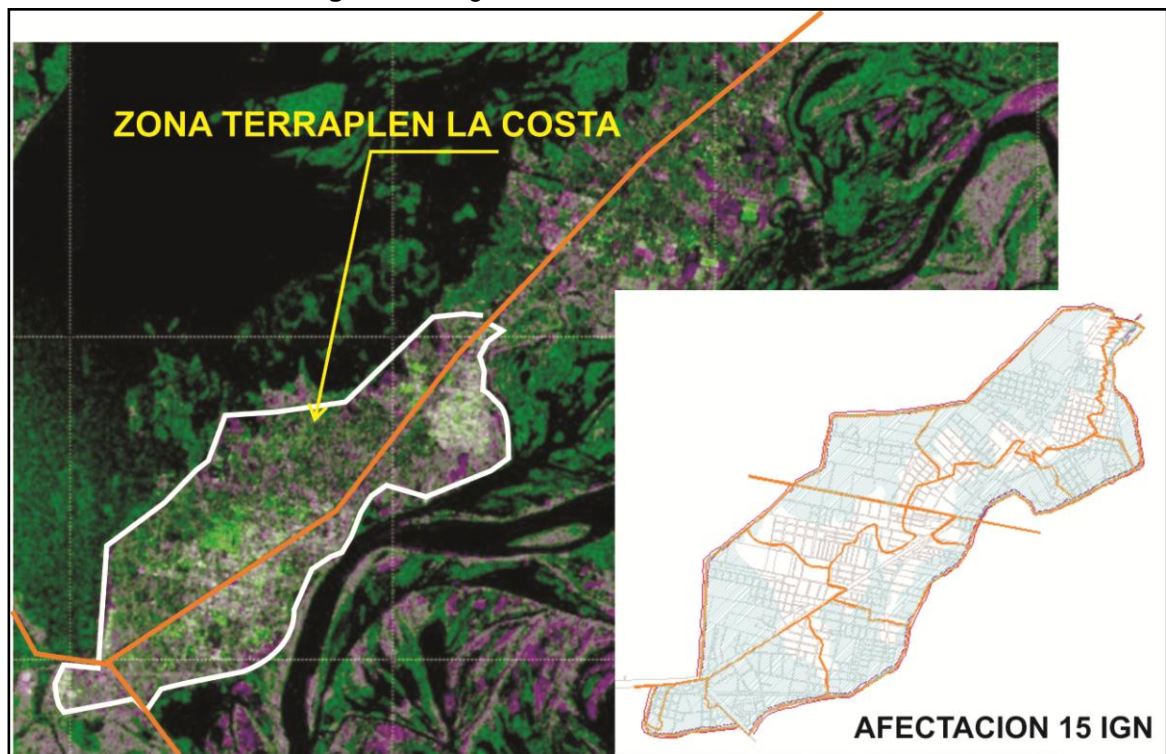
En las zonas con cotas inferiores a 15,0 m IGN, la imagen de radar muestra tonalidades más oscuras y magenta, indicando distintos grados de anegamiento. Durante el pico de la inundación (30/03–01/04/2007), los niveles alcanzaron valores cercanos a 15,0 m IGN, afectando aproximadamente el 65 % de la superficie interna del anillo de defensa (≈1.800 ha).

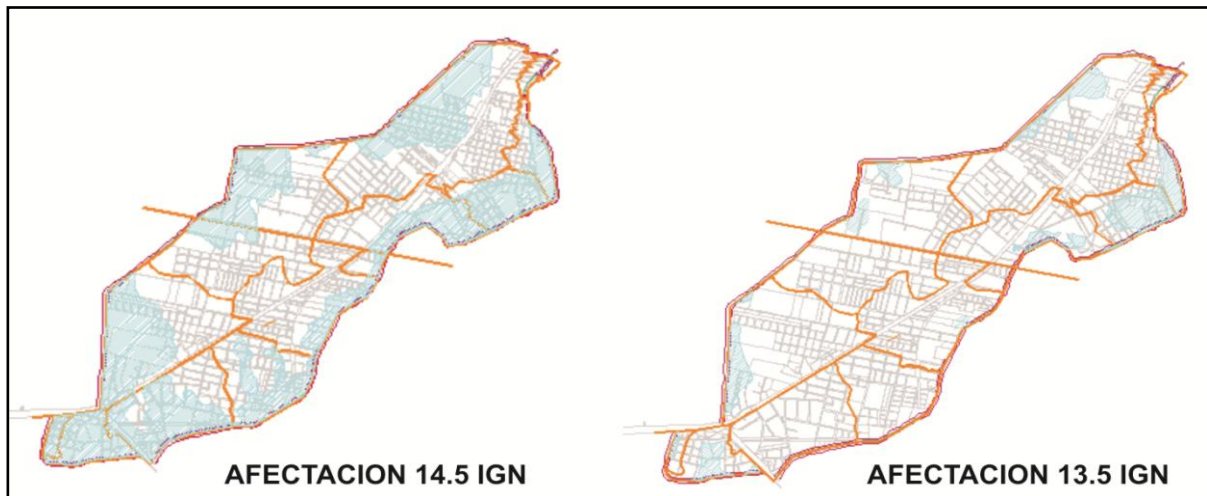
Al cabo de dos o tres días posteriores al evento, el nivel se estabilizó en aproximadamente 14.50 IGN y la superficie afectada un 42 %.

El tiempo de bombeo que fue necesario para sacar el volumen almacenado entre cotas 14.5 y 14 IGN, con la capacidad de bombeo ampliada a 10.000 m<sup>3</sup>/h (0.240 hm<sup>3</sup>/d), fue de aproximadamente 13 a 15 días y para llegar a cota 13 IGN (restableciendo los niveles anteriores a la precipitación) fue necesario bombear otros 10 -11 días. Igualmente los efectos de la inundación se pudieron superar recién a los tres meses de ocurrida ésta cuando los niveles freáticos se normalizaron y permitieron el normal funcionamiento de los pozos negros en las zonas habitadas más bajas (Bianchi et al)

Como referencia, se presentan las Figuras 4 y 5, que muestran los sombreados correspondientes a las cotas de 14,0 m IGN y 13,5 m IGN, respectivamente, a modo ilustrativo del comportamiento de las áreas anegadas.

**Figura 4:** Imagen Afectación a cota 15.0 m IGN



**Figura 5:** Afectación a cota 14.5 IGN – Cota 13.50 m IGM

## 7. MODELACIÓN MATEMÁTICA

### Descripción Modelo Matemático SWMM

El SWMM de la EPA es un modelo dinámico de simulación lluvia –escorrentía y cuenta con dos módulos fundamentales, el modulo hidrológico que funciona como una serie de cuencas donde cae la lluvia y se genera la escorrentía a partir de la simulación de diferentes procesos. Y un módulo hidráulico, es el que se usará en esta etapa del proyecto, que analiza el recorrido de estas aguas a través de un sistema de tuberías, canales, dispositivos de almacenamientos y tratamiento, bombas y elementos reguladores.

### Descripción HEC-RAS

El modelo hidráulico utilizado es el HEC RAS V.6.1 desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Departamento de Defensa de los Estados Unidos. Es un modelo numérico que permite simular flujos en cauces artificiales y cauces naturales para definir el nivel del agua, puede simular cuatro tipos de flujos, flujo en régimen permanente, modelización de flujo en régimen no permanente, modelización del transporte de sedimentos, análisis de calidad de aguas.

El sistema Hec-Ras contiene tres componentes para realizar análisis hidráulicos unidimensionales aplicados a: (1) cálculos de perfiles hidráulicos en flujos permanentes; (2) simulaciones de flujo no permanente; y (3) cálculos de transporte de sedimento en fondos y paredes erosionables.

Todos estos tres componentes utilizarán una misma representación geométrica de datos, y similares rutinas de cálculo geométrico e hidráulico.

Adicional a estos tres componentes hidráulicos, el sistema contiene algunos elementos de diseño hidráulico que pueden ser utilizados una vez que los perfiles hidráulicos hayan sido calculados.

### 7.1. Implementación Modelo SWMM

Se generó el archivo de entrada del modelo SWMM, incorporando de manera sistemática las características físicas e hidráulicas del sistema de drenaje y los datos de precipitación con un dt=5 min.

La lluvia neta se computa utilizando el método de curva número (CN). En este caso se adopta como CN=85

El modelo quedó constituido por 253 nodos, 123 subcuencas (que surgen de subdividir las 14 áreas de aportes a las estaciones de bombeo – E.B), y 15 estaciones de bombeo vinculadas a sus reservorios. En la figura 6 se detallan las áreas de aporte, reservorios y estaciones de bombeo (E.B) y en la figura 7 el archivo de entrada al modelo SWMM. En la tabla 1 y 2 se presentan las características de las áreas de aporte y las estaciones de bombeo a la que están vinculadas.

**Tabla Nº 1:** Distribución Áreas de Aporte a Estaciones de bombeo

<b>Distrito</b>	<b>Nombre Cuenca</b>	<b>Área (Has)</b>	<b>Nombre Estación de Bombeo</b>
La Guardia	G1A	12.5	La Guardia Sur
La Guardia	G1B	58.6	La Guardia (Makro)
Colástine	WC2	191.7	La Guardia Norte
Colástine		19.1	El Bañado
Colástine	Parte de WCR4a	161.6	Los Naranjos
Rincón	Parte WCR4a y parte de WCR4b	137.4	Villa California
Rincón	Parte WCR4b WR6	414.1	Villa Añaty
Colástine	EC3a	168	Virgen de Guadalupe
Colástine	EC3b	141.5	Dinosaurios
Colástine	LT	68.7	La Toma
Colástine	EC5	154.9	Colástine Norte
Rincón	ER7	144.1	Garello
Rincón	ER8	91.2	Los Espinillos
Rincón	ER9	48.5	La Boca
Rincón	ER10	16.3	La Lonja

**Tabla N° 2:** Características físicas Áreas de Aporte a Estaciones de bombeo (E.B)

<b>Áreas de aporte a la E.B</b>	<b>Área (has)</b>	<b>Pendiente (media)</b>	<b>Impermeabilidad (media)</b>
La Guardia (Makro)	58.6	0.26	20
La Guardia Sur	12.5	0.50	25
Virgen de Guadalupe	168	0.25	30
La Guardia Norte	191.7	0.30	21
Los Naranjos	161.6	0.29	26
Villa California	137.4	0.19	24
Villa Añaty	414.1	0.28	28
Los Dinosaurios	141.5	0.39	30
La Toma	68.7	0.34	30
Garello	144.1	0.28	30
los Espinillos	91.2	0.57	30
La Boca	48.5	0.20	30
La Lonja	16.3	0.40	30
Colastine Norte	154.9	0.27	25

Figura N° 6: Áreas de aporte y estaciones de bombeo (E.B)

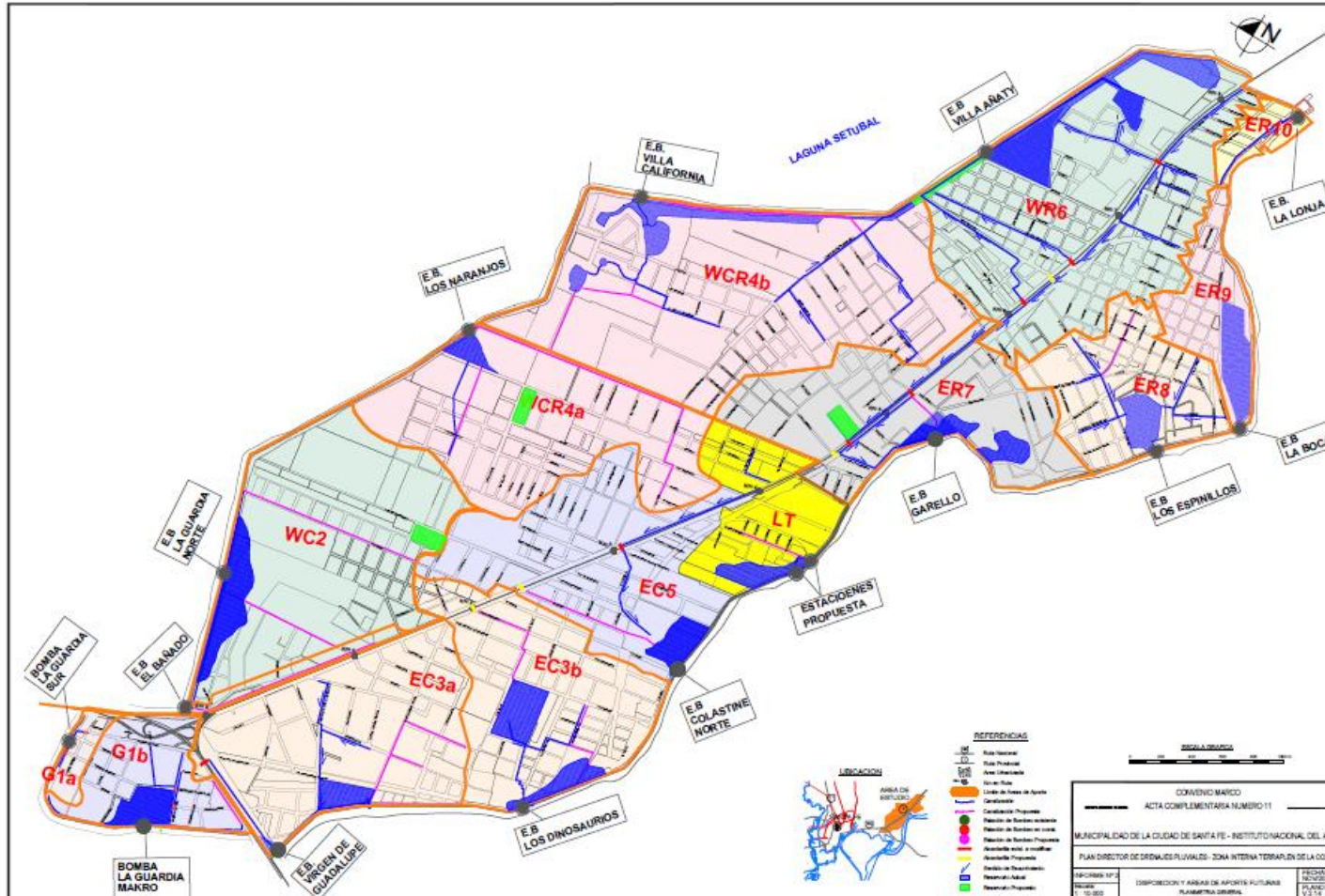
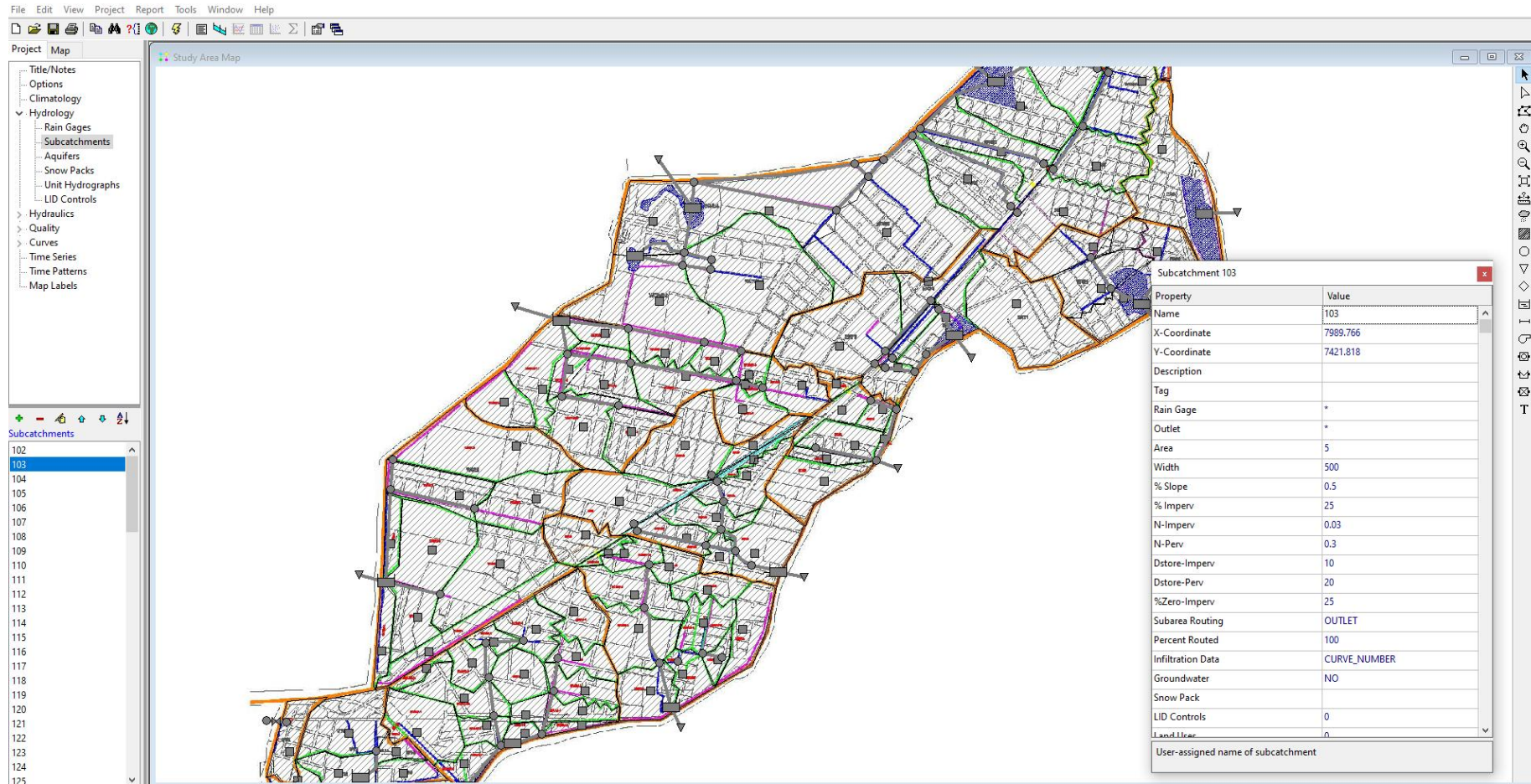
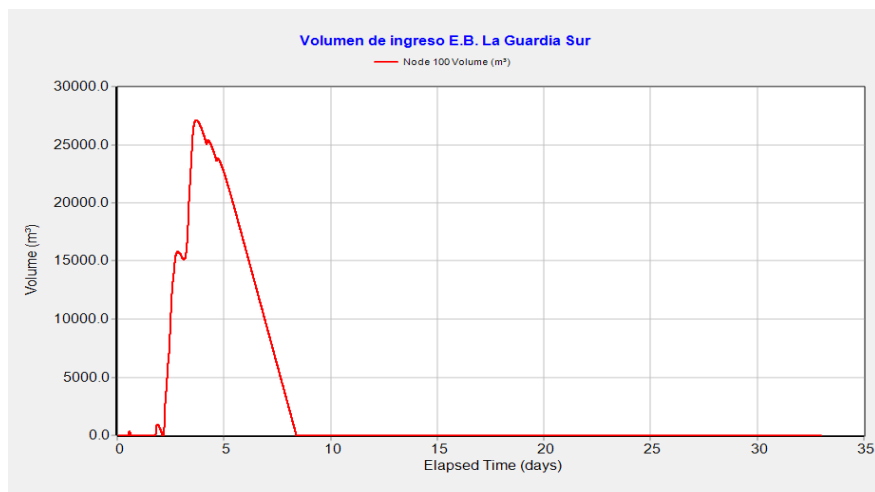


Figura 7: Esquema Modelo SWMM – Distrito Rincón y Colástine

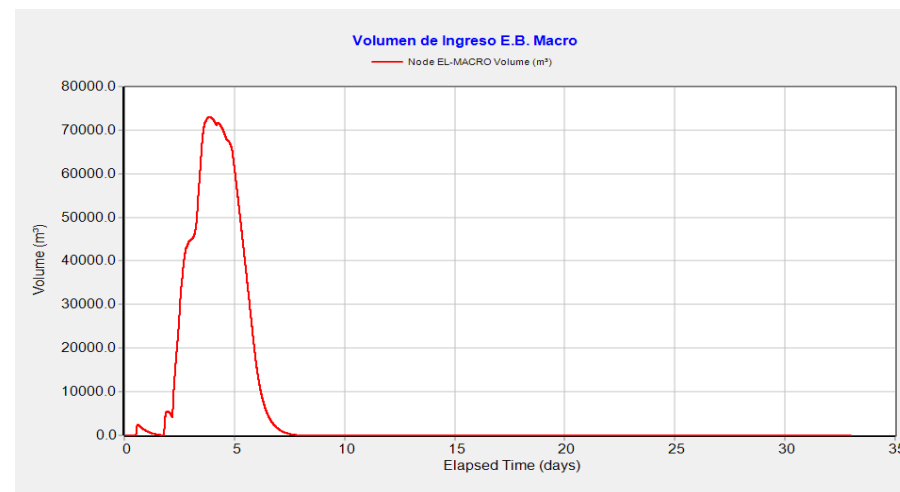


Se generaron los hidrogramas para cada subcuenca, los cuales representan los aportes afluentes hacia los reservorios asociados a las estaciones de bombeo. Dichos hidrogramas se incorporaron al modelo hidrodinámico HEC-RAS como condiciones de contorno aguas arriba, permitiendo simular el tránsito de caudales a través del sistema y su interacción con las estructuras hidráulicas.

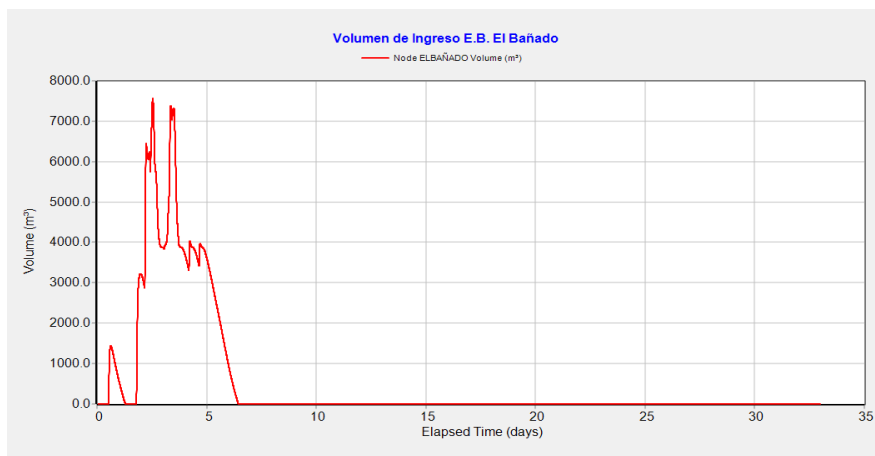
En las figuras 8 a 21 se presentan la variación de los volúmenes de ingreso a cada reservorio/almacenamiento temporal y en la tabla 3 se observan los volúmenes máximos de ingreso a cada uno de ellos.



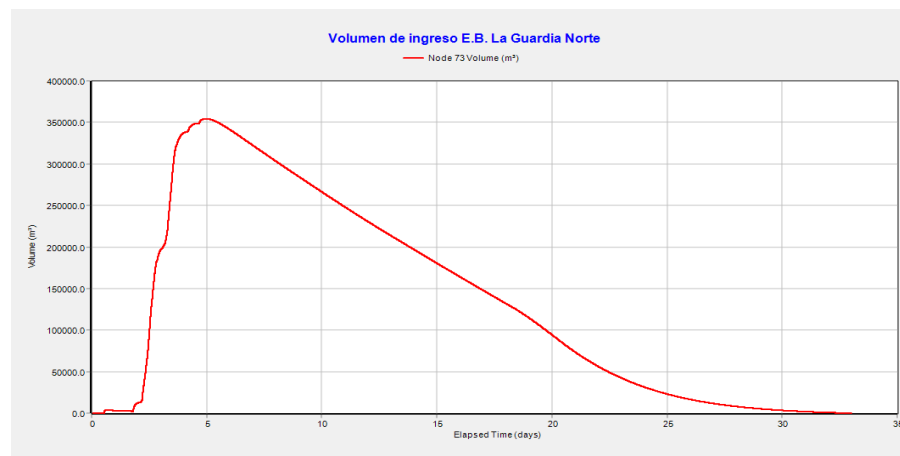
**Figura 8:** Hidrograma área de aporte (G1a)



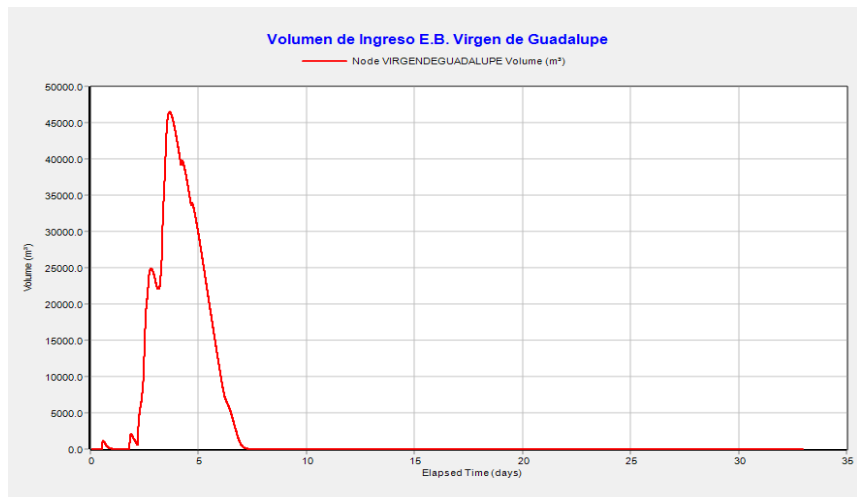
**Figura 9:** Hidrograma área de aporte (G1b)



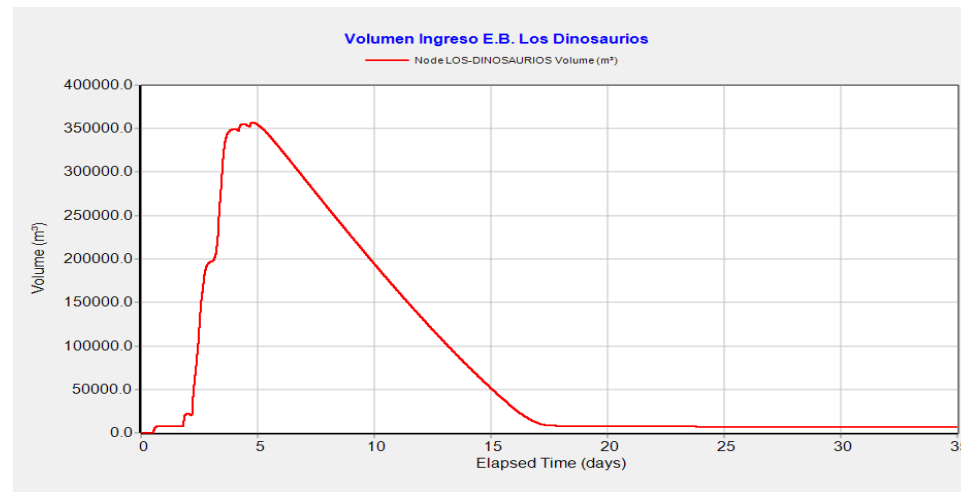
**Figura 10:** Hidrograma parte del área de aporte (Wc2)



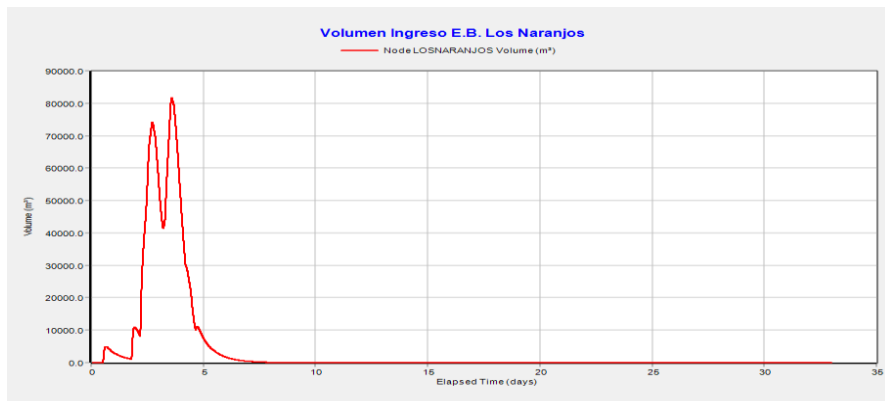
**Figura11:** Hidrograma parte del área de aporte (Wc2)



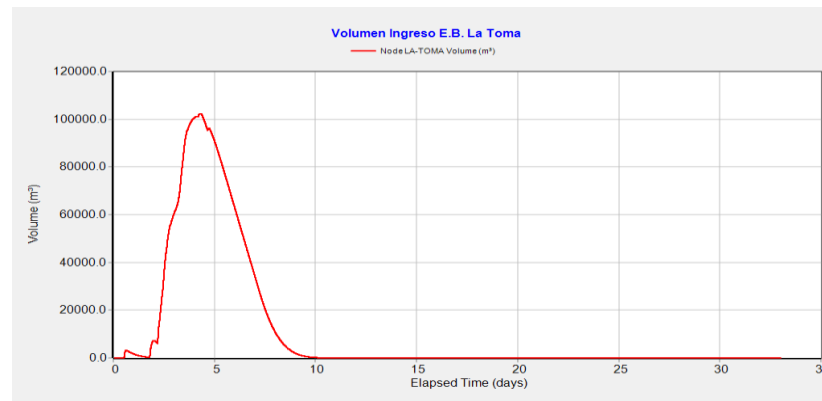
**Figura 12:** Hidrograma parte del área de aporte (EC3a)



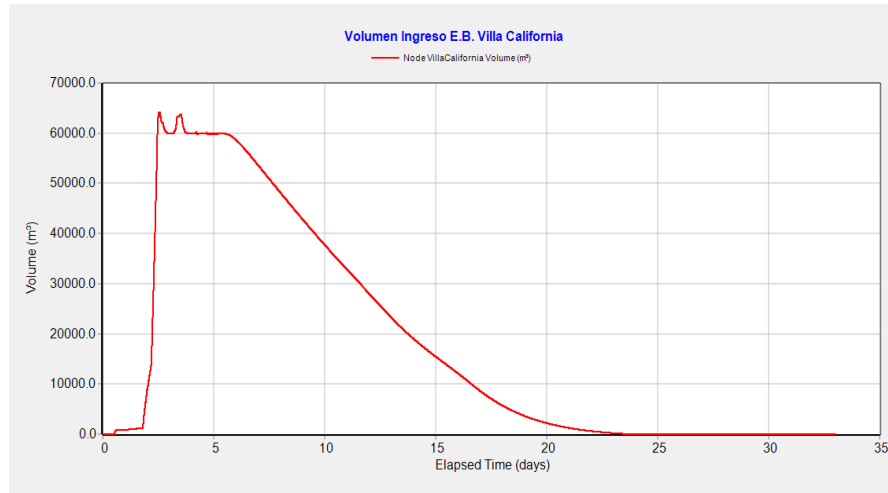
**Figura 13:** Hidrograma parte del área de aporte (EC3b)



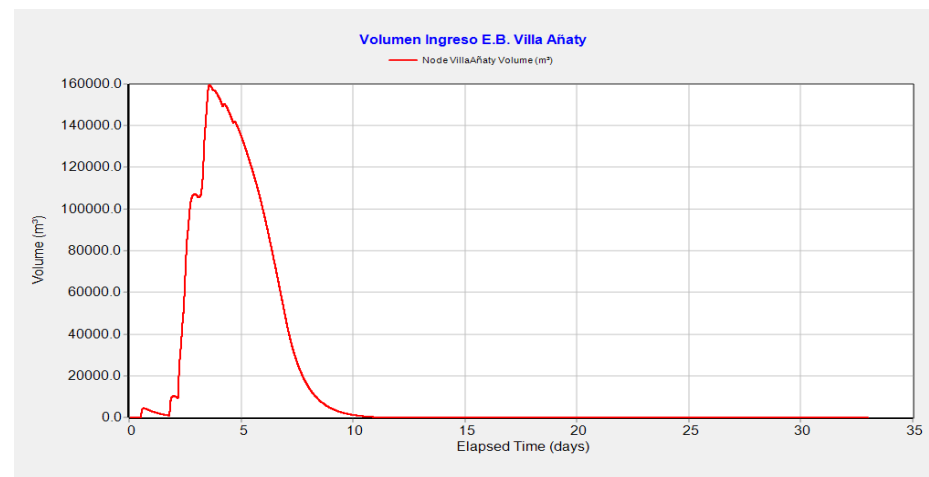
**Figura 14:** Hidrograma parte del área de aporte (WCR4a)



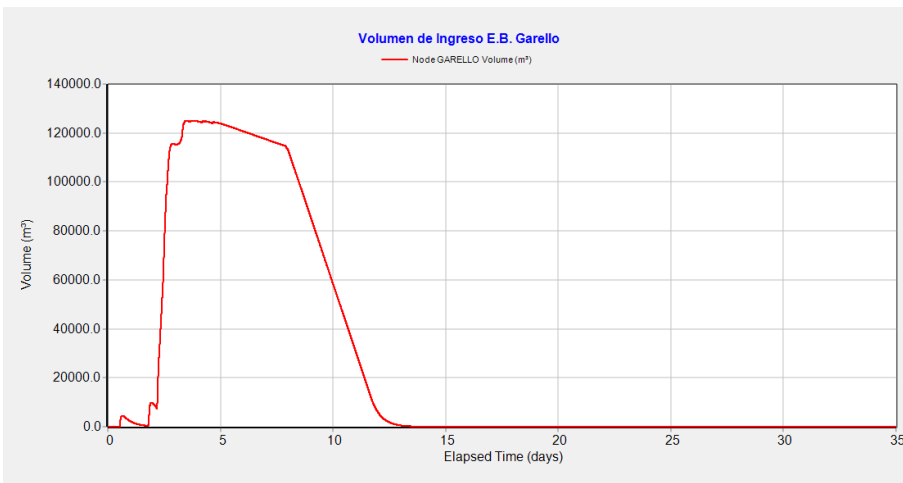
**Figura 15:** Hidrograma parte del área de aporte (Lt)



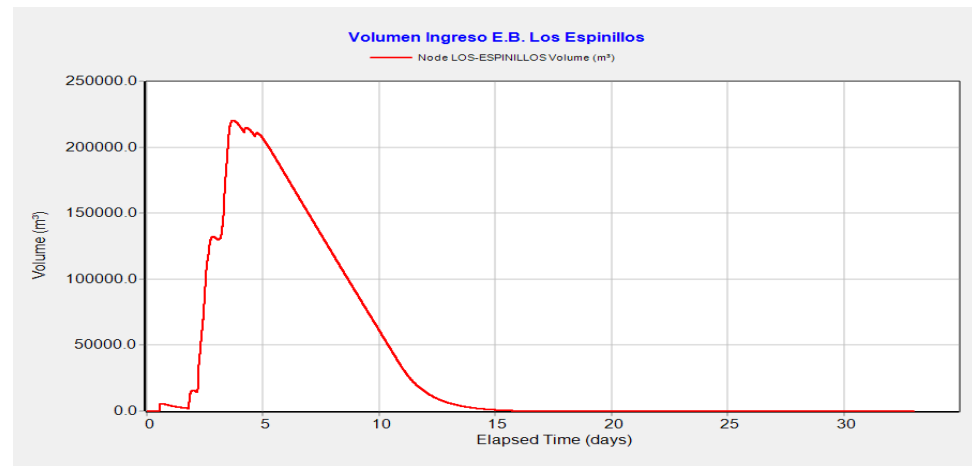
**Figura 16:** Hidrograma parte del área de aporte (WCR4b)



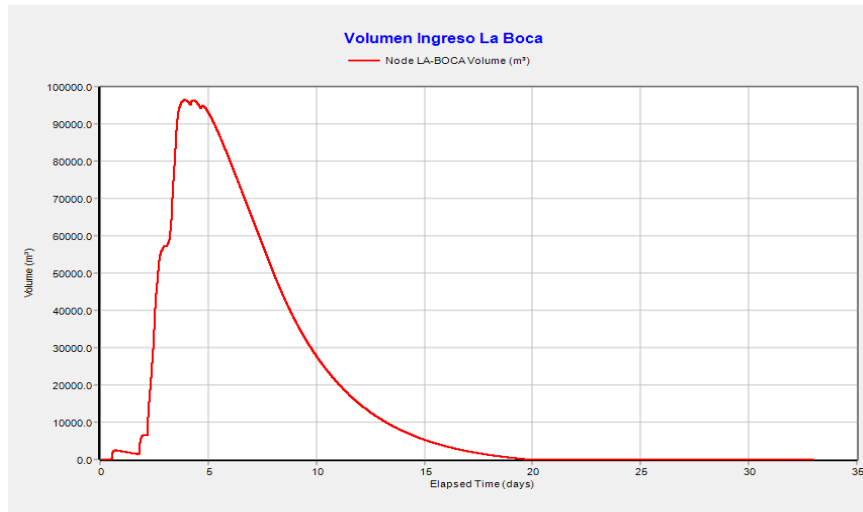
**Figura 17:** Hidrograma parte del área de aporte (WR6)



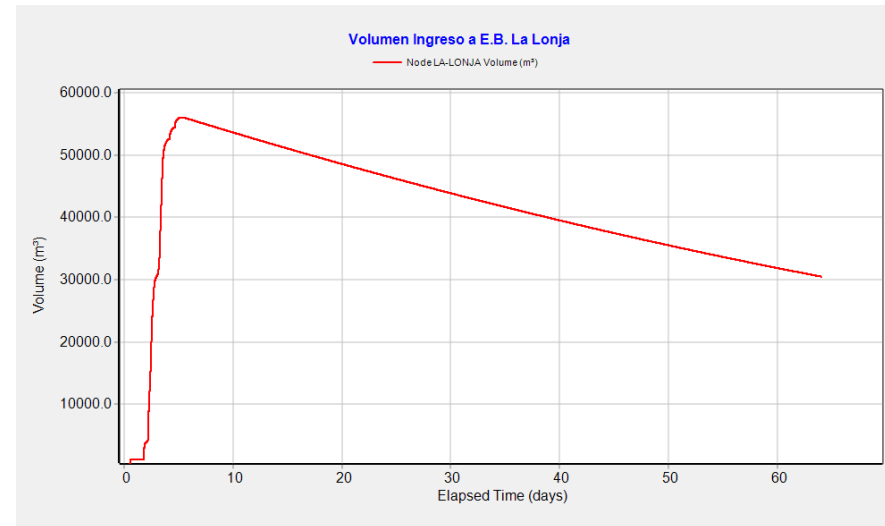
**Figura 18:** Hidrograma parte del área de aporte (ER7)



**Figura 19:** Hidrograma parte del área de aporte (ER8)



**Figura 20:** Hidrograma parte del área de aporte (ER9)



**Figura 21:** Hidrograma parte del área de aporte (ER10)

**Tabla N° 3:** Volumen de ingreso a cada reservorio/almacenamiento temporal incorporado en la modelación

Area de aporte a	Máximo Volumen (m3)
reservorio cuenca G1B	25000
reservorio cuenca G1A	72000
reservorio cuenca WC2	350000
reservorio cuenca EC3a	47000
reservorio cuenca EC3b	350000
reservorio cuenca EC5	105000
reservorio cuenca ER7	120000
reservorio cuenca ER8	230000
reservorio cuenca ER9	95000
reservorio cuenca ER10	55000
reservorio cuenca ER6	160000
reservorio cuenca WCR4b	65000
reservorio cuenca WCR4a	82000
reservorio cuenca WC2	350000
reservorio Intermedio	18000
reservorio Intermedio	60000
reservorio Intermedio	12000
reservorio cuenca LT	100000
<b>Total</b>	<b>2296000 m3</b>

## 7.2. Implementación Modelo HEC-RAS

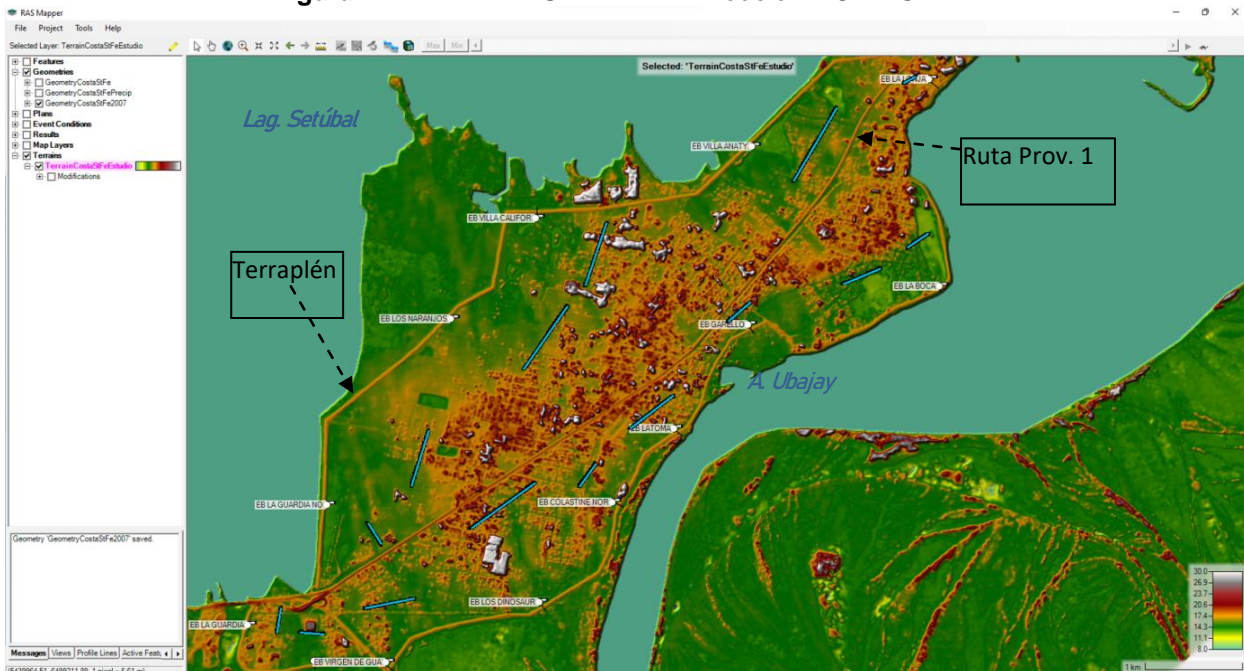
La implementación del modelo HEC-RAS permitirá caracterizar la extensión espacial de las áreas anegadas generadas por el evento extremo, así como estimar los tiempos de permanencia del anegamiento.

En relación a la incorporación del área 2D (modelación bidimensional), se configuró el proyecto asegurando que las unidades de medidas y las proyecciones sean las correctas. Para este caso se trabajó con unidades métricas y el sistema de coordenadas "POSGAR\_2007\_Argentina\_Zone\_5". Se creó la geometría para 2D trazando el perímetro que se desea incorporar para la modelación. Dentro de esta área se definieron algunas propiedades como son la rugosidad del terreno que se determina de observar imágenes, como también de estudios antecedente

El área bidimensional a modelar fue mallada a cada 5 m. Este mallado se toma de 5m, de tal manera que las celdas así conformadas puedan tomar y representar canales, caminos y, sobre todo, la elevación del terraplén y la ruta Nac. N° 1.

La necesidad de emplear un modelo digital de elevaciones (MDE), fue resuelta a partir del empleo de un producto del IGN, resultante de vuelos aerofotogramétricos llevados a cabo con el siguiente equipamiento: a) una cámara digital Vexcel Ultra Cam Xp; b) un sistema de navegación GNSS; y c) un sistema inercial IMU. El IGN ha desarrollado una línea de producción que le permite la determinación precisa de los parámetros de orientación externa de los fotogramas, la aerotriangulación por haces de rayos, y finalmente, la generación de un MDE. Los MDE/MDT aerofotogramétricos que distribuye el IGN tienen una resolución espacial de 5m y una precisión vertical submétrica. En la figura 22 se observa una síntesis visual del MDE (modelo digital de elevación) que distribuye el IGN con una resolución espacial de 5 m y una precisión vertical submétrica.

**Figura 22: MDE – RASMAPPER – Modelo HEC-RAS**



Como condición de borde aguas arriba se incorporaron como datos los hidrogramas generados por el SWMM y como condición de borde aguas abajo las capacidades de bombes instaladas en ese momento, que se detallan en la (tabla 4). Los escurrimientos generados en aquellas cuencas donde los bombes no estaban activos/existían al momento del evento fueron evacuados por las estaciones de bombeo cercanas.

Como se había mencionado en la descripción física del sistema, el área se encuentra atravesada por la ruta provincial Nº 1 siguiendo una dirección Noreste, Suroeste. En dicha arteria existen alcantarillas de cruce que vinculan hidráulicamente el sector oeste con el este que fueron

incorporadas al modelo HEC-RAS con sus dimensiones correspondiente, las cuales se detallan en la figura 23, 24, 25 (ubicación, dimensiones y cotas de fondo).

**Tabla N° 4:** Capacidad de bombeo instalada en 2007  
Discriminada por estación de bombeo

<b>E.B. En Colastine</b>	<b>Año 2007</b> (Capacidad de bombeo en m3/s)
LG 01 LA GUARDIA	0.078
LG 02 MAKRO	0.56
CN 01 VELOC. Y RESISTENCIA (Virgen de Guadalupe)	0.25
CN 03 JURASIK PARK (Los Dinosaurios)	-
CN 05 LA TOMA	-
CN 06 LOS NARANJALES	0.125
CN 07 PARAISO 17 (La Guardia Norte)	0.25
CN 08 EL BAÑADO	
<b>Bombeo total=</b>	<b>1.263</b>

	<b>Año 2007</b> (Capacidad de bombeo en m3/s)
VILLA CALIFORNIA	-
VILLA AÑATY	0.333
LA LONJA	0.0167
LOS ESPINILLOS	0.33
LA BOCA	0.167
GARELLO	0.333
<b>Bombeo total=</b>	<b>1.1797</b>

Figura 23: Alcantarillas de paso existente sobre ruta Prov. N° 1

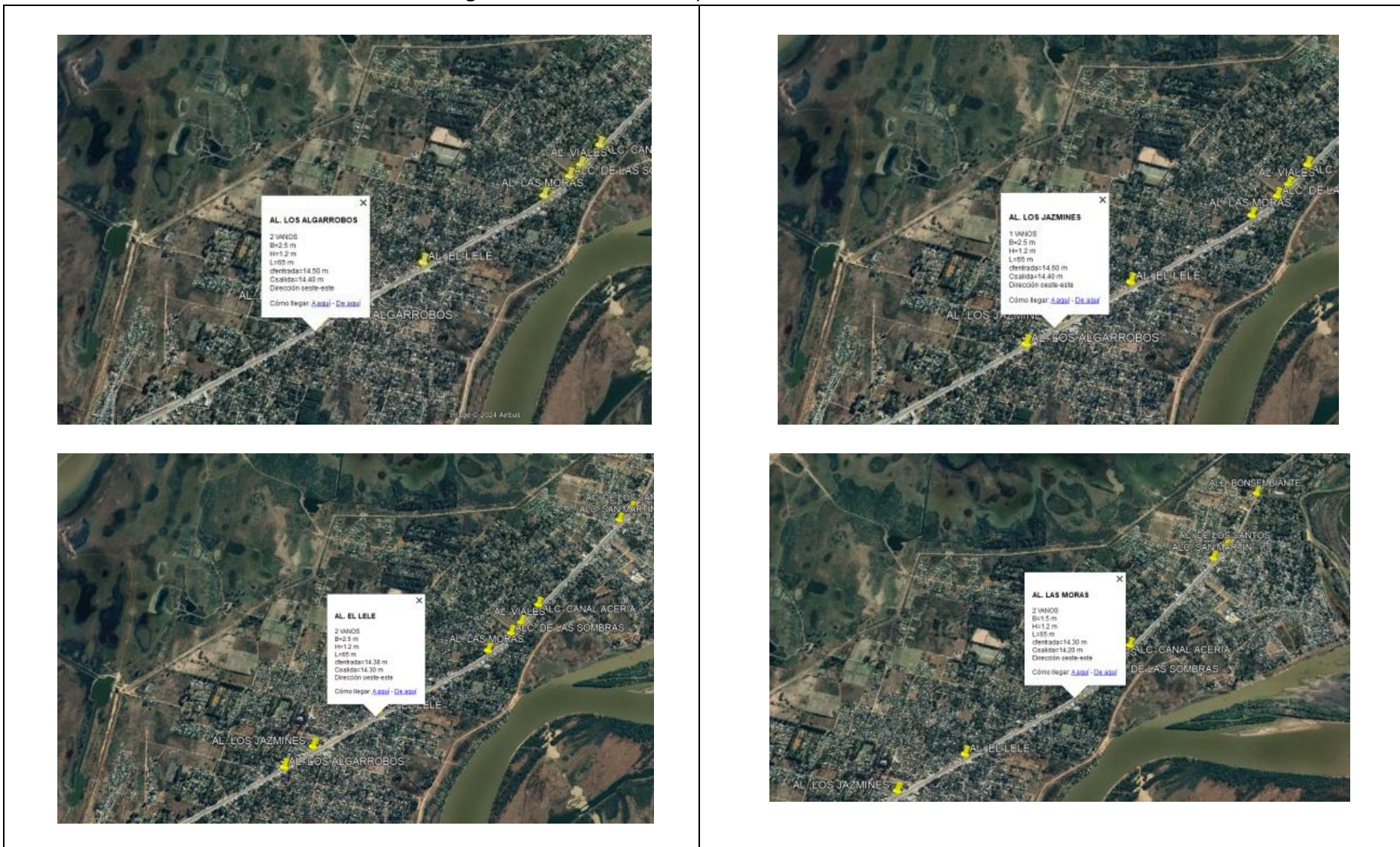


Figura 24: Alcantarillas de paso existente sobre ruta Prov. N° 1

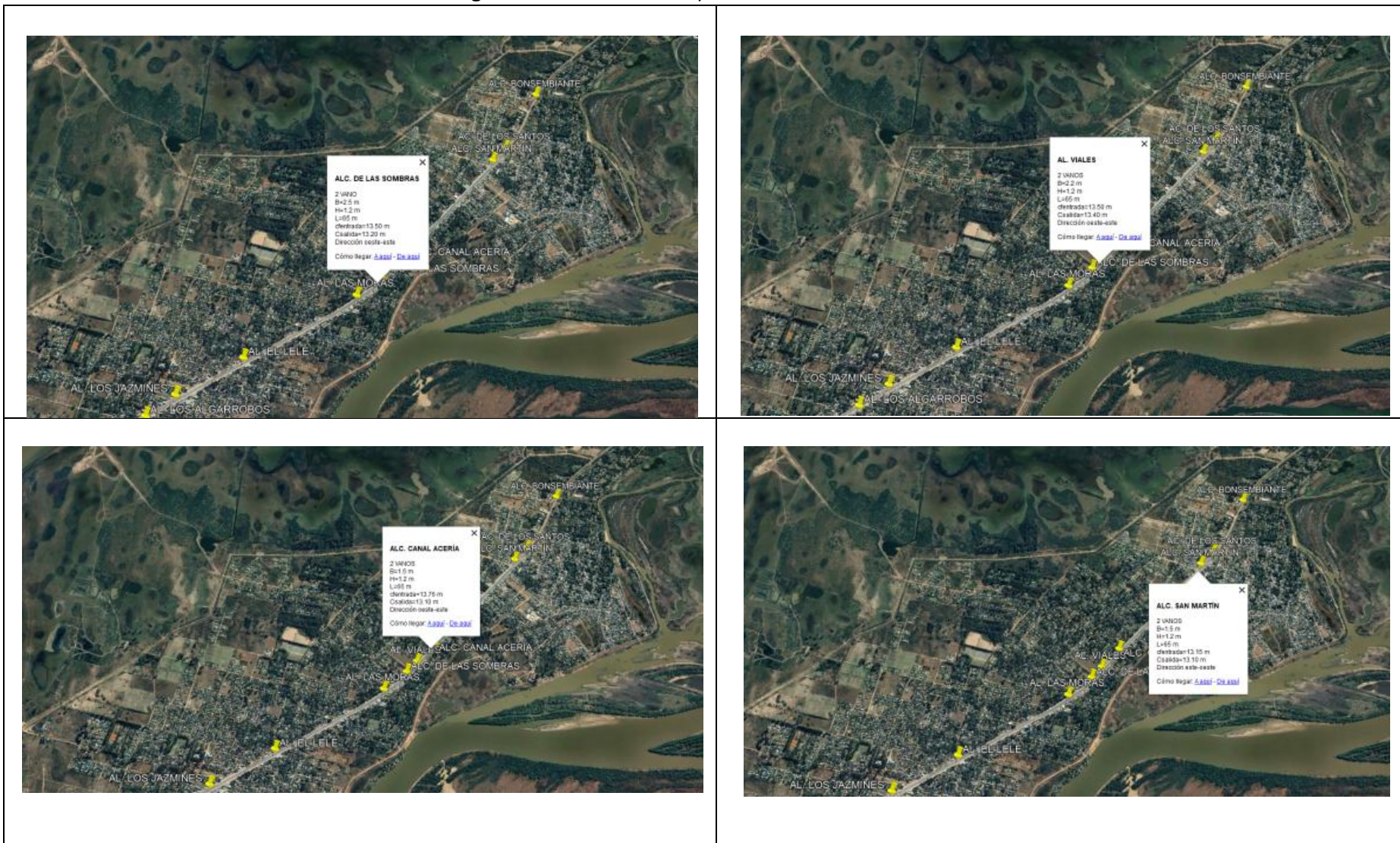


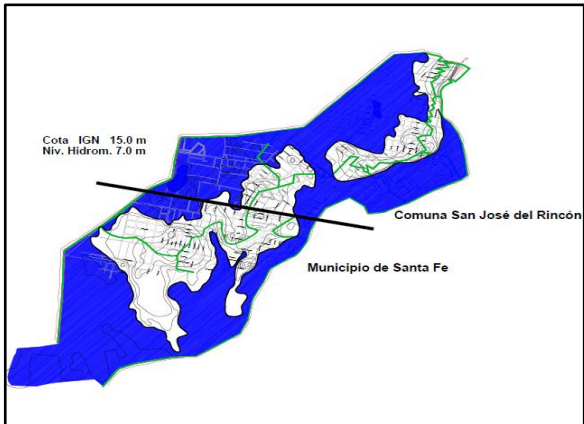
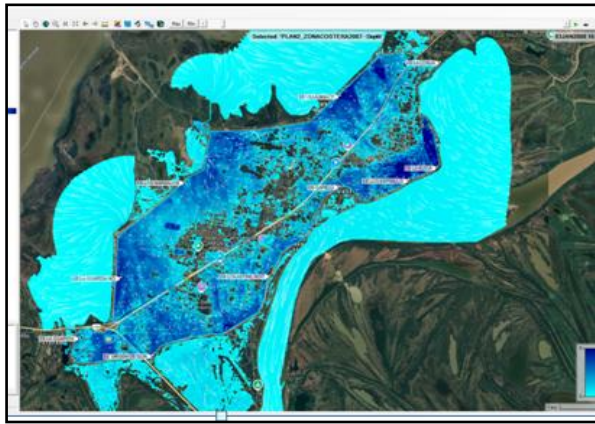
Figura 25: Alcantarillas de paso existente sobre ruta Prov. N° 1



### 8. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN BIDIMENSIONAL: EXTENSIÓN Y PERMANENCIA DE ANEGAMIENTOS

Los resultados obtenidos permitieron delimitar las zonas afectadas por la inundación, cuantificar los volúmenes de anegamiento y analizar su evolución temporal en función tanto de la respuesta hidrológica-hidráulica del sistema como de la capacidad de bombeo instalada. La validación del modelo se realizó mediante la comparación con observaciones de campo posteriores al evento, imágenes satelitales de alta resolución e información aportada por los vecinos. En las figuras 26,27, 28 y 29 se presentan los resultados para diferentes tiempos del evento.

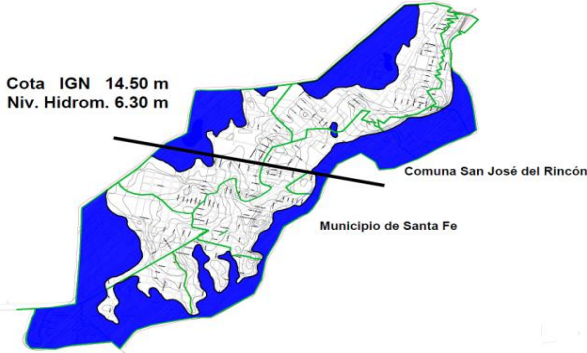
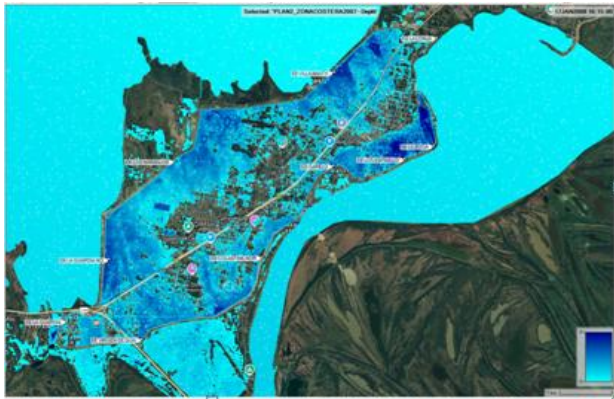
**Figura 26:** Área anegada durante el pico del evento

Afectación obtenida con recorridos de campo	Afectación resultados modelación matemática HEC-RAS
 <p>En esta figura se presenta el grado de afectación observada. Coincide aproximadamente con cotas inferiores a 15,0 IGN, si bien no presenta anegamientos uniformes, se pudo advertir que habían sido afectadas en mayor o menor grado. En definitiva, en el momento de máxima inundación en algunos sectores se alcanzaron niveles de 15 m IGN, entre el 30/03 al 1/04/07, afectando un 65 % de la superficie interna del anillo (1800 has).<sup>5</sup></p>	 <p>Este mapa que combina la modelación con una base satelital y permite identificar qué sectores urbanos quedaron más afectados.</p> <p>El resultado del modelo permite identificar con mayor precisión las áreas urbanas y rurales afectadas. El Volumen total escurrido simulado es de 5.9 hm<sup>3</sup>.</p> <p>Se observa la superficie anegada representada en distintos tonos de azul:</p> <p><i>Azules más oscuros:</i> corresponden a las áreas más bajas, con mayor profundidad de agua (zonas críticas).</p> <p><i>Azules más claros:</i> representan sectores con menor</p>

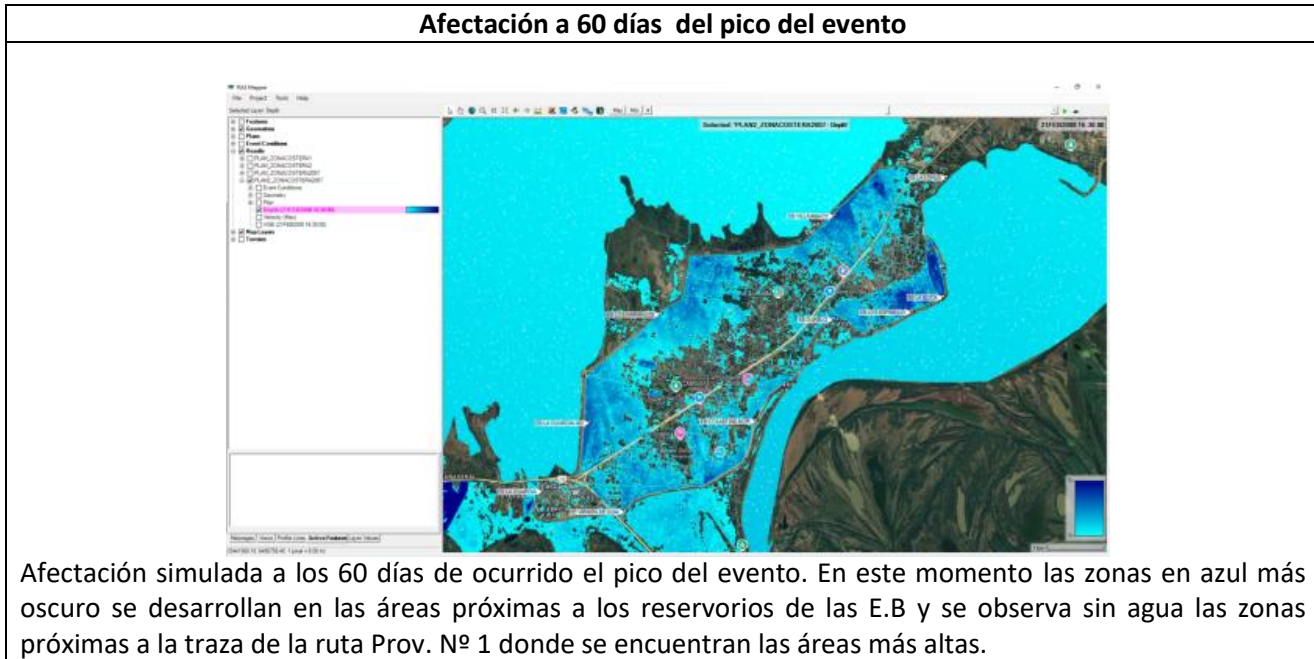
<sup>5</sup> Plan Director de Drenajes Pluviales Zona Interna Terraplén de la Costa (INA 2019)

	<p>tirante de agua (menos de 0,10 m en algunos casos, según lo descrito en tu texto anterior).</p> <p>El mapa confirma que la inundación alcanzó el 65 % del área interna del anillo (1800 ha) durante el evento de 2007.</p> <p>La distribución de intensidades (tonos de azul) coincide con lo observado en terreno, imágenes satelitales y testimonios de vecinos.</p>
--	---

**Figura 27:** Área anegada a los tres días del pico del evento

 <p>Cota IGN 14.50 m Niv. Hidrom. 6.30 m</p> <p>Comuna San José del Rincón Municipio de Santa Fe</p> <p>Al cabo de dos o tres días posteriores al evento, se observó que el nivel se estabilizó en aproximadamente 14.50 IGN, el almacenamiento del sistema de acuerdo a la topografía existente, era del orden de los 4.810.000 m<sup>3</sup> (4.81 hm<sup>3</sup>) y la superficie afectada un 42 %.</p>	 <p>En este mapa resultado se observa la coincidencia de las zonas en azul más oscuro con las manchas observadas.</p> <p>Las zonas con azules más claros representan sectores con menor tirante de agua (menos de 0,10 m) y pueden variar con lo observado en función de la precisión del MDT disponible.</p>
--	--

**Figura 28:** Área anegada los 60 días del pico del evento  
**Afectación a 60 días del pico del evento**



**Figura 29:** Área anegada los 100 días del pico del evento  
**Afectación a 100 días del pico del evento**



<sup>6</sup> Plan Director de Drenajes Pluviales Zona Interna Terraplén de la Costa (INA 2019)

## 9. CONSIDERACIONES FINALES

El estudio utilizando el SWMM y HEC-RAS permitió cuantificar los aportes a las estaciones de bombeo (EB), mapear anegamientos, caracterizar la extensión espacial, identificar zonas críticas de acumulación, evaluar los tiempos de permanencia del agua en superficie y la lentitud del descenso por bombeo de las áreas anegadas generadas por el evento extremo.

La simulación del evento ocurrido en el año 2007 reproduce las manchas de agua observadas en terreno, distingue sectores más críticos (zonas bajas) con tonos más oscuros e Identifica áreas de poca lámina de agua (< 0,10 m). Estas últimas podrían ser producto de la precisión del MDT (principal limitación al simular zonas planas amplias). Estos resultados representan un avance inicial y un insumo clave para el entendimiento de la dinámica hídrica del sistema y la evaluación cuantitativa del riesgo de inundación.

Además, destacar que el uso de este tipo de herramientas de modelación sirve también para generar escenarios prospectivos que permitan evaluar la eficacia de medidas de mitigación. En este sentido, la modelación se consolida como un insumo clave para la planificación de los esquemas de bombeo y la toma de decisiones en la gestión del riesgo hídrico, especialmente en este tipo de zonas planas sometidas a diferentes amenazas como las crecidas del Paraná, ascenso del freático y lluvias intensas que se suman a factores agravantes como la urbanización sin planificación, la impermeabilización de bajos, ocupación de reservorios y pozos negros que elevan la freática.

Es esencial optimizar continuamente este tipo de metodología mediante la integración de tecnologías avanzadas, incluyendo Modelos Digitales del Terreno (MDT) de mayor precisión, datos satelitales y otras fuentes de información geoespacial con el fin de mejorar la exactitud y la eficiencia del análisis

## Referencias

**Bianchi, H.** (2017). *Gestión Integrada de Inundaciones en la Zona Interior del Terraplén de la Costa, Area Metropolitana de la ciudad de Santa Fe, Argentina*. Tesis Maestría en Gestión integrada de Recursos Hídricos (FICH).

**Bianchi, H; Paoli C.G; Mazzon R.; Paoli C.U.** (2017). *Gestión Integrada de Crecidas en una Zona Defendida – GIC*. Anales de Resúmenes de XXVI, CONAGUA. ISBN 978-987-4029-23-2.

**Riccardi, G., Stenta, H., Scuderi, C., Basile, P., Zimmermann, E., Trivisonno, F.** (2013). "Aplicación de un modelo hidrológico-hidráulico para el pronóstico de niveles de agua en tiempo real", Tecnología y Ciencias del Agua, vol. IV, núm. 1, pp. 83-105.

**Macor J., Pedraza R.,** (2001). "Efectos de la Escala Espacial en la Simulación de Excesos Pluviales de Áreas Urbanas Usando el Modelo SWMM". I Seminario de Drenagem Urbana do Mercosul – V Seminario Nacional de Drenagem Urbana. Vol. I, pág. 105 – 110. Porto Alegre, Brasil.

**James W, James W.R.C,** (2000), "Water Systems Models [1]. Hydrology. User's guide to SWMM4 RUNOFF and supporting modules". Computational Hydraulics International, Ontario, Canadá.

**Barnes T. G.,** (1998). "FOR73 Creating Urban Stormwater Control Ponds for Water Quality and Wildlife Habitat, Extension Wildlife Specialist Lowell Adams" National Institute for Urban Wildlife. [www.ca.uky.edu/agc/pubs/for/for73/for73.pdf](http://www.ca.uky.edu/agc/pubs/for/for73/for73.pdf)

**Calomino F., Maksimović Ć., Molino B.,** (1995). "Urban Drainage: Experimental Catchments in Italy". Editorial Bios. Cosenza. Italia.

**Huber W., Dickinson R,** (1992). "Storm Water Management Model User's Manual Version 4". Water Resources Publications.

**Chow, V.T., Maidment, D. & Mays, L.:** *Hidrología aplicada*.