

DOI: 10.24850/j-tyca-13-05-05

Artículos

Aplicación de modelos hidrológicos e hidráulicos para cuantificación de escurrimientos superficiales del sistema endorreico cuenca Laguna La Picasa

Application of hydrological and hydraulic models to quantify surface runoff in the endorheic system of the La Picasa Lagoon basin

Gabriela Alejandra Ponce¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6980-4945>

Sebastián Grande²

Matías Eder³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0624-5781>

Alejo Juan Sebastián Testa-Tacchino⁴

Claudio Alejandro Carignano⁵, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4212-0014>

Andrés Rodríguez⁶, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4110-6464>

¹Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, alejandraponce47@hotmail.com



²Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, sebasgrande@gmail.com

³Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, matiaseder2@gmail.com

⁴Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, alejo_testa@unc.edu.ar

⁵Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, ccarignano@hotmail.com

⁶Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, andres.rodriguez@unc.edu.ar

Autora para correspondencia: Gabriela Alejandra Ponce, alejandraponce47@hotmail.com

Resumen

Las cuencas en llanura presentan particularidades desde el enfoque de los procesos hidrológicos que allí se desarrollan. Se caracterizan por presentar un predominio de movimientos verticales (evapotranspiración-



infiltración) del agua sobre movimientos horizontales (escurrimientos) mostrando una fuerte interrelación entre el agua superficial y subterránea.

La cuenca Laguna La Picasa se define como una región de la pampa húmeda naturalmente deprimida, con un relieve de llanura ondulado que posee sectores bajos de anegamientos temporarios y lagunas permanentes sin una red de drenaje definida. Es una cuenca endorreica interjurisdiccional entre las provincias de Córdoba, Santa Fe y Buenos Aires (Argentina) que ha sufrido entre los años 2014 y 2017 inundaciones recurrentes causadas por un incremento del nivel medio de la laguna llegando a máximos históricos, produciendo inundaciones y afectando infraestructura, transporte y la actividad agrícola. Debido a estos problemas, mediante la aplicación de modelos hidrológicos e hidráulicos, se cuantifica y evalúa el comportamiento del sistema cuenca Laguna La Picasa, con el fin de evitar futuras inundaciones.

En el presente trabajo se aplica un modelo hidrológico utilizando la herramienta libre HEC-HMS y un modelo hidráulico 1D/2D usando la herramienta libre HEC-RAS, donde se considera el sistema de canales y reservorios que componen el sistema. Se analizan las marcas de inundación en reservorios y en la laguna La Picasa, y se define cómo regular la variación de niveles en los distintos reservorios dentro de rangos permitidos. Estos modelos conforman una herramienta útil para el estudio de futuras situaciones hidrológicas que puedan ocurrir en torno a la zona de estudio.

Palabras clave: cuenca Laguna La Picasa, lagunas de llanura, modelo hidrológico e hidráulico, HEC-RAS, HEC-HMS.

Abstract

The basins in the plain present particularities from the approach of the hydrological processes that take place there. They are characterized by presenting a predominance of vertical water movements (evapotranspiration-infiltration) over horizontal movements (runoff), showing a strong interrelation between surface and underground water.

The La Picasa Lagoon basin is defined as a naturally depressed humid pampa region with an undulating plain relief that has low sectors of temporary flooding and permanent lagoons without a defined drainage network. It is an inter-jurisdictional endorheic basin between the provinces of Córdoba, Santa Fe, and Buenos Aires (Argentina) that has suffered recurrent floods between 2014 and 2017 caused by an increase in the average level of the lagoon reaching historical maximums, producing floods, and affecting infrastructure, transport, and agricultural activity. Due to these problems, through the application of hydrological and hydraulic models, the behavior of La Picasa basin system is quantified and evaluated to avoid future floods.

In the present work, a hydrological model is applied using the HEC-HMS free tool and a 1D/2D hydraulic model using the HEC-RAS free tool, where the system of channels and reservoirs that make up the system is considered. The flood marks in reservoirs and La Picasa Lagoon are

analyzed, and it is defined as regulating the variation of levels in the different reservoirs within permitted ranges. These models are a useful tool for studying future hydrological situations that may occur around the study area.

Keywords: La Picasa Lagoon basin, plain lagoons, hydrological and hydraulic model, HEC-RAS, HEC-HMS.

Recibido: 17/12/2020

Aceptado: 30/06/2021

Introducción

El estudio de la hidrología se basa en la comprensión del ciclo hidrológico, sus procesos e interrelaciones. Si bien existe una cantidad importante de métodos y técnicas de medición de caudal y precipitación que han evolucionado con el tiempo, existen otros componentes, como la infiltración, la percolación profunda y flujo subterráneo que, por la dificultad en su evaluación y modelación, no tuvieron los mismos avances.

Por lo general son estimados de manera indirecta, lo que lleva a grandes incertidumbres con respecto a su conocimiento (Cabrera, 2012).

Los efectos del cambio de la cobertura vegetal y el uso del suelo que están asociados con una expansión de la agricultura y ganadería influyen en los procesos hidrológicos en pequeñas cuencas y a nivel regional (Sahagian, 2000).

Los modelos matemáticos hidrológicos e hidráulicos resultan una herramienta útil para conocer el funcionamiento y comportamiento de los diferentes componentes que integran el ciclo hidrológico, y ayudan a comprender y analizar eventos extremos (sequías e inundaciones), crecimiento poblacional o la dinámica de los ríos, cuerpos lagunares y su capacidad para suministrar agua. Estos modelos deben ser calibrados y verificados antes de ser puestos en funcionamiento (Palacio, García, & García, 2010).

La laguna La Picasa se encuentra en una región que se caracteriza por tener una actividad agrícola ganadera de altos rindes (alto rendimiento). Durante las últimas décadas (1998-2017) ha sufrido cambios en su nivel con oscilaciones de su volumen de agua debido a diversas causas, donde influyen las precipitaciones, topografía del terreno y velocidad de escurrimiento de las aguas.

La cuenca Laguna La Picasa se ubica en la pampa húmeda en Argentina, y posee un bajo potencial de escurrimiento e infiltración. En periodos hídricos normales y secos, la dinámica hídrica superficial es de tipo endorreica hacia bajos y lagunas locales donde el agua se evapora e

infiltra desde estos almacenamientos. Aquí predominan los procesos de transferencia de agua verticales (precipitación, infiltración, evaporación) sobre el escurrimiento. Mientras que, en los periodos húmedos, si los excesos hídricos superan la capacidad de los bajos y lagunas, éstos se desbordan y concatenan formando líneas temporarias de flujo superficial relativamente concentrado. Estas líneas convergen hacia la franja deprimida central (zona central del sistema) y desde allí hacia el este hasta desaguar en La Picasa, receptora final del escurrimiento (INA, 2018).

Desde 1973 hasta la actualidad la zona en estudio está sujeta a un periodo húmedo con precipitaciones medias anuales por encima del valor medio histórico de 900 mm/año (Ministerio de Obras Públicas Servicios y Vivienda, Universidad Nacional del Litoral, 1999a; Ministerio de Obras Públicas Servicios y Vivienda, Universidad Nacional del Litoral, 1999b). Como consecuencia, el nivel de la laguna La Picasa ha ido aumentando paulatinamente generando cortes de importantes vías de comunicación, como el FFCC y la Ruta Nacional número 7, que une Buenos Aires con las provincias de la región de Cuyo, e integra el más importante corredor bioceánico del país, además de anegamientos en cascos urbanos, cortes de caminos provinciales y la pérdida por anegamiento de importantes áreas productivas.

El objetivo de este trabajo fue cuantificar los impactos en los escurrimientos superficiales de las obras hidráulicas proyectadas en el diseño original, de las obras ejecutadas y de las obras de protección

proyectadas en Villa Rossi y Leguizamón, mediante la aplicación de un modelo hidrológico y un modelo hidráulico.

Inicialmente, en este trabajo se realizó una comparación entre las obras hidráulicas proyectadas en el diseño original y las obras que fueron ejecutadas, relevadas en planos conforme a obra. De allí, se observaron diferencias, y con el fin de evaluar el impacto en el comportamiento general del sistema se simuló por separado las obras originales y las obras ejecutadas. Luego se aplicó un modelo hidrológico y un modelo hidráulico en la cuenca endorreica de la laguna La Picasa, donde se calibraron los parámetros y se simuló varios escenarios. Se buscó comprender el sistema y cuantificar los escurrimientos superficiales mediante el modelo hidrológico y se cuantificó los parámetros del flujo sobre el sistema principal de desagüe de la cuenca mediante un modelo hidráulico. Los modelos se calibraron con datos de niveles de agua en la laguna La Picasa, precipitaciones y caudales aforados en campo. La elección del *software* libre HEC-HMS para el modelo hidrológico se debió a requerimientos y coordinación con el equipo técnico de la Administración Provincial de Recursos Hídricos (APRHI).

El modelo hidrológico evaluó la respuesta de la cuenca y los niveles en la laguna La Picasa considerando las modificaciones en el sistema de regulación, y el manejo del sistema combinado de gravedad y bombeo. Mientras que el modelo hidráulico simuló el escurrimiento en el sistema de canales principales y reservorios.

Zona de estudio

El área de estudio comprende la superficie delimitada por la cuenca de La Picasa, su laguna homónima como receptor final, sus canales de ingreso y su sistema de bombeo, y sus siete lagunas interconectadas (reservorios).

La laguna La Picasa se encuentra al sur de la provincia de Santa Fe y pertenece a una cuenca endorreica que abarca también parte de las provincias de Buenos Aires y Córdoba (Argentina). Se ubica en una depresión de 20 kilómetros de longitud (en sentido este-oeste) y 10 kilómetros de ancho (norte-sur). En periodos normales ocupa algo más de la mitad de ésta, pero en las últimas décadas ha desbordado alcanzando más del doble (Iriondo, 2010).

La cuenca presenta un paisaje de llanura suavemente ondulada, con alternancia de lomas muy aplanadas y sectores deprimidos, donde se ubican lagunas y bajos anegables. Estas geoformas incorporan una gran capacidad de almacenamiento superficial (INA, 2018). La dinámica de los escurrimientos superficiales presenta un comportamiento típico de sistemas hidrológicos de llanuras en donde predominan los procesos hidrológicos de precipitación, evaporación e infiltración (Iriondo, 2010).

Dentro del área de estudio se encuentran las localidades de Laboulaye, Villa Rossi, Rufino, Aarón Castellano y Diego de Alvear, entre otras (Figura 1).

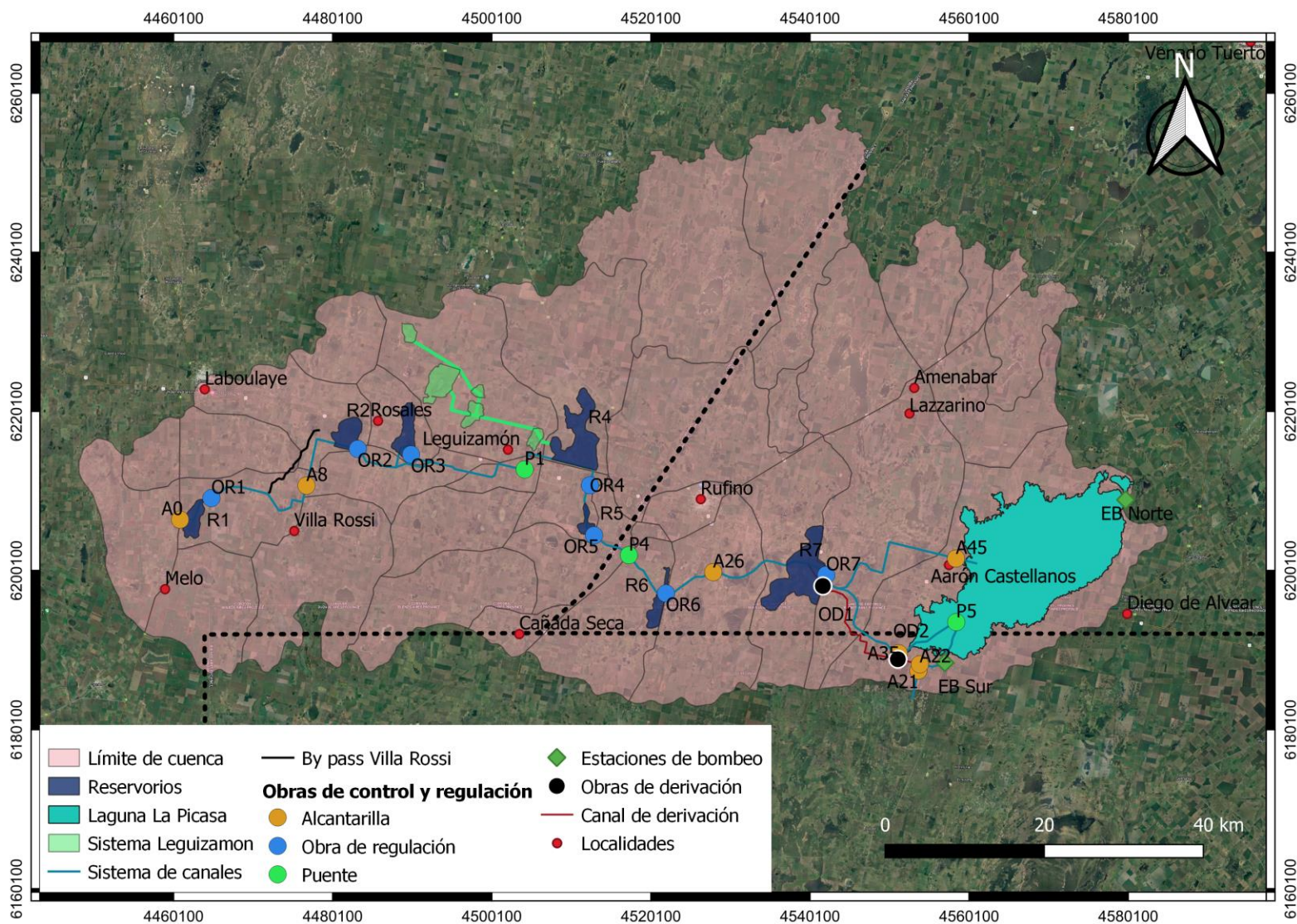


Figura 1. Zona de estudio: cuenca Laguna La Picasa.

La capacidad de almacenamiento superficial en bajos naturales lleva a respuestas hidrológicas diferentes ante la ocurrencia de precipitaciones, que dependen fuertemente del grado de saturación del sustrato de estos bajos. En la Figura 2 se presentan las depresiones topográficas localizadas en la cuenca La Picasa, mostrando un típico diseño anárquico, donde se observa la superficie tributaria con transferencias en sus divisorias con diversos puntos de salida. Estas depresiones topográficas ocupan un área aproximada de 1 100 km², que representa casi un 18 % de la superficie de la cuenca (área total de la cuenca = 6 200 km²).

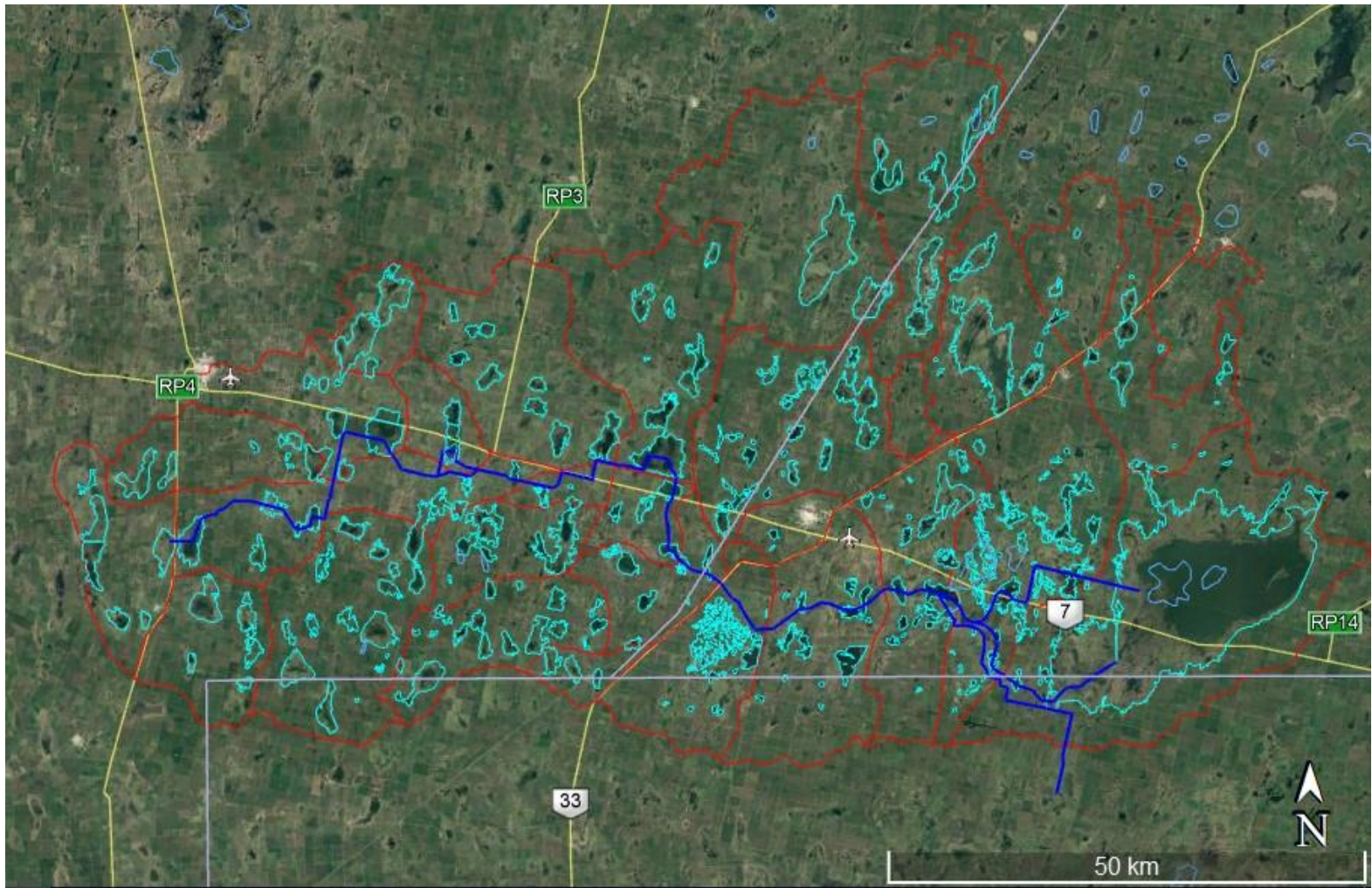


Figura 2. Depresiones de agua en la cuenca Laguna La Picasa.

La característica hidrológica fundamental en este sistema es el predominio de los movimientos verticales del agua sobre los movimientos horizontales, siendo de importancia la evaporación, evapotranspiración, infiltración, intercambios en la zona no saturada y la capa freática, y variaciones en el almacenamiento superficial y subterráneo. Este sistema

puede definirse como un sistema hidrológico no típico (SHNT) o de llanura.

La información hidrogeomorfológica se tomó de los estudios realizados por Carignano (Carignano, 1999; Carignano, Kröhling, Degiovanni, & Cioccale, 2014), donde se observó que el tipo de suelo que predominaba en la zona de estudio era molisoles de texturas franco arenosos a francos con problemas de drenaje por condiciones de topografía y freática elevada (Carignano, 1999; Carignano *et al.*, 2014). En la zona central del sistema se puede distinguir una franja deprimida central (FDC) que se desarrolla en forma longitudinal inmediatamente al sur del ferrocarril, en el tramo comprendido entre las estaciones Laboulaye y Aarón Castellanos (Iriondo, 2010).

La FDC tiene una forma planocóncava, con numerosos bajos cerrados y una pendiente general hacia el este de aproximadamente 0.00030 m/m; en su extremo oriental se ubica la laguna La Picasa. Los sectores altos y medios del paisaje tienen suelos bien drenados y profundos, mientras que los sectores bajos son suelos finos, con dificultad de drenaje (INA, 2018). Debido a sus características morfológicas, edafológicas y climáticas (Carignano *et al.*, 2014) no se ha desarrollado en el sistema una red fluvial natural jerarquizada, pero en las últimas décadas se han construido canales que vinculan bajos y lagunas, principalmente sobre la franja central entre Rufino y La Picasa.

Descripción de las obras hidráulicas que componen el sistema

El estado nacional y las provincias proyectaron y ejecutaron una serie de obras hidráulicas a fin de posibilitar un mejor drenaje hacia la laguna La Picasa y un control de sus niveles en periodos húmedos. El sistema se constituye por la laguna La Picasa y siete lagunas de regulación ubicadas hacia el oeste de la laguna principal, interconectadas por canalizaciones entre la Provincia de Córdoba y Santa Fe, y un sistema de descarga compuesto por dos estaciones de bombeo (EBSur y EBNorte), y canales que conducen las aguas desde la laguna La Picasa hacia el río Salado en la provincia de Buenos Aires.

Las obras hidráulicas proyectadas tuvieron como objetivo posibilitar la evacuación de excesos pluviales por medio de un sistema combinado de gravedad y bombeo; regular la variación de niveles de la laguna La Picasa dentro de un rango admitido a partir de políticas de manejo de los excedentes hídricos; y mejorar la capacidad de evacuación de la franja deprimida central por medio de un conjunto de obras de canalización y de dispositivos de regulaciones mejorando la transitabilidad en caminos existentes. Estas obras se dividieron en los siguientes módulos (INA, 2018):

Módulo I. Obras internas de canalización: el sistema de canales vincula bajos naturales, como se observa en la Figura 1. La traza del

mismo sigue la trayectoria de los escurrimientos superficiales de mayor jerarquía a lo largo de la franja deprimida central.

Módulo II. Obras de regulación: consistente en siete reservorios o lagunas de regulación ubicadas en depresiones naturales del terreno, las cuales están conectadas por el sistema de canalización que se describen en el Módulo I y cuya descarga está controlada por estructuras hidráulicas denominadas obras de regulación (OR), que cuentan con compuertas regulables de accionamiento manual y colchonetas de protección aguas abajo para prevenir procesos de erosión local. El objetivo de estas obras es atenuar los caudales pico de crecida y aumentar el espejo de agua acrecentando las áreas de evaporación (Figura 1).

Módulo III. Obras de derivación y protección: comprenden dos estaciones de bombeo (EBSur y EBNorte) y dos canales de derivación (D1 y D2). El objetivo de estas obras es controlar el nivel de agua en la laguna, y los caudales que ingresan y egresan de la laguna La Picasa. Por debajo de la cota 105.80 m IGM, la única vía de descarga significativa de la laguna es la evaporación (Figura 1).

El canal derivador D1 nace en el interior de la laguna de regulación número 7 y se conecta con el canal Horquetas, que conduce los escurrimientos hacia la cuenca del río Salado (provincia de Buenos Aires). El ingreso al canal derivador es controlado por la obra de derivación (OD1) que permite regular el ingreso de agua al canal mediante compuertas.

El canal derivador D2 se ubica aproximadamente 3 km aguas arriba del canal Horquetas, cuyo objeto es realizar un segundo control del caudal. Estas obras permitieron controlar los niveles de agua en el canal y derivar los excedentes nuevamente hacia la laguna La Picasa.

La Estación de Bombeo Norte se ubica en el sector noreste de la laguna y está compuesta de cinco bombas de 1 m³/s de capacidad y 6 m de altura de carga, que permite evacuar un caudal menor o igual a 5 m³/s hacia un canal que conduce los escurrimientos por una serie de bajos naturales hasta la laguna El Chañar, próxima a la localidad de Teodelina, cabecera de la cuenca del río Salado.

La Estación de Bombeo Sur se ubica al sur de la laguna La Picasa y es idéntica a la estación de bombeo Norte. Su funcionamiento es el siguiente: si el caudal derivado por gravedad hacia la cuenca del río Salado es menor a 5 m³/s y si el nivel de la laguna La Picasa es mayor a 98.50 m IGM se bombea el caudal necesario para completar los 5 m³/s hacia la cuenca del río Salado. En caso de que el caudal que ingrese al reservorio 7 sea mayor a 5 m³/s, se derivan sólo 5 m³/s y el resto ingresa a la laguna mediante el sistema de canalización.

Módulo IV. Obras de protección: se ubican próximas a la localidad de Villa Rossi, Córdoba, Argentina (By Pass Villa Rossi). Tienen como objetivo mejorar la capacidad de escurrimiento en la zona y reducir la vulnerabilidad de la localidad. El sistema de drenaje inicial no tenía capacidad suficiente para conducir los caudales producidos por la cuenca, por lo que genera anegamientos en la zona, y afecta una importante

superficie agrícola y caminos rurales. Además, como otras obras de protección y regulación, se consideró el sistema de canales y reservorios ubicados en la localidad de Leguizamón (Figura 1).

Materiales y métodos

Datos antecedentes

Las fuentes de información disponibles y utilizadas para la aplicación del modelo hidrológico e hidráulico se presentan en la Figura 3. Incluyen datos de precipitación en todas las estaciones y de evapotranspiración sólo en la estación Marcos Juárez y Pergamino.

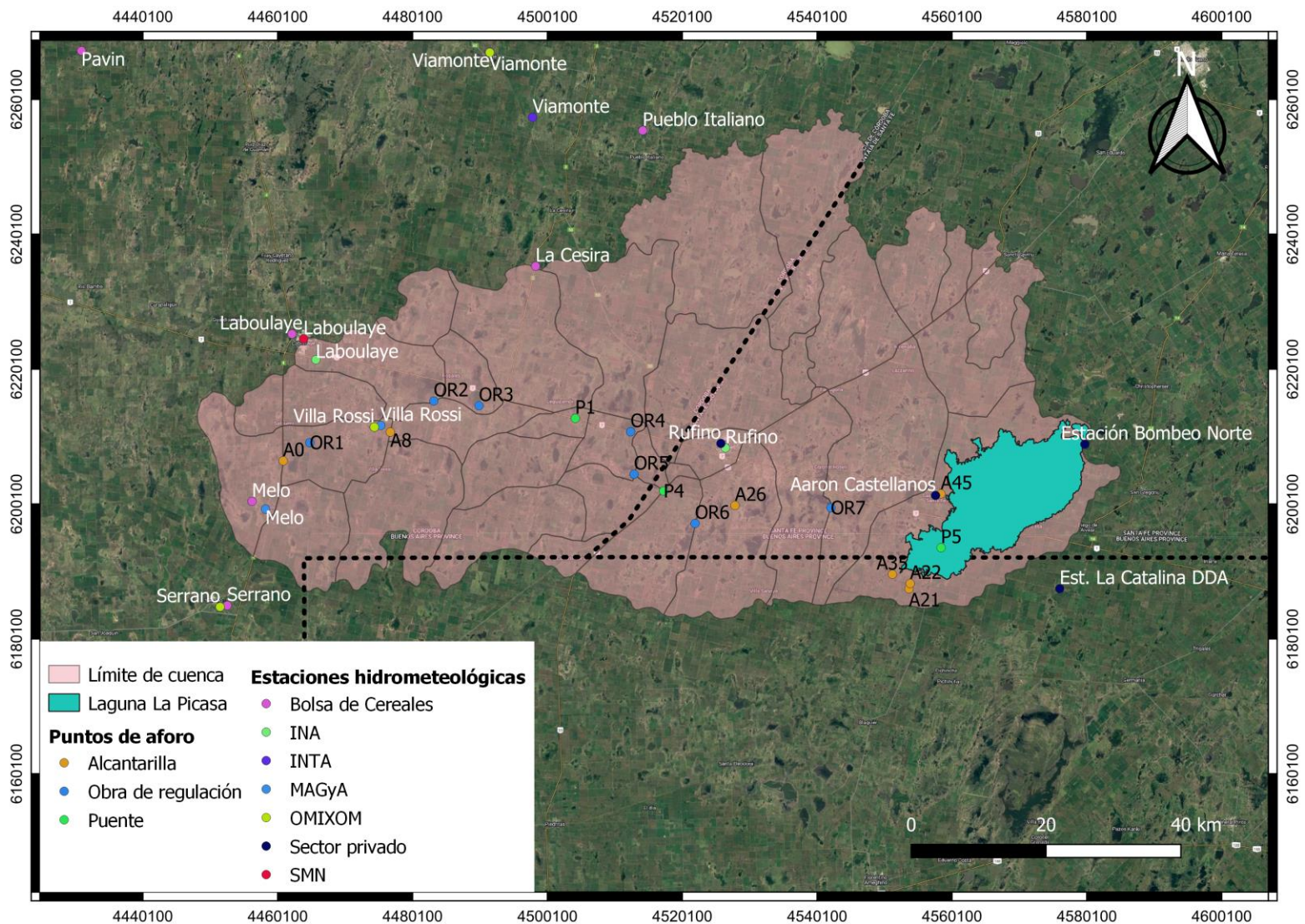


Figura 3. Inventario de estaciones hidrometeorológicas y puntos de aforo ubicados en la zona de estudio.

La precipitación varía en tiempo y espacio. En general es la única fuente de humedad que tiene el suelo, por lo que es necesario contar con

datos con la mejor precisión posible, pues de ellos dependerá la precisión de los modelos planteados. Los datos de precipitaciones son diarios y se obtuvieron a partir de registros pluviométricos con series de longitudes entre 1 y 20 años, y con distribución espacial de baja densidad.

La evapotranspiración ET se define como la cantidad de agua total que se pierde en la atmósfera, y que une los conceptos de evaporación y transpiración. En este trabajo se considera que varía en el tiempo y para cada reservorio, pero es uniforme espacialmente. Para estudiar la ET se considera que una parte de la precipitación es captada en el suelo por la vegetación desde donde se evapora parcialmente; otra parte llega al suelo, lo satura y luego se evapora desde el suelo húmedo. Una vez que el suelo se encuentra saturado, el agua escurre hacia cuerpos de agua desde donde también el agua se evapora. Los datos de ET son diarios y se obtuvieron de la aplicación del método del Thornthwaite, en función de la serie diarios de temperatura en las estaciones de Rufino.

Los puntos de aforo de caudal se ubican a la salida de cada reservorio que compone el sistema de la laguna La Picasa sobre obras de regulación, obras de derivación y obras de cruce, como alcantarillas y puentes. Se trata de mediciones que no son diarias, sino que fueron realizadas uno o dos días en el mes. Se cuenta con datos de aforos desde 1998, recopilados y medidos por la provincia de Santa Fe por los ingenieros Gustavo Villauria y Alfredo Raparo, y que se encuentran expuestos en el proyecto "Monitoreo de caudales – obras internas cuenca Laguna La Picasa".

Los niveles de agua medidos sobre la laguna La Picasa —utilizados luego para la calibración del modelo hidrológico— tienen una variación temporal diaria aplicados a todo el cuerpo de agua. Los datos recopilados abarcan el periodo de estudio que va de 2007 a 2017.

La información topobatemétrica del sistema abarca modelos digitales de elevación antecedente de los siete reservorios; modelo digital de elevación elaborado con base en tareas de campaña en la laguna La Picasa; curvas H-V y H-A para cada reservorio que compone el sistema, y trazado del sistema principal de canales.

Modelo hidrológico

El modelo hidrológico tiene como objetivo el estudio y análisis del sistema actual que compone la cuenca Laguna La Picasa y la calibración de sus parámetros con datos observados en campo. Primero se evalúan la respuesta hidrológica del sistema teniendo en cuenta las obras hidráulicas proyectadas en el diseño original; luego se consideran las obras hidráulicas ejecutadas, y por último se toman en cuenta las modificaciones realizadas sobre las obras de regulación en los reservorios 2 y 4; finalmente se evalúan los niveles de agua en la laguna La Picasa considerando diferentes manejos del sistema de bombeo. El paso de

tiempo que se utiliza durante la modelación es diaria para un periodo que abarca de 2007 a 2017.

Para el desarrollo del modelo se utilizó el programa HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center's-Hydrologic Modeling System*), en el periodo 2007-2017, que abarca una ventana de tiempo de 10 años. Durante este periodo se observó un aumento significativo del nivel de agua de la laguna La Picasa.

En la Figura 4 se presenta el esquema del modelo de la cuenca compuesto por 29 subcuencas que componen el sistema principal, siete subcuencas denominadas externas que generan aporte al sistema de La Picasa, 27 tránsitos y ocho reservorios.

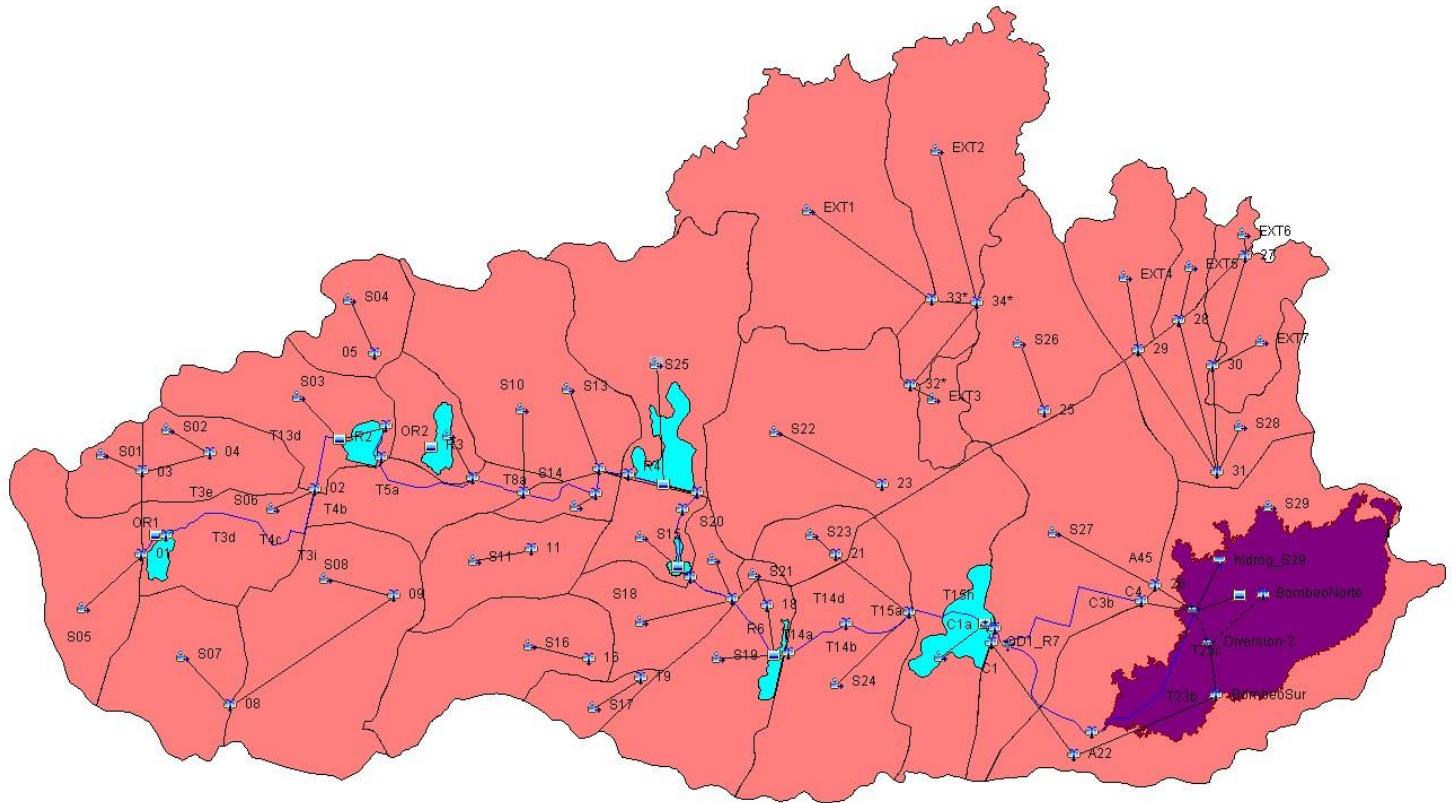


Figura 4. Esquema del modelo de la cuenca en HEC-HMS.

Para la delimitación de las 29 subcuencas se consideraron los principales bajos, los cuales se conectaron entre sí artificialmente por medio de canalizaciones que desembocan en la laguna La Picasa; depresiones naturales; y obras de arte, como alcantarillas, rutas y puentes (Figura 5).

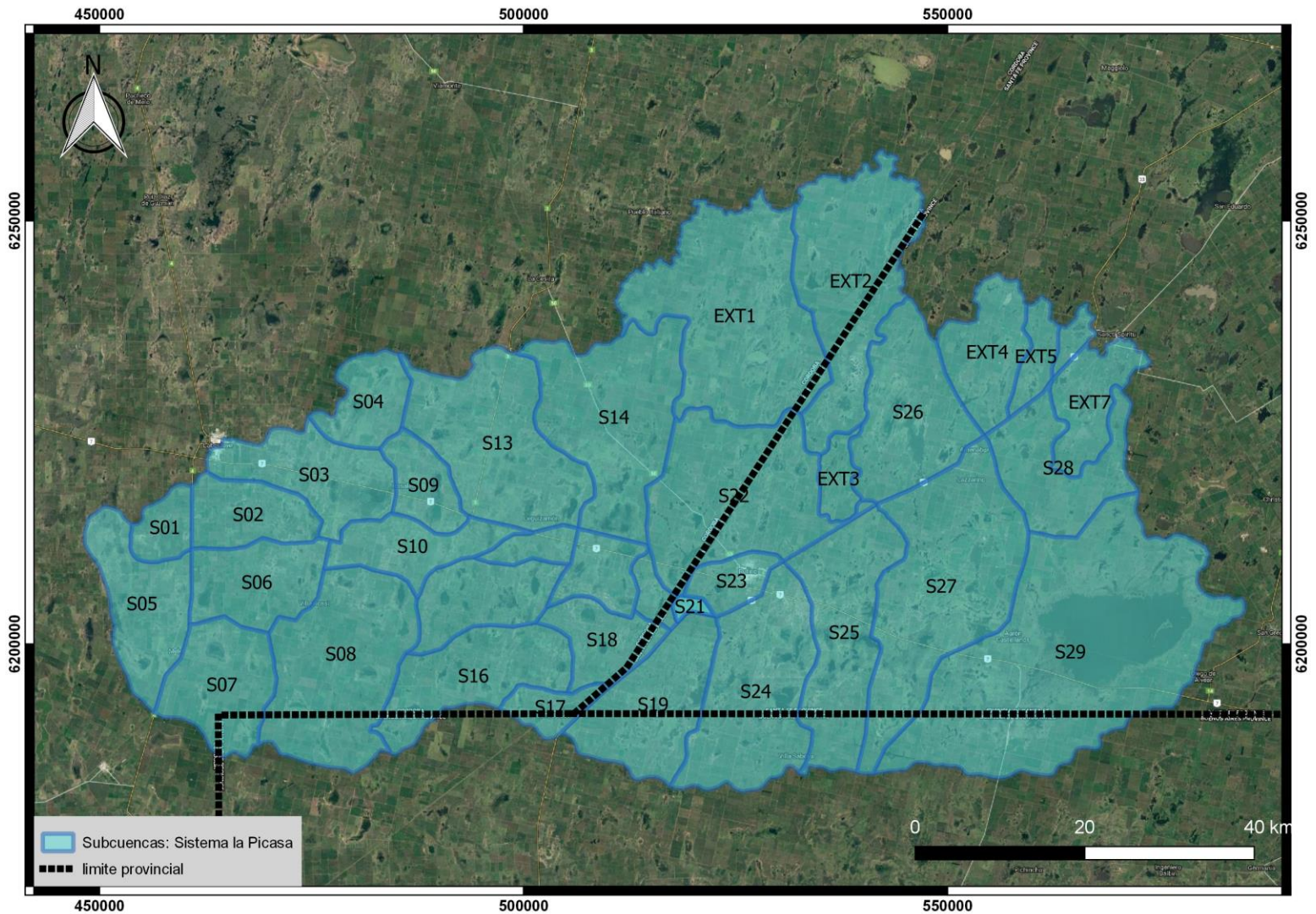


Figura 5. Delimitación de subcuencas.

El método de pérdidas utilizado fue el SMA (*Soil Moisture Accounting*). Se trata de un método continuo que utiliza tres capas para representar la dinámica del movimiento del agua en el suelo. Simula el

movimiento y almacenamiento del agua en la cubierta vegetal, superficie del suelo, perfil del suelo y acuíferos. Considera al flujo de agua en términos de velocidad (mm/h) que pasa de la superficie del suelo hacia la primera capa de suelo y desde ésta hasta el primer acuífero. En este trabajo se determinó el flujo de agua con base en el uso, con predominio agroganadero (Ministerio de Agricultura y Ganadería de la Provincia de Córdoba, 2019), y tipo de suelo, mencionado anteriormente, en términos de la permeabilidad (Universidad Nacional de Córdoba, 2019) (Figura 6).

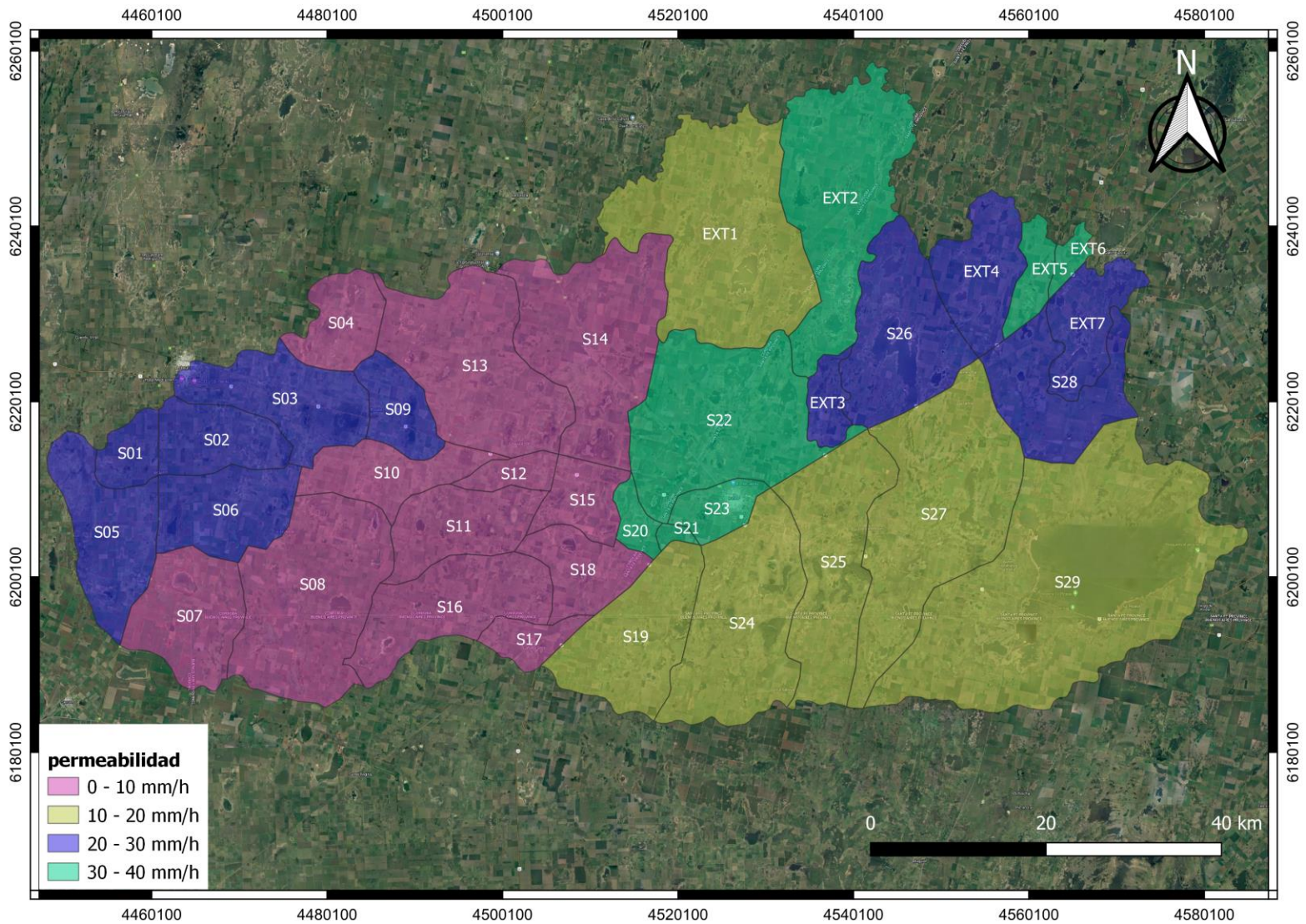


Figura 6. Clasificación en subcuencas según permeabilidad en mm/h.

Para el tránsito de los hidrogramas en los canales se utilizó el método de Muskingum desarrollado por McCarthy (1938), que se basa en el principio de que una onda de crecida desplazándose en un río se

amortigua a causa de la fricción del fondo y de las márgenes, así como por los almacenamientos naturales en el lecho de inundación (Llamas, 1993). Los parámetros se definieron en función de las características geométricas y pendientes longitudinales de cada uno de los canales.

Para el tránsito de los hidrogramas en los reservorios se aplicó el método de Puls (CEWRC-HEC, 1990). Los reservorios se modelaron según parámetros definidos por la geometría de los cuerpos de agua. Además, se consideraron ingreso y egreso directos sobre cada cuerpo lagunar, cuantificando las precipitaciones y evapotranspiraciones, respectivamente.

El escurrimiento subterráneo hacia la laguna La Picasa se definió según un análisis del uso y tipo de suelo, curvas de nivel y sistema de canales principales; mientras que el aporte subterráneo directo se atribuyó a la subcuenca que incluye a la laguna (Figura 7).

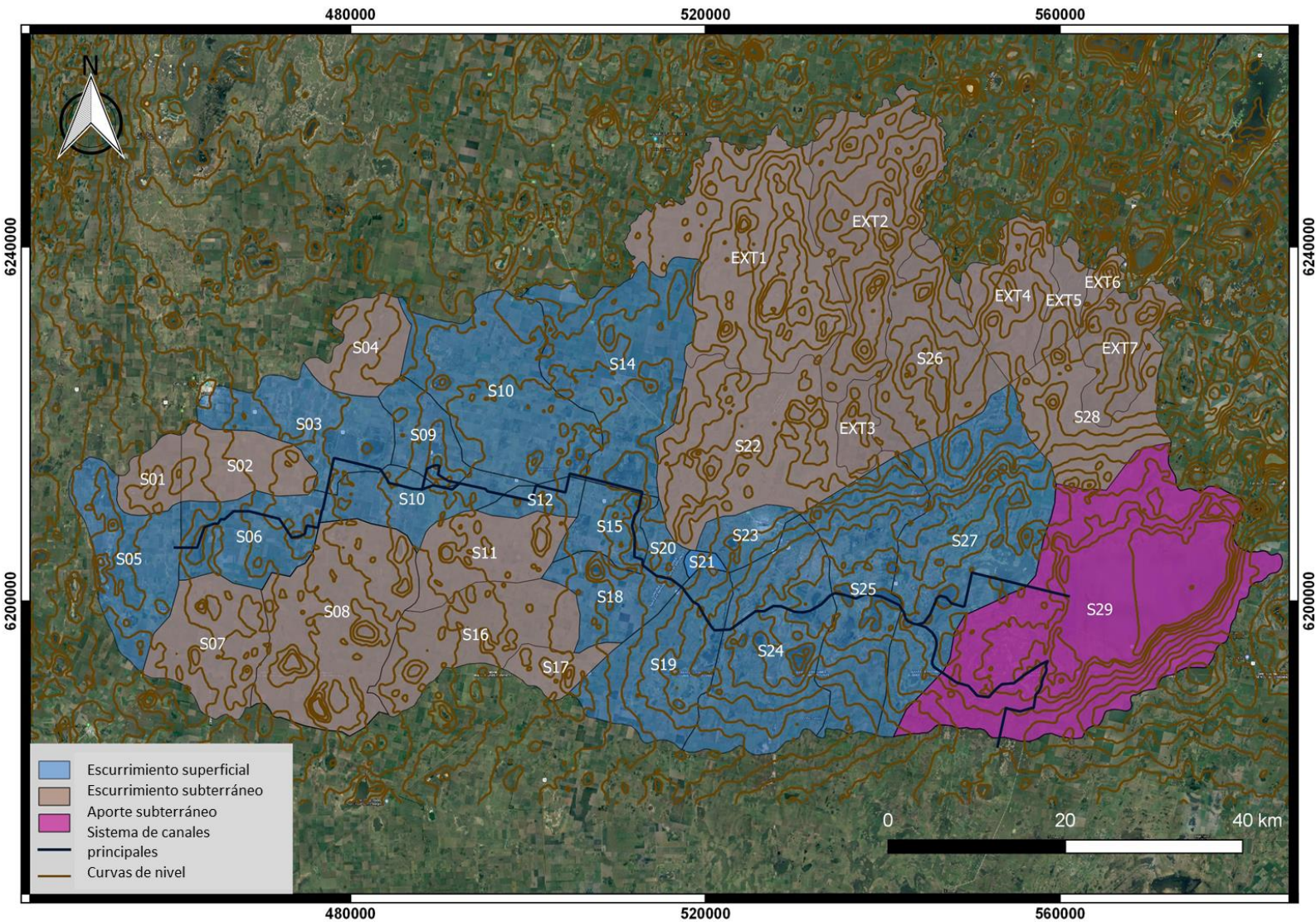


Figura 7. Subcuencas con aporte subterráneo y con aporte superficial.

Los balances se desagregaron para cada cuerpo lagunar en forma independiente siguiendo el orden natural de escurrimiento de las depresiones o las interconexiones que se determinen. Estas

conformaciones fueron variando en la simulación, estableciéndose diferentes interconexiones de un cuerpo lagunar a otro, con el fin de evaluar distintos escenarios.

Calibración del modelo hidrológico

Para la calibración del modelo hidrológico se compararon los resultados del modelo con datos observados de niveles de agua y caudales aforados en secciones de control ubicadas a lo largo del sistema de la laguna La Picasa (Figura 1). Los cuatro periodos de estudio fueron los siguientes: 1er periodo, de marzo a noviembre de 2007; 2º periodo, de marzo a junio de 2010; 3er periodo, de marzo a diciembre de 2012, y 4º periodo, de enero a diciembre de 2016.

El procedimiento de calibración consistió en simulaciones iterativas, donde se ajustaron los parámetros de almacenamiento superficial; almacenamiento en el primer y el segundo acuífero; velocidad de infiltración asociada con el flujo máximo de agua que pasa de un nivel al siguiente, y tiempos de retardo definidos para cada subcuenca hasta lograr que los resultados del modelo y las observaciones realizadas en campo se aproximen. Los tiempos de retardo hacen referencia a tiempos que transcurren para que el agua almacenada fluya lateralmente alimentando el cauce como caudal base.

Escenarios simulados

Una vez calibrados los parámetros de las subcuencas se simularon nueve escenarios en los que fue variando el diseño de obras hidráulicas según planos originales (E1), según planos conforme a obra (E2 y E3), y también se plantearon alternativas con elevación de umbrales en reservorios 2 y 4 (E4), y se consideraron distintas opciones con respecto al manejo del sistema de bombeo (E5, E6, E7, E8 y E9):

Escenario 1-E1: planos según diseño original de reservorios y sistema de canales principales sin obra de desvío en Villa Rossi.

Escenario 2-E2: planos conforme a obra sin considerar la obra de desvío en Villa Rossi.

Escenario 3-E3: planos conforme a obra, adicionando reservorio 3 con sus canales de ingreso y egreso, la obra de desvío de Villa Rossi y modificaciones en el ingreso del reservorio 2.

Escenario 4-E4: con base en el E3 se modificaron niveles de umbrales en reservorios 2 y 4 proponiendo elevación de los mismos.

Escenario 5-E5: no se consideró bombeo norte y sur.

Escenario 6-E6: se planteó capacidad máxima de bombeo en estación de bombeo sur y norte.

Escenario 7-E7: se buscó bombeo óptimo de manera tal de mantener el nivel de la laguna según consideraciones de proyecto.

Escenario 8-E8: con base en E3 se agregó capacidad máxima de 5 m³/s en Estación de Bombeo Sur.

Escenario 9-E9: con base en E4 se agregó capacidad máxima de 5 m³/s en Estación de Bombeo Sur.

Modelo hidráulico

El modelo hidráulico tiene como objetivo el estudio y análisis del sistema de canales principales y de reservorios donde se definen las áreas inundables, los niveles de agua y las velocidades para cada reservorio planteando diferentes escenarios.

Para la implementación del modelo hidráulico se utilizó el programa computacional HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center-River Analysis System*) (CEWRC-HEC, 1990) en el periodo que abarca del 17 de diciembre de 2015 al 25 de marzo de 2016, periodo en el cual la laguna superó el nivel máximo de proyecto. Esta herramienta permite realizar cálculos hidráulicos unidimensionales 1D, bidimensionales 2D o combinación de modelos 1D y 2D (Brunner *et al*, 2015). Para resolver los

modelos bidimensionales (2D), HEC-RAS permite utilizar las ecuaciones de Saint-Venant o las ecuaciones de onda difusiva (2D).

En este trabajo se realizó un modelo combinado 1D/2D. Se utilizaron componentes 1D para el sistema de canales debido a que en estos elementos el flujo es fundamentalmente unidimensional; en la zona de los reservorios en las cuales el flujo es bidimensional se utilizaron mallas de cálculo 2D.

La principal ventaja en el empleo combinado de modelado 1D y 2D es la disminución del costo computacional y, por lo tanto, del tiempo de cálculo respecto de un modelo 2D. En todas las simulaciones se utilizaron las ecuaciones de onda difusiva 2D, asumiendo que los términos del gradiente de presión gravimétrico y los términos de fricción son los dominantes.

Para asignar cotas a las celdas de las áreas bidimensionales se confeccionó un modelo digital de elevación del terreno (MDE) a partir de información topográfica recopilada de antecedentes y relevada en campo de los diferentes reservorios, y se complementó esta información con el MDE MERIT para ampliar el dominio de cálculo de las áreas 2D.

En la Figura 8 se presenta el esquema del modelo hidráulico, el cual está compuesto por 10 canales unidimensionales y ocho mallas de cálculo bidimensional. El tamaño de celdas 2D aproximado fue de 30 x 30 m, con lo cual el modelo completo estuvo compuesto por 779 000 celdas.

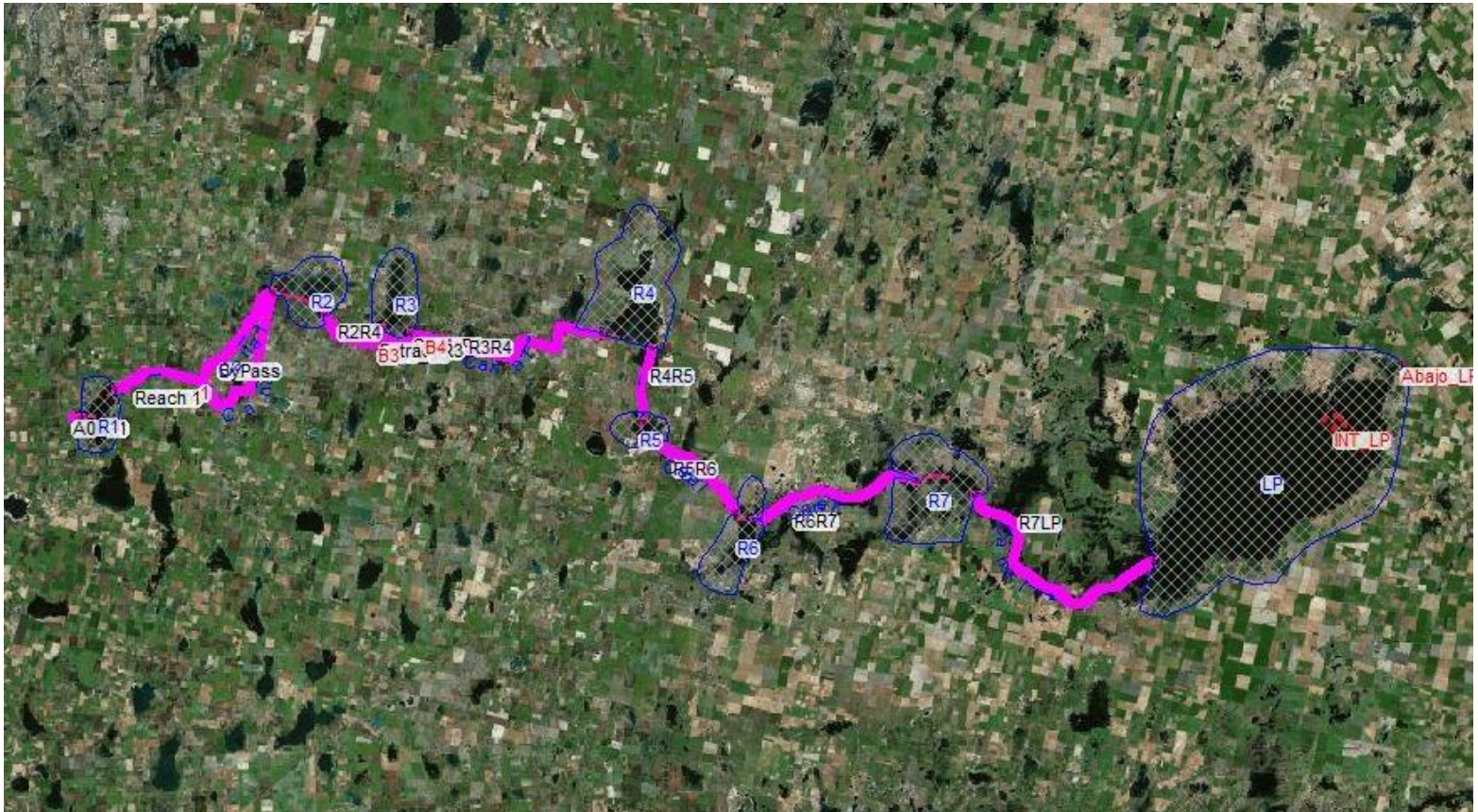


Figura 8. Configuración de geometría 1D y 2D en el sistema Laguna La Picasa.

La configuración previa a la ejecución del modelo cuasi 2D involucró la definición del tamaño de malla (Δx) y el paso de tiempo de cómputo (Δt), que permitieron obtener una buena precisión numérica y una reducción al mínimo del tiempo de cálculo.

El tamaño de malla permitió al modelo adecuarse apropiadamente al terreno e incluir todas las obstrucciones presentes. El paso de tiempo

de cómputo se relaciona con el número de Courant, y se obtuvo de la relación entre espacio, velocidad y tiempo.

Las condiciones de borde fueron los caudales obtenidos del modelo hidrológico. En extremos aguas arriba del sistema se introdujeron hidrogramas y aguas abajo se definió una condición de profundidad normal. Además, se introdujeron como flujos laterales los hidrogramas de salida de los puntos de cierre de las subcuencas estudiadas en las secciones correspondientes.

Calibración del modelo hidráulico

Para la calibración del modelo hidráulico se comparó el área de inundación obtenida para el escenario 1 y 2 de los reservorios 2 y 4 con el mapeo de áreas inundadas obtenido mediante un estudio del Índice Diferencial de Agua Normalizado Modificado (MNDWI) realizado con imágenes de satélite Landsat 7 y 8 (Universidad Nacional de Córdoba, 2019).

Escenarios simulados



El modelo hidráulico se aplicó en cuatro escenarios, en función del diseño de obras hidráulicas original, de los planos conforme a obra y de alternativas con elevación de umbrales en reservorios:

Escenario 1-E1: traza de canal conforme a obra, con obras de regulación según diseño original, sin obra de desvío en la localidad de Villa Rossi y diseño del reservorio 3.

Escenario 2-E2: planos conforme a obra sin obra de desvío en la localidad de Villa Rossi ni conexión del reservorio 3 (con obras de regulación conforme a obra).

Escenario 3-E3: planos conforme a obra, adicionando planos de proyecto del reservorio 3 y la obra de desvío en la localidad de Villa Rossi.

Escenario 4-E4: con base en E3 se modifican niveles de umbrales en reservorios 2 y 4, proponiendo elevación de los mismos como obras futuras.

Resultados y discusión

Modelo hidrológico



Validación y ajuste del modelo

Los resultados obtenidos para el escenario 3, que representa al sistema en su estado actual, se asemejan a los datos observados de niveles de agua en la laguna La Picasa. El incremento del nivel observado a partir del año 2015 pudo reflejarse en el modelo encontrándose en coincidencia con un aumento en las precipitaciones y por lo tanto un aumento en los escurrimientos superficiales. Además se visualiza una diferencia máxima entre niveles de 70 cm sucedido en el año 2012 (Figura 9).

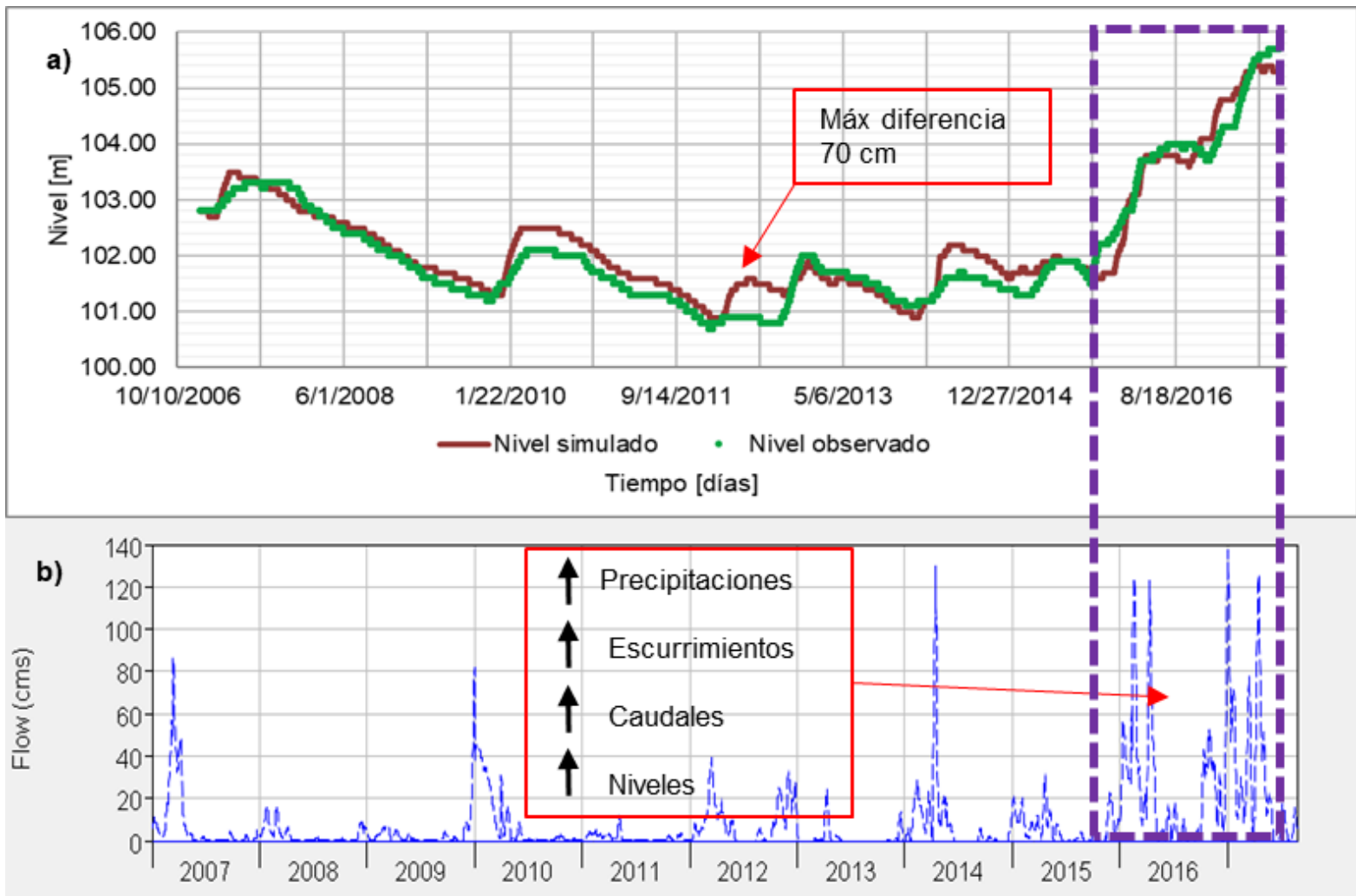


Figura 9. a) Comparación de niveles de agua obtenidos del modelo y niveles de agua observados en la laguna La Picasa, periodo 2007-2017; b) serie de caudales aplicada al modelo hidrológico de la laguna La Picasa, periodo 2007-2017.

Adicionalmente se determinó el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe que permite evaluar la habilidad predictiva de los modelos hidrológicos. Se aplicó a los niveles de agua observados y simulados en la laguna La Picasa usando la siguiente ecuación:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (h_m^t - h_0^t)^2}{\sum_0^t (h_0^t - \bar{h}_0)^2} \quad (1)$$

Donde h_m^t hace referencia al nivel de agua simulado; h_0^t , al nivel de agua observado, y $\bar{h}_0$ al nivel medio de los datos observados. De este análisis se obtuvo un valor de $NSE = 0.93$ y según valores de referencia del criterio cuando el coeficiente es > 0.8 se considera un ajuste “excelente” (Molnar, 2011).

El análisis de caudales mínimos, medios y máximos se lleva a cabo mediante la comparación de los resultados de caudal obtenidos del modelo con los caudales aforados en cada sección de control. Los puntos de comparación fueron obras de regulación OR1, OR2, OR4, OR6 y OR7, puentes P1 y O4 y alcantarilla A26.

La comparación y consiguiente ajuste del modelo se realizó para los escenarios 1, 2, 3 y 4 en los cuatro periodos seleccionados en el proceso de calibración de parámetros. Se ajustó el modelo para un periodo húmedo, como fue el de 2015, y para un periodo seco, como fue el del año 2010.

En la Figura 10, Figura 11 y Figura 12 se observa cómo se logró calibrar el modelo hidrológico, de manera que representa al sistema cuenca Laguna La Picasa y cuantifica los escurrimientos superficiales, siendo una herramienta útil para aplicar en futuras situaciones que puedan ocurrir.

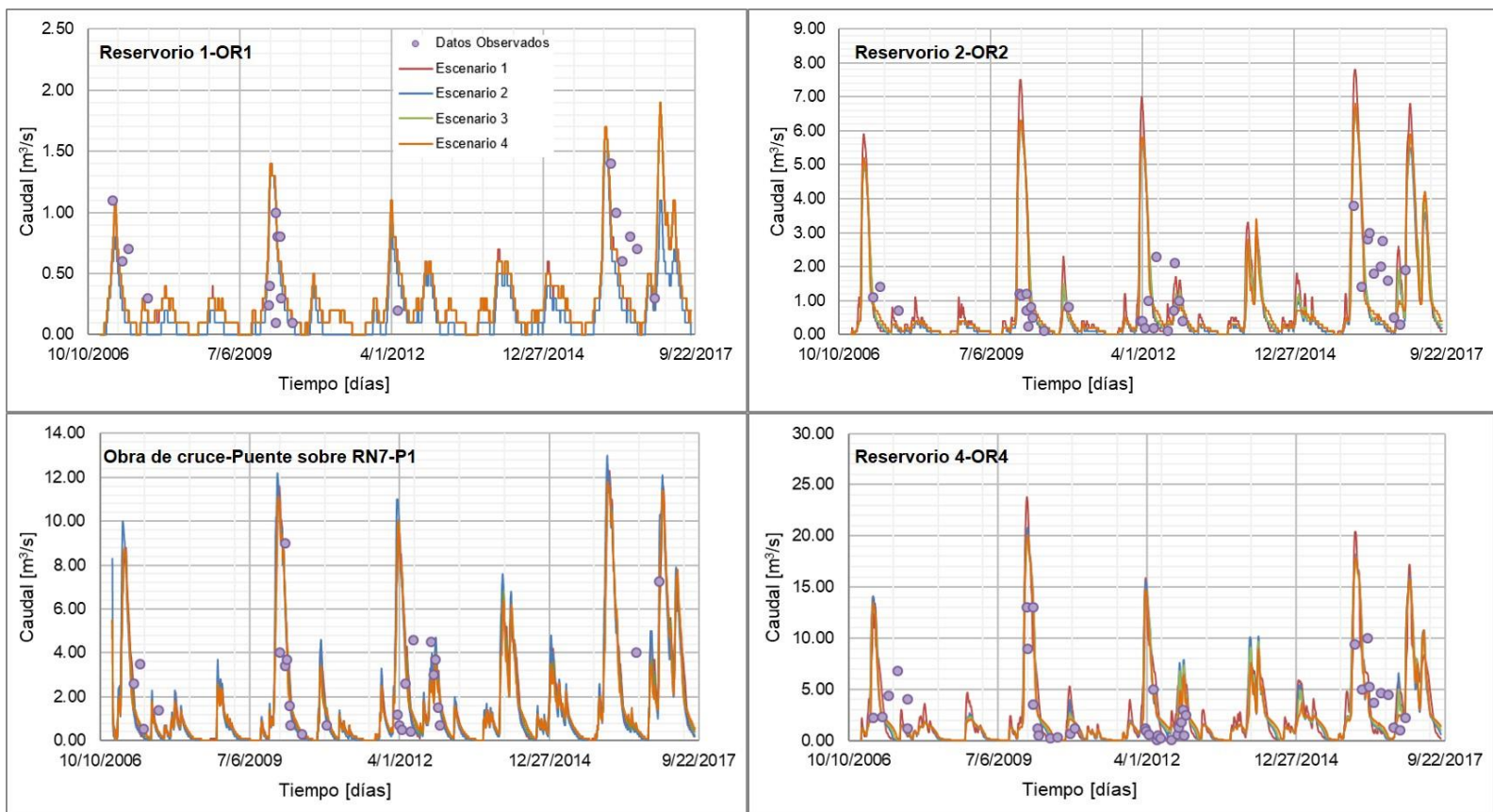


Figura 10. Resultados de E1, E2, E3 y E4 para las secciones de control OR1, OR2, P1 y OR4. En puntos se observan los datos aforados de caudal.

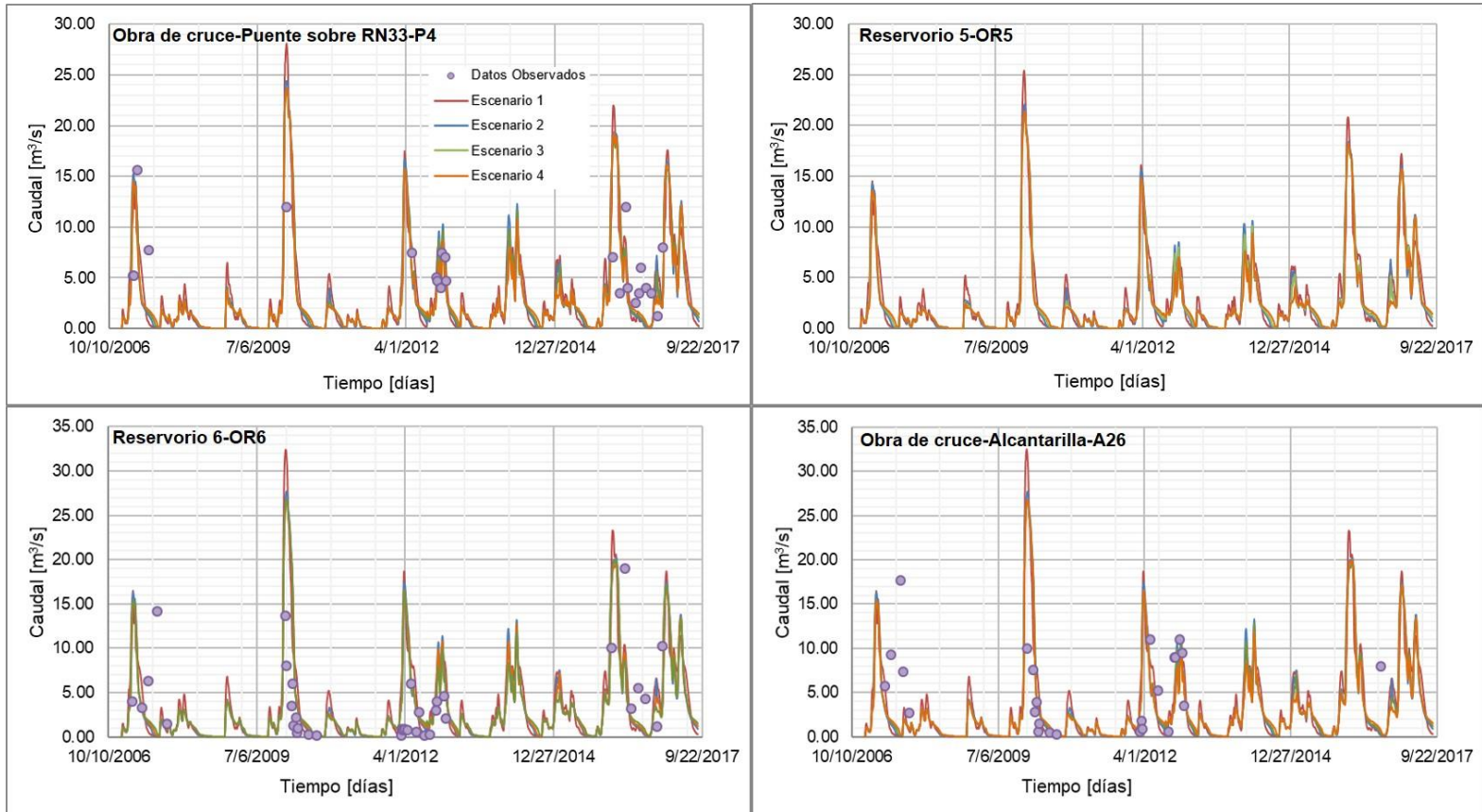


Figura 11. Resultados de E1, E2, E3 y E4 para las secciones de control P4, OR5, OR6 y A26. En puntos se observan los datos aforados de caudal.

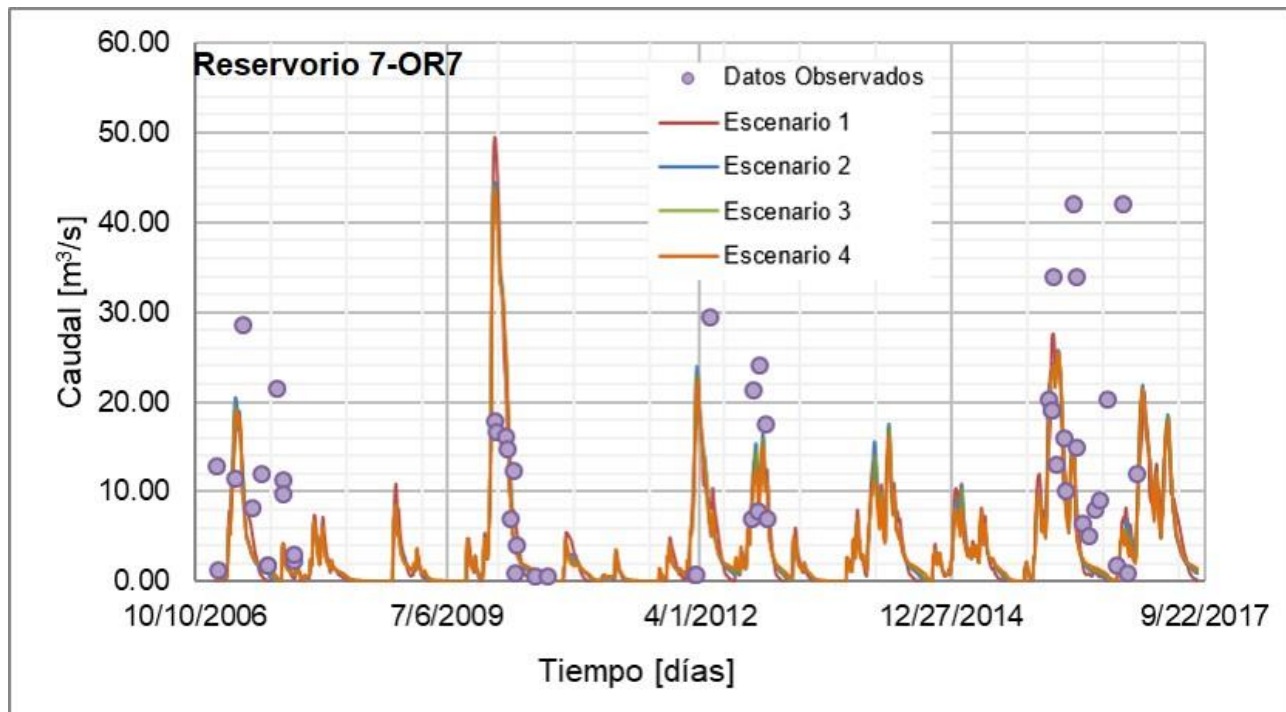


Figura 12. Resultados de E1, E2, E3 y E4 comparados con datos observados en sección de control OR7.

Una vez ajustado el modelo fue posible analizar el efecto del sistema de reservorios frente al evento de precipitaciones ocurrido durante el periodo de análisis para el escenario 3. La amortiguación o regulación lograda en el sistema de reservorios se puede observar en la Figura 13 y Figura 14, donde se destaca el efecto de amortiguación en los reservorios R1, R2, R3 y R4. Mientras que en los reservorios R5, R6 y R7 el caudal de entrada se igualó al de salida, mostrando una escasa regulación.

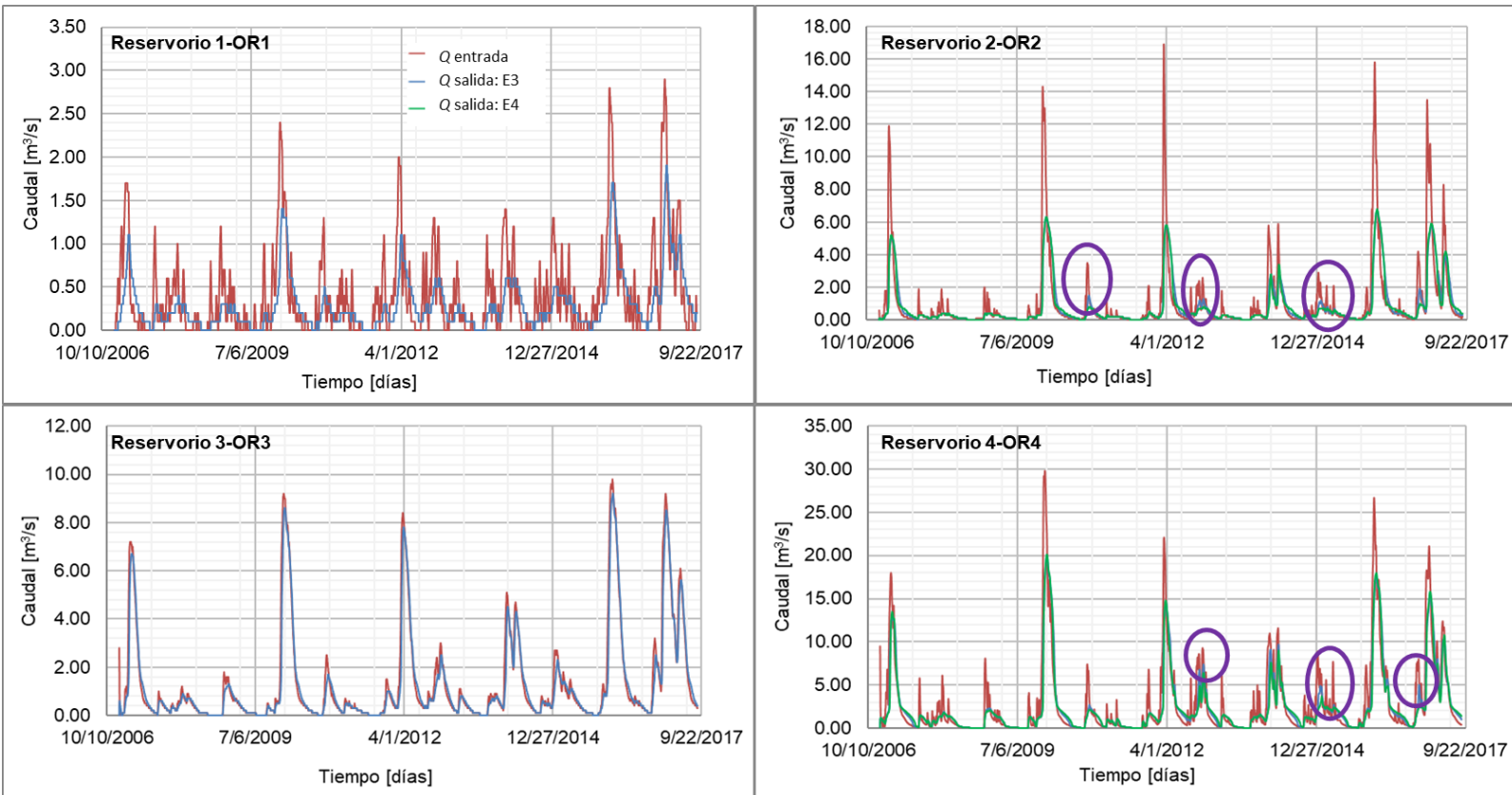


Figura 13. Resultados para el E3 y E4. Comparación entre caudal de entrada y caudal de salida en los reservorios R1, R2, R3 y R4.

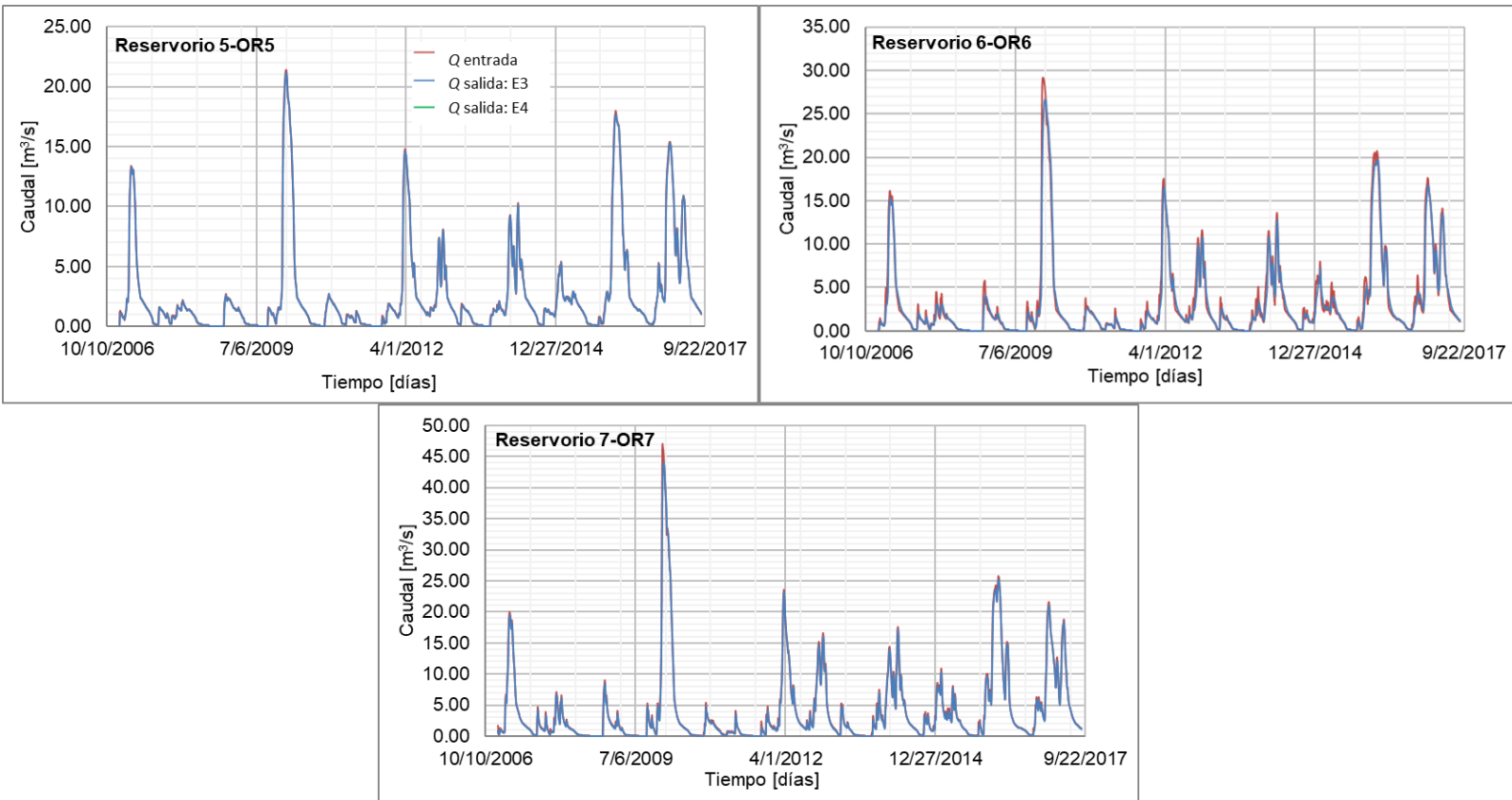


Figura 14. Resultados para el E3 y E4. Comparación entre caudal de entrada y caudal de salida en los reservorios R5, R6 y R7.

Finalmente se compararon los escenarios 3 y 4 para los reservorios 2 y 4, donde se diferencia solamente la elevación del umbral para dichos reservorios; se observó una disminución en los caudales de salida para el escenario 4 (Figura 13 b y d). La alternativa de elevación del umbral en obras de regulación (E4) presentó para caudales medios y mínimos una atenuación en hidrogramas de salida, observando un aumento del 3 % en la regulación del caudal medio. Para caudales máximos, la elevación del

umbral del reservorio 2 no significó un aumento en su regulación; mientras que en el reservorio 4 se observó una disminución del 4 %.

Esto muestra la importancia de llevar a cabo un análisis para la modificación de las obras de descarga (orificios y vertederos), ya que permitirán mejorar el manejo de excedentes en el sistema de canales principales, evitando futuros anegamientos en la zona de estudio (Figura 13 y Figura 14).

Aplicación del modelo

Niveles de agua en la laguna La Picasa

El modelo hidrológico se aplicó en los nueve escenarios planteados. En la Figura 15 se observan similitudes en los resultados obtenidos para los escenarios E1, E2, E3 y E4; mientras que en los escenarios E5, E6, E7, E8 y E9 se visualiza cómo el nivel de agua comienza a separarse de los niveles de agua obtenidos para los cuatro primeros escenarios a partir del año 2012. Esto puede relacionarse con el inicio de las operaciones de bombeo sucedidas ese año.

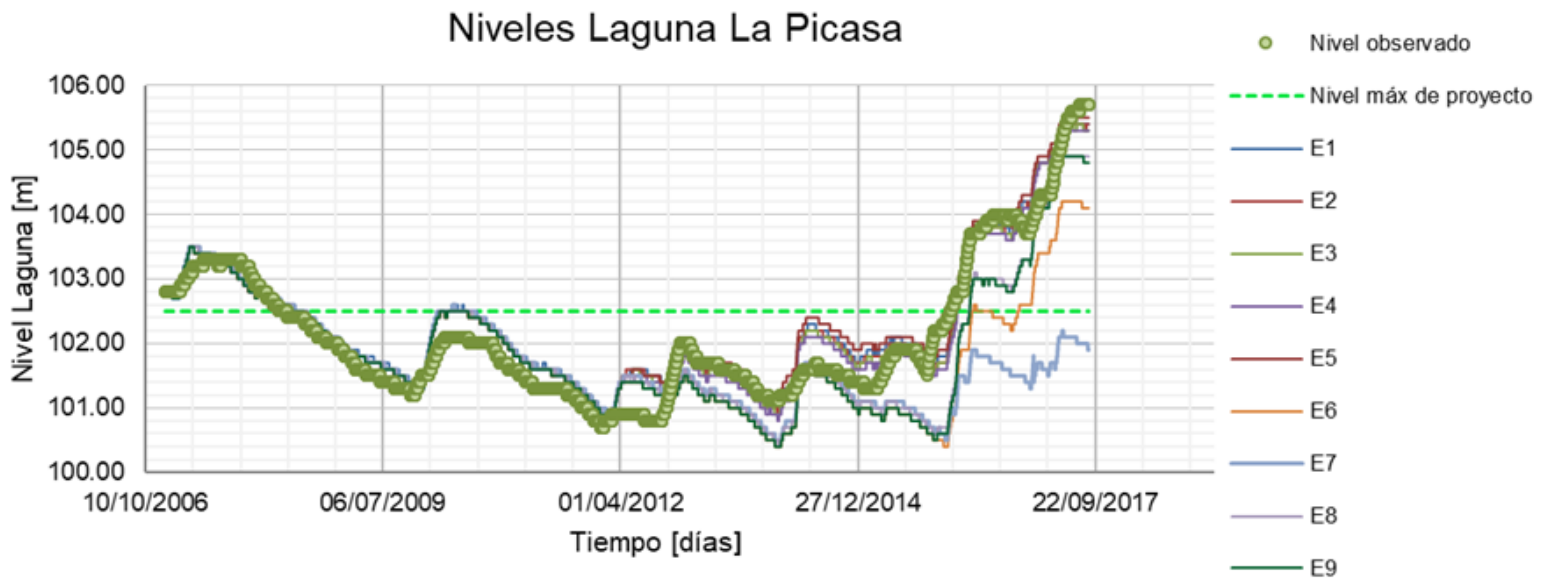


Figura 15. Niveles de agua obtenidos para los nueve escenarios planteados, periodo 2007-2017.

Los resultados del escenario 7 muestran los niveles de agua que deberían haberse logrado durante el periodo 2007-2017 para mantener a la laguna en su nivel máximo según proyecto de 102.50 m. Para lograrlo era necesario considerar como caudal erogado la siguiente serie de caudales que suma los bombeos de las estaciones sur y norte: periodo 01/04/2012 a 31/08/2015 de 5 m³/s; periodo 01/09/2015 a 28/01/2016 de 12,20 m³/s; periodo 29/01/2016 a 25/08/2017 de 35 m³/s.

Por otra parte, entre los años 2016 y 2017, periodo donde se observó un gran aumento de niveles observados en la laguna con

anegamientos en zonas aledañas, se visualiza la importancia de contar con una estación de bombeo, pues, por ejemplo, al considerarse un bombeo máximo de 5 m³/s, el nivel de la laguna desciende 1 m aproximadamente (E4 y E9).

La comparación del escenario 1 donde se consideró el sistema con base al diseño original y el escenario 3 donde se consideró el sistema según planos ejecutivos dio como resultado los que se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Comparación de caudales de descarga medios y máximos en OR1, OR2, OR3, OR4, OR5, P4, OR6 y OR7 – E1 y E3.

Obras de regulación	E1 Q medio (m ³ /s)	E3 Q medio (m ³ /s)	Diferencia (%)	E1 Q _{máx} (m ³ /s)	E3 Q _{máx} (m ³ /s)	Diferencia (%)
OR1	0.29	0.29	1	1.36	1.37	1
OR2	0.94	0.85	-9	5.87	5.29	-10
OR3	1.38	1.30	-6	7.81	7.48	-4
OR4	2.70	2.51	-7	17.25	13.16	-24
OR5	2.79	2.60	-7	18.40	13.45	-27

Obras de regulación	E1 Q medio (m ³ /s)	E3 Q medio (m ³ /s)	Diferencia (%)	E1 Q _{máx} (m ³ /s)	E3 Q _{máx} (m ³ /s)	Diferencia (%)
P4	3.05	2.86	-6	20.03	17.67	-12
OR6	3.34	3.15	-6	21.64	17.28	-20
OR7	4.19	4.11	-2	30.47	22.91	-25

En la Tabla 1 se observa un aumento en la regulación de caudales medios y máximos en los reservorios, excepto en el reservorio 1. Por lo tanto, la modificación de las obras de regulación fue positiva. La comparación de escenarios 3 y 4 en la sección de aforo ubicada en el límite provincial entre las provincias de Córdoba y Santa Fe P4 muestra un aumento del 2 % en la regulación del caudal medio, mientras que para los caudales máximos se obtuvo una disminución en su regulación (Tabla 2). Por lo tanto, la elevación de umbrales favorece la atenuación de caudales medios, pero no así los máximos.

Tabla 2. Comparación de caudales de descarga máximos y medios en OR2, OR4 y P4 – E3 y E4.

Obras de regulación	E3 Q medio (m ³ /s)	E4 Q medio (m ³ /s)	Diferencia (%)	E3 Q _{máx} (m ³ /s)	E4 Q _{máx} (m ³ /s)	Diferencia (%)
OR2	0.85	0.82	-3	5.29	5.31	0
OR4	2.51	2.45	-3	13.16	13.67	4
P4	2.86	2.80	-2	17.67	17.81	1

Modelo hidráulico

Validación y ajuste del modelo

Los resultados obtenidos en los reservorios 2 y 4 se compararon con las áreas anegadas obtenidas a partir del análisis del índice MNDWI (Xu, 2006). Dicha mancha hace referencia a imágenes de satélite del día 16 de marzo de 2016 y de la envolvente de las máximas superficiales inundadas en el periodo de estudio 2007-2017.

Los índices analizados fueron el índice diferencial de agua normalizado (NDWI, por sus siglas en inglés) y el índice diferencial de

agua normalizado modificado (MNDWI, por sus siglas en inglés). Para el presente trabajo se utilizó este último, pues se consideró que las imágenes analizadas delimitaban mejor los contornos de zonas inundadas. Para lograrlo, se comparó la combinación de banda en color natural (4, 3, 2 para Landsat 8; y 3, 2, 1 para Landsat 5 y Landsat 7).

En la Figura 16, Figura 17, Figura 18 y Figura 19 se observa cómo las manchas de inundación simuladas con HEC-RAS se ajustan a las manchas obtenidas con el índice MNDWI para los cuatro escenarios. La validación y el ajuste del modelo se consideran aceptables teniendo en cuenta la dimensión del área de estudio y la batimetría lograda. Se observa para los resultados del modelo, en los cuatro escenarios, una mancha levemente superior en el reservorio 2, en comparación con la envolvente de máxima superficie anegada que se presenta en color rojo.

- Escenario 1

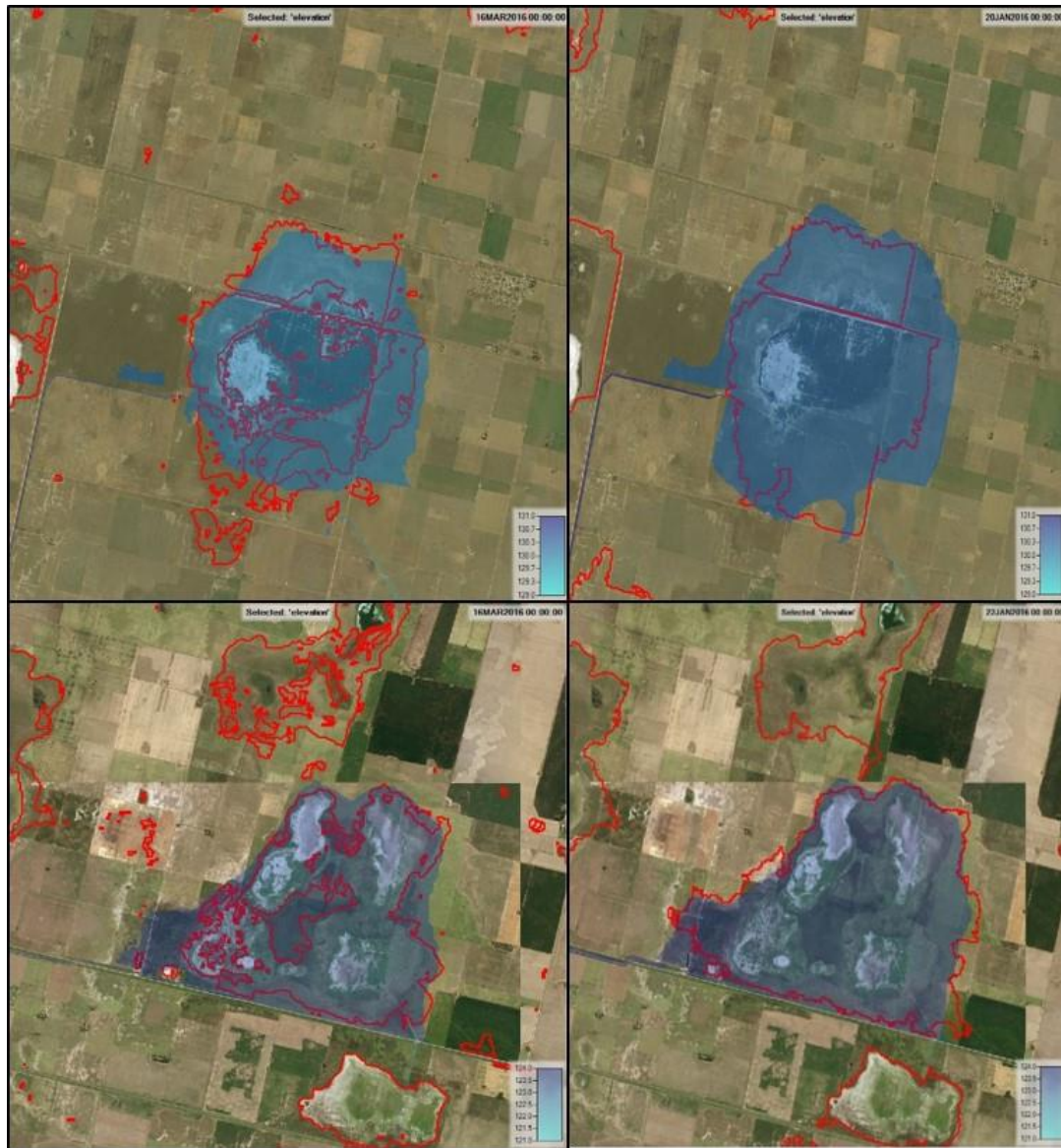


Figura 16. Resultados del nivel obtenidos para el escenario 1: a) reservorio 2-16/03/2016; b) reservorio 2 para nivel máximo; c) reservorio 4-16/03/2016; d) reservorio 4 para nivel máximo.

- Escenario 2

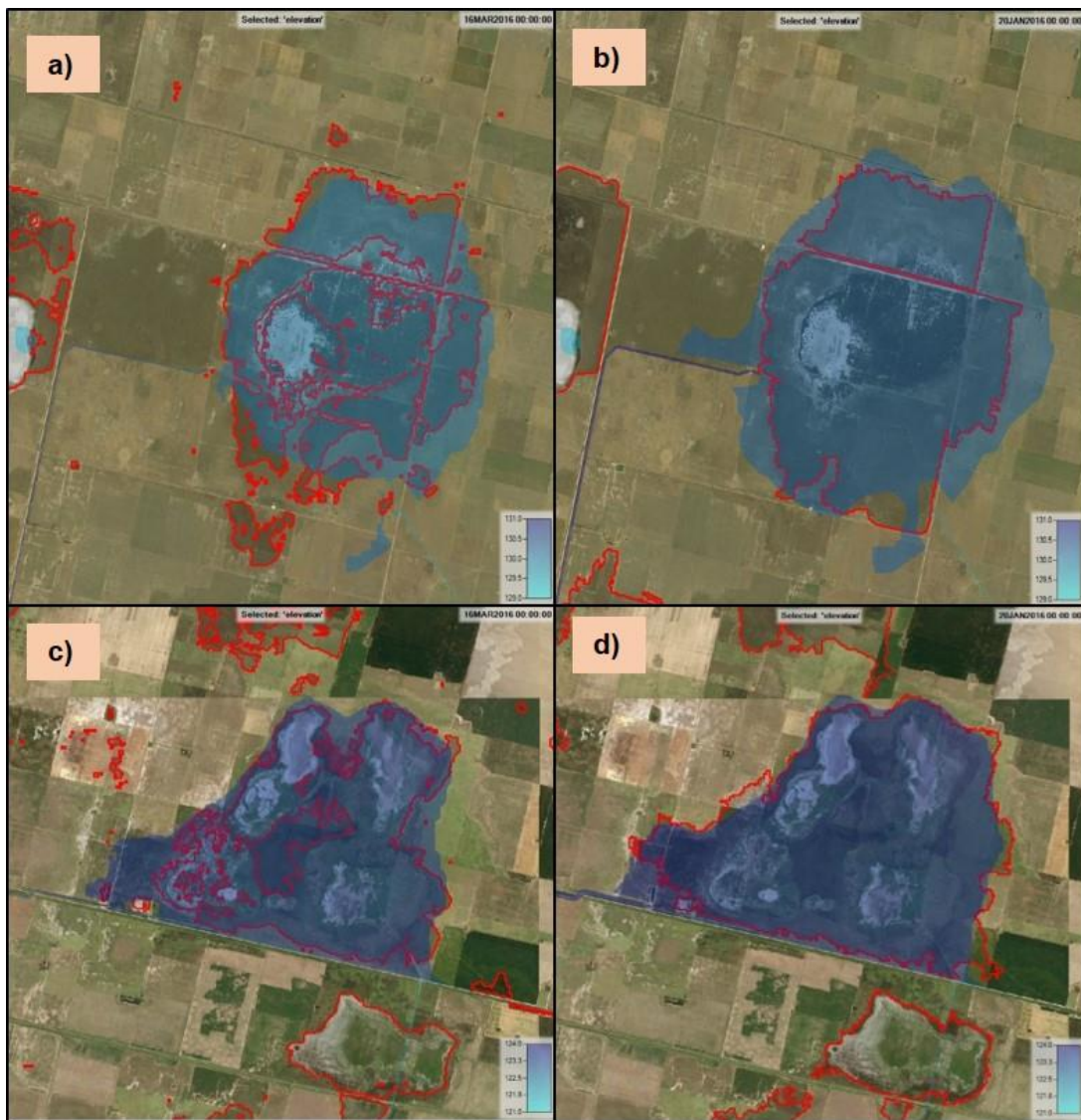


Figura 17. Resultados del nivel obtenidos para el escenario 2: a) reservorio 2-16/03/2016; b) reservorio 2 para nivel máximo; c) reservorio 4-16/03/2016; d) reservorio 4 para nivel máximo.

- Escenario 3

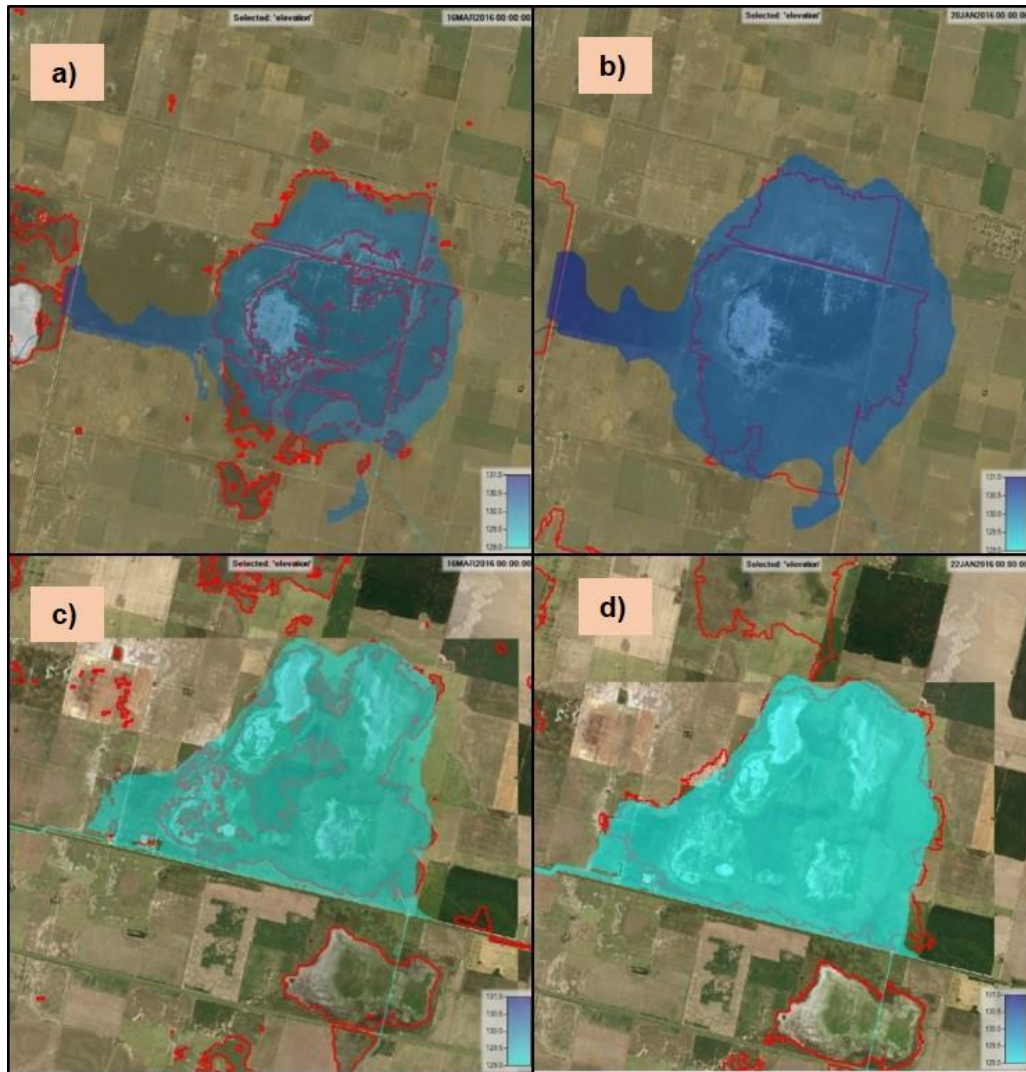


Figura 18. Resultados obtenidos para el escenario 3: a) nivel en reservorio 2 para la fecha 16/03/2016; b) nivel del reservorio 2 para

nivel máximo; c) nivel en reservorio 4 para la fecha 16/03/2016; d)
nivel del reservorio 4 para nivel máximo.

- Escenario 4

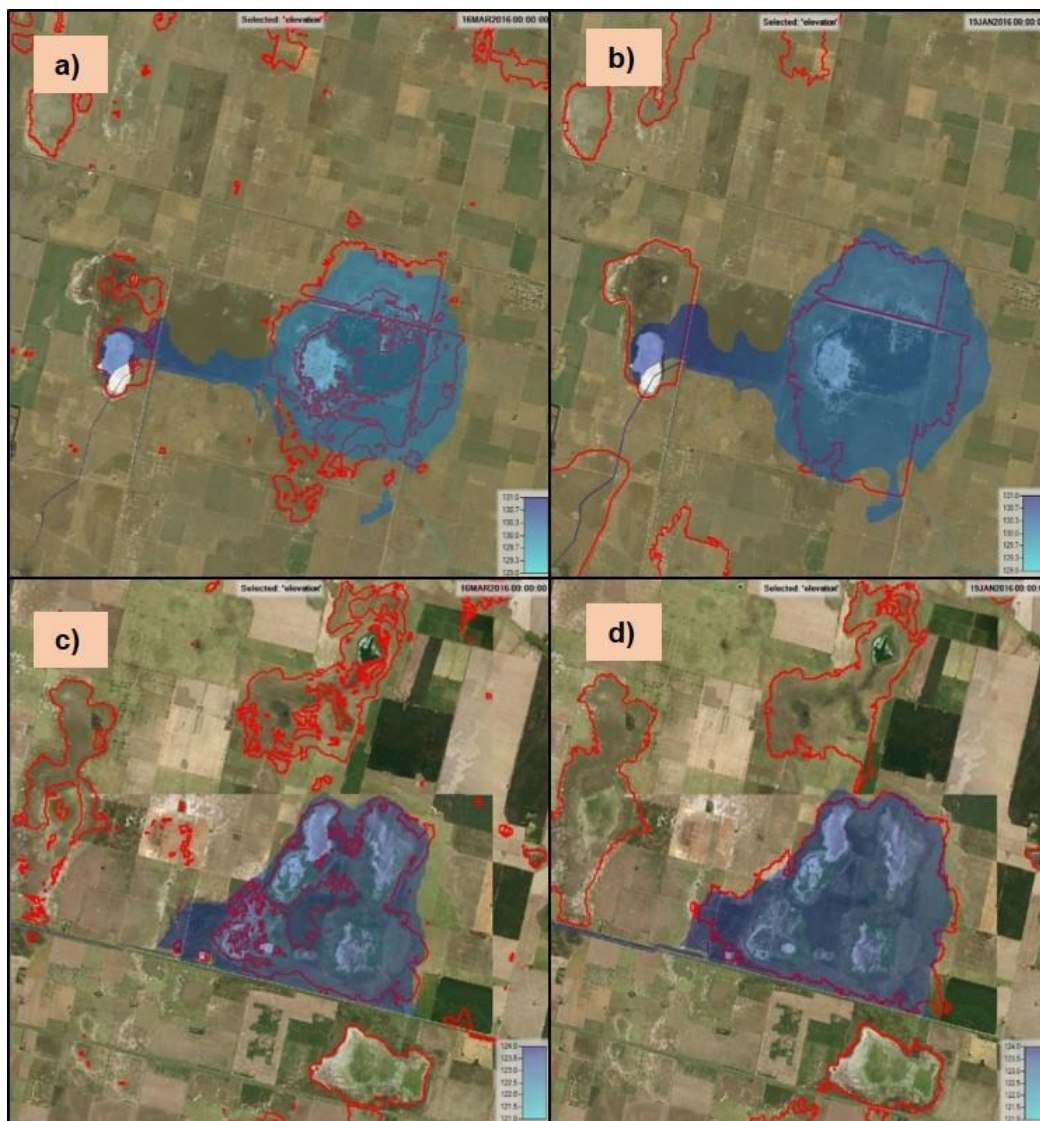


Figura 19. Resultados del nivel obtenidos para el escenario 4: a) reservorio 2-16/03/2016; b) reservorio 2 para nivel máximo; c) reservorio 4-16/03/2016; d) reservorio 4 para nivel máximo.

Los resultados obtenidos para el escenario 2 de la mancha de inundación de la laguna (máximo nivel) se observan en la Figura 20 y se compararon con la envolvente de las máximas inundaciones según el índice MNDWI.

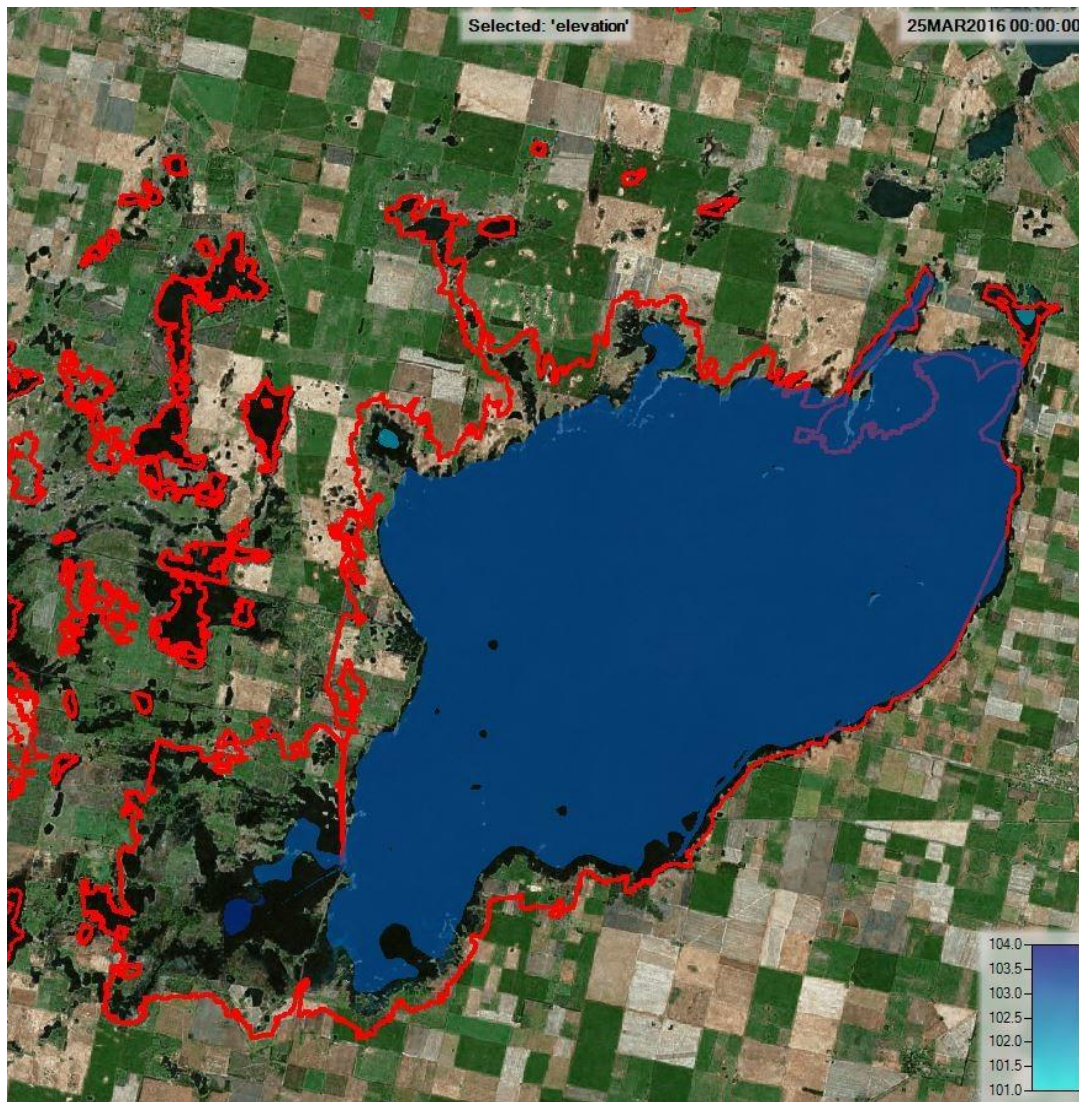


Figura 20. Comparación del nivel máximo obtenido con HEC-RAS y la envolvente de máximas inundaciones (definida según el índice MNDWI) para el escenario 2.

En la Figura 21 se presenta la comparación entre niveles de agua obtenidos con HEC-HMS, con HEC-RAS y el nivel de agua observado, mostrando un error respecto del nivel observado menor al 1 ‰ para el HMS y del 0.3 ‰ para el RAS. Estos errores se consideran aceptables en comparación con la magnitud del área de estudio involucrada. Por lo tanto, se considera al modelo hidráulico calibrado y ajustado para ser aplicado en los cuatro escenarios que se plantean.

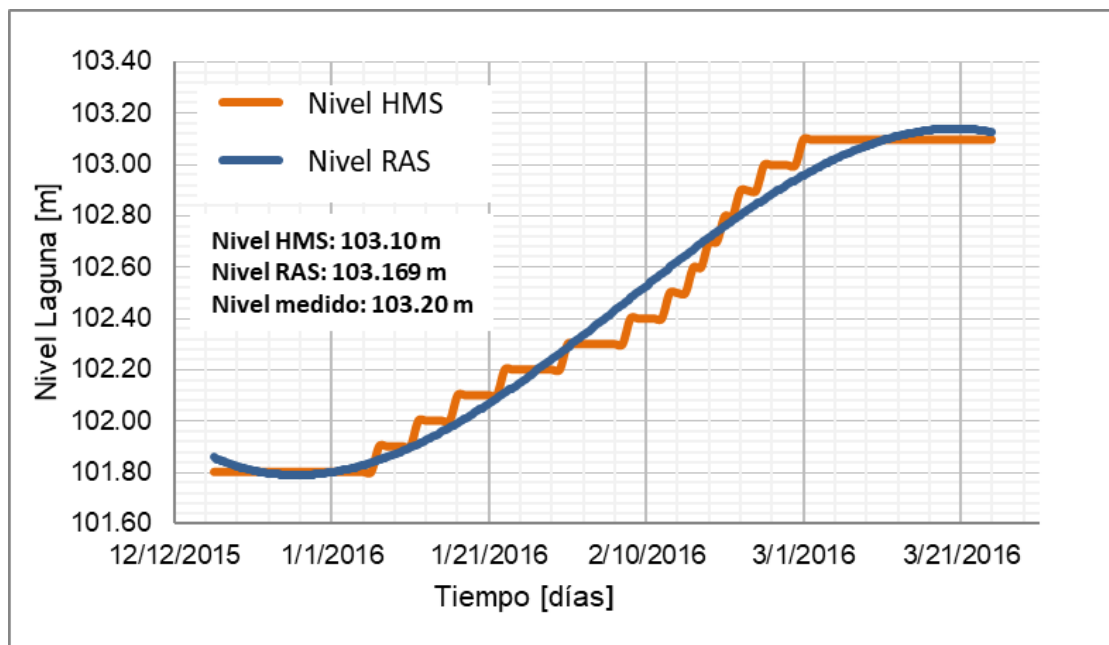


Figura 21. Evolución de niveles en la laguna La Picasa con HEC-HMS y HEC-RAS para el escenario 2.

Aplicación del modelo: patrones de flujo

Las velocidades y dirección del flujo alcanzadas para el escenario 1 al inicio y final de la modelación, y para el nivel máximo de la laguna se observan en la Figura 22 y Figura 23. La escala de colores muestra las velocidades más altas en rojo y las velocidades más bajas en azul.

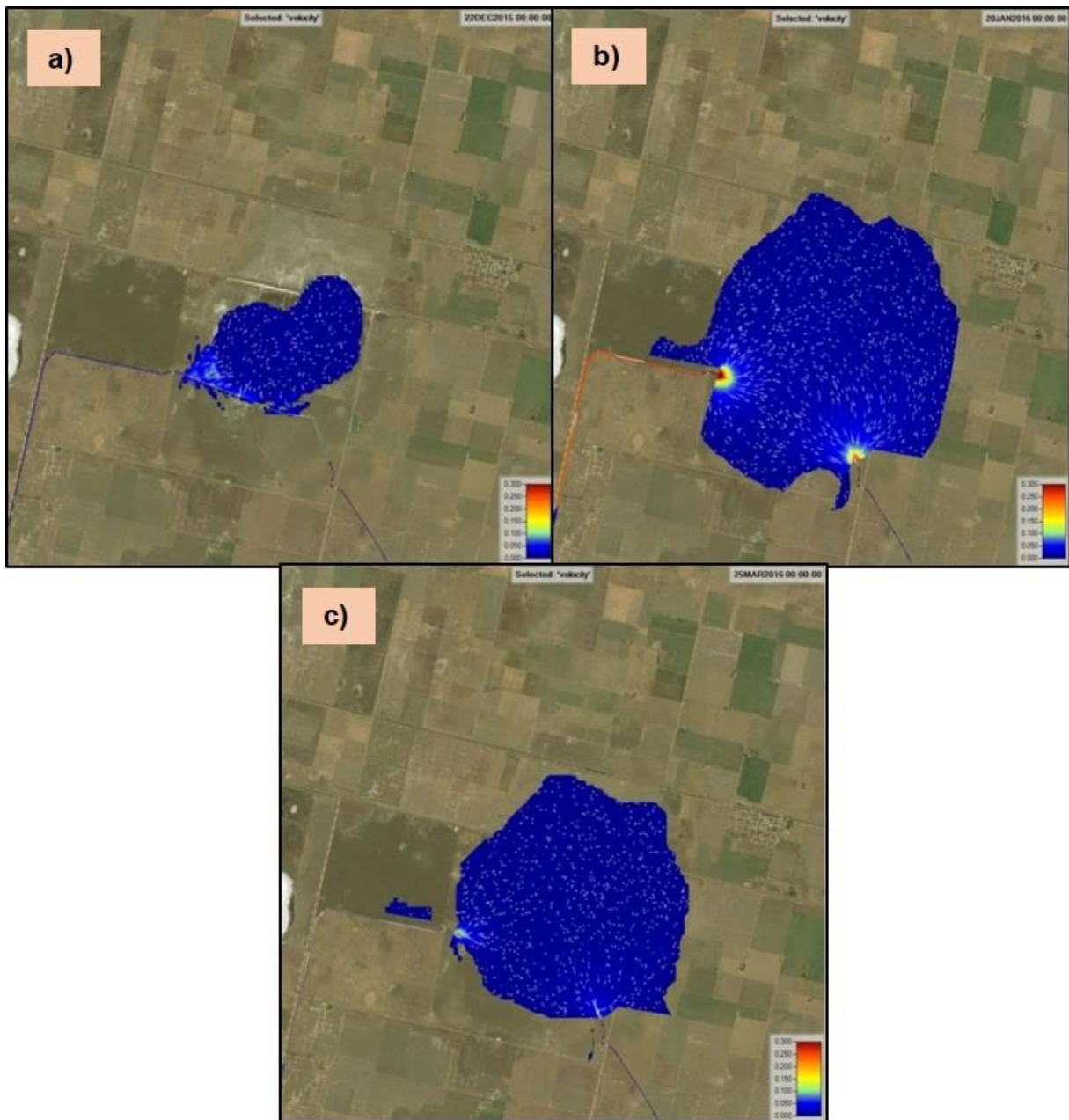


Figura 22. Resultados de la simulación para el escenario 1 en el reservorio 2: a) al inicio de la modelación; b) para el nivel máximo; c) al final de la simulación.

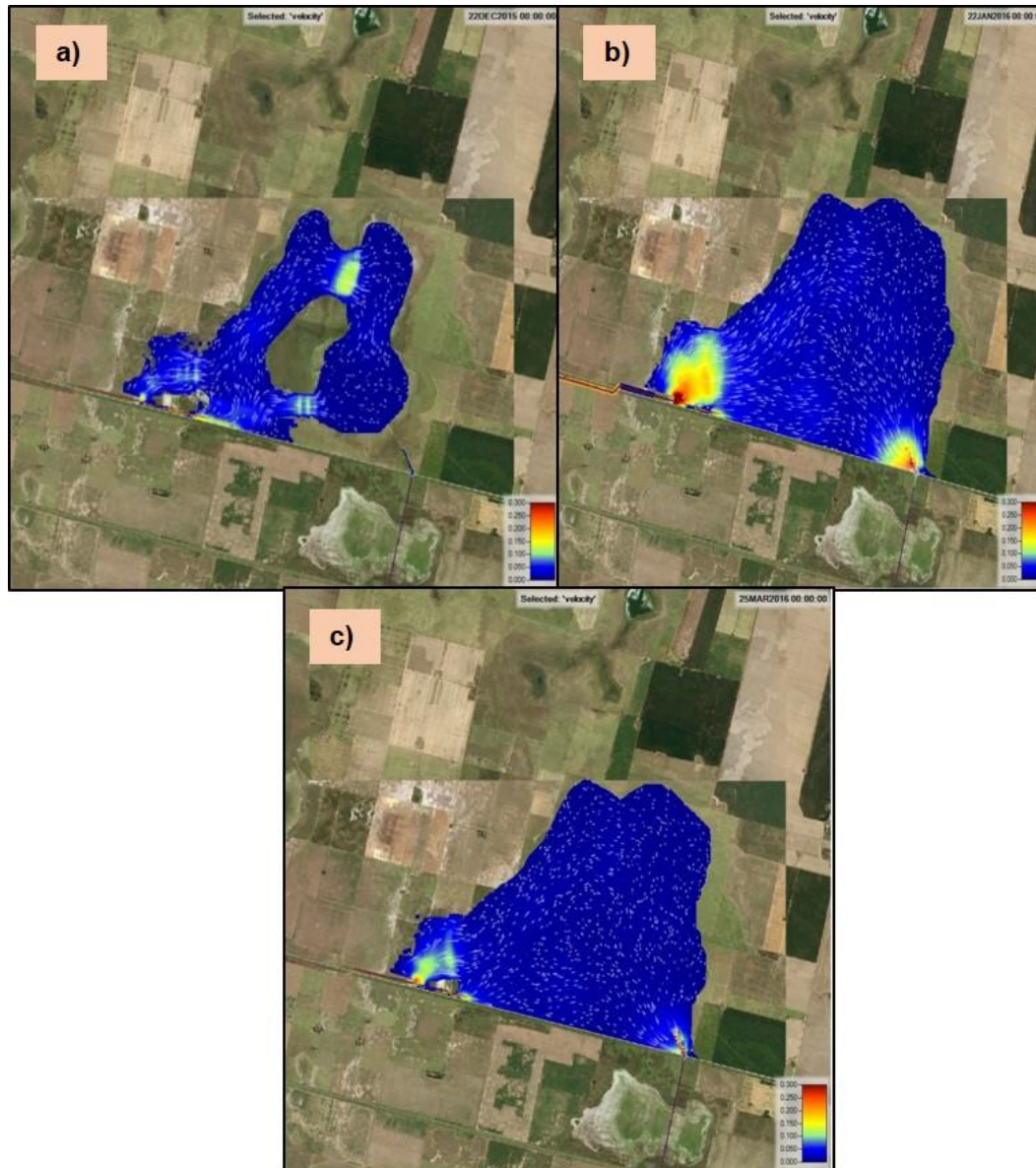


Figura 23. Resultados obtenidos de las velocidades en el reservorio 4 para el escenario 1: a) al inicio de la simulación; b) para el nivel máximo; c) al final de la simulación.

Para el reservorio 2, al generarse el desborde del canal, el flujo se dirigió hacia el vaso con velocidades menores a 0.3 m/s. En la condición de máximo nivel el flujo no superó velocidades de 0.5 m/s, dirigiéndose hacia la salida del reservorio. Para el reservorio 4, al inicio de la simulación el flujo se orientó también hacia el bajo del reservorio, con velocidades menores a 0.3 m/s, alcanzando velocidades algo mayores para la condición de máximo nivel, pero siempre menores a 1 m/s.

Los resultados del modelo para distintos escenarios simulados mostraron un comportamiento similar, donde no se encontraron diferencias significativas, y velocidades en promedio por debajo de los 0.5 m/s.

Conclusiones

El modelo hidrológico presenta variabilidad debido a factores naturales y artificiales, como los almacenamientos superficiales y subterráneos, y las conexiones realizadas en los sistemas de canales para ingresos o egresos de agua desde y hacia la laguna La Picasa. Los volúmenes de aporte que luego descargaron en la laguna La Picasa influyen directamente en los

niveles de agua, generando grandes anegamientos en la zona. De los escenarios planteados, aquel donde se consideran las obras hidráulicas según planos ejecutivos muestra un buen ajuste con diferencias máximas entre niveles de agua simulados y observados de 70 cm, que representa un error por debajo del 1 %.

En el modelo hidráulico se obtienen las manchas de inundación para reservorios de mayor almacenamiento comparando estos resultados con áreas anegadas obtenidas con el índice MNDWI, obteniéndose diferencias no significativas. Los vectores representativos del flujo evidenciaron la dirección de circulación entre la entrada y salida de reservorios, que permitió además obtener un orden de magnitud de las velocidades alcanzadas. Este modelo sienta bases para el análisis, con miras a convertirse en una herramienta predictiva y prospectiva de situaciones hidráulicas que se decidan evaluar.

Los resultados obtenidos podrían mejorarse con una topobatimetría de detalle del sistema cuenca, o de los reservorios en particular si se quisiera evaluar a cada uno por separado. Además, se subraya la importancia de contar con un buen funcionamiento del sistema de bombeo que permita mantener los niveles de la laguna bajo los niveles máximos establecidos, y también las modificaciones en obras de descarga de reservorios que logren mayor amortiguación de los caudales antes de su llegada a la laguna La Picasa.

Toda integración de recursos, información y conocimiento enfocados a analizar el funcionamiento del sistema con el fin de reducir o

prevenir las consecuencias de las inundaciones pueden disminuir estas pérdidas, y los esfuerzos redundan en grandes beneficios económicos.

Los modelos hidrológicos e hidráulicos aplicados muestran el comportamiento del sistema de la laguna La Picasa. Son útiles como herramientas de gestión y planeamiento necesarios en el ámbito ambiental, sobre todo cuando se trata de obras destinadas a mantener en orden un ecosistema.

Agradecimientos

Los autores agradecen al APRHI y a la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba por la financiación de los proyectos correspondientes, y a la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Santa Fe por la colaboración durante los trabajos de campo.

Referencias

- Brunner, G. W., Piper, S. S., Jensen, M. R., & Chacón, B. (2015). Combined 1D and 2D Hydraulic Modeling within HEC-RAS. *World Environmental & Water Resources Congress, ASCE, EWRI*, Austin, Texas, USA.
- Cabrera, J. W. (2012). *Modelos hidrológicos*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

- Carignano, C. (1999). Late Pleistocene to recent climate change in Córdoba province, Argentina: Geomorphological evidence. *Quaternary International*, 57-58, 117-134.
- Carignano, C., Kröhling, D., Degiovanni, S., & Cioccale, M. (2014). Geomorfología. En: Martino, R., & Guerreschi, B. (eds.). *Relatorio del XIX Congreso Geológico Argentino: Geología y Recursos Naturales de La Provincia de Córdoba* (pp. 747-822). Córdoba, Argentina: Asociación Geológica Argentina.
- CEWRC-HEC. (1990). *Flood hydrograph package. User's manual*. USA: Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers.
- INA, Instituto Nacional del Agua. (2018). *Plan director para la gestión integrada y sustentable de los recursos hídricos de la Cuenca "Laguna La Picasa"*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional del Agua.
- Iriondo, M. (2010). Geología del Cuaternario en Argentina. En: *Museo Provincial de Ciencias Naturales Florentino Ameghino* (437 pp.) Corrientes, Argentina: Ediciones Moglia.
- Llamas, J. (1993). *Hidrología general: Principios y Aplicaciones*. Editorial de la Universidad del País Vasco, Bilbao, España.
- McCarthy, G. T. (1938). *The unit hydrograph and flood routing. Conference of North Atlantic Division*. New London, USA: US Army Corps of Engineers, US Engineering.

- Ministerio de Agricultura y Ganadería de la Provincia de Córdoba. (2019). *Cartas de Suelos de Córdoba Hojas: 3563-8/9/10 Jovita/Melo/Cañada Seca; 3563-4 Rufino y 3363-34 La Cesira*. Recuperado de <http://suelos.cba.gov.ar/index.html>
- Molnar, P. (2011). *Calibration. Watershed Modelling, SS 2011*. Zürich, Switzerland: Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH.
- Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda, Universidad Nacional del Litoral, Dirección Provincial de Obras Hidráulicas. (1999a). *Informe final - Estudio de diagnóstico área de aportes a la laguna La Picasa (provincia de Santa Fe)*. Santa Fe, Argentina: UNL, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas.
- Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda, Universidad Nacional del Litoral, Dirección Provincial de Obras Hidráulicas. (1999b). *Estudio de diagnóstico área de aportes a la laguna La Picasa, provincia de Santa Fe- Informe final preliminar*. Santa Fe, Argentina: Dirección Provincial de Obras Hidráulicas-MOSPyV, UNL.
- Palacio, C., García, F., & García, U. (2010). Calibración de un modelo hidrodinámico 2d para la bahía de Cartagena, Medellín. *DYNA*, 77(164), 152166.
- Sahagian, D. (2000). Global physical effects of anthropogenic hydrological alterations: sea level and water redistribution. *Global and Planetary Change*, 25, 39-48.

- Universidad Nacional de Córdoba. (2019). *Informe de avance. Modelo hidrológico e hidráulico-cuenca laguna La Picasa*. Córdoba, Argentina: Laboratorio de Hidráulica-Centro de Estudios y Tecnología del Agua. Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.
- Ministerio de Obras Públicas Servicios y Vivienda, Universidad Nacional del Litoral. (1999). *Informe final. Estudio de diagnóstico área de aportes a la laguna La Picasa (provincia de Santa Fe)*. Santa Fe, Argentina: Convenio Dirección Provincial de obras hidráulicas-Universidad Nacional del Litoral.
- Xu, H. (2006). Modificación del índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) para mejorar las características de aguas abiertas en imágenes de detección remota. *Revista Internacional de Percepción Remota*, 27(14), 3025-3033.