

Cuantificación del escurrimiento superficial de la cuenca del Río Carcarañá.

José M. Díaz Lozada¹, Carlos. M García^{1,2}, Horacio Herrero^{1,2}, Gustavo M. Barchiesi¹, Martín Romagnoli³, Margarita Portapila³, Fabián Lopez⁴, Edgar Castelló⁴, Ana Cosavella⁴ y Juan P. Brarda⁴

¹ Centro de Estudios y Tecnología del agua (CETA), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

³ Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la Información y de Sistemas, CONICET Rosario, Argentina

⁴ Secretaría de Recursos Hídricos del Gobierno de la Provincia de Córdoba.

Fecha de recepción del manuscrito: 19/11/2014

Fecha de aceptación del manuscrito: 18/02/2015

Fecha de publicación: 16/03/2015

Resumen— La cuenca del Río Carcarañá, incluyendo a sus principales tributarios, tales como el Río Tercero (Ctalamochita), Río Saladillo, Arroyo Tortugas, entre otros, es una importante cuenca superficial ubicada en la zona central de las Provincias de Córdoba y Santa Fe, lo que la convierte en una fuente potencial de agua para diferentes usos. A pesar de la importancia de esta cuenca, la información hidrológica disponible es escasa y por lo tanto no permite llevar a cabo un manejo sustentable del recurso, por lo que es necesario realizar un programa de mediciones in situ para cuantificar el escurrimiento superficial del sistema para conocer sus variaciones tanto espaciales como temporales. Por ello se lleva adelante un esfuerzo conjunto entre tres instituciones de las Provincias de Córdoba y Santa Fe (CETA Universidad Nacional de Córdoba, CIFASIS CCT Rosario y la Secretaría de Recursos Hídricos del Gobierno de la Provincia de Córdoba) con el fin de cumplimentar este objetivo. En este trabajo se reportan los resultados obtenidos de la cuantificación del escurrimiento superficial en la cuenca del Río Carcarañá (hasta su desembocadura en el río Coronda) durante las campañas de monitoreo junto a las curvas altura caudal calibradas en diferentes secciones del sistema fluvial. Dadas las características del sistema estudiado se realizaron los aforos utilizando un Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP).

Palabras clave— ADCP, Cuantificación del recurso hídrico, Río Carcarañá, Río Tercero (Ctalamochita), Río Saladillo

Abstract— The Carcarañá River basin, including its main tributaries, such as the Tercero (Ctalamochita) River, the Saladillo River and the Tortugas Creek, among others, is an important basin located in the central area of the provinces of Córdoba and Santa Fe, which makes a potential source of water for different uses. The available hydrological information of the basin is limited, so it is necessary to perform a Streamflow Monitoring to quantify the system runoff flow and to evaluate its spatial and temporal variations. Therefore, a joint effort between three institutions in the provinces of Córdoba and Santa Fe (CETA National University of Córdoba, CIFASIS CCT Rosario and Water Resources Secretary of the Government of the Province of Córdoba) is carried on to achieve this objective. This paper shows the results of the quantification of the streamflow of different tributaries of the Carcarañá River (up to its discharge in the Coronda River). This work presents results obtained along different surveys including rating curves in different cross sections of the fluvial system. Given the characteristics of the fluvial system, it has been necessary to use for flow discharge measurements an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP).

Keywords— ADCP, quantification of water resource, Carcarañá River, Tercero (Ctalamochita) River, Saladillo River

INTRODUCCIÓN

El río Carcarañá nace en la provincia de Córdoba, Argentina a partir de la confluencia de los ríos Tercero o Ctalamochita (del cual es su directa continuación) y

Saladillo (nombre del curso inferior del Río Cuarto – Chocancharava-). Luego, este río ingresa en la provincia de Santa Fe, a la que cruza de oeste a este desembocando en la localidad de Puerto Gaboto sobre el río Coronda, que a su vez es afluente del río Paraná (Fig. 1).

La subcuenca del Río Tercero o Ctalamochita (Fig. 2) constituye un sistema de alimentación pluvial con régimen permanente cuya área es de 9.580 km² (Saldaño, 2010). Los principales afluentes que aportan a la subcuenca del Río Tercero (Ctalamochita), enunciados de norte a sur, son el río Santa Rosa, Arroyo Amboy, Río Grande, Río Quillínzo

Dirección de contacto:

José Manuel Díaz Lozada, Av. Filloy S/N Ciudad Universitaria X5016CGA., Teléfono / Fax: 4334446, E-mail.: jmdiazlozada@gmail.com

y Río de La Cruz o de los Sauces (Fig. 1). Los de mayor recorrido son el Grande, el Santa Rosa y el de la Cruz, de los cuáles el primero es el tributario más importante y está conformado por los arroyos Durazno, Manzano y las Letanías (Saldaño, 2010).

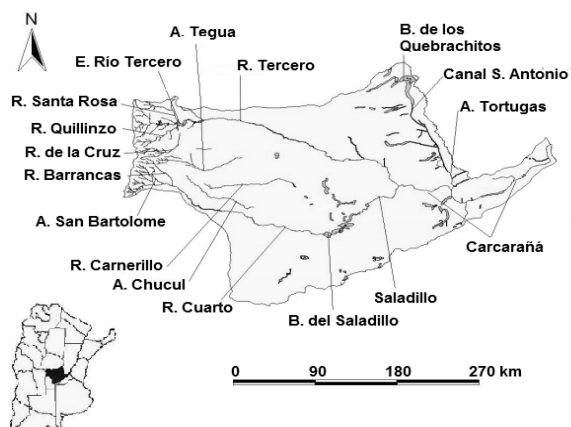


Fig. 1. Cuenca del Río Carcarañá. Fuente: Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (2014).

La cuenca alta del Río Tercero o Ctlamochita (Fig. 2) con una extensión de 3.287 km² (determinada a través del procesamiento de un modelo digital de terreno –DEM-STRM) es explotada hidroeléctricamente a través de dos sistemas. Por un lado, el complejo Río Grande, conformado por los embalses Cerro Pelado y Arroyo Corto; y por el otro, el sistema llamado Río Tercero, constituido por los embalses: Río Tercero, Ingeniero Cassaffousth, Ingeniero Benjamín Reolín y Piedras Moras (Lenarduzzi, 2013). Este último actúa como regulador y condiciona el caudal escurrido en el Río Tercero (Ctalamochita) y en el Río Carcarañá. A partir de la localidad de Almafuerte (Córdoba), el río toma características de llanura hasta la confluencia con el Río Saladillo.

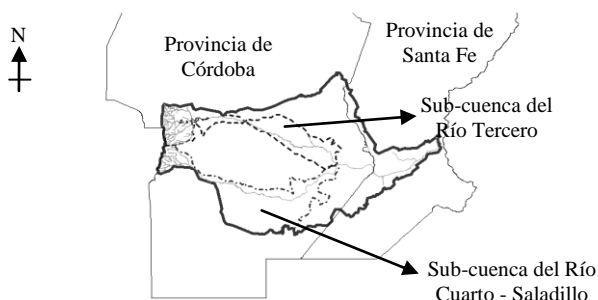


Fig. 2. Sub-Cuenca del Río Tercero- Ctalamochita (Saldaño, 2010) y del Río Cuarto - Saladillo

El Río Tercero o Ctlamochita, además de ser una importante fuente para el suministro de agua potable en la zona sur y este de la provincia de Córdoba, es utilizado como cuerpo receptor para disposición final de las aguas residuales industriales y de estaciones depuradoras de efluentes cloacales (Cossavella et al., 2003). Es por ello que es importante llevar a cabo un seguimiento integral del recurso en esa subcuenca para garantizar su disponibilidad y calidad.

La subcuenca del Río Saladillo (nombre del curso inferior del Río Cuarto o Chocancharava, Fig. 2) posee un

área de 12.421 km² (determinada a través del procesamiento de un modelo digital de terreno –DEM-STRM). Los principales afluentes son los ríos de las Barrancas, San Bartolomé, de la Tapa y Piedra Blanca (Fig. 1). El río Cuarto o Chocancharava, desde su nacimiento se dirige hacia el sudeste pasando por la localidad de Río Cuarto (Córdoba), ubicada sobre su margen derecha. Hasta la próxima localidad, La Carlota (Córdoba), el río sigue en dirección oeste-este. Quince kilómetros aguas abajo de dicha localidad dobla al noreste (Fig. 1) donde empieza a formarse la laguna Los Olmos que, tras el ensanchamiento del cauce y por la escasa pendiente, se transforman en bañados (aproximadamente a 60 km de La Carlota). Luego de este recorrido toma el nombre de Saladillo, el cual mantiene hasta la desembocadura en el Río Tercero o Ctlamochita para dar origen al Río Carcarañá. Los Bañados del Río Saladillo están inmersos en la zona más productiva para la actividad agropecuaria de la provincia de Córdoba. Debido a un aumento de las precipitaciones en el año 2001, en los años sucesivos se realizaron en todo el sur provincial canalizaciones para mitigar el efecto de las inundaciones con lo que estos bañados sufrieron el efecto de ser atravesados por dos grandes canales, el canal del Río Cuarto y el canal de La Brava. Dichas canalizaciones provocaron una disminución significativa del área original de los bañados, por lo cual el Río Saladillo aporta importantes caudales al río Carcarañá (Bandolín et al., 2013).

La subcuenca del Arroyo Tortugas es una importante cuenca de aporte a la cuenca baja del Río Carcarañá con una extensión de 11.402 km² (determinada a través del procesamiento de un modelo digital de terreno –DEM-STRM). Este arroyo fue canalizado para transportar el agua proveniente de desagües pluviales urbanos y del escurrimiento superficial en campos de la región centro-este de la provincia de Córdoba y del oeste de la provincia de Santa Fe (Fig. 3), por lo cual presenta en determinadas épocas del año caudales importantes. Al norte, esta cuenca se extiende hasta la ciudad de San Francisco.



Fig. 3. Sub-Cuenca Cuenca del Arroyo Tortugas.

Algunos arroyos que se encuentran entre los ríos Tercero o Ctlamochita y Cuarto o Chocancharava (Fig. 1) se pierden en dirección oeste-este y son de carácter arreicos. Entre esta serie de arroyos que se esparcen en cañadas y bañados, hay cuatro que son los más destacados y ellos son: el arroyo de las Peñas que se une al de las Tapias, el arroyo Tegua, el arroyo del Carnerillo y el arroyo Chucul (Fig. 1).

A pesar de algunos esfuerzos de monitoreo realizados sobre secciones o tramos específicos de los tributarios y en el mismo Río Carcarañá, no existen antecedentes de monitoreos integrales del sistema que involucren determinaciones de caudales escurridos superficialmente y parámetros hidráulicos globales en todo el sistema para distintas condiciones de flujo (estiaje o períodos de aguas altas). En la actualidad se cuenta con 2 estaciones activas de la Red Hidrometeorológica Nacional dentro de toda la extensión de la cuenca del Río Carcarañá. La estación Umepay (Lat.32° 13' 00,00"; Long.64° 43' 60,00"), sobre el río Grande, aguas arriba de las explotaciones hidroeléctricas del complejo Río Grande y que por la regulación de caudales que se realiza aguas abajo para explotación hidroeléctrica no aporta datos significativos para evaluar la evolución temporal de caudales en el Río Carcarañá debido a la capacidad regulatoria de los embalses. La estación hidrométrica Pueblo Andino (Lat.32° 40' 24,00"; Long.60° 51' 57,40") existente sobre el río Carcarañá, cuenta con datos históricos de Altura, Caudal Medio Diario, Caudal Medio Diario Máximo, Caudal Medio Diario Mínimo, Caudal Medio Mensual, Caudal Máximo Instantáneo y Caudal Mínimo Instantáneo para el período 1980 – 2014. La información registrada por esta estación hidrométrica es fundamental para entender la evolución temporal de caudales escurridos por el sistema fluvial estudiado. Sin embargo al momento de iniciar el programa de monitoreo reportado en este trabajo no se contaba con información de las contribuciones relativas de los tributarios al caudal escurrido en río Carcarañá en esta sección.

MATERIALES Y MÉTODOS

El instrumental utilizado para las mediciones de caudales superficiales escurridos en distintas secciones en el sistema fluvial analizado es el Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP, por sus siglas en inglés) “River Surveyor S5” (número de serie S501387) fabricado por la compañía YSI/Sontek. El ADCP provee información batimétrica (profundidades) de la sección y de las velocidades del flujo en tres direcciones ortogonales, lo que permite definir el caudal generalmente con un error menor al 5%.

Los ADCPs determinan la velocidad del flujo utilizando el principio Doppler. El instrumento emite una onda acústica a una determinada frecuencia (f_1 , el ADCP Riversurveyor S5, el cual fue utilizado en este trabajo, emite un pulso acústico a una frecuencia de 3 MHz), la cual es luego reflejada por partículas en suspensión en el flujo (sedimentos, plancton, algas, etc.). La onda acústica reflejada es detectada por el instrumento y la misma posee una frecuencia (f_2) diferente con la que fue emitida debido al movimiento relativo entre las partículas y el instrumento. Para minimizar el nivel de ruido presente en las determinación de velocidad de flujo, la técnica de análisis de señales implementada en los ADCP calcula las velocidades relativas entre el instrumento y el flujo a partir de la diferencia de fase (en lugar de diferencia de frecuencia) entre dos muestras diferentes de un único pulso de retorno en cada celda, (modo incoherente) o a partir de la diferencia de fase entre dos pulsos acústicos sucesivos (modo coherente) (Szupiany y Oberg, 2014).

En un comienzo los ADCPs fueron desarrollados para mediciones de caudales en ríos cuya profundidad mínimas fuera de 1,5 metros, lo cual imposibilitaba el uso de esta técnica en ríos de baja profundidad. Gracias a los desarrollos efectuados en los últimos 10 años, en la actualidad existen ADCPs (como el utilizado en este trabajo) que permiten realizar aforos en ríos de baja profundidad (profundidades mínimas mayores a 0,3m), típicos de la región central de la República Argentina.

El instrumento se puede configurar y operar desde una computadora personal portátil o bien con un teléfono celular, ambos dispositivos capaces de registrar los datos medidos. La configuración de registro del ADCP RiverSurveyor S5 y la visualización de los resultados obtenidos se realiza con el programa computacional RiverSurveyor Live. Específicamente se utilizó el software RiverSurveyor Live v.3.60 y firmware RiverSurveyor v3.0.0, de acuerdo a las recomendaciones sugeridas por YSI/Sontek. A partir del firmware RiverSurveyor v1.0.0 se incorporó el algoritmo “SmartPulse” el cual, en base a la profundidad, velocidad y niveles de turbulencia del flujo, adapta el esquema de pulso acústico para esas condiciones con el fin de proveer la máxima resolución de datos de velocidad, con tamaños de celda tan pequeños como 2 cm. La selección del esquema de registro óptimo se realiza automáticamente (Sontek, 2010)

El dispositivo de medición no posee movilidad propia, motivo por el cual es necesario colocar el ADCP en una balsa o bote capaz de transportarlo a través de la sección sobre la que se realizará la medición. El bote utilizado en estas campañas de aforo se muestra en la Fig. 4. En esa figura se muestran además dispositivos complementarios instalados en el bote durante los aforos como por ejemplo el módulo de procesamiento y comunicación (utilizando el sistema bluetooth) y un Geoposicionador satelital diferencial (DGPS) con su respectiva antena. El sistema de referencia del bote (DGPS o seguimiento de fondo) seleccionado en cada sección aforada fue aquel que tuviera la menor relación desvío estándar-media de las mediciones en casos de que la sección no presente fondo móvil; en los casos que la sección presente fondo móvil se utilizó DGPS. Para obtener una medición precisa del caudal, se realizaron mediciones utilizando la metodología recomendada por el USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos) la cual indica que como mínimo en 12 minutos se debe realizar un número par de transectas o cruces (al menos dos).

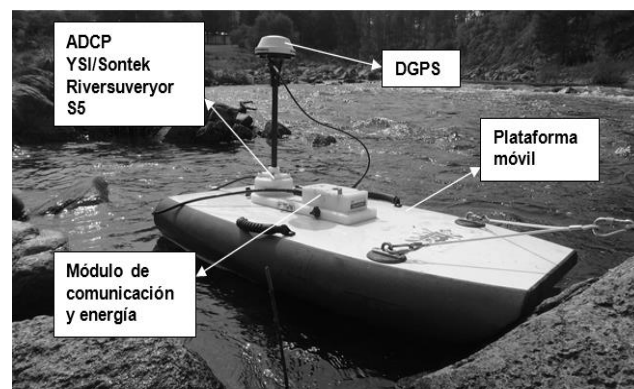


Fig. 4. Plataforma Móvil con ADCP YSI/SonTek S5 y todos sus componentes.

LOCALIZACIÓN DE LAS SECCIONES DE MEDICIÓN

Desde fines del año 2012 hasta la actualidad se realizaron diferentes campañas de aforo para cuantificar experimentalmente caudales superficiales en diferentes secciones transversales seleccionadas en los principales tributarios (ríos Tercero-Ctalamochita, Saladillo y Arroyo Tortugas) y en el río Carcarañá, en su escurrimiento tanto en la Provincia de Córdoba como en la provincia de Santa Fe, hasta su desagüe en el río Coronda en las cercanías de la localidad de Puerto Gaboto (Fig. 5). Sobre el Río Tercero (Ctalamochita), los caudales erogados por el embalse Piedras Moras proveen la condición de borde superior para el sistema estudiado. La primera sección aforada en el programa de monitoreo se encuentra en la ciudad de Río Tercero precisamente en el Balneario municipal de esa localidad ubicado a pocos kilómetros aguas abajo del embalse mencionado. Aguas abajo de esta sección se realizaron aforos sobre el mismo río en las localidades de Villa Ascasubi, Villa María, Cárcano, Bell Ville, San Marcos Sud y a unos pocos metros aguas arriba de la confluencia con el Río Saladillo en las cercanías de Monte Buey, Córdoba. En lo que respecta al Río Saladillo, la primera sección aforada se encuentra en el cruce con la ruta provincial 6 (Córdoba), 2,17km aguas arriba de la confluencia de este río con el Río Tercero (Ctalamochita). La otra sección aforada en este río se encuentra a pocos metros aguas arriba de su confluencia con el Río Tercero. También se cuantificó el caudal en cinco secciones sobre el Río Carcarañá y una sobre el Arroyo Tortugas. Las secciones aforadas sobre el Río Carcarañá fueron: Monte Buey, pocos metros aguas abajo de la confluencia de los ríos Tercero y Saladillo, Inriville, Cruz Alta sobre puente de la ruta provincial 15, Carcarañá, Pueblo Andino y Puerto Gaboto. Las tres primeras secciones mencionadas se encuentran en la provincia de Córdoba y las restantes están localizadas en la provincia de Santa Fe. La sección aforada sobre el Arroyo Tortugas se encuentra ubicada en el puente de ingreso a localidad Tortugas ubicada en el límite de las provincias de Córdoba y Santa Fe.

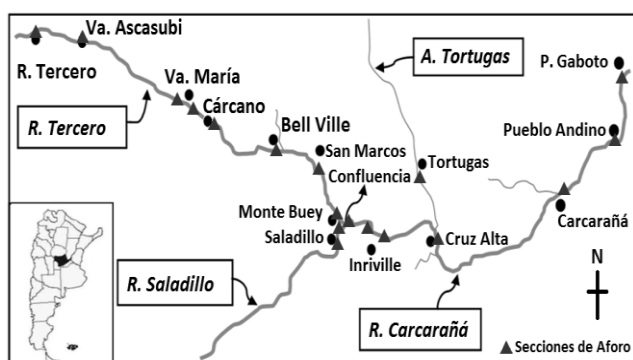


Fig. 5. Localización de las secciones de medición.

RESULTADOS

En la Tabla 1 se incluyen los principales resultados de las 19 campañas de aforos realizadas en el sistema fluvial de estudio. Estas campañas se realizaron en condiciones de aguas bajas, medias y durante un evento extraordinario en el cual se realizaron tres campañas (detalladas en la Tabla 1 con numeraciones 14, 15 y 16).

TABLA 1. Descripción de las campañas de aforos realizadas

Camp año #	Secciones de Aforos	Fecha	Vel. Med. (m/s)	Qmax aforado [m ³ /s]
1	RTBRT	11/06/12	0,84	17,22
2	RTBRT	10/09/12	0,84	14,79
3	RTBRT	12/11/12	0,86	18,51
4	RTCMB, RSCMB	17/12/12	1,01	90,60
5	RTBRT	04/03/13	0,84	23,38
6	RTCMB, RSCMB	14/05/13	0,57	26,94
7	RTBRT	28/05/13	0,61	17,87
8	RTBRT, RTVM158, RSPR6, RCI, RCCA	11/06/13	0,65	49,77
9	RTCMB, RSCMB, RCCMB	13/08/13	0,51	30,66
10	RTBRT, RSPR6, RCI	09/09/13 10/09/13	0,62	27,71
11	RSPR6, RCI, RCCA, RCPSC, RCPA, RCG	29/09/13 30/09/13 01/10/13	0,31	34,48
12	RTVMPA, RSPR6, RCIPR12, RCCA, RCCPS, RCPA, RCG, ATT	18/11/13 19/11/13 20/11/13	0,44	77,6
13	RTABV, RTASM	17/12/13	0,28	13,56
14	RTVA, RTVMPA	27/02/14	1,31	482,67
15	RTVA, RTVMPA, RTC, RTPSBV, RTSM,	05/03/14 06/03/14	1,27	299,36
16	RTVA, RTVMPA, RTPSBV, RSPR6, RCIPR12, RCCA, RCCPS, RCPA, RCG, ATT	07/04/14 08/04/14 09/04/14	1,11	379,89
17	RTVA, RTVMPA, RTPSBV, RSPR6, RCIPR12, RCCA, RCCPR9, RCPA, RCG, ATT	09/06/14 10/06/14 11/06/14	0,41	104,72
18	RTVA, RTVMPA, RTPSBV, RSPR6, RCIPR12, RCCA, RCCPR9, RCPA, RCG, ATT	08/09/14 09/09/14 10/09/14	0,61	64,86
19	RTPSBV, RSPR6, RCIPR12, RCCA,	16/10/14	0,74	65,70

Nomenclatura de los sitios de medición:

RTBRT: Río Tercero (Ctalamochita), Balneario en Río Tercero.; **RTVA:** Río Tercero (Ctalamochita), Villa Ascasubi.; **RTVM158:** Río Tercero (Ctalamochita), Puente Ruta 158, Villa María.; **RTVMPA:** Río Tercero (Ctalamochita), Puente Alberdi, Villa María.; **RTC:** Río Tercero (Ctalamochita) - Puente Cárcano, Cárcano.; **RTPSBV:** Río Tercero (Ctalamochita) - Puente Sarmiento, Bell Ville.; **RTABV:** Río Tercero (Ctalamochita), azud Bell Ville.; **RTASM:** Río Tercero (Ctalamochita), azud San Marcos.; **RTCMB:** Río Tercero (Ctalamochita), Confluencia, Monte Buey.; **RSCMB:** Río Saladillo, Confluencia Monte Buey.; **RSPR6:** Río Saladillo, Puente Ruta 6.; **RCCMB:** Río Carcarañá, Confluencia Monte Buey.; **RCI:** Río Carcarañá, Inriville.; **RCIPR12:** Río Carcarañá, Puente ruta 12, Inriville.; **RCCA:** Río Carcarañá, Cruz Alta.; **RCCPS:** Río Carcarañá, Parque Sarmiento, Carcarañá.; **RCCPR9:** Río Carcarañá, Puente Ruta 9, Carcarañá.; **RCPA:** Río Carcarañá, Pueblo Andino.; **RCG:** Río Carcarañá, Puerto Gaboto.; **ATT:** Arroyo Tortugas, Tortugas.

En la Fig. 6 se muestra el campo de velocidades obtenido mediante ADCP en la sección RTVA (Villa Ascasubi) para un caudal de 482,67 m³/s (campaña N°14), mayor caudal aforado en todo el sistema durante este estudio. Se puede observar en la Fig. 6 que el área mojada que contribuye al flujo (área efectiva) es pequeña ya que el 80% del caudal escurre en el área delimitada con un recuadro.

Contribución de cada tributario en el escurrimiento superficial del Río Carcarañá

Durante las diferentes campañas de aforo se determinó la contribución de cada uno de los tributarios en el escurrimiento superficial total del Río Carcarañá para diferentes condiciones de flujo evaluadas. Este análisis incluye las campañas 8, 11, 12, 16, 17, 18 y 19. En la campaña del 11 de junio de 2013 (campaña 8) y 16 de Octubre de 2014 (campaña 19) se determinó el aporte de cada uno de los tributarios, como así también la evolución

del caudal del Río Carcarañá hasta la localidad de Cruz Alta en el límite de las Provincias de Córdoba y Santa Fe. En las campañas realizadas los días 29 y 30 de septiembre y 1 de octubre de 2013 (campaña 11); 18, 19 y 20 de noviembre del 2013 (campaña 12); 07, 08 y 09 de abril de 2014 (campaña 16); 09, 08 y 10 de Junio de 2014 (campaña 17) y 07, 08 y 09 de septiembre de 2014 (campaña 18) se extendió este estudio hasta la desembocadura del Río Carcarañá en el Río Coronda, tributario del Río Paraná.

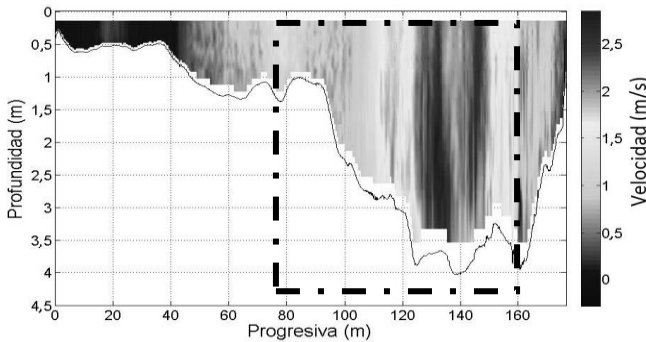


Fig. 6. Campo de velocidades obtenido mediante ADCP en la sección del Río Tercero (Ctalamochita) en la localidad de Villa Ascasubi (RTVA). El caudal aforado fue de 482,67 m³/s, el mayor registrado en este estudio.

• *Campaña N° 8 (11 de Junio de 2013)*

En esta campaña se observó que el Río Tercero (Ctalamochita) no ha recibido aportes significativos desde su nacimiento hasta la confluencia con el Río Saladillo, por lo cual se puede deducir que el escurrimiento superficial de este río en épocas de estiaje depende en gran medida de lo erogado por el embalse Piedras Moras. Luego de la confluencia de los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo se verificó que a 11,5 km aguas abajo de la misma en la localidad de Inrville, la suma de los caudales de ambos tributarios poseía una diferencia pequeña con respecto al caudal medido en ese sitio, por lo cual se puede decir que no se han registrado aportes significativos debido a las contribuciones provenientes de desagües pluviales de los campos existentes en el sector. Entre las secciones de Inrville y Cruz Alta se observó un importante incremento de caudal en muy poca distancia. Esto se debe al aporte puntual del Arroyo Tortugas pocos kilómetros aguas arriba de la sección de Cruz Alta. En la Fig. 7 se observa la contribución relativa al escurrimiento superficial en la sección de Cruz Alta de los diferentes tributarios del río Carcarañá.

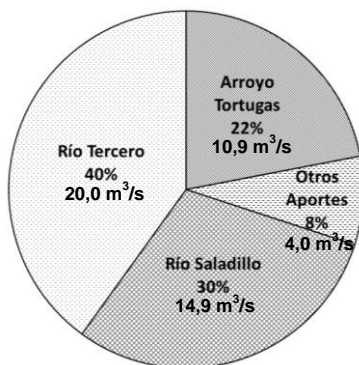


Fig. 7. Contribución relativa de los tributarios principales en el caudal escurrido total en el Río Carcarañá en la sección ubicada en Cruz Alta en la campaña de medición de día 11/06/2013.

• *Campaña N°11 (29 y 30 de Septiembre y 1 de Octubre de 2013)*

Al igual que la campaña anterior se observó que el Río Tercero o Ctalamochita no ha recibido aportes significativos a lo largo de su recorrido ya que el caudal erogado por la central Piedras Moras era similar a lo obtenido por diferencia entre los caudales del río Carcarañá en la sección ubicada en Inrville y el Río Saladillo en la sección ubicada en las cercanías de la localidad homónima.

En el río Carcarañá en la sección ubicada en la localidad de Cruz Alta se observa un aporte significativo producido por el Arroyo Tortugas. Aguas abajo de esta sección, al igual que el Río Tercero o Ctalamochita, el río Carcarañá no presenta ningún aporte ni extracción significativa, lo cual se pudo verificar con las mediciones que se realizaron en las tres localidades de la provincia de Santa Fe: Carcarañá, Pueblo Andino y Puerto Gaboto. Para un nivel de confianza de 95% los caudales aforados en dichos puntos son estadísticamente similares al obtenido en Cruz Alta. En la Fig. 8 se muestra la contribución relativa al escurrimiento superficial de los diferentes tributarios del Río Carcarañá en la sección ubicada en la localidad de Puerto Gaboto (Santa Fe).

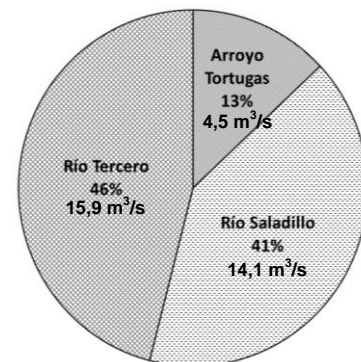


Fig. 8. Contribución relativa de los tributarios principales al caudal total escurrido en el Río Carcarañá en la localidad de Gaboto previo a su desembocadura en el Río Coronda - Campaña de medición de los días 29 y 30/09/2013 y 01/10/2013.

• *Campaña N°12 (18, 19 y 20 de Noviembre de 2013)*

Durante esta campaña, el caudal del Río Tercero o Ctalamochita no varió significativamente desde su nacimiento hasta la confluencia con el Río Saladillo. El Río Carcarañá en la sección ubicada en la localidad de Inrville (11,5km aguas abajo de la confluencia con el Río Saladillo), registró un caudal cuya diferencia con la suma de los caudales de los Ríos Tercero o Ctalamochita y Saladillo no es significativa. En la sección del Río Carcarañá ubicada en la localidad de Cruz Alta se observó un aumento de caudal muy significativo, debido al aporte del Arroyo Tortugas. Los días anteriores a la campaña se registraron importantes lluvias en la región centro-este y noreste de la provincia de Córdoba, lo que explica el considerable caudal superficial escurrido en este arroyo. En las sucesivas secciones de aforo a lo largo del Río Carcarañá se observaron pequeñas variaciones de caudal debido al aporte de desagües pluviales. En esta campaña se pudo comparar el caudal aforado por el grupo de trabajo en la sección ubicada en Pueblo Andino (73,93m³/s) con el caudal medido ese mismo día (71,20 m³/s por Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (2014), donde la diferencia entre

ambos valores es menor al 3%. En la Fig. 9 se muestra la contribución relativa al escurrimiento superficial de los diferentes tributarios al Río Carcarañá en la sección ubicada en Puerto Gaboto (Santa Fe).

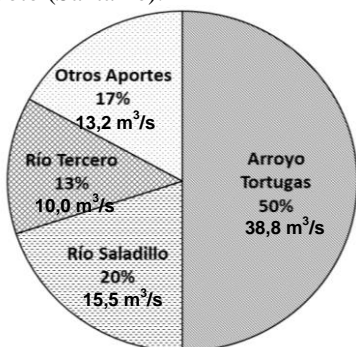


Fig. 9. Contribución relativa de los tributarios principales al caudal total escurrido en el río Carcarañá en la localidad de Puerto Gaboto previo a su desembocadura en el Río Coronda - Campaña del 18, 19 y 20 del 11/2013.

• *Campaña N° 16 (07, 08 y 09 de Abril de 2014)*

Esta campaña se desarrolló durante un periodo de crecidas en toda la cuenca del Río Carcarañá. Los caudales registrados fueron importantes y en algunos casos extraordinarios. En el Río Tercero o Ctlamochita, los caudales aforados en las localidades de Villa Ascasubi, Villa María y Bell Ville demostraron que el río no recibe aportes ni extracciones significativas durante su recorrido y que todo el importante caudal que escurre a través de él proviene de la cuenca alta. Al igual que en las campañas anteriores, en la sección ubicada en la localidad de Inrville (11,5km aguas abajo de la confluencia) el caudal aforado fue semejante a la suma de los caudales de los Ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo. En la localidad de Cruz Alta se registró un incremento importante del caudal debido al aporte del Arroyo Tortugas. Aguas abajo de esta sección, en las localidades de Carcarañá, Pueblo Andino y Puerto Gaboto, se observó que entre cada una de ellas el caudal del río Carcarañá aumentaba de forma significativa. Este aumento de caudal entre las secciones mencionadas (referenciado como otros aportes en la Figura siguiente) se debe a los desagües pluviales rurales y arroyos menores (por ej. Canal Serodino – Santa Fe), los cuales presentaban importantes caudales debido a las grandes precipitaciones registradas en la provincia de Santa Fe la semana anterior a la campaña. En la Fig. 10 se muestra la contribución relativa al escurrimiento superficial de los diferentes tributarios del río Carcarañá en la sección ubicada en la localidad de Puerto Gaboto (Santa Fe).

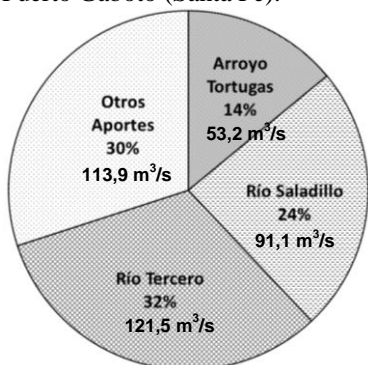


Fig. 10. Contribución relativa de los tributarios principales al caudal total escurrido en el Río Carcarañá en la localidad de Puerto Gaboto previo a su desembocadura en el Río Coronda - Campaña del 07,08 y 09 del 04/2013.

• *Campaña N° 17 (09, 10 y 11 de junio de 2014)*

Esta campaña de aforo fue efectuada luego de un período de crecidas en todo el sistema fluvial en los meses de Febrero, Marzo y Abril de 2014. En el Río Tercero (Ctalamochita), las mediciones efectuadas en Villa Ascasubi y Villa María demostraron que el río no presentaba variaciones significativas de caudal a lo largo de su recorrido, y el caudal escurrido coincidía plenamente con lo erogado por el Dique Piedras Moras. En la ciudad de Bell Ville se registró un aumento leve del caudal del Río Tercero (Ctalamochita) producto del aporte producido por los campos inundados por las fuertes precipitaciones y desbordes del río en los meses anteriores. En la localidad de Inrville (11,5 km aguas abajo confluencia de los Ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo), sobre el Río Carcarañá se aforó un caudal levemente mayor que la suma de los caudales aportados por los tributarios (Ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo), esto se debe, al igual que el caso anterior, a las descargas provenientes de los campos inundados. En la localidad de Cruz Alta, el Río Carcarañá presentó un leve aumento de caudal producido por el aporte del Arroyo Tortugas, el cual fue el tributario que menos contribuyó al escurrimiento total del Río Carcarañá en esta campaña. En las secciones de aforo ubicadas en las localidades de Carcarañá, Pueblo Andino y Puerto Gaboto, el caudal del río aumentaba levemente debido a los aportes producidos por las descargas de los campos producto de los excedentes hídricos registrados en meses anteriores. En la Fig. 11 se muestra la contribución relativa al escurrimiento superficial de los diferentes tributarios del río Carcarañá en la sección ubicada en la localidad de Puerto Gaboto (Santa Fe).

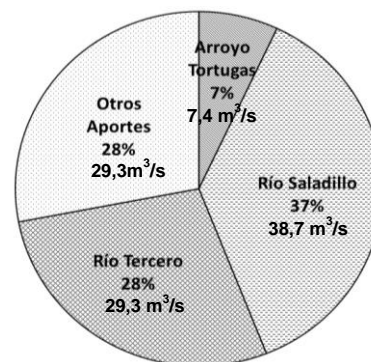


Fig. 11. Contribución relativa de los tributarios principales al caudal total escurrido en el Río Carcarañá en la localidad de Puerto Gaboto previo a su desembocadura en el Río Coronda - Campaña del 09,10 y 11 de junio de 2014.

• *Campaña N° 18 (08, 09 y 10 de Septiembre de 2014)*

En esta campaña se observó que el Río Tercero (Ctalamochita), entre Villa Ascasubi y la confluencia con el Río Saladillo, no ha tenido aportes significativos. Entre las secciones de Inrville y Cruz Alta se observó un incremento de caudal en muy poca distancia. Esto se debe al aporte del Arroyo Tortugas y otros arroyos aledaños pocos kilómetros aguas arriba de la sección de Cruz Alta. Aguas abajo de esta sección, el Río Carcarañá no presentó ningún aporte hasta la localidad de Carcarañá. Entre la localidad de Carcarañá y Pueblo Andino se observó un aporte significativo al escurrimiento superficial del Río Carcarañá, el cual se atribuye al canal Salto Grande. Aguas abajo de esta sección hasta la desembocadura del Río Carcarañá en el Río

Coronda, no se ha registrado aportes significativos. En la Fig. 12 se muestra la contribución relativa al escurrimiento superficial de los diferentes tributarios del Río Carcarañá en la sección ubicada en la localidad de Puerto Gaboto (Santa Fe).

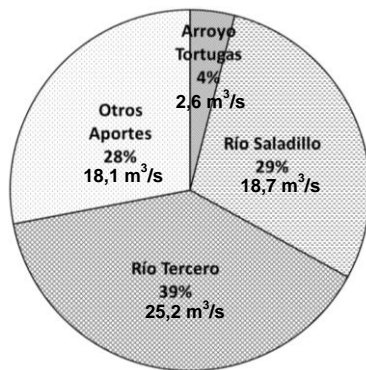


Fig. 12. Contribución relativa de los tributarios principales al caudal total escurrido en el Río Carcarañá en la localidad de Puerto Gaboto previo a su desembocadura en el Río Coronda - Campaña del 08,09 y 10 de Septiembre de 2014.

• *Campaña N° 19 (16 de Octubre de 2014)*

En esta campaña el caudal del Río Tercero (Ctalamochita) no varió significativamente desde el Dique Piedras Moras hasta la confluencia con el Río Saladillo, por lo cual se puede decir que el río no ha recibido aportes significativos a lo largo de su recorrido. En el Río Carcarañá en la localidad de Inriville el caudal aforado es similar a la suma de los caudales de los Ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo, lo cual indica que no ha habido aportes significativos desde la confluencia hasta la sección de medición. Finalmente en la localidad de Cruz Alta se observa un aumento significativo del caudal del Río Carcarañá debido al aporte del Arroyo Tortugas y otros arroyos y canales aledaños con importantes caudales. En la Fig. 13 se muestra la contribución relativa al escurrimiento superficial de los diferentes tributarios del río Carcarañá en la sección ubicada en la localidad de Cruz Alta.

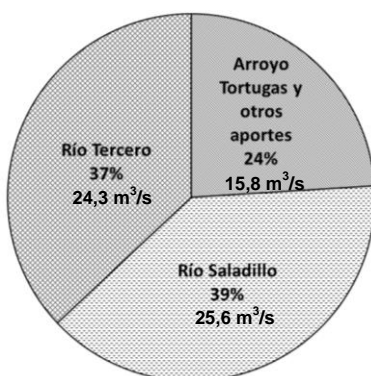


Fig. 13. Contribución relativa de los tributarios principales en el caudal escurrido total en el río Carcarañá en la sección ubicada en Cruz Alta en la campaña de medición de día 16/10/2014.

• *Resumen de las observaciones realizadas.*

Del análisis de las campañas de aforo realizadas, se verificó que el caudal superficial que escurre en el Río Tercero (Ctalamochita) en las cercanías de las localidades de Río Tercero y Villa Ascasubi, está fuertemente explicado por las erogaciones del Dique Piedras Moras, ya sea por la central hidroeléctrica o por las estructuras de evacuación de

excedencia. Utilizando un extenso registro de datos de potencia diaria generada (datos desde el año 2004 hasta la actualidad) provisto por EPEC – Empresa Provincial de Energía de Córdoba-, se procedió a realizar una estimación de caudal utilizando dicha información. En la Fig. 14 se contrastó los caudales estimados (utilizando los datos de potencia y una eficiencia del 85%, la cual se determinó a priori y se verificó posteriormente con las mediciones realizadas) y los caudales medidos en las secciones ubicadas en el Balneario de la ciudad de Río Tercero y en Villa Ascasubi. Se observa una buena correspondencia entre ambos caudales lo que implica que, en casos donde no se disponga de datos de aforos en las secciones ubicadas en el Balneario de la ciudad de Río Tercero y Villa Ascasubi (siempre que no esté en funcionamiento el vertedero del embalse Piedras Moras), se puede estimar el caudal escurrido utilizando los datos de potencia generada.

Además se contrastó los caudales erogados por vertedero con los medidos en la localidad de Villa Ascasubi durante el evento de crecida registrado en los meses de febrero, marzo y abril del año 2014, mostrándose también una buena correspondencia (Fig. 15).

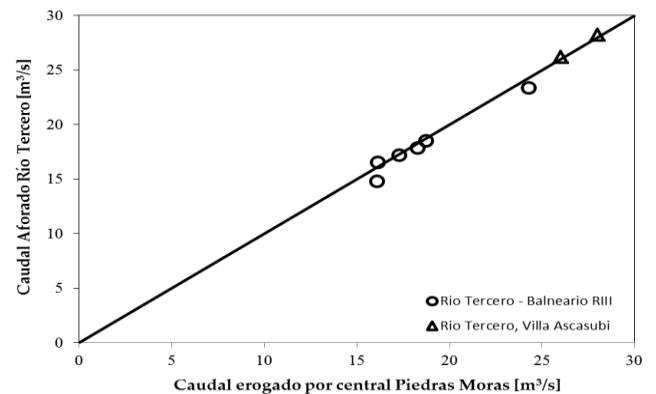


Fig. 14: Contraste entre los caudales estimados mediante datos de potencia generada por la central Piedras Moras y los caudales medidos en las secciones emplazadas en el Río Tercero (Ctalamochita) en el Balneario de la ciudad de Río Tercero y en Villa Ascasubi.

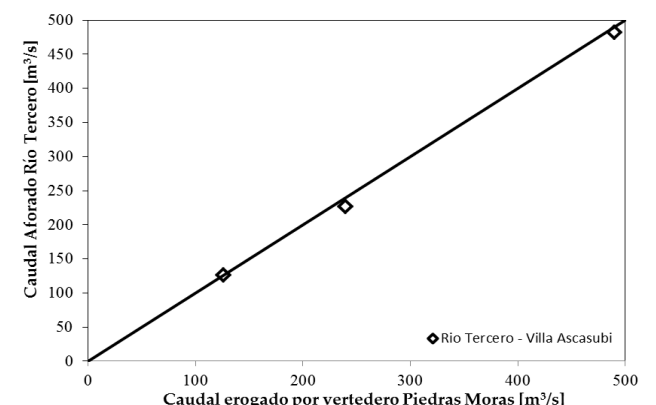


Fig. 15: Contraste entre los caudales erogados por el vertedero del Dique Piedras Moras y los caudales medidos en el Río Tercero-Ctalamochita en la localidad de Villa Ascasubi.

En las campañas 6, 8, 9, 10, 11, 12, 17, 18 y 19 (realizadas en periodos donde no se registraron precipitaciones significativas en la cuenca) no se han detectado aportes importantes en la cuenca del Río Tercero (Ctalamochita) en el tramo desde el Dique Piedras Moras

hasta la confluencia con el Río Saladillo, por lo cual se puede afirmar que prácticamente el escurrimiento superficial del Río Tercero (Ctalamochita) en esos periodos está regulado por el Embalse Piedras Moras. Con respecto al caudal del Río Saladillo, este presenta una variación estacional importante, debido a que no se encuentra regulado (el Río Cuarto – Saladillo, es uno de los pocos sistemas fluviales importantes en la Provincia de Córdoba que no presenta regulación) y presenta múltiples canalizaciones en su cuenca con el objetivo de desaguar las lagunas existentes (Bañados del Río Saladillo) para evitar inundaciones de los campos en épocas de crecida.

La Fig. 16 muestra la contribución relativa al Río Carcarañá (en la confluencia) de los principales tributarios de los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo.

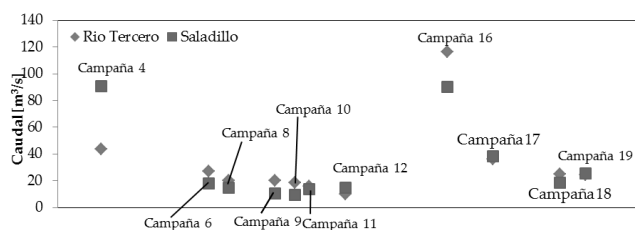


Fig. 16: Evolución del caudal de los Ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo en la confluencia.

En los períodos lluviosos se han observado contribuciones importantes del Arroyo Tortugas en el caudal escurrido del Río Carcarañá, principalmente luego de que ocurrieron eventos de lluvias en la región noreste de la provincia, al sur de la localidad de San Francisco. Este curso de agua puede aportar, al río Carcarañá, caudales de igual o mayor magnitud que los otros principales tributarios (Ríos Tercero –Ctalamochita- y Saladillo). En las campañas efectuadas en noviembre de 2013 (campaña 12) y Abril de 2014 (campaña 17) se observó una variación relativa importante en el caudal del río Carcarañá entre las secciones de Inriville y Cruz Alta, debido al aporte de este arroyo (Fig. 17). En época de estiaje se observa una baja variabilidad del caudal del Río Carcarañá a lo largo de todo su recorrido (Fig. 17).

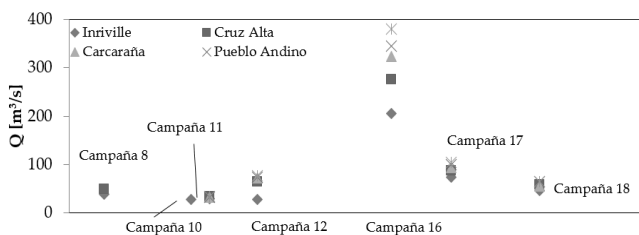


Fig. 17: Evolución del caudal del Río Carcarañá en las diferentes secciones de aforo

Curvas Altura de superficie libre – Caudal calibradas para distintas secciones de los principales tributarios de la cuenca del río Carcarañá

Utilizando los datos relevados en las diferentes campañas para diferentes condiciones hidrológicas, se calibraron curvas que relacionan las alturas de superficie libre y el caudal escurrido para las secciones de medición: Puente de ingreso a Villa Ascasubi (RTVA), Puente Alberdi en Villa María (RTVMPA), Puente Sarmiento en Bell Ville

(RTPSBV), Puente Sturla en Bell Ville, Azud en San Marcos (RTASM), Puente ruta 12, en Inriville (RCIPR12), Puente Ruta 15 en Cruz Alta (RCCA), Pueblo Andino (RCPA) y Arroyo Tortugas en Tortugas (ATT). Debido a las condiciones de flujos extraordinarias monitoreadas durante los meses de febrero, marzo y abril de 2014, se han obtenido puntos extremos muy valiosos para ajustar estadísticamente las curvas altura-caudal, lo cual es significativo a la hora de extrapolar las curvas para valores elevados de caudal. Para el ajuste de las curvas altura -caudal a través de los datos medidos, se procedió a desarrollar interpoladores mediante el ajuste estadístico de los valores experimentales utilizando ecuaciones matemáticas (con fundamento hidráulico) presentadas por el Servicio Geológico de los Estados Unidos –USGS- (Sauer, 2002). Dichas ecuaciones son del tipo:

$$Q = \alpha \cdot (H - H_{Q0})^\beta = \alpha \Delta H^\beta \tag{1}$$

Donde α y β son parámetros de calibración, H es el nivel o altura de superficie libre respecto a un nivel de referencia y H_{Q0} es un parámetro que representa la altura de superficie libre cuando no hay escurrimiento (caudal nulo). El parámetro H_{Q0} es hipotético y no puede ser medido in situ en cursos fluviales (donde la batimetría del lecho es irregular), pero si puede ser relevado en estructuras de control como vertederos.

- *Curva Altura-Caudal del Río Tercero (Ctalamochita) en el puente de ingreso a la localidad de Villa Ascasubi.*

En la Fig. 18 se muestra la curva altura-caudal ajustada para el Río Tercero (Ctalamochita) en el puente de ingreso a la localidad de Villa Ascasubi, la batimetría de sección y la escala existente en dicho puente (los valores intermedios de altura se interpolaron digitalmente) sobre la cual se tomaron las lecturas de nivel.

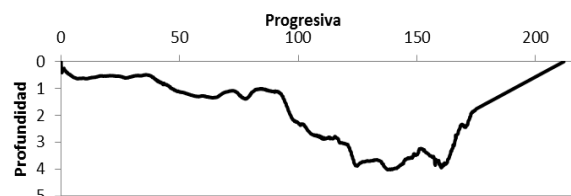
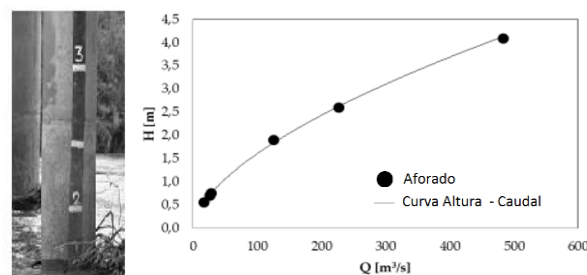


Fig. 18: Curva altura-caudal para el Río Tercero (Ctalamochita) en el puente de ingreso a la localidad de Villa Ascasubi. Los niveles de superficie libre están referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente. (Ver imagen de la izquierda)

La ecuación ajustada en esta sección (ec. 2) presenta un coeficiente de determinación R^2 de 0,999 y un valor H_{Q0} de -0,36m.

$$Q = 45,3 \cdot (H - H_{Q0})^{1,67} \quad (2)$$

con H expresado en [m] y Q en [m³/s].

• *Curva Altura-Caudal en el puente Alberdi de la localidad de Villa María.*

La sección de aforo donde se ajustó la curva altura-caudal se encuentra en el área central de Villa María y es utilizada por los bomberos y organismos municipales y provinciales para monitorear la evolución del nivel del Río Tercero (Ctalamochita). Durante el evento de crecida registrado en febrero, marzo y abril de 2014 los niveles del río reportados por los medios de comunicación y utilizados por los organismos de defensa civil corresponden a esta sección. En la Fig. 19 se muestra la curva ajustada, la batimetría de sección y la escala existente.

La ecuación ajustada en esta sección (ec. 3) presenta un valor de R^2 de 0,999 y un valor H_{Q0} de -0,69m.

$$Q = 32,4 \cdot (H - H_{Q0})^{1,67} \quad (3)$$

con H expresado en [m] y Q en [m³/s].

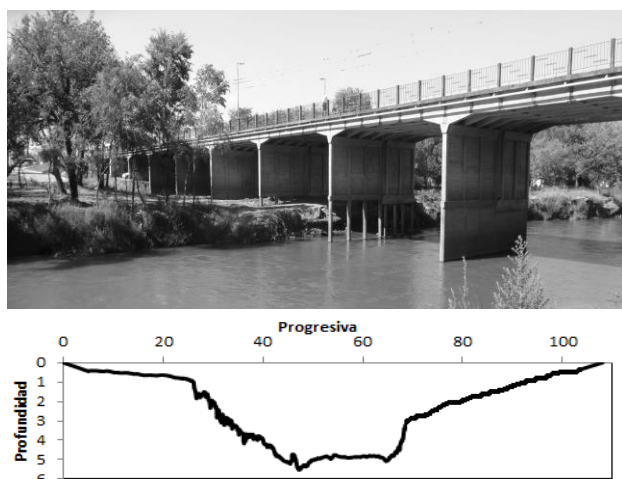
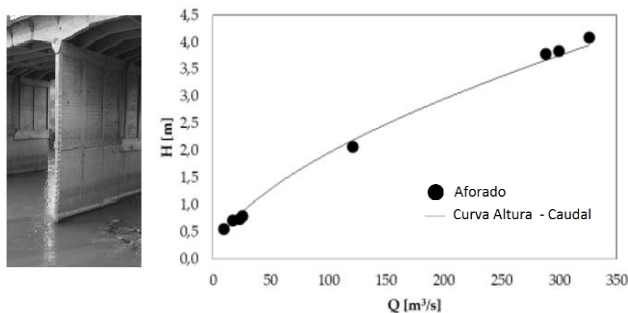


Fig. 19: Curva altura-caudal del Río Tercero (Ctalamochita) en el Puente Alberdi de Villa María. Los niveles de superficie libre están referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente. (Ver imagen de la izquierda).

Los valores de caudales máximos utilizados para el ajuste de la curva altura de superficie libre-caudal en esta sección fueron registrados en condiciones de flujo con desborde del río, invadiendo la Av. Costanera y sectores aledaños. Aun en estas condiciones se pudo monitorear la totalidad de la

sección mojada ya que el aforo de estos caudales se realizó en la sección del puente Alberdi.

• *Curva Altura-Caudal en el Puente Sarmiento Bell Ville*

El puente Sarmiento se encuentra ubicado en el área central de la localidad de Bell Ville. Este puente cuenta con una escala, la cual en épocas de crecida queda bajo el agua y no es posible tomar lectura. Para subsanar este problema y poder ajustar la curva altura-caudal se referenció los niveles respecto al tablero del puente y luego se determinó el nivel de superficie libre con respecto a la escala existente. En la Fig. 20 se muestra la curva ajustada, la batimetría de sección y la escala existente.

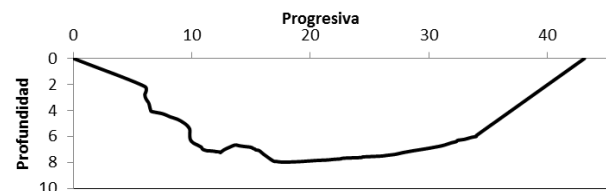
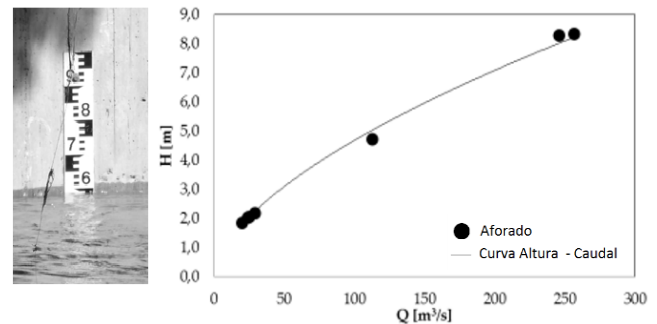


Fig. 20: Curva altura-caudal para el Río Tercero (Ctalamochita) en el puente Sarmiento de la localidad de Bell Ville. Los niveles de superficie libre están referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente. (Ver imagen de la izquierda).

La ecuación ajustada en esta sección (ec. 4) presenta un valor de R^2 de 0,997 y un valor H_{Q0} de -0,14m.

$$Q = 7,6 \cdot (H - H_{Q0})^{1,67} \quad (4)$$

con H expresado en [m] y Q en [m³/s].

• *Curva Altura-Caudal en el Puente Sturla Bell Ville*

El puente Sturla es el último puente dentro del tramo urbano del Río Tercero (Ctalamochita) en la ciudad de Bell Ville y posee una escala que es utilizada por las autoridades municipales y provinciales para monitorear la evolución del nivel del Río Tercero (Ctalamochita). Durante el evento de crecida de los meses de febrero, marzo y abril de 2014, los niveles reportados por los medios periodísticos corresponden a esta escala. Dado la importancia que tiene esta sección y debido a la existencia de registro de niveles,

se procedió a ajustar la curva altura-caudal (Fig. 21). La ecuación ajustada en esta sección (ec. 5) presenta valor de R^2 de 0,998 y un valor H_{Q0} de 1,00m.

$$Q = 6,9 \cdot (H - H_{Q0})^{1,67} \tag{5}$$

con H expresado en [m] y Q en [m³/s].

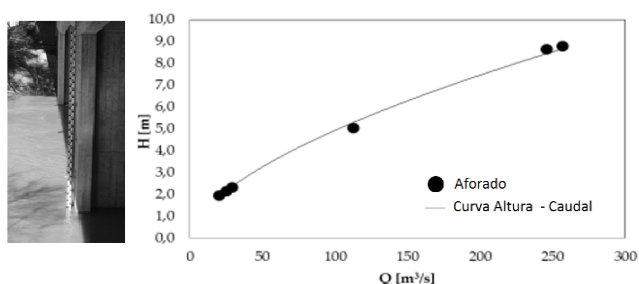


Fig. 21: Curva altura-caudal del Río Tercero (Ctalamochita) en el puente Sturla de la localidad de Bell Ville. Los niveles de superficie libre están referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente. (Ver imagen de la izquierda)

La sección transversal en este sitio de medición no se muestra en la Fig. 21 debido a que las mediciones de caudal se efectuaron aguas arriba en el puente Sarmiento de la localidad de Bell Ville.

• *Curva Altura-Caudal en el Azud San Marcos*

El azud San Marcos al igual que el azud Bell Ville se utilizan para elevar el nivel de superficie libre necesario para la toma de agua que abastece a todo el sudeste provincial. Al igual que en el azud Bell Ville la cooperativa del Sudeste tiene previsto utilizar la curva altura-caudal para publicar valores de caudal en tiempo real. En la Fig. 22 se muestra la curva ajustada, la batimetría de sección y la escala existente.

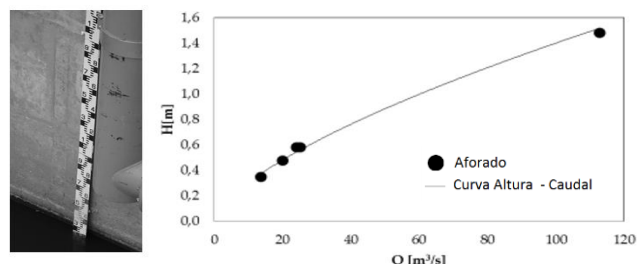


Fig. 22: Curva altura-caudal del Río Tercero (Ctalamochita) en el Azud San Marcos. Los niveles de superficie libre están referenciados a la escala existente en el azud. (Ver imagen de la izquierda)

La ecuación ajustada en esta sección (ec. 6) presenta un valor de R^2 de 0,989 y un valor H_{Q0} de -0,08m.

$$Q = 59,7 \cdot (H - H_{Q0})^{1,50} \tag{6}$$

con H expresado en [m] y Q en [m³/s].

La sección transversal en este sitio de medición, no se muestra en la Fig. 22 debido a que las mediciones de caudal se efectuaron aguas abajo en el puente rural de la localidad de San Marcos Sud, por cuestiones de accesibilidad y seguridad.

• *Curva Altura-Caudal del Río Carcarañá en la sección ubicada en Inriville en el puente Ruta 12*

La sección del Río Carcarañá ubicada en el puente de la ruta provincial 12 en Inriville tiene la particularidad de ubicarse pocos kilómetros aguas abajo de la confluencia de los ríos Tercero (Ctalamochita) y Saladillo antes del aporte producido por el Arroyo Tortugas. A través de esta curva se puede obtener por diferencia con el caudal relevado en el puente de Ruta 15 en Cruz Alta, el aporte al sistema producido por el Arroyo Tortugas y arroyos aledaños a la zona. En la Fig. 23 se muestra la batimetría de la sección y la curva altura-caudal cuyos valores se encuentran referenciados a un nivel de 5,5 m por debajo del nivel inferior de viga.

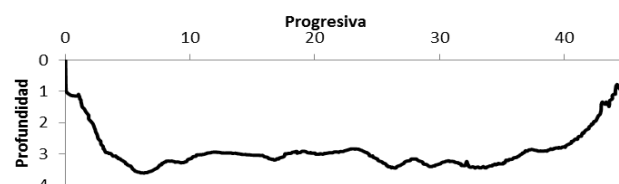
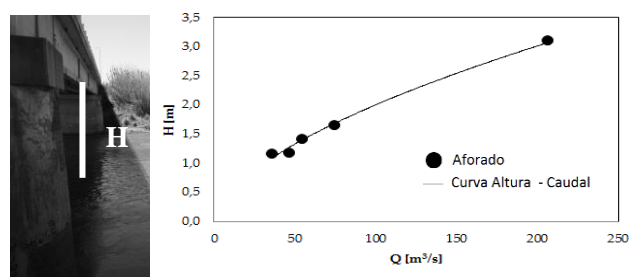


Fig. 23: Curva altura-caudal del Río Carcarañá en el puente Ruta 12 en las cercanías de Inriville. Los niveles de superficie libre se encuentran referenciados a un nivel de 5,5 m por debajo del nivel inferior de viga. (Ver imagen de la izquierda)

La ecuación ajustada en esta sección (ec. 7) presenta un valor de R^2 de 0,985 y un valor H_{Q0} de -0,86m. El nivel de referencia de superficie libre de esta sección (nivel cero) se

encuentra ubicado a 5,50 m debajo del nivel inferior de viga del tablero del puente.

$$Q=31,3 \cdot (H-H_{Q0})^{1,67} \tag{7}$$

con H expresado en [m] y Q en [m³/s].

- *Curva Altura-Caudal del Río Carcarañá en la sección de la localidad de Cruz Alta ubicada en el puente Ruta 15*

La sección del Río Carcarañá ubicada en el puente de la ruta 15, se encuentra en el límite de las provincias de Córdoba y Santa Fe. La importancia de ajustar una curva altura-caudal en esta sección radica en conocer los caudales que entrega la provincia de Córdoba a su provincia vecina. Actualmente se está gestionando la instalación en esa sección de una estación remota automática para el registro de niveles, los cuales podrán ser convertidos en un procesamiento sencillo en caudales a través de la curva mostrada en la Fig. 24. En esta Figura se muestra además la batimetría de sección.

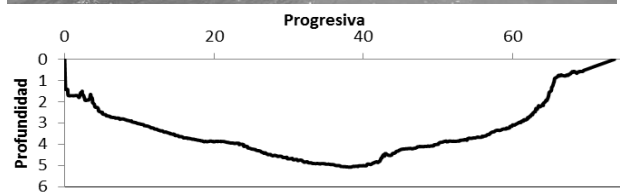
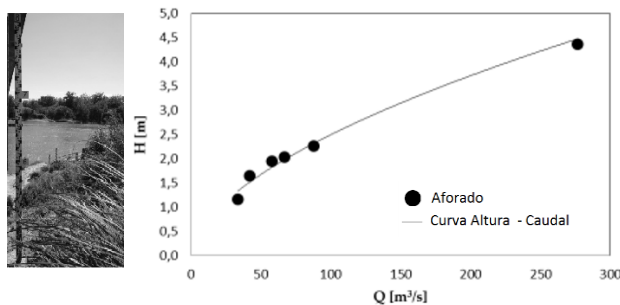


Fig. 24: Curva altura-caudal del río Carcarañá en el puente Ruta 15 en las cercanías de Cruz Alta. Los niveles de superficie libre están referenciados a 8 metros por debajo del nivel inferior de la viga del puente. (Ver imagen de la izquierda)

La ecuación ajustada en esta sección (ec. 8) presenta un valor de R² de 0,989 y un valor H_{Q0} de -0,60m.

$$Q=21,3 \cdot (H-H_{Q0})^{1,67} \tag{8}$$

con H expresado en [m] y Q en [m³/s].

- *Curva Altura-Caudal del Río Carcarañá en la sección ubicada en la localidad de Pueblo Andino – Santa Fe*

La sección de aforo de Pueblo Andino tiene la característica de ser la sección utilizada por la Subsecretaría

de Recursos Hídricos de la Nación (2014) para realizar aforos periódicos y publicarlos en la base de datos integrados del organismo. La importancia de realizar la curva altura-caudal en esta sección radica en corroborar los datos publicados por la SSRH. En la Fig. 25 se muestra la curva altura-caudal calibrada. Se incluye además la batimetría de sección

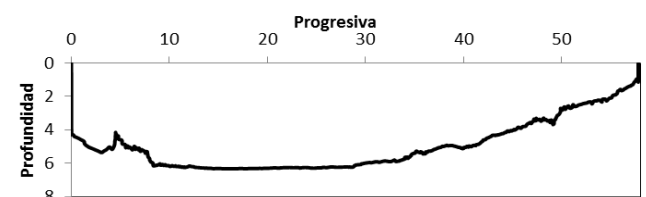
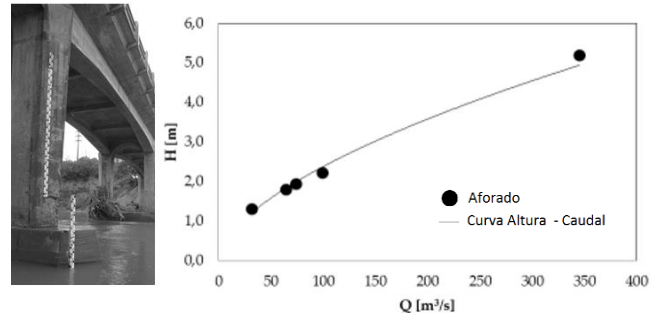


Fig. 25: Curva altura-caudal del Río Carcarañá en la localidad de Pueblo Andino. Los niveles de superficie libre están referenciados a la escala existente en una de las pilas del puente. (Ver imagen de la izquierda)

Un dato interesante a destacar es que durante este estudio logró aforarse el 5º valor más alto de la serie de datos existente de la SSRH. La ecuación ajustada en esta sección (ec. 9) posee valor de R² de 0,987 y un valor H_{Q0} de -0,77m.

$$Q=23,4 \cdot (H-H_{Q0})^{1,67} \tag{9}$$

con H expresado en [m] y Q en [m³/s].

- *Curva Altura-Caudal del Arroyo Tortugas en la sección ubicada sobre el puente de la ruta nacional 9.*

En la Fig. 26 se muestra la curva altura-caudal elaborada para el Arroyo Tortugas en la sección ubicada sobre la ruta nacional 9 en el puente de ingreso a la localidad homónima. A través de esta curva se pretende reactivar el monitoreo de caudales en este sistema, el cual se encuentra discontinuado desde el año 1954 (Base de datos hidrológica de la SSRH, 2014).

La ecuación ajustada en esta sección (ec. 10) presenta un valor de R² de 0,989 y un valor H_{Q0} de -0,22m. El nivel de referencia de superficie libre de esta sección (nivel cero) se

encuentra ubicado a 4,50 m debajo del nivel inferior de la viga del tablero del puente.

$$Q = 9,9 \cdot (H - H_{Q0})^{1,67} \quad (10)$$

con H expresados en [m] y Q en [m³/s].

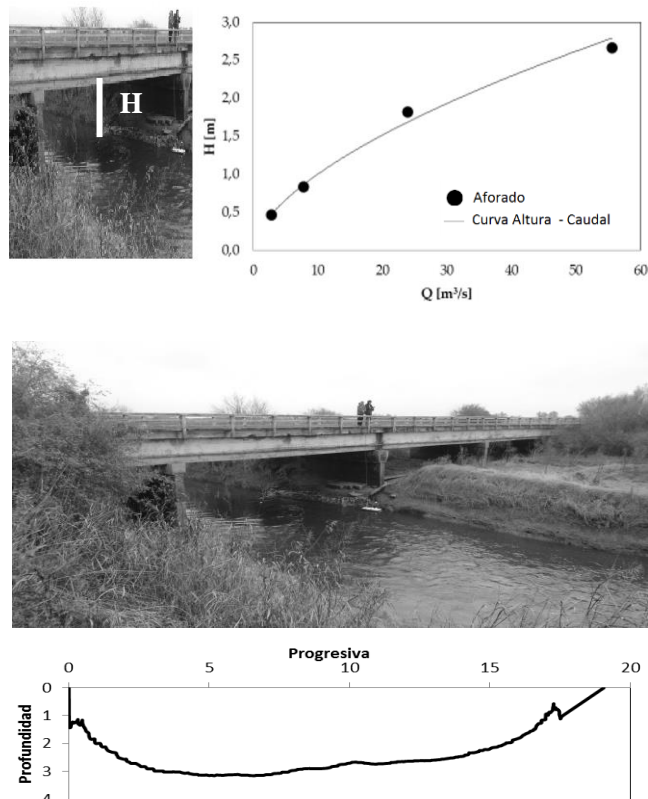


Fig. 26: Curva altura-caudal del Arroyo Tortugas en el puente de la ruta nacional 9. Los niveles de superficie libre están referenciados a 4,5 metros por debajo del nivel inferior de la viga del puente. (Ver imagen de la izquierda)

Reconstrucción de los hidrogramas generados durante un evento de crecida extraordinario

Utilizando los registros de nivel realizados periódicamente en dos secciones de la cuenca y mediante las curvas altura-caudal calibradas en cada una de ellas, se procedió a determinar los hidrogramas de crecida para los meses de febrero, marzo y abril de 2014 en las localidades de Villa María y Bell Ville, los cuales se muestran en la Fig. 27. En esta figura además se grafica el hidrograma generado por la erogación de caudales del vertedero del Dique Piedras Moras y la precipitación media areal semanal de la cuenca alta del Río Tercero (Ctalamochita), la cual fue el evento hidrológico generador de la crecida registrada en la cuenca.

Mediante los hidrogramas se pudo conocer la respuesta hidrológica de la cuenca del Río Tercero (Ctalamochita). El hidrograma del Dique Piedras Moras muestra que el primer pico de crecida (16/02/2014) se generó por una precipitación media areal semanal en la cuenca alta de 262 mm, la cual se registró en la semana del 08/02/2014 al 14/02/2014. El segundo pico que se observa (26/02/14), de mayor magnitud que el primero, fue generado por un evento de precipitación menor registrado entre las semanas del 15/02/14 al 21/02/14 y 22/02/14 al 01/03/14 ya que la capacidad de regulación de los embalses fue menor.

En la Fig. 27, es posible también observar que a medida que el hidrograma de crecida avanza hacia aguas abajo, este se atenúa no sólo por el tránsito, sino también debido a los desbordes y desvíos que sufre el río, los cuales producen que el caudal que llega a las diferentes secciones de medición sea menor. Además, se observa que la duración del hidrograma aumenta notablemente hacia aguas abajo, debido a que los caudales desbordados almacenados en los campos comienzan a escurrir nuevamente al cauce del río a medida que baja el nivel del mismo, produciendo que se mantengan altos caudales por un tiempo mayor.

A través del análisis de los tiempos al pico, se determinó que el primer pulso de crecida demoró desde el Dique Piedras Moras, un poco menos de dos días (42 horas) en llegar a Villa María y 6 días en llegar a Bell Ville. Mientras que el segundo pulso demoró aproximadamente un día y medio (34 horas) en llegar a Villa María y 6,5 días en llegar a Bell Ville. Esta disminución del tiempo que demoró el pico en viajar desde Piedras Moras a Villa María (disminución del 20% en el tiempo al pico) está relacionada a un aumento de los caudales escurridos (aumento del 48% en el caudal) ya que los tiempos al pico dependen directamente de los caudales escurridos en ese pulso. Sin embargo no se observaron diferencias significativas entre los tiempos al pico de los pulsos hacia Bell Ville ya que desde Villa María hacia aguas abajo el caudal escurrido en el cauce no ha variado significativamente porque los excesos de caudal desbordan del cauce. Estos datos son importantes a tener en cuenta a la hora de determinar protocolos de acción durante crecidas.

Mediante la integración de los hidrogramas se obtuvieron los volúmenes escurridos por las diferentes secciones. El dique Piedras Moras entre el 14 de Febrero y 19 de Marzo de 2014 erogó un total de 787 Hm³ valor muy cercano a la capacidad de almacenamiento del conjunto de embalses. Este volumen corresponde a una lámina de lluvia media areal escurrida en la cuenca alta del Río Tercero (área = 3.287 km²) de 242mm, un 35% del total de lámina media areal precipitada en el mismo periodo (691mm). En Bell Ville el volumen escurrido entre 18 de Febrero y 23 de Abril de 2014 fue de 730 Hm³.

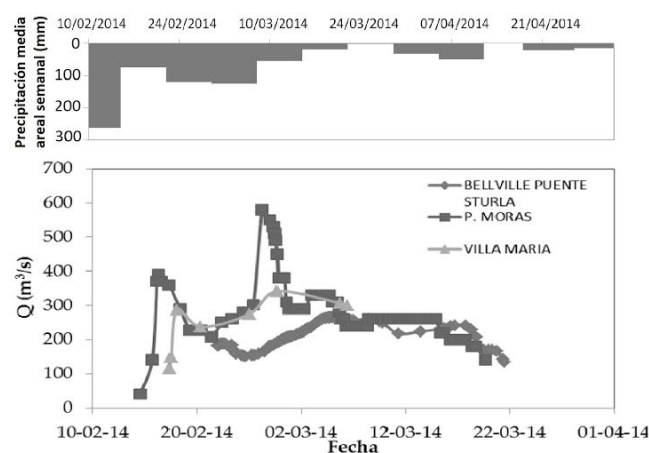


Fig. 27: Hidrogramas de crecida del Río Tercero (Ctalamochita) en Piedras Moras, Villa María y Bell Ville. En la parte superior se representa el hietograma medio areal en la cuenca alta.

CONCLUSIONES

A partir de la cuantificación del escurrimiento superficial de la cuenca del Río Carcarañá se arribó a las siguientes conclusiones:

- Del análisis de los aforos realizados en todo el sistema se pudieron conocer las contribuciones relativas de los tributarios al río Carcarañá relacionadas con sus evoluciones hidrológicas y sus características de regulación. Se observó que durante épocas de estiaje en la cuenca baja del Río Tercero o Ctlamochita, el río no recibe ningún aporte significativo a lo largo de su recorrido, y su caudal depende fuertemente de lo erogado por la central Piedras Moras. El Río Carcarañá, luego de la confluencia de los Ríos Tercero-Ctlamochita y Saladillo, en épocas de estiaje no recibe aportes significativos y el proceso hidrológico dominante es el tránsito de los caudales. En épocas de lluvia el Río Carcarañá recibe una gran cantidad de aportes provenientes de campos y arroyos menores los cuales producen importantes aumentos de caudal. El Arroyo Tortugas es un curso fluvial que ha sido canalizado y por donde escurre los excedentes hídricos provenientes de los campos ubicados en la zona limítrofe de Córdoba y Santa Fe (al sur de la ciudad de San Francisco), por lo que al ocurrir importantes eventos hidrometeorológicos en la zona este de la provincia de Córdoba, este arroyo aporta importantes caudales al sistema fluvial del río Carcarañá.
- Se observó muy buena correspondencia entre los caudales erogados por la central hidroeléctrica Piedras Moras y aquellos monitoreados en el Río Tercero-Ctlamochita durante las campañas realizadas en el balneario de la ciudad de Río Tercero y Villa Ascasubi, lo que implica que, en casos donde no se disponga de aforos en estas secciones y que no esté en funcionamiento el vertedero del embalse Piedras Moras, los valores de potencia generada reportados por la central pueden ser usados para generar buenos estimadores del caudal escurrido en esa sección. Se observó además una buena correspondencia entre los caudales erogados por el Vertedero del Dique Piedras Moras y aquellos monitoreados en las secciones mencionadas.
- En la calibración de las curvas que relacionan la altura de superficie libre y el caudal escurrido (H-Q) en las distintas secciones del sistema fluvial se incorporaron registros relevados durante los eventos extraordinarios ocurridos en el año 2014, lo cual permite ajustar la curva en la zona de máximos caudales, en donde generalmente estas curvas presentan falencias en la estimación de caudal. Una vez calibradas y validadas las curvas H-Q, las mismas permitirán a organismos municipales, provinciales y cooperativos obtener una estimación rápida de caudal.

- Mediante la reconstrucción de los hidrogramas de crecida correspondientes al periodo de crecida extraordinario, utilizando las curvas altura-caudal, se pudo conocer los volúmenes y láminas de lluvia escurridos y los tiempos de tránsito de los picos de crecida en llegar a dos secciones de interés.
- Se recomienda continuar con el programa de cuantificación del escurrimiento superficial de la cuenca del Río Carcarañá y diseñar una red de monitoreo remota automática con una cantidad de estaciones mínimas con el objetivo de aumentar el conocimiento del mismo y permitir un manejo sustentable del recurso.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen a la Empresa Provincial de Energía de Córdoba (EPEC) por proveer la información de potencia diaria generada para estimar los caudales erogados, al Sr. Domínguez (de la Secretaria de Recursos Hídricos del Gobierno de la Provincia de Córdoba de la Provincia de Córdoba) a Coperaña, (Cooperativa de obras, servicios públicos asistenciales y vivienda de Carcarañá) y a los bomberos voluntarios de la ciudad de Carcarañá por su colaboración durante el desarrollo de las campañas de aforo. Este estudio se realizó en el marco del proyecto de investigación “Cuantificación y Caracterización del Flujo de agua en Sistemas Fluviales de la Provincia de Córdoba con fines ambientales”. Financiado por la Secretaria de Ciencia y Tecnología (SECyT) de la Universidad Nacional de Córdoba. Durante las campañas de mediciones se realizaron actividades de transferencia tecnológica previstas en el “Programa de capacitación y actualización en modernas técnicas experimentales para medición de caudales de aguas superficiales en cauces naturales”, financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología de la Provincia de Córdoba en el marco del Programa de Transferencia de Resultados de la Investigación y Comunicación Pública de la Ciencia (PROTRI).

REFERENCIAS

- [1] Bandolín, P.G., Ávalos, M.A. De Angelo, C. (2013). “The impact of flood control on the loss of wet lands in Argentina” *Aquatic Conserv: Mar. Freshw. Ecosyst.* 23: 291– 300.
- [2] Cossavella, A.M.; Carranza, P.; Monarde, F.; Larrosa, N.; Roqué, M.; Nuño, C.; Hunziker, M.L.; Ferreyra, M. y Melián J et al. (2003). “Gestión de efluentes líquidos en la cuenca del Río Tercero (Ctlamochita)”. XXIVº Congreso Nacional del Agua 2013, San Juan, Argentina.
- [3] Lenarduzzi, M.G. (2013). “Caracterización hidrodinámica experimental de un tramo del Río Tercero (Ctlamochita) con fines hidroambientales”. Práctica Supervisada de la carrera Ingeniería Civil de la FCEFN UNC. Córdoba, Argentina.
- [4] Saldaño, V. (2010). “Modelación Hidrológica y de Calidad de Agua del Río Tercero (Ctlamochita)”. Trabajo final de la carrera Ingeniería Civil de la FCEFN UNC. Córdoba, Argentina.
- [5] Sauer, V.B., (2002) “Standards for the Analysis and Processing of Surface-Water Data and Information Using Electronic Methods” U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 01–4044, 91p.
- [6] Sontek (2010) “RiverSuveyor S5/M9 System Manual” – Manual del usuario provisto por SonTek para la operacion de ADCP S5/M9

- [7] Subsecretaria de Recursos Hídricos de la Nación. (2014)
<http://www.hidricosargentina.gov.ar/>
- [8] Szupiany R.N y Oberg K (2014) “Perfiladores de Corriente Acústicos Doppler (ADCP)” – Monografía IAHR: Caracterización experimental de flujos turbulentos en hidráulica.