

Modelo conceptual y de funcionamiento hidrogeológico de humedales en la Cuenca Matanza Riachuelo a escala detalle

Informe 01 – Campaña N° 1 de aforos y relevamientos topográficos



Programa Hidráulica Computacional – Subgerencia Laboratorio de Hidráulica
Instituto Nacional del Agua

Proyecto INA 1669
Informe LHA 01-1669-23
Ezeiza, marzo de 2023

Equipo de trabajo (por orden alfabético)

Programa Hidráulica Computacional – Subgerencia Laboratorio de Hidráulica – Instituto Nacional del Agua

Dr. Ing. Pablo E. García | Mayra Morale | Lic. Nicolás Ortiz

Subgerencia de Servicios Hidrológicos – Instituto Nacional del Agua

Lic Ariel Humai | Lic. Valeria Petrizzi | Lic Santiago Valdés

Informe realizado por:

Pablo E. García

Nicolás Ortiz

Mayra Morale

Tabla de contenido

1. Campaña de aforos y relevamientos topográficos.....	4
1.1. Técnicas de aforos líquidos	5
1.1.1. Perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP).....	6
1.1.2. Metodología LSPIV	9
1.2. Relevamientos topográficos con GNSS Diferencial.....	11
1.3. Resumen de actividades y resultados de la campaña de aforos aforos y relevamientos topográficos	12
1.4. Conclusiones.....	14
Anexo A. Detalle de los aforos de la campaña.....	15
A.1. Sección 01.....	16
Aforo con ADCP	16
A.2. Sección 02.....	19
Aforo con ADCP	19
A.3. Sección 03.....	21
Aforo mediante la técnica LSPIV	21

1. Campaña de aforos y relevamientos topográficos

Los días 15 de diciembre de 2022 y 03 de febrero de 2023 se llevó a cabo la primera Campaña de aforos y relevamientos topográficos asociada al proyecto “Modelo conceptual y de funcionamiento hidrogeológico de humedales en la Cuenca Matanza Riachuelo a escala detalle”. El día 15/12/2022 se realizaron aforos en 3 secciones del arroyo Rodríguez y afluentes y relevamientos topográficos en 15 puntos correspondientes a pozos freáticos, molinos y puentes, tal como se muestra en la Figura 1.1. El día 03/02/2023 se realizaron relevamientos topográficos en 5 puntos (Figura 1.2).

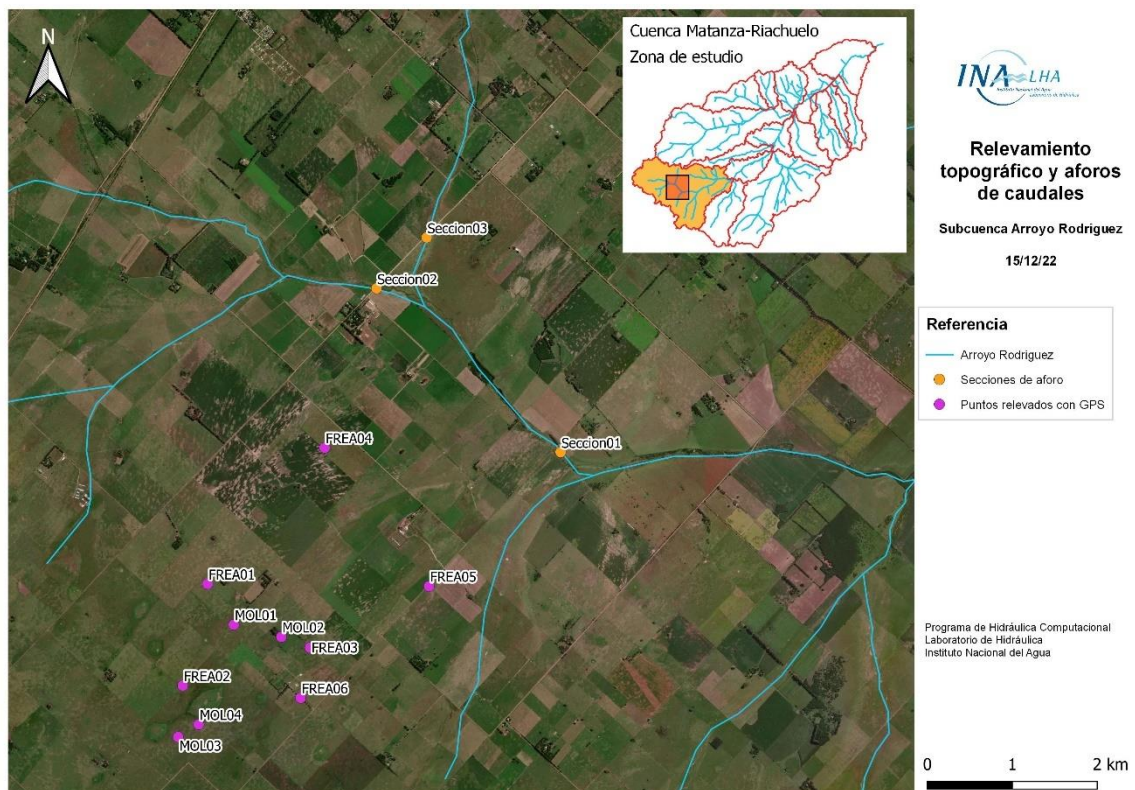


Figura 1.1. Aforos y relevamientos topográficos realizados el 15 de diciembre de 2022.

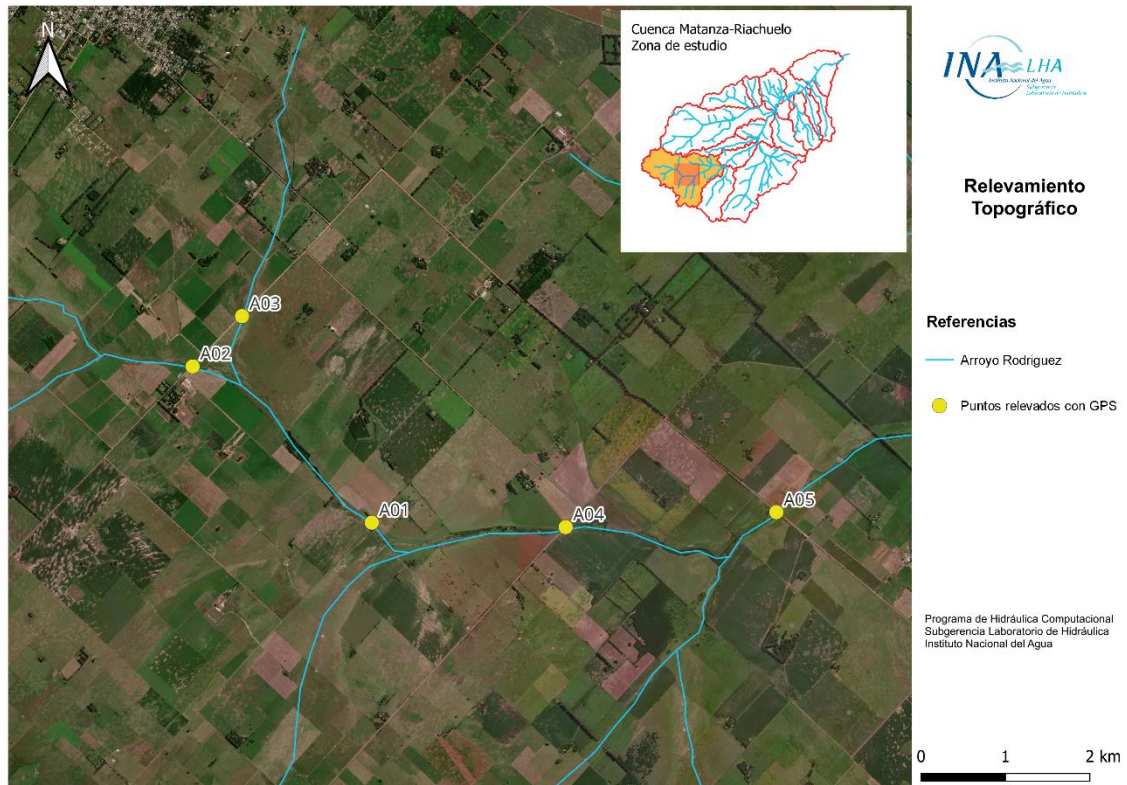


Figura 1.2. Relevamientos topográficos realizados el 03 de febrero de 2023.

1.1. Técnicas de aforos líquidos

Las técnicas de aforos líquidos en ríos y arroyos históricamente se han basado en métodos mecánicos, electromagnéticos o acústicos que requieren contacto con el flujo para la medición. Diversos problemas (seguridad, logística, interferencias en la medición, etc.) limitan la aplicabilidad de estos métodos convencionales, por lo que en las últimas décadas se han desarrollado métodos no intrusivos basados en la detección remota de la velocidad de la superficie del agua utilizando análisis de secuencias de imágenes y radares Doppler, entre otros¹.

En el marco de las actividades de aforos líquidos realizadas en el ámbito de la cuenca Matanza-Riachuelo las metodologías utilizadas principalmente han sido las hidroacústicas. Específicamente, según el requerimiento de las secciones relevadas en la cuenca, como instrumentos de medición han sido utilizadas técnicas de medición con ADV (velocímetro acústico Doppler; Acoustic Doppler Velocity) y ADCP (perfilador de corriente acústico Doppler; Acoustic Doppler Current Profiler). La implementación de estas tecnologías basadas en el efecto Doppler (respecto de otras tradicionales como el uso de molinetes) permite obtener velocidades del flujo con mayor precisión, y han significado una mejora sustantiva en las observaciones a partir de una mejor caracterización del flujo, disminuyendo los tiempos operativos y

¹ Tauro et al. (2016). "A novel permanent gauge-cam station for Surface flow observations on the Tiber River". Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems 5.1, págs. 241-251.

favoreciendo las mediciones en cursos particulares. El ADV registra puntualmente series temporales de las tres componentes del vector velocidad del flujo y generalmente se aplica en cauces pequeños (estimación de caudal, caracterización de turbulencia, estudios en capa límite; entre otros usos). El ADCP también permite medir las tres componentes de la velocidad del flujo a través de un perfil, pero se lo utiliza en cauces naturales o artificiales con valores de profundidad mayores.

Las principales técnicas de velocimetría por imágenes, los métodos no intrusivos más desarrollados, son las denominadas velocimetría por imágenes de partículas (PIV, Particle Image Velocimetry), velocimetría por seguimiento de partículas (PTV, Particle Tracking Velocimetry), y su implementación a gran escala (LSPTV y LSPIV, siendo LS en el acrónimo Large Scale). Estas técnicas de medición permiten caracterizar el campo de velocidades de flujos con alta resolución temporal y espacial mediante un análisis en el que se cuantifica el desplazamiento en el flujo de partículas sembradas (trazadores) o de patrones superficiales². El abordaje que realiza PIV es de tipo euleriano (comparando desplazamientos de patrones superficiales o grupos de partículas) y el de PTV es de tipo lagrangiano (donde se sigue a cada partícula/trazador individualmente).

A pesar de que las técnicas de velocimetría por imágenes resultan adecuadas para gran variedad de condiciones de flujo, presentan algunas limitaciones que tienen que ver con las condiciones de luminosidad sobre el curso de agua o las características de los trazadores o las estructuras superficiales, entre otras.

A continuación se presenta el detalle de los equipos y técnicas utilizadas en la campaña de aforos como así también un resumen de sus funcionamientos.

1.1.1. Perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP)³

En la presentes campaña se utilizó un perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP) RS5 fabricado por SonTek. El ADCP provee información batimétrica (profundidad) de la sección y de las velocidades del flujo en tres direcciones ortogonales. Este instrumento mide la velocidad del agua utilizando el principio físico llamado cambio de frecuencia Doppler. Un transductor genera un pulso de sonido a una frecuencia conocida que se propaga a través del agua. Este se refleja en todas las direcciones por las partículas que se encuentran en suspensión (sedimento, materia orgánica, etc.). Una porción de la energía reflejada vuelve hacia el transductor donde es recibida por éste y el ADCP mide el cambio de frecuencia de la señal de retorno (Figura 1.3). Este cambio de frecuencia, medido por cada transductor, se traduce en la velocidad del agua en la dirección radial del mismo.

² Patalano, A., C. M. García y A. Rodríguez (2017). "Rectification of Image Velocity Results (RIVeR): A simple and user-friendly toolbox for large scale water surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV)". Computers & Geosciences 109, págs. 323-330.

³ Adaptado de Heredia, A. (2017). Caracterización del transporte de sedimentos en un tramo del río Tercero (Ctalamochita) utilizando tecnología acústica doppler. Tesis de Maestría.

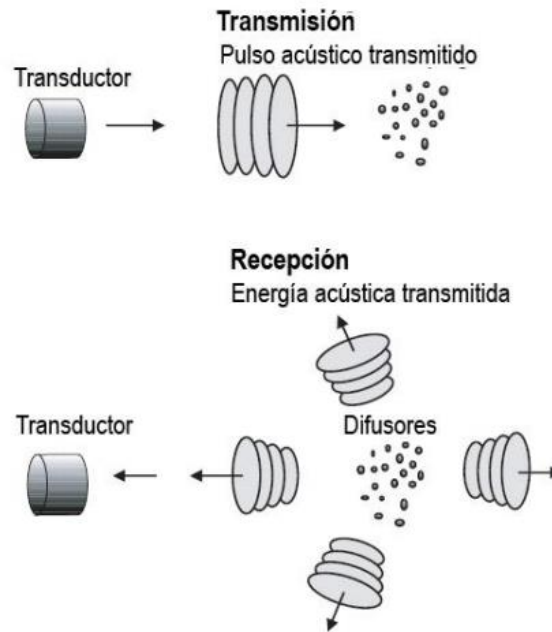


Figura 1.3. Funcionamiento del equipo ADCP⁴.

El ADCP SonTek RS5 tiene un conjunto dual de cuatro sensores inclinados 25° con respecto a la vertical (Figura 1.4) en una configuración denominada “Janus” (mirando en direcciones opuestas) que emiten pulsos acústicos mediante los cuales puede medirse la velocidad en tres direcciones (el sistema de cuatro rayos provee información redundante en una dirección, generalmente la vertical, que permite determinar la calidad de la medición).

Los sensores del ADCP RiverSurveyor RS5 operan con una señal acústica de 3,0 MHz. Este instrumento puede ser comandado desde una computadora personal o bien con un teléfono celular, ambos dispositivos capaces de registrar los datos medidos. Para realizar la medición y visualizar los resultados obtenidos con el ADCP se utiliza el programa computacional llamado RSQ. Este programa permite configurar el instrumento y registra toda la información enviada por el equipo, generando resultados en forma de tablas, gráficos e imágenes, permitiendo además exportar los resultados a otros programas para un análisis más detallado.

Las especificaciones técnicas del ADCP se presentan a continuación:

- Rango de velocidad de flujo a medir: hasta 5,0 m/s (precisión: $\pm 1,0\%$ del valor medido, $\pm 0,002$ m/s)
- Rango de profundidad de trabajo: 0,1 a 6,0 m (resolución 0,005 m)
- 5 Transductores de 3,0 MHz (4 inclinados 25° y un rayo vertical)

⁴ Simpson, M. R. (2001). “Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler”. Open File Report 01-1, United States Geological Survey, Sacramento, California



Figura 1.4. Configuración de los sensores del ADCP RS5 (izquierda) y utilización del equipo en los aforos del presente proyecto (derecha)

2.1.2.1 Incertidumbres en la medición con ADCP

Durante mediciones experimentales hay errores sistemáticos y aleatorios. Los primeros pueden deberse a sesgos en la medición de la velocidad, la profundidad, factores ambientales (como movimiento del fondo), limitaciones del instrumento (zonas no medibles), problemas con el GPS y errores propios del operador.

Todos los procesos presentes durante el muestreo de flujo de campo, como ser ruido ambiental (ondas superficiales, fluctuaciones del flujo, entre otros), ruido del instrumento y la turbulencia del flujo, contribuyen a los errores aleatorios (incertidumbre) de las mediciones de caudal con ADCP desde plataformas móviles.

Durante las mediciones de caudal con ADCP los errores críticos más comunes que pueden observarse son: a) una selección inapropiada o mala configuración de los modos de operación, b) errores de configuración (tales como número insuficiente de celdas en la vertical), c) errores en la comunicación del instrumento con el GPS, d) pérdida apreciable del sistema de monitoreo de fondo, e) errores debido a una alta velocidad de la embarcación y f) excesivo cabeceo o balanceo de la embarcación.

En este proyecto, para la estimación de las incertidumbres, se utilizó el software "QRev"⁵ desarrollado por el USGS (*United States Geological Survey*). Las incertidumbres analizadas por este software incluyen: datos inválidos, caudales extrapolados en las márgenes, fondo móvil y errores sistemáticos.

⁵ <https://hydroacoustics.usgs.gov/movingboat/QRev.shtml>

1.1.2. Metodología LSPIV

La metodología LSPIV de medición de caudales se implementa a partir de la obtención de una videofilmación estática de la superficie de un curso de agua, con una duración de registro suficiente como para obtener parámetros estadísticos representativos que permitan la evaluación del desplazamiento de estructuras de flujo y/o trazadores superficiales. Luego, la selección de fotogramas (o frames por su nombre en inglés) del video con una discretización temporal constante, permite realizar distintos tipos de procesamientos y/o análisis para obtener la velocidad superficial del flujo.

Conocida la batimetría de una sección transversal y con el campo de velocidades en superficie, asumiendo que la distribución de velocidades en la columna de agua presenta una distribución logarítmica estándar, se puede obtener interpolando el perfil en cada punto de la misma. Finalmente, con esta información se puede calcular el caudal total en la sección. En la Figura 1.5 se presenta un esquema simplificado del campo de velocidades superficiales obtenido con LSPIV y los perfiles verticales de velocidad estimados en una sección transversal conocida.

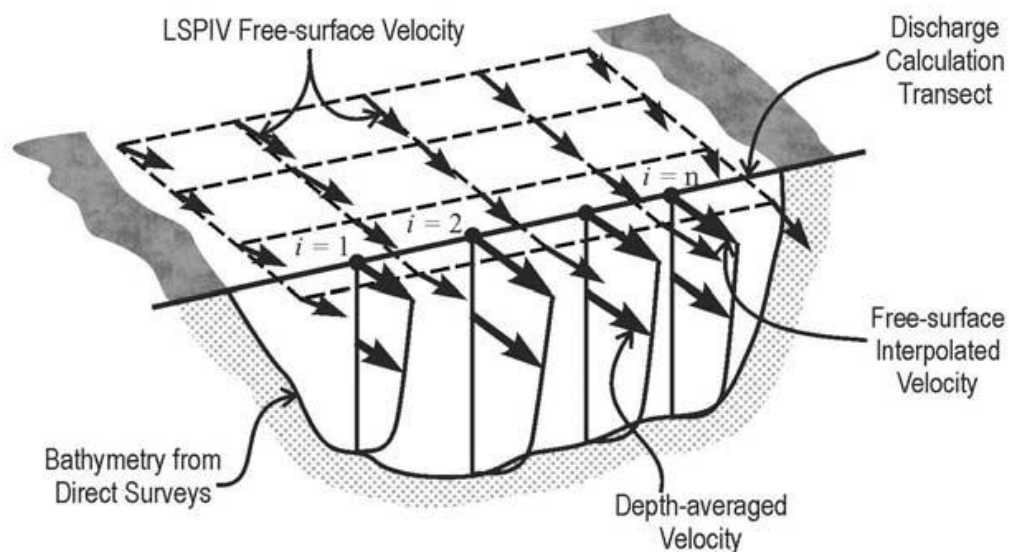


Figura 1.5. LSPIV - Esquema de velocidades superficiales observadas e interpolación en una sección transversal conocida⁶.

La toma de los videos consiste en una etapa fundamental de la aplicación de esta técnica. Las filmaciones pueden ser ocasionales (generalmente de baja calidad) y/o planificadas. Para estas últimas se considera la posibilidad de realizarlas mediante la utilización de cámaras de video fijas (en trípodes o estructuras ad-hoc) o cámaras en VANTs (drones).

Para una correcta aplicación de la técnica LSPIV, en caso de no poder registrar un flujo con patrones de escurrimiento superficiales dinámicos, es necesario contar con trazadores

⁶ Muste, M., I. Fujita y A. Hauet (2008). "Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments". Water Resources Research 44.4.

identificables en la superficie, de lo contrario el cálculo de velocidades no resulta con una adecuada precisión. La selección de trazadores debe realizarse considerando una densidad similar a la del líquido y preferentemente de forma esférica. El movimiento de trazadores muy livianos puede verse afectado por la acción del viento, mientras que trazadores de densidad excesiva pueden hundirse dificultando su detección. Las partículas elegidas deben ser capaces de seguir el movimiento superficial del fluido y de no interrumpirlo.

La estimación de las velocidades superficiales del flujo, en el marco de la etapa de procesamiento de imágenes, resulta posible utilizar una variedad de algoritmos de acuerdo al software que se utilice. En el proyecto se utilizarán dos softwares: RIVER⁷ y Fudaa⁸

En el proceso de cálculo de caudal, dado que la velocidad superficial en un curso de agua resulta representativa de la velocidad promediada en la vertical, resulta necesario determinar el coeficiente α que relaciona a ambos valores (Figura 1.6). Este coeficiente α depende de la forma del perfil vertical de velocidades y de la geometría de la sección (relación de aspecto: ancho sobre radio hidráulico) y además puede verse afectado por los números de Froude y Reynolds y la micro y macro rugosidad de fondo⁹.

Más detalles de esta metodología, junto con varios ejemplos de aplicación, pueden encontrarse en el Informe LHA 01-397-21 “Estado del arte de la medición de caudales utilizando la técnica de velocimetría por imágenes” desarrollado en el marco del presente Convenio.

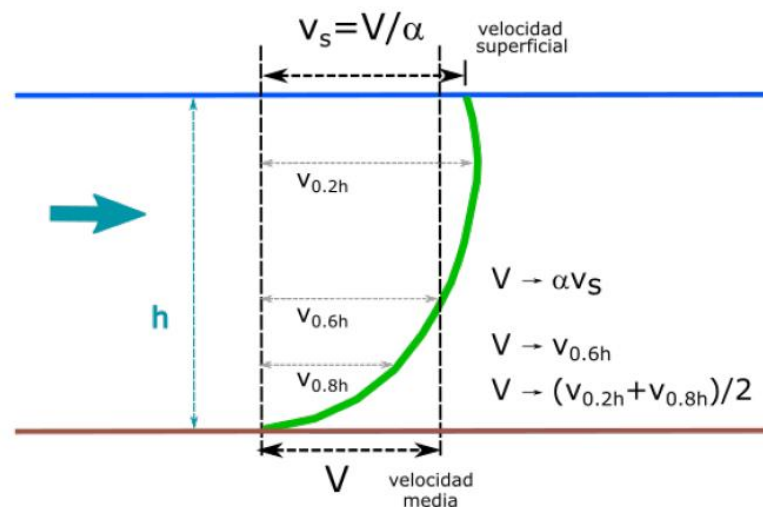


Figura 1.6. Perfil vertical teórico de velocidad.

⁷ Patalano, A., C. M. García y A. Rodríguez (2017). “Rectification of Image Velocity Results (RIVER): A simple and user-friendly toolbox for large scale water surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV)”. Computers & Geosciences 109, págs. 323-330.

⁸ Perks et al. (2020). “Towards harmonisation of image velocimetry techniques for river surface velocity observations”. En: Earth System Science Data 12.3

⁹ Muste, M., I. Fujita y A. Hauet (2008). “Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments”. Water Resources Research 44.4.

2.1.3.1 Incertidumbres en la medición con LSPIV

En la actualidad no existe una metodología normalizada para poder estimar las incertidumbres asociadas a la medición de caudales mediante LSPIV. Avanzar en las incertidumbres de esta técnica es parte de los objetivos del presente convenio entre ACUMAR y el INA.

1.2. Relevamientos topográficos con GNSS Diferencial

Un receptor Global Navigation Satellite System (GNSS), emplea la señal de satélites para localizar su posición. El sistema de referencia respecto al cual se expresa dicha posición es el elipsoide (forma geométrica perfectamente regular) World Geodesic System 1984 (WGS84) y el geode - modelo de superficie del campo de gravedad- GEOIDE-AR16 desarrollado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) que contempla la aproximación más precisa de geode para Argentina.

El sistema GNSS diferencial se basa en emplear simultáneamente dos receptores GNSS, próximos entre sí y por tanto, afectados por los mismos errores. El primero de ellos, o receptor base, estará fijo en un punto de coordenadas perfectamente conocidas para trabajar de forma autónoma tomando datos de posicionamiento segundo a segundo, y el segundo, o receptor móvil, es el que se desplaza a lo largo de la trayectoria del levantamiento o serie de puntos de los cuales se busca conocer su posición. Combinando la información obtenida por ambos receptores, mediante el método diferencial, se obtiene la posición relativa entre ellos y finalmente, las coordenadas reales de las trayectorias realizadas con el GNSS móvil.

Por otra parte, la posición de cada punto puede obtenerse, empleando el sistema Real Time Kinematic (RTK), o bien en modo postproceso mediante el tratamiento posterior con un software de los archivos registrados.

El equipo utilizado es un *GNSS Diferencial Topcon*. Este equipo cuenta con dos receptores satelitales HIPER V con antena incorporada y una controladora con el software *Magnet Field* que permite el manejo de los receptores (Figura 1.7). La conexión entre ambos equipos por radio permite la corrección en tiempo real de los puntos obtenidos, utilizando el sistema RTK con un error menor a 3 cm (vertical y horizontal).

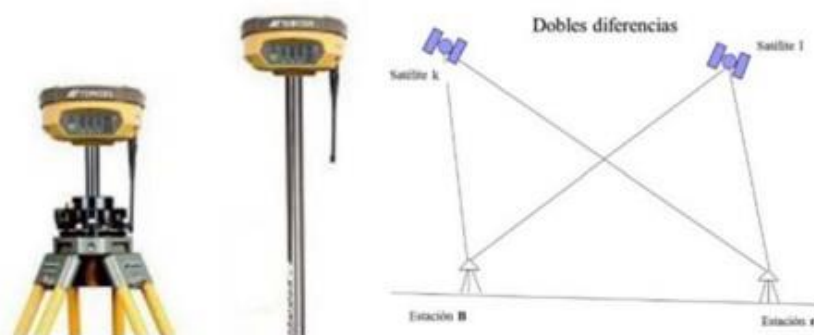


Figura 1.7. GNSS diferencial Topcon Hiper V.

Su funcionamiento consiste en generar posicionamientos de puntos obteniendo datos satelitales de las redes del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) utilizando los satélites del “Global Positioning System” (GPS) de Estados Unidos y su equivalente de Rusia el “Sistema Mundial de Navegación por Satélites” (GLONASS).

El receptor base deberá permanecer en su posición un tiempo determinado en relación con la distancia aproximada en línea recta desde la posición del punto elegido y la estación de la “Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo” (RAMSAC) más cercana. Además, el equipo deberá permanecer midiendo durante todo el tiempo en que se realiza el levantamiento con el receptor móvil.

De acuerdo a la localización del área se trabajó con el modelo GEOIDE-AR16 y en Faja 5 del sistema POSGAR 07 (Posiciones Geocéntricas Argentinas), como el Marco de Referencia Geodésico Nacional.

El postproceso de los datos de la estación base del GNSS Diferencial se lleva a cabo en gabinete con el software *Magnet Tools* asociando los datos de posicionamiento obtenidos, en la modalidad autónoma del dispositivo, con datos de las estaciones RAMSAC disponibles en el sitio web del IGN (www.ign.gob.ar). En todos los casos la estación elegida será la que se encuentre ubicada de forma más cercana a la zona de trabajo. Mediante este proceso se obtienen las coordenadas del punto seleccionado con el receptor base, posteriormente con el mismo software se lleva adelante la corrección de los puntos levantados con el receptor móvil.

1.3. Resumen de actividades y resultados de la campaña de aforos y relevamientos topográficos

El resumen de los resultados de los aforos realizados el día 15 de diciembre de 2022 se presenta en la Tabla 1.1. Los datos informados son: hora del aforo, técnica utilizada, caudal aforado, incertidumbre asociada al caudal aforado, área total de la sección, ancho total de la sección, profundidad media y velocidad media. El detalle del aforo en cada una de las estaciones junto con el registro fotográfico del mismo se puede encontrar en el Anexo A que acompaña este informe.

Tabla 1.1. Resultados de los aforos realizados en la campaña de aforos.

Estación	Hora	Método aforo	Q	Incertidumbre aforo	Área total	Ancho Total	Vel. media	Prof. media
			[m ³ /s]	[%]	[m ²]	[m]	[m/s]	[m]
Sección 01	12:00	ADCP	0,053	14,9	0,53	2,47	0,1	0,22
Sección 02	10:15	ADCP	0,044	11,4	1,08	5,6	0,04	0,19
Sección 03	11:15	LSPIV	0,01	-	0,07	0,9	0,14	0,08

Los resultados obtenidos del relevamiento topográfico se presentan en la Tabla 1.2. Los datos que se muestran en la dicha tabla son las cotas relevadas (en metros IGN) y sus correspondientes incertidumbres.

Tabla 1.2. Resultados de los relevamientos topográficos

Estación		Cota
Nombre	Detalle	[m IGN]
Freatímetro 01	Boca	34,57 ± 0,05
	Terreno	34,26 ± 0,05
Freatímetro 02	Boca	34,26 ± 0,05
	Terreno	33,95 ± 0,05
Freatímetro 03	Boca	33,43 ± 0,05
	Terreno	33,19 ± 0,05
Freatímetro 04	Boca	32,18 ± 0,05
	Terreno	31,86 ± 0,05
Freatímetro 05	Boca	30,45 ± 0,05
	Terreno	30,17 ± 0,05
Freatímetro 06	Boca	33,90 ± 0,05
	Terreno	33,56 ± 0,05
Molino 01	Boca	34,35 ± 0,05
	Terreno	34,07 ± 0,05
Molino 02	Boca	33,83 ± 0,05
	Terreno	33,60 ± 0,05
Molino 03	Boca	No se pudo relevar por interrupción de la señal GPS
	Terreno	34,19 ± 0,05
Molino 04	Terreno	34,33 ± 0,05
A01	Cota lecho	23,56 ± 0,05
	Nivel agua	23,92 ± 0,05
	Cota terreno	25,20 ± 0,05
A02	Cota lecho	25,60 ± 0,05
	Nivel agua	25,91 ± 0,05
	Cota tablero	28,71 ± 0,05

A03	Cota lecho	27,10 ± 0,05
	Nivel agua	27,39 ± 0,05
	Cota tablero	29,39 ± 0,05
A04	Cota lecho	22,11 ± 0,05
	Nivel agua	22,53 ± 0,05
	Cota tablero	28,41 ± 0,05
A05	Cota lecho	21,13 ± 0,05
	Nivel agua	21,33 ± 0,05
	Cota tablero	26,19 ± 0,05

1.4. Conclusiones

Se pudieron realizar los aforos en las 3 secciones previstas con las diferentes técnicas detalladas anteriormente. También se pudieron relevar las cotas topográficas de todos los puntos de interés indicados por la Subgerencia de Servicios Hidrológicos.

En relación a los aforos, los resultados muestran una consistencia en cuanto a la conservación de masa, puesto que el caudal pasante por la sección 01 (0,053 m³/s) se compone principalmente por los aportes de las secciones 02 (0,044 m³/s) y 03 (0,01 m³/s).

Anexo A. Detalle de los aforos de la campaña.

A.1. Sección 01

El aforo en esta estación se realizó el día 15/12/2022. El aforo se realizó con el equipo ADCP RS5. El arroyo Rodríguez presentaba una situación de aguas bajas. Se registraron precipitaciones poco significativas en una estación meteorológica perteneciente a ACUMAR representativa de la zona (ver Figura A.1).

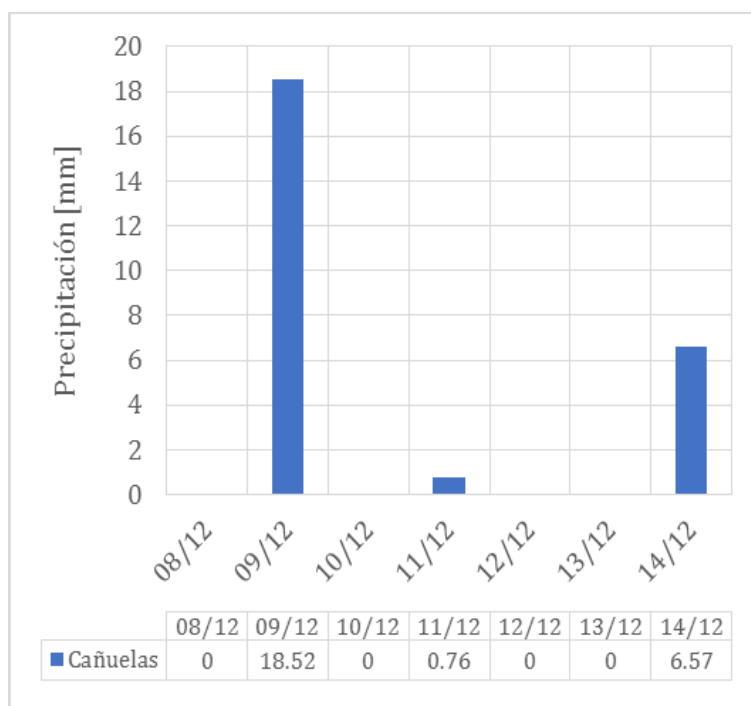


Figura A.1. Precipitaciones en la cuenca en la semana previa al aforo

Aforo con ADCP

El aforo con ADCP (Figura A.2 y Figura A.3) se realizó desde las 11:40 hs hasta las 12:10 hs. Se realizaron 16 pasadas con el equipo obteniéndose un caudal de 0,053 m³/s con una incertidumbre del 14,9%. La distribución de velocidades obtenidas en la sección de aforo se muestra en la Figura A.4.



Figura A.2. Detalle Aforo con ADCP en la Sección 01.



Figura A.3. Aforo con ADCP en la Sección 01.

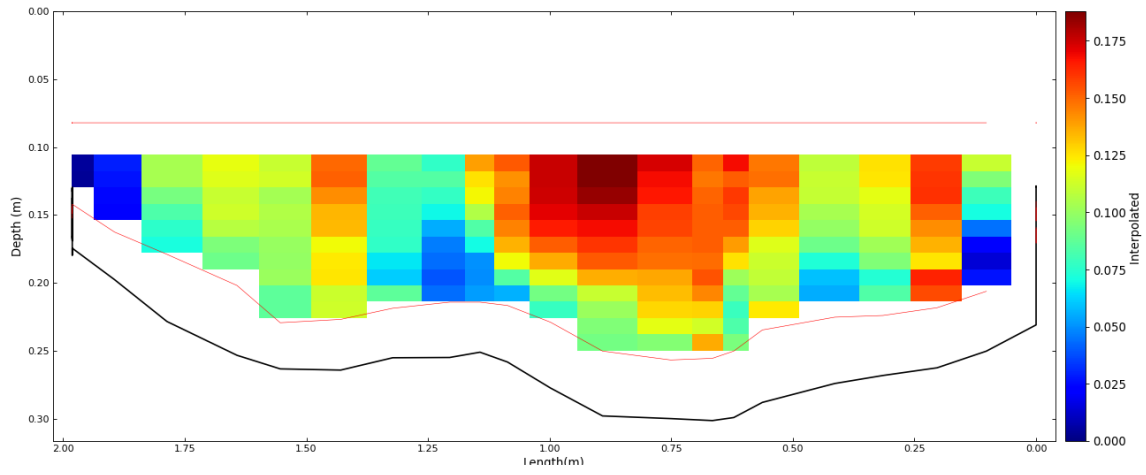


Figura A.4. Distribución de velocidades en la sección de aforo de la Sección 01 obtenida con ADCP.

A.2. Sección 02

El aforo en esta estación se realizó el día 15/12/2020. El aforo se realizó con el equipo ADCP RS5. El arroyo Rodríguez presentaba una situación de aguas bajas. En la Figura A.5 se presentan las precipitaciones registradas en una meteorológica representativa de la zona.

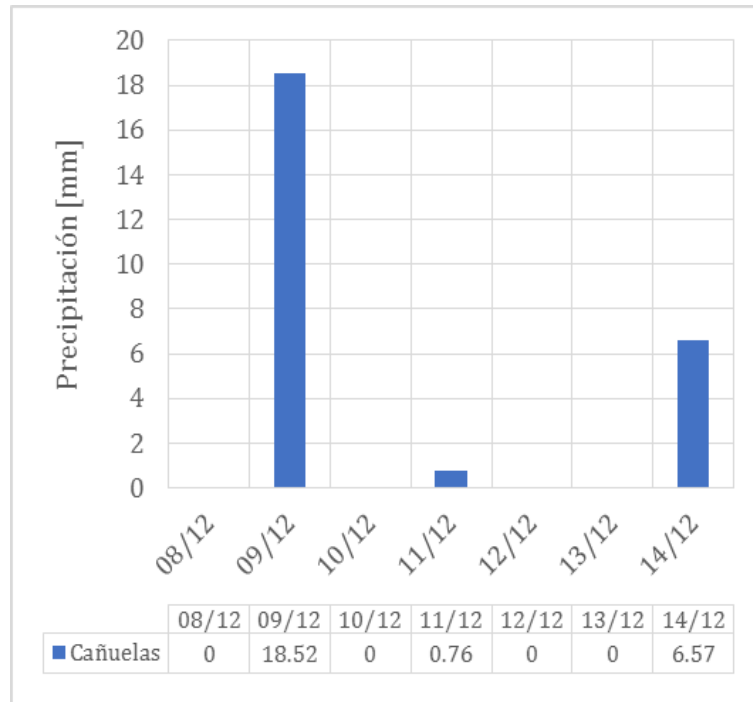


Figura A.5. Precipitaciones en la cuenca en la semana previa al aforo.

Aforo con ADCP.

El aforo con ADCP (ver Figura A.6) se realizó desde las 10:00 hs hasta las 10:30 hs. Se obtuvo un caudal de 0,044 m³/s con una incertidumbre del 11,4% luego de realizar 12 pasadas con el equipo. La distribución de velocidades obtenidas en la sección de aforo se muestra en la Figura A.7.



Figura A.6. Aforo con ADCP en la Sección 02.

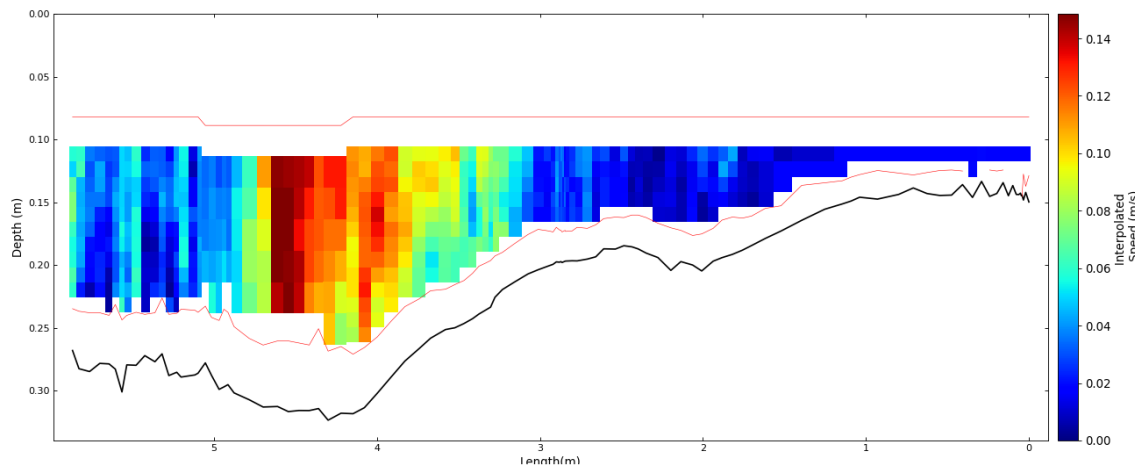


Figura A.7. Distribución de velocidades en la sección 02 obtenida con ADCP.

A.3. Sección 03

El día 21/10/2022 a las 11:45 hs se arribó a esta sección con el objetivo de realizar el aforo correspondiente. Se registraron precipitaciones poco significativas en una estación meteorológica perteneciente a ACUMAR representativa de la zona (ver Figura A.8).

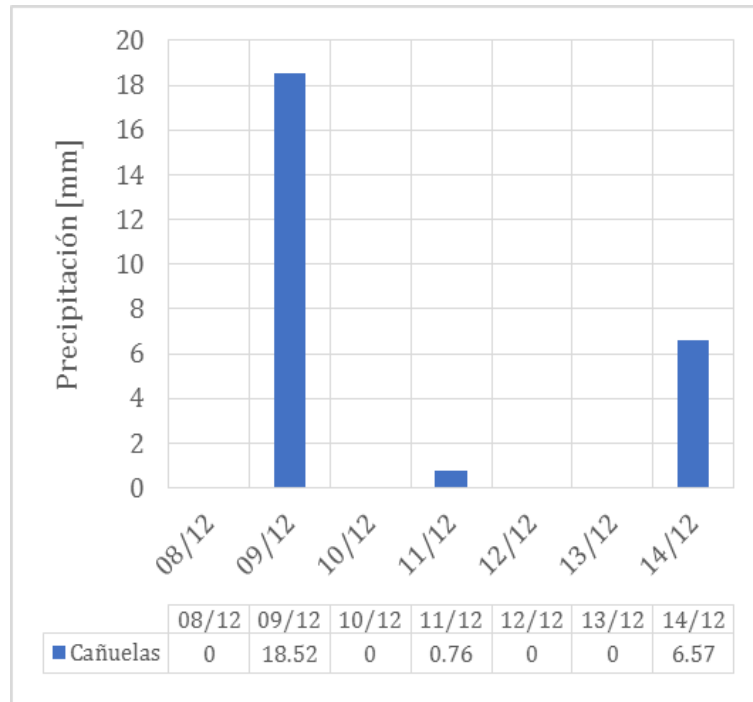


Figura A.8. Precipitaciones en la cuenca en la semana previa al aforo

Aforo mediante la técnica LSPIV

Para implementar la técnica se utilizaron cuatro puntos fijos establecidos en la Campaña (ver Figura A.9). Las distancias entre dichos puntos fueron relevadas en campo. La Figura A.10 muestra el campo de velocidades superficiales obtenido con el software RIVeR, donde las velocidades máximas alcanzan los 0,44 m/s en la sección de aforo. El caudal medio obtenido fue de 0,01 m³/s.

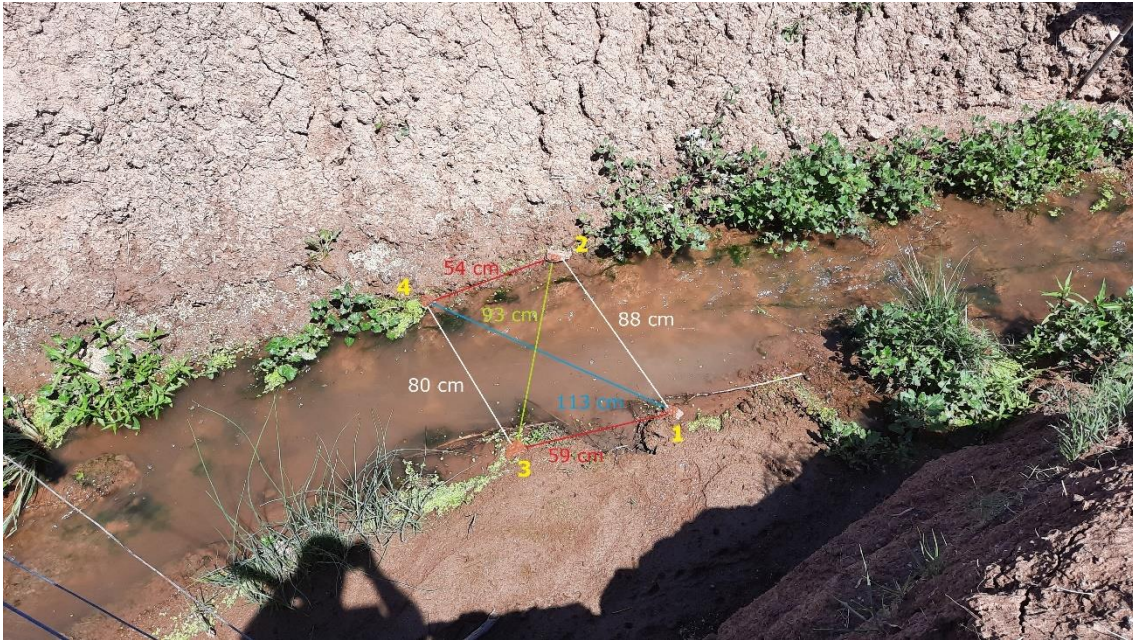


Figura A.9. Distancias de los puntos fijos utilizados para aplicar la técnica LSPIV.

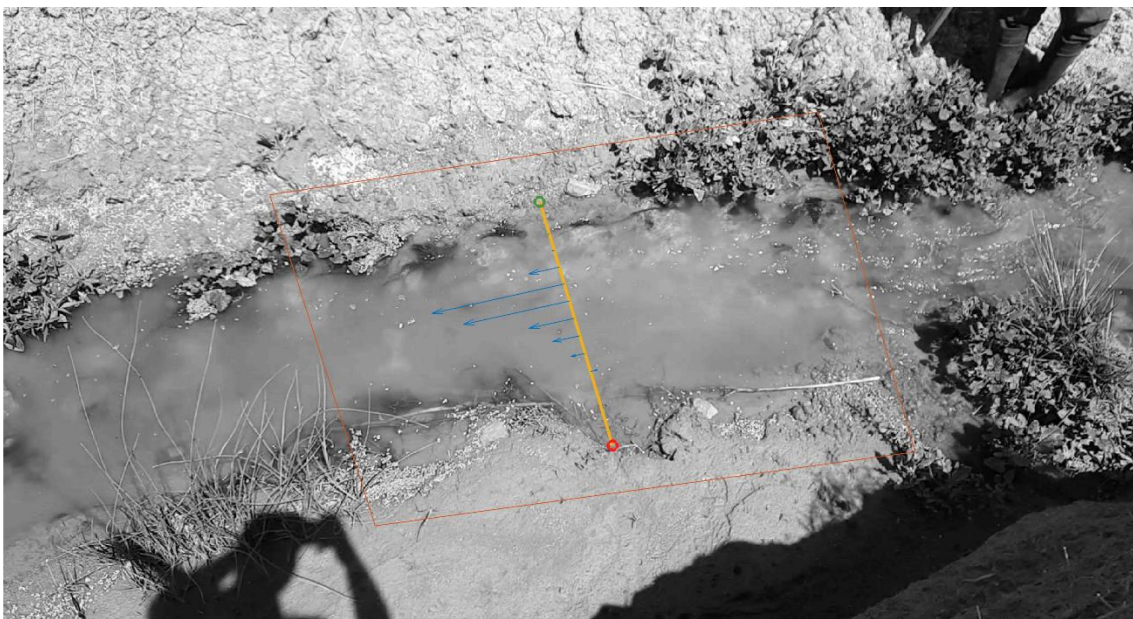


Figura A.10. Campo de velocidades superficiales en la Sección 03 obtenido con el software RIVER.