

## AMENAZA EN EL RIESGO DE INUNDACIONES EN SISTEMAS HIDROLÓGICOS DE LLANURA ANTE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO: APLICACIÓN AL SISTEMA "LAS ENCADENADAS"

### THREAT TO FLOODING RISK IN FLATLANDS HYDROLOGICAL SYSTEMS UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS: APPLICATION TO THE "LAS ENCADENADAS" SYSTEM

Magalí V. Soria<sup>(1)</sup>, Pedro A. Basile<sup>(2)</sup> y Gerardo A. Riccardi<sup>(2)(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Venado Tuerto, Argentina.  
e-mail: msoria@frvt.utn.edu.ar. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4680-8753>

<sup>(2)</sup> Departamento de Hidráulica (Escuela de Ingeniería Civil) y Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

e-mail: pbasile@fceia.unr.edu.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8826-0621>

<sup>(3)</sup> Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario, Argentina.  
e-mail: riccardi@fceia.unr.edu.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9294-3166>

#### RESUMEN

El presente trabajo estudia la amenaza asociada a diversos escenarios de cambio climático (CC) en el riesgo de inundaciones en el sistema hidrológico no-típico "Las Encadenadas", ubicado al sur de la provincia de Santa Fe en Argentina. Las herramientas y metodologías utilizadas son fundamentadas en la geomática. Respecto a representaciones del comportamiento del sistema, es utilizado un modelo hidrológico-hidráulico distribuido, físicamente basado. Como principales resultados, es lograda la cuantificación y mapeo de superficies de agua y caudales, la permanencia del agua superficial y su cercanía a ejidos urbanos y redes viales, para recurrencias con y sin consideración del efecto por CC. Para las condiciones más desalentadoras: recurrencia de 100 años, suelo cuasi-saturado y coeficiente de CC de 1.30; se obtuvo un 19.92% de superficie del sistema ocupada con agua, caudales pico del orden de los 320 m<sup>3</sup>/s en la sección de cierre, un escurrimiento del agua del 11.6% en las primeras 24 horas y un total de 202 tramos de redes viales con agua en proximidades. Se obtuvo una nueva delimitación del sistema y se realizaron mejoras en la zonificación y regulación del uso del suelo en áreas inundables de diversos pueblos, de acuerdo con Ley N° 11730.

**Palabras clave:** Sistemas Hidrológicos de Llanura, Modelo Hidrológico-Hidráulico Distribuido y Físicamente Basado, Herramientas Geomáticas, Las Encadenadas, Cambio Climático.

#### ABSTRACT

In the present work the threat associated with different climate change (CC) scenarios on the flooding risk of the non-typical hydrological system called "Las Encadenadas" is studied. The basin is located in the southern part of Santa Fe province in Argentina. The tools and methodologies used are based on geomatics. Regarding representations of the system behavior, a physically based distributed hydrologic-hydraulic model is used. The main results are the quantification and mapping of water surfaces and flows, the permanence of surface water and its proximity to urban areas and road networks, for recurrences with and without consideration of the CC effect. For the most discouraging conditions: 100-year recurrence, quasi-saturated soil and CC coefficient of 1.30, we obtained 19.92% of the system surface area occupied with water, peak flows of about 320 m<sup>3</sup>/s in the closing section, water runoff of 11.6% in the first 24 hours and a total of 202 sections of road networks with water in the vicinity. A new delimitation of the system was obtained and improvements were made in the zoning and regulation of land use in flood-prone areas in different towns, in accordance with Law No. 11730.

**Keywords:** Flatlands Hydrological Systems, Distributed and Physically Based Hydrological-Hydraulic Model, Geomatics Tools, Las Encadenadas, Climate Change.

## INTRODUCCIÓN

Los Sistemas Hidrológicos No Típicos (SHNT) son sistemas que no cuentan con una superficie tributaria definida de componentes lineales, organizados y jerarquizados, ni con una relación puntual, sino que prevalece la estructura de disipación (Fertonani y Prendes, 1983).

Dichos sistemas tienen como rasgo distintivo la baja energía morfológica del terreno (Fuschini Mejía, 1994) encontrándose conformados por zonas bajas y depresiones, las cuales se interconectan naturalmente mediante cañadas y esteros.

El agua pluvial en este tipo de sistemas se moviliza muy lentamente sin encauzarse en forma de manto, incitada generalmente por la pendiente local (Paoli y Giacosa, 1983) hasta llegar a las depresiones naturales (lagunas y bajos temporarios), produciendo el anegamiento del sector. Para eventos de recurrencias importantes, dichos espacios de amortiguación incrementan sus niveles hasta el desborde, anegando la zona aledaña y/o pudiendo conectarse con otras lagunas a través de los esteros y cañadas.

Cabe destacar que los fenómenos hidrológicos son los mismos tanto para zonas llanas como para zonas de relieve, pero las variables que lo componen asumen una importancia e interrelación diferentes en cada uno de éstos, siendo la principal diferencia el lapso en el cual actúan las mismas (Paoli y Giacosa, 1983).

Con respecto al balance para una tormenta para una cuenca hidrológicamente aislada (situaciones que se presentan en este trabajo), por tratarse de un intervalo de tiempo corto, el planteo de la cuantificación de las variables del ciclo hidrológico se considera:

$$P = \Delta F + \Delta S + I + A_s \quad (1)$$

Es decir, el enfoque del trabajo involucra los procesos de precipitación (P), intercepción en follaje (F) y superficial (S), infiltración (I) durante el evento y escurrimiento superficial ( $A_s$ ), procesos considerados predominantes durante un evento lluvioso y mayormente causantes de amenazas de inundación con el consiguiente riesgo hídrico.

Dicho esto, se remarca que el estudio no contempla la evaluación directa de procesos de evapotranspiración, exfiltración, recarga, escurrimiento subterráneo, ni tampoco almacenamiento de humedad de suelo ni almacenamiento subterráneo; siendo las mismas

introducidas como condiciones iniciales y de borde para el correcto análisis por evento.

### **Perturbaciones antrópicas**

La instalación del hombre en las llanuras ha alterado el ciclo hidrológico de estos sistemas (Fuschini Mejía, 1994). Si bien la inundación es producida por precipitaciones considerables, también puede ser coproducida por la acción humana al alterar de diversas maneras el equilibrio del mismo.

Una modificación importante que el hombre produce en el paisaje (actualmente en muchos casos de manera incorrecta) es la sustitución de cobertura vegetal nativa por cultivos de cereales, oleaginosas, pasturas, etc. Los cambios en la vegetación natural por otras implantadas producen una gran fragilidad en los SHNT, recordando principalmente las componentes verticales del ciclo hidrológico, dentro de las cuales se encuentra la humedad del suelo y la evapotranspiración, dos componentes ligadas a la vegetación. Además, el tipo de técnica con el cual se siembran y se cosechan los cultivos, afecta el ciclo normal del agua precipitada, obteniendo en el peor de los casos la impermeabilización del suelo, lo cual genera más escorrentía directa.

Otro efecto importante para destacar es el producido por las conexiones mediante canalizaciones de lagunas y/o bajos temporarios, las cuales en muchos casos no son planificadas o son clandestinas. Estas acciones disminuyen las superficies de agua acumuladas, con lo cual generan una mayor escorrentía superficial y en un tiempo mucho menor al natural, produciendo el colapso del sistema aguas abajo.

Sumado a estas perturbaciones, en nuestra región se presenta una planificación escasa para la regulación de los excedentes hídricos superficiales, falta de ejecución de proyectos de obras, desconocimiento del comportamiento de los sistemas hídricos y falta de información hidrológica seriada, entre otros (Riccardi et al., 2008).

### **Cambio climático en los Sistemas Hidrológicos (SH): riesgos hidroambientales**

La definición de cambio climático (CC) provista por el artículo N°1 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) (1992) expresa que cambio climático, es un cambio del clima adjudicado a la actividad humana que modifica las características de la

composición de la atmósfera mundial y se acopla a la variabilidad normal del clima observada en periodos de tiempo comparables.

En el Sexto Informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) (2021), más específicamente en el aporte del Grupo de Trabajo 1, se aborda una comprensión física de CC, recopilando los últimos avances en la ciencia del clima y combinando múltiples líneas de evidencia. Se ha incorporado, además, con objeto de brindar un análisis tanto espacial como temporal flexible ya sea de la información sobre el CC basada en datos como de los resultados de la evaluación, un Atlas interactivo (Gutiérrez et al., 2021).

En el Atlas, para la región Sur-Este de América del Sur, se presentan los coeficientes de incrementos de precipitaciones máximas, de 5 días de duración, los cuales fueron adoptados en este trabajo, mostrándose en la Tabla 1.

**Tabla 1. Coeficientes de incrementos de Precipitaciones máximas de 5 días de duración. CMIP6-Coupled Model Intercomparison Project Fase 6 (Gutiérrez et al., 2021) Región: Sur-Este de América del Sur.**

Escenario	Calentamiento (°C)	Coefficiente CC
ECC1	1.5	1.06
ECC2	2.0	1.10
ECC3	3.0	1.20
ECC4	4.0	1.30

ECC: escenario de cambio climático

Respecto al riesgo, Natenzon (2017) realiza un abordaje del mismo, describiendo a los componentes del mismo: peligrosidad es definida como una potencialidad que requiere de conocimientos sobre los aspectos físicos-naturales del proceso desencadenante, vulnerabilidad como producto de estructuras sociales que requieren conocer los aspectos socioeconómicos del estado antecedente de los grupos involucrados, exposición como el impacto material que demanda del conocimiento de aspectos territoriales y poblaciones; y a la incertidumbre, formando parte de las perspectivas/decisiones, necesitando conocer los aspectos políticos, imaginarios y representaciones de los grupos sociales involucrados.

El IPCC para su último informe de evaluación, realiza una definición de riesgo con el objeto de que el uso del concepto entre sus colaboradores sea

completamente coherente, y permita una comunicación eficaz. Lo define como un potencial de consecuencias adversas para los sistemas humanos o ecológicos, aceptando la variedad de valores y metas asociadas a tales sistemas. Además, define que, en el marco de CC, el riesgo puede originarse de los impactos potenciales del CC como así también de las respuestas humanas al CC (Reisinger et al., 2020).

### **Caracterización del sistema hidrológico de llanura Las Encadenadas**

Debido a que el sistema hidrológico de interés no se encuentra muy estudiado, se inicia el trabajo caracterizando al mismo, con el objeto de comprender primeramente el comportamiento de éste frente a eventos conocidos, y posteriormente pronosticar su desenvolvimiento frente a eventos futuros acrecentados por CC.

### **Ubicación**

El SHNT Las Encadenadas se encuentra ubicado en Argentina, al sur de la provincia de Santa Fe, en el departamento General López (Figura 1). El mismo abarca completamente los distritos de San Eduardo y Venado Tuerto. A su vez, en menor proporción, comprende los distritos de: Maggiolo, Murphy, San Francisco, Cafferata, La Chispa, Carmen, Chapuy, Sancti Spíritu, María Teresa, Santa Isabel, Elortondo, Villa Cañas y Teodelina; teniendo como punto de cierre del mismo esta última localidad.

Es atravesado por las rutas nacionales N° 8 y N° 33, las rutas provinciales N°: 14, 15 y 94, las rutas secundarias: 2-S, 3-S, 4-S, 5-S, 7-S y 8-S; y las líneas San Martín y Mitre del ferrocarril.

Los límites hidrológicos del área de estudio de noreste a sureste son: cuenca del río Carcaraña, cuenca del arroyo Saladillo, cuenca superior del arroyo Pavón, cuenca de la laguna de Melincué y cuenca del río Arrecifes. De noroeste a suroeste son: cuencas de lagunas endorreicas y cuenca del río Salado brazo sur (Giraut et al., 2008).

### **Clima**

El clima de la región de estudio es definido como templado húmedo con estación seca. Si bien esta definición parece contradictoria, responde a las estadísticas sobre las condiciones climáticas imperantes en esta zona: clima C (templado), a (húmedo) y w (invierno seco) (Martín, 2014). Las precipitaciones medias anuales de la región rondan los 1000 mm.

Además, se destaca que en esta zona se presentan dos principales tipos de tormentas: las de frente frío y las de calor o verano. Se producen en promedio 56

cambios de tiempo al año. Salvo contadas excepciones, las tormentas siempre se producen poco antes o durante el cambio de tiempo (Martín, 2014).

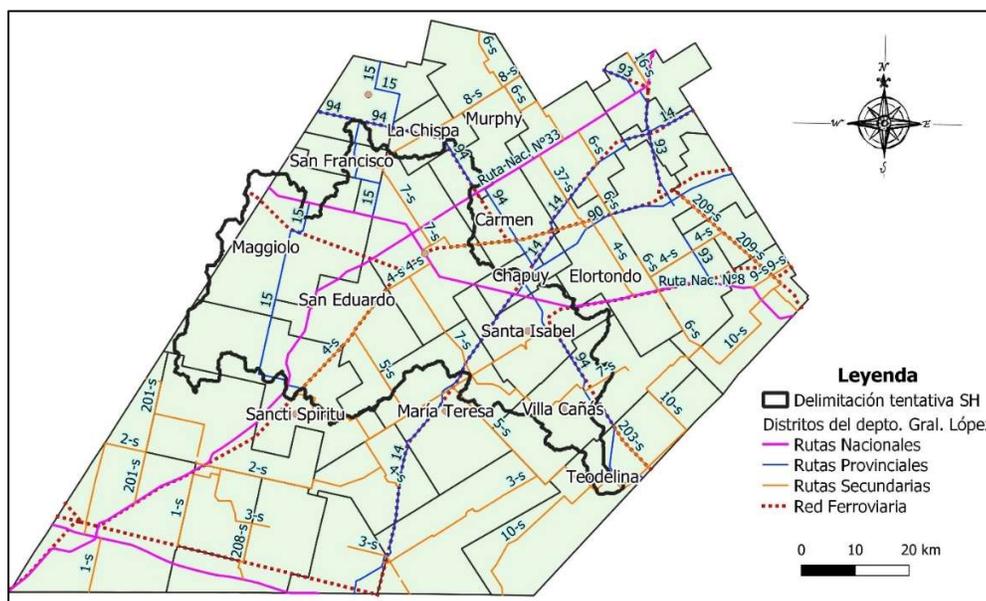


Figura 1: Ubicación geográfica del SH Las Encadenadas.

## OBJETIVOS

El objetivo general es estudiar la dinámica hídrica del SH de llanura, mediante la conceptualización de los procesos relevantes involucrados y la simulación hidrológica correspondiente; incorporando la incertidumbre asociada a diferentes escenarios de CC.

Asimismo, se plantean como objetivos específicos, analizar el impacto para diversos escenarios de lluvia, determinando las zonas afectadas en términos de áreas anegadas y permanencias (caracterización de impacto de inundaciones) para el estado actual del clima y para hipotéticos estados futuros frente a la influencia del CC.

Se optó por simular la dinámica de los procesos de almacenamiento y escurrimiento superficial asociados a eventos de lluvias máximas de varios días de duración, similares a eventos de lluvia ya acontecidos en la zona de estudio, los cuales han puesto en emergencia diferentes vías de comunicación y poblaciones dentro de la cuenca.

Algunos tópicos tales como almacenamiento, elaboración, análisis y recuperación de gran cantidad

de información espacialmente distribuida, gestionada mediante sistemas de información geográfica (SIG) y su combinación con modelos hidrológicos son asimismo objetivos importantes de este trabajo.

Se consideran además como objetivos importantes la transferencia al medio de metodologías de evaluación apropiadas para la planificación y gestión de los recursos hídricos de la región, haciendo por lo tanto hincapié en la aplicación del estudio en el SH Las Encadenadas, ubicado en el sur de la Provincia de Santa Fe.

## MATERIALES Y METODOLOGÍA

En lo que respecta a Materiales, a modo de resumen se indica que es empleada información básica para realizar la simulación hidrológica/hidráulica del sistema de estudio, como ser: modelo digital de elevación (DEM), mapas de tipologías y usos del suelo, imágenes satelitales, canalizaciones, alcantarillas intervinientes, registros históricos de lluvias, temperatura, viento, humedad, etc. Se destaca que dicha información es adquirida conforme métodos clásicos de recolección y mediante productos provenientes de la teledetección.

En cuanto a Metodología, son utilizadas herramientas de geomática, principalmente para la preparación de información espacial. Respecto a la simulación hidráulica del sistema de estudio, es empleado el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado VMMHH 1.0.

### **Constitución del modelo VMMHH 1.0**

El VMMHH 1.0 está compuesto por un modelo hidrológico-hidráulico (Riccardi, 2001) y una plataforma computacional (Stenta et al., 2005).

La modelización del SH se encuentra constituida por elementos del tipo Valle y Río, los cuales representan en este caso, porciones de planicies y canalizaciones/cañadas presentes en el mismo. Además, son presentadas las diferentes vinculaciones entre los elementos.

Cada uno de los elementos que componen el SH contiene información característica del área que representan, en el caso de elementos del tipo Valle, contienen información como ser: coordenadas, altura del terreno y coeficiente de rugosidad de Manning. En cuanto a los elementos de tipo Río, contienen además de la información requerida para elementos Valle, ancho de base, talud y profundidad del canal. Conjuntamente, con la finalidad de representar situaciones semejantes a la realidad, los elementos contienen alturas iniciales de agua, cuando así lo requiere la representación del evento.

Otro factor para considerar en la modelización es el contenido humedad inicial en los elementos. En el modelo hidrológico-hidráulico de elementos, al definir el Número Curva (CN) al inicio de una tormenta real o de proyecto, se define el complejo suelo-vegetación más una aproximación a la humedad antecedente en cada elemento de discretización. Si bien en el modelo la señal de entrada es la lluvia neta, esta variable se deduce a partir de la precipitación total y el CN calculado inicialmente a partir de una condición media (CN II) y luego llevada a una condición real [CN entre condición I (seca) y III (saturada)] que representa la humedad inicial antecedente para un evento.

### **Información geomorfológica**

#### **Corrección altimétrica del DEM**

En lo que respecta a materiales, fue utilizado el DEM obtenido por la misión SRTM (Shuttle Radar Topography Model) de 90 m de resolución espacial, de

la cual se utilizaron cuatro escenas; y puntos acotados del Instituto Geográfico Nacional (IGN), los cuales presentan valores altimétricos precisos, referenciados sobre el nivel del mar, para el área de estudio. Los softwares empleados fueron QGIS y GRASS GIS.

En cuanto a la metodología, debido a que el modelo puede presentar ciertas diferencias con la altimetría real del terreno, son realizadas diferentes correcciones al mismo. Para iniciar con dichas correcciones, es efectuada la unión de las cuatro escenas del DEM-SRTM y luego es exportada al software GRASS-GIS para aplicar correcciones con herramientas específicas para DEM's.

La primera operación de correcciones altimétricas realizada al modelo es Relleno de vacíos y depresiones, la cual corrige las falsas depresiones encontradas en el DEM. Seguidamente, es aplicado un filtro de paso bajo de ventana móvil, con el objeto de eliminar ruidos en el ráster.

Luego de estas correcciones, con motivo de corroborar la validez de los valores altimétricos del modelo, es realizado un análisis de regresión lineal simple para puntos seleccionados del DEM, los cuales se contrastaron con puntos acotados provistos por el IGN con objeto de identificar una relación entre las variables.

Se destaca que la correlación obtenida entre los 336 pares de valores del modelo SRTM y del IGN fue formidable, con un valor  $R^2 = 0.99$ , un error porcentual del sesgo de 0.001 y una desviación de la raíz media cuadrada de 1.61, lo cual indica que la corrección es acertada.

Finalizadas las correcciones altimétricas, debido a que el DEM poseía un sistema convencional que es empleado para la representación de la cartografía a nivel mundial (EPSG: 4,326 - WGS 84), el mismo fue proyectado a coordenadas planas (para la zona de estudio se utilizó WGS 84 - UTM zona 20-S, codificación: EPSG 32,720) con el objeto de trabajar con coordenadas precisas y unificar el sistema con los mapas de suelos y usos del suelo. A su vez, éste fue resamplado a píxeles de 100 m x 100 m, puesto que el software QSWAT+, el cual se detalla posteriormente, se ejecuta con mosaicos de iguales valores en x e y.

#### **Generación de batimetrías**

Para realizar una interpretación batimétrica marginal del sistema de estudio, y que la misma resulte

funcional a la simulación hidrológica, fueron empleados los siguientes recursos: Imágenes satelitales Landsat, Software ENVI 4.8 (para el procesamiento y análisis de imágenes geoespaciales), Software QGIS, Software R (para el análisis estadístico y gráfico), DEM ajustado e información batimétrica proveniente de EVARSA (1995).

En cuanto a la metodología, la misma se inicia con la identificación de las lagunas pertenecientes o circundantes al SH de estudio, posteriormente se trabaja con imágenes satelitales de diferentes fechas para ver el comportamiento de las mismas con el paso del tiempo y extraer en forma de máscaras de agua sus geometrías. Para finalizar, se contrastan dichas máscaras con información altimétrica del DEM, logrando de tal manera una batimetría marginal de las lagunas (Soria et al., 2017). Cabe destacar que para las lagunas presentes en el estudio de EVARSA (1995) se pudo además cotejar la información de manera visual con los relevamientos topobatimétricos presentes en el mismo. Las lagunas seleccionadas para realizar el estudio batimétrico marginal fueron elegidas conforme pertenencia o cercanía a la delimitación actual del SH, puesto que en esta instancia no se tiene una delimitación concluyente del SH, pudiendo lagunas cercanas aportar agua pluvial al mismo.

#### **Delimitación marginal del SH de estudio**

Para realizar la delimitación del sistema de estudio fueron utilizadas las siguientes herramientas y materiales: Mapa de delimitación del SH del Instituto Nacional del Agua (INA) (Giraut et al., 2008), Mapa de delimitación del SH del Ministerio de Infraestructura y Transporte, Secretaría de Recursos Hídricos, Subsecretaría Operativa, Dirección Provincial de Coordinación de Comité de Cuencas, Dirección General de Comité de Cuencas y Talleres; Capa delimitación de la parte alta del SH Las Encadenadas (Soria, 2019), complemento QSWAT+, el cual es una herramienta de evaluación de suelo y agua para el manejo de cuencas (Soil & Water Assessment Tool [SWAT], 2019); y el DEM calibrado y modificado conforme el estudio de batimetrías como material de ingreso al software.

En cuanto a la metodología, inicialmente al disponer de dos delimitaciones del SH que se encontraban en formato pdf, fue empleado el software QGIS para realizar la georreferenciación de las mismas y posteriormente el trazado en formato vectorial; pero al no ser las delimitaciones coincidentes y, con motivo de comprender fehacientemente el comportamiento

del agua proveniente de precipitaciones en el SH, es realizada la delimitación del mismo mediante software y complemento citados. Como insumo de dichas herramientas es empleado el DEM con las correcciones presentadas hasta el momento.

Realizada la delimitación, la cual fue ejecutada con procedimientos similares (Soria, 2019), es notado que la misma incorpora el SH cerrado aledaño. Esto es así puesto que el mecanismo de delimitación se basa en la búsqueda de caminos de flujo, no considerando los sistemas cerrados como una posibilidad sino forzando su camino a una salida. Debido a que se tiene poca información sobre el comportamiento del sistema aledaño, y que no es de descartar una posible unión de ambos sistemas para recurrencias de años elevados, se ha decidido conservar dicha delimitación para el estudio, resultando al finalizar las simulaciones hidrológicas-hidráulicas para distintas recurrencias, la delimitación final.

Además, conforme la asistencia de imágenes satelitales actuales, fueron detectadas canalizaciones en los bordes del SH las cuales vierten sus aguas pluviales dentro del mismo y zonas de dudoso escurrimiento, con lo cual debieron ser anexadas para su análisis.

En la Figura 2 pueden apreciarse las delimitaciones mencionadas.

#### **Discretización del DEM corregido y determinación de rangos numéricos componentes de las subcuencas**

El software de simulaciones hidrológico-hidráulicas necesita como información de ingreso valores altimétricos puntuales representativos del SH, los cuales deben estar equidistantes en sus dos direcciones del plano.

Puesto que hasta el momento se venía trabajando con el DEM, el cual es en formato ráster, se debió realizar la discretización de dicha información conforme los lineamientos del software de simulaciones.

El modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado VMMHH 1.0, permite la caracterización mediante categorías de distintos sectores de la cuenca, tanto para diferenciar características del suelo y cobertura, como para distinguir el impacto de los eventos climáticos en distintas áreas. Para este estudio, las categorías fueron adoptadas como representación de las distintas subcuencas presentes en el SH.

Debido a que la numeración de los elementos de la discretización del SH están dados conforme su aparición en el plano, de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo; y que, las subcuencas presentan formas irregulares

conforme su naturaleza hidrológica, hubo que realizar un reconocimiento de los valores identificatorios de elementos presentes en cada una de las subcuencas y agruparlos en rangos conforme su correlatividad.

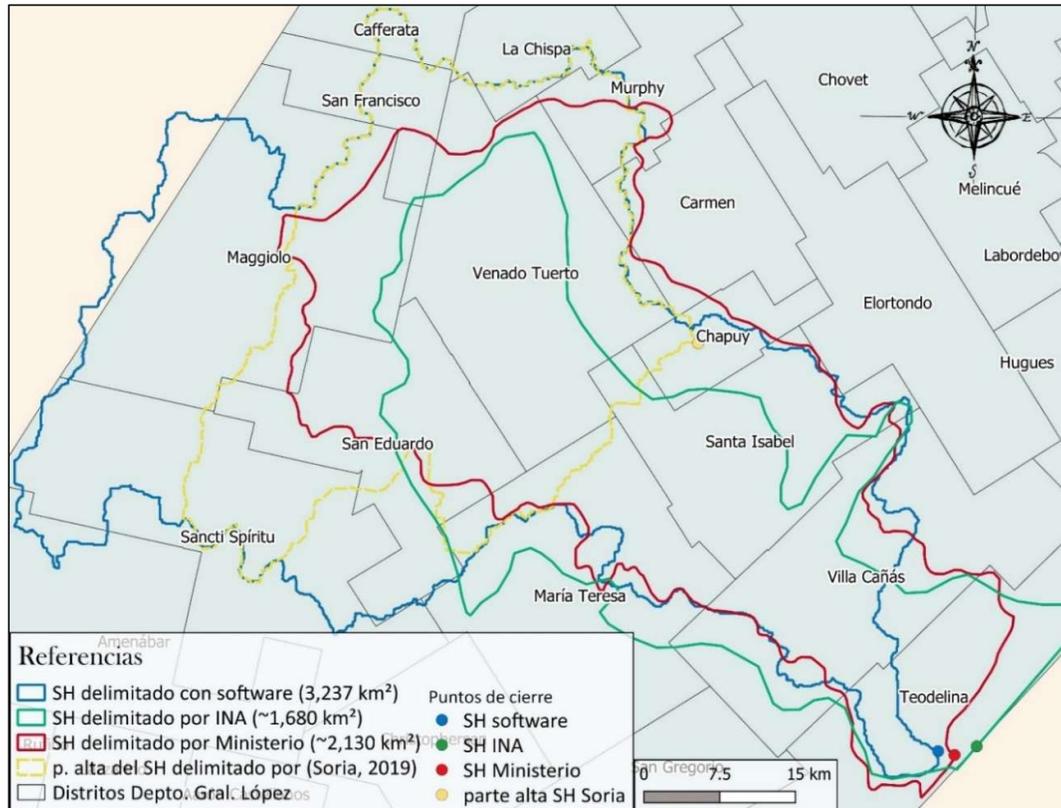


Figura 2: Comparativa de delimitaciones para el SH de estudio.

### Información hidrológica

Al iniciar con el tratamiento de la información hidrológica, son obtenidas las divisiones en subcuencas, resultado de la tipología de suelos presentes en el área de estudio el uso que se le da al mismo y la altimetría del terreno. Para la tipología de suelos se trabajó con el mapa confeccionado por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (Espindola et al., 2014); y respecto a los usos del suelo, fue utilizado el producto Land Cover de MODIS (Friedl et al., 2010). Cabe destacar que las subcuencas son identificadas meramente a los efectos de diferenciar los distintos tipos de suelos, usos y pendientes; no así para la modelación del escurrimiento superficial, ya que el modelo implementado en este estudio no necesita que se delimiten subcuencas para representar la dinámica del escurrimiento.

Seguidamente, es ubicada geográficamente preparada la información climatológica, la cual se presenta, a excepción de la información pluviométrica, de carácter mensual, debiendo ser transformada a diaria para poder efectuar la simulación hidrológica. En cuanto a la información pluviométrica, la misma es recabada de la estación meteorológica ubicada en Venado Tuerto (VT), perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional (SMN), y de una Estación particular de la localidad de Villa Cañas (VC); siendo ambas ciudades pertenecientes al área de estudio y poseyendo un registro pluviométrico que data desde 1989. Cabe destacar que, debido a que la información pluviométrica de la localidad de Villa Cañas es proveniente de una estación particular, no adquiriendo rigor de información oficial, debió efectuarse un análisis de consistencia (Basile, 2008), el cual manifestó una marcada proporcionalidad

entre ambas, no observándose ningún tipo de quiebre significativo y con un valor de  $R^2 = 0.9988$ , lo cual se traduce en una efectiva consistencia de los datos de la estación VC.

Posteriormente, son obtenidos mediante simulación hidrológica los valores de cada una de las variables del ciclo hidrológico para el período de análisis. El software empleado para la obtención de los valores promedio de las variables es QSWAT+. El mismo simula al ciclo hidrológico basándose en la ecuación de equilibrio del agua. Para la infiltración, considera que la tasa inicial depende del contenido de agua en la superficie terrestre y la final a la conductividad hidráulica saturada de la tierra. Para determinar la humedad del suelo, utiliza una técnica que predice el flujo por cada capa de tierra en la zona principal; ocurriendo la filtración cuando se excede la capacidad de espacio de una capa de tierra y no se presenta saturada la siguiente inferior. Para la evapotranspiración, computa por separado la evaporación de plantas y suelos, utilizando funciones exponenciales de profundidad de suelo y contenido de agua para evaporación de agua en el suelo; y simulando como una función lineal de la evapotranspiración potencial e índice de área de hoja a la transpiración de la planta. Para la evapotranspiración potencial, presenta tres métodos opcionales para la estimación: Hargreaves, Priestley-Taylor y Penman-Monteith (empleando este último para el cálculo). En cuanto a la simulación de la escorrentía, utiliza una modificación del método de Número Curva del Servicio de Conservación de Suelos (Uribe, 2010).

Para la calibración del balance, fue considerado el primer año de datos (1989) de simulación como calibración. Cabe destacar que la obtención de las variables del ciclo hidrológico, no sólo son importantes para la caracterización del SH, sino que también son fuentes de ingreso a las simulaciones hidrológicas-hidráulicas de eventos puntuales realizadas más adelante.

Para finalizar, son estimados los valores de CN en condición media para cada uno de los meses en cada una de las subcuencas, con el objeto de definir el complejo suelo-vegetación y una aproximación de la humedad antecedente del suelo. Esta información es requerida para determinar los hietogramas netos, los cuales alimentan al modelo. Para la estimación de los valores de CN de cada una de las subcuencas que componen el SH de estudio es utilizada información del tipo hidrológico de suelo, del uso de la tierra y

tratamiento, y condición previa de humedad; la cual ya fue generada. Obtenido el resultado, fue realizado el promedio mensual de CN para cada una de las de las unidades presentes, los cuales fueron verificados con los valores brindados en Tipos de complejos hidrológicos y números de escurrimiento respectivos para condición II (media) del libro Hidrología, procesos y métodos (Orsolini et al., 2008).

### **Información sobre canalizaciones**

Debido a la escasa información sobre canalizaciones presentes en el sistema de estudio, son empleadas metodologías de análisis espacial, mediante el software QGIS, tanto para identificar los canales presentes como así también para extraer información característica de los mismos.

### **Información sobre alturas iniciales**

Puesto que no se dispone de información directa sobre alturas de agua en el SH, debieron utilizarse técnicas de teledetección y SIG para obtener las mismas. A grandes rasgos, la metodología consiste en clasificar imágenes satelitales radar en coberturas de agua/no agua y analizar las superficies de agua: conforme el valor altimétrico del terreno en el elemento de mayor altura que contempla el cuerpo de agua, asignar tirantes a los restantes elementos; realizando este procedimiento para cada uno de los cuerpos de agua presentes en el evento de análisis.

En lo que concierne a herramientas para desarrollar esta metodología, a modo de resumen se menciona principalmente el software SNAP, el cual es empleado para la manipulación de las imágenes satelitales radar, el software QGIS para la extracción de la información proveniente de las imágenes satelitales radar, y hoja de cálculo de Microsoft Excel, para el tratamiento final de la información.

Con respecto a los materiales, insumos de los softwares, son utilizados los productos L1 Detected High-Res Dual-Pol (GRD-HD) del satélite radar Sentinel 1 para distintas fechas; y el DEM SRTM de 90 m de píxel corregido.

### **Selección de eventos para la simulación del SH**

La selección de eventos climatológicos para el área de estudio debió ser realizada conforme dos factores: por un lado, los períodos de búsqueda de información pluviométrica debieron ser ajustados acorde a la disponibilidad de registros históricos de lluvias de las

localidades de Venado Tuerto y Villa Cañas, de las cuales se dispone información desde el año 1989; y el otro motivo, severamente limitante a la hora de elegir los eventos puesto que de él depende la calibración de las simulaciones, fue el de la disponibilidad de imágenes satelitales radar, de las cuales existe un registro que inicia a finales de 2014. Cabe aclarar que se utilizaron únicamente imágenes radar debido a que las imágenes satelitales ópticas, si bien poseen un archivo histórico considerablemente mayor al de las imágenes radar, se presentan cubiertas con nubes en la totalidad de las fechas en las cuales se registra precipitación.

Por estas cuestiones, los eventos climatológicos seleccionados para la simulación del comportamiento del SH fueron los siguientes:

*Evento N° 1:* Se inicia la simulación del mismo el 21 de diciembre de 2016, con una primera calibración de ajuste para el día 02 de enero de 2017 y una calibración de cierre del evento el día 14 de enero de 2017. Dicho evento presentó una precipitación total de 347 mm para la localidad de Venado Tuerto y 363 mm para la localidad de Villa Cañas. Es el evento de mayor magnitud presente en el rango de estudio, y a su vez, un evento notable para la región, que puso en emergencia hídrica la zona, afectando numerosas poblaciones y vías de comunicación.

*Evento N° 2:* De inicio con fecha 10 de octubre de 2016 y culmina el 22 de octubre de 2016. Este evento presentó una precipitación total de 57 mm para la localidad de Venado Tuerto y 52 mm para la localidad de Villa Cañas. En cuanto a magnitud es un evento leve, distribuido en el tiempo, resultando útil su análisis para la calibración de eventos de baja recurrencia.

Cabe aclarar, que las fechas de inicio de los eventos son dadas conforme las fechas de las imágenes satelitales radar utilizadas en las asignaciones de alturas iniciales de agua del SH.

#### **Simulación de eventos climatológicos antecedentes**

Los procedimientos efectuados aquí, son meramente realizados con el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado VMMHH 1.0.

#### **Ingreso de información altimétrica**

Para dar inicio a las simulaciones, es ingresada como primera información el DEM corregido, el cual además posee ejecutadas las batimetrías de las lagunas presentes. Cabe recordar que los valores de dicho DEM se presentan discretizados en valores

puntuales, en forma de malla, numerados de izquierda a derecha y de norte a sur, con una separación entre puntos de 100 m en ambas direcciones.

#### **Adjudicación de Número de Curva CN**

En esta etapa, son ingresados los valores de CN normales (condición II) a cada rango numérico conforme la subcuenca que integra y el mes en el cual es desarrollada la simulación.

#### **Especificación de coeficientes de rugosidad de Manning**

En cuanto a las rugosidades de Manning, fue utilizado en esta instancia un valor general, representativo de todas las subcuencas presentes en el SH. El mismo fue obtenido del manual de Hidrología Aplicada (Chow et al., 1994) como un promedio de los valores para las descripciones de planicies de inundación compuestas de pastos y cultivos ( $0.035 \text{ s/m}^{1/3}$  y  $0.040 \text{ s/m}^{1/3}$ , respectivamente). Cabe aclarar que estos valores son particulares, formando parte de un conjunto mayor con los cuales fue realizado el análisis de sensibilidad, el cual es descrito más adelante.

#### **Condición de borde**

La condición de borde seleccionada para la caracterización del punto de cierre del SH es una curva de descarga tipo Q-H, caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) versus altura de agua (m).

La misma se presenta en la Figura 3, obtenida a partir de información conforme obras de arte situadas en el punto de cierre del SH, siendo la misma brindada por la Sede de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Santa Fe en Venado Tuerto y corroboradas las secciones mediante salidas de campo. Se aclara que fue realizada una prolongación de la curva considerando situaciones en las cuales la cota de agua supere la cota de coronamiento de las obras de arte, escurriendo a superficie libre sobre el pavimento.

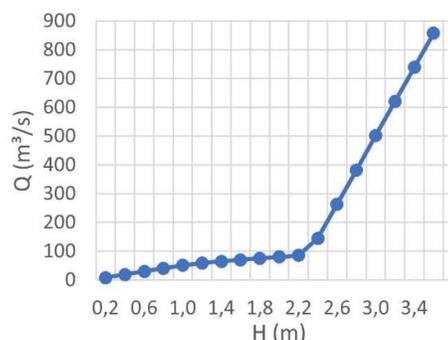


Figura 3: Curva Q ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) vs H (m).

Si bien no se cuenta con registro de caudales en el punto de cierre del sistema con los cuales poder cotejar los valores de la curva, se obtuvieron imágenes del evento de diciembre 2016-enero 2017, el cual es analizado posteriormente, lo cual permite una comparación marginal de tirante-caudal ocurrido frente a lo simulado.

### Asignación de precipitaciones

Los hietogramas ingresados a la simulación fueron obtenidos mediante información pluviométrica de las localidades de Venado Tuerto y Villa Cañas. Con la finalidad de que los hietogramas posean una buena representatividad en la cuenca, los mismos fueron asignados a las distintas subcuencas de acuerdo con su cercanía las mismas.

Debido a que el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado realiza la simulación del escurrimiento de la precipitación considerando la lluvia neta se realizaron procedimientos preliminares a la simulación con el objeto de descontar el agua precipitada que es retenida e infiltrada y lograr la precipitación neta.

En la Tabla 2 pueden apreciarse los resúmenes de lluvia para ambas estaciones.

Tabla 2. Resumen de lluvias para las estaciones VT y VC.

Evento/ Estación	Lluvia Total (mm)	Lluvia Neta (mm)
Evento 1 - VT	347	233
Evento 1 - VC	363	293
Evento 2 - VT	57	8
Evento 2 - VC	52	14

### Procesamiento y simulación

Como etapa previa a la simulación, debió realizarse el análisis de consistencia de datos, y conforme a su dictamen, continuar con la etapa de procesamiento o rever los errores informados. Seguidamente, se realizó el guardado de los archivos en formato dat.

Resulta apropiado mencionar que, en esta primera etapa de simulación (sin canalizaciones) son utilizados intervalos de procesamiento del orden de los 30 segundos, tiempo máximo en el cual las simulaciones se manifiestan estables.

Con los archivos dat generados, la simulación es ejecutada por fuera del modelo hidrológico-

hidráulico distribuido y físicamente basado, mediante un intérprete de comandos CMD. Cabe destacar que antes de iniciar la simulación, debieron ser modificados los archivos de alturas iniciales.

### Validación de las simulaciones

El SH Las Encadenadas, no posee registros históricos de caudales o de cotas de nivel de agua en secciones fijas de interés, con lo cual, realizar la validación de las simulaciones hidrológico/hidráulicas del mismo, se torna ciertamente más complejo. Debido a esta situación, y con el objeto de lograr simulaciones precisas del sistema, es utilizada parte de la metodología desarrollada para obtener alturas iniciales con el objeto de obtener una validación a través de la verificación de superficies de agua presentes en el SH. A modo de repaso, son utilizadas las imágenes satelitales radar clasificadas en agua/no agua y contrastada dicha información con la arrojada por la simulación, que también previamente es condicionada bajo la sentencia agua/no agua.

Resulta importante aclarar que la unidad areal de contraste son celdas (de 100 m x 100 m, en este caso) puesto que es la unidad con la cual trabaja el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado. Con respecto a las fechas de las imágenes satelitales radar, las mismas son elegidas conforme los eventos climáticos seleccionados y viceversa, es decir, son elegidos los eventos climáticos conforme la disponibilidad de imágenes satelitales radar.

El contraste de la información de alturas finales de agua en cada una de las celdas conforme la existencia de agua/no agua del producto logrado mediante imágenes satelitales radar (Soria et al., 2020) es efectuado luego de realizadas las simulaciones sin canalizaciones, para ambos eventos.

Dicha contrastación se realiza ingresando en una planilla de cálculo el archivo de alturas finales que arroja el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado y alistando en otra columna (previo alineamiento de la información por valores de coordenadas) la información del producto agua/no agua de la imagen radar para la fecha de estudio. La información de alturas brindada por el modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado es convertida a agua/no agua bajo el condicionante de que, para alturas de agua seleccionadas dentro del rango de 0.40 m a 0.60 m sean consideradas agua, y alturas inferiores como no agua. Cabe destacar que dicho rango de valores fue

designado luego de analizar la influencia que genera dicho valor en los resultados de la contrastación. Se debe tener en cuenta que este tirante de agua responde a una esquematización de almacenamiento y conducción dentro del elemento; con lo cual la altura inicial en la que se considera como agua, resulta menor en la realidad al encontrarse dispersa por toda el área del elemento; por tal motivo las alturas inferiores a ese rango son consideradas no agua.

Luego de asignada la altura en la cual las celdas son consideradas con agua, es realizada una clasificación de dichas celdas conforme las siguientes premisas: la celda es considerada con agua tanto en la simulación como en la máscara de agua, la celda es considerada sin agua tanto en la simulación como en la máscara de agua, la celda es considerada como agua sólo en la simulación; y la celda es considerada como agua sólo en la máscara de agua. Realizado esto, la planilla es exportada a formato .csv e ingresada al software de SIG. Para finalizar, es realizado un mapeo de este análisis, lo cual permite una mejor interpretación de las no coincidencias.

Debido a que existen algunas subcuencas en las cuales la modelización no presenta un ajuste adecuado conforme la realidad, resulta necesario realizar la modelización del SH con el agregado de canales existentes, siendo seleccionados primordialmente los pertenecientes a las zonas de menor ajuste. Además, con el objeto de lograr alta precisión tanto espacial como del caudal saliente, se realizaron diversas simulaciones del SH con las canalizaciones, en las cuales se variaron los valores de rugosidad de Manning tanto para las canalizaciones como para los valles de inundación. Se realizaron simulaciones con diferentes combinaciones de rugosidades en celdas río y celdas valle, basadas en los rangos numéricos establecidos de acuerdo a las características de las celdas: canales de tierra, serpenteantes y lentos, con pastos y algunas malezas; y planicies de inundación con coberturas desde pastizales hasta cultivos en sus diferentes etapas.

Como resultado se obtuvo que, las simulaciones que contienen valores de rugosidad de valle mínimos-medios dentro del rango de las rugosidades consideradas para campos cultivados, en cualquiera de los estados en los que se presente: sin cultivo, cultivos alineados y cultivos maduros (Chow, 2004) son las que producen los mayores picos de caudales a la salida del sistema (hasta 800 m<sup>3</sup>/s). Además, las simulaciones que consideran los valores mínimos-

medios de rugosidad dentro de la categoría seleccionada de canales excavados con pala con poca vegetación (Chow, 2004) también incrementan dichos valores. Esta situación de caudales pico tan elevados no es representativo de la realidad puesto que, al observar la curva Q vs H de cierre del sistema y el posicionamiento de las alcantarillas, esos caudales pico representarían tirantes superiores a 0.50 m de agua sobre la calzada, situación que no ha ocurrido. Por tal motivo, y debido a un mejor ajuste espacial, fueron seleccionadas como más representativas las rugosidades de 0.033 para río y 0.050 para valle.

Cabe recordar que los tiempos de traslado de la escorrentía son validados indirectamente, mediante la contrastación de las superficies de agua arrojadas por el software y las presentes en la clasificación de las imágenes satelitales, para diferentes fechas, dentro de la ocurrencia del evento de análisis.

La Figura 4, corresponde a la respuesta de la calibración de la simulación para el Evento N° 1, con las canalizaciones seleccionadas, las rugosidades definidas y; al igual que en las simulaciones sin canalizaciones, el tirante para que una celda sea considerada agua, definido. En las mismas puede apreciarse que, en color azul se presentan las áreas en las cuales realmente había agua en la superficie, de acuerdo con la imagen satelital radar, y también la simulación arroja como resultado agua. En color beige, se presentan las zonas en las cuales no había agua para ese evento y tampoco lo considera agua la simulación. En color celeste, se presentan las superficies en las cuales no había agua según la imagen satelital radar, pero que la simulación considera como agua; y en color terracota, en las cuales sí había agua en superficie pero que la simulación no las considera agua.

Además de la clasificación expuesta, se presenta una categorización la cual se encuentra basada en las diferencias entre la simulación sin canales y la simulación con canales. La misma, hace un discernimiento entre las superficies consideradas como agua en la simulación con canales, y que anteriormente en la simulación sin canales no existían como agua (en color magenta) es decir que desmejoró el ajuste de la simulación puesto que no era agua en realidad; y las superficies que figuraban como agua en la simulación sin canales, y que en la simulación con canales desaparecieron (en color amarillo), resultando una mejora en el ajuste ya que como en el caso anterior, no era agua en la realidad.

En la Figura 5 se presenta el hidrograma en el punto de cierre del SH, obtenido de la simulación del Evento N° 1, con las canalizaciones anexadas y el ajuste de las rugosidades.

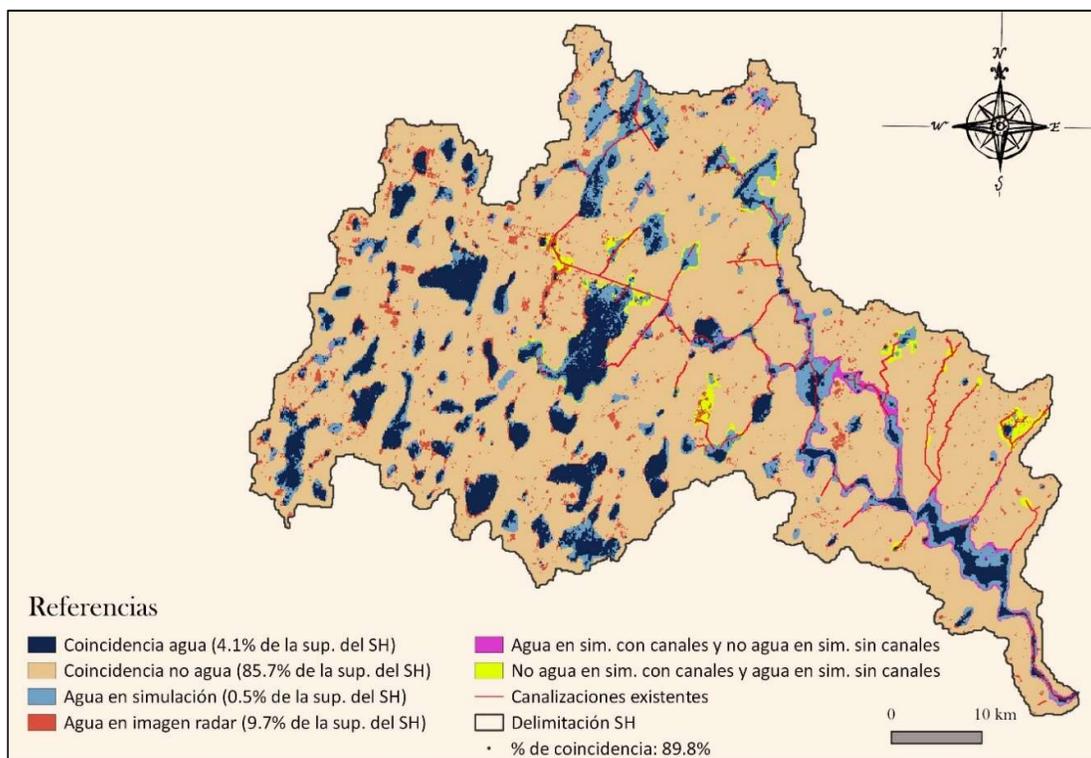


Figura 4: Mapa de contraste de respuestas de Evento N° 1, con canalizaciones y rugosidades ajustadas, para la fecha 14 de enero de 2017.

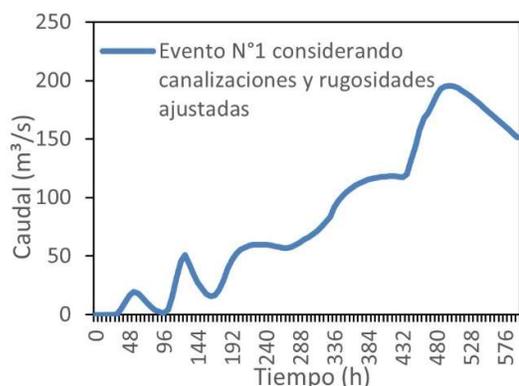


Figura 5: Hidrograma en punto de cierre obtenido de la simulación calibrada del Evento N° 1.

Como puede apreciarse en la Figura 4, en varios sectores en los cuales fueron agregados canales, se notan mejorías. También, se observa que en la zona de escurrimiento más definida que posee el sistema, se presenta un desborde mayor al de la simulación sin considerar canales y, que resulta real de lo

acontecido. Conforme a lo observado y de acuerdo con las superficies de cada una de las clases analizadas, se manifiesta que la calibración del sistema y consecuentemente las predicciones del comportamiento del mismo frente a diversos eventos climáticos poseen un grado de certeza superior al 86%.

Además, se tiene que, para estas representaciones del SH calibradas, en el Evento N° 1 se presenta un pico máximo en el escurrimiento ~ 200 m³/s a las 510 h de iniciada la simulación; y el Evento N° 2 un pico máximo de 2 m³/s a las 258 h.

En cuanto a los tiempos de respuesta del SH arrojados por el software de simulación hidrológica-hidráulica, si bien los mismos no pudieron ser verificados directamente debido a la inexistencia de lecturas de caudales en el punto de cierre, para dichos eventos; pudieron ser cotejados marginalmente para estas fechas de calibración, mediante la visualización de incrementos y decrementos de las superficies de agua

del cauce próximo al punto de cierre a través de las imágenes satelitales correspondientes a dichas fechas de análisis.

### **Aplicación de VMMHH 1.0 en eventos extremos ante cambio climático**

#### **Determinación de lluvias para diferentes recurrencias**

Para la selección de las recurrencias de precipitaciones se utilizaron las series históricas de la localidad de Venado Tuerto y de Villa Cañas, las cuales ya fueron descritas con anterioridad. Acorde a la escala de trabajo, fueron analizadas las recurrencias de 25, 50 y 100 años; estableciendo como duración de la tormenta (D) 120 h.

Para iniciar con la selección de las recurrencias, se extrajeron de cada año y para cada estación, las precipitaciones máximas de duración igual a 24, 48, 72, 96 y 120 h. Posteriormente, mediante el software de inferencia estadística AFMULTI (Paoli et al., 1996) se realizaron ajustes a las series de precipitaciones máximas conforme los modelos probabilísticos: LogGauss (Galton), Gumbel, GEV, Pearson, LogPearson y Exponencial, obteniendo así las recurrencias de precipitación. Además, con motivo de obtener el modelo de predicción de mejor ajuste a las series de estudio, se efectuaron gráficos de probabilidad de excedencia, para ambas estaciones.

Conforme las pruebas de bondad de ajuste realizadas, todos los modelos son considerados como válidos; pero con motivo de seleccionar uno de los mismos, para realizar las curvas Precipitación-Duración-Recurrencia (PDR) y posteriormente realizar los hietogramas de análisis, se ha escogido el modelo de LogPearson, el cual presenta un mejor ajuste de manera general para las distintas recurrencias y duraciones.

#### **Hietogramas de lluvia para distintas recurrencias considerando cambio climático**

Para la confección de los hietogramas de lluvia para distintas recurrencias considerando CC es utilizado el método de bloques alternos (Orsolini, 2008). En el mismo, son utilizadas las curvas P-D-R presentadas anteriormente.

Posteriormente, en dichos hietogramas se aplicaron coeficientes de incremento de precipitación, los cuales fueron adjudicados a cada uno de los barotes de lluvias diarias, para las recurrencias de análisis de ambas estaciones. Los coeficientes aplicados fueron de 1.06, 1.10, 1.20 y 1.30; pretendiendo abarcar con

éstos, la variación del efecto de CC producto de diversos escenarios.

Para finalizar, fue realizado el cálculo de las precipitaciones netas en el SH para las distintas recurrencias y condiciones de CC, según procedimientos (Zimmermann y Orsolini, 2008), conforme dos condiciones de estado del terreno: Por un lado, con los CN's normales a la temporada verano, que es donde se producen los registros más copiosos de lluvias en la región de estudio; y por otro lado, bajo una condición de suelo cuasi-saturado (CN = 95) para todo el sistema; aclarando que los CN corresponden a un valor medio ponderado para todo el evento.

#### **Simulación del comportamiento del SH frente a eventos climáticos de diversas recurrencias considerando cambio climático**

Respecto de la simulación del comportamiento del SH frente a eventos considerando CC, la información de entrada resulta la misma que fue utilizada en el período de calibración (alturas del terreno, canales, características de canales y condición de borde), pero las alturas iniciales de agua en las celdas (para las celdas que representan lagunas) fueron utilizados valores correspondientes a un estado habitual de las lagunas. En cuanto a la condición de humedad del suelo, se realizaron simulaciones conforme dos condiciones de valor medio ponderado para todo el evento: normales (Condición II) y cuasi-saturados (Condición III, CN = 95). Además, fueron realizadas simulaciones para estas tres recurrencias considerando diversos coeficientes de CC. En los siguientes apartados, son presentados los efectos de dichos escenarios de CC, conforme las diferentes recurrencias de precipitaciones de análisis.

#### **Recurrencia de veinticinco años**

La simulación del comportamiento del SH frente a precipitaciones de recurrencia de 25 años, arrojó como resultado 45236 ha de superficie cubiertas por agua para condiciones normales de la capacidad absorción (condición II) y 53709 ha para la condición de suelo cuasi saturado (CN = 95); con un 4.7% y un 10.2%, respectivamente, del volumen entrante escurrido a los 12 días de iniciado el evento. Para condiciones de capacidad de absorción de suelo normales considerando CC, el incremento de agua superficial llega a alcanzar, para los escenarios más desfavorables, aproximadamente un 13.6% más respecto a la superficie de agua sin considerar CC; en cambio, en condiciones de suelo cuasi-saturadas el incremento respecto a una simulación sin CC es del 12.2%. Con respecto a volúmenes escurridos

considerando el peor escenario de CC, en condiciones normales del suelo llega a alcanzar el 6.7%, y un 17.5% en condiciones de suelo cuasi saturado. En cuanto al incremento del porcentaje de superficie cubierta con agua respecto la superficie del SH, para condiciones de suelo normales respecto del peor escenario alcanza un 15.87% y para condiciones de suelo cuasi-saturado un 18.61%. En cuanto a los caudales pico, para condiciones de suelo normales se observa que al no considerar CC los mismos rondan en 40 m<sup>3</sup>/s, y considerando los coeficientes de CC más desfavorables, duplican dicho valor. Para los caudales pico en condiciones de suelo cuasi-saturado sin CC se tienen valores del orden de los 100 m<sup>3</sup>/s y, considerando los coeficientes por CC más desfavorables, del orden de los 200 m<sup>3</sup>/s.

#### **Recurrencia de cincuenta años**

El análisis del comportamiento del SH frente a precipitaciones de recurrencia de 50 años, da como resultado 47498 ha de superficie cubiertas por agua para condiciones normales de la capacidad absorción y 55602 ha para la condición de suelo cuasi saturado; con un 7.1% y un 12.5%, respectivamente, del volumen entrante escurrido a los 12 días de iniciado el evento. Para condiciones de capacidad de absorción de suelo normales considerando CC, el incremento de agua superficial llega a alcanzar, para los escenarios más desfavorables, aproximadamente un 14% más respecto a la superficie de agua sin considerar CC; en cambio, en condiciones de suelo cuasi-saturadas el incremento respecto a una simulación sin CC es del 12.22%. Con respecto a volúmenes escurridos considerando el peor escenario de CC, en condiciones normales del suelo llega a alcanzar el 13.3%, y un 20.5% en condiciones de suelo cuasi saturado. En cuanto al incremento del porcentaje de superficie cubierta con agua respecto la superficie del SH, para condiciones de suelo normales respecto del peor escenario alcanza un 16.62% y para condiciones de suelo cuasi-saturado un 19.27%. En cuanto a los caudales pico, para condiciones de suelo normales se observa que al no considerar CC los mismos rondan en 50 m<sup>3</sup>/s, y considerando los coeficientes de CC más desfavorables, duplican dicho valor. Para los caudales pico en condiciones de suelo cuasi-saturado sin CC se tienen valores del orden de los 120 m<sup>3</sup>/s y, considerando los coeficientes por CC más desfavorables, del orden de los 250 m<sup>3</sup>/s.

#### **Recurrencia de cien años**

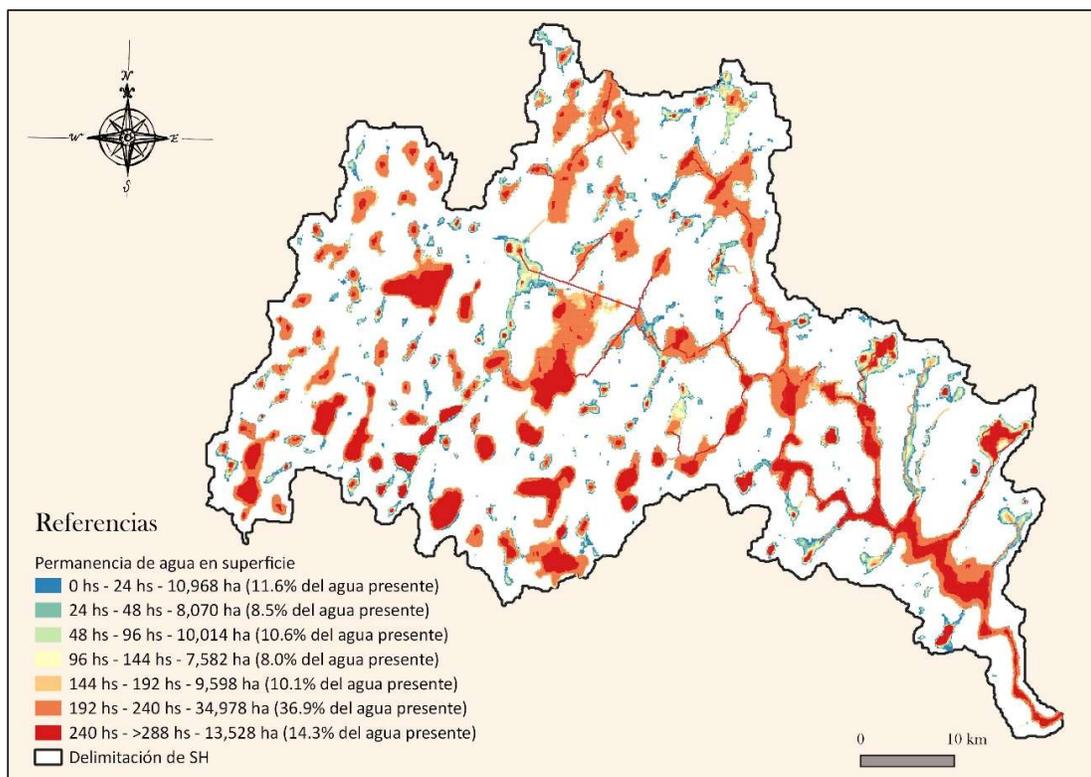
En cuanto al comportamiento del SH frente a precipitaciones de recurrencia igual a 100 años, el

mismo proporcionó como resultado 49220 ha de superficie cubiertas por agua para condiciones normales de la capacidad absorción y 57669 ha para la condición de suelo cuasi saturado; con un 9.3% y un 15.1%, respectivamente, del volumen entrante escurrido a los 12 días de iniciado el evento.

Para condiciones de capacidad de absorción de suelo normales considerando CC, el incremento de agua superficial llega a alcanzar, para los escenarios más desfavorables, aproximadamente un 14% más respecto a la superficie de agua sin considerar CC; en cambio, en condiciones de suelo cuasi-saturadas el incremento respecto a una simulación sin CC es del 12%. Con respecto a volúmenes escurridos considerando el peor escenario de CC, en condiciones normales del suelo llega a alcanzar el 15.5%, y un 22.7% en condiciones de suelo cuasi saturado. En cuanto al incremento del porcentaje de superficie cubierta con agua respecto la superficie del SH, para condiciones de suelo normales respecto del peor escenario alcanza un 17.30% y para condiciones de suelo cuasi-saturado casi un 20%. En cuanto a los caudales pico, para condiciones de suelo normales se observa que al no considerar CC los mismos rondan en 60 m<sup>3</sup>/s, y considerando los coeficientes de CC más desfavorables, se encuentran próximos a los 180 m<sup>3</sup>/s. Para los caudales pico en condiciones de suelo cuasi-saturado sin CC se tienen valores del orden de los 150 m<sup>3</sup>/s y, considerando los coeficientes por CC más desfavorables, del orden de los 330 m<sup>3</sup>/s.

#### **Determinación/análisis de permanencia de agua en superficie**

Una situación que resulta también relevante de analizar es el tiempo en el cual el agua permanece sobre la superficie del SH hasta que escurre, se infiltra o evapora. Para realizar este análisis es utilizado un complemento del modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado VMMHH 1.0 el cual realiza la lectura de las simulaciones y efectúa el análisis de permanencia de agua en superficie. Debido a que el mismo arroja los resultados de permanencia de agua en cada celda en formato de coordenadas de posicionamiento, los mismos son procesados mediante el software de SIG para, mediante una categorización de la información, realizar un mapeo general del tiempo de permanencia de agua en superficie en todo el SH. A continuación, en la Figura 6, se presenta el mapa de permanencia de agua en superficie para una recurrencia de 100 años, en condición antecedente de humedad del suelo cuasi-saturado, para un escenario que considera el coeficiente máximo de incremento por CC.



**Figura 6: Mapa de permanencia de agua en superficie para una R = 100 años, en condición de suelo cuasi-saturado considerando un incremento de precipitación por CC de 1.30.**

Para una recurrencia de 25 años, sin considerar el efecto del CC, más del 47% de la superficie con agua presente tiene una demora superior a 193 h en escurrir, escurriendo solamente el 8% del agua superficial dentro de las primeras 24 h de iniciado el evento climático. Para la misma recurrencia, considerando la peor condición de CC (coeficiente CC = 1.30) se tiene que el 10.5% del agua presente escurre dentro de las 24 h y más del 53%, después de las 193 h.

Para una recurrencia de 50 años, sin considerar el efecto del CC, se tiene que más del 52% del agua escurre posterior a las 193 h de iniciado el evento, y tan sólo el 10.1% del agua presente en el SH escurre dentro de las 24 h de iniciado el evento climático. Para las mismas condiciones, pero teniendo en cuenta el peor efecto por CC (coeficiente CC = 1.30) se tiene que el 11.1% escurre dentro de las 24 h y más del 53% pasadas las 193 h.

Respecto a la recurrencia de 100 años, sin considerar CC, se tiene que más del 52% del agua presente escurre después de las 193 h, escurriendo tan sólo el

10.7% del agua presente en el SH dentro de las 24 h. En cuanto a la recurrencia de 100 años, pero considerando el peor efecto por CC se tiene que el escurrimiento del agua presente que se da dentro de la primeras 24 h es del 11.6% y el 51.2% pasadas las 193 h.

## DISCUSIÓN EN DELIMITACIÓN DEL SH

Para elección de la delimitación del SH, se trabajó con la desarrollada en este trabajo, después una exposición de delimitaciones existentes, pero se la consideró marginal puesto que se esperaba ver la respuesta del SH frente a los diferentes eventos climáticos para poder determinar de forma fehaciente la delimitación.

Acorde con lo esperado, en la Figura 7 se muestra en esquema de colores los tirantes de agua para una recurrencia de 100 años considerando el máximo coeficiente por CC planteado y condición de suelo cuasi-saturado (CN medio = 95), vislumbrando de fondo el DEM corregido con exageración vertical, para una mejor interpretación. Como puede

observarse, todos los sectores del SH se encuentran interconectados, y en la mayoría de ellos para este evento de recurrencia de 100 años, presentan agua. Es por ello, que resulta apropiado considerar esta delimitación como correcta del SH, puesto que si bien es más extendida que la presentada por los organismos enunciados, contempla eventos que pueden acontecer, con lo cual ignorar el aporte que brindarían las áreas no incluidas, puede ocasionar problemas de gravedad.

Se aclara que esta delimitación no contempla el área anexada o suprimida producto de la canalización que conecta ese sector a otro SH mediante el canal San Urbano en dirección noreste, puesto que no hay evidencia clara del sentido de escurrimiento del agua, y conforme las calibraciones para las simulaciones efectuadas, los resultados son aceptables bajo este esquema de funcionamiento del SH.

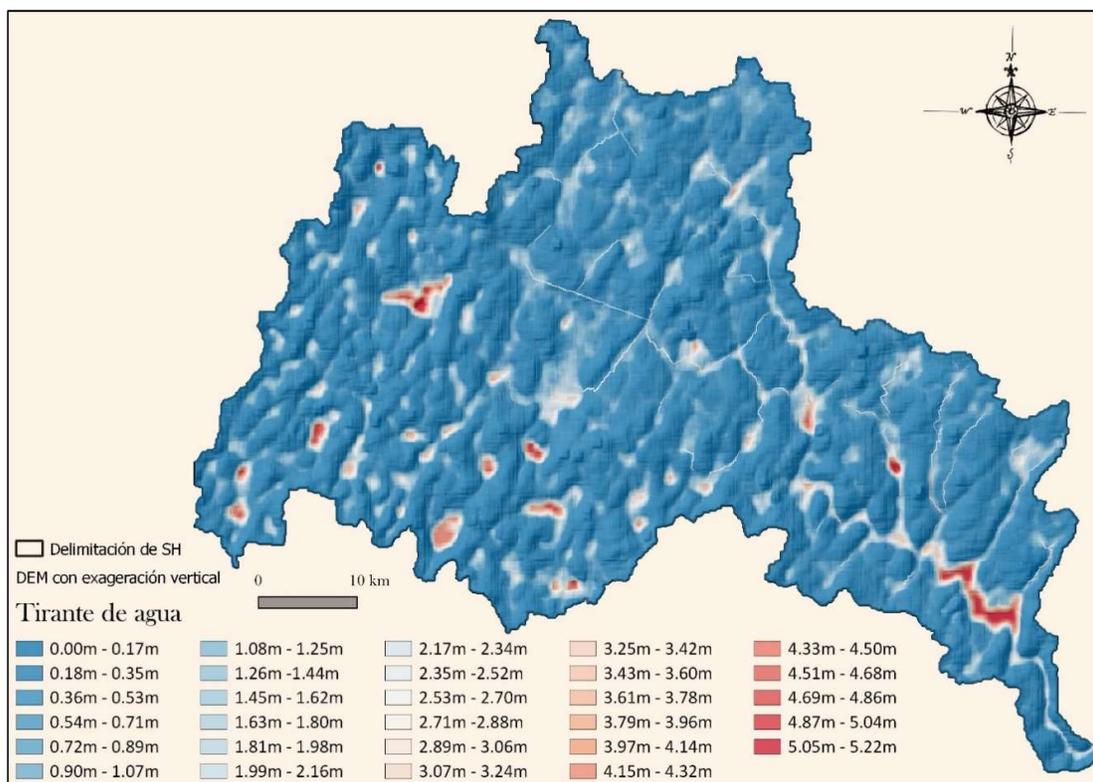


Figura 7: Mapa de validación de la delimitación del SH Las Encadenadas.

### IDENTIFICACIÓN DE ZONAS CON AMENAZA, CONSTRUCCIÓN DE MAPAS Y CONTRASTACIÓN CON ÁREAS DE RIESGO HÍDRICO SEGÚN LEY 11730

En este apartado son identificados los sectores en riesgo producto de eventos climáticos que contemplan CC, y generados diversos Mapas de amenaza/peligrosidad conforme distintos factores. Además, se realiza una contrastación de los mismos de acuerdo a las Áreas de Riesgo Hídrico según Ley 11730.

La primera serie de mapas de amenaza/peligrosidad contempla las áreas máximas de agua superficial

producto de eventos de recurrencia 25, 50 y 100 años considerando CC y cercanía de éstas a las redes viales. Para la confección de estos mapas es realizada, para cada una de las recurrencias, la unión de las capas de superficie de agua; producto de los distintos coeficientes por CC. Posterior a ello, son ejecutadas las disoluciones de dichas uniones, adquiriendo una sola figura por recurrencia e interceptando a las mismas con las distintas capas de tipo línea de las redes viales; dando como resultado una capa de tipo línea conformada por tramos de redes que se encuentran próximas a las superficies de agua. Para finalizar, con el objeto de lograr una interpretación eficaz de los mapas, se puntualizaron dichos tramos,

fue aplicada una escala de tamaño de los puntos, conforme la longitud de los tramos próximos a agua superficial y se discriminaron en distintos colores, conforme la tipología de red.

A continuación, en la Figura 8 se presenta el gráfico de cantidad de tramos para cada uno de los tipos de vías que presentan agua circundante conforme eventos climáticos para una recurrencia de 100 años, considerando CC; y en la Figura 9, uno de los mapas de amenaza por agua circundante en redes viales, en este caso debido a eventos climáticos contemplando CC para una recurrencia de 100 años.

Se tiene para una recurrencia de 25 años, la existencia de 122 tramos con agua circundante: 48 corresponden a redes ferroviarias, 21 a rutas nacionales, 12 a rutas provinciales y 41 a rutas secundarias; resultando 19 de los 122 tramos, con longitud superior a los 1400 m. Para una recurrencia de 50 años, 124 tramos con agua en cercanías, de los cuales 20 superan los 1400 m de longitud. Para una recurrencia de 100 años, 202 tramos con agua en sus cercanías, siendo 40 de rutas nacionales, 41 de rutas provinciales, 64 de rutas secundarias y 57 de redes ferroviarias. Cabe destacar que 26 de los 202 tramos para la recurrencia de 100 años poseen una longitud superior a los 1400 m.

La segunda serie de mapas consiste en representar los sectores de las redes viales en los cuales el agua aledaña presente posee una determinada permanencia luego de iniciada la lluvia de diseño. La metodología fue similar a la efectuada en la serie de mapas descritos arriba, a diferencia que en este caso son

puntualizados los tramos que presentan cercanía a una determinada permanencia de agua, siendo representada esta permanencia en distintos tamaños sobre las puntualizaciones.

En la Figura 10 se aprecia uno de los Mapas de amenaza en redes viales frente a permanencia de agua contemplando CC, en este caso para una recurrencia de 100 años.

La tercera serie de mapas resulta de un análisis de las simulaciones para recurrencias de 25, 50 y 100 años con el incremento del máximo coeficiente de CC. El análisis contempla la clasificación entre superficies que han superado el tirante de 1 m de agua en algún momento de la simulación, juntamente con la superación de la velocidad de 1 m/s en su escurrimiento, consideradas como zonas de riesgo; y las superficies que no han alcanzado dichos condicionantes. Posteriormente son consideradas las redes viales pertenecientes al SH, efectuando puntualizaciones en los tramos de éstas que presentan cercanía a las zonas de riesgo, con metodologías similares a las series de mapas anteriores. En la Figura 11, puede apreciarse uno de los mapas de riesgo en redes viales contemplando CC, en este caso para una recurrencia de 100 años.

Una cuarta tipología de mapa (Figura 12) presenta un compendio de las puntualizaciones de los sectores de amenazas/peligrosidad presentados en las tres series anteriores aglomerando los puntos por cercanía, con el objeto de visualizar los sectores más comprometidos dentro del SH.

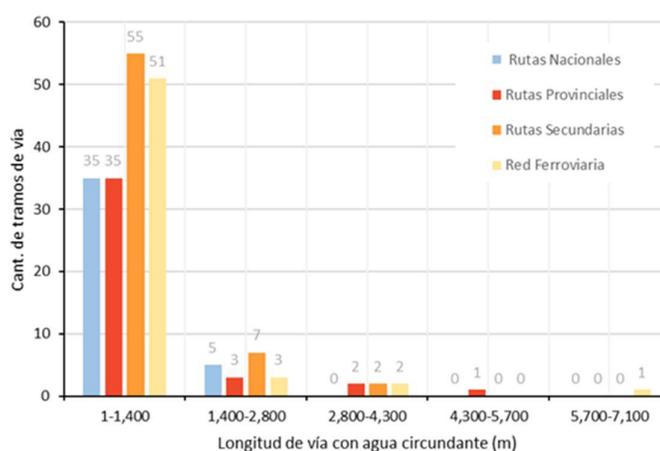


Figura N° 8: Cantidad de tramos para cada uno de los tipos de vías que presentan agua circundante conforme eventos climáticos para una recurrencia de 100 años, considerando CC.

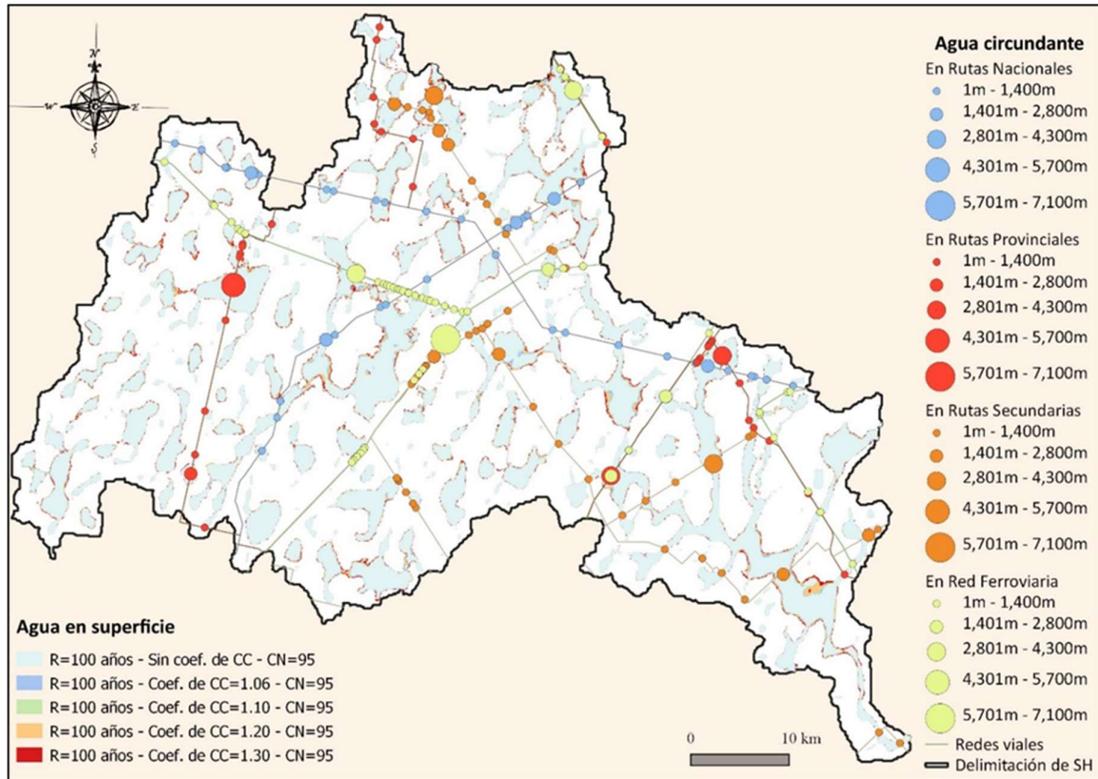


Figura 9: Mapa de amenaza por agua circundante en redes viales, debido a eventos climáticos contemplando CC para una recurrencia de 100 años.

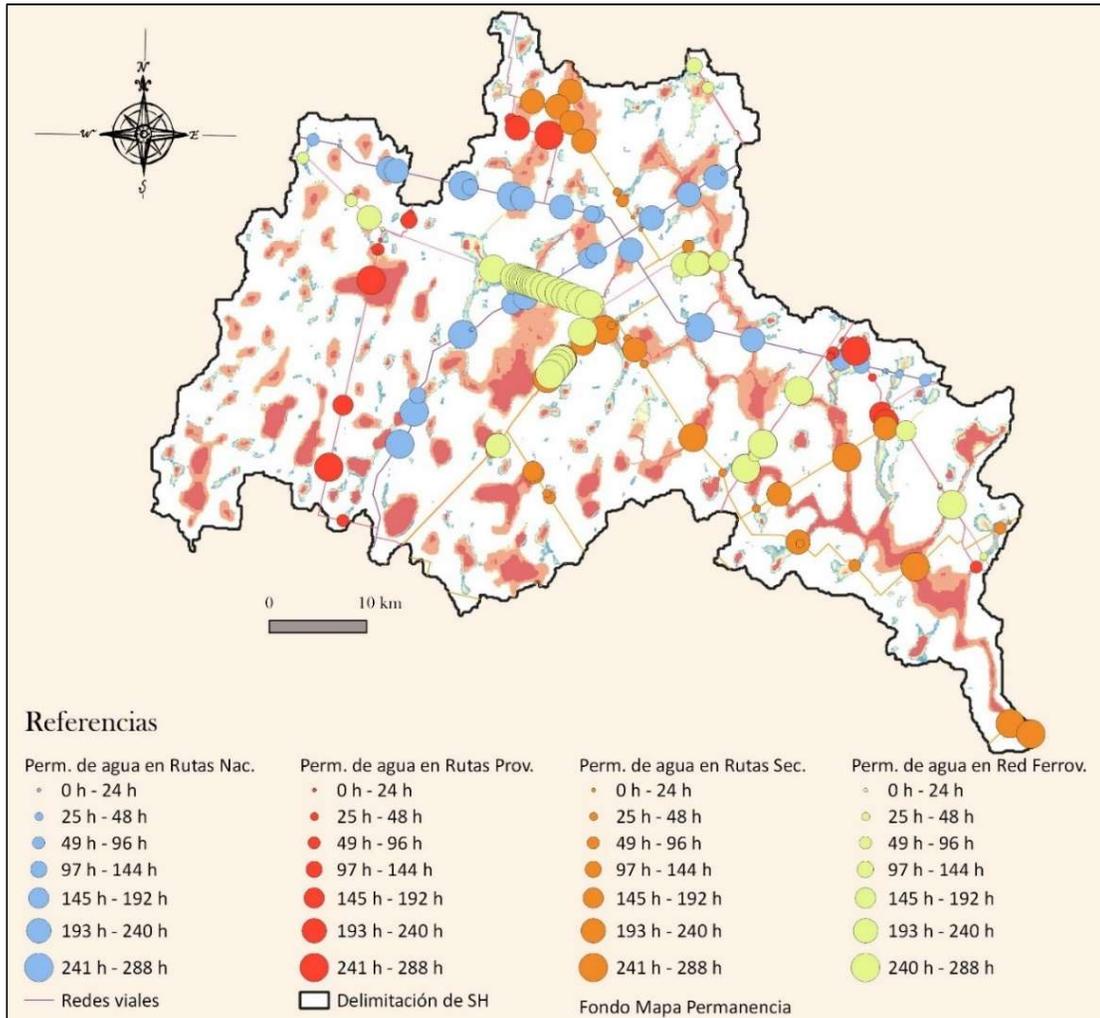


Figura 10: Mapa de amenaza en redes viales frente a permanencia de agua contemplando CC para una recurrencia de 100 años.

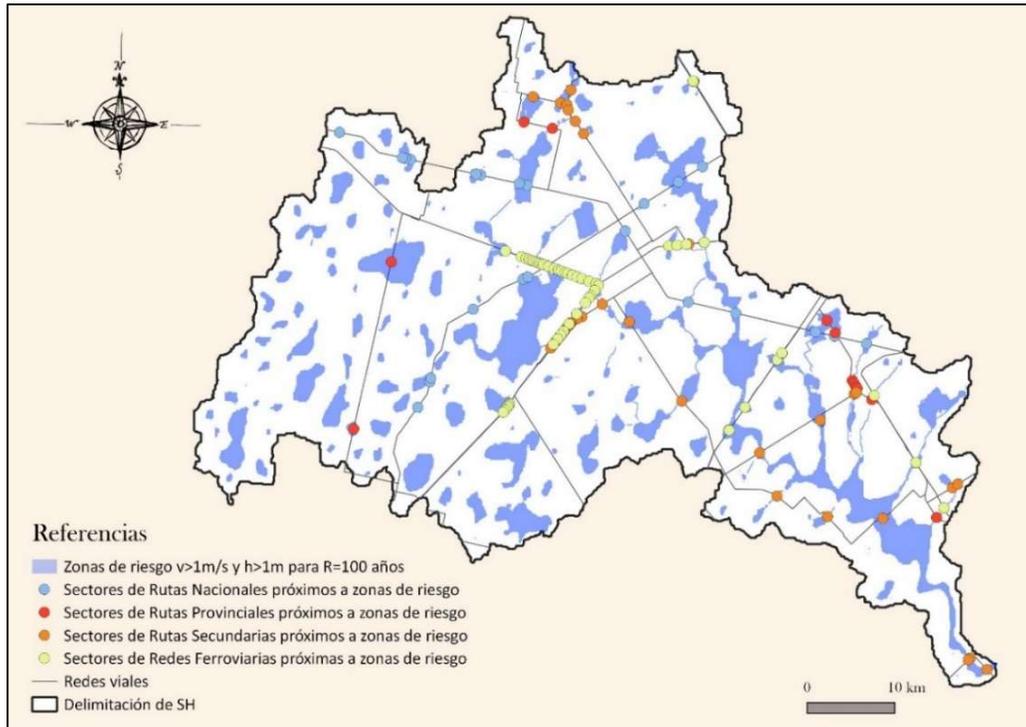


Figura 11: Mapa de riesgo en redes viales contemplando CC para una recurrencia de 100 años.

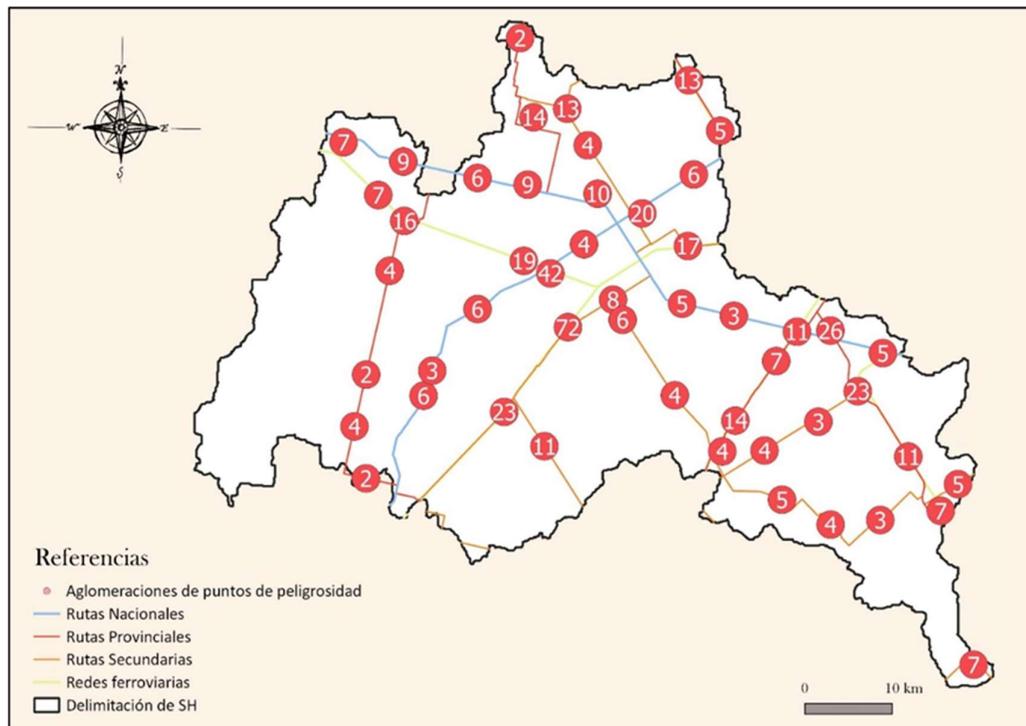


Figura 12: Mapa de detección de sectores del SH con peligrosidad frente a eventos con CC conforme agua superficial, su permanencia, tirante y velocidad.

Para finalizar, se presentan mapas de amenazas/peligrosidad de riesgo hídrico para las localidades pertenecientes íntegramente al SH Las Encadenadas. Dichos mapas contienen áreas de influencia a 250 m a las manifestaciones de riesgo, lo cual brinda un panorama de la posible afectación urbana. Además, es realizada una comparativa entre las imágenes de amenaza realizadas en este trabajo para algunas de las localidades, en conjunto con los mapas de amenaza presentadas en el archivo de planos de la Ley 11730 (Gobierno de la Provincia de Santa Fe, s.f.) sobre las cuales se presentan disimilitudes. A continuación se presentan breves comentarios sobre las tres localidades pertenecientes al SH, en las cuales se obtuvo mayor diferencia respecto a la Ley 11730.

San Francisco: Como puede apreciarse en la Figura 13, en este trabajo el riesgo se presenta potencialmente desde la zona oeste a la localidad de San Francisco, y en la imagen obtenida por el atlas se presenta desde el este. Se considera que quizás, la diferencia radique en que, al tener este estudio una base de simulaciones de eventos y producto de esto, tal como lo expresa la imagen central presente en la Figura 13, una aproximación sobre la permanencia de agua en superficie, dicha zona haya escapado al análisis del atlas, el cual utiliza una metodología quizás más estática basada en imágenes satelitales puntuales.

Maggiolo: Para esta localidad, desde lo realizado en este trabajo se presenta cierta cercanía del riesgo, es decir, las zonas de mayor riesgo se encuentran a una distancia aproximada de 200 m del agua en superficie; pero con respecto a la imagen presentada en el atlas, surgen dos interpretaciones: o bien dicha imagen considera que el riesgo se manifiesta por todos los frentes a la localidad, o bien no hay riesgo para la localidad, pero sí para el área circundante. Desde lo realizado, puede observarse en la Figura 14, en la parte central, que el agua más próxima al poblado desaparece en el menor rango de tiempo presentado.

Venado Tuerto: En esta localidad, se presenta un caso similar al expuesto para la localidad de Maggiolo; en Figura 15 se evidencia que en el atlas no resulta claro si toda la ciudad se encuentra en riesgo de inundación, o si la ciudad se encuentra fuera de riesgo, pero el área circundante sí. En este trabajo, se visualizan zonas puntuales de riesgo, y

una alerta de cuáles son las zonas en las cuales demorará considerablemente en escurrir el agua.

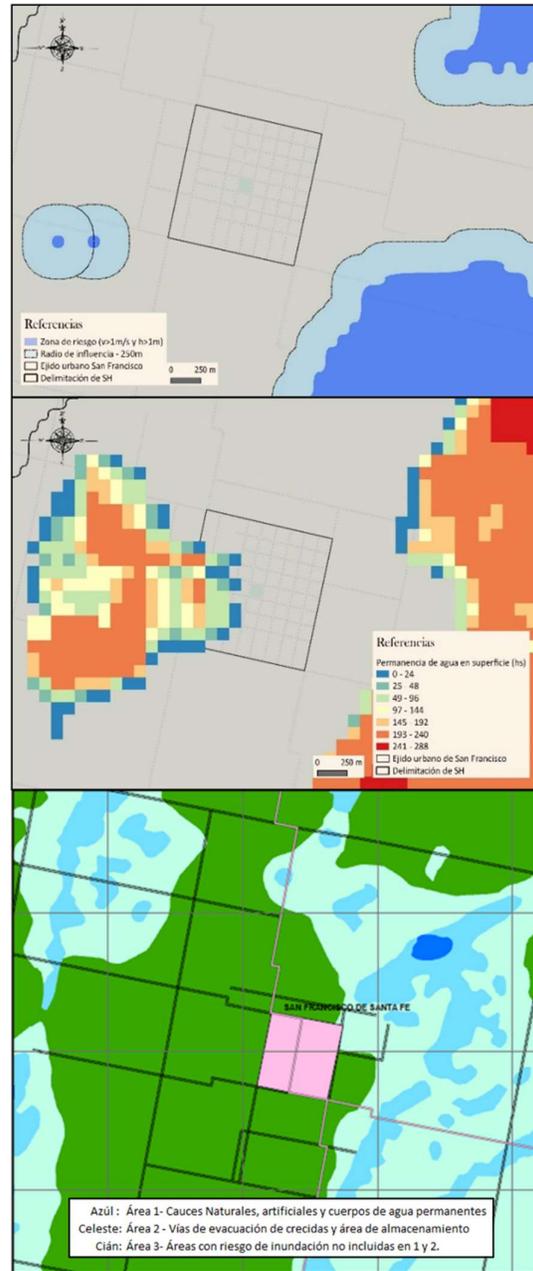


Figura 13: Mapa de contraste de respuestas de amenaza para la localidad de San Francisco. Izquierda: mapas elaborados en este estudio, derecha: mapas del archivo de planos de la Ley 11730.

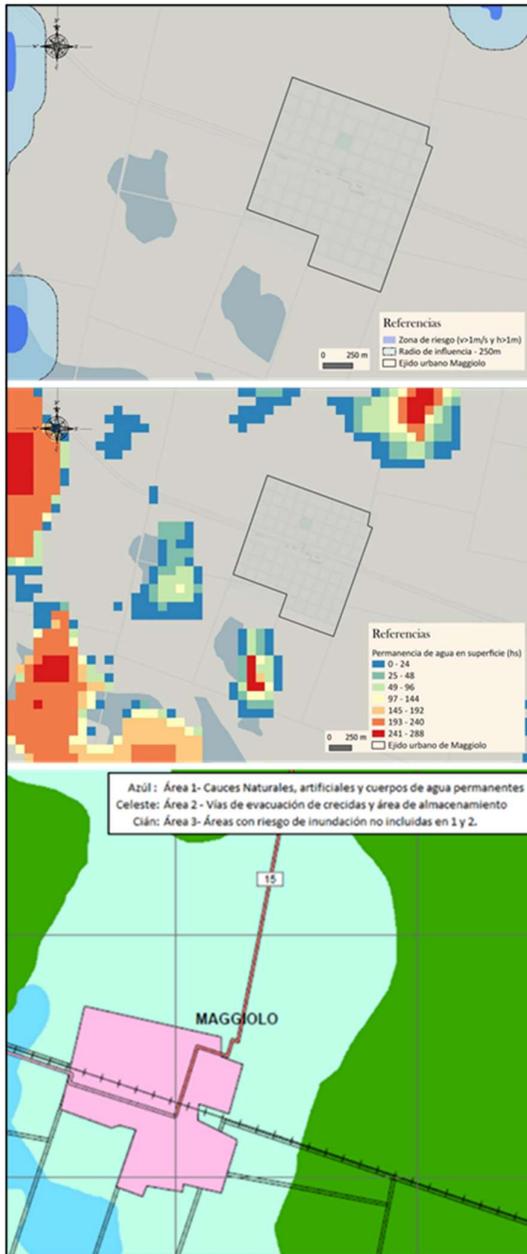


Figura 14: Mapa de contraste de respuestas de amenaza para la localidad de Maggiolo. Izquierda: mapas elaborados en este estudio, derecha: mapas del archivo de planos de la Ley 11730.

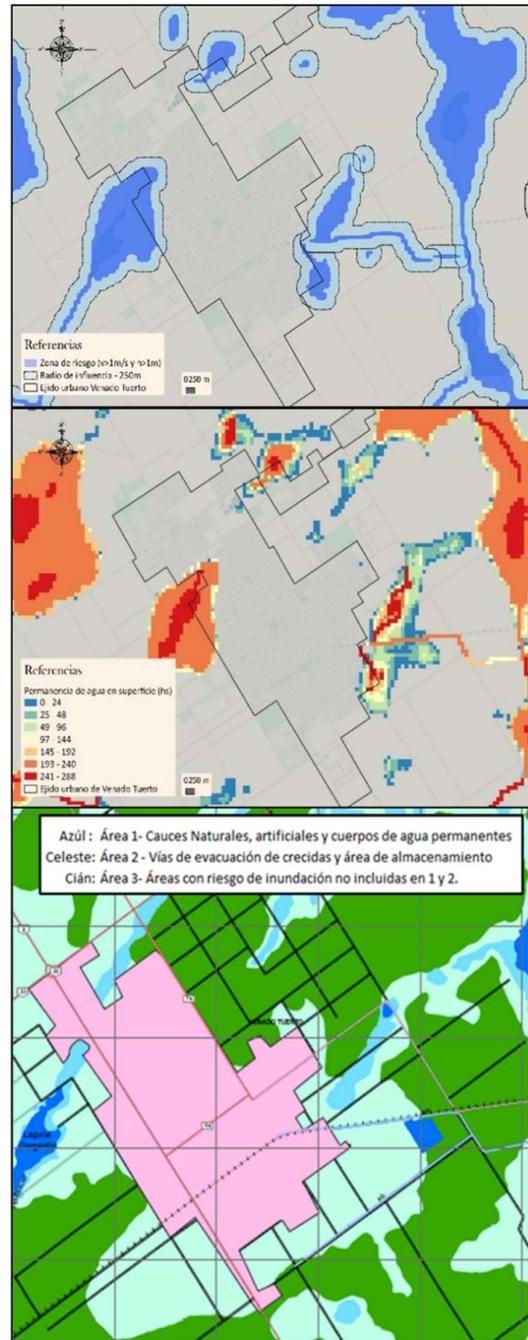


Figura 15: Mapa de contraste de respuestas de amenaza para la localidad de Venado Tuerto. Izquierda: mapas elaborados en este estudio, derecha: mapas del archivo de planos de la Ley 11730.

Resulta conveniente aclarar, tal como se fue visualizando a lo largo de la lectura del trabajo, que el análisis realizado en el mismo fue basado en el proceso del ciclo hidrológico dominante, que

es en este caso el horizontal. Resta para otros estudios analizar el comportamiento del SH en lapsos de tiempo mayores, que contemplen los procesos verticales.

## CONCLUSIONES

Se ha logrado representar la dinámica hídrica del SH de llanura "Las Encadenadas", mediante la conceptualización de los procesos relevantes involucrados y la simulación hidrológica-hidráulica correspondiente; incorporando la incertidumbre asociada a diferentes escenarios de CC.

Se ha realizado la cuantificación y mapeo de superficies de agua y caudales presentes en el SH, la permanencia del agua superficial y la cercanía de la misma a ejidos urbanos y redes viales, para recurrencias con y sin consideración del efecto por CC.

En cuanto a la superficie del SH Las Encadenadas para una recurrencia de 25 años, en condiciones de suelo normales y sin considerar CC, se alcanza las 45236 ha (el 13.97% de la superficie del SH) y caudales pico del orden de los 40 m<sup>3</sup>/s; mientras que en peores condiciones (suelo cuasi-saturado y coeficiente de CC = 1.30) alcanza las 60267 ha (18.61% de la superficie del SH) y caudales pico del orden de los 80 m<sup>3</sup>/s. Para una recurrencia de 50 años, en condiciones de suelo normales y sin considerar CC se tienen 47498 ha de la superficie del SH ocupadas con agua (14.67% del total de la superficie del SH) y caudales picos próximos a los 50 m<sup>3</sup>/s; siendo que para condiciones de suelo cuasi-saturado y coeficiente de CC de 1.30, se tienen 62396 ha ocupadas con agua (19.27% del total del SH) y caudales picos cercanos a los 250 m<sup>3</sup>/s. Para recurrencias de 100 años, en condiciones de suelo normales y sin considerar CC se tienen 49220 ha del SH ocupadas con agua (15.20% de la superficie del SH) y caudales picos próximos a los 60 m<sup>3</sup>/s; mientras que para condiciones de suelo cuasi-saturado y coeficiente de CC de 1.30 se tiene una superficie de 64514 ha ocupadas con agua (19.92% de la superficie total del SH) y caudales picos del orden de los 320 m<sup>3</sup>/s.

En cuanto a la permanencia del agua en la superficie, se obtuvo que, para una recurrencia de 25 años, sin considerar el efecto del CC, sólo el 8% del agua superficial escurre dentro de las primeras 24 h de iniciado el evento climático, mientras que más del 47% de la superficie con agua presente tiene una demora superior a 193 h en escurrir y; considerando la peor condición de CC (coeficiente de CC = 1.30) se tiene que el 10.5% del agua presente escurre dentro de las 24 h y más del 53%, después de las 193 h. Para una recurrencia de 50 años, sin considerar el efecto del CC, se tiene que el 10.1% del agua presente en el SH escurre dentro de las 24 h de iniciado el evento climático, y más del 52% del agua, posterior a las 193 h y; teniendo en cuenta el

peor efecto por CC (coeficiente CC = 1.30) se tiene que el 11.1% escurre dentro de las 24 h y más del 53% pasadas las 193 h. Respecto a la recurrencia de 100 años, sin considerar CC, se tiene que el 10.7% del agua presente en el SH escurre dentro de las 24 h y más del 52% del agua presente, después de las 193 h. En cuanto a la recurrencia de 100 años, pero considerando el peor efecto por CC se tiene que el escurrimiento del agua presente que se da dentro de las primeras 24 h es del 11.6% y el 51.2% pasadas las 193 h.

Con respecto a los tramos con agua en sus proximidades, se presenta para una recurrencia de 25 años, la existencia de 122 tramos, de los cuales 48 corresponden a redes ferroviarias, 21 a rutas nacionales, 12 a rutas provinciales y 41 a rutas secundarias; resultando 19 de los 122 tramos, con longitud superior a los 1400 m. Para una recurrencia de 50 años, son 124 los tramos con agua en cercanías, de los cuales 20 superan los 1400 m de longitud y; para una recurrencia de 100 años, son 202 los tramos que poseen agua en sus cercanías, conformados de la siguiente manera: 40 pertenecen a rutas nacionales, 41 a rutas provinciales, 64 a rutas secundarias y 57 a redes ferroviarias. Cabe destacar que 26 de los 202 tramos para la recurrencia de 100 años poseen una longitud superior a los 1400 m.

Toda esta información también presentada espacialmente en el SH mediante mapas permite una clara y rápida comprensión de la amenaza/peligrosidad en la cual se encuentra el SH frente a determinadas condiciones climáticas, lo cual favorece a la toma de decisiones de los actores correspondientes.

Otro resultado que merece sea mencionado, es la obtención de una nueva delimitación del SH, más extensa a las actualmente vigentes (3237 km<sup>2</sup> respecto a ~1680 km<sup>2</sup> del INA y ~2130 km<sup>2</sup> del Ministerio de Infraestructura y Transporte) la cual como fue demostrado, contempla superficies que aportan al SH frente a eventos del orden de los 100 años de recurrencia o superiores. Además, se realiza un aporte concreto en la región del SH a un mejor detalle en la zonificación y regulación del uso del suelo en áreas inundables en sistemas hídricos de la provincia de Santa Fe de acuerdo con Ley 11730 en referencias a la definición de áreas con riesgo hídrico.

Como aporte del trabajo en el avance del conocimiento, se resalta la contribución respecto a la representación de la dinámica del escurrimiento superficial en una cuenca compleja, donde no había

antecedentes de calibración y explotación de un modelo hidrológico-hidráulico distribuido y físicamente basado, para simulación de eventos, del tipo utilizado en el trabajo. Resulta muy importante también la contribución que se logra en estos estudios hidrológicos-hidráulicos desde la geomática, en la obtención y manipulación de datos y resultados en cuencas escasamente aforadas. Cabe destacar que es implementada una novedosa metodología para la determinación de las topobatemías de las lagunas y correspondientes curvas nivel-almacenamiento. También se resalta la contribución (inédita en el SH) de la calibración a partir del entrecruzamiento de áreas inundadas simuladas (con un modelo apropiado para la representación de la dinámica del escurrimiento en zonas de llanura) y áreas inundadas obtenidas de imágenes satelitales. En sistemas hidrológicos de este tipo, la calibración con mediciones puntuales de caudal en un lugar o en algunos puntos específicos, no necesariamente puede capturar la dinámica de los procesos de almacenamiento y escurrimiento superficial en toda la cuenca; lo cual es posible solo con un modelo del tipo aquí utilizado juntamente con dicha estrategia de calibración. Esta metodología, de evaluar niveles de lagunas en calibración/validación, resulta un gran avance del trabajo, puesto que se trata de las condiciones iniciales y de borde predominantes, necesarias para una correcta simulación por eventos; ya que el almacenamiento superficial es en este tipo de SHNT gravitante en la valoración de la posible amenaza de inundación en cualquier evento, en variables como altura de agua y permanencia de inundación.

Este trabajo puede considerarse como un avance para estudios futuros, mediante la implementación de modelos que incorporen otros aspectos del ciclo hidrológico (modelos continuos). En este trabajo se optó por representar la dinámica de los procesos de almacenamiento y escurrimiento superficial asociados a eventos de lluvias máximas de 5 días de duración, similares a eventos ya acontecidos, los cuales han puesto en emergencia diferentes rutas y poblaciones dentro de la cuenca. Justamente uno de esos eventos (diciembre 2016) fue utilizado en la calibración del modelo.

Además, se realiza un aporte a la rasterización de diversos tipos de información (meteorológica, hidrológica, hidráulica, morfológica, cobertura de suelo, usos de suelo, etc.) del SH en estudio para su posible ensamblaje futuro con todo tipo de sistema de información geográfica.

## BIBLIOGRAFÍA

- Basile, P. A. (2008). Mediciones hidrológicas. En: H. Orsolini, E. Zimmermann y P. Basile (Eds.), *Hidrología, Procesos y Métodos* (2nd ed., pp. 19–48). Rosario, Argentina: UNR Editora.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Santa Fé de Bogotá, Colombia. McGRAW-HILL / Interamericana Editores S.A. de C.V.
- Chow, V. T. (2004). Desarrollo del flujo uniforme y sus ecuaciones. En: M. Suárez (Ed.), *Hidráulica de canales abiertos* (pp. 109–111). McGRAW-HILL / Interamericana Editores S.A. de C.V.
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Naciones Unidas, FCCC/INFORMAL/84 GE.05-62220 (E) 200705. Secretaría de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Bonn, Alemania, 24 p. [unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf](http://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf)
- Espindola, A., Godagnone, R., Havrylenko, S., de la Fuente, J. C. y Mercuri, P. (2014). Generación de bases de datos de suelos para modelos hidrológicos a escalas regionales. *XXIV Congreso Argentino de La Ciencia Del Suelo*, 10p.
- EVARSA (1995). *Obras de evacuación laguna El Basural*. Proyecto ejecutivo. Informe Final. Tomo I.
- Fertonani, M. y Prendes, H. (1983). Hidrología en áreas de llanura. Aspectos conceptuales teóricos y metodológicos. En: M. C. Fuschini Mejía (Ed.), *Hidrología de las grandes llanuras - Coloquio de Olavarría* (pp. 119–156). Buenos Aires, Argentina: Comité Nacional Argentino para el Programa Hidrológico Internacional en conjunto con UNESCO.
- Friedl, M. A., Sulla-Menashe, D., Tan, B., Schneider, A., Ramankutty, N., Sibley, A. y Huang, X. (2010). *MODIS Collection 5 cobertura global del suelo: refinamiento de algoritmos y caracterización de nuevos conjuntos de datos*. Collection 5.1 IGBP Land Cover. Boston University, Boston, MA, USA.
- Fuschini Mejía, M. C. (1994). *El agua en las llanuras* (1ra. ed.). Montevideo, Uruguay: UNESCO - ORCYT. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000159361>
- Giraut, M., Lupano, C., Soldano, Á. y Rey, C. (2008). *Cartografía Hídrica Superficial Digital de la Provincia de Santa Fe*. Atlas Digital de los Recursos Hídricos Superficiales de la República Argentina. Buenos Aires.
- Gobierno de la Provincia de Santa Fe (s.f.). Mapas de áreas afectadas por inundaciones. En: *Informe final sobre la implementación de la Ley provincial N°*

- 11730 Zonificación y regulación del uso del suelos en áreas inundables en sistemas hídricos de la Provincia de Santa Fe.
- Gutiérrez, J. M., Jones, R. G., Narisma, G. T., Alves, L. M., Amjad, M., Gorodetskaya, I. V., Grose, M., Klutse, N. A. B., Krakovska, S., Li, J., Martínez-Castro, D., Mearns, L. O., Mernild, S. H., Ngo-Duc, T., van den Hurk, B. y Yoon, J. H. (2021). Atlas. En: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R. y Zhou, B. (eds.), *Cambio climático 2021: la base de la ciencia física. Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático*. Prensa de la Universidad de Cambridge. Atlas interactivo disponible en <http://interactive-atlas.ipcc.ch/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Eds.: V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S., Connors, C., Péan, S., Berger, ... B. Zhou. Cambridge University Press. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WG1\\_SPM\\_Spanish.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_Spanish.pdf)
- Martín, R. (2014). *Meteorología Regional* (1era. ed.). Rosario, Argentina: Iracema Ediciones.
- Natenzon, C. (2017). Riesgo hídrico, vulnerabilidad social y participación ciudadana. *III Jornadas Nacionales de Política Hídrica*. Buenos Aires, Argentina.
- Orsolini, H. (2008). Estadística hidrológica. Lluvias de diseño. Hidrograma de diseño. En: H. Orsolini, E. Zimmermann y P. Basile (Eds.), *Hidrología, procesos y métodos* (2da. ed., pp. 262–336). Rosario, Argentina: UNR Editora.
- Orsolini, H., Zimmermann, E. D. y Basile, P. A. (2008). *Hidrología, procesos y métodos* (2da. ed.). Rosario, Argentina: UNR Editora.
- Paoli, C., Bolzicco, J., y Cacik, P. (1996). *Análisis de frecuencia de variables hidrológicas*. UNL - FICH.
- Paoli, C. y Giacosa, R. (1983). Necesidades de investigaciones hidrológicas en áreas de llanura. En: M. C. Fuschini Mejía (Ed.), *Hidrología de las grandes llanuras - Coloquio de Olavarría* (pp. 395–432). Buenos Aires, Argentina: Comité Nacional Argentino para el Programa Hidrológico Internacional en conjunto con UNESCO.
- Reisinger, A., Howden, M., Vera, C., Garschagen, M., Hurlbert, M., Kreibiehl, S., ... Ranasinghe, R. (2020). *The concept of risk in the IPCC Sixth Assessment Report: a summary of cross-working group discussions*. Guidance for IPCC authors. Intergovernmental Panel on Climate Change, Ginebra, Suiza. 15 p. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/02/Risk-guidance-FINAL\\_15Feb2021.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/02/Risk-guidance-FINAL_15Feb2021.pdf)
- Riccardi, G. A. (2001). *Un sistema de simulación hidrológica-hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos*. Tesis Doctoral. FCEfyN-UNC, Córdoba.
- Riccardi, G. A., Basile, P. A., Zimmermann, E. D., Stenta, H. R., Scuderi, C. M. y Garcia, M. L. (2008). El modelado de escurrimiento superficial en cuencas del sur de la provincia de Santa Fe, Argentina. En: *Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura* (1era. ed., pp. 3–20). Rosario, Argentina: UNR Editora.
- Soil & Water Assessment Tool. (2019). QSWAT. <https://swat.tamu.edu/software/qswat/>
- Soria, M. (2019). *Caracterización morfológica y análisis de riesgo hidrológico en la parte alta del sistema hidrológico de llanura Las Encadenadas mediante aplicación de herramientas geomáticas*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Entre Ríos, Facultad de Ciencia y Tecnología.
- Soria, M., Basile, P. y Riccardi, G. (2020). Calibración de simulaciones bi-dimensionales mediante imágenes radar. En: Universidad Nacional de Rosario (Ed.), *XIV Jornadas de Ciencia, Tecnologías e Innovación*. Rosario, Argentina.
- Soria, M., Piñero, V., Ledesma, N., Basile, P. y Riccardi, G. (2017). Análisis batimétrico de lagunas poco profundas mediante técnicas de Teledetección y SIG: aplicación a la laguna La Victoria. *Cuadernos del CURIHAM*, 23, pp. 51–61.
- Stenta, H., Rentería Beltrán, J. y Riccardi, G. (2005). Plataforma computacional para gestión de información en la Simulación Hidrológica-Hidráulica del Escurrimiento Superficial. *XX Congreso Nacional Del Agua y III Simposio de Recursos Hídricos Del Cono Sur*, Cap. Hidrología 1-13. Retrieved from [https://www.fceia.unr.edu.ar/curiham/es/wp-content/uploads/2018/11/cna-2005\\_-stenta-renteria-riccardi.pdf](https://www.fceia.unr.edu.ar/curiham/es/wp-content/uploads/2018/11/cna-2005_-stenta-renteria-riccardi.pdf)
- Uribe, N. (2010). Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. Versión SWAT2005. En: *SWAT Soil and Water Assessment Tool*. Guía de uso de SWAT adaptado de Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. 2005. Soil and Water Assessment Tool – Theoretical Documentation.

Grassland, Soil and Water Research Laboratory – Agricultural Research Service. Blackland Research Ce. Retrieved from <http://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>

Zimmermann, E. y Orsolini, H. (2008). Infiltración y exceso de lluvia. En: H. Orsolini, E. Zimmermann y P. Basile (Eds.), *Hidrología, procesos y métodos* (2da. ed., pp. 89–107). Rosario, Argentina: UNR Editora.

**Trabajo recibido el 12/12/2023, aprobado para su publicación el 20/02/2024 y publicado el 26/02/2024.**

### COMO CITAR

Soria, M. V., Basile, P. A. y Riccardi, G. A. (2024). Amenaza en el riesgo de inundaciones en sistemas hidrológicos de llanura ante escenarios de cambio climático: aplicación al sistema “Las Encadenadas”. *Cuadernos del CURIHAM*, 29. e193. <https://doi.org/10.35305/curiham.v29i.e193>

**Tipo de Publicación: ARTÍCULO.**

### ROLES DE AUTORÍA

Nombre y Apellido de Autores	Colaboración Académica													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Magalí Valeria Soria	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Pedro Abel Basile	X	X	X			X		X			X	X		
Gerardo Adrián Riccardi	X	X	X			X		X			X	X		

1. Administración del proyecto; 2. Adquisición de fondos; 3. Análisis formal; 4. Conceptualización; 5. Curaduría de datos; 6. Escritura - revisión y edición; 7. Investigación; 8. Metodología; 9. Recursos; 10. Redacción - borrador original; 11. Software; 12. Supervisión; 13. Validación; 14. Visualización.

### LICENCIA

*Este es un artículo de acceso abierto bajo licencia: Creative Commons Atribución -No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>)*

