

cuadernos de ingeniería civil hidráulica

revista de divulgación de trabajos de investigación, ciencia y tecnología, afines a la
ingeniería civil orientación hidráulica

Serie de documentos del Proyecto de investigación:

EVENTOS SEVEROS EN AMBIENTES DE CLIMA SEMIÁRIDO. CASOS DE LA PATAGONIA CENTRAL

CUENCA DEL RIO CHUBUT, Y OTRAS CUENCAS MENORES DE LA MESETA EN LA
REGION CENTRAL DE LA PATAGONIA ARGENTINA



Cuadernos de Ingeniería Civil Hidráulica

**revista de divulgación de trabajos de investigación, ciencia y tecnología,
afines a la ingeniería civil orientación hidráulica**

CD-DICH

Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco

ISSN 1853-8479

Cuadernos de Ingeniería Civil Hidráulica

revista de divulgación de trabajos de investigación, ciencia y tecnología, afines a la
ingeniería civil orientación hidráulica

Volumen 4 No. 1

Año: 2020



Editorial:

CD-DICH , Centro de Documentación del Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica
Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica - Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco

Trelew, Provincia del Chubut, Rep. Argentina – Diciembre 2020

cuadernos de ingeniería civil hidráulica

Editorial:

CD-DICH, Centro de Documentación del Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco
Av. 9 de Julio 25, CP 9100, Trelew, Pcia. del Chubut, Argentina. Tel y fax: +54 0280 4428403
<http://www.unp.edu.ar> - <http://www.dich.edu.ar>

Editores responsables

Juan J. Serra

Gabriel Kaless

Compiladora / Correctora:

María Jesús Chachero

Jefe Departamental (DICH)

Marcelo Ambrosio

Comité editorial (1)

Marcelo Ambrosio

Rodrigo Bastida

Claudia Beccaria

María Jesús Chachero

Carlos Diaz Farias

Sebastian Iglesias

Gabriel Kaless

Héctor A. Malnero

Martín Nozijkoswki

Juan J. Serra

Consejo científico revisor (2)

Erico Bianchi

Laura Brandizi

Leda Cotti de la Lastra

Hugo J. Donini

Sandra Fernández

Silvia Flaherty

Federico Horne

Ana Liberoff

Lucca Mao

Tomás Olivier

José Paredes

Natalia Pessacg

Lorenzo Picco

Gabriela Polla

José Sainz Trápaga

Julio Stampone

- Marcelo J. Ambrosio** Ingeniero Químico (UN Litoral, 1980), Magister en Ingeniería Sanitaria y Ambiental (Universidad de Cantabria, España). Jefe del Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica. Profesor Asociado de Ingeniería Sanitaria y de Termodinámica Básica (UNPSJB).
- Rodrigo Bastida** Ingeniero Civil con Orientación en Hidráulica (UNPSJB, 2017), Master Universitario en Costas y Puertos (Universidad de Cantabria, España, 2020). Auxiliar en las asignaturas de Hidráulica I y II (UNPSJB).
- Claudia Beccaria** Ingeniera Hidráulica (UNPSJB, 2000) Profesora Adjunta en la Cátedra de Ingreso, JTP en Analisis Matemático II, en Aprovechamientos Hidráulicos y Construcciones Hidráulica (UNPSJB); Auxiliar de 1ra en Proyecto de Ingeniería Civil – Orientación Hidráulica.
- María Jesús Chachero** Ingeniero Hidráulico (UN La Plata, 1980), Ingeniero Civil (UN La Plata, 1982), Master en regadíos (CEDEX, España, 1995), Master en Hidrología General y Aplicada (CEDEX, España, 1996). JTP de Hidrología y de Hidráulica Agrícola y Fluvial. Profesor Adjunto de Hidráulica II (UNPSJB).
- Carlos N. Diaz Farias** Ingeniero Civil – Hidráulico (UNSJ, 1995), Master en Ingeniería de Regadíos (CEDEX Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Madrid, España, 2000). J.T.P de Construcciones Hidráulicas y Construcciones Hidráulicas Especiales. J.T.P. Hidráulica I-II -Suplente (UNPSJB).
- Sebastian Iglesias** Ingeniero Civil con Orientación en Hidráulica (UNPSJB, 2016). Master en Ingeniería Civil – Track Ingeniería Hidráulica (Universidad Tecnológica de Delft, Países Bajos, 2022). JTP de las asignaturas de Hidráulica I y II (UNPSJB).
- Gabriel Kaless** Ingeniero Hidráulico (UNPSJB, 2001), Ingeniero Civil (UNPSJB, 2001), Master en Difensa e Manutenzione del Territorio (Università degli studi dei Padova, Italia, 2006). Doctor en Hidronomía Ambiental (Università degli studi dei Padova, Italia, 2013). Profesor Adjunto de Hidráulica I y JTP de Hidráulica II. (UNPSJB) (2).
- Héctor A. Malnero** Ingeniero Hidráulico (UNPSJB, 1989), Ingeniero Civil (UNPSJB, 1989). JTP de Aprovechamientos Hidráulicos, Profesor Titular de Elasticidad y Estabilidad III. (UNPSJB).
- Martín Nozijkowski** Ingeniero Hidráulico (UNPSJB, 2003), Master en Diseño, Gestión y Dirección de Proyectos (Universidad de León, España, 2012). Profesor Adjunto de Proyecto de Ingeniería Civil (Proyecto III) y de Ingeniería Económica y Organización de Obras.(UNPSJB).
- Juan J. Serra** Ingeniero en Recursos Hídricos (UN Litoral, 1978), Magister en Recursos Hídricos en Zona de Llanura (2003). Doctor en Ingeniería, UN Rosario (2007). Profesor titular de Hidrología, y de Hidráulica Agrícola y Fluvial (UNPSJB). Graduado en Alta Formación de Cuadros Dirigentes de los Países del MERCOSUR”, Area Ciencia y Tecnología. Mercosur - Università di RomaMercosur - Università di Roma (2007).
- Erico Bianchi** Lic. en Geología (UN de La Plata, 1998), Lic. en Geología (Univesitat d' Barcelona, España, 2007), Diplomado en Gestión del Agua en el Sector Minero (UN de Lima, Perú, 2012), Especialista en Contaminación de Aguas Subterráneas (UNPSJB, UNCOMA, UNPA, 2018), Ex-profesor adjunto de Geología Aplicada (UNPSJB, 2016-2019).
- Lura D. Brandizi** Ingeniera Civil con Orientación en Hidráulica (UN del Sur, 2007). Doctora en Ingeniería (UN del Sur, 2013). Diplomatura en Gestión inteligente del Agua (Columbia Water Center, Abril 2020). Profesora Adjunta en las cátedras de Hidrología y Física I (UNPSJB), colaboradora en la cátedra de Hidráulica Agrícola y Fluvial.
- Hugo J. Donini** Ingeniero Hidráulico (UNPSJB, 2000), Ingeniero Civil (UNPSJB, 2002). Profesor Adjunto de Puertos y Vías Navegables, Fundaciones Especiales y Programación Básica y Métodos Numéricos. JTP de Hormigón I y II (UNPSJB)
- Sandra N. Fernández** Doctora en Ingeniería de la Universidad Politécnica de Madrid, docente del Área de Hidráulica del Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur, en las Cátedras de Hidráulica General e Hidráulica Fluvial y además, Investigador Asociado con la categoría equivalente a Adjunto sin Director de la Comisión de Investigaciones Científicas. Se la puede contactar en la dirección electrónica: <sfernand@uns.edu.ar>.
- Silvia Flaherty** Lic. En Meteorología (Universidad de Buenos Aires, 1996). Doctorado y Maestría con especialización en sensores remotos y sistemas de información geográfica (University of Edinburgh y Dundee University, Escocia, 2013 y 2006, respectivamente). Profesora adjunta en la FHycS de la UNPSJB, cátedras

- Fotointerpretación y Teledetección (sede Comodoro Rivadavia), Ambiente Natural 2 y Sistemas de Información Geográfica 2 (sede Trelew).
- Federico Horne** PhD in Civil & Environmental Engineering (Univ. of California, Davis, USA). Master Scientiae en Planificación de los Recursos Hidráulicos, (CIDIAT, ULA, Venezuela). Ing. Agronomo especialista en suelos y agua (Univ. Nac. del Sur, Bahía Blanca, Argentina).
- Profesor Titular Regular Área de Recursos Hídricos Universidad Nacional del Comahue (UNCo). Director Instituto de Tierras, Agua y Medio Ambiente, (ITAMA, UNCo). Director del Programa de Postgrado en Ciencias Hídricas, PCH (UNCo, UNPSJB, UNPA)**
- Ana Laura Liberoff** Lic. en Ciencias Biológicas (UNPSJB, 2008), Doctora en Ciencias Biológicas (UNC, 2013), Auxiliar de primera Química General de la Licenciatura en Ciencias Biológicas (UNPSJB, Sede Puerto Madryn).
- Lucca Mao** Ingeniero Forestal (Università degli Studi di Padova, Italia, 2000), Doctor en Hidronomía Ambiental (Università degli Studi di Padova, Italia, 2005). Profesor Asociado en Geografía Física en la University of Lincoln (UK).
- Tomás Olivier** Lic. en Ciencia Política (Universidad Católica de Córdoba, 2011). Master en Gobierno y Políticas Públicas (Universidad de Arizona, Estados Unidos, 2014). Doctor en Gobierno y Políticas Públicas (Universidad de Arizona, Estados Unidos, 2017). Profesor Asistente en la Escuela de Administración Pública de la Florida Atlantic University, en Florida, Estados Unidos.
- José Matildo Paredes** Geólogo (UNPSJB, 1999) y Doctor en Geología, especialidad Estratigrafía (Universidad de Barcelona, España, 2003). Profesor Titular de Sedimentología del Depto. Geología, FCNyCS (UNPSJB).
- Natalia Pessacg** Licenciada y Doctora en Ciencias de la Atmósfera (Universidad de Buenos Aires, 2008 y 2013; respectivamente). JTP de Sistema Climático, UNPSJB.
- Lorenzo Picco** Ingeniero Forestal y Ambiental (Università degli Studi di Padova, Italia, 2006), Doctor en Hidronomía Ambiental (Università degli Studi di Padova, Italia, 2010). Profesor Asociado de Mountain River Morphology and Restoration; rural Landscape Conservation and Watershed Management; Applicazioni GIS in Agricoltura; Basic Statistics (Dip. TESAF, Università degli Studi di Padova, Italia).
- Gabriela Polla** Ing. en Recursos Hídricos. Magister en Planificación y Manejo de Cuencas Hidrográficas. Doctora en Agronomía. Asistente de Docencia Regular de las cátedras de Hidráulica e Hidrología Agrícola e Ingeniería de los Recursos Hidráulicos (Facultad de Ciencias Agrarias, UNCo). Coordinadora Académica de la Especialización en Calidad de Aguas Superficiales (Postgrado Interdisciplinario UNCo-UNPSJB-UNPA).
- José M. Sainz Trápaga** Ingeniero Civil (UBA, 1982). Master en Gestión y Auditorías Ambientales, (Universidad de León, España, 2011). Profesor titular de Aprovechamientos Hidráulicos, de Construcciones Hidráulicas y de Construcciones Hidráulicas Especiales (UNPSJB).
- Julio Stampone** Licenciado en Geología (UNLP, 1971). Especialidad laboral en minería, hidrogeología, estudios ambientales. Cargos actuales. Profesor Titular Cátedras Geología General. Suelos e Hidrología, Geología y Geomorfología. FCNyCS – UNPSJB.

© Derechos reservados.

“cuadernos de ingeniería civil hidráulica” es una publicación científico técnica seriada, para la difusión de trabajos de investigación, ciencia y tecnología afines a la disciplina de la ingeniería civil en general, y la orientación hidráulica en particular.

Editado en Trelew, Provincia del Chubut, Rep. Argentina, Diciembre de 2020



cuadernos de ingeniería civil hidráulica

Volumen 4 Número 1 – Año 2020

EDICIÓN ESPECIAL: DOCUMENTOS DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE

EVENTOS SEVEROS EN AMBIENTES DE CLIMA SEMIÁRIDO. CASOS DE LA PATAGONIA CENTRAL (*)

CUENCA DEL RIO CHUBUT, Y OTRAS CUENCAS MENORES DE LA MESETA EN LA REGIÓN CENTRAL
DE LA PATAGONIA ARGENTINA

Departamento de ingeniería civil hidráulica (DICH)

Jefe de Departamento

Marcelo Ambrosio

Editores responsables:

Juan Serra

Gabriel Kaless

Compilación/ Corrección:

María Jesús Chachero

Autores:

Mag. Marcelo J. Ambrosio

Ing. Ana Ayestarán

Ing. Rodrigo Bastida

Lic. Érico Bianchi

Dra. Lura Brandizi

Mag. María Jesús Chachero

Ing. Paula De Pablo

Lic. Alicia González

Lic. Daniel González

Ing. Sebastián Iglesias

Ing. Ricardo Ingaramo

Dr. Gabriel Kaless

Ing. Andrés Malnero

Mag. Martín Nozijkowski

Dr. Juan Serra

Ing. Juan Carlos Walker

Ing. Dante Zappellini

Revisores de esta edición:

Mg. José M. Sainz Trápaga

Ing. Héctor A. Malnero

Mag. Ing. María Jesús Chachero

(*) Selección de documentos producidos por el Proyecto de Investigación “PI 1226: *Productos para la planificación y gestión integrada de los recursos hídricos*”, Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNPSJB, 2014-2017.

Es una publicación del CD-DICH, Centro de Documentación del Departamento de Ingeniería Civil (Orientación Hidráulica) de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.



Editor responsable: Juan Serra

juanjoserra@hotmail.com

4ta. Edición (Diciembre de 2020) - Cantidad de ejemplares: 200

ISSN: 1853-8479

© CD-DICH (2011). Av. 9 de Julio 25, CP 9100, Trelew-Pcia. del Chubut,
Rep. Argentina. Edición argentina. Derechos reservados.

ÍNDICE

DOCUMENTOS DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:

EVENTOS SEVEROS EN AMBIENTES DE CLIMA SEMIÁRIDO. CASOS DE LA PATAGONIA CENTRAL CUENCA DEL RIO CHUBUT, Y OTRAS CUENCAS MENORES DE LA MESETA EN LA REGIÓN CENTRAL DE LA PATAGONIA ARGENTINA

- **Presentación: compendio temporal de investigaciones en cuencas y sistemas hidrológicos mixtos regionales**
Juan Serra 3
- **Tras las huellas de las crecidas extraordinarias en la patagonia semiárida (argentina): tipologías de improntas, modelo teórico y resultados preliminares**
Gabriel Kaless, Diego E. Walker y Héctor A. Malnero 39
- **Estimación del caudal máximo de inundaciones históricas en arroyos efímeros. casos de la patagonia semiárida (Argentina)**
Kaless Gabriel, Bastida Rodrigo, Iglesias Sebastián, Belcaro Franco, Villar Milton, Brandizi Laura, Días Farías Carlos, Rubinich Queupan Mayra, Bianchi Érico, Dante Zappellini, Juan José Serra 69
- **Aplicación de la geología a la producción de escorrentías: caso de estudio, cuenca hidrográfica del arroyo perdido, patagonia, argentina**
Érico Hernán Bianchi y Dante Zappellini 91

COMPENDIO TEMPORAL DE INVESTIGACIONES EN CUENCAS Y SISTEMAS HIDROLÓGICOS MIXTOS REGIONALES

Serra, Juan
Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco
juanjoseserra@hotmail.com

RESUMEN

Este compendio trató sobre la línea de investigación y su evolución temporal en el área hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica, y su evolución temporal, con foco en temáticas de cuencas y sistemas hidrológicos mixtos regionales de la región central de la Patagonia.

En orden cronológico se describieron ocho proyectos de investigación continuos, desde 1985 a 2018, donde intervinieron un mismo grupo focal, más distintos investigadores y auxiliares de investigación, en sus distintas etapas.

El trabajo reunió para cada proyecto un detalle de los temas tratados, los investigadores participantes, y la producción científica más relevante en materia de publicaciones y presentaciones en eventos de ciencia y técnica.

Palabras Clave: recursos hídricos, Patagonia, cuencas hídricas.

ABSTRACT

This compendium dealt with the line of research and its temporal evolution in the hydraulic area of the Department of Civil-Hydraulic Engineering, and its temporal evolution, with a focus on basin issues and mixed hydrological systems in the central region of Patagonia.

In chronological order, eight continuous research projects were described, from 1985 to 2018, where the same focus group, plus different researchers and research assistants, participated in their different stages.

The work gathered for each project a detail of the topics covered, the participating researchers, and the most relevant scientific production in terms of publications and presentations at science and technology events.

Keywords: water resources, Patagonia, water basins.

RESEÑA

El Departamento de Ingeniería Civil-Hidráulica (DICH) de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, fue creado en 1992, en el ámbito de las carreras de entonces de Ingeniería Hidráulica y de Ingeniería Civil (hoy Ingeniería Civil Orientación Hidráulica).

Simultáneamente a su creación y conjuntamente con su actividad docente y académica se integraron grupos de investigación y de servicios tecnológicos asociados, con un fuerte sesgo hacia temas aplicados y de demanda regional. Dos grupos destacan en su inicio por su temática: las actividades de investigación y servicios de laboratorio impulsadas desde el Laboratorio de Investigaciones y Ensayos Viales (LABIEVI), por un lado. Y por el otro, las disciplinarias del área de “hidráulica” en la que convergen investigadores de cátedras de Hidráulica, Hidrología e Hidráulica Agrícola y Fluvial, Aprovechamientos Hidráulicos, Construcciones Hidráulicas, y otras asignaturas afines, con foco en temáticas de hidrología e hidráulica en la cuenca inferior del Río Chubut, y en pequeños “cañadones” torrenciales que en ocurrencia de tormentas descargan desde “la meseta” hacia su cauce principal, en muchos casos drenando por barrios urbanos de las ciudades del Valle Inferior (VIRCh). Sin perjuicio de enfocar ocasionalmente otras cuencas de la región cordillerana, de la meseta, o del valle.

En esta segunda línea de investigación –al que refiere esta reseña–, un grupo de docentes comienza a interactuar en investigaciones aplicadas, referidas a problemáticas de sistemas hidrológicos regionales, y paralelamente, integrada con prestaciones de servicios de ingeniería de distinta complejidad técnica.

Los sucesivos proyectos fueron tratando otros problemas, tanto de áreas urbanas del VIRCh (Trelew, Rawson, Gaiman, Dolavon, 28 de Julio), Puerto Madryn, como cordilleranas (Esquel, Trevelin, El Hoyo, Lago Puelo, Epuyén, Corcovado), y el sur de la Provincia (Comodoro Rivadavia, Sarmiento, Rio Mayo, Rio Senguer, entre otros). Así también, los proyectos fueron contribuyendo a soluciones en áreas suburbanas, rurales, o propiamente de la meseta como suele referirse en términos coloquiales en nuestra zona a una enorme extensión central de la Provincia del Chubut.

1985-PI38: primeras investigaciones

El núcleo base de investigadores se conformó inicialmente en 1985 con el “*Proyecto de Investigación y Desarrollo de Técnica Hídricas de Manejo y Control del VIRCh, SCyT, UNPSJB, 1986-90*”, del Consejo de Investigaciones (CIUNPAT) de nuestra Universidad. (Director: Juan Serra. Investigadores: Gustavo Ichazo, Felipe Clérico, José Sainz Trápaga, Héctor Andrés Malnero, Teddy Villegas. Alumnos: Mabel Jones, Héctor Castillo).

El trabajo se dirigió a recopilar y procesar información, y producir informes de estadística hidrológica aplicada, caracterizar conceptualmente la problemática hídrica del VIRCh (Serra, 1987), reelaborar un modelo matemático de transformación lluvia-caudal diseñado y adecuado para pequeñas cuencas típicas de la meseta semiárida patagónica. Este primer modelo hidrológico fue basado en la estructura computacional del modelo denominado “Gaiman”, programado en el antiguo lenguaje BASIC para los primeros ordenadores PC XT, y producido por el mismo autor en los años ’80 en la ex. Dirección General de Estudios y Proyectos, MESOP, Provincia del Chubut. El modelo fue aplicado entonces al cálculo hidrológico de crecidas máximas en pequeños ambientes torrenciales,

típico de cañadones de meseta, y su nombre refiere al primer tema estudiado, el Cañadón “Baraibar” en la ciudad de Gaiman (Serra y Clérici, 1989; Serra et al., 1987).

Cabe mencionar que las tecnologías de la época incorporaban como novedad los primeros ordenadores personales –siendo uno de los primeros en el ámbito universitario-, los estudios requerían una fuerte componente de reconocimientos expeditivos y salidas a campo,. Para la cartografía era usual utilizar las “cartas” del IGM, mapas y planos de relevamientos locales o regionales, y fundamentalmente la interpretación de fotografías aéreas donde ello era posible, y en la escala entonces disponible. Se destaca acá el mapa geomorfológico de la región del VIRCh, basado en fotointerpretación, producido por el Lic. Gustavo Ichazo, y que fuera la base cartográfica más importante y actualizada para la interpretación de cuencas, y en particular de sistemas torrenciales que afectan a las ciudades del VIRCh (Ichazo y Castillo, 1988; Ichazo, 1989).

Entre los desarrollos y resultados de este proyecto se destacó el modelo de simulación de “Operación de Embalse Florentino Ameghino bajo severas restricciones por capacidad de conducción del cauce en el Valle Inferior del Río Chubut” (Sainz Trápaga y Malnero, 1988; Sainz Trápaga y Malnero, 1990), que formuló el desarrollo computacional de 4 modelos diferentes de simulación, incluidos programación dinámica, cota objetivo simple y doble, para enfocar finalmente en el algoritmo de “tipo cota objetivo doble”, aplicado por la Ex Agua y Energía Eléctrica de la Nación en distintos aprovechamientos hidráulicos. La modelación lograda y sus resultados permitieron inferir comportamientos esperados de “fallas” por caudal máximo, por caudal mínimo, y por cota mínima admitida, considerando como entradas la serie histórica de caudales medios mensuales ingresados al embalse, medidos en la sección hidrométrica de Los Altares.

Los resultados y conclusiones de esta simulación fueron categóricos, y demostraron dificultades para la operación del embalse en crecidas extraordinarias bajo las nuevas consignas de operación de embalse fijadas con la privatización de la central hidroeléctrica, en tanto en tales condiciones, resultan probables la ocurrencia de grandes caudales con consecuentes desbordes en el curso del Río Chubut aguas abajo del Dique, por períodos de tiempo prolongados. Así como también se verificaban, fallas por caudal mínimo y fallas por cota mínima (corridas cronológicas con la serie real de datos históricos).

1992-PI138: continuidad en la línea de investigación

Esta línea investigativa continúa con en el “Proyecto de Investigación Estimación de Crecidas en el Valle Inferior del Río Chubut”, SCyT, UNPSJB, 1992-95”. (Director: Juan Serra. Investigadores: María Jesús Chachero, Héctor Andrés Malnero, José Sainz Trápaga, Teddy Villegas. Alumnos: Sergio Ferrarías, Marcelo Bulacio).

En este Proyecto de Investigación (PI) se trataron temas como estadística hidrológica aplicada en la cuenca media del Río Chubut (Serra, 1994a), e investigaciones estadísticas de precipitaciones en el VIRCh. El estudio de precipitaciones valletano se realizó sobre la base de un primer trabajo previo que realizara el Ing. Osvaldo Vicenty, en la ex-Dirección General de Estudios y Proyectos (Vicenty-1982). En una revisión metodológica y ampliación muestral de datos pluviográficos se procesaron y publicaron resultados de nuevas funciones de ajuste de *intensidad-duración-recurrencia* de lluvias, y en particular para la *precipitación máxima diaria anual* en Trelew. El estudio combinó datos actualizados obtenidos de INTA (fajas pluviográficas) y del SMN (registros diarios Aeropuerto Trelew) (Villegas et. al., 1994). El proyecto desarrolló además una

modelación lluvia-caudal, de tipo agregado (modelo <VIRCH>), para las 32 cuencas aluvionales identificadas entre el Dique Florentino Ameghino y Boca Toma (Cañadones), y su propagación de onda de crecida por el cauce del valle inferior (Serra, TI, 1994; Serra y Chachero, TII, 1994). Este modelo permitió simular los caudales entrantes del Río Chubut (como salidas erogadas desde el Dique Florentino Ameghino), los hidrogramas de cada una las 32 cuencas aluvionales identificadas, el hidrograma final a la altura del paraje del Azud de Boca Toma, y su propagación esperada aguas abajo hasta la desembocadura, pasando por las áreas urbanas de 28 de Julio, Dolavon, Gaiman, Trelew y Rawson.

En similar línea de investigación del PI 38, se continuó analizando la operación del embalse F. Ameghino y el estudio de crecidas de embalse (Malnero, 1994; Malnero y Serra, 1994; Serra y Chachero, 1993; Serra et. al., 1995). Se menciona además la simulación hidrológica de un sector de planicie entre cordones litorales, al norte de Rawson, para el pre-dimensionamiento de drenajes pluviales urbanos (Serra, 1994b).

1996 PI194: el área aluvional entre el Dique Ameghino y Boca Toma

En un nuevo proyecto, el foco de investigación estuvo puesto en un área particular del VIRCh, titulado “*Ordenación del Cuenco Aluvional Área Dique-Boca Toma y su Impacto Ambiental en el Valle Inferior del Río Chubut*”, SCyT, UNPSJB, 1996-98”. (Director: Juan Serra. Investigadores: María Jesús Chachero, Héctor Andrés Malnero, José M. Sainz Trápaga, Alejandro Sorondo, Teddy Villegas. Alumnos: Javier Ban, Christian Davies Sala).

El vertiginoso ritmo de crecimiento tecnológico informático incorporó nuevas herramientas y aplicaciones informáticas, software específico de ingeniería hidrológica e hidráulica, procesamiento de imágenes satelitales (LANDSAT TM), e incursionando en la modelación hidrológica distribuida, de pixel o celda, con productos en 2D y cuasi-3D. Se citan por caso la modelación hidrológica de crecidas del Cañadón Baraibar, en Gaiman (Ban y Davies Sala, 1995), y el modelo <VIRCh> fue perfeccionado en lenguaje VisualBasic, con las mismas funcionalidades y una plataforma de entradas y salidas más “amigable” para las corridas de rutina.

Entre las metas propuestas se estableció desarrollar los modelos matemáticos de aplicación al plan de evaluación integrada de erosión hídrica en el cuenco aluvional y su impacto en el medio ambiente físico del Valle Inferior del Río Chubut.

Modelación hidrológica lluvia-caudal del área aluvional del VIRCh

Estas aplicaciones tecnológicas, y los desarrollos de modelos de simulación propios del proyecto, facilitaron la identificación de cuencas torrenciales (16 con vertido sobre la margen derecha del Río Chubut y otras 16 cuencas sobre la margen izquierda, y sus subcuencos, divisorias de aguas, red de drenaje, puntos de síntesis (Fig. 1).

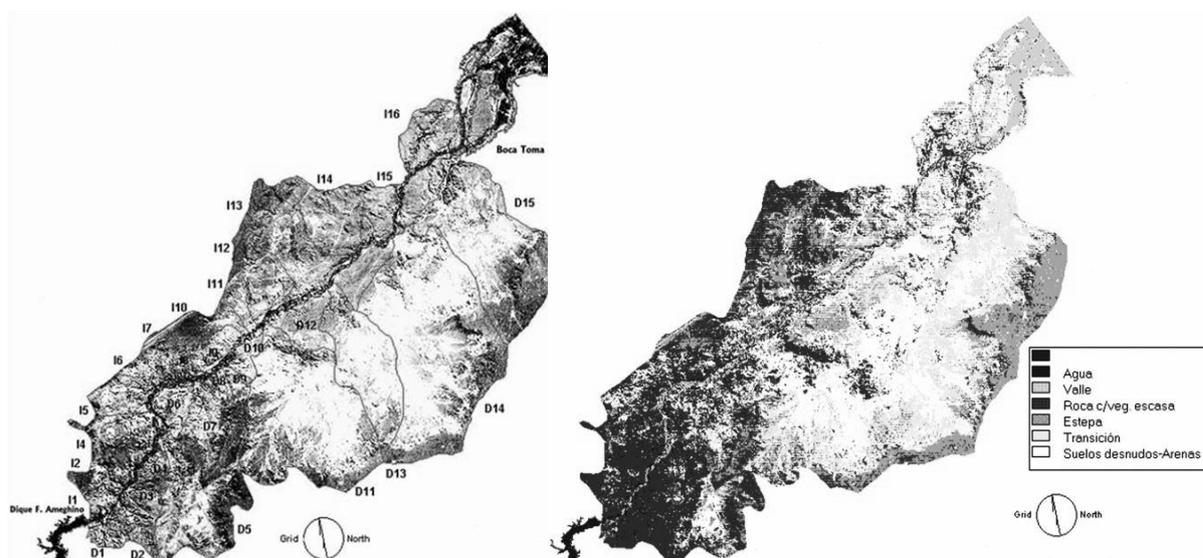


Fig. 1: 1995, Identificación de cuencas aluvionales (izquierda) y clasificación de cobertura superficial, en el área Dique F. Ameghino – Boca Toma, VIRCh (derecha)

Simultáneamente se desarrolló una modelación hidrológica de *lluvia-caudal*, de tipo agregado, que permitió simular los caudales entrantes del Río Chubut (salidas desde el Dique Florentino Ameghino), los hidrogramas máximos de los 32 cuencos aluvionales que descargan sobre el cauce principal, el hidrograma final a la altura del paraje del Azud de Boca Toma, y su propagación esperada aguas abajo hasta la altura de Rawson.

Modelo de erosión hídrica USLE-MUSLE, cuenco aluvional VIRCh

Este apartado tuvo por objeto cualificar y cuantificar -en el orden de magnitud acorde a la metodología e información disponible-, el proceso de erosión hídrica en la cuenca aluvional del VIRCh, la acción natural y antrópica, formular el abanico de soluciones técnicas posibles que permitan un mejor control de crecidas aluvionales, de disminución del proceso erosivo y de atrofiamiento del Río Chubut en su tramo inferior. "

Comprendió el desarrollo computacional (VisualBasic) del modelo conocido como USLE, modificado para la evaluación de la pérdida de suelo o erosión en la cuenca de recepción, a partir de distintos estimadores conocidos como Factores "R" o factor de lluvia, "LS" o factor topográfico, "K" o factor de erosionabilidad, y "CP" o factor de cultivo (Serra, 1997).

Este modelo, obtenido a partir de la ecuación universal de pérdida de suelos es diseñado como herramienta de cálculo en el Plan Integral de Evaluación Hídrica y su Impacto Ambiental.

Sobre esta base de modelación USLE, se programó (VisualBasic) y aplicó el modelo conocido como MUSLE que permite evaluar la erosión en cuencas hidrográficas, con ayuda del modelo de transporte de Williams, y su estimador o coeficiente "B". Estos desarrollos y sus resultados fueron publicados en la revista Cuadernos del Curiam, UNR (Serra, 1999).

Con apoyo de tecnología GIS IDRISI e imágenes satelitales LND SAT TM7, cartografía existente, y los modelos referidos (VIRCH, USLE, MUSLE), se elaboró un "Plan Integral de Evaluación de Erosión Hídrica y su Impacto Físico Ambiental en el VIRCh".

Entre la producción de publicaciones y documentos relacionados se citan comparación de métodos para la estimación de la evapotranspiración (Chachero y Sorondo, 1996),

actualización de las ecuaciones de tormenta en el VIRCh (Chachero, 1998), pequeñas presas de laminación de crecidas (Sainz Trápaga, 1996), pérdida de suelos en el cuenco aluvional mediante imágenes satelitales (Malnero 1998), el control aluvional en áreas urbanas del VIRCh (Serra y Sainz Trápaga, 1997).

Otras actividades del proyecto

Laboratorio de hidráulica: Entre otras actividades asociadas se constituyó en grupo promotor de la construcción y puesta en marcha de un Laboratorio de Hidráulica departamental, documentado por el Ing. Andrés Malnero (Malnero, 1996).

Taller de evaluación técnica: a fin de permitir la evaluación técnica de los sucesos derivados de las grandes lluvias ocurridas en la región del Valle Inferior y Puerto Madryn, en el mes de Abril de 1998, y sus devastadoras consecuencias, este Proyecto con el aporte organizativo de docentes y alumnos del DICH impulsó la realización del “*Taller de evaluación técnica*” denominado “*Ingeniería de crecidas aluvionales y pluviales urbanas en el VIRCh*” (Serra et. al., 1998a).

Resultados

Entre los resultados de este proyecto resguardados en la biblioteca departamental (CD-DICH), presentaciones en reuniones científicas y publicaciones se destacan determinación de tormenta de diseño del Cañadón Baraibar en Gaiman, estudios de evapotranspiración en el VIRCh, implementación de un modelo físico en el laboratorio de hidráulica para estudios de defensa de crecidas y protección de márgenes (Rio Percy, Trevelin), tipología de obras de pequeñas presas de laminación de crecidas en áreas urbanas con riesgo de crecidas aluvionales, modelo de erosión hídrica en las cuencas torrenciales entre el Dique Ameghino y Boca Toma (<Laderas>), productos de modelación en este cuenco aluvional resumidos en mapas temáticos (IDRISI).

Los resultados del proyecto fueron presentados en distintos eventos públicos regionales y nacionales, revistas de ciencia, y su informe final tuvo distinciones de instituciones científicas locales y nacionales (Serra et. al., 1998b).

1999-PI274: modelando crecidas torrenciales en cañadones del VIRCh y ríos cordilleranos

En este proyecto, titulado “*Modelos Físicos y Matemáticos de Aplicación para el Control de Crecidas en Ambientes Torrenciales Patagónicos*”, 1999-2002. SCyT, UNPSJB, se reorientaron las actividades a fortalecer y mejorar resultados en modelación física y matemática aplicada. (Director: Juan Serra. Investigadores: María Jesús Chachero, Héctor Andrés Malnero, José M. Sainz Trápaga, Winston Greco. Alumnos: Martín Nozijkoswki, Mauricio Williams, Francisco Ojeda).

Entre los principales temas abordados se destacan:

Modelo físico-conceptual de tramo de Río Percy, en Trevelin

Se construyó como una de las actividades iniciales del Laboratorio de Hidráulica, bajo la dirección del docente investigador Ing. Andrés Malnero, y la participación de los Ing. José Sainz Trápaga y María Jesús Chachero, y de alumnos Francisco Ojeda, Félix Matamala y Martín Noazijkoswky, entre otros (Malnero, op.cit., 1996).



Fig. 2 Construcción de una maqueta –modelo de tramo urbano del Rio Percey en Trevelin

Se eligió un modelo de fondo móvil, que permitiera representar el movimiento de los sedimentos dentro del cauce y el efecto de las obras sobre la distribución de los mismos. Para la reproducción de las estructuras de gaviones se utilizaron los planos del proyecto de obras, las que se reprodujeron por niveles a escala del modelo (Fig. 2 y 5).

La primera situación de interés fue representar las condiciones iniciales del tramo de río, donde se buscó principalmente reproducir las condiciones de flujo registradas históricamente, simulando la ocurrencia de crecidas y periodos de estiaje con la duración a escala de tiempo. En esta fase se contrastó el modelo físico con los resultados obtenidos mediante la simulación matemática con el modelo HEC-RAS, al cual se le había incorporado la información proveniente del relevamiento topográfico.

En una segunda fase de la secuencia constructiva del proyecto, se analizó la disposición de distintas combinaciones de obras, a las que se sometió a la simulación de ocurrencia de crecidas, para evaluar el impacto sobre las márgenes y sobre la dinámica del movimiento de los sedimentos sobre el cauce. También se comparó el funcionamiento con el modelo HEC-RAS, al que se le incorporan las obras seleccionadas.

Finalmente se analizó el escenario con las obras terminadas, con el objeto de observar la respuesta ante situaciones de crecidas y el impacto que tales obras producían en el curso del río, la generación de zonas de deposición y erosión dentro del cauce.

Modelo de Presa de Laminación de Crecidas en Cuenco aluvional N° 3, Puerto Madryn

Esta tarea comprendió el diseño y construcción a escala de un modelo físico bidimensional del cuerpo de presa y obra de descarga en cierre de laminación de crecidas. El modelo físico realizado se orienta al estudio del comportamiento de un dispositivo de desagüe adoptado bajo el concepto de “aliviadero de servicio” en una serie de proyectos de presas de laminación de crecidas. Consistió en la representación física, en escala 1:20, de una sección de una presa de laminación de crecidas proyectada por un equipo profesional basado en los docentes que integraban este proyecto construido en el Cuenco Aluvional N° 3 que descarga sus aportes sobre la ciudad de Puerto Madryn, Provincia del Chubut.

Integran el modelo una “faja” de la presa de 6 metros de longitud de coronamiento (en el prototipo), coincidente con la sección de mayor altura y las estructuras de desagüe compuestas por una obra de toma, un conducto que atraviesa la presa y un cuenco disipador de energía en la restitución (Fig. 3).



Fig. 3: Vista de Maqueta-Modelo Presa Cuenco Aluvional III , Puerto Madryn

El modelo <OPERFA>

En este PI se continuaron investigaciones de operación del embalse Ameghino, con restricciones por distintos usos del agua en el VIRCh, sus proyecciones, con el agregado de escenarios de limitaciones por posibles incrementos de áreas bajo riego (meseta intermedia).

Con nuevas tecnologías de programación en VisualBasic, una plataforma más amigable y menos rígida que el antiguo Basic, se generó el modelo <OPERFA>. Sus diagramas y algoritmos principales tuvieron por precedente inmediato la revisión del modelo de operación de embalse, con restricciones aguas abajo, de tipo cota objetivo simple y doble, generados en el primer proyecto (Sainz Trápaga y Malnero, op. cit., p. 9). La revisión incluyó el antiguo modelo de simulación tipo cota objetivo utilizado por la ex Agua y Energía Eléctrica (AyEE), la modificación y ampliación de algoritmos de cálculo y computacionales, el rediseño de las formas de entradas y salidas, la actualización de la serie de datos de entradas de caudales medios mensuales en la Estación Hidrométrica de Los Altares (considerada como el ingreso principal al embalse). Entre las funcionalidades del OPERFA fue incorporar “anidamiento” del bloque principal de la simulación para correr secuencias automáticas y completas modificando parámetros de entrada y condiciones de entorno como variables, de manera de disponer de salidas múltiples para diferentes hipótesis de condiciones de borde, cota objetivo, y otros parámetros. Esta funcionalidad facilitó los estudios de sensibilidad de la modelación ante la variación de cota objetivo simple, doble, múltiple, y de los parámetros de restricciones aguas abajo de la presa.

Con los resultados de esta herramienta se fortalecieron las conclusiones en relación a las restricciones del cauce aguas abajo y las limitaciones para controlar crecidas extraordinarias bajo las normas de desembalse aplicadas, ya detectadas en el PI inicial. El foco de esta simulación fue puesto en las limitaciones de uso de agua en el VIRCh y, en particular, de las ampliaciones de áreas bajo riego, teniendo por análisis el proyecto de irrigación de 35.000 has del área denominada “Meseta Intermedia”, al norte de la ciudad de Trelew.

La simulación permitía mediante un análisis multiparametrizado obtener entre otros resultados el análisis de fallas e incumplimiento de consignas restrictivas en el VIRCh para diferentes cantidades de superficie incorporadas bajo riego en el área de la Meseta Intermedia. Esta simulación se sintetizó en tablas, y un ábaco de tres variable: “Nro. de meses con fallas” y “% de fallas” Vs “Nuevas hectáreas bajo riego”.

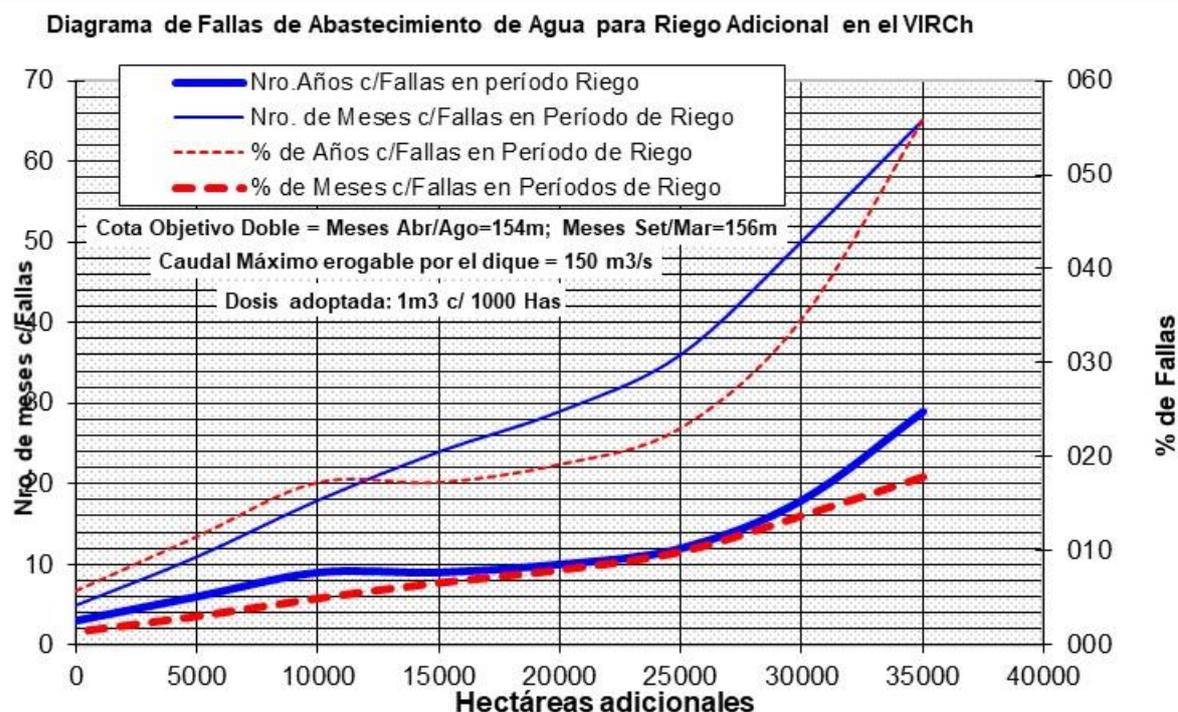


Fig. 4: Modelación hidráulica Operación de Embalse Ameghino, diagrama de fallas de abastecimiento de aguas para riego adicional en la terraza intermedia.

Los resultados fueron contundentes, demostrando la imposibilidad de satisfacer y garantizar la demanda de tamaño superficie, con riego superficial, sin entrar en conflictos de usos del agua en los años de más secos, y simulados para la serie histórica de datos medidos de caudales medios mensuales en Los Altares (Fig. 4). Estos resultados fueron presentados en distintos eventos. En el Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba 2000, se presentó y publicó en su libro bajo el título de *Limitaciones de disponibilidad hídrica del Río Chubut para nuevas áreas bajo riego o derivaciones para otros fines en el valle inferior* (Serra et. al., 2000).

Investigadores de este grupo y docentes de las cátedras de Hidrología, Construcciones Hidráulicas y de Aprovechamientos Hidráulicos, continuaron perfeccionando la simulación de operación de embalse Ameghino con restricciones de uso aguas abajo, actualizando la serie histórica de datos medios mensuales, mejorando la estimación de la curva altura-superficie-volumen almacenado de su embalse, y produciendo estimadores de fallas esperados, trabajo que se mantiene de manera continua en los años recientes. También se generaron distintas pruebas no publicadas de operación de embalse bajo el supuesto de construcción del Dique Las Piedras, aguas abajo del Dique F. Ameghino.

Se menciona además la determinación de la pérdida de suelos en el cuenco aluvional aguas abajo del Dique F. Ameghino (Malnero, 1999), y la caracterización de las crecidas en el VIRCh (Serra, 1999a; Serra et. al., 2001).

Simulación hidrológica del Cañadón del PIT (Parque Industrial de Trelew)

Accesoriamente y relacionados con las lluvias torrenciales y crecidas extraordinarias producidas en el Valle Inferior durante abril de 1998, se efectuaron investigaciones por fallas constructivas del sistema de presas del Cañadón Baraibar en Gaiman a causa de material arcilloso del núcleo impermeable construido no conforme a proyecto (Sainz Trápaga y Greco 1999); y del sistema de presas de laminación de crecidas en el Cañadón del Parque Industrial de Trelew, por rotura del vertedero principal de la Presa II, vandalizado con sustracción de mallas de alambre de su estructura gavionada, y por el taponamiento masivo con escombros del vertedero

principal de la Presa III. La modelación hidrológica aplicada al PIT fue la base para los estudios de refacción del sistema de pequeñas presas de laminación de crecidas en este sector urbano de Trelew (Serra, 2000a; Serra, 2000b; Serra, 2000c).

Se mencionan además en la finalización del proyecto su informe final (Serra et. al., 2002), y publicaciones referidas al riesgo aluvional en el VIRch (Serra, 1999).



Fig. 5: Construcción del modelo físico de fondo móvil: ensayo de prueba – equipo de trabajo

2002-PI453: el riesgo aluvional y la seguridad hídrica en las mesetas

En continuidad de la línea investigativa este proyecto de investigación se tituló “*Riesgo Aluvional y Seguridad hídrica en Ambientes torrenciales de la meseta Semiárida Patagónica: Parametrización Hidrológica*”; SCyT, UNPSJB, 2003-2006. (Director: Juan Serra. Investigadores: María Jesús Chachero, Héctor Andrés Malnero, Marcelo Ambrosio, José M. Sainz Trápaga. Alumnos: Estela Helt, Martin Nozijkoswki).

El proyecto se propuso aportar al mayor conocimiento de nuevas líneas metodológicas, parámetros y coeficiente de diseño y cálculo particularizados a las características típicas de los cuencos torrenciales de la región, para el estudio y proyecto de obras de control de torrencialidad regionales.

Fueron metas del proyecto el desarrollo y actualización de software de aplicación de desarrollo propio, diseño de una metodología integrada de estudio hidrológico, diseño o cálculo de hidrotecnias de control aluvional en cuencos torrenciales típicos de áreas de la meseta semiárida patagónica; continuar el desarrollo de modelos físicos en cauces cordilleranos (Río Percy) y de una Presa de Laminación de Crecidas en Cuencos Torrenciales de Meseta (Presa Cuenco 3, Puerto Madryn). El proyecto tuvo además una activa participación en ámbitos especializados propios de la disciplina y de acciones de difusión de interés general. Entre los temas abordados se destacan:

Estudio de Tormentas: Actualización Metodológica y Paramétrica de la Ecuación Regional de Lluvia.

Comprendió la actualización de estudios previos realizados en proyectos anteriores para la región del VIRCh.

La fuerte variabilidad climática de la última década, obliga a la incorporación de nuevos datos de precipitaciones máximas y a la revisión metodológica, de criterios y métodos de procesamiento, que permitan obtener resultados más confiables en relación a la variabilidad por el efecto Niño-No Niño, la obtención de nuevas expresiones para la ecuaciones PDR, de la tormenta máxima probable y las conclusiones y recomendaciones, incluidas las limitaciones de aplicabilidad de las expresiones resultantes.

Evaporación y Evapotranspiración

En base a la disponibilidad de datos de evaporación en estaciones locales, con el apoyo de nuevos datos incorporados, trabajos de investigación y estudios existentes, se buscó caracterizar las unidades hidrológicas objeto de investigación y establecer una relación paramétrica simple, a nivel de tasas de evaporación media y máxima diaria de paso mensual.

Simulación hidrológica aplicada a PHMP

El problema torrencial en los paisajes hídricos de meseta (PHM), de la región Patagónica (PHMP), y de su zona de contacto con los valles de ríos y arroyos, adquiere particularidades que la distinguen de la problemática hidrológica de cuenca de montaña y de área de llanura.

Si bien el ambiente semiárido habla de un reducido módulo pluviométrico, suelen ocurrir eventos meteorológicos extraordinarios que, con escasa frecuencia, activan sistemas hídricos de gran potencialidad torrencial.

Partiendo de la observación y experiencias realizadas en un paisaje particular de la Provincia del Chubut, se abordaron en esta investigación dos modelos de aplicación, particularmente desarrollados para el estudio de la fenomenología torrencial y de la estimación de crecidas máximas en pequeñas y medianas unidades hidrológicas, propias de las zonas de meseta y del clima semiárido, con poca o nula información hidrométrica.

Sus desarrollos pueden verse en el documento “*Simulación hidrológica para el estudio de crecidas máximas en paisaje hídrico de meseta patagónica (PHMP)*”, (Serra, 2002b; Serra, 2003b; Serra, 2006a; Serra, 2006b), extracto del Capítulo de la Tesis defendida por el autor “Metodología integrada de estimación de crecidas en ambientes torrenciales típicos de áreas de meseta en la región semiárida patagónica”, se reúnen e integran las experiencias, actualizaciones, fundamentos, algoritmos, diagramas de bloques y resultados del modelo <GAIMAN>, y los fundamentos conceptuales del modelo <PIXEL>.

Parametrización hidrológica – Modelo TORDISE

El modelo hidrológico básico para la estimación lluvia caudal es el sistema <TORDISE>, de Simulación de Torrentes en Areas de Meseta Semiárida, con los modelos <GAIMAN> de transformación lluvia-caudal en pequeñas cuencas torrenciales y <PRESAS> de análisis y diseño hidráulico de presas de laminación de crecidas en cascada, desarrollado ad-hoc en trabajos anteriores de proyectos de investigación. . Como modelo de simulación complementario y comparativo se utilizaron otros modelos conocidos como CHAC, HEC1 o HYMO.

Los parámetros hidrológicos sometidos a estudio, -no excluyentes-, fueron coeficientes “a” y “b” de infiltración para suelos tipo (Kostiakov); Tasa de almacenamiento o retención superficial para suelos y morfologías tipo; Coeficientes C y K prácticos, de propagación de ondas de crecidas en cañadones por onda cinemática; Coeficientes de descarga superficial (recesión superficial) para el almacenamiento en cuenca luego del cese de la lluvia.

Simulación Hidráulica en Ríos Cordilleranos: Río Percey, Arroyo Esquel. Simulación con HEC RAS, (Hydrologic Engineering Center – River Análisis System).

Entre su producción más relevante se citan los estudios de control de crecidas y saneamiento del Arroyo Esquel, con impacto en el área urbana, y su plan de acciones estructurales y no estructurales (Serra y Chachero, 2003). Sus resultados fueron publicados y presentados en el Congreso Nacional del Agua CONAGUA 2005, Mendoza (Serra et. al., 2005a). Con posterioridad por gestión de la Municipalidad de Esquel este proyecto concluyó las obras hidráulicas y gestión de acciones no estructurales, que aunque con modificaciones del proyecto original en el tramo ejecutivo, siguieron los lineamientos trazados para la protección de márgenes y áreas inundables.

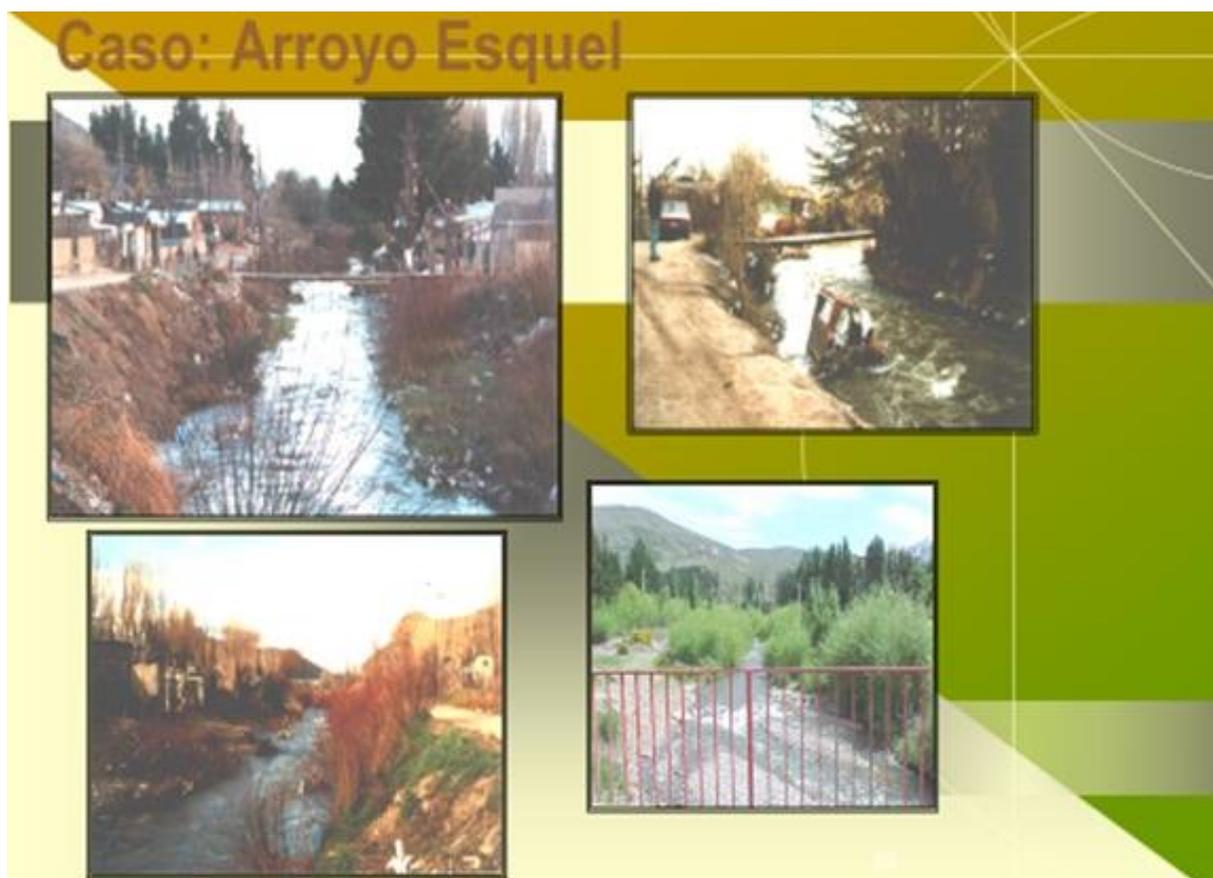


Fig. 6: Arroyo Esquel, vistas del relevamiento preliminar en el tramo de estudios

El Cañadón del PIT (Parque Industrial de Trelew)

En otra línea similar de ingeniería de proyectos hidráulicos se planificó, y estructuró un plan de acciones estructurales y no estructurales para el control de crecidas en el área del Parque Industrial de Trelew (PIT). Las obras proyectadas incluyeron tres cierres de un sistema de retardo de crecidas “en cascada”, con dos presas de almacenamiento y regulación dentro del cañadón del PIT, y un cierre final aguas arriba del Barrio Mil Viviendas, permitiendo la colección de la totalidad de los caudales provenientes de lluvias de baja y media recurrencia, y conducirlos por conducto cerrado y enterrado bajo la “calle canal” existente. Para lluvias extraordinarias se previó la descarga por vertederos y colección final por sobre la calle canal mencionada. Sus resultados también fueron publicados y presentados en el Congreso Nacional del Agua CONAGUA 2005, Mendoza (Serra et al, 2005b).

Las obras proyectadas fueron construidas por gestión provincial (CORFO CHUBUT) y desde su puesta en servicio a la fecha no se han detectado crecidas por sobre la cresta de vertederos ni vertidos por sobre la calle canal, aunque es escenario probable.



Fig. 7: inundación de la ciudad de Trelew (Barrio 1000 viviendas), abril de 1998

Nota: no obstante, el buen funcionamiento de las obras construidas, la simple exploración y reconocimiento expeditivo del área muestra hoy una gran vandalización en inmediaciones de los cierres, el vertido de basura de construcción e industrial, basura en general, movimientos y descarga de áridos, que han disminuido sensiblemente la capacidad de sus pequeños vasos de almacenamiento, y depositado material contaminante en supuestas crecidas. Las presas muestran roturas generalizadas de sus estructuras de regulación y evacuación, taponamientos en sus tomas, y otras roturas que reducen significativamente el buen funcionamiento del sistema de retardo. No se observa que en la práctica, un área técnica de institución municipal o provincial efectúe las tareas rutinarias de monitoreo para un sistema de presas que, en crecidas, afecta al populoso Barrio Constitución y todos los barrios ubicados aguas abajo hasta la Laguna Cacique Chiquichano y sus inmediaciones. Las rutinas de control, monitoreo y mantenimiento de este sistema de retardo en crecidas es clave para evitar su mal funcionamiento en crecidas, y en situaciones extremas, su colapso. Existen diversos documentos que registran esta afirmación en distintos proyectos de investigación y trabajos del DICH.

Libro de Inundaciones Urbanas en Argentina (participación, ciclo de conferencias)

Se participó en el Libro *Inundaciones Urbanas en la Argentina* (Bertoni et. al., 2004a; Bertoni et. al., 2004b; Serra, 2004), en el cual se incorporó un capítulo de “*Urbanización e inundaciones en sistemas hídricos del centro de la región patagónica*”. Su texto abordó sobre crecidas e inundaciones en cuencas pluvio-nivales cordilleranas de la región central de la Patagonia. La presentación inicial en el País de este libro, junto a sus principales

autores, se realizó en setiembre de 2004 en las ciudades de Trelew, Esquel y El Bolsón (Fig. 6 y 7).

Este proyecto contribuyó además con el Convenio entre la Universidad y la Municipalidad de Trelew, en acuerdo con la Municipalidad de Rawson, para los estudios de alternativas de un sistema de tratamiento de efluentes cloacales de la ciudad de Trelew (Serra et. al., 2006c). Asimismo, contribuyó a la evaluación de impacto de la obra de Limpieza y Dragado del Río Chubut, Etapa I (Sainz Trápaga, 2004).

Otros trabajos

Se mencionan trabajos en el tratamiento de residuos pesqueros (Ambrosio, 2004), y trabajo conjuntamente con investigadores de la Facultad de Ciencias Naturales en la Prognosis del Funcionamiento Hidráulico de Lagunas de Evaporación de Efluentes Industriales (Stampone et. al., 2005).

Distintos trabajos de este proyecto fueron presentados y expuestos por sus autores en diversos encuentros de ciencia y técnica de carácter regional y nacional (Malnero y Chachero, 2004; Serra, 2005, Serra, 2003).

2007-PI 648: dedicado a sistemas lagunares en un paisaje de mesetas

Este proyecto se tituló “*Aspectos hidroambientales de sistemas lagunares en paisaje de meseta, en la región Nordeste del Río Chubut*” SCyT, UNPSJB”. PI N° 648 Disp. SCyT 207/07, UNPSJB. 2007-20010. (Director: Juan Serra. Investigadores: María Jesús Chachero, Marcelo Ambrosio, Héctor Andrés Malnero, José M. Sainz Trápaga, Gabriel Kaless. Alumnos: Martín Nozijkoswki, Lucrecia González, Sabrina Haag).

Tuvo por objetivo general contribuir a desarrollar formas sostenibles de manejo de aguas en sistemas lagunares en planicies y terrazas de la región Nordeste del Valle Inferior del Río Chubut. Sus objetivos específicos se propusieron un mayor conocimiento y actualización de ecuaciones de lluvias, simulación hidrológica de ambientes lagunares en mesetas, el desarrollo de alternativas para la remoción de biomasa (algas) en cuerpos lagunares determinando la calidad del efluente generado, y el establecimiento de semejanzas y diferencias entre los ambientes sujetos a investigación (mesetas) con relación a resultados similares conocidos en ambientes de llanuras y montaña. Entre los temas abordados se destacan:

Modelación hidrológica aplicada a sistemas hidrológicos mixtos

Se perfeccionaron y actualizaron a plataformas informáticas más amigables los modelos hidrológicos desarrollados en proyectos anteriores (Serra, 2009a; Serra, 2009b; Serra, 2007), que fueron la base para tesis de maestría y de doctorado.

Estudio de precipitaciones (actualización)

Se realizó el análisis estadístico de lluvias máximas diarias, con datos de la estación Trelew del Servicio Meteorológico Nacional. Asimismo, en este mismo trabajo, se presentó el análisis para duraciones menores a la diaria con datos pluviográficos de la estación de la Estación del Servicio Meteorológico Nacional, y de la Estación Experimental Agropecuaria del INTA de Trelew.

Con información recogida en los establecimientos ganaderos se pudo realizar una caracterización areal de las precipitaciones (Fig. 8).

Los resultados del análisis de información diaria, fueron recopilados en el trabajo de investigación: “Estudio de precipitaciones en la ciudad de Trelew – Análisis estadístico y ecuación de lluvia” (Chachero, 2010).

Además de su aplicabilidad a diversos estudios e investigaciones hídricas, su aplicación más directa resulta de interés en estudios y proyectos hidráulicos y, particularmente, en el diseño de estructuras de control de crecidas y desagües pluviales, con criterio probabilístico.



Fig. 8: Trazado de isohietas de precipitación media anual.

Estudio de Evapotranspiración en lagunas con imágenes satelitales LANDSAT TM

Se utilizaron los algoritmos propuestos por los autores del modelo (Allen et. al. 2007), siguiendo la metodología descrita en los informes de investigación, los manuales editados hasta el momento, y las experiencias de aplicación desarrolladas en ambientes similares (Fig. 9).

Se realizó una adaptación del modelo, ya que originalmente las rutinas se han desarrollado para el sistema ERDAS y en este caso se implementaron en IDRISI. Para la modelación de la evapotranspiración mediante imágenes de satélite, fue necesario recopilar la información meteorológica del instante del paso del satélite y los valores instantáneos y diarios de la evapotranspiración potencial. Esta información fue provista por el INTA mediante los datos de la estación meteorológica automática emplazada en la Estación Experimental INTA Chubut, en cercanías de la ciudad de Trelew.

Una vez establecidos los algoritmos se procedió a la verificación de las rutinas con un conjunto de datos provisto por los autores, cuyos resultados se encuentran publicados.

Durante el desarrollo de la implementación del modelo, y como consecuencia de las investigaciones realizadas por los autores, han surgido modificaciones de importancia en los algoritmos de cálculo, muchos de los cuales generaron cambios metodológicos necesarios que mejoran notablemente la precisión de los resultados logrados por el modelo (Malnero, 2010a; Malnero 2010b)

Uno de estos cambios estuvo relacionado con un nuevo algoritmo de calibración interna, que permitió, con simplemente conocer los datos meteorológicos del momento del paso

del satélite y el valor de la evapotranspiración instantánea, ajustar el flujo de calor sensible mediante un proceso iterativo. En METRIC el cálculo de la resistencia aerodinámica usa la velocidad del viento extrapolada a una altura de 200m sobre la superficie y un procedimiento iterativo de ajuste basado en las ecuaciones de Monin-Obhukov (Malnero, 2010c).

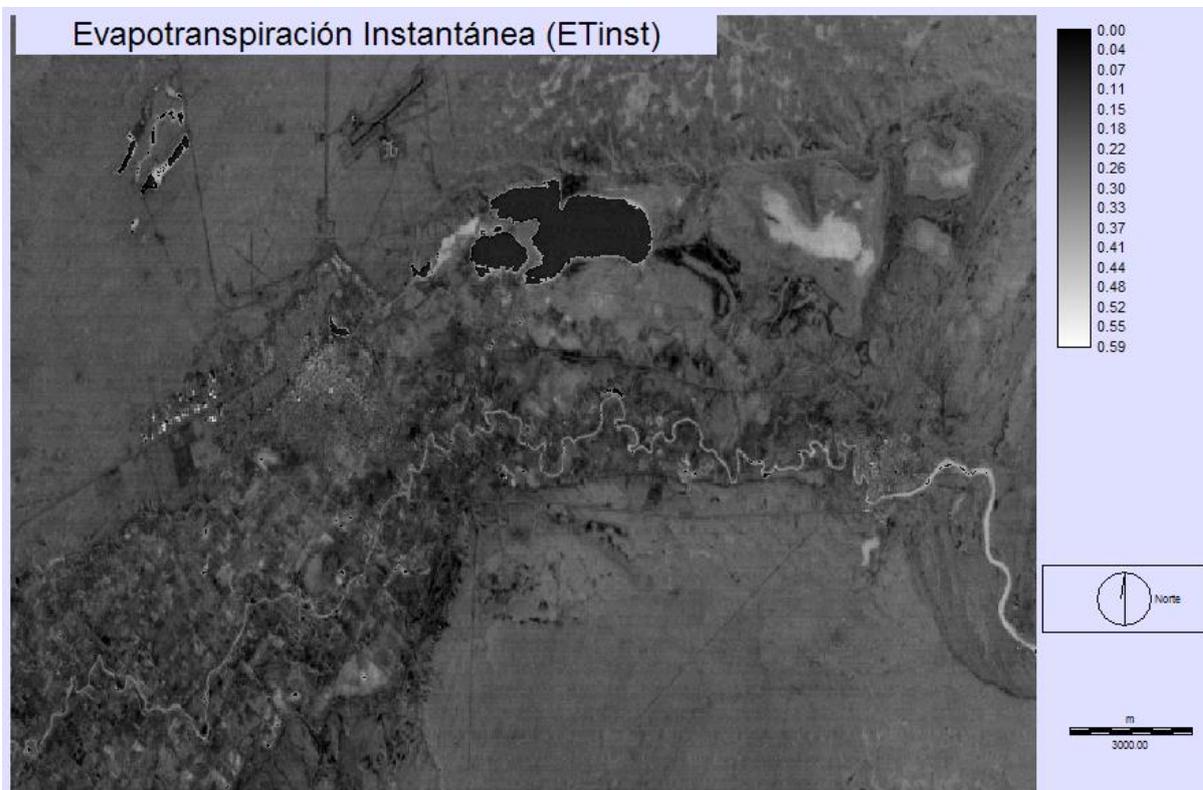


Fig. 9: Evapotranspiración Instantánea (mmh-1) para el día 17 de Febrero de 2003.

El modelo METRIC aplicado a la zona de lagunas y bajo riego circundante a la ciudad de Trelew ha permitido lograr mapas de evapotranspiración con una alta calidad de definición espacial y temporal.

Esta característica permite su aplicación en tareas relacionadas con el análisis del consumo de agua de los cultivos en la zona bajo riego y en la estimación del balance hídrico de las lagunas.

La aplicación de este modelo requirió de un entrenamiento en diferentes áreas del conocimiento como: el procesamiento digital de imágenes de satélite, el balance de energía, la física de la atmósfera y las radiaciones.

Balance y funcionamiento hidrológico superficial de cuerpos lagunares

En este componente se desarrolló, verificó y aplicó un modelo de balance de aguas superficiales y análisis de crecidas máximas para un sistema de lagunas.

En base a modelos hidrológicos e hidráulicos anteriores se desarrolló un nuevo modelo de simulación hidrológica para la evaluación del balance de aguas superficiales en cuerpos lagunares. El modelo básico parte de la conocida ecuación de continuidad (Shames, 1967; Chow, 1989). Se establecieron balances de entradas y salidas de aguas superficiales por lluvias, drenajes pluviales y otros efluentes, evapotranspiración y pérdidas por infiltración, para períodos de tiempo de paso medio diario o mensual.

El objeto del modelo es el análisis en condiciones de lluvias medias y extremas (inundación-sequía), y diferentes escenarios de efluentes ingresados. Se analizó el caso regional de “Laguna Negra”, que incluyó a su vez varios cuerpos lagunares encadenados.

Caso de gestión de efluentes cloacales de Trelew

La ciudad de Trelew, (Chubut, Argentina) desde hace varias décadas vierte sus efluentes cloacales en un área deprimida, de lagunas temporarias, situada al nordeste del Río Chubut entre el ejido de esta ciudad y el de la ciudad de Rawson. Debido a los continuos y crecientes aportes, estas depresiones se han convertido en lagunas permanentes, interconectadas entre sí en ocasiones de grandes lluvias.

En el año 2005, la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco desarrolló los estudios del “Plan de manejo y gestión integral del sistema de tratamiento de efluentes cloacales de la ciudad de Trelew (PMGI-EC Trelew)” (Serra et al, 2006) para la Municipalidad de Trelew. En la formulación, análisis y selección de alternativas, se destaca la metodología de evaluación de factibilidad ambiental de la gestión de efluentes (Ares y Serra, 2008).

Para apoyar la evaluación técnica y ambiental se realizó una simulación del balance de masa hídrica superficial.



Fig. 10: Imagen Google Earth, zona Este del Valle Inferior del Río Chubut, área Trelew-Rawson y lagunas

Los estudios se enfocaron en las denominadas Laguna II, o “de la Base”, Laguna III, o “del Caño”, Laguna IV, o “Laguna Negra”, Laguna V, o “Basural”, y Laguna VI, o “El Salitral”. A estas depresiones confluyen las aguas de torrentes y cañadones que drenan excedentes pluviales desde terrazas vecinas (Fig. 10). El área de estudios está afectada por frecuentes inundaciones urbanas, y severamente impactada por la urbanización de depresiones e impermeabilización de suelos.

El objeto específico de la simulación del balance fue estimar la variación de alturas de anegamiento (H), superficies (S) y volúmenes de almacenamiento (V), para distintos escenarios. Los escenarios combinaban el ingreso y egreso de masa hídrica en

condiciones naturales mínimas, medias y extremas, y por intervención antrópica (vertidos de ductos, canales, irrigación u otros) (Serra y Chachero, 2011).

Reducción de biomasa (algas) en lagunas

Se analizó el tratamiento mediante un filtro biológico de flujo ascendente para remover la biomasa generada en los sistemas lagunares (algas), determinando la calidad del efluente generado: Turbiedad, SST, DQO, bacteriología y nutrientes (Ambrosio, 2010).

Se construyó un reactor (escala laboratorio), de forma cilíndrica, con un volumen total de 7 litros y 3 litros de volumen útil. La alimentación del sistema se efectuó en forma ascendente, por medio de una bomba peristáltica CRONIMO BPX 100 R65 (con cabezal Watson Marlow), cuyo caudal se puede variar entre los valores extremos previstos (Fig. 11).

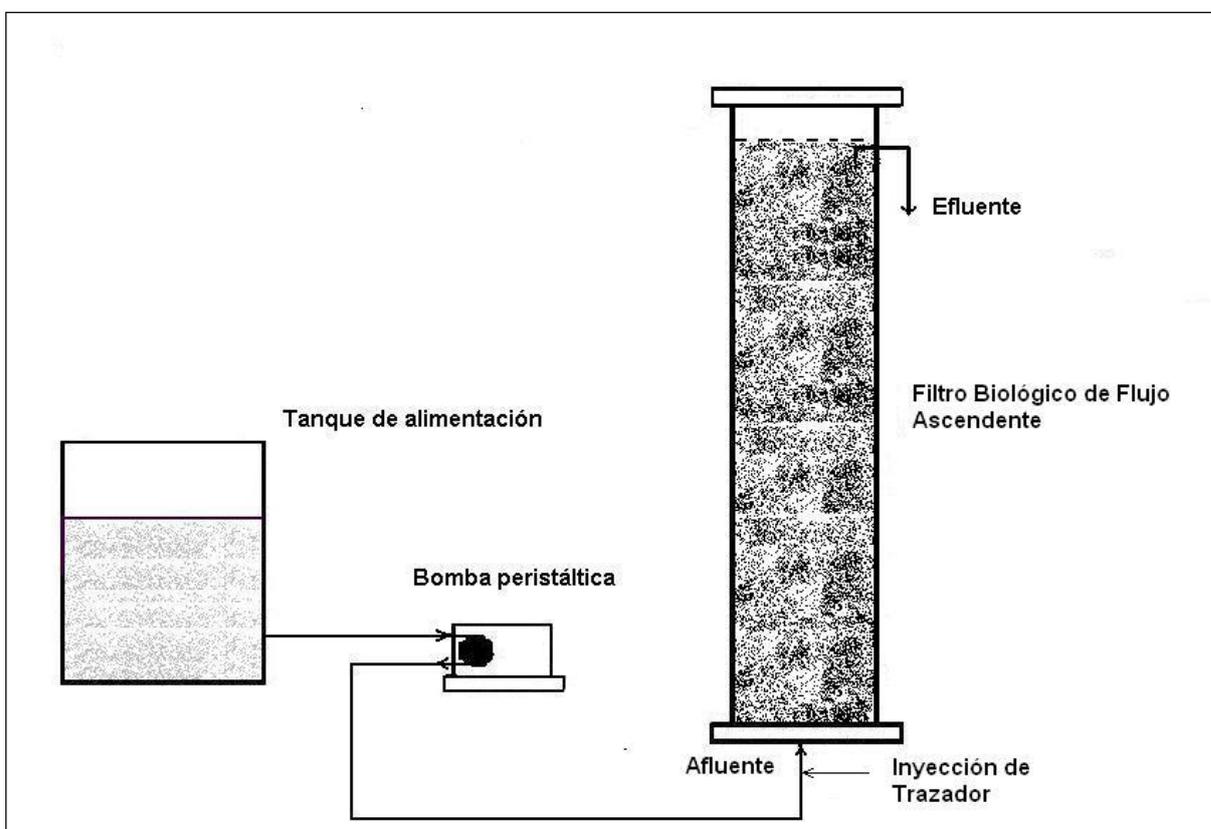


Fig. 11: Esquema del filtro biológico de flujo ascendente

La unidad tiene un diámetro de 110 mm y una longitud total de 900 mm, el falso fondo está constituido por una rejilla plástica que soporta el material de relleno y se ubica a 40 mm del fondo. El material de relleno empleado fue árido clasificado, con una granulometría de diámetro equivalente $\frac{3}{4}$ " y coeficiente de uniformidad 1.

Los resultados obtenidos permitieron incrementar el conocimiento que se tenía de la distribución espacio-temporal de lluvias y tormentas, que podrá ser mejorado por trabajos futuros que dispongan de mayor información pluviográfica y pluviométrica areal.

Se han desarrollado alternativas para la remoción de biomasa en cuerpos lagunares, determinando la calidad del efluente generado.

Accesoriamente, se realizaron trabajos de aforos químicos en pequeños cursos de agua (Ambrosio y Serra, 2010a), y se contribuyó al estudio de fuentes alternativas de

abastecimiento de agua poblacional en la ciudad de Esquel y Trevelin, Cooperativa 16 de Octubre (Serra, Ambrosio, 2010b).

Se menciona además la presentación de un resumen de evolución histórica de estudios de precipitaciones en el VIRCh, en evento de Hidrología Superficial en la ciudad de Córdoba. (Serra y Chachero 2010).

La totalidad de este proyecto se resume en su informe final (Serra et. al., 2010a; Serra et. al., 2010b).

2010- PI 874: modelando variables hidroambientales en el VIRCh

Análisis y modelación de variable hidroambientales en la cuenca inferior del Río Chubut (VIRCh). SCyT, UNPSJB, 2011-2014. Director: Juan Serra. Investigadores: María Jesús Chachero, Marcelo Ambrosio, Gabriel Kaless, Héctor Andrés Malnero, José M. Sainz Trápaga. Alumnos: Martín Nozijkoswki, Sabrina Haag.

El propósito general del proyecto fue contribuir a elevar el conocimiento de problemáticas hidroambientales que se manifiestan en la región del Valle Inferior del Río Chubut, en particular derivados de la amenaza hidrológica de crecidas del Río, y de crecidas repentinas en cañadones y torrentes aledaños. Este proyecto es continuador de una misma línea investigativa de otros seis ya concluidos desde 1985 a la fecha, y producido por el mismo núcleo activo de docentes investigadores.

Finalidad: esta investigación, sistematiza datos y conocimientos adquiridos en investigaciones anteriores en el cauce y valle inferior del Río Chubut, y se propone alcanzar nuevos conocimientos sobre variables hidroambientales en la región de estudios, y en la región patagónica en general.

Objetivo General: contribuir a desarrollar formas sostenibles de manejo de aguas en el valle inferior del Río Chubut.

Los principales resultados del proyecto fueron agrupados en trabajos publicados en “Cuadernos de ingeniería civil hidráulica”, revista de divulgación de trabajos de investigación, ciencia y tecnología, afines a la ingeniería civil orientación hidráulica, que edita y publica el Centro de Documentación Departamental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. (Volumen 2, Número 1, editado, actualmente en imprenta, en proceso de impresión). ISSN 1853-8479.

En este nuevo número se publican 8 trabajos que resultan de esta investigación, y que se resumen a continuación:

La investigación realizada contribuyó a desarrollar formas sostenibles de manejo de aguas en la región del Valle Inferior del Río Chubut. Entre los temas abordados se destacan un mayor conocimiento de parámetros y coeficientes de análisis de precipitaciones máximas; análisis, selección y determinación de indicadores de riesgo hidrológico de crecidas e inundaciones; nuevas técnicas de análisis y modelación de variables hidroambientales; alternativas para la remoción de biomasa (algas) en cuerpos lagunares.

Para publicar se seleccionaron temas de precipitaciones máximas en Comodoro Rivadavia y Puerto Madryn y análisis de casos; filtro de roca aireado nitrificación y desnitrificación bajo distintas cargas, y como tratamiento terciario para remoción de carga orgánica y bacteriológica; modelo RUSLE para estimar la erosión de suelos en ambientes de clima desértico en Patagonia; alteración en la dinámica de los sedimentos en el Río Chubut aguas abajo de la presa Florentino Ameghino; radares meteorológicos en la Patagonia:

contribución a la evaluación y selección de sitios de emplazamiento, y finalmente de sistemas mentales para la resolución de problemas y diseño de proyectos, tomando por caso aplicado la disposición final de los efluentes cloacales de la ciudad de Trelew.

Se mencionan también trabajos producidos por el Dr. Gabriel Kaless, compartidos con investigadores de la Università di Padova (Kaless y Luca, 2011; Kaless et.al., 2011c; Kaless et.al., 2013a; Kaless et.al., 2014a; Kaless et.al., 2014b; Rigon et. al, 2012), con el Centro de la Región Semiárida del Instituto Nacional del Agua en Córdoba, CIRSA, en estudios en la “Quebrada del Condorito” (Rico et. al, 2012), y del embalse del dique “La Falda” (Beltramone et. al, 2011).

Se mencionan además trabajo presentado al CONAGUA 2001 (Serra y Ambrosio, 2011), charlas y conferencias (Serra, 2011a; Serra, 2011b; Serra, 2011c; Serra, 2013).

El Informe Final de este proyecto incluyó una publicación especial de “Cuadernos de Ingeniería Civil Hidráulica, Vol 2, Num 2: ISSN 1853-8479: ANÁLISIS Y MODELACIÓN DE VARIABLES HIDROAMBIENTALES EN LA CUENCA INFERIOR DEL RIO CHUBUT” (Serra et. al., 2014).

Análisis de precipitaciones máximas; actualizaciones; análisis de caso

El 14 de enero de 2013, una tormenta de características inusuales azotó la ciudad de Comodoro Rivadavia, ocasionando daños muy severos en la zona urbana. Según el Servicio Meteorológico Nacional, sólo se registraron 9 mm de lluvia, concluyendo que debió de tratarse de un evento localizado, o sobre la alta cuenca con valores casi despreciables en la ciudad. Esto motivó el estudio de otros eventos extraordinarios y su modo de registro, analizando la tormenta del 12 al 14 de Abril de 2011, que superó ampliamente los registros oficiales históricos de la región.

Entre los días 7 y 8 de Abril de 2014, a raíz de un importante centro ciclónico de inusuales características que comenzó en el centro del país y se desplazó a la zona patagónica, se generó una tormenta excepcional en la zona noreste del Chubut, provocando precipitaciones de carácter extraordinario y con intensidades máximas de lluvia, medidas en diferentes duraciones, de muy alta recurrencia.

Se exponen en el trabajo los resultados de los análisis estadísticos realizados a registros de precipitaciones de la ciudad de Puerto Madryn, donde se evalúa el período de retorno de la precipitación ocurrida y las nuevas relaciones funcionales que surgen de la incorporación de la misma a la serie de precipitaciones máximas en 24 horas (Chachero, 2011a; Chachero 2011b; Chachero, 2012; Chachero, 2013; Chachero, 2014).

Estas nuevas relaciones ajustadas, son las que se recomienda utilizar en la determinación del evento o los eventos de lluvia que servirán de base en el estudio técnico y diseño de obras en la ciudad y áreas de influencia.

Efluentes: filtro de roca aireado. Nitrificación y desnitrificación. Tratamiento terciario

El estudio consistió en determinar la eficiencia de un filtro de roca aireado (FRA), para el tratamiento de pulido del efluente de una Laguna Facultativa (L.F.). Como relleno se utilizó árido de 20 mm de diámetro equivalente (menor que los empleados en trabajos previos), que dispone de mayor superficie específica para la fijación de biopelícula.

En los ensayos se operó el FRA en forma $m^3/día m^3$, incrementando el área del filtro bajo aireación de acuerdo a las recomendaciones dadas. (Ambrosio et.al. 2011a; Ambrosio et. al., 2011b).

Como objetivo se buscó determinar los valores de reducción de: amonio (NH_4^+) por nitrificación, nitrógeno inorgánico ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+$), demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales (SST), y compararlos con los obtenidos en FRA en trabajos previos.

El tratamiento de terciario del efluente de lagunas facultativas (LF), mediante un filtro de roca aireado (tratamiento de biopelícula fija con sectores anóxicos y aerobios), tiene como objeto reducir los niveles remanentes de demanda biológica de oxígeno (DBO5), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos (SST), y la carga microbiológica, cuyos niveles superan los recomendados en las Guías de la Organización Mundial de la Salud, para reuso en riego sin restricción, y las normativas de vertido en cuerpos receptores, sin considerar los nutrientes como Nitrato (NO_3^-), Nitrito (NO_2^-) y Amonio (NH_4^+), o la necesidad de lograr una relación $\text{SST/DBO5/ NH}_4^+ \leq 10/15/5$.

Ingeniería de Ríos. Sedimentología. Aplicaciones en el VIRCh

En este estudio se aplicó el modelo RUSLE para evaluar la pérdida de suelo por erosión hídrica comparando las predicciones con mediciones realizadas en una pequeña cuenca endorreica ubicada al noroeste de la Provincia del Chubut. Se dispuso de mediciones detalladas de la escorrentía, precipitación y pérdida de suelo en 18 parcelas de 6m^2 . El periodo de medición se extendió por 3 años (Rostagno et al. 1999). La tasa total de erosión en el periodo de observación fue aceptablemente predicha por el modelo (la predicción fue del mismo orden de magnitud a la observada). Se observó que el factor de erosividad de la lluvia R subestimaba las mediciones cuando se empleaba el parámetro I30. En cambio, cuando se utilizó la intensidad máxima en 10min se logró una mejor predicción de la tasa de erosión. El empleo del parámetro propuesto por Williams (1975) que tiene en cuenta exclusivamente la erosión canalizada dio también buenos resultados.

Los resultados obtenidos muestran el factor de lluvia R, y los distintos parámetros del modelo, los factores K, L, S, C y P, y los valores de erosión obtenidos con este método (Kaless, 2011a).

El Río Chubut ha experimentado cambios morfológicos notables luego de la construcción de la presa Florentino Ameghino. En la sección de Puente Gaiman se ha observado el estrechamiento del cauce, la elevación del nivel del fondo con las consecuentes repercusiones en la relación entre niveles de agua y caudales. Estos cambios morfológicos han reducido la capacidad hidráulica del cauce aumentando el riesgo de desborde en el VIRCh (Kaless, 2011b).

El atrofiamiento del cauce se debe a una combinación de factores: a) reducción en la capacidad de transporte producto del cambio en el régimen de caudales, b) aporte de sedimentos desde las cuencas laterales ubicadas entre la presa y el paraje de Boca Toma. En este estudio se analizaron las fuentes históricas sobre mediciones de transporte de sedimentos en suspensión los cambios en la capacidad de transporte empleando fórmulas empíricas y se evaluó el aporte de sedimentos desde las cuencas torrenciales mediante modelos de pérdida de suelos y transferencia de sedimentos.

Radares meteorológicos en Patagonia

Este trabajo focalizó el análisis de posibles sitios de ubicación de radares en la Patagonia, y el caso particular de un RM en el VIRCh. El documento contribuyó a la selección de posibles sitios al SINARAME, Sistema Nacional de Radares Meteorológicos. Entre sus fundamentos se muestran una selección de casos de eventos severos de lluvia y nieve,

crecidas extraordinarias y excepcionales, problemas causados por fuertes vientos, cenizas de incendios forestales y de campos y pastizales, cenizas volcánicas.

Este trabajo tuvo 13 avales científicos técnicos de distintos docentes investigadores de Universidades Nacionales Patagónicas. Asimismo, el documento adquirió entidad institucional siendo presentado por el Sr. Rector de la UNPSJB ante el Servicio Meteorológico Nacional. Con posterioridad, a consecuencias de este documento, el Sr. Gobernador de la Provincia del Chubut se dirigió a la Secretaría de Obras Públicas de la Nación para reclamar la instalación de un Radar Meteorológico Argentino en la Provincia (Serra, 2011).

Sistemas mentales para la resolución de problemas y diseño de proyectos

El trabajo se desarrolla en el marco de la tesis final de la maestría de Diseño, Gestión y Dirección de Proyectos de la Universidad de León (España), en la cual se expone la metodología para el desarrollo de un proyecto que permita gestionar eficientemente la disposición final de los efluentes de la ciudad de Trelew, dando solución a los conflictos ocurridos desde el colapso del mismo, tras las copiosas lluvias acontecidas en el año 1998 que provocaron el desborde del sistema de tratamiento.

El estudio se realizó a través de una investigación descriptiva y el diseño del proyecto que daría solución al conflicto, proponiendo una metodología para el reconocimiento del problema y la resolución del mismo por medio del planteamiento de un sistema deseado, que va hasta un sistema ofrecido pasando por un proceso creativo.

Realizado el análisis de la situación, se identificó que el problema era la: incapacidad del sistema de tratamiento lagunar existente, para contener y tratar las aguas residuales domésticas y pluviales de la ciudad, ya que el mismo fue adoptado en 1950, desconociendo el vertiginoso crecimiento poblacional que aconteció en la localidad. Planteándose como objetivo general para lograr la solución: Diseñar un sistema eficiente para el tratamiento de efluentes, mitigando el impacto ambiental y reutilizando el efluente, para la ciudad de Trelew provincia del Chubut (Nozijkoswki, 2011).

2015-PI 1226: planificación y GIRH en la cuenca del Rio Chubut

Productos para la planificación y gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca del Rio Chubut. SCyT, UNPSJB 2015-2017. Director: Juan Serra. Co-director: María Jesús Chachero. Investigadores: Marcelo Ambrosio, Laura Brandizi, Gabriel Kaless, Héctor Andrés Malnero, Martín Nozijkoswki, José M. Sainz Trápaga.

Este proyecto tuvo por finalidad contribuir con las políticas públicas de planificación y ordenamiento territorial en la cuenca del Rio Chubut, con foco en la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH).

El objetivo general del proyecto fue contribuir con productos científico-técnicos a la planificación hídrica de la Cuenca del Rio Chubut, en el marco de la Gestión Integrada de los recursos hídricos.

Las gravísimas circunstancias y consecuencias ocurridas en la ciudad de Comodoro Rivadavia por ocurrencia de lluvias extremas en 2017, y en todo el Este chubutense, incluyendo lluvias extremas ocurridas en 2016, motivaron que el grupo investigador reorientara el foco de investigación a esta temática en particular, lo cual se muestra en la producción detallada en su informe final. Se mencionan seguidamente algunas de las más relevantes.

Modelación de variables hidroambientales

En proyectos anteriores se avanzó en técnicas de modelación matemática de tipo determinística, donde para describir el comportamiento de un fenómeno físico-hidrológico dado, se aplicaron un conjunto de leyes físicas relacionadas, variables en el tiempo y/o en el espacio. Por caso, se cita los modelos MHIG y MHIG-SIG, con aplicaciones en la estimación de crecidas máximas en pequeñas y medianas unidades hidrológicas, en el VIRCH, y en zonas de meseta patagónica en general. Se mencionan contribuciones presentadas en el CONAGUA 2017, referidas a tormentas de lluvias extremas producidas en el Este de la Provincia del Chubut y en la ciudad de Comodoro Rivadavia, en particular (Serra et. al., 2017a; Serra et. al., 2017b).

En otra actividad del proyecto se procedió a analizar técnicas de modelación estocástica, donde no se conoce el resultado esperado sino su probabilidad de ocurrencia, y en consecuencia, se admite la existencia de incertidumbre. La construcción de modelos estocásticos, o basados en datos, implica interactuar primeramente entre la teoría y la práctica, y la selección de una clase de modelo acorde al objetivo trazado. Se utilizaron métodos de identificación basados en los datos y el conocimiento del sistema, se identificaron subclases de modelos, partiendo de una identificación tentativa para definir los parámetros iniciales de la modelación, y un primer ajuste, también tentativo, cuyos resultados alimentan métodos más refinados. Finalmente, se verificó el modelo con el objeto de encontrar y corregir problemas de ajuste.

Se aplicaron técnicas de análisis espectral a las series de caudales líquidos registradas históricamente, y relacionadas con el funcionamiento hidrológico del tramo inferior del río Chubut. Se analizaron, adicionalmente, diversas cuencas de la meseta central patagónica.

Se consideraron las series de caudales aportados al embalse Florentino Ameghino, los caudales erogados del embalse, y las series de caudales registradas por las estaciones hidrométricas existentes aguas abajo.

Para realizar la modelación de las ondas de caudales líquidos y sólidos mediante modelos basados en ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System), en primera instancia, se consideraron modelos independientes para cada uno de los fenómenos en estudio en cada sección de control donde se deseaba estimar los caudales.

Como variables de entrada se tomaron los datos de precipitación (pluviograma), precipitación total en las últimas 72hs, niveles del pelo de agua y de turbiedad en los puntos de control intermedios comprendidos entre la sección de control en estudio y la salida de la central hidroeléctrica Florentino Ameghino (Malnero et. al., 2017).

Calidad de aguas

Se recopiló información en organismos específicos sobre mediciones de parámetros físicoquímicos de las aguas superficiales. Se establecieron estaciones volantes y realizaron campañas de medición en campo (turbiedad, SST, OD, DQO, Bacteriología).

En gabinete se trabajó en la construcción de un índice o indicador del tipo del definido por “Water Quality Index – WQI”, de la Fundación de Sanidad Nacional de los Estados Unidos, para el Índice de Calidad de Aguas (ICA).

Un ICA es un indicador basado en una expresión simple conformada por una combinación más o menos compleja de un número de parámetros, los cuales sirven como una medida de la

calidad del agua. Puede ser representado por un número, rango, descripción verbal, símbolo, color.

Por caso pueden citarse trabajos similares producidos por investigadores de la Universidad Nacional de Córdoba y el Instituto Nacional del Agua para el Lago San Roque y el Dique Los Molinos (Córdoba). Se mencionan los trabajos sobre filtro biológico aireado anaeróbico en el tratamiento de lagunas facultativas (Ambrosio et. a., 2017), y de evolución espacial a través de parámetros indicadores de calidad de agua subcuenca (Bianchi, et. al., 2017).

SINARAME Etapas I y II

Este proyecto de investigación tuvo una fuerte interacción con el proyecto de Sistema Nacional de Radares Meteorológicos, siendo el director el responsable de la unidad de Inspección del Contrato entre la Secretaría de Recursos Hídricos de la Nación e INVAP SE, a través de Convenio y Actas Complementarias entre la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco y el Instituto Nacional del Agua. A partir de julio de 2014 la oficina técnica de Inspección se instaló en la sede de Av. Gale 57, Trelew, Chubut, (hoy oficina de investigación y posgrados del DICH). Producto de la interacción con el SINARAME se destaca la publicación sobre el primer sistema integrado de radares meteorológicos de Latinoamérica (Rodríguez, et. al., 2017; Serra et. al., 2017).

Sedimentología e hidráulica de Ríos

Esta componente constituyó una de las principales líneas de trabajo, impulsadas por el Dr. Gabriel Kaless. Entre su producción se destacan trabajos sobre estimación de caudal máximo en cursos de agua efímeros (Kaless y Bastida, 2017a), simulación unidimensional hidráulica-sedimentológica (Kaless y Bastida, 2017b).

Otras actividades relacionadas

Se mencionan además trabajos sobre una instalación hidráulica de recirculación de flujo con propósitos múltiples (Bastida, et. al., 2017), proyecto de presa de regulación Nacimiento del Río Senguerr (Sainz Trápaga et. al., 2017a), acueducto del Valle Inferior del Río Chubut (Sainz Trápaga et. al., 2017b),

Una selección de resultados de estos proyectos fueron publicados en un número especial de la Revista Cuadernos de Ingeniería Civil-Hidráulica que edita el Centro de Documentación del Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad citada (Serra et. al., 2017c).

2018-PI 1464: Eventos severos en ambiente semiárido

PI “*Parametrización y análisis de eventos severos en ambientes de clima semiárido. Casos de la Patagonia Central.* Director: Juan Serra, Co-director: Gabriel Kaless. Investigadores: Marcelo Ambrosio, Rodrigo Bastida, Érico Bianchi, Franco Belcaro, Laura Brandizi, María Jesús Chachero, Carlos Díaz Farias, Daniel González, Sebastián Iglesias, Héctor A. Malnero, Martín Nozijkoswki, Milton Villar, Dante Zappellini. Alumna: Mayra Rubinich.

Este proyecto de investigación, liderado por el Dr. Gabriel Kaless, se encuentra en su fase final, de redacción y presentación del Informe Final. Algunos de sus resultados son presentados en este Volumen 4 de Cuadernos de Ingeniería Civil Hidráulica, de Ed. CD-DICH.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

I) PRODUCIDA: Catálogo (bibliografía, documentos y material de divulgación más relevante de resultados de investigaciones. CD-DICH, Centro de Documentación del Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica)

PI N° 38, Investigación y Desarrollo de Técnica Hídricas de Manejo y Control del Valle Inferior del Río Chubut. 1986/90. (Director: Juan J. Serra. Investigadores: Gustavo Ichazo, Felipe Clerici, José M. Sainz Trápaga, Héctor A. Malnero, Teddy E. Villegas. Alumnos: Mabel Jones. Néstor Castillo):

Ichazo Gustavo, Castillo N. (1988). Geología y Geomorfología de la Cuenca. Ref. cddich: PI 38-IA IDTH /3/1988b.

Ichazo Gustavo. (1989); Análisis de la dinámica geomorfológico determinante del diseño actual del Río en el VIRCh. Ref. cddich: PI 38-IDTH /5/1989b.

Sainz Trápaga José, Malnero H. (1988). Modelo de Operación de Embalse Florentino Ameghino: Informe de Avance. Ref. cddich: PI 38-IDTH /4/1988a

Sainz Trápaga José, Malnero H. (1990). Formulación y evaluación de Modelos Básicos Alternativos, Modelo de Operación de Embalse F. Ameghino, 2 tomos; Ref. cddich: PI 38-IDTH /6/1990.

Serra Juan (1987) VIRCh: Problemática Hídrica. Pautas para su estudio. Ref. cddich: PI 38-IDTH /2/1987^a.

Serra Juan y Clerici F. (1989). GAIMAN: Modelo matemático de transformación lluvia-caudal para pequeñas cuencas aluvionales en áreas de la meseta semiárida patagónica. Ref. cddich: PI 38-IDTH /7/1989^a.

Serra Juan, Clerici F. y Malnero H.; (1987). Hidrología Estadística Aplicada. Ref. cddich: PI 38- IDTH /1/1987b.

PI N° 138, Estimación de crecidas en el Valle Inferior del Río Chubut; SCyT, UNPSJB. 1.992/1995. (Director: Juan Serra. Investigadores: María Jesús Cchachero, Héctor Andrés Malnero, José Sainz Trápaga, Teddy E. Villegas, Alumnos: Sergio Ferraría, Marcelo Bulacio):

Malnero Héctor A. (1994). Operación del Embalse F. Ameghino bajo severas restricciones por capacidad de conducción del cauce en el Valle Inferior del Río Chubut; Ref. cddich: PI 138-IA/1994^a.

Malnero Héctor A., Serra J. (1994). Estudio de crecidas de embalse. Ref. cddich: PI 138-IA/1994c.

Serra Juan (TI), y Serra J., Chachero M. J. (TII). (1994). Modelo <VIRCH> de simulación de hidrogramas de crecidas aluvionales y su propagación en el cauce inferior del Río Chubut: Tomo I y II; Ref. cddich: PI 138-IA/1994b.

Serra Juan J. y Chachero María J. (1993). Red de monitoreo de crecidas y control ambiental del cauce inferior del Río Chubut; Ref. cddich: PI 138-IA/1993.

Serra Juan, Villegas T., Sainz Trápaga J., Ferraria S. y Bulacio M. (1995). Estimación de crecidas en el Valle Inferior del Río Chubut: Inf. Final; Ref. cddich: PI 138-IF/1995.

- Serra Juan. (1994a). Caracterización estadística hidrológica del Río Chubut en Los Altares, Monografía, Proyecto de Investigación. Ref. cddich: PI 138-IA/1994d.
- Serra Juan. (1994b). Modelo <RAWSON>: Simulación lluvia escorrentía en pequeñas áreas llanas de la meseta patagónica; Presentado en Congreso Nacional del Agua, La Plata, 1994. Ref. cddich: PI 138-IA/1994e.
- Villegas Teddy, Serra J., Ferraria S. y Bulacio M. (1994). Estudio de precipitaciones en el Valle Inferior del Río Chubut; Presentado en Congreso Nacional del Agua, La Plata, 1994. Ref. cddich: PI 138-IA/1994d.

PI N° 194, Ordenación del Cuenco Aluvional Area Dique Ameghino – Boca Toma y su Impacto Ambiental en el VIRCh. 1995/1998. (Director: Juan Serra. Investigadores: María Jesús Chachero, Héctor Andrés. Malnero, José Sainz Trápaga, Alejandro Sorondo. Alumnos Teddy Edgardo VILLEGAS Al. Javier BAN Christian DAVIES SALA):

- Ban Javier y Davies Sala C. (1995). Determinación de la Tormenta de Diseño en el Cuenco Torrencial Experimental de Cañadón Baraibar - Gaiman, Chubut. Ref. cddich: PI 194-IA/1995.
- Chachero María Jesús y Sorondo A. (1996). Comparación de Métodos para la estimación de la Evapotranspiración en el Valle Inferior del Río Chubut. Ref. cddich: PI 194-IA/1996c.
- Chachero María. (1998). Actualización de las Ecuaciones de Tormentas en el VIRCh. Ref. cddich: PI 194-IA/1998b.
- Malnero Héctor A. (1998). Determinación de la pérdida de suelos en el cuenco aluvional Ameghino - Boca Toma mediante el uso de imágenes satelitales. Ref. cddich: PI 194-IA/1998^a.
- Malnero Héctor Andrés. (1996). Laboratorio de Hidráulica: Implementación de un Modelo Físico de Defensas de Crecidas y Protección de Márgenes. Ref. cddich: PI 194-IA/1996b.
- Sainz Trápaga José. (1996). Pequeñas Presas de Laminación de Crecidas Torrenciales en proximidades de los núcleos urbanos del Valle Inferior del Río Chubut: Tipología de Obras y su Adaptación al Medio Ambiente; Ref. cddich: PI 194-IA/1996^a.
- Serra Juan (1999). Riesgo de erosión hídrica en el cuenco aluvional del área Dique F. Ameghino y Boca Toma, Valle Inferior del Río Chubut. *Cuadernos del Curigram*, UNR, Vol 5(2):63-83. ISSN 1514-2906.
- Serra Juan y Sainz Trápaga J. (1997). El control aluvional en áreas urbanas del Valle Inferior del Río Chubut. Presentación escrita c/ aceptación, en Seminario Internacional s/Manejo del Agua Pluvial Urbana, Santa Fé). Ref. cddich: PI 194-IA/1997a
- Serra Juan, Malnero A., Chachero M. J., Sainz Trápaga J., Sorondo A., Ban J. y Davies Sala C. (1998b). Ordenación del Cuenco Aluvional Area Dique Ameghino – Boca Toma y su Impacto Ambiental en el VIRCh: Informe Final. Inédito. Ref. cddich: PI 194-IF/1998c.
- Serra Juan, Sainz Trápaga J., Greco W. y Malnero H. (1998a); La Seguridad en las Obras Hidráulicas de Control de Crecidas en Cuencos Urbanos Aluvionales Urbanos del Valle Inferior del Río Chubut y Puerto Madryn (Contribución especial del DICH en el “Taller de Evaluación Técnica s/Ingeniería de Crecidas Aluvionales y Pluviales Urbanas en el

VIRCh”, con motivo de las inundaciones de Abril de 1998 en el VIRCh). Ref. cddich: PI 194-IA/1998c.

Serra Juan. (1997). Herramientas para la Evaluación de la Erosión Hídrica: Modelo <LADERAS-v97.xls>, de estimación de erosión en laderas torrenciales en el área aluvional Dique Ameghino - Boca Toma. Ref. cddich: PI 194-IA/1997b.

PI N° 274, Modelos Físicos y Matemáticos de Aplicación para el Control de Crecidas en Ambientes Torrenciales Patagónicos. 1999/2002. (Director: Juan Serra. Investigadores: María Jesús Chachero, Héctor Andrés Malnero, José Sainz Trápaga Winston Greco. Alumno: Martín Nozijkoswki, Mauricio Williams Quintana, Francisco Ojeda):

Malnero Héctor A. (1999). Determinación de la pérdida de suelos en el cuenco aluvional Ameghino – Boca Toma, mediante el uso de imágenes satelitales; Modalidad: doc. escrito; 11 pgs. Ref. cddich: PI 274-IA/1999c.

Sainz Trápaga José M. y Greco W. (1999). Diagnóstico de fallas del sistema de presas de laminación de crecidas del Cañadón Baraibar, Gaiman, Pcia. del Chubut. 26 pgs. Ref. cddich: PI 274-IA/1999d:

Serra Juan (2002), El Riesgo Aluvional, Cuenco Aluvional del Area Dique F. Ameghino y Boca Toma, Valle Inferior del Río Chubut, Monografía, Proyecto de Investigación PI N° 274/1999-2002 “Modelos físicos y matemáticos de aplicación para el control de Crecidas en ambientes torrenciales patagónicos”, Secretaría de Ciencia y Tecnología, U. N. de la Patagonia San Juan Bosco, Pcia. del Chubut; 14 pgs., inédito. Ref. cddich: PI 274-IA/1999e:

Serra Juan (1999). Riesgo de erosión hídrica en el cuenco aluvional del área Dique F. Ameghino y Boca Toma, Valle Inferior del Rio Chubut. *Cuadernos del Curiham*, UNR, Vol 5(2):63-83. ISSN 1514-2906.

Serra Juan J. (2000a). El Cañadón del Parque Industrial, Calle Canal y el Problema Pluvial de Trelew. Nota II; modalidad: art. escrito; Pcia. del Chubut: Semanario Patagonia Universidad, Diario El Chubut, Diario Jornada; 3 pgs. Ref. cddich: PI 274-IA/2000c.

Serra Juan J. (2000b). El Cañadón del Parque Industrial, Calle Canal y el Problema Pluvial de Trelew. Nota I; modalidad: art. escrito; Pcia. del Chubut: Semanario Patagonia Universidad, Diario El Chubut, Diario Jornada; 3 pgs. Ref. cddich: PI 274-IA/2000d.

Serra Juan J. (2000c). *¿Que hacer con la Laguna Negra?* (Rawson, Pcia. del Chubut); Pcia. del Chubut: Semanario Patagonia Universidad Nro. 52, Diario El Chubut, Diario Jornada; 2 pgs. Ref. cddich: PI 274-IA/2000b.

Serra Juan, Malnero H., Sainz Trápaga J. y Chachero M. J. (2001). Español; Caracterización de crecidas y riesgo aluvional en el Valle Inferior del Río Chubut. modalidad: doc. escrito, en SIMICH, Seminario Internacional sobre Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas, Resúmenes, pg. 72; Editorial: UNR editora. Ref.: cddich: PI N° 274-IA/2001.

Serra Juan, Sainz Trápaga J. y Malnero H.(2000). Limitaciones de disponibilidad hídrica del Río Chubut para nuevas áreas bajo riego o derivaciones para otros fines en el Valle Inferior. En: (Memorias) XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica – Córdoba 2000. Ed. Alejandro Graziani, Ind. Gráfica, 2000. V(II):693-702. Série:I; ISSN/ISBN: 9503302692.

- PI N° 453 Riesgo aluvional y seguridad hídrica en ambientes torrenciales de la meseta semiárida patagónica: parametrización hidrológica. 2002/2006.** (Director: Juan José Serra. Investigadores: María Jesús Chachero, Héctor Andrés Malnero, Marcelo J. Ambrosio, María Sainz Trápaga. Alumnos: Estela Dora HELT, Martín Nozjowski):
- Ambrosio Marcelo, (2004), "Procesamiento Pesquero, Disposición de Residuos, e Impacto Ambiental" Anales del "14° Congreso Argentino de Saneamiento y Medio Ambiente" Buenos Aires – (2004), Organizada por: A.I.D.I.S. Argentina – Presentación Oral N° 30.
- Bertoni Juan .C., Paoli C. y Serra, J. (2004b) "Ciclo de Conferencias s/ Inundaciones Urbanas en la Argentina"; Esquel (30/8/2004), El Bolsón (31/8/2004) y Trelew (1/9/2004).
- Bertoni, Juan Carlos., Ambrosino, S., Daniele, A., Maza, J.A., Paoli, C. U. y Serra, J. 2004a. Inundaciones urbanas en la Argentina. 1ra. Ed.. Editorial Universitas, UNC. v. I, p. 155-195. ISBN:9879406761. Córdoba, Argentina.
- Malnero Hector A. y Chachero M. J. (2004). Documento de resumen de actividades de investigación y ponencias; Jornadas de Ciencia y Tecnología de la Facultad de Ingeniería, Comodoro Rivadavia Nov 2004. CD-DICH.
- Sainz Trápaga, José. (2004). Informe de Evaluación de Impacto en Obra de Limpieza y Dragado del Río Chubut, Etapa I. CD-DICH.
- Serra Juan (2002b). "Simulación hidrológica para el estudio de crecidas máximas en paisaje hídrico de meseta patagónica (PHMP)", Informe Final de PI 274.- CD-DICH.
- Serra Juan (2003b). "Metodología integrada de estimación de crecidas en ambientes torrenciales típicos de áreas de meseta en la región semiárida patagónica". En: Tesis de Maestría en Recursos Hídricos en Zona de Llanura, Escuela de Posgrado y Formación Continua, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, U. N. de Rosario; Argentina. Defensa: 14/4/2003, Director de tesis: Dr. F. Horne; Tribunal: Dra. N. Pouey / Dr. L. Vives / Dr. E. Zimmermann. Inédito. 168 pag.
- Serra Juan y Chachero M. J. (2003). Modelación hidráulica HEC-RAS de tramo de Río Percey, Trevelin, Chubut. Informe Final PI 274. CD-DICH
- Serra Juan, Ares J., Testino A., Feller J., Malnero H., Chachero M., Stampone J. Gallastegui, R., Pagnoni G., Regnando M., March M., Scalise A. y Sainz Trápaga J. (2006c). Plan de manejo y gestión integral del sistema de tratamiento de efluentes cloacales de la ciudad de Trelew (PMGI-EC Trelew)". Convenio UNSJP; Municipalidad de Trelew. En Conferencias de gestión de efluentes cloacales de Trelew. Julio de 2006. Tomos 1 a 17. Centro de Documentación CD-DICH, UN Patagonia SJB, Trelew.
- Serra Juan, Sainz Trápaga J., Malnero H., Villegas T. y Greco W. (2005b). Sistema de retardo de crecidas del cañadón del Parque Industrial de Trelew (PIT). CD-DICH.
- Serra Juan, Sainz Trápaga J., Malnero H. y Chachero M.J. (2005a). Aspectos más relevantes del plan de acciones estructurales y no estructurales para el control de crecidas y saneamiento del Arroyo Esquel. CD-DICH.
- Serra Juan. (2003a) El problema del agua en el Valle y Puerto Madryn y el desafío político de concretar un proyecto común, Diario El Chubut.
- Serra Juan. (2004). "Capítulo 7: Urbanización e Inundaciones en sistemas hídricos del centro de la región Patagónica"; en Bertoni, J.(com. y ed.), et al; "Inundaciones Urbanas en la

- Argentina", Córdoba. Ed. Universitas, UNC. (Auspicios Global Water Partnership, Arg-Cap-Net, CPCNA.)
- Serra Juan. (2005). "Obras Hidráulica", V Jornadas de Medio Ambiente, "Agua: Patagonia y su Elemento Vital", Comodoro Rivadavia, 2, 3 y 4 de JUNIO de 2005; Municipalidad de C. Rivadavia y UNPSJB. CD-DICH.
- Serra Juan. (2006a). Sistemas hidrológicos mixtos en paisaje de meseta: Maro conceptual.. Cuadernos del CURIHAM, Vol. 12, ISSN 1514-2906, pp 25-42.
- Serra, Juan (2006b). "Estimación de Crecidas Máximas en Paisaje de Meseta"; En: Tesis de Doctorado en Ingeniería (Mención en Hidráulica) Carrera de Doctorado en Ingeniería, Centro Rosario de Investigaciones Hidroambientales (CURIHAM), Escuela de Posgrado y Formación Continua, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, U. N. de Rosario, Argentina. Defensa: 7/8/2007, Director de Tesis: Dra. N. Pouey. Inédito. 204 pag. Jurados: Dr. M. Varni, Dr. E. Zimmermann, Dr. Luis Vives).
- Stampone Julio, Serra J. y Durante C. (2005). Prognosis del Funcionamiento Hidráulico de Lagunas de Evaporación de Efluentes Industriales. CD-DICH.
- PI N° 648 Aspectos hidroambientales de sistemas lagunares en paisaje de meseta, en la región Nordeste del Río Chubut. 2007/2010:** Director: Juan Serra. Investigadores: María Jesús Chachero, Marcelo Julio Ambrosio, Hector Andres Malnero, José María Sainz Trápaga, Gabriel Kaless, Martín Nozijkoswki. Alumnos: Lucrecia Gonzalez, Sabrina Haag:
- Ares Jorge y Serra J. (2008). Selection of sustainable projects for floodplain restoration and urban wastewater management at the lower Chubut River valley (Argentina). Landscape and Urban Planning 85 (2008) 215–227. ELSEVIER.
- Malnero Héctor A. (2010c). Aplicación METRIC al Valle Inferior del Rio Chubut. UNPSJB. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 1 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.
- Serra Juan J (2009b). MHIG, modelo hidrológico Gaiman: GMRT, Guía de Modelos y Referencias Técnicas. MHIG, MODELO HIDROLÓGICO GAIMAN: Autor editor (ebook), 2009. 91 p. ISBN:978-987-05-6274-0.
- Serra Juan J. (2009b). Metodología integrada de estimación de crecidas en ambientes torrenciales típicos de áreas de meseta en la región semiárida patagónica. Guadalajara, México: Acervos científico tecnológicos, Univ. Guadalajara, 2009. 165 p. ISBN:978-987-05-4496-8.
- Serra Juan. (2006) Sistemas hidrológicos mixtos en paisaje de meseta. UNPSJB. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 1 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.
- Serra Juan. (2007). Tesis de doctorado : "Estimación de Crecidas Máximas en Paisaje de Meseta". Universidad Nacional de Rosario (UNR), 2007.
- Serra Juan, Chachero, M.J., Ambrosio M., Malnero H., Sainz Trápaga J., Kaless G., Nozijkoswki M., Gonzalez L. y Haag S. (2010a). Aspectos hidroambientales de sistemas lagunares en paisaje de meseta, en la región nordeste del río chubut. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 1 N° 1, año 2011 Edición especial dedicada a resultados del proyecto de investigación: documentos del proyecto de investigación. Cd-dich, ISBN 1853-8479:

- Ambrosio Marcelo J. (2010). Caracterización hidrodinámica de un filtro biológico de flujo ascendente. UNPSJB. Cd-dich, ISBN 1853-8479
- Ambrosio Marcelo y Serra J. (2010a). Metodo de aforo químico aplicado a mediciones expeditivas en pequeños cursos de agua. UNPSJB. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 1 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.
- Chachero M. J. (2010). Estudio de precipitaciones en la ciudad de Trelew, análisis estadístico y ecuación de lluvia. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 1 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.
- Malnero Héctor A. (2010a). Modelos de evaporación de aguas residuales. UNPSJB. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 1 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich
- Malnero Héctor A. (2010b). Sistemas de evaporación acelerada de aguas residuales industriales Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 1 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.
- Serra Juan (2010). Sistemas hidrológicos mixtos en paisaje de meseta. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 1 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.
- Serra Juan y Ambrosio M. (2010b). Fuentes alternativas de abastecimiento de agua poblacional a la ciudad de Esquel. UNPSJB. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 1 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.
- Serra Juan y Chachero M. J. (2010) El análisis estadístico de precipitaciones y tormenta de diseño aplicados a la región del valle inferior del Río Chubut. UNPSJB. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 1 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.
- Serra Juan y Chachero M. J. (2011) Modelo de balance hídrico superficial de un sistema lagunar, caso “Laguna Negra”, Provincia del Chubut. UNPSJB. Cuadernos del CURIHAM, Vol. 17, pp. 59-76. UNR Editora. ISSN N° 1514-2906. Rosario. Argentina.
- Serra Juan. (2010b). Presentación del Informe Final del “Plan de manejo y gestión integral del sistema de tratamiento de efluentes de la ciudad de Trelew”. Sala de conferencias del Museo Egidio Feruglio, Trelew, Pcia. del Chubut, Julio de 2006. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 1 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.

PI 874: Analisis y modelacion de variables hidroambientales en la cuenca inferior del Rio Chubut. (SCyT – UNPSJB). 2011/2014: (Director: Juan Serra. Investigadores: María Jesús Chachero, Marcelo Ambrosio, Gabriel Kaless, Héctor Malnero, José M. Sainz Trápaga, Martín Nozijkoswki. Alumna: Sabrina Hagg):

Beltramone Carlos, Serra Juan, Ambrosino Silvio, Barbeito Osvaldo, Malnero Héctor, y Sanchez Roque (2011). Estudios básicos de caracterización de sedimentos y batimetría en el embalse del dique La Falda. Simposio Regional de Hidráulica de Rios. Santiago del Estero, 2 al 4 noviembre 2011.

- Chachero, M.J. (2013). “Análisis de Precipitaciones Máximas en Comodoro Rivadavia” Cuadernos del CURIHAM, UNR Editora, Vol 20, Año 2014, URI:<http://hdl.handle.net/2133/7139>.
- Chachero, M.J. (2014). “Precipitaciones Máximas en Puerto Madryn. Análisis de caso: Tormenta de abril de 2014”. Revista Argentina de Ingeniería (RADI), Año 2 Vol. IV, Octubre de 2014, pp. 65 a 72
- Kaless Gabriel, Lenzi Mario A. y Mao Luca. (2011c). Regimen theories in gravel bed rivers; Preliminary comparison between disturbed rivers due to anthropic activities (Northeastern Italy) and natural rivers (Patagonia, Argentina); Convegno di Medio Termine dell’Associazione Italiana di Ingegneria Agraria, Belgirate Italia.
- Kaless Gabriel, Lenzi Mario A. y Mao Luca. (2013a). A 2D hydrodynamic-sedimentological model for gravel-bed rivers. Part I: theory and validation. 10th Conference of the Italian Society of Agriculture Engineering, Viterbo, Italia. Journal of Agriculture Engineering, Vol XLIV(s1) ISSN 1974-7071.
- Kaless Gabriel, Mao L. (2011). Numerical simulation of armour layer development under conditions of sediment starvation; Convegno di Medio Termine dell’Associazione Italiana di Ingegneria Agraria, Belgirate Italia.
- Kaless Gabriel, Mao Luca, Lenzi Mario, A. (2014a) The response of a gravel-bed river planform configuration to flow variations and bed reworking: a modelling study. Hydrological Processes (presentado en 2014 y aprobado para su publicación en 2015). DOI: 10.1002/hyp.10504.
- Kaless Gabriel, Mao Luca y Lenzi Mario A. (2014b). Regime theories in gravel-bed rivers: models, controlling variables, and applications in disturbed Italian rivers. Hydrological Processes 28(4): 2348–2360; DOI: 10.1002/hyp.9775.
- Kaless Gabriel, Moretto Johnny, Delai Fabio, Mao Luca y Lenzi Mario A. (2013b). A 2D hydrodynamic-sedimentological model for gravel bed rivers. Part II, Case study: the Brenta River in Italy. 10th Conference of the Italian Society of Agriculture Engineering, Viterbo, Italia. Journal of Agriculture Engineering, Vol XLIV(s1) ISSN 1974-7071.
- Rico Andrea, Baldissone Marcelo y Serra Juan. (2013). Limitantes en la Definición del Proyecto de Abastecimiento de Agua en Parque Nacional Quebrada del Condorito. XII Simposio Iberoamericano sobre planificación de sistemas de abastecimiento y drenaje. SEREA 2013. Buenos Aires, 11 al 15 noviembre 2013. 10pp.
- Rigon E., Moretto J., Mao L., Picco L., Delai F. Ravazzolo D., Lenzi M. A. y Kaless G. (2012). 30 years (1981-2011) of vegetation cover dynamics and planform changes in the Brenta River (Italy): implications for channel recovery. International Symposium of IAHS-ICCE. Chengdu, Sichuan, China. ISBN Number: 978-1-907161-33-9.
- Serra Juan y Ambrosio Marcelo. (2011a). Fuentes alternativas de abastecimiento de agua poblacional a la ciudad de Esquel. CONAGUA 2011. Resistencia, Chaco, Junio 2011.
- Serra Juan. (2011b). Expositor. Riesgo hidrológico y gestión integrada de los recursos hídricos en el Valle Inferior del Río Chubut. Ciclo de charlas sobre investigación, ciencia y tecnología en la ingeniería civil hidráulica, y sus aplicaciones en el Valle Inferior del Río Chubut Jueves 24 de Noviembre de 2011, Sede Trelew UNPSJB.

- Serra Juan. (2011c). Expositor. Riesgo hidrológico y gestión integrada de los recursos hídricos en el Valle Inferior del Río Chubut. Ciclo de charlas agua y sociedad. Comodoro Rivadavia, Agosto 2012. UNPSJB
- Serra Juan. (2013). Laguna Negra de ayer a hoy. Foro del agua de Trelew. Ciclo de charlas sobre Laguna negra. UNPSJB, Trelew, 3 de Octubre de 2013.
- Serra Juan, Kaless G., Chachero M.J., Ambrosio M., Nozijkoswki M., Malnero H., Sainz Trápaga J., Hagg S. (2014). Analisis y modelacion de variables hidroambientales en la cuenca inferior del Río Chubut. Vol. 2 N° 1, año 2014. Edición especial dedicada a resultados del proyecto de investigación: documentos del proyecto de investigación. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 2 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich:
- Ambrosio Marcelo J; Varisco R. Iglesias S., Ayestarán A. y Calzetta, C. (2011a). Filtro de roca aireado nitrificación y desnitrificación bajo distintas cargas. UNPSJB. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 2 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.
- Ambrosio Marcelo J; Calzetta C., Ayestarán A. y Varisco R. (2011b). Filtro de roca aireado como tratamiento terciario para remoción de carga orgánica y bacteriológica, bajo distintas condiciones de alimentación. UNPSJB. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 2 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.
- Chachero M. J. (2012). Estudio de precipitaciones en la ciudad de Trelew, análisis estadístico y ecuación de lluvia. Cuadernos del CURIHAM, Vol. 18, pp. 23-38. UNR Editora, Rosario, Argentina.
- Chachero María Jesús. (2011a). Análisis de precipitaciones máximas en Comodoro Rivadavia. UNPSJB. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 2 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.
- Chachero María Jesús. (2011b). Estudio de precipitaciones en Puerto Madryn. Análisis de caso: tormenta de abril de 2014. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 2 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.
- Kaless Gabriel. (2011a). Evaluación del modelo RUSLE para estimar la erosión de suelos en ambientes de clima desértico en Patagonia. UNPSJB. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 2 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.
- Kaless Gabriel. (2011b). Alteración en la dinámica de los sedimentos en el Río Chubut aguas abajo de la presa Florentino Ameghino. UNPSJB. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 2 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich
- Nozijkoswki Martín. (2011). Sistemas mentales para la resolución de problemas y diseño de proyectos. Aplicación del método: Disposición final de los efluentes cloacales de la ciudad de Trelew. UNPSJB. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 2 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.
- Serra Juan (2011). Radares meteorológicos en patagonia: Contribución a la evaluación y selección de sitios de emplazamiento. UNPSJB. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 2 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.

PI 1226: Productos para la planificación y gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca del Río Chubut. 2015/2017: Director: Juan Serra. Investigadores: Marcelo

Ambrosio, Laura Brandisi, María Jesús Chachero, Gabriel Kaless, Héctor A. Malnero, Martín Nozijkoswki, José Sainz Trapaga:

- Serra Juan, Ambrosio M., Ayestaran A., Bastida R., Bertoni J. C., Bianchi E., Brandizi L., Calzetta C., Chachero M.J., De Pablo P., Fossati E., Gonzalez A., Gonzalez D., Iglesias S., Ingaramo R., Kaless G., Malnero H., Nozijkoswki M., Rodriguez A., Walker J. C. y Zappellini D. (2017c). Productos para la planificación y gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca del Río Chubut. 2015/2017. Edición especial dedicada a resultados del proyecto de investigación: documentos del proyecto de investigación. UNPSJB. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 3 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich:
- Ambrosio Marcelo, Fossati E., Ayestarán A. y Calzetta C. (2017). Filtro biológico aireado anaerobio – aerobio, tratamiento de pulido de efluentes de lagunas facultativas bajo distintas cargas hidráulicas. UNPSJB. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 3 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.
- Bastida Rodrigo, Iglesias S., Kaless G. y Malnero H.. (2017). Desarrollo de una instalación hidráulica de recirculación de flujo con propósitos múltiples. Construcción y resultados preliminares. UNPSJB. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 3 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.
- Bianchi Erico. (2017). Evolución espacial a través de parámetros indicadores de calidad de agua subcuenca El Molle,-cuenca de Gastre. UNPSJB. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 3 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.
- Kaless Gabriel y Bastida R. (2017a). Estimación del caudal máximo de crecidas extraordinarias en arroyos efímeros. Casos de los arroyos Salado y Verde (Patagonia Central). UNPSJB. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 3 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.
- Kaless Gabriel y Bastida R. (2017b). Simulación Unidimensional Hidráulica-Sedimentológica de crecidas torrenciales en cursos efímeros. Caso del Arroyo Verde en Patagonia Central. UNPSJB. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 3 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.
- Malnero H., Kaless G., Laura Brandizi. (2017) .Teleconexiones del régimen de caudales medios mensuales del Río Chubut. UNPSJB. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 3 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.
- Sainz Trápaga José, De Pablo P., Malnero H., Kaless G. y Chachero M.J. (2017a). Presa de regulación Nacimiento del Río Senguer: regulación con bajo impacto ambiental en un proyecto de aprovechamiento múltiple. UNPSJB. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 3 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.
- Sainz-Trápaga José M., Ambrosio M., Malnero H., Walker J.C., Zappellini D. (2017b). Acueducto del Valle Inferior del Río Chubut: una alternativa superadora para suministro de agua de uso poblacional. UNPSJB. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 3 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.
- Serra Juan, Chachero M. J. y Brandizi L. (2017a). Selección de eventos hidrometeorológicos severos en la Patagonia Argentina. UNPSJB. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 3 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.

Serra Juan, González D., Chachero M. J., Malnero H. y González A. y Laura Brandizi. (2017b). Indicadores de caudales máximos en cuencos urbanos de Comodoro Rivadavia ocasionados por la tormenta severa de marzo–abril de 2017. UNPSJB. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 3 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.

Serra Juan, Rodríguez A., Sainz Trápaga J., Ingaramo R., Chachero M. J., Bertoni J.C. y Brandizi L. (2017). Fundamentos del empleo de radares meteorológicos para la prevención y alerta hidrometeorológica y de otros eventos severos en zonas patagónicas. UNPSJB. Cuadernos de ingeniería civil hidráulica. Vol. 3 N° 1, ISBN 1853-8479, Cd-Dich.

Rodríguez A., Lacunza C., Serra J., Saulo C., Ciapessoni H., Caranti G., Bertoni J.C., MartinaA. (2017) SiNaRaMe: El primer Sistema Integrado de Radares Hidro-Meteorológicos de Latinoamérica. Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (UNC). ISSN 2362 - 2539 (Versión electrónica).

II) OTRA BIBLIOGRAFIA CITADA:

Allen, R.G., Tasumi, M. and Trezza, R., 2007, Satellite-based energy balance for Mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Model. ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 133(4), 380 – 394.

Rostagno César M., Coronato Fernando R. y Del Valle Héctor F. (1999). Runoff and Erosion in Five Land Units of a Closed Basin of Northeastern Patagonia. National Scientific and Technical ResearRunoff and Erosion in Five Land Units of a Closed Basin of Northeastern Patagonia. Instituto Patagonico para el Estudio de los Ecosistemas Continentales (IPEEC-CONICET).

Shames, Irving H. (1967). Mecánica de Fluidos. Ediciones Castilla. España.

Vicenty Osvaldo (1982). Estudio de precipitaciones en el VIRCh. Dirección General de Estudios y Proyectos. MESOP. Biblioteca.

TRAS LAS HUELLAS DE LAS CRECIDAS EXTRAORDINARIAS EN LA PATAGONIA SEMIÁRIDA (ARGENTINA): TIPOLOGÍAS DE IMPRONTAS, MODELO TEÓRICO Y RESULTADOS PRELIMINARES

Gabriel Kaless, Diego E. Walker y Héctor A. Malnero
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco
Av. 9 de Julio 25, Trelew, Chubut, Argentina – Tel/Fax +54 280-4428403
e-mail: gkaless@ing.unp.edu.ar

RESUMEN

Las crecidas repentinas en los sistemas fluviales efímeros de la Patagonia extraandina (Argentina) tienen su origen en eventos de lluvias intensas provocados por celdas de tormentas convectivas de reducida extensión areal. El flujo en los arroyos dura poco tiempo y alcanza velocidades elevadas. Por tales motivos resulta muy difícil la medición directa. Se recurre a reconstruir los eventos en base a las marcas dejadas por la corriente. En el presente artículo se presenta un modelo teórico de distribución de frecuencia vertical de dichas marcas que es contrastado con observaciones directas realizadas en la cuenca Sagmata (noreste de la Provincia del Chubut, Argentina). Se utilizaron dos modelos hidrodinámicos (HEC-RAS e IBER) para relacionar la elevación de las marcas con la lectura de escala registrada. El modelo HEC-RAS resultó inadecuado para resolver el flujo debido a la ocurrencia de flujo crítico a supercrítico. En cambio, el modelo IBER resolvió adecuadamente el flujo. La frecuencia de marcas predichas por el modelo concordó adecuadamente con la frecuencia empírica recabada de las observaciones post-evento. La metodología resulta prometedora para reconstruir inundaciones de intensidad extraordinaria ocurridas en el pasado reciente de la Patagonia.

Palabras Clave: crecidas repentinas, paleohidrología, modelación hidrodinámica, arroyos efímeros, Patagonia.

ABSTRACT

Flash floods in the ephemeral fluvial systems of the extra-Andean Patagonia (Argentina) originate in intense rainfall events caused by convective storm cells of reduced areal extension. The flow in the streams lasts a short time and reaches high speeds. For these reasons direct measurement is very difficult. It resorts to reconstructing the events based on the marks left by the flow. This article presents a theoretical model of vertical frequency distribution of these marks that is confronted against direct observations made in the Sagmata basin (northeast of the Province of Chubut, Argentina). Two hydrodynamic models (HEC-RAS and IBER) were used to relate the elevation of the marks to the recorded scale reading. The HEC-RAS model was found to be inadequate to resolve the flow due to the occurrence of critical to supercritical flow. In contrast, the IBER model adequately resolved the flow. The frequency of occurrence of marks predicted by the model agreed well with the empirical frequency collected from post-event observations. The methodology is promising to reconstruct floods of extraordinary intensity that occurred in the recent past in Patagonia.

Keyword: flash floods, paleohydrology, hydrodynamic modeling, ephemeral streams, Patagonia.

INTRODUCCIÓN

La Patagonia argentina es un vasto territorio de América del Sur que se extiende desde los ríos Colorado y Barrancas (Provincias de Mendoza, La Pampa y Buenos Aires) en el extremo norte, hasta el Canal de Beagle en el sur, y desde la Cordillera de los Andes en el oeste hasta el Océano Atlántico en el este. Su extensión alcanza los 790.000 km², distinguiéndose dos grandes regiones, una cordillerana y otra extraandina que se caracteriza por paisajes mesetiformes. La presencia de la cordillera restringe el pasaje de la humedad transportada por los vientos del oeste, desde el Océano Pacífico, determinando dramáticamente el clima de la región extraandina. En las regiones más próximas a la cordillera el clima es de tipo Frio-árido continental (provincias de Neuquén y oeste de Río Negro, norte de Chubut), frío-árido de transición (sur de Chubut y Provincia de Santa Cruz) y Templado-árido de transición (mitad oriental de Chubut) (Coronato et al., 2008). La precipitación media anual no supera los 250 mm y el índice de aridez (definido como el cociente entre la precipitación media anual y la evapotranspiración potencial, UNESCO, 1977) es de 0.20 en la Patagonia extraandina. La lluvia no tiene estacionalidad y puede presentarse en modo torrencial acumulándose la lámina anual en pocos eventos (Chachero, 2012, 2014) que produce impactos en las comunidades (Serra, 2004) y en los suelos (Rostagno et al., 1999).

La densidad poblacional de la Patagonia es baja. Según el Censo de 2010 la población total ascendía a 2.096.826 (sumando las provincias de Tierra del Fuego, Santa Cruz, Chubut, Río Negro y Neuquén). La población tiende a concentrarse en pocos centros urbanos. Por ejemplo, en la Provincia del Chubut, el 71.7% se concentra en tan sólo 3 ciudades (Comodoro Rivadavia, Puerto Madryn y Trelew, según Censo del año 2010). El resto de la población se distribuye entre pequeñas ciudades, comunas rurales o establecimientos rurales. La literatura científica reciente da cuenta de los estragos que producen las lluvias cuando ocurren en áreas urbanizadas tales como las ciudades costeras de Comodoro Rivadavia en el año 2017 (Paredes et al., 2020) y Puerto Madryn en el verano de 2016 (Bilmes et al., 2016). Sin embargo, los eventos extremos de lluvias también han afectado a las zonas menos pobladas. En el año 2014 la crecida del Arroyo Verde produjo el corte de la Ruta Nacional N° 3, principal arteria de circulación que vincula la Patagonia con el norte de Argentina (Kaless y Bastida, 2017a, 2017b). En el mismo evento, una crecida extraordinaria se produjo en la cuenca del Arroyo Telsen inundando el valle, produciendo una muerte y destruyendo la infraestructura vial (Escobar, 2014; Colombani et al., 2017). Más recientemente, la lluvia intensa ocurrida en marzo de 2017 en la meseta central del Chubut produjo crecidas extraordinarias en las cuencas de los Arroyos Salado y Perdido con afectación de poblaciones rurales, vías de comunicación y tendido de alta tensión (Kaless et al., 2019).

El carácter torrencial de las crecidas en arroyos de clima desértico ha sido ampliamente documentado en la literatura científica (Tooth, 2000). En estos cursos, que se encuentran secos gran parte del año, se denomina crecida al flujo independientemente de su intensidad. Las crecidas torrencales usualmente se deben a precipitaciones convectivas en pequeñas cuencas (superficie menor que 100 km²). La baja tasa de infiltración produce flujo hortoniano que genera rápidamente escorrentía. Así, los hidrogramas resultantes se caracterizan por una fase ascendente y otra recesiva muy empinada con escaso tiempo de base (Rhoads, 1990; Reid et al., 1994).

La medición de caudales suele realizarse sistemáticamente en los cursos permanentes donde se instala infraestructura de monitoreo que permite la cuantificación del recurso hídrico. En Patagonia existen numerosas estaciones de aforo en los principales cursos de agua (SIPHN, 2022). En cambio, la medición por métodos directos en arroyos efímeros

resulta difícil, por la baja frecuencia de los eventos y por ocurrir en lugares remotos, y riesgosa por la elevada velocidad de la corriente. Por tal motivo, usualmente se ha recurrido al empleo de metodologías indirectas para cuantificar el caudal pico de los eventos. Woodward et al. (2010) prepararon un estado del arte sobre los métodos alternativos para el estudio de crecidas y paleocrecidas. Se destaca la modelación computacional que provee de información sobre las características hidrodinámicas del escurrimiento y del transporte de sedimentos. Recientemente, Heritage et al. (2019) aplicaron un modelo hidrodinámico 2D para cuantificar la magnitud de dos crecidas extremas ocurridas en Sudáfrica por el ciclón Dando en enero/febrero de 2012. Comparando niveles hidrométricos simulados para distintos caudales con las marcas de la crecida medidas en campo, pudieron estimar para el caso de la cuenca del Río Olifans (superficie de 54570 km^2) un caudal comprendido entre 1.4 y $1.7 \cdot 10^5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y para el Río Sabie, un caudal $\sim 5 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (superficie de la cuenca 6320 km^2). En Patagonia, una metodología similar fue empleada por uno de los autores utilizando un modelo unidimensional para estimar la crecida en el Arroyo Verde (Kaless y Bastida, 2017a) y en el evento extremo en el Arroyo Salado (Kaless et al., 2019). Para el primer caso, se estimó un caudal de $553 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (superficie de 4494 km^2) y para el segundo, uno de $1.1 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (superficie de 1313 km^2).

El uso de marcas para la reconstrucción del evento presenta dificultades para su interpretación. Heritage et al. (2019) reportan variaciones de elevación de hasta 3 m a lo largo de una misma marca. Por otro lado, Heritage et al. (2004) y Fischer (2005) muestran que se pueden producir varios niveles de marcas en distintas fases del hidrograma. Kaless y Bastida (2017a) estimaron los caudales máximos a partir de un ajuste de mínimos cuadrados entre niveles simulados y las marcas observadas en campo. Hasta ahora, la información que se utilizaba en las modelaciones era aquella recopilada con relevamientos post evento y no se contaba con información del evento para poder contrastar las interpretaciones de dichas marcas. En el presente estudio continuamos la estrategia de modelación hidráulica introduciendo nueva información recopilada en base a cámaras fotográficas para el monitoreo de pequeños arroyos efímeros ubicados en el extremo noreste de la Provincia del Chubut. Los objetivos del estudio son: a) presentar un espectro de tipologías de marcas usuales en el contexto patagónico, y posiblemente aplicables a otros arroyos efímeros en clima desértico; b) evaluar la performance de modelos hidráulicos simples (unidimensionales) y más complejos (bidimensionales) aplicados a flujos torrenciales posiblemente críticos; c) utilizar los modelos hidráulicos para relacionar el nivel de la crecida inferida de marcas con las efectivamente observadas en una sección; d) proveer de una metodología de estimación del caudal máximo de eventos torrenciales basada en la distribución altimétrica de las marcas dejadas por la corriente.

TAXONOMÍA DE IMPRONTAS

El paso de la corriente de agua deja numerosas huellas en las márgenes sea imprimiendo rasgos en el suelo o a través de la interacción con la vegetación circundante. La experiencia de campo en arroyos efímeros en contextos patagónicos nos muestra una variedad de huellas que hemos clasificado en cinco categorías, a saber: coprodetritus, detritus silvestris, terra retentum, terra erosis y radix nudis. Los tres primeros tipos se caracterizan por el aporte de material desde el flujo a las márgenes, mientras que los dos últimos constituyen casos de remoción de material. Se presenta a continuación una descripción de cada caso.

Coprodetritus (CD)

Se denomina coprodetritus (del griego “copro” que significa excremento y del latín “detritus”, que significa desgastado) a restos de excrementos de la fauna presente en la zona tales como guanacos, ovejas y caballos. Los guanacos suelen utilizar los mismos lugares para depositar sus excrementos produciendo acumulaciones de más de 2 m de diámetro. El excremento tiene forma de pequeñas elipsoides de 1 cm de diámetro medio; son fácilmente transportados por la corriente y depositados en lugares de aguas tranquilas (Fig. 1a). Similar comportamiento ocurre con el excremento de oveja que tiene forma de pequeñas canicas de menos de 1 cm de diámetro. En cambio, el excremento de caballo es de mayor tamaño, con forma esferoidal de hasta 5 cm de diámetro. Dado su mayor dimensión, suele ser interceptado y retenido por la vegetación arbustiva.

La impronta formada por estos detritos se presenta en la zona de planicie adyacente donde la velocidad es baja o ha sido inundada por desborde y queda el flujo en reposo. Marca el límite de la zona inundada y se observa en campo como lonjas de material acumulado (Fig. 1b, 2a, 2b). La persistencia de estas improntas depende de la ocurrencia de lluvias y vientos que tienden a dispersar el material. Si bien no se cuenta con datos de la velocidad de descomposición, se han observado en el campo relictos de crecidas luego de varios años de su ocurrencia.

Detrito silvestris (DS)

Se denomina detrito silvestris (del latín “silvestris” adjetivo de forestal) a los restos de vegetación arbustiva tales como ramas de distintos tamaños (desde follaje y vegetación herbácea hasta ramas con diámetro de 1 a 2 cm). Estos detritos vienen interceptados por la vegetación arbustiva presente en los taludes del cauce u otros obstáculos (alambrados, postes eléctricos, etc.). La descomposición del material depende de las condiciones climáticas, y en ambientes de clima áridos pueden persistir muchos años, por lo que en un tramo de arroyo puede haber improntas acumuladas de varias crecidas. En tal sentido, es conveniente realizar una visita al lugar al poco tiempo de ocurrido el evento a fin de distinguir las improntas frescas de aquellas más antiguas (Fig. 1c).

Dentro de esta categoría se distinguen los micro-detritos silvestris (mDS) que consisten en follaje normalmente de pequeño tamaño en la vegetación de ambiente desértico. Por ejemplo, el quilembai (*Chuquiraga avellanadae*) posee hojas elípticas de 0.5 a 1 cm de tamaño. También es usual encontrar follaje de jarilla (*Larrea divaricata*). Estos detritos se acumulan en zonas de estancamiento del flujo, detrás de rocas o arbustos grandes y por su tamaño son huellas que perduran poco tiempo al ser fácilmente transportados por el viento.

Terra retentum (TR)

El nombre de esta categoría significa acumulación de sedimentos (del verbo latino “retinere” que significa retener). El material en suspensión está compuesto por suelo erosionado (fracciones más finas de limos y arcillas) y material presente del cauce (fracciones de arena fina del lecho y depósitos eólicos). En los sectores de baja velocidad se produce la sedimentación y se observa en campo un marcado cambio en la coloración del suelo (Fig. 1d). Los indicadores más claros se producen en las planicies de inundación. También es usual observar un cambio en la rugosidad de la superficie, siendo más suave donde estuvo inundado y más áspera fuera de dicha zona. El material fino es fácilmente removido por las lluvias posteriores y el viento. Sin embargo, es posible encontrar rastros

Tras las huellas de las crecidas extraordinarias en la Patagonia semiárida (Argentina): tipologías de improntas, modelo teórico y resultados preliminares.

de crecidas pretéritas buscando depósitos en zonas protegidas de la intemperie como debajo de grandes arbustos.



Figura 1. A) Detalle de coprodetrítos (excrementos de guanaños). B) Acumulación de coprodetrítos en la planicie adyacente al cauce del arroyo. Se observa claramente la forma alargada del depósito en conformidad con el límite de la zona inundada. C) Detrítos silvestris acumulados en el tronco de un arbusto ubicado en la margen del arroyo; la disposición de los detrítos indica la dirección del flujo. D) Combinación de tipologías de improntas tales como pequeños detrítos silvestris y terra retentum que se evidencia con el cambio en la coloración de sedimentos, cambios en la textura de sedimentos y cambios en la rugosidad de la superficie. E) Marcas de erosión en un talud vertical de suelo limoso; se distinguen varios niveles de erosión. F) Se observa el nivel de erosión en los suelos limo-arcillosos que constituyen la margen con talud vertical; quedan al descubierto las raíces del arbusto que además retienen detrítos transportados por la corriente.



Figura 2. Fotos del evento del 14 de marzo de 2019 en la cuenca Sagmata. A) Registro de nivel máximo alcanzado pocos minutos antes de tomar la foto (16:37) y B) mismo lugar una hora después se observa el descenso en el nivel y las marcas (DS y CD). C) formación de ondas estacionarias (flechas verticales) e indicación de nivel de erosión en la pared vertical de la margen derecha del cauce (TE – flecha horizontal). D) Vista de la escala en la estación Sagmata con formación de onda aguas arriba y estela aguas abajo del tubo (flujo de derecha a izquierda). E) Vista de la estación en el arroyo Tir Halen desde la margen opuesta apreciándose el tubo con la escala y la cámara de foto sobre la margen (la flecha indica la posición de la cámara); F) captura de imagen de la escala de Tir Halen por la cámara fotográfica en el mismo momento de la foto anterior.

Cuando el flujo tiene cierta entidad en la planicie se producen cuerpos sedimentarios de arena fina aguas abajo de arbustos. Aunque el nivel más alto de estos sedimentos suele ser inferior al nivel de la crecida, el depósito suele tener alta persistencia en el tiempo y contribuir a una reconstrucción del evento.

Terra erosis (TE)

Esta categoría corresponde al grupo de huellas producidas por remoción de material (del latín “erosis” que significa, remover). Cuando las márgenes están conformadas por suelos limosos con intercalaciones de arena y gravas se producen taludes verticales (alta cohesión aparente producto del elevado valor de la matriz de succión en suelos secos). Durante la crecida se erosiona el sector mojado. Los suelos granulares al carecer de cohesión suelen desmoronarse rápidamente. En el caso de suelos finos el avance del frente de humedad provoca el colapso de bloques (remoción en masa). La morfológica restante es de tipo voladizo (Fig. 1e, 2c). Cuando la margen tiene talud más tendido se han observado marcas de erosión de menor tamaño como líneas de inflexión en el terreno.

La persistencia de las marcas depende de la ocurrencia de ulteriores crecidas. Una sucesión de crecidas pequeñas puede erosionar una margen de altura considerable al remover el material granular de un estrato inferior y así provocar un deslizamiento en masa.

Radix nudis (RN)

Conforma también el segundo grupo de huellas, producidas por erosión. Su nombre deriva del latín, “radix”, raíz y “nudis”, al descubierto. Se trata de raíces de arbustos ubicados en las márgenes que quedan visibles al removerse el suelo por erosión durante la crecida (Fig. 1f). En general, dada la baja densidad de vegetación en las márgenes la red radicular no suele ser muy profusa. Sin embargo, en los lugares puntuales de presencia de vegetación, las raíces otorgan más resistencia a la margen y se desarrollan voladizos de mayor tamaño.

MODELO CONCEPTUAL

Función teórica de distribución de improntas

Se formula un modelo teórico para explicar la presencia y distribución de improntas en las márgenes del cauce. El objeto de análisis es un tramo de arroyo en el cual se observa una distribución de masa de detritos que es función de la elevación, $m(y)$, en donde m es la masa, y y es la elevación (con unidad de masa por unidad de longitud del tramo en estudio). Considérese un volumen de control que abarca una región espacial delimitada por el contorno sólido del cauce y un espesor dado por la altura de la vegetación u obstáculos presentes en las márgenes y fondo. Denominaremos a este volumen de control como VC_m (figura 3). Un segundo volumen de control está definido por la región de flujo en el cauce, que denominaremos VC_c . El VC_c constituye una fuente de detritos, mientras que el VC_m funciona como sumidero. El flujo entre ambos volúmenes está dado por la función J . La tasa de variación de masa de detritos en VC_m viene dada por la expresión:

$$\frac{dm(y,t)}{dt} = J(y,t) \quad (1)$$

El flujo de masa J ocurre en la superficie libre para el primer grupo de improntas porque se supone un transporte de materiales flotantes. En cambio, para el caso del segundo grupo, la erosión tiene lugar en todo el perímetro mojado.

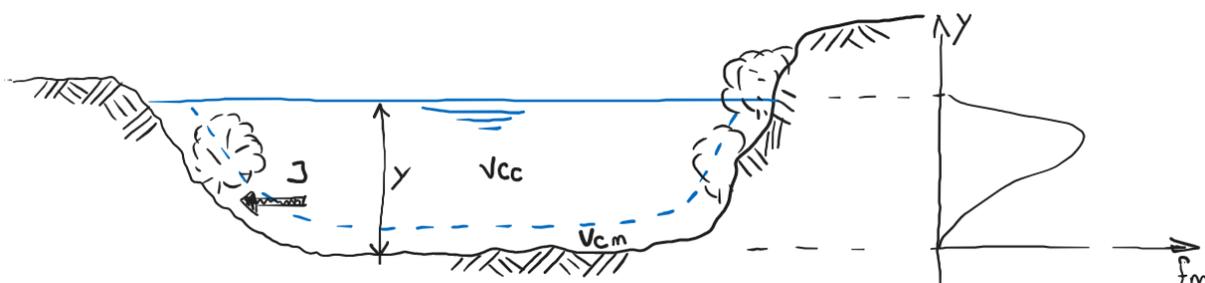


Figura 3. Modelo conceptual de transferencia de material flotante a la margen. Definición de dos volúmenes de control, uno para el flujo (VcC) y otro para la zona de retención de material flotante en las márgenes (VcM).

La capacidad de retención de material depende de la presencia de obstáculos (vegetación arbustiva, raíces, rocas, etc). Sea p_y una función que toma valores entre 0 y 1 y que define la posibilidad de retención de material. Cuando hay suelo desnudo, adopta un valor de 0, en cambio, la presencia de abundante vegetación permite el valor máximo de 1. La función de transferencia J viene modificada por este factor para considerar la tasa efectiva de retención.

La hipótesis formulada asume que la intensidad del flujo de masa depende de la cantidad de material transportado por la corriente y de la intensidad de la turbulencia que mezcla el material en la sección transversal al flujo, permitiendo la transferencia lateral de material desde el centro del escurrimiento hacia las márgenes. Se asume que el flujo J es proporcional a la densidad de material, ρ (expresada en kg m^{-2}), y a la intensidad de la turbulencia parametrizada con la velocidad de corte, u^* :

$$J = p_y \alpha_1 \rho u^* \quad (2)$$

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_a}} \quad (3)$$

En donde α_1 es un factor de proporcionalidad, τ_0 es el esfuerzo de corte medio en el perímetro mojado y ρ_a es la densidad del agua.

Es de esperar que la cantidad de material transportado por la corriente aumente con el caudal. En la medida que se prolonga el evento de lluvia o su intensidad, mayor es la cantidad de material que es incorporado a la corriente producto del arrastre desde las zonas marginales al cauce y las laderas. Esto incluye a los coprodetritos, detrius-silvestris y suelos (carga de lavado). Por otro lado, para niveles hidrométricos más elevados se produce la erosión de las márgenes y aporte directo de material a la corriente. Se propone una función empírica de tipo potencial para la relación entre densidad y caudal.

$$\rho = \alpha_2 Q^\beta \quad (4)$$

La relación propuesta para los detritos es similar a la utilizada en el análisis del transporte de sedimentos en arroyos de ambiente árido. Con respecto a la carga de lavado, Sutherland y Bryan (1990) reportan un valor de exponente de 0.28; Frostick et al (1983) ajustaron datos con un exponente de 0.51. Para los sedimentos en suspensión Alexandrov et al. (2009) obtuvieron exponentes entre 1.31 y 1.51 variando estacionalmente, y para la carga disuelta variando entre 0.99 y 1.01.

Reemplazando (4) y (3) en (1) y considerando que la elevación es función del tiempo:

$$\frac{dm}{dy} = p_y \alpha_1 \alpha_2 Q^\beta u^* \frac{dt}{dy} \quad (5)$$

Se define la función de permanencia de niveles hidrométricos como el periodo de tiempo en el que se observa niveles iguales o mayores que y . La función de densidad de distribución temporal de niveles es:

$$t_y = \frac{dt}{dy} \quad (6)$$

Integrando la ecuación (5) se obtiene la cantidad total de masa retenida en todo el evento:

$$M = \int_0^{y_{max}} p_y \alpha_1 \alpha_2 Q^\beta u^* t_y dy \quad (7)$$

A fin de facilitar la comparación con las observaciones de campo se define la función de densidad de distribución de masa normalizada:

$$f_m = \frac{1}{M} \frac{dm}{dy} \quad (8)$$

Si se divide el intervalo continuo de y ($0 \dots y_{max}$) en N clases, con tamaño de clase Δy , la frecuencia parcial de cada clase es:

$$F_m = \frac{\Delta m}{M} = \frac{p_y Q^\beta u^* t_y}{\sum p_y Q^\beta u^* t_y} \quad (9)$$

Para ilustrar el comportamiento de la función de distribución se asume que $p_y = 1$ en todo el perímetro mojado. El flujo de masa J aumenta conforme aumenta el calado del escurrimiento porque ambas funciones, Q y u^* aumentan con el calado. Sin embargo, la duración de los niveles altos suele ser más baja que aquella de los calados más bajos. Es decir, para el momento más intenso de la crecida se dispone de la máxima cantidad de detritos en la corriente y transferencia a las márgenes pero el tiempo en el cual se produce la impronta es bajo. Entonces, es de esperar que exista un máximo en la distribución de improntas para un calado inferior al máximo y que se encuentren pocas improntas correspondientes al máximo calado de la crecida.

Análisis de parámetros

Se presenta un ejemplo analítico para evaluar la incidencia del exponente β en la ecuación (9). Se considera que el flujo es uniforme para un canal de sección rectangular. El caudal se evalúa con la fórmula de Manning:

$$Q = \frac{1}{n} R_h^{2/3} y b S_0^{1/2} \quad (10)$$

En donde n es el coeficiente de Manning, y es el tirante, b es el ancho del canal, S_0 es la pendiente del fondo y R_h es el radio hidráulico:

$$R_h = \frac{b y}{b + 2y} \quad (11)$$

La velocidad de corte es:

$$u^* = \sqrt{g R_h S_0} \quad (12)$$

En donde g es la aceleración de la gravedad.

Con respecto a la función de permanencia de caudales se propone la siguiente expresión adimensional:

$$\frac{t_y}{t_0} = 1 - \left(\frac{y}{y_{max}} \right)^\delta \quad (13)$$

En donde t_0 es la duración del evento que no es necesario determinar porque se anula en el cálculo de f_m .

Para realizar el ejemplo analítico se consideró un ancho de canal de 6.0 m, una profundidad máxima de 1.5 m, pendiente $S_0 = 0.002 \text{ m m}^{-1}$ y coeficiente de Manning de 0.02 (aunque estos últimos dos parámetros desaparecen cuando se realiza la normalización de la función). En la figura 4 se muestra el efecto en la variación del exponente δ . Un valor elevado de δ (100 en la figura e infinito en el límite teórico) corresponde a un hidrograma de forma triangular en el que la superficie libre asciende y desciende a velocidad constante. Como la densidad aumenta con el caudal ($\beta = 1$) el máximo de la distribución se alcanza para el nivel máximo en la superficie libre. En cambio, conforme δ adopta valores más bajos se aumenta la permanencia de los niveles hidrométricos menores con lo cual el máximo de f_m se alcanza para calados menores al máximo de la crecida.

En la figura 5 se muestra el efecto en f_m al cambiar la relación entre densidad de material flotante y caudal. Para este caso se consideró un hidrograma con $\delta = 4$. Un valor bajo de β , próximo a 0, corresponde a densidad constante de material flotante durante toda la crecida y entonces el máximo de material retenido en las márgenes depende exclusivamente de la permanencia del nivel hidrométrico. Cuando el exponente β aumenta, los niveles elevados transfieren mayor cantidad de material a las márgenes compensando su menor duración. De este modo, el máximo en la distribución de masa se desplaza hacia la derecha. Sin embargo, en todos los casos es de esperar que el máximo en la distribución de improntas no coincida con el máximo de la crecida.

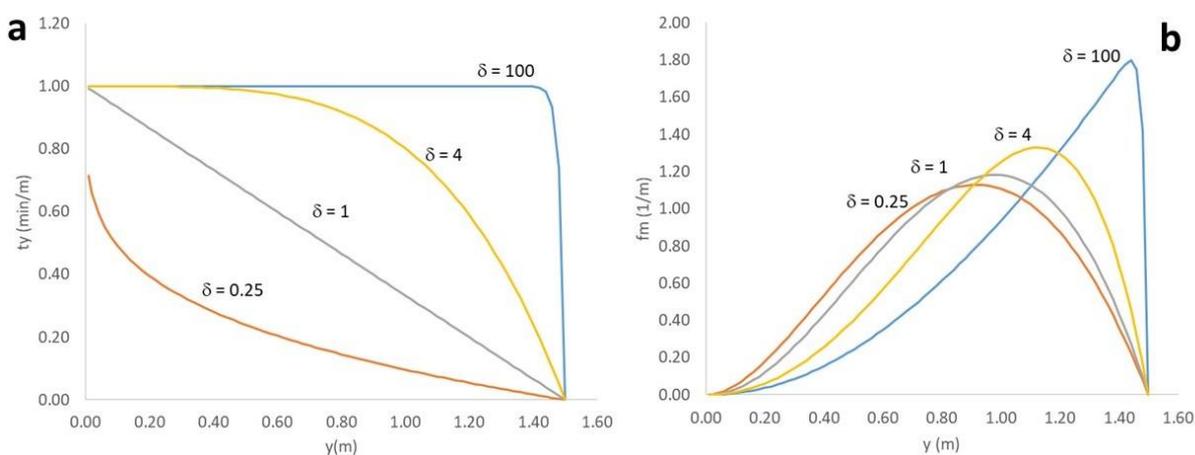


Figura 4. A) Variación del exponente δ que regula la forma de la curva de duración de niveles. B) Efecto en la distribución de masa en las márgenes.

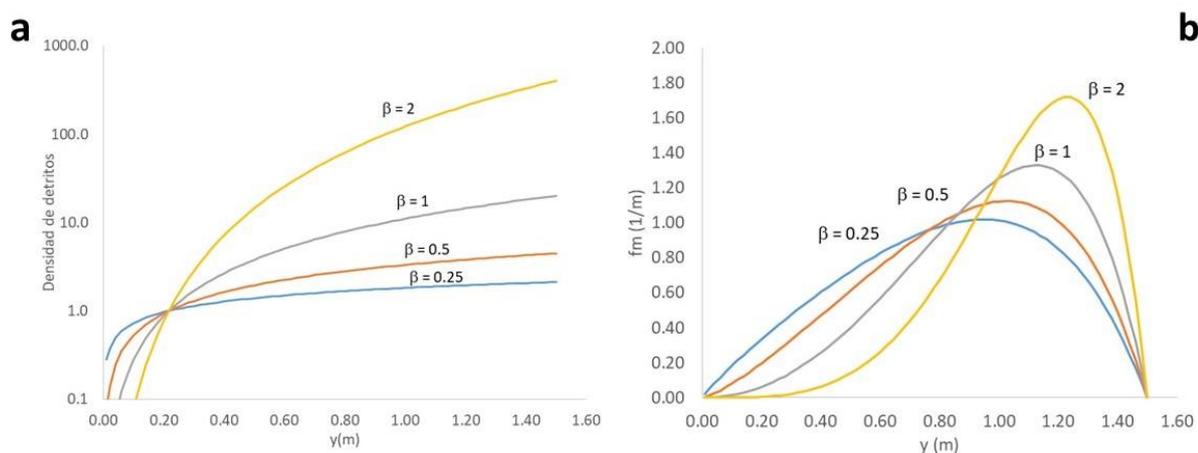


Figura 5. A) Variación del exponente δ que regula la relación entre densidad de detritos y caudal. B) Efecto en la distribución de masa en las márgenes.

MODELACIÓN HIDRODINÁMICA

El modelo presentado anteriormente predice la distribución alimétrica de la cantidad de materia retenida a lo largo de un tramo. Esta distribución será confrontada con observaciones directas del nivel de la superficie libre en una sección de aforo. Para poder comparar ambos resultados se requiere de un modelo hidrodinámico.

El análisis hidrodinámico fue realizado en dos niveles sucesivos de complejidad modelística. En el nivel más simple se utilizó un modelo de flujo permanente gradualmente variado unidimensional implementado en el software HEC-RAS, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos (Brunner, 2016). El segundo y más complejo nivel de análisis se llevó a cabo con un modelo de flujo transitorio bidimensional implementado en el software IBER que fue desarrollado por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio ambiente, GEAMA (Universidad de La Coruña) y el Instituto Flumen (Universidad Politécnica de Cataluña) y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE) (Bladé et al., 2014). Ambas aplicaciones informáticas son gratuitas y están disponibles en la red.

En un modelo unidimensional se supone un escurrimiento donde predomina una de las componentes del campo de velocidad y además puede describirse mediante un valor de velocidad media en la sección transversal. El dominio de flujo se discretiza mediante secciones transversales que deben relevarse en campo perpendiculares a la dirección del flujo. Cuando el flujo es permanente se resuelve la ecuación de Bernoulli incluyendo un modelo para cuantificar la pérdida de energía y se determinan la velocidad y el tirante en cada sección transversal. El modelo de resistencia evalúa la pendiente de disipación de energía en cada sección transversal aplicando la fórmula de Manning y luego se calcula una pendiente media para el tramo comprendido entre las secciones. Las condiciones de borde dependen del tipo de régimen hidráulico. Para flujos subcríticos se impone la condición de flujo uniforme, evaluada con la pendiente de energía, en la sección de aguas abajo (usualmente se adopta la pendiente media del fondo en el tramo de estudio). Para flujos supercríticos se debe establecer la condición de borde en el extremo de aguas arriba. En ambos casos, el caudal se impone en el extremo de aguas arriba.

En la modelación bidimensional con IBER se emplean las ecuaciones de Saint-Venant para aguas someras (Bladé et al., 2014). Se incluye un esfuerzo de corte para representar

la interacción entre el flujo y el fondo del canal (evaluado con la fórmula de Manning) y un modelo de turbulencia para evaluar las tensiones de Reynolds utilizando la hipótesis de Boussinesq. IBER provee varios métodos para evaluar la viscosidad de remolino. En este estudio hemos aplicado el modelo algebraico de turbulencia (distribución parabólica de la viscosidad de remolino) y el modelo estándar $k-\varepsilon$, que incluye dos ecuaciones de transporte, una para la energía cinética de la turbulencia (k) y otra para la tasa de disipación de la energía cinética de la turbulencia (ε). Las condiciones de borde se especifican del mismo modo que en el modelo unidimensional. IBER ha sido validado con varios casos de campo y laboratorio (Corestein y Bladé, 2013, Cea et al., 2020) y tiene un esquema numérico robusto. Las simulaciones de régimen permanente se realizan como un flujo transitorio que, imponiendo condiciones de borde permanentes, alcanzará el régimen estacionario al cabo de un cierto tiempo de simulación. Para este estudio se realizaron simulaciones de régimen permanente para determinar el tamaño de grilla adecuado y elegir el modelo de turbulencia. Posteriormente se realizó una simulación del pasaje de una onda de crecida.

La resistencia al flujo en el cauce está determinada por el tamaño del material del lecho, las formas de fondo y los obstáculos presentes en las márgenes. Para el cauce se adoptó un valor de “ n ” de Manning igual a 0.016 característico de lechos de arena (Ven te Chow, 1994) estimado inicialmente aplicando la ecuación de resistencia de Keulegan (1938) para un tamaño de rugosidad de 0.005 m. Para las márgenes y planicie se adoptó un valor de “ n ” igual a 0.035.

SITIO DE ESTUDIO

La cuenca del Arroyo Sagmata se encuentra ubicada en la Provincia del Chubut (Argentina) en la región semiárida de la Patagonia, a 85 km al oeste de la ciudad capitalina de Rawson. El arroyo es un tributario efímero del Río Chubut y su descarga se produce en la coordenada geográficas: Latitud $43^{\circ} 30' 41''$ Sur, Longitud $66^{\circ} 2' 46''$ Oeste. La cuenca tiene una superficie de 129 km^2 con nivel máximo en la meseta circundante en 273 m.s.n.m. y nivel mínimo dado por el Río Chubut en 50 m.s.n.m. (figura 6). En el tramo de estudio, el área drenada es de 27 km^2 con una elevación de 68 m.s.n.m. La precipitación media anual es de 170 mm.

Se seleccionó un tramo de arroyo con trazado rectilíneo para la implantación de la escala hidrométrica (Fig. 7.). El arroyo está incidido en depósitos aluviales y tiene una sección transversal que varía entre rectangular con márgenes verticales a trapezoidal (con inclinación de taludes próximos a 45°). El ancho de fondo del canal es de 6 m, mientras que el ancho superficial varía entre 11 m y 18 m. La distancia vertical entre la superficie de la planicie circundante y el fondo del canal es de 1.50 m. El tramo elegido tiene una longitud de 405 m. La pendiente media del fondo es de 0.0039 m m^{-1} .

El lecho está conformado por una mezcla de arena y gravas con tamaño mediando D_{50} de 0.3 mm. Las márgenes están conformadas por suelos limo-arenosos. Se observan estratos de suelos arenosos y gravosos al pie las márgenes fácilmente erosionables. La vegetación que cubre los taludes es escasa y de tipo arbustiva.

Tras las huellas de las crecidas extraordinarias en la Patagonia semiárida (Argentina): tipologías de improntas, modelo teórico y resultados preliminares.

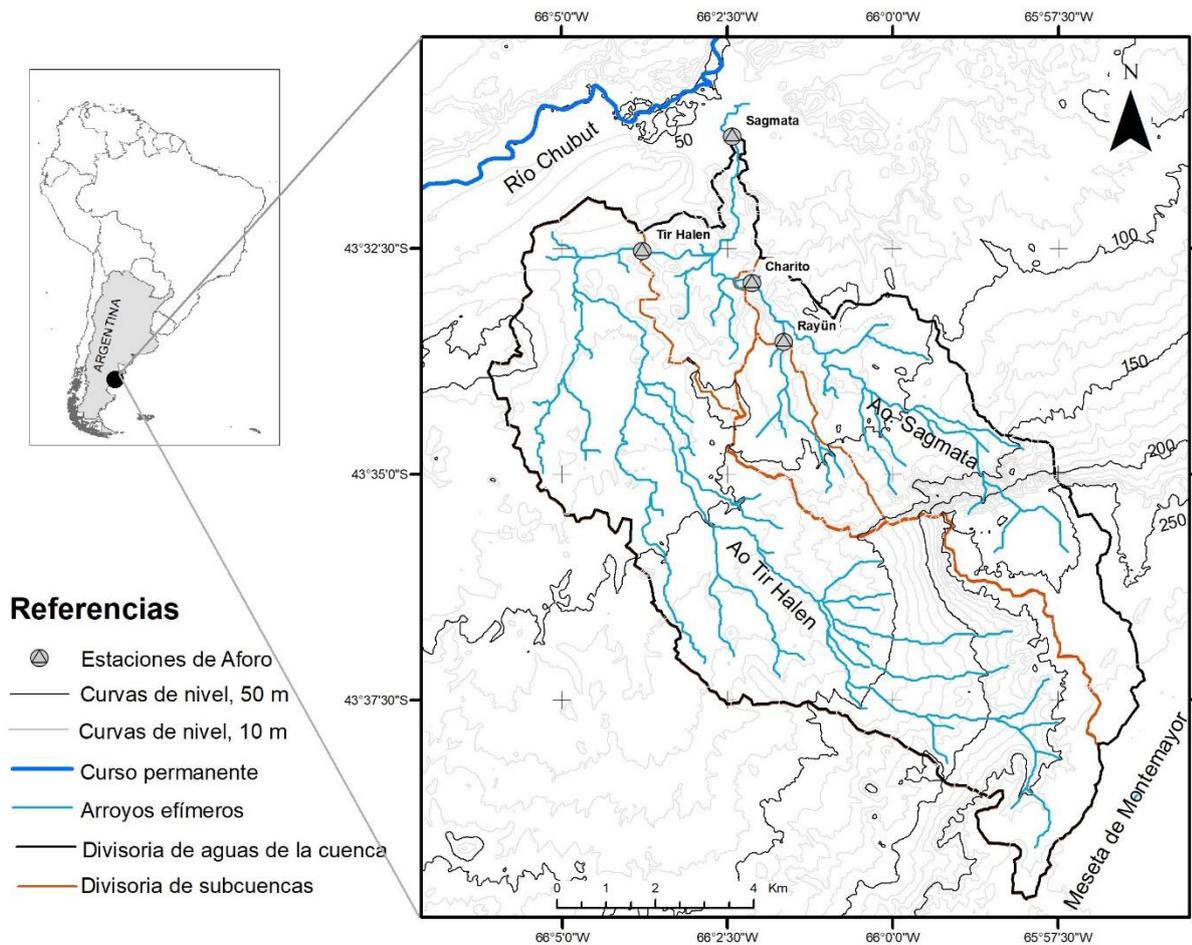


Figura 6. Mapa de la cuenca Sagmata, con ubicación de los tramos con instrumentos de monitoreo.



Figura 7. Vista del tramo de estudio hacia aguas arriba. Se distingue la escala hidrométrica apostada sobre el borde derecho del canal (la flecha indica la posición de la cámara).

MATERIALES Y MÉTODOS

Equipos de monitoreo

Se instaló una escala en proximidad de la margen derecha del arroyo. La escala está ubicada sobre la superficie de un tubo de PVC de 175 mm de diámetro (para albergar equipos de muestreo de sedimentos). La regla está pintada con intervalos de 0.05 m. El tubo tiene una altura de 1.60 m y está unido a un tramo inferior que está afirmado en el terreno con suelocemento elaborado in-situ. En la parte superior del tubo se colocó una lámpara alimentada con panel solar, para iluminar la escala durante la noche. A pocos metros del tubo se encuentra una cámara de tipo “time-lapse” (Brinno BCC 100) que toma una fotografía cada 5 min y al final del día compila las fotos en un video (Kaless et al., 2021). En la figura 8 se muestra una secuencia de fotos del evento de marzo de 2019. La primera foto muestra el estado del arroyo previo al evento (14 de marzo) y las siguientes fotos componen una secuencia de una hora de duración que captura el pico de la crecida (15 de marzo).

Posteriormente al evento de marzo de 2019, se enterraron cadenas en el lecho del arroyo, con el fin de monitorear las variaciones altimétricas (erosión y sedimentación durante los eventos de crecida). Se colocaron tres cadenas a lo largo de una sección transversal ubicada a 4.80 m aguas arriba del tubo de PVC. Se realizaron tres excavaciones de 0.70 m de profundidad media. Las cadenas fueron ancladas al fondo utilizando barras de hierro nervurado nro. 8. El pozo fue rellenado dejando la cadena en posición vertical y el remanente (aproximadamente 0.50 m) fue dispuesta horizontalmente sobre el lecho del arroyo

Relevamientos de campo

Se realizó un relevamiento topográfico de perfiles transversales abarcando el cauce principal y parte de la planicie adyacente. Posteriormente se realizó un segundo relevamiento con la finalidad de realizar un modelo digital del terreno (MDT). En este caso se relevaron puntos morfológicamente significativos, tales como el centro del cauce, los laterales del cauce donde cambia abruptamente la pendiente del terreno, los puntos de inflexión que delimitan los márgenes de la planicie adyacente y puntos sobre la planicie. Mismo criterio se utilizó para representar los niveles de planicies intermedias. Se relevó un total de 1025 puntos y se ubicaron dos estacas en el campo a fin de materializar una referencia altimétrica para posteriores relevamientos. Se utilizó un equipo GPS diferencial Magellan PRO, en modo stop-and-go con postproceso.

Seguidamente se procedió a construir una superficie de triángulos (TIN) eligiendo los puntos de interpolación de acuerdo al criterio morfológico utilizado en el relevamiento. Finalmente se transformó el TIN en raster con un tamaño de pixel de 0.22 m. En la figura 9 se muestra el MDT del cauce. Se indica la ubicación de la escala hidrométrica, que está a 205 m de la sección de salida y a 180 m la sección de entrada. Se han agregado las improntas halladas con indicación de su tipología.

Se realizó un segundo relevamiento GPS con la finalidad de cuantificar los cambios en la elevación del arroyo luego del paso de la crecida de junio de 2019. Se relevó un total de 31 puntos en el cauce y en las márgenes.

Tras las huellas de las crecidas extraordinarias en la Patagonia semiárida (Argentina): tipologías de improntas, modelo teórico y resultados preliminares.



Figura 8. Secuencia de fotogramas obtenidos de los videos correspondientes a los días 14 y 15 de marzo de 2019. El primer fotograma muestra el estado del cauce el día 14 luego del paso del primer hidrograma. Los restantes 7 fotogramas muestran la fase creciente del segundo hidrograma, con intervalo de tiempo de 10 min entre fotos.

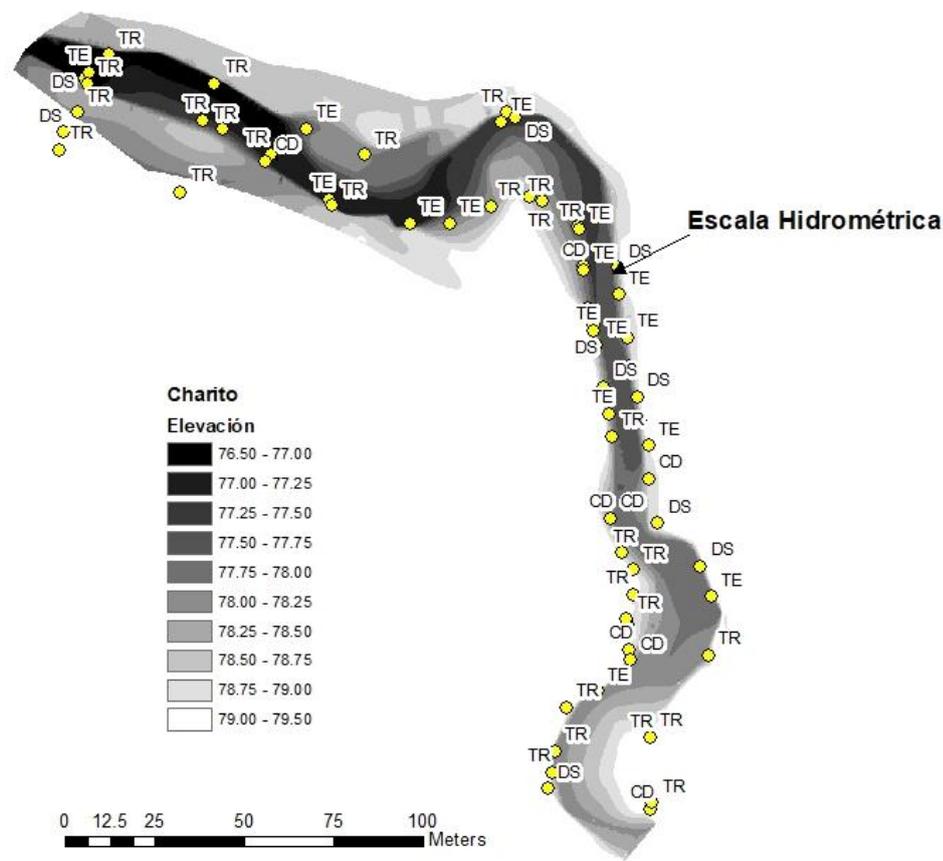


Figura 9. Modelo digital del terreno para el tramo de arroyo estudiado. Se indica la ubicación y tipología de impronta identificada y relevada en el terreno posterior al evento de marzo de 2019. TE, Terra erosis; TR, terra retentum; DS, Detrito silvestris y CD, coprodetritos.

Procedimiento de cálculo

Se obtuvo la elevación de la superficie libre para cada fotograma del video de los días 14 y 15 de marzo de 2019. La elevación se observó en los laterales del tubo o se estimó a partir de los niveles visibles aguas arriba y abajo del tubo. El pico de la crecida volteó el tubo a las 8:00 hs del día 15. Los niveles de la fase recesiva fueron determinados comparando las fotos de dicho periodo con fotos de eventos precedentes para los cuales está visible el nivel en la escala.

La determinación de la altura de escala correspondiente a cada impronta se realizó con los modelos hidráulicos. Para el caso del modelo unidimensional, se calcularon los perfiles longitudinales de la superficie libre para distintos caudales. Luego, a partir de la progresiva de la impronta y su elevación se interpoló entre los niveles calculados para determinar el caudal asociado a dicha elevación. La superficie libre en la sección de la escala se calculó suponiendo que el caudal era el mismo en ambas secciones.

Para el caso del modelo bidimensional, se realizaron gráficos de la superficie libre para distintos instantes de tiempo de la crecida simulada (régimen transitorio). Para cada impronta se determinó el instante de tiempo para el cual la cota de agua simulada era igual a la elevación de la impronta. Se estimó el tiempo de traslado del flujo desde la sección de la impronta a la sección de la escala y se obtuvo el tiempo correspondiente a la observación en la escala. Para dicho momento se determinó la elevación de la superficie libre según la simulación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelación hidrodinámica de arroyos efímeros

Se llevó a cabo una modelación hidráulica unidimensional en régimen permanente porque las condiciones morfológicas del cauce son acordes con las hipótesis de dicho modelo: escurrimiento canalizado sin inundación de la planicie adyacente y longitud de tramo corto. Se representó un tramo de arroyo de 325 m de longitud mediante 14 secciones transversales con separación mínima de 18.2 m y máxima de 36.8 m (promedio de 25.02 m). La modelación se realizó con régimen permanente imponiendo un rango de caudales aguas arriba entre $16 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $36 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

El resultado principal de la modelación es el perfil longitudinal de la superficie libre para los distintos caudales (figura 10). En el tramo comprendido entre las distancias 150 a 250 m se observa que la superficie libre desciende abruptamente. Este sector corresponde al tramo rectilíneo en el que se ha instalado la escala hidrométrica (Figura 9). El software HECRAS predice condiciones de flujo crítico e impone dicho tirante al resolver la ecuación de la energía. La distribución de improntas tiende a quedar representada solamente por los caudales más elevados en dicho sector.

La modelación bidimensional con IBER se realizó siguiendo la planificación expuesta en la tabla 1 con el objetivo de determinar las características del modelo más sencillo que implicase el menor tiempo de cálculo para la modelación de la crecida. En la primera corrida se utilizó una grilla gruesa, con esquemas numéricos de primer orden. Se determinó que, para un caudal de $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, el escurrimiento alcanza el régimen permanente a los 700 s de simulación. En las corridas siguientes se redujo el tamaño de grilla a fin de evaluar el Índice de Convergencia de Grilla (en adelante GCI por sus siglas en inglés, Roache, 1997) considerando como variable significativa la elevación de la superficie libre. En la tabla 1 se muestran los valores de GCI medios del dominio de cálculo. Se concluyó que resulta adecuado utilizar una malla no estructurada con tamaño de 0.75 m y de 3.0 m en la zona de planicie, con esquema numérico de segundo orden. De la comparación de las corridas CHRT7 y CHRT10 se determinó que se debe utilizar el modelo de turbulencia k- ϵ , porque en las zonas de baja velocidad el modelo parabólico subestimaba la viscosidad de remolino. En la corrida CHRT11 se simuló un hidrograma de aproximadamente dos horas de duración con fases crecientes y decrecientes con variación lineal, caudal pico de $40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y una permanencia de 10 min.

Tabla 1. Programa de corridas para la validación del modelo 2D (IBER).

Corrida	Tiempo (seg)	Esquema	Grilla Cauce (m)	Grilla Planicie (m)	Modelo Turbulencia	GCI (m) Media (desv. Est.)
CHRT1	1000	1er	1.50	6.0	Parabólico	0.073 (0.082)
CHRT2	700	1er	1.06	4.2	Parabólico	0.063 (0.067)
CHRT3	700	1er	0.75	3.0	Parabólico	0.083 (0.091)
CHRT4	700	1er	0.53	2.1	Parabólico	
CHRT5	700	2do	1.50	6.0	Parabólico	0.037 (0.037)
CHRT6	700	2do	1.06	4.2	Parabólico	0.028 (0.027)
CHRT7	700	2do	0.75	3.0	Parabólico	0.038 (0.034)
CHRT8	700	2do	0.53	2.1	Parabólico	
CHRT9	1500	2do	0.53	2.1	Parabólico	
CHRT10	700	2do	0.75	3.0	k- ϵ	
CHRT11	7050	2do	0.75	3.0	k- ϵ	

Los resultados de la simulación 2D se exponen en la figura 10b. En este caso se muestra la superficie libre para distintos instantes de tiempo. Se observa que ha desaparecido la anomalía de flujo crítico presente en la modelación unidimensional. La distribución de improntas resulta más acorde con la tendencia de las curvas de superficie libre. Finalmente, si bien el tramo es corto, el modelo predice una leve laminación del caudal. El caudal máximo a la salida fue de $37 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mientras que el pico en el hidrograma de entrada era de $40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

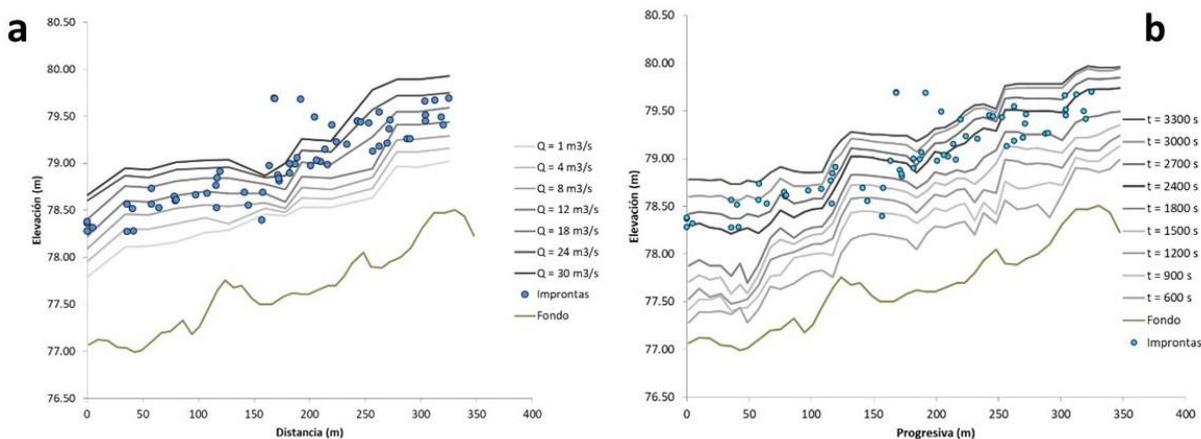


Figura 10. A) Perfil longitudinal con niveles hidrométricos calculados mediante el modelo 1D (HEC-RAS) simulando régimen permanente para distintos caudales. B) Perfil longitudinal con niveles hidrométricos calculados mediante el modelo 2D (IBER) simulando un régimen transitorio.

En ambas modelaciones se asumió que la elevación del lecho permanecía constante, es decir, que no se producía ni erosión ni sedimentación. Durante la fase inicial del evento de crecida se pudo observar en campo la formación de ondas estacionarias en uno de los tramos del Arroyo Sagmata. Estas ondas son típicas formas de fondo relacionadas con lechos de granos finos, elevado transporte de sedimentos y régimen hidráulico tendiente a crítico. Se evaluó el parámetro de transporte T de Van Rijn (1993) obteniéndose un valor de 95 para tirantes bajos de 0.5m. En el diagrama de Van Rijn, cuando se supera un umbral de $T = 25$ se caracteriza al régimen como superior y es acorde a la formación de ondas de arena, lecho plano, y antidunas. Por lo tanto, las condiciones de flujo simuladas son compatibles con la formación de ondas en el lecho.

Comparación entre predicciones y observaciones de improntas

Entre el 13 y 15 de marzo de 2019 se produjo una tormenta que tuvo alcance regional. En la cuenca de estudio, la lluvia acumulada del día 13 fue de 0.8 mm, 22 mm para el día siguiente y de 21.3 mm para el 15 de marzo. La intensidad máxima fue incrementándose con el desarrollo del evento, siendo de 6, 12 y 54 mm hr^{-1} en cada día. El evento produjo escorrentía el 14 y 15 al encontrar el suelo de la cuenca húmedo (figura 12a). El primer pico se produjo el día 14 con una altura de 0.77 m. Luego de un evento menor en la madrugada del día 15 sobrevino la crecida más importante que alcanzó un nivel máximo de 1.50 m. La duración de los eventos fue reducida. En el primer evento, se registraron niveles superiores a 5 cm durante 250 min. El segundo evento tuvo una duración de 310 min. La velocidad máxima de ascenso del nivel fue de 0.054 m min^{-1} para el primer evento y de 0.090 m min^{-1} para el segundo.

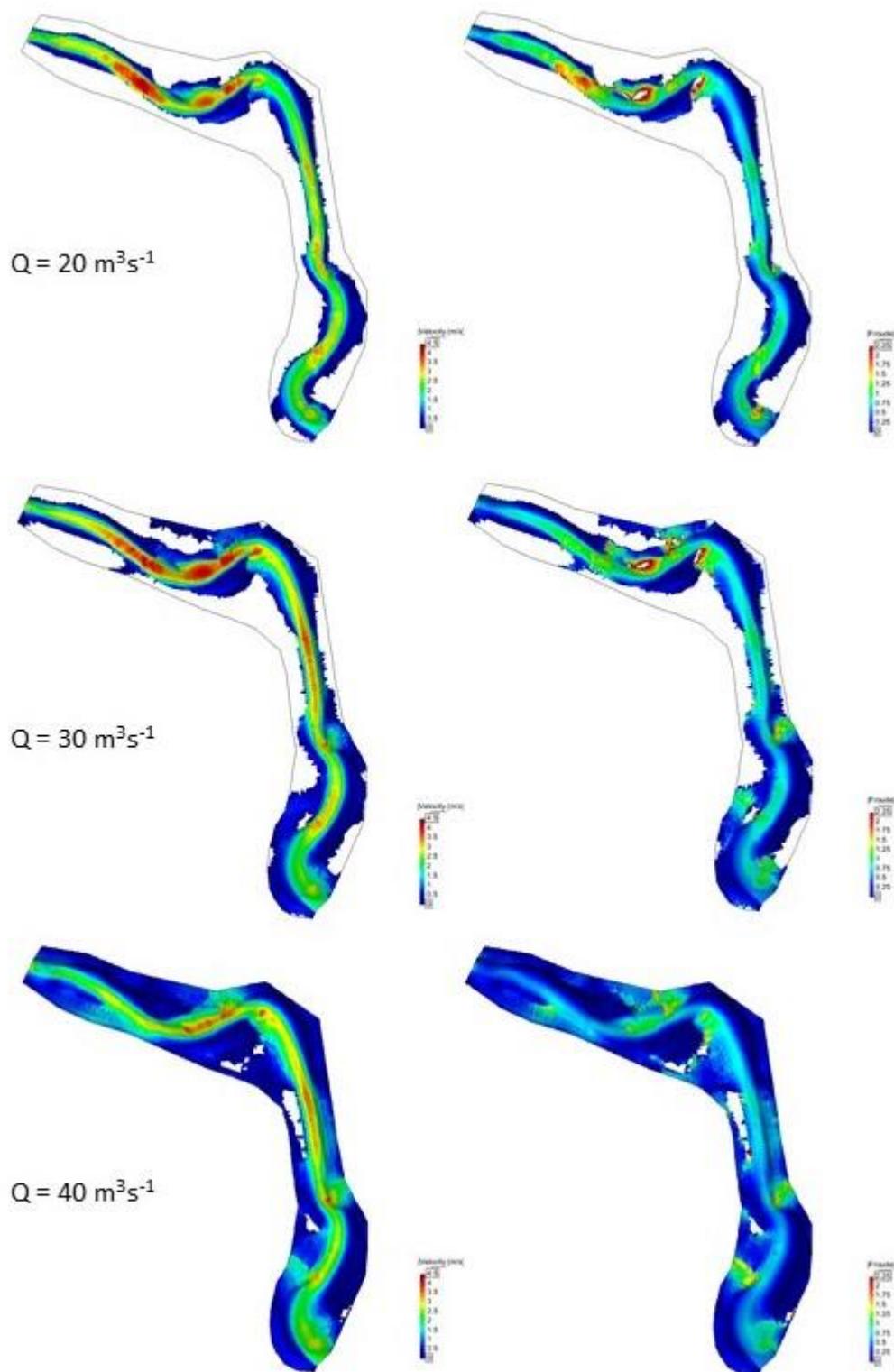


Figura 11. Resultados del modelo bidimensional para tres instantes de tiempo y caudales distintos. A la derecha se muestra el módulo de la velocidad y a la izquierda el número de Froude.

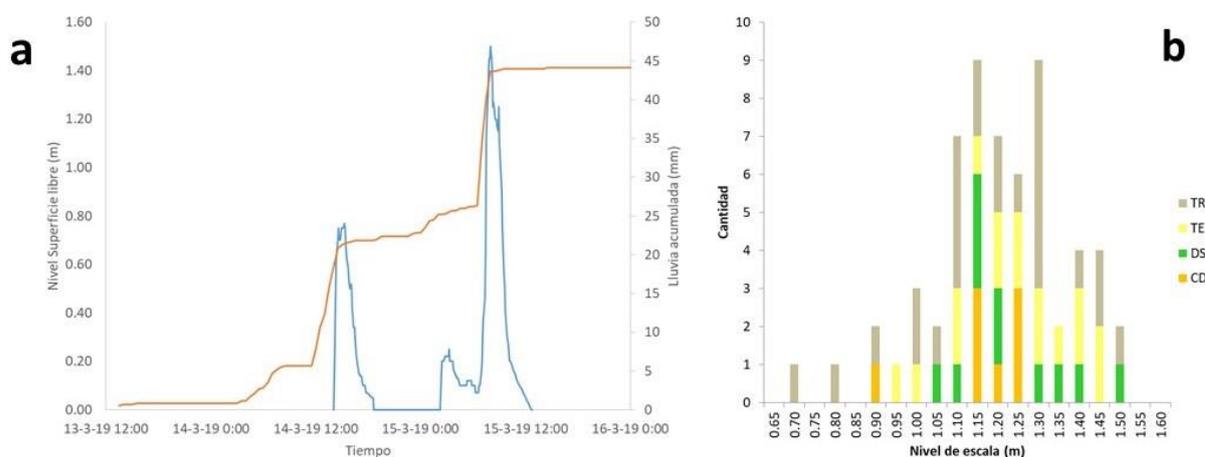


Figura 12. A) Evento registrado en marzo de 2019. Se expone la lluvia acumulada según las mediciones de tres pluviómetros y el nivel en el arroyo. B) Frecuencia de observaciones de los distintos tipos de improntas referidos a la elevación de la superficie en la escala hidrométrica.

El día 22 de marzo fue posible acceder al lugar para revisar los equipos mientras que el relevamiento de las improntas se realizó el día 9 de abril, muy próximo a la ocurrencia del evento encontrándose una numerosa cantidad de improntas. Se relevó la ubicación y elevación de un total de 62 improntas, 16 del tipo TE, 24 de TR, 8 de CD y 10 del tipo DS. No se encontraron casos de RN. Cuando se compararon los perfiles longitudinales simulados con IBER y las mediciones de campo se decidió eliminar 4 registros de improntas que eran evidentemente ajenos a la población de relictos. En la figura 12b se muestra la distribución de frecuencia de tipos de improntas referida a la elevación en la escala hidrométrica (utilizando modelo hidrodinámico 2D). El tipo TR fue observado en todo el rango de niveles, desde 0.90 m hasta 1.45 m. Posiblemente tal distribución obedece a la presencia de zonas susceptibles de general aguas tranquilas en distintos niveles. La mayor frecuencia se encuentra para el nivel de 1.30 m. La tipología TE se distribuye uniformemente en todo el rango de observación; los taludes laterales del cauce son pronunciados y de material limo-arcilloso que permite la formación de esta impronta.

El tipo CD fue observado mayormente en el rango de 1.12 m a 1.27 m. Luego de producirse el pico de la crecida del segundo evento, el nivel de la superficie libre permaneció 45 min en dicho rango de niveles posibilitando la acumulación de material flotante en las zonas altas planas o con baja pendiente de las márgenes. Las improntas del tipo DS se observaron en el rango de 1.05 m a 1.50 m y principalmente entre 1.12 m y 1.22 m, registrándose una sola impronta en la clase más alta. La distribución está influenciada por la presencia de vegetación arbustiva en los flancos más tendidos del canal. También se verifica para este caso la incidencia de la duración del nivel hidrométrico antes señalado.

La comparación entre frecuencia de improntas en función del nivel hidrométrico observado en la escala se expone en la figura 13a. Al buscarse registros de los niveles máximos alcanzados por la corriente, la frecuencia empírica no cubre el rango inferior de la escala sino que inicia desde la elevación 0.95 m. Se observa una buena correspondencia entre las predicciones de distribución de masa con la distribución de improntas calculadas con el modelo hidrodinámico 2D. Cuando se aplica el modelo 1D se produce un desplazamiento de la distribución hacia la derecha producto de los tirantes críticos calculados en el tramo entre las distancias 150 m y 250 m. Por tal motivo, se continuará el análisis considerando el modelo hidráulico 2D.

Se distinguen tres modas en la distribución de improntas, en las elevaciones 1.15 m, 1.30 m y 1.40 m. Con respecto a las predicciones teóricas se distinguen dos modas, una inferior en 1.25 m y otra superior en 1.45 m. El cambio en el exponente beta no modifica la ubicación de las modas sino que cambia el peso relativo entre los niveles elevados y los bajos. Claramente las improntas medidas en campo corresponden al segundo evento de crecida (el primer evento tuvo un nivel máximo de 0.80 m).

La variación del exponente beta se realizó para un rango de valores entre -0.5 y 1.5. El valor negativo indica una reducción en la carga conforme aumenta el caudal, el valor nulo indica concentración constante y valores positivos corresponden al aumento de la concentración con el caudal. En la medida que disminuye el exponente los niveles más bajos adquieren mayor peso relativo. En la figura 14b se muestra un nuevo gráfico en el cual se han renormalizado las curvas de frecuencia considerando solamente los niveles superiores a 0.80 m. Aunque la variación en el exponente es considerable, no se observan cambios sustanciales en la distribución teórica. Por tal motivo, la similitud entre distribución teórica y empírica se atribuye principalmente a la duración en los niveles hidrométricos. Por otro lado, la diferencia puede atribuirse a la posibilidad de retención de material. Para los niveles más altos predominan las improntas del tipo TR y TE. La ausencia del-tipo CD y una sola observación de DS puede atribuirse a una menor posibilidad de condiciones susceptibles de retener materiales flotantes. Vale señalar que los cálculos teóricos se realizaron considerando que la función p_y es constante.

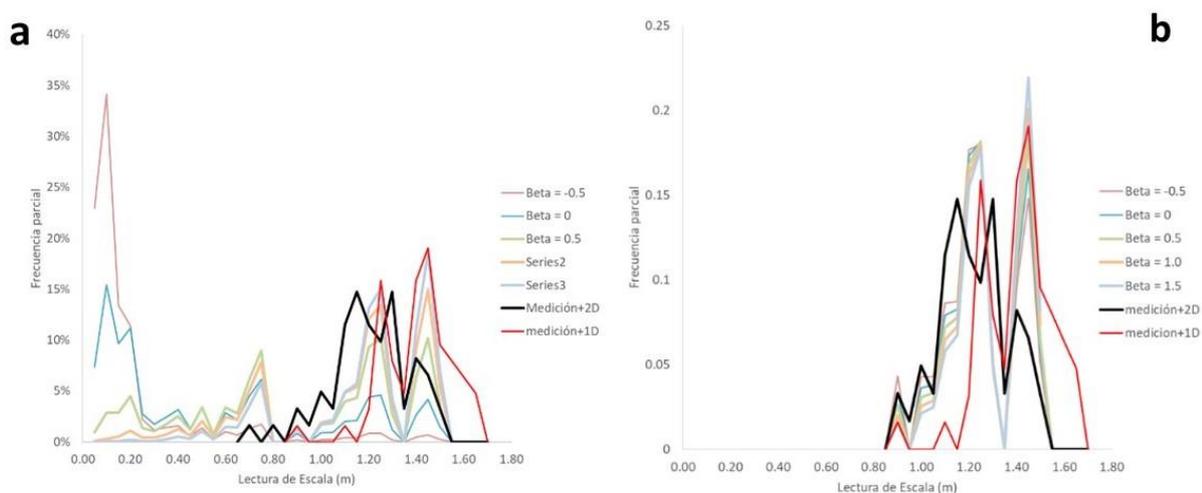


Figura 13. A) Comparación entre distribución de frecuencias parciales según observaciones de niveles y de improntas. B) Comparación entre frecuencia de observaciones y distribución teórica de masa de improntas para el rango de observaciones en campo.

Curva de frecuencia de niveles

Finalmente se aborda la comparación entre frecuencia de niveles observados y estimados en base a improntas con el fin de responder a la pregunta por los indicadores más convenientes a relevar en campo. Se construyeron curvas de frecuencia acumulada considerando distintos tipos de improntas. El primer grupo incluye únicamente al tipo DS que es muy común encontrar tanto en los arbustos presentes en las márgenes del canal como en la planicie adyacente cuando se producen desbordes. El segundo grupo incluye los CD que suelen observarse principalmente luego del evento al igual que el tipo TE. En el cuarto grupo se han incluido todos los tipos propuestos en este artículo. En la figura 14 se muestran las distribuciones acumuladas de

improntas referidas a la elevación en la sección monitoreada y la frecuencia empírica considerando únicamente la permanencia de niveles.

Todas las distribuciones acumuladas basadas en improntas resultan muy similares independientemente de la cantidad de tipologías incluidas. Además existe poca diferencia respecto a la duración de los niveles. La elevación mediana (50% del tiempo de los niveles comprendidos entre 0.80 m a 1.60 m) es de 1.23 m según las observaciones directas (tabla 2). El valor predicho en base a improntas subestima, estando comprendido entre 1.18 m y 1.21 m. Misma situación ocurre para los percentiles superiores, esto es, 84% y 90%. En el caso del percentil 95%, mientras el valor de observación directa es de 1.47 m, las estimaciones en base a improntas se ubican entre 1.46 m y 1.50 m.

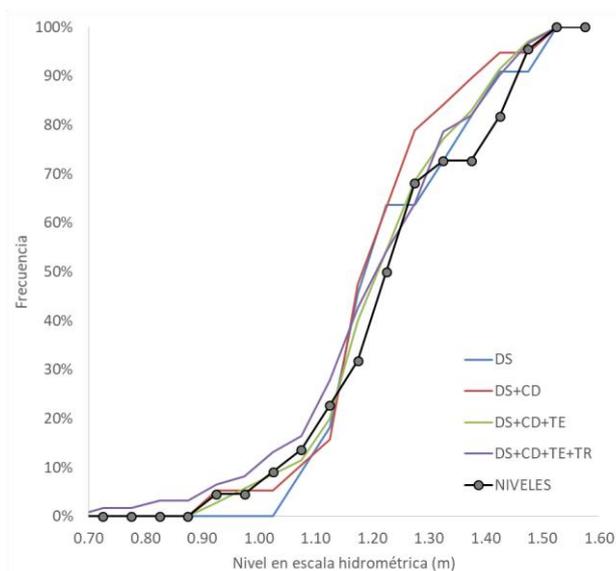


Figura 14. Distribución de frecuencia de elevaciones considerando distintas improntas y los niveles registrados por la cámara.

Tabla 2. Niveles obtenidos para distintos percentiles incluyendo registros de distintas tipologías de improntas y comparación con los niveles observados por la cámara.

Percentil	Niveles según improntas y cámara (m)				Cámara	Caudal ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)		
	DS	DS+CD	DS+CD+TE	DS+CD+TE+TR		DS	DS+CD+TE+TR	Cámara
16%	1.11	1.13	1.10	1.07	1.09	26.1	24.5	25.2
50%	1.19	1.18	1.21	1.21	1.23	28.8	29.5	30.1
84%	1.39	1.32	1.38	1.39	1.43	35.9	35.9	37.5
90%	1.42	1.38	1.42	1.42	1.46	37.0	37.2	38.2
95%	1.50	1.48	1.46	1.46	1.47	39.6	38.4	38.8
max	1.48	1.48	1.48	1.49	1.50	39.0	39.4	39.7

Discusión

Observación directa de niveles de las crecidas

La colocación de cámaras en la cuenca Sagmata ha posibilitado la comparación directa entre la variación de los niveles en el arroyo y las marcas observadas posteriormente al evento. Dichas marcas constituyen una fuente de información usual en la determinación de paleocrecidas y han sido objeto de amplia discusión. Fischer (2005), en su estudio del

lago del glacial Agassiz, asoció la observación en campo de líneas de sedimentos (denominados “Terra Retentum” en este estudio) con distintos niveles recesivos del lago conforme se incidía el canal de drenaje. Heritage et al (2019) estimaron el caudal pico de un evento extremo en Sudáfrica utilizando detritos vegetales, que en este estudio han sido denominados “Detritus Silvestris”, midiendo la elevación más alta de la línea de detritos como indicador del nivel alcanzado por la corriente. Dichos investigadores evitaron los casos de grandes detritos por la posible flexibilidad de algunos elementos en condiciones de flujos altos y la sobrelevación del flujo. En el presente estudio tal consideración fue atendida en campo priorizando los detritos interceptados por fustes importantes o en la base de los arbustos con lo cual se minimizaba la deformación de la planta. Además, el uso de varios tipos de improntas ha permitido aumentar el número de observaciones en campo (cerca de 60 para un tramo corto de 400 m). La curva de distribución de frecuencia de improntas fue explicada correctamente en función del modelo de distribución de masa, combinación del hidrograma, como fue señalado por Fischer (2005) y de la concentración de material transportado. No se han encontrado en la literatura informes sobre la concentración de detritos arrastrados por la corriente. Sin embargo, si se considera que la carga de detritos es proporcional a la carga de lavado, numerosos estudios realizados en ambientes semiáridos sugieren un amplio rango para el exponente beta, variando entre 0.2 y 1.5. En el presente estudio, la comparación directa con la duración de los niveles (Fig. 15) sugiere que el exponente beta tendría un valor muy bajo siendo más influyente el tiempo de permanencia de un determinado nivel.

Para la relación entre niveles hidrométricos registrados en la escala y los niveles de las improntas se utilizaron dos estrategias de modelación, una unidimensional y otra bidimensional. La aplicación del software HEC-RAS requiere de menos información de campo y resulta, naturalmente, la primera elección. Sin embargo, en el caso estudiado no pudo obtenerse una solución adecuada de la ecuación de energía. El procedimiento numérico buscó la solución en modo iterativo y alcanzó la cantidad máxima de iteraciones. Entonces adoptó aquella solución que produjo el menor residuo en la ecuación de energía o impuso el tirante crítico. De este modo el programa puede continuar el cálculo en las secciones siguientes (Brunner, 2016). Costa y Jarrett (2008) advierten sobre las dificultades en la estimación de caudales en cursos aluviales cuando el número de Froude es elevado. En este estudio, la aplicación del modelo bidimensional IBER permitió resolver numéricamente el flujo. En la figura 11 se observa que el régimen es más factible de ser crítico a supercrítico (Fr entre 0.8 y 1.4) para caudales próximos a $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en el tramo donde se encuentra ubicada la escala. Cuando aumenta el caudal, aumenta mayormente el tirante y disminuye el número de Froude.

El desarrollo del flujo crítico ha sido asociado con la formación de dunas y antidunas que se visualizan por la ondulación en la superficie libre (Tinkler, 1997). Estas formas de fondo previenen el desarrollo de flujos supercríticos en canales naturales, salvo en tramos muy pequeños (Grant, 1997). La modelación hidrodinámica 2D indica que el flujo se concentra en la zona central del canal, que se ha verificado en campo con la formación de ondulaciones. Por otro lado, estas ondulaciones aumentan la resistencia al flujo e inhiben el aumento de la velocidad. Lumbroso y Gaume (2012) propusieron un valor límite de 1.3 para el número de Froude en corrientes naturales. En el presente estudio, los valores de dicho parámetros estuvieron contenido en el rango sugiriendo que la elección del coeficiente de Manning ha sido adecuada.

Consideraciones sobre los errores en las determinaciones de alturas

Las mediciones de niveles están sujetas a errores de lectura en la escala hidrométrica. La estructura produce una perturbación en el escurrimiento generando un punto de estancamiento del flujo en el borde de ataque del tubo y la sobrelevación del flujo (Fig. 2d). Por ejemplo, para una velocidad de flujo de 2 m s^{-1} la energía potencial equivalente (por unidad de peso) es tan elevada como 0.20 m. En el borde de aguas abajo se produce la zona de estela que suele evidenciar nivel inferior al flujo circundante. En base a estas condiciones un error de hasta 0.05 m en la lectura de la escala resulta plausible.

La elevación atribuida a las improntas también está sujeta a errores. En primer lugar, en campo no siempre resulta evidente el nivel que habría alcanzado el flujo para producir tal huella. En el caso de los DS el nivel máximo de una acumulación de detritos gruesos no necesariamente indica el nivel máximo porque los detritos fueron transportados por flotación. Además, dependiendo de la ubicación del obstáculo respecto del flujo principal y del grado en que éste altera al flujo, al igual que en el caso de la escala, se puede generar una impronta tipo DS a un nivel superior. Los CD y TR requieren de condiciones de aguas tranquilas y son proclives a formarse en niveles más altos al nivel medio de la superficie libre cuando existen condiciones locales de oleaje (Fig. 2a, 2b). Sin embargo, como estas improntas suelen encontrarse en la planicie donde la pendiente del terreno es suave, un cambio en la posición de la impronta no repercutirá en mayores errores de elevación.

La formación de improntas TE depende de las condiciones hidráulicas y geotécnicas del sitio. En la Fig. 2c se muestra la formación de ondas estacionarias que producen una elevación local del flujo por encima del nivel medio circundante. Cuando se mide la impronta post-evento se obtendría una elevación sesgada. Por otro lado, es usual encontrar intercalaciones de estratos de suelos finos cohesivos (limos y arcillas) con estratos de arenas y gravas. La presencia de estos últimos produce improntas más rápidamente porque se desmoronan al aumentar la humedad en el suelo. De tal modo que se produce una impronta que responde en mayor medida a la estratificación que al nivel hidrométrico.

La relación entre la elevación de la impronta y la correspondiente lectura de escala se realizó mediante simulación hidrodinámica. Se estimó un coeficiente de Manning y los niveles hidrométricos dependen de dicho factor por regular sobre la resistencia al flujo. Sin embargo, el caudal fue arbitrario por lo que una subestimación en el coeficiente de Manning se compensaría con un caudal más elevado para producir el mismo nivel. La elección del coeficiente de Manning resulta más importante para la determinación del caudal máximo de la crecida. El análisis de GCI mostró que la modelación con una grilla con elementos triangulares de 0.75 m de lado tenía asociada un error de 0.038 m. Dicho error es similar al estimado para la lectura directa en la escala.

Las modelaciones hidrodinámicas se realizaron asumiendo fondo fijo y utilizando un modelo digital del terreno obtenido por triangulación de una nube de puntos GPS. Por un lado, el análisis de un evento posterior (ocurrido en junio con un tirante de 0.87 m en la sección de la cámara) produjo un descenso de 0.13 m y un posterior relleno de 0.20 m, tal se deduce de las longitudes de las cadenas. Y por otro lado, el relevamiento GPS evidenció una variación altimétrica media de 0.021 m. La formación de ondas en el lecho puede aumentar el coeficiente de Manning seleccionado inicialmente en base a la granulometría exclusivamente. Finalmente, los cambios altimétricos están dentro de los errores de la modelación hidrodinámica.

Los valores de errores asociados a la lectura en la regla hidrométrica, variación del lecho y estimación del nivel de agua mediante modelación hidrodinámica sugieren que las diferencias altimétricas reportadas en la tabla 2 no son significativas.

Performance de los modelos hidrodinámicos

El uso de modelos bidimensionales para la reconstrucción de crecidas recientes y paleocrecidas constituye una nueva herramienta de exploración. Dada la complejidad de estos modelos, se han desarrollado alternativas que simplifican las ecuaciones del flujo. Heritage et al. (2019) usaron JFlow en su estudio de la crecida en los ríos Sabie y Olifan en Sudáfrica con tramos de 50 km de longitud. Jflow es un paquete informático comercial que aplica una versión 2D de la ecuación de difusión por lo que es una primera aproximación a un modelo de flujo 2D (Bradbrook, 2006). Sin embargo, dicha simplificación permite acelerar el tiempo de cálculo y manejar grandes volúmenes de información haciendo posible el análisis de tramos extensos de ríos. Cuando la extensión del dominio de cálculo es más acotada, resulta viable el uso de modelos de flujo 2D con las ecuaciones de Saint-Venant promediadas en la vertical. Por ejemplo, Bohorquez (2016) utilizó el modelo Dassflow-Shallow 2.0 para reconstruir crecidas en un tramo de 5 km del Río Guadalquivir (España). En el presente estudio se ha utilizado el software IBER que también resuelve las ecuaciones de Saint-Venant. Las corridas de 700 s en un tramo corto del arroyo efímero duraron entre 10 min y 2 hs 25 min según la densidad de grillas (corridas CHRT5 Y CHRT8, respectivamente). La simulación de la onda de crecida (corrida CHRT11) tuvo una duración de 7 hs 40 min. El trabajo constante de desarrollo del software IBER ha producido durante la redacción del presente informe nuevas versiones que aprovechan las potencialidades de cálculo de las unidades gráficas de las computadoras reduciendo drásticamente el tiempo de cálculo (García-Feal et al., 2020).

Cabe destacar que la cantidad de información necesaria para una simulación bidimensional es mayor. En tal caso se requiere mayor tiempo de relevamiento topográfico en campo si se emplea un GPS puesto que se debe armar una nube de puntos suficientemente densa para luego elaborar un MDT, que normalmente requiere de trabajo de gabinete adicional asistiendo al programa de interpolación. Otra alternativa es el empleo de un drone para la obtención de una nube de puntos del terreno. Dicha tecnología comienza a convertirse en una herramienta topográfica estándar.

A partir de la modelación hidrodinámica 2D fue posible obtener una relación entre el nivel en la escala hidrométrica y el caudal que circula por dicha sección. En la tabla 2 se muestran los caudales asociados a distintos percentiles de observación de improntas y lecturas directas en la escala. Como las distintas elevaciones son similares, los caudales estimados no difieren significativamente. Se incluyó una columna con las estimaciones de caudal a partir del análisis de niveles con DS exclusivamente, porque son los más frecuentes en el terreno, luego de varios meses de ocurrido el evento. El caudal estimado para el percentil 90% resulta 3% inferior al obtenido mediante lectura de escala, mientras que el correspondiente al percentil 95% resulta en exceso por 2%. Por lo tanto, el uso de este único indicador resulta prometedor para el estudio de las crecidas más antiguas. Finalmente, señalamos que en este estudio no hemos analizado la sensibilidad en la predicción del caudal con la variación de la rugosidad del lecho. Además, un estudio más complejo debería incursionar en la modelación hidráulica-sedimentológica para explorar el efecto de la variación del nivel del fondo.

Indicador de caudal máximo de una crecida

El modelo teórico indica que es más probable encontrar improntas para niveles hidrométricos inferiores al máximo alcanzado por la crecida. En la tabla 2, el valor de caudal para la mediana es un 75% del valor máximo. Si bien los caudales máximos estimados en base a las improntas son similares a los observados, es probable que la cantidad e improntas en campo no sean tantas como las encontradas en este estudio (62) por haberse realizado pocos días después del evento. En tal sentido, no resulta adecuada o posible la aplicación de un criterio máximo. En cambio, para un percentil del 90%, el caudal estimado es un 7% inferior al máximo, lo cual está dentro de los errores usuales en las prácticas de aforo con molinete. El empleo de este percentil es un buen indicador de la intensidad máxima de la crecida.

CONCLUSIONES

El presente estudio presenta nuevas contribuciones para la reconstrucción de paleocrecidas con especial énfasis en ambientes áridos de la Patagonia Argentina. Se presentaron cinco tipologías de improntas reconocidas en el campo, a saber: detritus silvestris, coprodetritus, terra retentum, terra erosis y radix nudis. Se atribuyó a cada tipo de impronta una perdurabilidad en el tiempo diferente siendo más probable encontrar del tipo DS, TE y RN. Los fuertes vientos patagónicos suelen disturbar las improntas tipo CD y TR. El relevamiento temprano de las improntas en la pequeña cuenca del Arroyo Sagmata permitió el reconocimiento de las cuatro primeras categorías y su inclusión en el análisis.

El modelo teórico propuesto explicó adecuadamente los niveles de improntas encontrados en campo posteriores al evento de 14-15 de marzo de 2019. El modelo indica que la mayor cantidad de improntas se hallará para una profundidad menor al nivel máximo de la crecida. Dicha distribución depende de la cantidad de detritos transportados por la corriente y del tiempo de permanencia de los niveles hidrométricos.

La relación entre el nivel hidrométrico estimado en campo a partir de la impronta y el correspondiente nivel en la escala hidrométrica se estableció aplicando modelos hidráulicos, 1D y 2D. Para el caso de estudio, el modelo 1D (HEC-RAS) encontró dificultades en el tramo donde el flujo se tornaba crítico-supercrítico. En cambio, la modelación bidimensional (IBER) permitió resolver el flujo adecuadamente.

La propuesta de tipología de improntas, con su distribución espacial sumada a modelación hidrodinámica (1D en los casos posibles por ser más sencilla o en su defecto, 2D) resulta interesante para su aplicación extensiva en ambiente de la Patagonia semiárida a fin de estimar los eventos de crecidas recientes. Finalmente, se propone como indicador de la intensidad de la crecida utilizar el percentil 90% de la curva de distribución vertical de improntas.

En trabajos futuros se pondrá a prueba el modelo propuesto en este artículo con una mayor cantidad de casos. Para tal fin se considerarán otros tramos dentro de la cuenca Sagmata y varios eventos con diferentes niveles de intensidad. Además, el relevamiento de improntas en distintos momentos luego del paso de los eventos permitirá evaluar su persistencia, proveyendo información importante para la reconstrucción de eventos pasados. La construcción de MDT con tecnología Drone posibilitará evaluar cambios morfológicos en los tramos de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Caolineria Patagónica, propietaria del campo donde se encuentra el área de estudio, por los permisos de acceso y su apoyo a esta actividad. La presente investigación ha sido desarrollada en el marco del proyecto “Aplicación de ingeniería verde para fomentar la retención de sedimentos en suelos del Valle Inferior del Río Chubut” (CONICET-CENPAT, UNPJSB, INTA) con el financiamiento de Danone S.A. y el auspicio de The Nature Conservancy.

REFERENCIAS

- Alexandrov Y., Cohen H., Laronne J. B., Reid I. (2009) Suspended sediment load, bed load, and dissolved load yields from a semiarid drainage basin: a 15-year study. *Water Resources Research*, Vol. 45, doi: 10.1029/2008WR007314.
- Bilmes, A.; Pessacg, N.; Alvarez, M.P.; Brandizi, L.; Cuitiño, J.I.; Kaminker, S.; Bouza, P.J.; Rostagno, C.M.; Núñez de la Rosa, D.; Canizzaro, A., 2016. Inundaciones en Puerto Madryn: Relevamiento y diagnóstico del evento del 21 de Enero de 2016. Informe Técnico CCTCONICET-CENPAT.
- Bladé E., Cea L., Corestein G., Escolano E., Puertas J., Vázquez-Cedón, Dolz J., Coll A. (2014) Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*. 30(1), 1-10.
- Bohorquez P. (2016) Paleohydraulics reconstruction of modern large floods at subcritical speed in a confined valley: proof of concept. *Water*, 8, 567; doi :10.3390/w8120567.
- Bradbrook, K. (2006). JFlow: a multiscale two-dimensional dynamic flood model. *Water Environment Journal* 20 (2), 79–86 .
- Brunner G., (2016). HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual, Version 5.0. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center.
- Cea L., Bladé E., Sanz-Ramos M., Fraga I., Sañudo E., García-Feal O., Gómez-Gesteira M., González-Cao J., (2020) Benchmarking of the Iber capabilities for 2D free Surface flow modelling. *Servizo de Publicacións. Universidade da Coruña*.
- Colombani, E., Behr S., Brandizi L. (2017) Estimación de precipitaciones extremas a través de GSMap y aplicación hidrológica a la crecida del Arroyo Telsen, Chubut, Patagonia Argentina. *Revista de Meteorología*. [online]. 2017, (42), 1, 53-66.
- Corestein G., y Bladé E., (2013) Validación del módulo de transporte de sedimentos de fondo – Modelo Iber. III Jornadas de Ingeniería del Agua. La protección contra los riesgos hídricos. Barcelona.
- Coronato A, Coronato F, Mazzoni E, Vázquez M. (2008). Physical geography of Patagonia and Tierra del Fuego. In: J Rabassa, ed. *Late Cenozoic of Patagonia and Tierra del Fuego. Development in Quaternary Sciences*, Volume 11, 3. Amsterdam: Elsevier, 13– 56.
- Costa J. E., y Jarrett R. D. (2008) An Evaluation of Selected Extraordinary Floods in the United States Reported by the U.S. Geological Survey and Implications for Future Advancement of Flood Science. *ScienceScientific Investigations Report 2008–5164*. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey.

- Chachero M. J., (2012) Estudio de precipitaciones en la ciudad de Trelew, Análisis estadístico y ecuaciones de lluvia. Cuadernos del CURIHAM, Vol. 18, pp. 23-37.
- Chachero M. J., (2014) Análisis de precipitaciones máximas en Comodoro Rivadavia. Cuadernos del CURIHAM, Vol. 20, pp. 1-10.
- Chow V. T., (1994) Hidráulica de Canales Abiertos. McGraw Hill, Colombia.
- Escobar, J.M. 2014. Informa de la recorrida por sitios afectados por las precipitaciones torrenciales de abril de 2014. Informe interno. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Estación Experimental Agropecuaria INTA Chubut.
- Fisher T.G. (2005). Strandline analysis in the southern basin of glacial lake Agassiz, Minnesota and North and South Dakota, USA. *Geo. Soc. Am. Bull.* 117, 1481–1496.
- Frostick, L.E., Reid, I., Layman, J.T., 1983. Changing size distribution of suspended sediment in arid-zone flash floods. In: Collinson, J.D., Lewin, J. Eds., *Modern and Ancient Fluvial Systems*. Special Publication of the International Association of Sedimentologists No. 6. Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp. 97–106.
- García-Feal O., Cea L., González-Cao, J., Domínguez J.M., Cómez-Gesteira M. (2020) IberWQ: A GPU accelerated tool for 2D water quality modeling in rivers and estuaries. *Water*, 12. Doi:10.3390/w12020413
- Grant G. E. (1997) Critical flow constrains flow hydraulics in mobile-bed streams: a new hypothesis. *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 2, 349-358
- Heritage G.L., Large A., Moon B., Jewitt G., (2004). Channel hydraulics and geomorphic effects of an extreme flood event on the Sabie River, South Africa. *Catena* 58, 151–181.
- Heritage G., Entwistle N., Milan D., Tooth S. (2019) Quantifying and contextualizing cyclone-driven, extreme flood magnitudes in bedrock-influenced dryland rivers. *Advances in Water Resources* 123, 145–159.
- Kalless, G. y Bastida, R., (2017a). Estimación del caudal máximo de crecidas extraordinarias en arroyos efímeros. Casos de los arroyos Salado y Verde (Patagonia Norte). Cuaderno del Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica, Vol 3, N° 1. Pp. 59-82.
- Kalless, G., y Bastida, R., (2017b) Simulación numérica unidimensional hidráulica-sedimentológica de crecidas torrenciales en arroyos efímeros. Caso del Arroyo Verde en Patagonia Central. Cuaderno del Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica, Vol 3, N° 1. Pp. 31-58.
- Kalless G., Frumento O., Bianchi E. Chachero M. J., Bastida R., Iglesias S. (2019) Cuando en el desierto patagónico los arroyos braman. Evento extraordinario de abril de 2017 en la cuenca del Arroyo Perdido. En: Paredes J. M. (Comp.) *Comodoro Rivadavia y la catástrofe de 2017. Visiones Múltiples para una ciudad en riesgo*. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Argentina.
- Kalless G., Malnero H., Frumento, O., y Pascual, M. (2021) When it rains in the desert of Patagonia: heavy rains, sediment laden flash floods and hazard management challenges. *Authorea*. October 27, 2021. DOI: 10.22541/au.163534875.55080666/v1
- Keulegan, G. H. (1938), *Laws of turbulent flow in open channels*, National Bureau of Standards Research Paper RP 1151, Washington, D.C.

Lumbroso, D., y Gaume, E., (2012) Reducing the uncertainty in indirect estimates of extreme flash flood discharges. *Journal of Hydrology*, Volume 414-415, 16-30. Doi 10.1016/j.jhydrol.2011.08.048

Paredes J. M., Ocampo, S. M., Foix, N., Olazabal, S.X., Valle, M.N., & Allard, J.O. (2021) Geomorphic and Sedimentological Impact of the 2017 Flash Flood Event in the City of Comodoro Rivadavia (Central Patagonia, Argentina). In Bouza, P., Rabassa, J., & Bilmes A. (Ed) *Advances in Geomorphology and Quaternary Studies in Argentina*. Proceedings of the Seventh Argentine Geomorphology and Quaternary Studies Congress. Springer Earth. 3–29. DOI:10.1007/978-3-030-66161-8_1

Reid, I., Powell, D.M., Laronne, J.B., Garcia, C., 1994. Flash floods in desert rivers: studying the unexpected. *Eos _Transactions of the American Geophysical Union*. 75, 452.

Rhoads, B.L., 1990. Hydrologic characteristics of a small desert mountain stream: implications for short-term magnitude and frequency of bedload transport. *Journal of Arid Environments* 18, 151–163.

Roache P.J. (1997) Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics. *Annual Review of Fluid Mechannics*, 29, 123-160.

Rostagno C., Coronato F., Del Valle H., Puebla D. (1999) Runoff and Erosion in Five Land Units of a Closed Basin of Northeastern Patagonia. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 13:3, 281-292. DOI: 10.1080/089030699263311

Serra, J.J. 2004. Urbanización e inundaciones en sistemas hídricos del centro de la región patagónica. En: Bertoni, J.C. (Organizador), *Inundaciones Urbanas en Argentina*, 155-195, ed. GWP-SAMTAC, Córdoba, Argentina.

SIPHN (2022). Sistema Nacional de Información Hídrica. Secretaría de Información y Política Hídrica Nacional. <https://www.argentina.gob.ar/obras-publicas/hidricas/base-de-datos-hidrologica-integrada>.

Sutherland, R.A. and R.B. Bryan 1990. Runoff and erosion from a small semi-arid catchment, Baringo District, Kenya. *Applied Geography*, 10, 91–109.

Tooth S. (2000) Process, form and change in dryland rivers: a review of recent research. *Earth-Science Reviews*. Vol (51), 67-107. Doi: 10.1016/S0012-8252(00)00014-3

Tinkler K. J. (1997) Critical flow in rockbed streams with estimated values for Manning's n. *Geomorphology* 20, 147-164.

UNESCO (1977). *Carte de la repartition mondiale des régions arides*. Notes techniques du MAB, 7. Paris.

Van Rijn, L. C. (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Aqua publications, Netherlands.

Woodward J.C., Tooth S., Brewer P.A., Macklin M.G., (2010) The 4th International palaeoflood workshop and trends in palaeoflood science. *Glob. Planet. Change* 70, 1–4.

ESTIMACIÓN DEL CAUDAL MÁXIMO DE INUNDACIONES HISTÓRICAS EN ARROYOS EFÍMEROS. CASOS DE LA PATAGONIA SEMIÁRIDA (ARGENTINA).

Kaless Gabriel, Bastida Rodrigo, Iglesias Sebastián, Belcaro Franco, Villar Milton, Brandizi Laura, Días Farías Carlos, Rubinich Queupan Mayra, Bianchi Érico, Dante Zappellini, Juan José Serra

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco
Av. 9 de Julio 25, Trelew, Chubut, Argentina – Tel/Fax +54 280-4428403
e-mail: gkaless@ing.unp.edu.ar – www.dich.edu.ar

RESUMEN

Una vasta extensión del territorio de la Patagonia Argentina (al sur del Río Colorado hasta el canal de Beagle) posee clima seco. Sin embargo ocurren precipitaciones de alta intensidad que activan los arroyos efímeros y producen crecidas repentinas. En el año 2014 ocurrió un evento extraordinario en las cuencas de los arroyos Telsen y Verde; mientras que los eventos que tuvieron lugar en marzo y abril de 2017 activaron las cuencas de numerosos arroyos en el ejido de la ciudad de Comodoro Rivadavia (sudeste de la Provincia del Chubut), las cuencas del Río Chico y de los arroyos Salado y Perdido. Se aplicó una metodología de reconstrucción de la magnitud de los eventos en base a las huellas encontradas en campo y usando un modelo hidráulico unidimensional. Se obtuvieron caudales específicos de 0.097 a 1.19 m³/s/km², y según el área de la cuenca el caudal máximo estimado estuvo en el rango de 33 a 1816 m³/s. Es la primera vez que se reportan valores de tal magnitud. Las incertidumbres del método están asociadas a la estimación de la resistencia al flujo y los cambios morfológicos de los cauces aluviales. Se proponen curvas-envolventes de eventos máximos en base a datos locales y publicados en la literatura, que contribuyen al diseño y verificación de obras de infraestructura en el contexto patagónico.

ABSTRACT

A vast extension of the territory of Argentine Patagonia (south of the Colorado River to the Beagle Channel) has a dry climate. However, high-intensity rainfalls occur that activate the ephemeral stream network producing flash floods. In 2014, an extraordinary event occurred in the basins of the Telsen and Verde streams; moreover the events of March and April 2017 activated the basins of numerous streams in the city of Comodoro Rivadavia (southeast of the Province of Chubut), and the basins of the Chico, Salado and Perdido streams. An indirect magnitude reconstruction methodology was applied based on the traces found in the field and one-dimensional hydraulic modeling. Specific flows of 0.097 to 1.19 m³/s/km² were obtained, and depending on the basin area, the estimated maximum flow was in the range 33 to 1816 m³/s. It is the first time that such magnitudes are reported. The uncertainties of the method are associated with the estimation of the flow resistance and the morphological changes of the alluvial channels. Envelope curves are also proposed based on local data and data published in the literature, which contribute to the design and verification of infrastructure works in the Patagonian context.

INTRODUCCIÓN

Las regiones con climas áridos y semiáridos cubren una extensión significativa del planeta. Se caracterizan por láminas anuales de precipitación reducidas, inferiores a la evapotranspiración (umbral de precipitación de 500 mm aproximadamente, según la clasificación de Köppen para climas secos). Sin embargo, los eventos de lluvias pueden afectar áreas acotadas y desarrollar elevadas intensidades (Sharon, 1972; Peleg y Morin, 2012; Smith et al. 2019). Debido a los largos periodos con ausencia de lluvias, el suelo suele estar seco y se requiere superar un umbral para la generación de escorrentía (Kampf et al, 2018). En tal situación, la red de arroyos efímeros, que permanecen secos gran parte del año (Kaless et al., 2021, Reid et al., 1998) se activan con el paso de crecidas repentinas que pueden alcanzar caudales elevados (Jahns, 1949; Ben-Zvi y Shentsis, 2000; Costa y Jarret, 2008). Las crecidas repentinas tienen un rol importante en la modelación del paisaje, al transportar una significativa cantidad de sedimentos (Cohen and Laronne, 2005), producir la erosión de márgenes y así la migración del curso con la formación de planicies de inundación (Nanson and Croke, 1991). Al caracterizarse las crecidas por ser repentinas e intensas también producen daños a la infraestructura e incluso muertes cuando los cursos efímeros cruzan centros urbanos. Por tal motivo, el estudio de las crecidas torrenciales reviste interés tanto desde el punto de vista de la geomorfología, para la comprensión de los procesos, como así también de la ingeniería para el diseño de medidas estructurales.

La intensidad de las crecidas inhibe la medición directa del caudal. A fin de obtener información de dichos eventos se ha recurrido al estudio de las huellas que dejan las crecidas, tales como material flotante atrapado en obstáculos, marcas de sedimentos y erosión (Baker 2008; Jarret y England, 2002; Kaless et al., 2020a) En base a estos indicadores de nivel máximo se ha recurrido a variadas técnicas de modelación hidráulica con distintos niveles de complejidad para estimar el caudal máximo, tales como flujo uniforme (Costa y Jarret, 2008), modelos unidimensionales (Web y Jarret, 2002; Zitumi et al., 2021; Kaless et al., 2017) y más sofisticados modelos hidrodinámicos bidimensionales (Delinger et al., 2002; Heritage et al., 2019; Kaless y Bastida, 2017a; Kaless et al., 2019c).

La región patagónica (ubicada al sur de los ríos Colorado y Barrancas) y en particular la Provincia del Chubut, ha sido recientemente escenario de eventos extraordinarios. En abril de 2014 se produjo un evento que afectó la zona norte de Chubut y sur de Río Negro. En la localidad de Telsen se registró una lluvia acumulada de 248 mm, que activó el arroyo homónimo inundando el valle y causando una muerte (Colombani et al., 2014). El mismo evento produjo una crecida extraordinaria en el Arroyo Verde que interrumpió la circulación por la Ruta Nacional Nro. 3, principal arteria vial que conecta a la Patagonia con el norte del país (Kaless y Bastida, 2017a). Posteriormente, entre marzo y abril de 2017, se produjeron varias tormentas afectando una vasta extensión del Chubut. La tormenta de marzo de 2017 (con acumulado de 394 mm) activó la red de 7 arroyos efímeros al sur del Chubut que atraviesan la ciudad de Comodoro Rivadavia. Debido a la inusual intensidad del evento, la corriente arrastró ingente cantidad de sedimentos produciendo anegamientos y rellenos en la ciudad (Paredes et al., 2021). Además se activó el curso impermanente del Río Chico. La alta tasa de erosión de suelo impidió el proceso de potabilización interrumpiéndose el suministro de agua potable en las poblaciones del Valle Inferior del Río Chubut durante dos semanas (Kaless et al., 2019b). Un mes después, un segundo evento tuvo lugar en la zona central afectando las cuencas de los arroyos Perdido y Salado, anegándose las comunas rurales de El Escorial y El Mirasol (Kaless et al., 2019c).

Los objetivos del presente estudio son: a) cuantificar la intensidad máxima de las inundaciones extraordinarias de los años 2014 y 2017 en las cuencas de los arroyos Perdido, Salado, Verde y La Mata; b) analizar las fuentes de incertidumbre al aplicar métodos indirectos de cuantificación; c) caracterizar la intensidad de los eventos en términos de parámetros hidráulicos; d) contextualizar las crecidas recientes con eventos locales precedentes y del extranjero en condiciones climáticas similares; y finalmente e) proponer curvas de envolvente para su uso como herramienta de diseño o verificación de obras de infraestructura.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Se seleccionaron tramos de arroyos pertenecientes a 3 cuencas hidrográficas, a saber, la del Arroyo Perdido, Arroyo La Mata y Arroyo Verde. La cuenca del Arroyo Perdido se extiende en un amplio territorio de la meseta central de la Provincia del Chubut y es de carácter endorreica, resumiéndose la escorrentía en el Bajo de la Tierra Colorada. Esta cuenca tiene dos grandes cursos efímeros, el Arroyo Perdido y su tributario principal, el Arroyo Salado. Se seleccionaron 4 tramos a lo largo del curso principal del Arroyo Perdido y en dos tributarios, los arroyos Colorado y Escorial. Por otra parte, para el Arroyo Salado se seleccionaron 5 tramos a lo largo del curso principal y uno sobre su tributario, el Arroyo Ponte (Ver Figura 1).

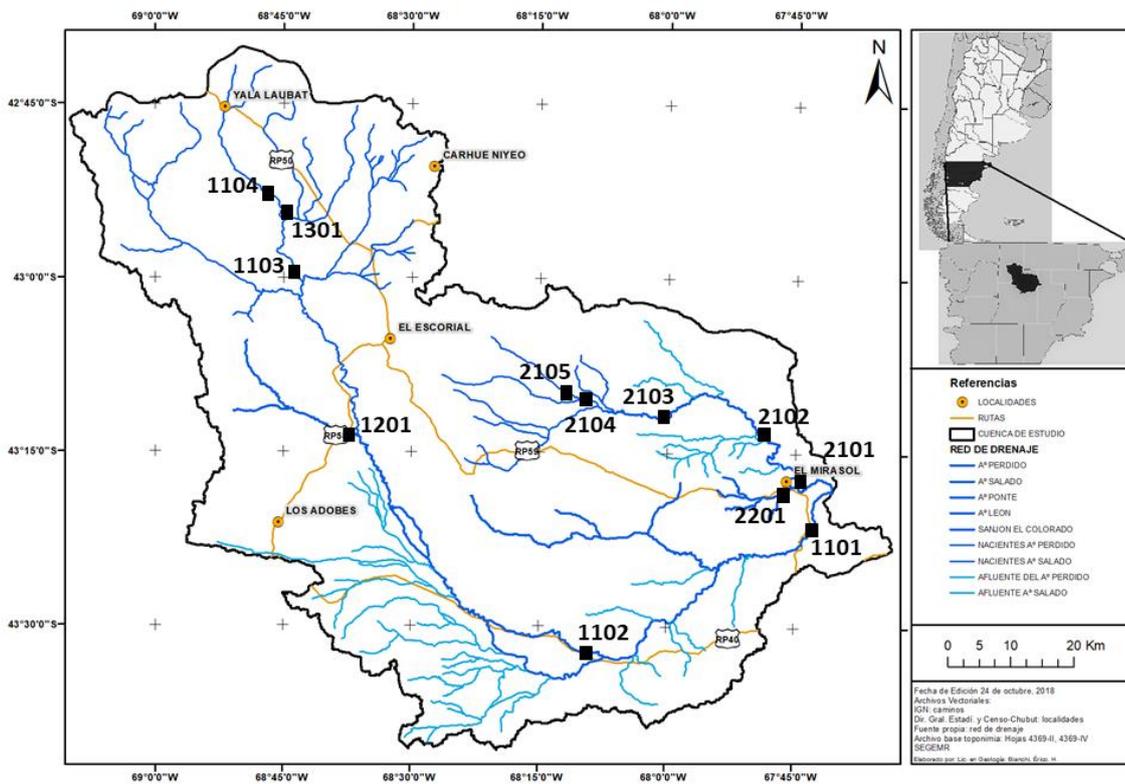


Figura 1.- Cuenca del Arroyo Perdido y ubicación de los tramos estudiados (consultar tabla 1).

Las cuencas de los arroyos Verde y La Mata descargan en el Océano Atlántico. Con respecto a la cuenca del Arroyo Verde, su nacimiento se encuentra en la meseta de Somuncurá. Se estudió un único tramo en esta cuenca. Finalmente, la cuenca del Arroyo La Mata nace en la meseta de Pampa del Castillo. Se analizaron dos tramos de arroyos correspondientes a sendos cursos

efímeros que drenan la parte norte y sur de la cuenca, respectivamente. En la tabla 1 se exponen los datos de ubicación geográfica de cada sitio estudiado junto con el área drenada.

Tabla 1.- Ubicación y características geométricas de los tramos estudiados.

COD.	Curso	Sitio	Coordenadas geográficas		Área Drenada(km ²)
			Latitud	Longitud	
1101	Ao. Perdido	Cruce RP N° 59	43°21'15.35"S	67°42'51.21"O	5853
1102	Ao. Perdido	Ea. El Amanecer	43°31'33.30"S	68°11'14.84"O	3857
1103	Ao. Perdido	Cruce RP N° 58	43°7'13.37"S	68°38'30.21"O	1963
1104	Ao. Perdido	Cerro Bayo	42°58'6.44"S	68°45'10.36"O	596
1201	Ao. Colorado	Cruce RP N° 58	43°13'29.90"S	68°37'49.80"O	293
1301	Ao. El	Confluencia Ao Perdido	43°12'44.81"S	68°36'14.75"O	192
2101	Ao. Salado	Aldea Escolar El	43°17'4.88"S	67°45'36.52"O	1441
2102	Ao. Salado	Línea Alta Tensión	43°13'10.38"S	67°49'11.87"O	1314
2103	Ao. Salado	Ea. Aguada del Toro	43°11'4.48"S	68°8'1.46"O	380
2104	Ao. Salado	Ea. Cerro Parva	43°10'4.7"S	68°15'45.76"O	144
2105	Ao. Salado	Ea. La Nueva Alicantina	43°9'45.12"S	68°16'14.82"O	127
2201	Ao. Ponte	Cruce RP N° 59	43°17'53.02"S	67°45'37.12"O	81
3101	Ao La Mata	Curso norte - RP N°26	45°54'31.03"S	67°40'27.70"O	336
3201	Ao La Mata	Curso Sur	45°53'38.00"S	67°40'57.64"O	219
4101	Ao Verde	Puente R. nac. N°3	41°59'42.60"S	65°17'32.35"O	4494

Relevamientos de campo

Se seleccionaron tramos de arroyos con trazado planimétrico mayormente rectilíneo, continuidad geológica y uniformidad de vegetación de las márgenes. Se evitaron tramos con notable perturbaciones producto de estructuras hidráulicas. Estos criterios sirvieron para minimizar las pérdidas de energía producto de cambios de sección y trazado, lo cual permite confiar en que la fuente principal de resistencia al flujo se debe a la rugosidad del fondo y márgenes.

Se relevaron secciones transversales a lo largo de un tramo de longitud estimada entre 5 y 10 veces el ancho del canal. En cada caso se relevaron aproximadamente 5 secciones. Se utilizó un equipo GPS como base y otra unidad móvil requiriéndose de post-proceso. Se relevaron los niveles alcanzados por las marcas dejadas por la crecida, tales como detritos leñosos, marcas de erosión, material flotante varios atrapados por la vegetación, sedimentos depositados en zonas de aguas tranquilas (siguiendo la metodología expuesta por Kaless et al., 2020a).

Se tomaron muestras volumétricas del material en la superficie del lecho del arroyo. Posteriormente se aplicaron técnicas estándar de laboratorio para la obtención de las curvas granulométricas y los diámetros característicos del material. Los ensayos se realizaron en las instalaciones del Laboratorio de Investigación y Ensayos Viales (Labievi). También se tomaron fotografías del lecho, utilizando un marco 0.75 m x 1.00 m de lado a fin de escalar las fotos. El objetivo de las mismas es caracterizar la presencia de las fracciones más gruesas en la superficie.



Figura 2.- Selección de fotos de algunos tramos relevados del Arroyo Salado (fotos a, b, c, tramos 2102, 2103 y 2101, respectivamente), Arroyo Perdido (fotos d, f, h, tramos 1104, 1103 y 1102, respectivamente), Arroyo El Escorial (e - 1301) y Arroyo Colorado (g - 1201).

Modelación hidrodinámica 1D

La modelación hidrodinámica unidimensional es una estrategia de fácil implementación y que requiere de un nivel de datos de campo relativamente rápido de obtener. Para este estudio se utilizó el modelo HECRAS desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos y que es de acceso gratuito. El software resuelve la ecuación de la energía utilizando la fórmula de Manning para estimar la resistencia al flujo. Mayor información sobre las características del modelo teórico pueden encontrarse en las publicaciones de Brunner (2010a, 2010b).

El coeficiente de Manning fue estimado a partir de la ecuación de resistencia al flujo de Keulegan (1938), utilizando una altura de rugosidad equivalente, k_s , de $2 \cdot D_{90}$, siendo D_{90} el diámetro para el cual el 90% del material del lecho tiene un tamaño igual o inferior (Kamphuis, 1974; Kaless y Bastida, 2017b; Kaless, 2017). Para la condición de borde de aguas abajo se impuso generalmente la condición de flujo uniforme adoptando la pendiente media del tramo como suficiente aproximación de la pendiente de disipación de energía en dicha sección. Se modelaron distintos caudales y se obtuvieron familias de curvas de la superficie libre a lo largo del tramo.

Indicadores de caudales máximos

El indicador de caudal máximo se define como el caudal para el cual el 90% de las observaciones de niveles máximos medidos en campo es igual o inferior al nivel de la superficie libre determinada mediante modelación hidrodinámica para dicho caudal (Kaless et al., 2020a).

A fin de estimar un caudal corregido (Q_c) en base al indicador de caudal máximo (Q) se calcularon los parámetros geométricos medios del tramo bajo condiciones actuales, midiéndose el área de flujo (A) y el radio hidráulico (Rh). Mediante el estudio de imágenes satelitales de alta resolución (BING) se determinó el ancho del canal antes y después del paso de la crecida (se utilizaron imágenes del año 2014 para caracterizar el estado previo). Se asumió que el ancho durante el pasaje del pico de la crecida fue igual al promedio de los anchos iniciales y finales. La corrección propuesta se basa en la hipótesis de flujo uniforme:

$$\frac{Q_c}{Q} = \frac{A_c R h_c^{2/3}}{A R h^{2/3}}$$

Caracterización hidráulica del flujo

El flujo fue caracterizado en términos de potencia de la corriente, la potencia específica de la corriente y el esfuerzo de corte medio de la sección de flujo. Además se utilizaron parámetros adimensionales tales como el número de Froude y el parámetro de Shields.

La potencia de la corriente (Stream power, expresada en W/m) que cuantifica la tasa de disipación de energía por unidad de distancia de recorrido de la corriente,

$$\Omega = \gamma Q S_0$$

La potencia unitaria de la corriente (W/m²) que expresa la disipación por unidad de área:

$$\omega = \frac{\Omega}{B}$$

Finalmente, el esfuerzo de corte (Pa) se define cómo:

$$\tau = \gamma h S_0$$

En las expresiones anteriores, U es la velocidad media, h es el tirante medio, Q es el caudal, B es el ancho del flujo y S_0 es la pendiente media del tramo y γ es el peso específico del agua.

El número de Froude se define del siguiente modo:

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}}$$

El número de Shields fue evaluado para las fracciones granulométricas más gruesas a fin de verificar la movilidad del lecho:

$$\tau^* = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma)D}$$

En donde γ_s es el peso específico del material y D es el diámetro del sedimento. En este caso se adoptó el correspondiente al percentil 90%.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos se exponen en la tabla 2. El espectro de área drenada es amplio y abarca desde pequeñas cuencas de 81 km² hasta una extensión máxima de 5853 km². Si se considera el ajuste por mínimos cuadrados, el caudal mínimo fue de 24 m³/s y el máximo de 1600 m³/s, sin embargo cuando se considera que el 90% de las marcas dejadas por la corriente deben estar por debajo de los niveles modelados, el rango de caudales se eleva a 40.5 m³/s – 2100 m³/s.

Tabla 2.- Caudales máximos estimados mediante modelación hidráulica. Q_{mc}: caudal ajustado por mínimos cuadrados. Q₅₀, Q₈₄, Q₉₀, Q₉₅: caudales para los cuales los niveles modelados sumergen el 50%, 84%, 90% y 95% de las marcas observadas en campo, respectivamente. La columna designada como Q_c corresponde al Q₉₀ corregido con la variación morfológica del curso. La profundidad media corresponde a la superficie libre de mínimos cuadrados. Los anchos fueron obtenidos mediante imágenes satelitales.

COD	Indicadores de Caudal Máximo (m ³ /s)						Prof. media (m)	Ancho inicial (m)	Ancho final (m)	Pendiente (m/m)	N Manning
	Q _{mc}	Q ₅₀	Q ₈₄	Q ₉₀	Q ₉₅	Q _c					
1101	1600	1325	2056	2100	---	1816	2.51	307.4	420.1	0.0018	0.025
1102	1150	1131	1291	1336	---	1266	2.67	101.2	112.7	0.0024	0.024
1103	265	265	358.4	372	386	360	2.57	17.1	18.1	0.0038	0.025
1104	40	36	63	67	70	58	2.16	6.4	8.3	0.0034	0.029
1201	110	145	252	255	258	231	1.10	43.3	53.1	0.0047	0.022
1301		72.5	100.6	106	110.5	102	1.05	13.3	14.4	0.0110	0.033
2101	870	870	1133	1158	1179	932	3.31	37.4	59.0	0.0016	0.026
2102	1108	1025	1218	1400	1640	1152	3.62	61.4	92.7	0.0026	0.026
2103	130	134.3	164.3	174.3	186.3	161	1.74	30.7	35.7	0.0043	0.024
2104	35	32.5	63.6	67.9	72.9	59	1.56	7.7	9.9	0.0072	0.025
2105	24	25	37.8	40.5	42.75	33	1.22	4.9	7.5	0.0065	0.025
2201	50	56.25	101.7	111.7	120	97	0.82	39.0	52.5	0.0034	0.019
3101	50	52.5	78.9	82.5	100	78	0.73	42.1	46.6	0.0104	0.030
3201	35	33.75	66.7	73.3	81.7	90	0.92	17.5	29.0	0.0077	0.030
4101	554	575	890	950	---	783	1.51	81.7	125.1	0.0045	0.024

Con respecto al parámetro de resistencia al flujo, el valor medio adoptado es de 0.026, mientras que la variación se encuentra entre 0.022 para los lechos más finos (D_{90} de 12 mm) y 0.033 para aquellos lechos con presencia de material grueso (D_{90} de 100 mm).

DISCUSIÓN

Incertidumbres en la determinación del caudal máximo

Todos los tramos estudiados se emplazan en depósitos aluviales. En general se recomienda la selección de tramos en roca para garantizar la constancia de la sección durante el pasaje del máximo de la crecida (Delinger et al., 2002; Heritage et al., 2019). Esta situación ideal no pudo encontrarse en el campo. Por tal motivo es muy probable que la crecida de entidad extraordinaria haya producido profusa erosión de márgenes y ensanchado el canal. La geometría utilizada en las modelaciones posee un área de flujo superior a aquella del momento de producirse el pico de la crecida. En la tabla 2 se incluye la columna con el indicador de caudal máximo corregido, Q_C . En promedio, el caudal corregido resulta ser 14% inferior al inicialmente estimado, aunque esto depende del grado de erosión siendo del 3% para el tramo 1301 (Arroyo Perdido, cruce con la Ruta Provincial Nro. 58) y llega hasta el 26% en el tramo 3201 (Arroyo La Mata). En el primer caso, la presencia de roca sobre la margen derecha condicionó la expansión del cauce. En cambio, en el caso del Arroyo La Mata, las márgenes están compuestas por materiales granulares mezcla de grava y arena fácilmente erosionable.

Otra fuente de incertidumbre se encuentra en la determinación del tirante de la crecida. Si bien se buscó identificar los niveles máximos, las marcas o retención de detritos se produce a lo largo de toda la crecida por lo que es de esperar una distribución del material (ver Kaless et al, 2020a). En la medida que es mayor el espectro altimétrico de distribución de detritos, mayor es el rango de variación de los caudales asociados. Por lo tanto, el cociente entre los percentiles 90% (indicador máximo utilizado en este estudio) y el 50% (valor mediano, con mayor representación estadística) indica el espectro relativo de caudales asociados al evento. La figura 3 muestra esta variación en función del tirante. En este caso se utilizó la profundidad media del tramo medida con las observaciones en campo de las marcas dejadas por la crecida (Tabla 2). Se observa que en la medida que el canal de flujo es más profundo, menor es el rango de caudales asociado a la crecida. Lo contrario ocurre para los tirantes más bajos observados, particularmente los que se encuentran en el rango de 0.50 m a 1.00 m. Proponemos como explicación que en los cursos más someros resulta más sensible la determinación del caudal porque la variación de las niveles observados puede ser del mismo orden o un orden inferior que el tirante medio. En cambio, para los tramos más profundos, la variación relativa del tirante respecto a la profundidad resulta menor.

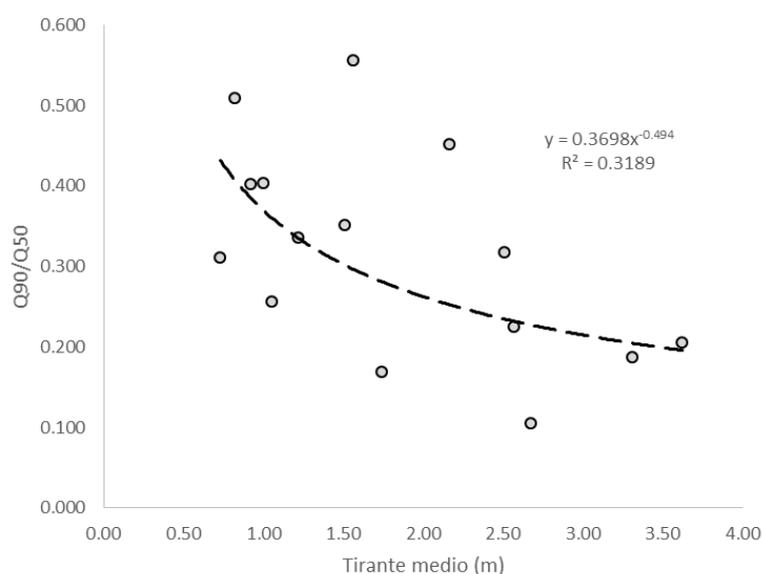


Figura 3. Variación de la proporción entre el indicador de caudal máximo y la mediana con el tirante medio del tramo observado en campo.

Intensidad máxima y aspectos metodológicos

La intensidad máxima de eventos torrenciales recientes en la Provincia del Chubut ha sido estudiada previamente por otros investigadores aplicando otras metodologías para estimar los máximos de cada evento. Kaless y Bastida (2017a) aplicaron el método de los mínimos cuadrados para determinar el pelo de agua más probable de los eventos en el Arroyo Verde (evento del año 2014) y el Arroyo Salado (evento del año 2017). Los caudales pico fueron estimados en $553 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1108 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente. Los valores reportados en la tabla 2 resultan superiores a los estimados anteriormente. Para el caso del Arroyo Verde, cuando se considera la corrección por variación morfológica, el caudal es un 41% superior. En cambio para el caso del Arroyo Salado, el nuevo caudal es un 84% del valor estimado por Kaless y Bastida (2017a). Estas diferencias se explican en parte por la diferencia de criterio en el percentil utilizado para definir el indicador de caudal máximo (el utilizado por Kaless y Bastida corresponde a la columna de Q_{mc} de la tabla 2) y por otro lado, a la corrección por cambio en el ancho utilizado en este estudio. Esto en particular reduce el nuevo caudal como se aprecia en el caso del Arroyo Salado.

Las cuencas ubicadas en el ejido de la ciudad de Comodoro Rivadavia fueron estudiadas por Paredes et al. (2021). Los investigadores estimaron la velocidad superficial en el Arroyo Belgrano y con ello el caudal pico. Posteriormente, utilizando una relación de áreas estimaron los caudales pico en las otras cuencas aledañas. Para el caso del Arroyo La Mata estimaron un caudal total de $196 \text{ m}^3/\text{s}$. Debe observarse que la velocidad superficial suele ser superior a la velocidad media de la sección y, por lo tanto, debería reducirse antes de estimar un caudal. Si se toma un rango entre el 60% y 80% para el cociente entre velocidad media y máxima superficial, surgiría un caudal para el Arroyo La Mata entre $118 \text{ m}^3/\text{s}$ y $157 \text{ m}^3/\text{s}$. Este rango se aproxima al valor de caudal total que resulta de los dos tramos estudiados en este trabajo, y que asciende a $169 \text{ m}^3/\text{s}$ (tramos 3101 y 3201 en la tabla 2).

El evento del año 2017 ocurrido en las cuencas de Comodoro Rivadavia también fue estudiado por Serra et al. (2017) quienes aplicaron técnicas de modelación hidrológica para estimar los caudales máximos en función de los datos de lluvia disponibles. Para el arroyo La Mata estimaron caudales entre $600 \text{ m}^3/\text{s}$ y $800 \text{ m}^3/\text{s}$ según el modelo hidrológico empleado. Estas cifras resultan 3.5 a 4.7 veces superiores a la estimación realizada en este estudio. Atribuimos tales diferencias a la aplicación homogénea en toda la cuenca de hietogramas medidos en la costa. Recientemente, Kaless et al. (2021) han aportado evidencias, a partir de mediciones con una red de pluviómetros, que las lluvias torrenciales en ambiente semiáridos patagónicos tienen una distribución espacial muy localizada. Estas características también fueron observadas en otras zonas desérticas en el extranjero (Sharon, 1972; Peleg y Morin, 2012; Smith et al. 2019).

Características hidráulicas del flujo

El número de Froude es mayormente insensible a la ubicación del tramo en la cuenca, y tiene una media de 0.66 (desvío estándar de 0.21), lo cual indica que prevalecieron condiciones de flujo subcrítico. Doce de quince tramos presentan valores de Fr inferiores a 0.80. Dos tramos tienen número de Froude próximo al valor crítico de 1 (0.8 y 1.17). Un tramo presenta régimen supercrítico con valor de 1.55 (tramo 1301). Numerosos investigadores han advertido sobre las condiciones particulares del flujo en cursos naturales y sus diferencias respecto de los flujos en canales artificiales. Grant (1997) formuló la hipótesis de que la interacción del flujo con los sedimentos del fondo genera dunas y antidunas que previenen la ocurrencia de flujos supercríticos, salvo en pequeños tramos. Las formas de fondo aumentan la disipación de energía, que se puede traducir en un incremento del coeficiente n de Manning. Por otro lado, Tinkler (1997) realizó observaciones de campo interpretando la formación de trenes de ondas en la superficie libre con la ocurrencia del flujo crítico. Este flujo está restringido espacialmente a una parte del canal de flujo. Por lo que, si bien en media el Fr puede ser menor que uno (condiciones de flujo medio subcrítico), el flujo en el centro del canal puede ser crítico o supercrítico a lo largo de tramos cortos del arroyo. Estas diferencias de flujo producen una mayor turbulencia, incremento en la disipación de energía y aumento del n de Manning. Por tal motivo, Lumbroso y Gaume (2012), analizando las incertidumbres asociadas en la determinación indirecta del caudal de eventos extremos, advierten que si $Fr > 1.3$ (en la sección transversal) entonces es probable que el valor de n haya sido subestimado.

Si bien resulta difícil la documentación de eventos en un contexto patagónico de baja densidad poblacional, se cuenta con algunos ejemplos de formación de dunas. La figura 4a muestra el flujo en el Arroyo Salado durante una pequeña crecida (estimada en $84.1 \text{ m}^3/\text{s}$, Kaless et al., 2019a). Se observa la formación de ondas superficiales que afectan una reducida parte del canal. El cruce de la Ruta Nacional Nro. 3 con el Arroyo Verde propicia la mayor documentación de eventos porque se trata de la principal vía de comunicación a lo largo de la costa atlántica de la Patagonia. La figura 4b muestra la formación de dunas aguas abajo del puente durante el evento de baja intensidad ocurrido en abril de 2021. Finalmente, el estudio sistemático de la cuenca Sigmata, con la instalación de cámaras para el monitoreo de los cursos efímeros, provee de nueva información sobre las condiciones de flujo (Kaless et al., 2021). La figura 5 muestra la formación de ondulaciones en la superficie libre en el arroyo Tir Halen durante el pico del evento de marzo de 2019. El tirante es de 1.00 m y las dunas afectan la parte central del arroyo.



Figura 4. Formación de dunas en el Arroyo Salado aguas arriba de la localidad de El Mirasol (pequeña crecida del año 2019) (Fuente: cortesía Carola Jones). Formación de dunas en el Arroyo Verde aguas abajo del puente de la Ruta Nacional Nro 3, evento de abril de 2021 (Fuente: Diario el Chubut, <https://www.youtube.com/shorts/UhGK3SoyBjg>)



Figura 5. Formación de dunas en un pequeño curso efímero ubicado en el Valle Inferior del Río Chubut, Arroyo Tir Halen. La profundidad es de aproximadamente 1.00 m.

Los valores estimados para Fr en los tramos estudiados sugieren que las condiciones de flujo subcrítico predominaron en el momento pico de la crecida. Sin embargo, localmente pudo haber condiciones de flujo supercrítico o crítico. Concluimos que la rugosidad del fondo y de las márgenes constituyeron la principal fuente de la resistencia al flujo y que, por lo tanto, el n de Manning asignado a cada tramo es adecuado.

La intensidad de la corriente se analiza en primer término utilizando el esfuerzo de corte. El mismo varía entre 44.3 y 164 Pa, con un valor medio de 95.1 Pa y un desvío estándar de 33.2 Pa. El esfuerzo de corte tiene una marcada tendencia decreciente hacia aguas abajo (aumento del área drenada). Cuando se consideran los tramos ubicados a lo largo del curso principal de los arroyos Perdido y Salado, se obtiene la siguiente relación:

$$\tau = 324.84A^{-0.188}$$

Con $R^2 = 0.517$. En donde el área A , viene expresada en km^2 y el esfuerzo de corte en Pa. Esta tendencia puede explicarse por la curvatura del perfil del fondo (cóncavo hacia arriba) y, por lo tanto, con la reducción de la pendiente en el sentido del escurrimiento. Además, en la misma dirección se observa un aumento del factor de forma B/h , que implica secciones de flujo más someras en cauces anchos hacia aguas abajo.

El esfuerzo de corte tiene implicaciones en el transporte de sedimentos. El parámetro de Shields tiene un valor medio de 0.192 variando entre 0.084 y 0.456. En cursos con lechos de grava el umbral de inicio del movimiento se encuentra en 0.06 (Andrews, 1984; Parker, 1990), sin embargo la presencia de arena puede reducir a la mitad dicho parámetro. Powell et al. (2003) propusieron un valor mínimo de 0.021 para el parámetro de referencia en el transporte de sedimentos, que si bien es conceptualmente distinto al umbral de inicio de movimiento, indica el efecto de la presencia de arena. Comparando estos umbrales con los valores hallados en campo se sigue que los eventos movilizaron todas las fracciones granulométricas. En base a estos resultados y a la ausencia de coraza superficial de los tramos estudiados, inferimos que existieron condiciones de transporte total, tal como ha sido medido en otros arroyos efímeros (Powell et al., 2003).

Con respecto a la potencia de la corriente, se observa que aumenta hacia aguas abajo, siendo función del área drenada. El valor más bajo es de 1932 W/m mientras que el mayor es de 34556 W/m. El aumento obedece al mayor incremento del caudal respecto a la disminución en la pendiente conforme aumenta el área drenada. Cuando se divide la potencia de la corriente por el ancho de flujo, se obtiene una tendencia mayormente constante, con valor medio de 263.9 W/m² y desvío estándar de 112.4 W/m². Esto se explica en el aumento del ancho de los canales hacia aguas abajo, lo cual tiende a distribuir la disipación de la energía en modo más constante en los arroyos.

Tabla 3. Parámetros hidráulicos calculados para el caudal máximo de crecida (Qc).

COD	Potencia Corriente W/m	Potencia Específica W/m ²	Esfuerzo Corte Pa	U Media m/s	Fr
1101	32071	88	52.2	1.69	0.31
1102	29801	279	68.8	4.05	0.76
1103	13342	760	116.8	6.50	1.17
1104	1932	264	98.2	2.69	0.50
1201	10654	221	76.4	2.90	0.72
1301	10991	794	142.3	5.58	1.55
2101	14628	304	61.7	4.92	0.79
2102	29391	381	106.2	3.59	0.56
2103	6799	205	87.5	2.34	0.52
2104	4171	475	164.0	2.90	0.61
2105	2075	335	106.5	3.15	0.78
2201	3235	71	44.3	1.60	0.44
3101	8007	180	100.6	1.79	0.58
3201	6798	292	108.3	2.70	0.72
4101	34556	334	92.1	3.63	0.80

Variación espacial de la intensidad máxima de las crecidas

La numerosidad de tramos estudiados en la cuenca del Arroyo Perdido permite indagar en la relación espacial, es decir, si existirían modos de respuesta diferenciados en el interior de la unidad hidrológica de estudio. A tal fin, se comparó el caudal máximo estimado con el percentil 90% (valor corregido expuesta en la tabla 2) y el área drenada aguas arriba de cada tramo de estudio. Los tramos fueron clasificados de acuerdo a las cuencas principales (Arroyo Perdido

y Arroyo Salado) y de acuerdo a su ubicación en la red de drenaje (cauce principal y tributarios). Se diferencian claramente dos comportamientos según las cuencas, a saber: la cuenca del Arroyo Salado produjo mayor intensidad de crecida que la cuenca del Arroyo Perdido a igualdad de área drenada (Fig. 6). Por otro lado, se observa una buena correlación cuando se consideran los tramos ubicados a lo largo del curso principal. Se realizó el análisis de regresión obteniéndose las siguientes expresiones ($p < 0.01$).

Arroyo Salado:

$$Q = 0.052 A^{1.367}$$

Arroyo Perdido:

$$Q = 0.0028 A^{1.554}$$

En donde Q es el indicador del caudal máximo, expresado en m^3/s , y A es el área drenada expresada en km^2 .

Como se dispone de pocos valores, aunque bien distribuidos en el espectro de análisis, los parámetros del modelo de regresión presentan un intervalo de confianza del 95%. Para el modelo de regresión del Arroyo Salado, el factor varía entre 0.0076 y 0.3539, y el exponente entre 1.055 y 1.680. Para el modelo del Arroyo Perdido, el factor varía entre 0.0002 y 0.0505 y el exponente entre 1.1844 y 1.9244. Para verificar si los exponentes eran significativamente diferentes, se procedió a realizar una transformación logarítmica de los datos. Se aplicó el análisis ANOVA y se verificó que las dos rectas de regresión son paralelas ($p = 0.099$). El exponente que mejor ajusta ambas muestras es 1.434. La diferencia en las ordenadas en el origen es significativamente distinta y se rechaza la hipótesis de que ambos modelos sean coincidentes ($p < 0.01$). Para este nuevo modelo de curvas con mismo exponente, los factores son de 0.0072 para el Arroyo Perdido y 0.0348 para el Arroyo Salado.

El caso de los tramos tributarios merece una consideración especial. Para la cuenca del Arroyo Perdido, dos tramos identificados como 1201 y 1301 (ver tabla 1) se ubican marcadamente alejados de la tendencia general del curso principal ($p < 0.01$) y en cambio más próximos a los datos del Arroyo Salado. El tramo 1301 drena las aguas provenientes de la zona de El Escorial con cabecera de cuenca en la Sierra Rosada, divisoria de aguas de las cuencas de los arroyos Salado y Perdido (ver Figura 1). Es decir que geográficamente se encuentra próximo a los tramos 2104 y 2105. Se interpreta que las características fisiográficas y geológicas, junto con una posible similitud en la precipitación habrían producido una respuesta similar. Por tal motivo, los puntos 2104, 2105 y 1301 se ubican próximos en la figura 6. Los casos de los tramos 2201 (cuenca del Arroyo Salado) y 1201 (cuenca Arroyo Perdido) se explican de acuerdo a su ubicación en la cuenca. Para el tramo 2201, el Arroyo Ponte descarga en el Arroyo Salado en proximidad del punto síntesis de la cuenca, por lo que su comportamiento se apartaría de la tendencia media del tramo principal. Por otro lado, se ubica en el extremo opuesto a los tramos 2104 y 2105 que tienen áreas drenadas similares y entonces las variación espacial de la precipitación podría explicar la respuesta hidrológica de las subcuencas.

Finalmente, para el caso del Arroyo Colorado (tramo 1201) se hipotetiza que hubo una intensidad de lluvia mayor en dicha subcuenca, puesto que a nivel de producción de escorrentía los estratos son similares al resto de las subcuencas del Arroyo Perdido (Bianchi y Zappellini, 2022).

Los casos de los arroyos La Mata y Verde no permiten realizar un análisis areal puesto que no ha sido posible relevar tramos en otros sectores de la cuenca. Sin embargo, cabe señalar que el evento del año 2014 que afectó la cuenca del Arroyo Verde produjo una crecida que se asemeja

al comportamiento de la cuenca del Arroyo Perdido. En cambio, el evento del año 2017 en la cuenca del Arroyo La Mata arrojó caudales que se asemejan a la respuesta de la cuenca del Arroyo Salado. La comparación de escala regional será motivo de mayor desarrollo en otro apartado.

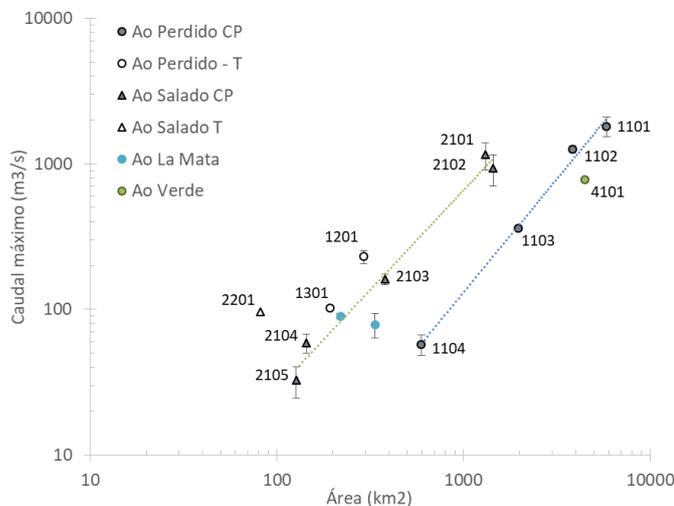


Figura 6.- Relación entre el caudal máximo de la crecida (estimado con el indicador Q_{90}) y el área drenada aguas arriba del tramo de estudio. CP: cauce principal, T: tributarios. Los números indican el código de identificación de los tramos estudiados (Ver Tabla 1).

El área de la cuenca ha sido utilizada ampliamente como variable explicativa para predecir el caudal pico de eventos de crecida, tanto para cursos en climas húmedos como arroyos impermanentes en climas áridos. Thomas y Hjalmarson (1997) estudiaron varias cuencas aforadas en el Sudoeste de EE.UU. (solamente las cuencas en las zonas áridas de Nuevo México y Arizona, son consideradas en el presente estudio) y encontraron que el caudal pico era una función potencial del área drenada con exponente comprendido entre 0.4 y 0.6 (regiones del noreste de Arizona, cuenca superior de Gila y del Río Grande, y la zona del Sudeste). Knighton y Nanson (2001) estudiaron las cuencas endorreicas del Lago Eyre en Australia y encontraron una relación log-lineal para cuencas con una superficie menor a 10^4 km². Para cuencas más extensas obtuvieron una relación log-cuadrática, es decir, la tasa de crecimiento del caudal disminuye conforme aumenta el área de la cuenca. Una tendencia similar fue reportada por Meirovich et al. (1998) en su estudio de cursos efímeros en el desierto de Negev (Israel). En este caso, los investigadores observaron un incremento constante en la relación Q-A para $A < 300$ km². Superada dicha extensión, disminuye la tasa de crecimiento del caudal. En general, los investigadores han explicado este cambio de tendencia considerando que el aporte de los tributarios no es sincrónico por lo que los picos no se suman; que las precipitaciones tienen un carácter localizado y por lo tanto no afectan con igual intensidad a toda la cuenca; las pérdidas por infiltración en el lecho del cauce y además los efectos de laminación en la propagación de la crecida.

Las discrepancias encontradas entre los resultados del presente estudio y los resultados publicados en la literatura requieren de un análisis más pormenorizado. Para esto se consideraron los modelos publicados: Sorman y Abdulrazzak (1993) estudiaron crecidas en arroyos en Arabia Saudita, mientras que Ben Zvi y Shentsis (1999) presentaron datos de eventos en el desierto de Negev (Israel). Los modelos propuestos por los investigadores relacionan el caudal pico del evento con el volumen de escorrentía, a través de relaciones log-lineales con pendientes que varían entre 0.69 y 1.02. En base a estas tendencias y suponiendo

sean válidas para las cuencas de los arroyos Perdido y Salado, se obtendría una relación potencial para la escorrentía, $R \sim A^n$, en donde R es la escorrentía y A es el área drenada. Considerando que el caudal aumenta con la potencia 1.4 del área, se sigue que n variaría entre 0.4 y 1.1. Esto significa que la escorrentía habría aumentado desde la cabecera de la cuenca hacia el punto de síntesis.

La producción de escorrentía depende tanto de la intensidad de la lluvia como de la capacidad de infiltración del suelo. Bianchi y Zappellini (2022) clasificaron las formaciones geológicas en términos de producción de escorrentía utilizando clases cualitativas como “Alta”, “Moderada”, “Baja” y “Muy Baja”. Cuando se considera el área de las regiones con “alta” productividad de escorrentía y su variación respecto del área total de las subcuencas se obtiene que dicha área aumenta con la potencia 0.958 para la cuenca del Arroyo Salado y 1.15 para el Arroyo Perdido. Estas potencias resultan significativamente distintas a las obtenidas para las variaciones areales del caudal por lo que la caracterización geológica explicaría sólo parcialmente el aumento de escorrentía.

Contextualización de las crecidas recientes

Las crecidas torrenciales han sido estudiadas con anterioridad en el contexto patagónico, en particular en la Provincia del Chubut, y también a nivel internacional. Con respecto al contexto local, Coronel (2002) estimó las crecidas en el Arroyo Telsen que se produjeron a fines del siglo XX. Mas recientemente, Colombani et al. (2014) analizaron el evento del año 2014 en la misma cuenca. Paredes et al. (2021) estimaron caudales máximos en varios sistemas fluviales efímeros en el ejido de la ciudad de Comodoro Rivadavia. Sainz Trápaga et al (2019) estimaron caudales de eventos esporádicos en el curso del Río Chico. En todos los casos se han utilizado métodos indirectos de reconstrucción de los caudales máximos. Más recientemente, Kaless et al. (2021) presentaron información sobre eventos torrenciales en una pequeña cuenca monitoreada (area de 100 km² aprox.) ubicada en el noroeste de la Provincia del Chubut.

En el contexto internacional, hemos seleccionado dos fuentes de información referidas a crecidas en ambientes áridos y semiáridos, que publican datos de áreas de cuencas estudiadas, precipitación y caudales medidos. La primera de las fuentes expone datos del desierto de Negev en Israel (Ben-Zvi y Shentsis, 1999), mientras que la segunda publica datos de EE.UU, de donde hemos seleccionado los casos ubicados en Arizona (Thomas et al., 1997). En la tabla 4 se presenta información sobre los eventos recopilados.

En primer término se comparó el caudal máximo del evento con el área drenada de cada cuenca. Se utilizó el caudal específico definido como el cociente entre el caudal (expresado en m³/s) y el área (expresada en km²) a fin de eliminar la influencia del tamaño de la cuenca en la intensidad del evento. La figura 7 muestra que el caudal específico disminuye con la superficie drenada. Las tres poblaciones utilizadas se superponen muy bien. Se ha trazado una curva de envolvente con la siguiente fórmula:

$$\log y = b_0 + b_1 \cdot (x - x_0)^n$$

En donde $y = Q/A$ (caudal en m³/s y área en km²), $x = \log A$. Los parámetros son $b_0 = 1.6$, $b_1 = -0.05$, $x_0 = -1.0$, $n = 2.35$.

Seguidamente se incorporó la precipitación en la variable respuesta considerando que existen marcadas diferencias regionales. La nueva variable es $y = Q/AP_p$, con la precipitación, P_p , medida en m. La figura 8 muestra la distribución de la información. Los datos de la Patagonia se ubican próximos a los de Arizona mientras que los correspondientes al desierto de Negev

tienen valores de ordenada más elevados porque las precipitaciones son muy escasas y probablemente de carácter más torrencial. Se trazó una nueva curva envolvente con la misma fórmula empleada anteriormente. Los parámetros son $b_0 = 2.05$, $b_1 = -0.016$, $x_0 = -1.0$, $n = 3.0$.

Los parámetros también fueron calibrados con los datos únicamente de Patagonia (ver línea de trazo discontinua en la figura 7). Los parámetros son $b_0 = 0.85$, $b_1 = -0.018$, $x_0 = -1.0$, $n = 2.8$.

Finalmente, en la tabla 5 se presentan estimaciones de valores de caudales máximos basados en las curvas de envolvente propuestas anteriores. Para la precipitación se utilizó un valor medio de 220 mm. Estos valores pueden utilizarse en la fase de anteproyecto de estructuras viales o análisis de riesgo de poblaciones. Por ejemplo, en la zona del Valle Inferior del Río Chubut (noreste de la Provincia del Chubut), el valle es afectado por lluvias que ocurren aguas arriba del mismo y drenan una extensión aproximada de 1250 km². De acuerdo a la tabla 5, se esperarían caudales máximos de 1031 m³/s (utilizando los datos locales) hasta 1559 m³/s, si se incorporan los datos del extranjero. Cabe advertir que el caso 1 reportado en la tabla 5 debería considerarse con cierta cautela teniendo en cuenta las características antes señaladas de las lluvias en el desierto de Negev.

Tabla 4. Resumen de datos utilizados para la contextualización de las crecidas patagónicas. Para ésta región se compuso un conjunto con los datos de esta publicación y las referencias indicadas en el texto. Se indican los valores medios y rango de variación del área drenada, caudal máximo reportado y precipitación de cada región.

Región	Cant. Datos	Área (rango) (km ²)	Caudal (rango) (m ³ /s)	Pp. (rango) (mm)
Patagonia	25	1339 (6 - 10572)	337 (24 - 1816)	219 (210 - 240)
Negev (Israel)	20	778 (64 - 3350)	511 (20 - 1150)	142 (32 - 292)
Arizona (EE.UU.)	218	187 (1 - 1782)	285 (1 - 2775)	410 (152 - 655)

Tabla 5. Estimaciones de caudales máximos en función del área drenada de la cuenca. (1) utilizando la relación Q/A en función de A. (2) utilizando la relación Q/(A·Pp) en función de A con Pp = 220 mm; (3) relación Q/A en función de A utilizando los datos de la región patagónica.

Área (km ²)	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	Q _{esp} (m ³ /s/km ²)	Caudal (m ³ /s)	Q _{esp} (m ³ /s/km ²)	Caudal (m ³ /s)	Q _{esp} (m ³ /s/km ²)	Caudal (m ³ /s)
100	8.69	869	9.13	913	2.88	288
200	5.92	1184	4.40	879	2.19	438
500	3.30	1651	2.44	1219	1.41	704
750	2.48	1857	1.83	1373	1.13	844
1000	2.00	1997	1.48	1480	0.95	948
1250	1.68	2099	1.25	1559	0.82	1031
1500	1.45	2178	1.08	1621	0.73	1099
2000	1.14	2290	0.86	1713	0.60	1206
5000	0.50	2521	0.39	1930	0.30	1508

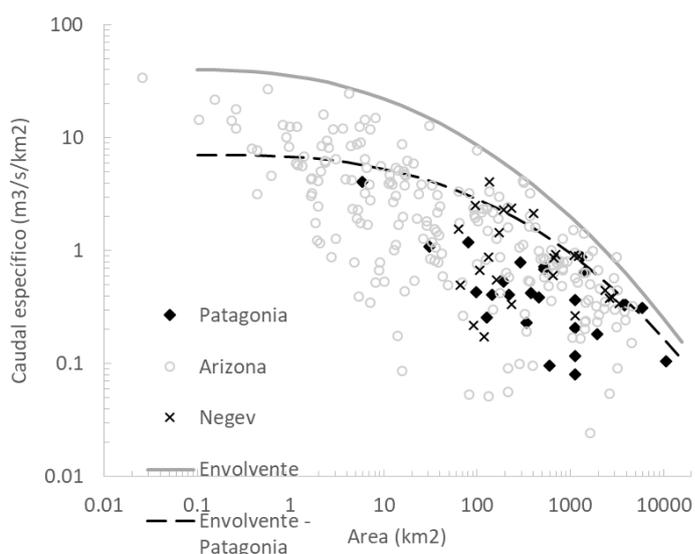


Figura 7. Comparación entre los eventos registrados en Patagonia con otras regiones de clima árido-semiárido. Se utilizan como variable el área drenada y el caudal específico. La línea de trazo discontinuo corresponde a la curva de envolvente para los datos de la región patagónica exclusivamente.

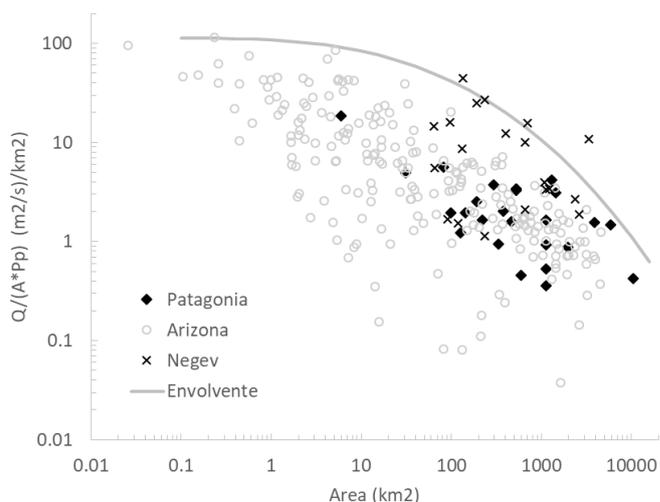


Figura 8. Comparación entre los eventos registrados en Patagonia con otras regiones de clima árido-semiárido. Se utilizan como variable el área drenada y el caudal específico.

CONCLUSIONES

Las eventos de inundaciones repentinas, sea por sus características de torrencialidad y peligrosidad como así también por la baja densidad de población en Patagonia, no pueden cuantificarse directamente. En el presente estudio se aplicó una metodología indirecta basada en rastros observados post-evento para cuantificar y caracterizar los eventos extraordinarios recientes, ocurridos en los años 2014 y 2017 sobre el territorio patagónico, en la Provincia del Chubut.

Se analizaron tres cuentas pertenecientes a los arroyos Perdido, La Mata y Verde, a través de 15 tramos. Las áreas drenadas aguas arriba de cada tramo estaban comprendidas entre 81 y

5853 km² que permitió una buena representación a diferentes escalas. Los caudales estimados se encuentran entre 33 y 1816 m³/s (caudales específicos de 0.097 a 1.19 m³/s/km²). Estos caudales resultan de una magnitud no documentada con anterioridad. En la mayoría de los tramos el flujo fue subcrítico con lo que la estimación del coeficiente n de Manning en base al material del lecho resulta adecuada. Por otro lado se aplicó una corrección por el cambio de ancho, que redujo en un 14% las primeras estimaciones basadas en la geometría relevada en campo posterior al evento.

La metodología indirecta fue confrontada con estimaciones realizadas en cuencas del Arroyo La Mata sobre la observación de velocidad superficial. En este caso se obtuvieron resultados coherentes. Por el contrario, los resultados del presente estudio son significativamente inferiores a los obtenidos mediante modelación hidrológica en la misma cuenca. Por lo tanto, concluimos que se requiere cierta cautela en el uso de los modelos hidrológico cuando se trata de cuencas extensas y no hay suficientes datos de distribución espacial de la lluvia.

La intensidad de la corriente evaluada mediante el esfuerzo de corte y potencia unitaria de la corriente, sugieren que todos los tamaños del material del lecho fueron puestos en movimiento. Este aspecto sedimentológico, junto con los cambios morfológicos, deberían considerarse a la hora del proyecto de obras de infraestructura vial o de defensa.

El caudal a lo largo del curso principal de los arroyos Perdido y Salado aumentó con el área drenada, con una potencia de 1.434. Este valor ha sido explicado parcialmente con capacidad de generación de escorrentía de los estratos geológicos. Sin embargo, el valor es aún elevado y merece mayor indagación.

Finalmente, se proponen curvas de envolvente en base a los casos analizados en este estudio y antecedentes en el contexto Patagónico. También se proponen curvas agregando datos de otras cuencas en el mundo (casos de Arizona e Israel) con condiciones climáticas semejantes. Las curvas propuestas pueden ser utilizadas para la verificación de estructuras interpretándolas como caudales máximos probables.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la hospitalidad y colaboración de números pobladores rurales que nos permitieron el acceso a los campos a fin de llegar a los arroyos. En particular agradecemos a Rosa Vidal, directora de la Escuela Nro. 118 de la Aldea El Mirasol, a Sebastián Sánchez, director de la Escuela Nro. 212 de El Escorial, y a José Oroquieta dueño de la Estancia La Nueva Alicantina, por abrirnos las puertas y albergarnos durante las salidas al campo. El proyecto de investigación recibió fondos de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (PI-1464) y del Departamento de Ingeniería Civil Or. Hidráulica.

REFERENCIAS

- Andrews, E. D. (1984), Bed material entrainment and hydraulic geometry of gravel-bed rivers in Colorado, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 95, 371– 378.
- Baker, V. R. (2008) Paleoflood hydrology: Origin, progress, prospects. *Geomorphology* 101, 1-13. doi:10.1016/j.geomorph.2008.05.016
- Ben-Zvi A., Shentsis I. (2000) Runoff events in the Negev, Israel. *The Hydrology-Geomorphology Interface: Rainfall, Floods, Sedimentation, Land Use (Proceedings of the Jerusalem Confluence. IAHS Publ. No. 261.*

- Bianchi E. H. y Zappellini, D. E. (2022) Descripción geológica y geomorfológica con aplicación a la producción de escorrentía. Caso de las cuencas del Arroyo Perdido y Arroyo Verde (Patagonia – Argentina). Cuadernos del Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica (Vol 5 – en edición).
- Brunner, G. 2010a. HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC).
- Brunner, G. 2010b. HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic User's Manual., US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC).
- Cohen H., y Laronee J. B. (2005) High rates of sediment transport by flashfloods in the Souterhn Judean Desert, Israel. *Hydrological Processes*, 19, 1687-1702. Doi: 10.1002/hyp.5630
- Colombani, E., Behr S., Brandizi L. (2017) Estimación de precipitaciones extremas a través de GSMap y aplicación hidrológica a la crecida del Arroyo Telsen, Chubut, Patagonia Argentina. *Revista de Meteorología*. [online]. 2017, (42), 1, 53-66.
- Coronel, O.F. (2002). Control de inundaciones y mejora del sistema de riego valle de Telsen provincia de Chubut, Argentina. Proyecto, Informe final. SAGPyA-PROSAP
- Costa, J. E., y Jarret, R. D. (2008) An evaluation of selected extraordinary floods in the United State Reported by the U.S. Geological Survey and implications for Future Advancement of Flood Science. USGS. Scientific Investigations Report 2008-5164.
- Denlinger, R. P., O'Connell D. R. H., House P., (2002) Robust determination of stage and discharge: an example from an extreme flood on the Verde River, Arizona. En House P. K., Webb R. H., Baker V. R. y Levish D. R. (Ed) *Ancient Floods, Modern Hazard: Principles and applications of paleoflood hydrology*. *Water Sciendes an Applications*, Vol 5, Pag 127-146.
- Grant G. E. (1997) Critical flow constrains flow hydraulics in mobile-bed streams: a new hypothesis. *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 2, 349-358
- Heritage G., Entwistle, N., Milan, D., y Tooth, S. (2019) Quantifying and contextualising cyclone-driven, extreme flood magnitude in bedrock-influenced dryland rivers. *Advances inWater Resources* 123, 145-159. Doi: 10.1016/j.advwatres.2018.11.006
- Jahns, Richard H.(1949) *Desert Floods*. *Engineering and Science*, 12 (8). pp. 10-14. ISSN 0013-7812
- Jarret R. D. y England J. F. (2002) Reliability of Paleostage indicators for paleoflood studies. En House P. K., Webb R. H., Baker V. R. y Levish D. R. (Ed) *Ancient Floods, Modern Hazard: Principles and applications of paleoflood hydrology*. *Water Sciendes an Applications*, Vol 5, Pag 91-109.
- Kaless, G. 2017. Rugosidad equivalente en ríos con lecho de gravas en condiciones de flujo de cauce lleno, Casos de ríos en Patagonia. VIII Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. 8 – 10 de Noviembre de 2017, Córdoba, Argentina.
- Kaless, G., Bastida, R., (2017a). Simulación numérica unidimensional hidráulica-sedimentológica de crecidas torrenciales en arroyos efímeros. Caso del Arroyo Verde en Patagonia Central. Cuaderno del Depto. de Ingeniería Civil Hidráulica, UNPSJB.
- Kaless G., Bastida R., (2017b). Estimación del caudal máximo de crecidas extraordinarias en arroyos efímeros. Casos de los Arroyos Salado y Verde (Patagonia Norte). Cuaderno del Depto. de Ingeniería Civil Hidráulica, UNPSJB.
- Kaless, G., Brandizi, L., Bianchi, E. H., Iglesias S. R., y Bastida R. (2019a) Evaluación del riesgo por dinámica fluvial de la Linea de Alta Tensión 330 kV (Sector Arroyo Salado) y formulación de alternativas de mitigación. Informe Final. Convenio UNPJSB – TRANSPA S.A.
- Kaless, G., Pascual, M., Flaherty, S., Liberof A., García Asorey, M., Brandizi L., & Pessacg, N., (2019b). Capítulo 22. Ecos de la tormenta de Comodoro Rivadavia en el Valle Inferior del Río Chubut. Aporte de sedimentos al Río Chubut desde la cuenca del Río Chico. En: Paredes J. M. (Ed.) Comodoro

Rivadavia y la catástrofe de 2017. Visiones Múltiples para una ciudad en riesgo. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Argentina. 290-303.

Kaless, G., Frumento, O., Bianchi, E., Chachero, M. J., Bastida, R., & Iglesias, S. (2019c). Cuando en el desierto patagónico los arroyos braman. Evento extraordinario de abril de 2017 en la cuenca del Arroyo Perdido. En: Paredes J. M. (Comp.) Comodoro Rivadavia y la catástrofe de 2017. Visiones Múltiples para una ciudad en riesgo. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Argentina. 274-288.

Kaless G., Malnero H., Frumento, O., y Pascual, M. (2021) When it rains in the desert of Patagonia: heavy rains, sediment laden flash floods and hazard management challenges. Authorea. October 27, 2021. DOI: 10.22541/au.163534875.55080666/v1

Kaless G. Walker D., Malnero H. (2020a) Tras las huellas de las crecidas extraordinarias en la Patagonia semiárida. Tipologías de improntas, metodología y caso de estudio. Cuadernos del Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica (Vol 4).

Kaless G., Iglesias S., Bastida R. Brandizi L., Bianchi E. (2020b) Reconstrucción de una inundación extraordinaria mediante modelación hidrodinámica 2D: caso del Arroyo Salado en la Patagonia central (Argentina). Cuadernos del Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica (Vol 4).

Kampf, S. K., Faulconer, J., Shaw, J. R., Lefsky, M., Wagenbrenner, J. W., & Cooper, D. J. (2018). Rainfall thresholds for flow generation in desert ephemeral streams. *Water Resources Research*, 54, 9935-9950. doi.org/10.1029/2018WR023714

Kamphuis, J. W. 1974. Determination of sand roughness for fixed beds. *Journal of Hydraulic Research*, 12(2), 193–203.

Keulegan, G. H. (1938), Laws of turbulent flow in open channels, National Bureau of Standards Research Paper RP 1151, Washington, D.C.

Knighton, A. D., y Nanson G. C. (2001) An event-based approach to the hydrology of arid zone rivers in the Channel Country of Australia. *Journal of Hydrology* (254), 102-123.

Lumbroso, D., y Gaume, E., (2012) Reducing the uncertainty in indirect estimates of extreme flash flood discharges. *Journal of Hydrology*, Volume 414-415, 16-30. Doi 10.1016/j.jhydrol.2011.08.048

Nanson G.C. y Croke J.C. (1991) A genetic classification of floodplains, *Geomorphology*, 4 459-486 459.

Meirovich, L., Ben-Zvi, A., Shentsis, I., y Yanvich, E. (1998) Frequency and magnitude of runoff events in the arid Negev of Israel. *Journal of Hydrology* (207) 204-219.

Paredes J. M., Ocampo, S. M., Foix, N., Olazabal, S.X., Valle, M.N., & Allard, J.O. (2021) Geomorphic and Sedimentological Impact of the 2017 Flash Flood Event in the City of Comodoro Rivadavia (Central Patagonia, Argentina). In Bouza, P., Rabassa, J., & Bilmes A. (Ed) *Advances in Geomorphology and Quaternary Studies in Argentina. Proceedings of the Seventh Argentine Geomorphology and Quaternary Studies Congress*. Springer Earth. 3–29. DOI:10.1007/978-3-030-66161-8_1

Parker, G. (1990), Surface-based bedload transport relation for gravel rivers, *Journal Hydraulic Research*, 28(4), 417–436.

Peleg, N., and E. Morin (2012), Convective rain cells: Radar-derived spatiotemporal characteristics and synoptic patterns over the eastern Mediterranean, *J. Geophys. Res.*, 117, D15116, doi:10.1029/2011JD017353.

Powell, D. M., Laronne, J. B., and Reid, I. (2003) The dynamics of bedload sediment transport in low-order, upland, ephemeral gravel-bed rivers, *Advances in Environmental Monitoring and Modelling*, 1(2), <http://www.kcl.ac.uk/advances/>.

Reid I., Laronee J. B., Powell D. M. (1998) Flash-flood and bedload dynamics of desert gravel-bed streams. *Hydrological Processes*, 12, 543-557.

Sainz Trapaga J., Liberoff A. A., Flaherty S. (2019) Notas sobre el balance hídrico del Dique Ameghino. Reflexiones sobre la información existente y la requerida para la gestión del embalse cabecera del Valle Inferior del Río Chubut. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco y CENPAT-CONICET.

Serra J., González D., Chachero M. J., Malnero H., González A, Brandizi L (2017) Indicadores de caudales máximos en cuencos urbanos de Comodoro Rivadavia ocasionados por la tormenta severa de marzo-abril de 2017. *Cuadernos de Ingeniería Civil Hidráulica*, Vol 3, nro 1.

Sharon, D. (1972) Spatial analysis of rainfall data from dense networks. *Bulletin of the International Association of Hydrological Sciences*, XVII.

Sorman A. U. Y Abulrazzak M. J. (1993) Flood hydrograph estimation for ungaged wadis in Saudi Arabia. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol 119, 45-63. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1993)119:1(45)

Smith, J. A., Baeck, M. L., Yang, L., Signell, J., Morin, E., & Goodrich, D. C. (2019). The paroxysmal precipitation of the desert: Flash floods in the southwestern United States. *Water Resources Research*, 55. Doi: 10.1029/2019WR025480

Thomas B. E., Hjalmarson H. W. Waltemeyer S. D. (1997) Methods for estimating magnitude and frequency of floods in the southwestern United States. *US Geological Survey Water-Supply Paper* 2433.

Tinkler K. J. (1997) Critical flow in rockbed streams with estimated values for Manning's n. *Geomorphology* 20, 147-164.

Web R. H. y Jarret R. D., (2002) One-dimensional estimation techniques for discharges of paleofloods and historical floods. En House P. K., Webb R. H., Baker V. R. y Levish D. R. (Ed) *Ancient Floods, Modern Hazard: Principles and applications of paleoflood hydrology*. *Water Sciences and Applications*, Vol 5, Pag 111-125.

Zituni R., Greenbaum, N., Porat N., y Benito, G., (2021) Magnitude, frequency and hazard assessment of the largest floods in steep, mountainous bedrock channels of the Southern Judean Desert, Israel. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 37(6). doi: 10.1016/j.ejrh.2021.100886

APLICACIÓN DE LA GEOLOGÍA A LA PRODUCCIÓN DE ESCORRENTÍAS: CASO DE ESTUDIO, CUENCA HIDROGRÁFICA DEL ARROYO PERDIDO, PATAGONIA, ARGENTINA.

Érico Hernán Bianchi^{1,2}, Dante Zappellini³

1Profesor Investigador UNSL–FTU. 2 Profesor Investigador UNLC–DCAyP. 3Docente Investigador UNPSJB

Santa Cecilia 280, Carpintería, San Luis, +54 9 280 466 9242
ehbianchi@unsl.edu.ar ebianchi@unlc.edu.ar

RESUMEN

El agua presenta diferentes interacciones ante las características que poseen los tipos rocosos. Este trabajo muestra una clasificación básica, a partir de las herramientas que poseen los Sistemas de Información Geográfica (SIG), de unidades litológicas categorizadas como unidades drenates en respuesta a la producción de escorrentías. Las proporciones de las distintas clases de respuesta hidrológica se presentan mayormente constantes en las diversas subcuencas que constituyen la porción estudiada de la cuenca del Arroyo Perdido. La clase “Alta” representa en media el 41.33% de la superficie total de la cuenca, mientras que, la clase “Moderada” corresponde al 20.69%. Las clases de menor generación de escorrentía, “Baja” y “Muy Baja” se extienden en promedio sobre el 26.05% y 11.93%, respectivamente. Los resultados dejan en evidencia el comportamiento de las precipitaciones en los diferentes tipos litológicos.

Palabras clave: unidades geológicas, SIG, escorrentía, cuenca Arroyo Perdido.

ABSTRACT

Water has different interactions with the characteristics of the rock types. This work shows a basic classification, using Geographic Information Systems (GIS) tools, of lithological units categorized as drainage units in response to runoff production. The proportions of the different hydrologic response classes are largely constant in the various sub-basins that constitute the studied portion of the Arroyo Perdido basin. The "High" class represents on average 41.33% of the total surface area of the watershed, while the "Moderate" class corresponds to 20.69%. The classes with the lowest runoff generation, "Low" and "Very Low", represent an average of 26.05% and 11.93%, respectively. The results show the behavior of precipitation in the different lithological types.

Key words: geological units, GIS, runoff, Arroyo Perdido basin.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La producción de escorrentía superficial, a escala de cuenca hidrográfica, constituye un proceso clave en estudios hidrológicos e hidráulicos, bajo la mirada de recurso hídrico, erosión de suelo, capacidad de infiltración, riesgo de inundaciones, entre otros aspectos.

Varios factores actúan como disparadores en el proceso de generación de escorrentía, principalmente se reconocen dos: las precipitaciones y las características intrínsecas de la cuenca (Camarasa *et al.*, 2006). La cuantía, intensidad y distribución espacio-temporal de las precipitaciones establecen los parámetros de entrada al sistema, mientras que, la pendiente, la cubierta vegetal, saturación del suelo, exposición de las rocas evidencian las variaciones del caudal para cada episodio.

Los paisajes asociados a cursos de agua no permanentes, a nivel mundial, son más habituales de lo que parece y en zonas semiáridas es donde presentan su mayor extensión (Skoulikidis *et al.*, 2017, Camarasa *et al.*, 2018). Estudios europeos muestran escenarios donde los porcentajes que abarcan estas condiciones alcanzan a cubrir una superficie del 90%, como es el caso en Cerdeña y Sicilia (Petrakis *et al.*, 2012), una situación que perfectamente es trasladable a la meseta central patagónica. En este sentido, en las cuencas hídricas situadas en ambientes áridos o semiáridos, los estudios de las unidades geológicas juegan un rol importante, que determina, junto a la pendiente, el desarrollo de un flujo con características propias.

El empleo de las herramientas que proporcionan los Sistemas de Información Geográfica (SIG), en las últimas décadas ha tenido un auge creciente. La disponibilidad de datos digitales espaciales, permiten el uso de los SIG en cualquier ámbito de trabajo referente a estudios aplicados, como es el caso de la planificación de recursos hídricos (Francés *et al.*, 2000), estudios de riesgos, inundaciones, mapeos geológicos, etc., que resulta cada vez más frecuente como una herramienta habitual.

El objetivo que se persigue en el presente artículo pretende determinar el comportamiento de las diferentes unidades litológicas en respuesta a la generación de escorrentía, caracterizadas como unidades drenantes en base a su comportamiento, estructura y tipo geológico.

Área de estudio

El paisaje de la región se encuentra caracterizado por una variedad de geoformas representadas, principalmente, por zonas mesetiformes, compuestas por rocas volcanoclástica mesozoicas y sucesión de coladas basálticas cenozoicas. Irrumpe la monotonía subhorizontal, lomadas suavizadas de basamento granítico Paleozoico y complejos volcánicos de composición básica-ácida del Jurásico. Distribuidos en forma aleatoria se reconocen diversos conos volcánicos de expresiones resumidas, rodeados de bloques y gravas producto de la acción gravitacional (remoción en masa). La zona de cabecera, en el sector norte, presenta una serranía compuesta por rocas graníticas paleozoicas que no superan los 1.700 metros de altitud. Los sedimentos cuaternarios quedan supeditados a los valles representados por geoformas de terrazas, bajos, salinas y cauces fluviales.

La situación geográfica de la cuenca del Arroyo Perdido, comprende el sector de la meseta central de la provincia del Chubut. Incluye los principales valles fluviales de carácter permanente Arroyo Telsen con sentido de escurrimiento N-S, y no permanente arroyo Perdido de sentido de escurrimiento W-E. La red de drenaje en su mayor expresión constituye el carácter no permanente del tipo efímero. La cuenca desde el punto de vista de la escorrentía se clasifica en endorreica, presenta el nivel de base en el Bajo de la Tierra Colorada.

El área de estudio comprende la porción centro-oeste de la cuenca del Arroyo Perdido. Presenta una forma semi-elongada distorsionada en la parte media. En este sentido, permite obtener dos secciones con diferentes direcciones: NNW-SSE y W-E. Abarca una superficie de 7.411 km², compuesta por 12 subcuencas. La primera sección se encuentra limitada al norte, zona de cabecera, por la Sierra de Blancuntre, al oeste, este y sur por un conjunto de sistemas serranos de baja altitud. La segunda sección presenta la sierra de la Ventana al norte, Sierra Rosada al oeste, Sierra Chata al Sur y el punto de cierre

Aplicación de la geología a la producción de escorrentías: Caso de estudio, cuenca hidrográfica del Arroyo Perdido. Patagonia, Argentina..

se ubica en las proximidades de la aldea escolar de El Mirasol, confluencia de los arroyos Perdido y Salado. Los principales accesos corresponden a rutas provinciales de tierra consolidada: RP 40, RP 59, RP 58, RP 50, las cuales, conducen a las principales aldeas escolares y parajes: El Mirasol, El Escorial, Yalalaubat, Los Adobes (Figura 1).

METODOLOGÍA

Para el análisis se emplearon métodos sencillos de digitalización manual a partir de base cartográfica conocida, hojas geológicas y la elaboración de red de drenaje en Google Earth Pro. El empleo de modelos de elevación digital (MED o su sigla en inglés DEM: digital elevation model) permitió generar curvas de nivel y los límites de subcuencas. El conjunto de datos obtenidos mediante técnicas de SIG dieron como resultado el mapa de respuesta hidrológica.

Datos y fuentes

- Hoja geológica 4369-I Gastre, escala 1:250.000, SEGEMAR.
- Hoja geológica 4369-II Gan Gan, escala 1:250.000, SEGEMAR.
- Hoja geológica 4369-IV Los Altares, escala 1:250.000, SEGEMAR.
- Boletín N° 313, SEGEMAR.
- Boletín N° 267, SEGEMAR.
- Mapa Hidrogeológico – Cuenca de Gastre y Sacanana – CFI, (2014), geología.
- DEM, servidor: United States Geological Survey (USGS), raster de resolución 30 x 30 m.
- Imágenes satelitales, Landsat 8 OLI_TIR, marzo y septiembre de 2018, USGS.
- Google Earth Pro.

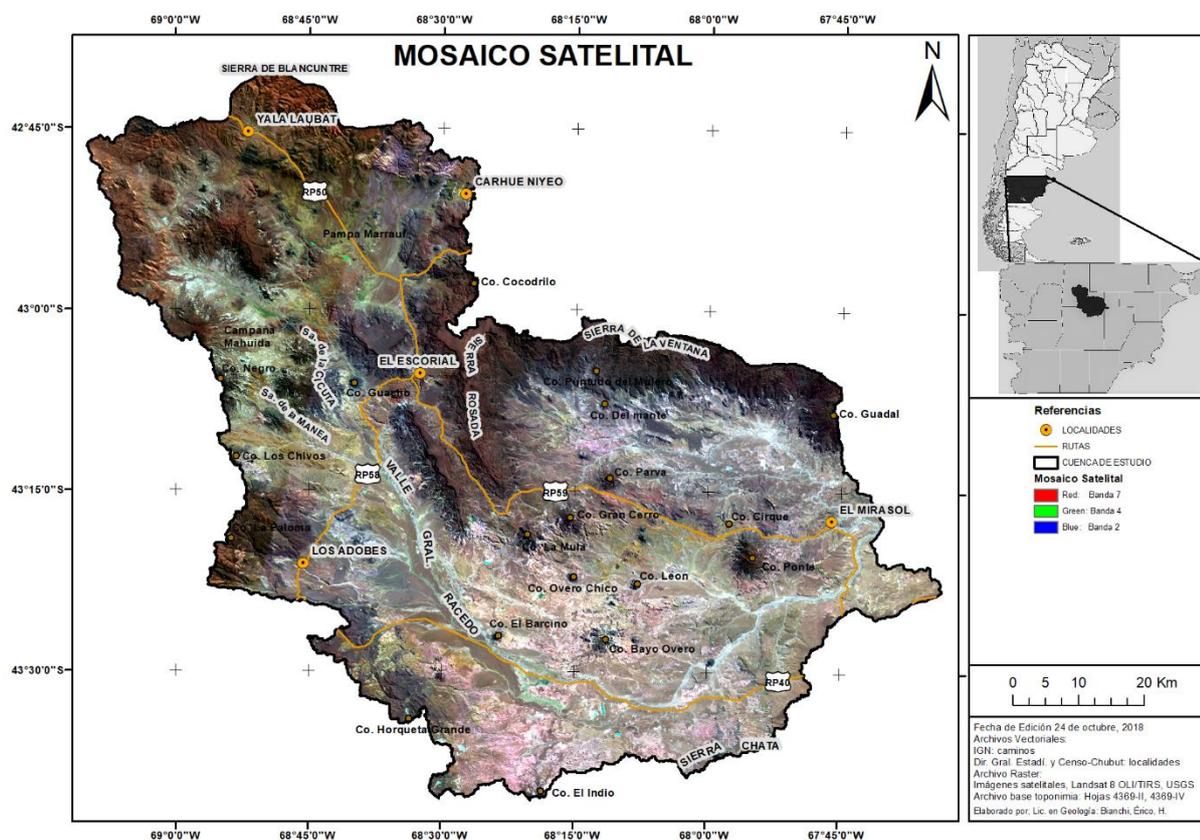


Figura 1 Área de estudio. Mosaico satelital, cuenca del Arroyo Perdido.

Fase de cartografía inicial: elaboración de capas de información de base

Las salidas cartográficas se elaboraron en QGIS, versión 2.18.22, software de versión libre. Este sistema, permite trabajar de forma simultánea con diversas capas vectoriales en formato de archivo informático digital (shape file: shp), capas raster (imagen de píxeles: imagen satelital), imágenes fotográficas, entre otros formatos de archivos digitales.

La primera acción consistió en delimitar el perímetro de la cuenca, empleando para ello los datos proporcionados por el DEM. Se extrajeron las superficies de las subcuencas, curvas de nivel, red primaria de flujo concentrado.

Las imágenes satelitales otorgan la capacidad de combinar diferentes bandas del espectro electromagnético con el fin de resaltar atributos geográficos, geomorfológicos, edáficos, entre otros. Se utilizó la combinación de bandas R: 7, G: 4, B: 2, que muestra diferencias en los tipos de rocas, resalta la cobertura vegetal y el contenido de humedad (Franzosi, 2010). Finalmente se utiliza la banda pancromática 8, para aumentar la resolución a 10 m. A través de la herramienta "Raster Tools>Convert Map to Raster" se logró construir un mosaico recortado a los límites de la cuenca (Figura 1). El raster generado permitió ajustar la digitalización de las hojas geológicas y la red de drenaje elaborada en Google Earth Pro (Figura 2).

Toda la información generada junto a las hojas geológicas, se georreferenciaron en el sistema de coordenadas WGS84; POSGAR 2007 Faja 2, Proyección Gauss-Krüger, escala 1:250.000. Seguidamente se procede a digitalizar mediante archivo vectorial de polígonos, los mapas geológicos analógicos. Cada archivo vectorial contiene una tabla de atributos con los datos que permiten su clasificación y posterior expresión cartográfica.

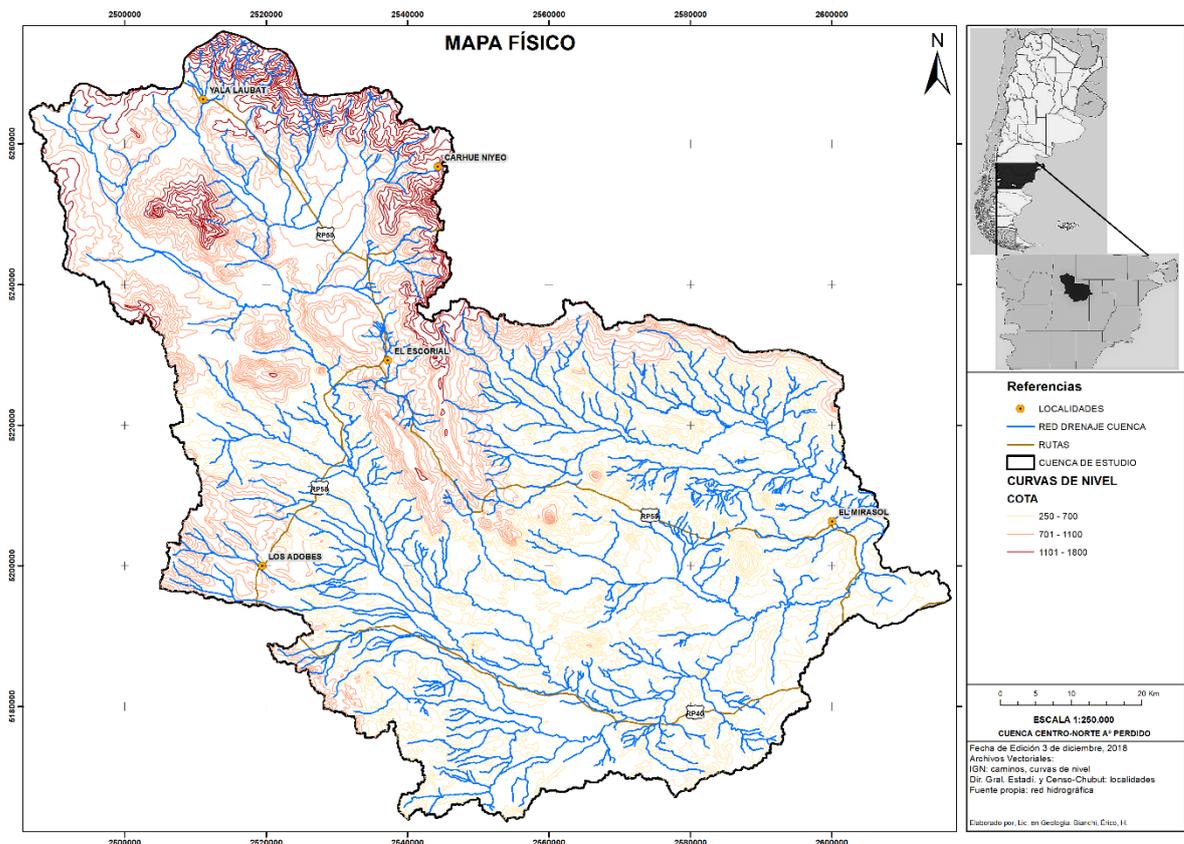


Figura 2 Área de estudio. Distribución del drenaje y curvas de nivel.

Fase de cartografía detallada: descripción de unidades geológicas agrupadas

El mapa geológico de clasificación integrada se elaboró a partir de la información contenida en los boletines mencionados. Las hojas Gan Gan y los Altares ocupan el 95% de la superficie de estudio, el 5% restante, la hoja de Gastre. Se utilizó el boletín N° 267, correspondiente a la Hoja Geológica 4369-III Paso de Indios, como apoyo descriptivo de unidades estratigráficas en las hojas Gastre y Gan Gan que carecen de información.

El criterio de integridad geológica consistió en unificar unidades que presentan afloramientos de escasa expresión, agrupar eventos geológicos, ambiente formacional, cualidades estructurales, mineralógicas y posibles comportamientos hidráulicos de las rocas: grado de infiltración.

En las salidas al campo se verificó el tipo y distribución de los afloramientos rocosos, grado de meteorización, efectos de erosión provocados por corrientes fluviales en los cauces y el ajuste de la digitalización de las hojas geológicas.

La clasificación integrada permitió establecer conjuntos de unidades con capacidades de producir escorrentía según las características analizadas.

Fase de cartografía final: determinación de unidades de respuesta hidrológica

A partir del producto obtenido se estableció un nuevo criterio de clasificación dividido en cuatro respuestas: Escorrentía Alta, Escorrentía Moderada, Escorrentía Baja y Escorrentía Muy Baja. Seguidamente se realizó el cruce de información contenida en las capas vectoriales: clasificación integrada y subcuencas, mediante la herramienta SGA>Vector Polygon Tools>Intersect. Se obtuvo un producto de intersección que muestra el porcentaje del área ocupada de cada categoría, en cada una de las subcuencas.

RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Integración de unidades geológicas

Unidad 1: Rocas metamórficas (edad Precámbrico sup.); Integrada por la Formación Cushamen – Miembro El Escorial, se componen de calizas cristalinas compactas de coloración blanquecina a veces algo grisácea, con un ligero bandeamiento, constituyen cuerpos alargados.

Unidad 2: Rocas graníticas (edad Ordovícico-Silúrico-Pérmico); Bajo esta denominación se agrupan:

- a- Formación Mamil Choique, compuesta por dioritas cuarzosas, tonalitas, granodioritas, migmatitas tonalíticas, y escasas cataclasitas. Las dioritas poseen coloración grisácea, las granodioritas y tonalitas, presentan colores rosados, minerales como el cuarzo, microclino, andesina y moscovita.
- b- Formación Lipetrén, se compone de pórfidos graníticos, riolíticos y microgranitos como representantes en relación intrusiva con la formación anterior. La coloración en general es rosada, compuestos por cuarzo, feldespato potásico, moscovita. Las composiciones riolíticas y dacítica presentan coloración gris y fenocristales de oligoclasa, cuarzo y biotita.

Unidad 3: Complejo volcánico-piroclástico (edad Jurásico inf. a sup.); integrada por las formaciones:

- a- Formación Los Mártires; conjunto de rocas efusivas mesosilíceas y ácidas que afloran al oeste de la aldea escolar El Mirasol. Se componen de andesitas, ignimbritas andesíticas a riolíticas y tobas. Las andesitas poseen coloración castaño rojiza, las ignimbritas

presentan componentes vítreos y cristaloclastos de cuarzo. Las tobas presentan colores rojizos a violáceos, vítricas y litoclásticas.

- b- Formación Lonco Trapial; agregado de rocas extrusivas y efusivas constituidas por los miembros Cajón de Ginebra, Cañadón Puelman y Cerro Carnero. El grupo está compuesto por lavas, ignimbritas y aglomerados volcánicos de composición andesítica a basandesítica y basáltica, se observan tobas, lapillitas, tufitas y brechas tobáceas subordinadas. En general la coloración es muy variada: morada, gris verdoso y gris oscuro, rosados pálidos a amarillo pálido y rojizo.

Unidad 4: Rocas continentales jurásicas (edad Jurásico med. y sup.); Se enmarca bajo esta denominación a la Formación Cañadón Asfalto, se reconocen dos miembros; Inferior, compuestos por mantos lávicos básicos con intercalaciones de aglomerados volcánicos, material piroclástico, sedimentitas epiclásticas, algunas ignimbritas riolíticas y brechas volcánicas. El miembro Superior, compuesto por fangolitas, tufitas, tobas, areniscas, conglomerados, calizas e intercalaciones lávicas, muestra un ambiente continental de facies fluviales y lacustres, con aporte piroclástico sincrónico. Se reconoce una amplia gama de colores, rojo a morados pálidos y oscuros, castaños claros y rojizos, amarillo a rosado grisáceo. Las facies lacustres presentan un contenido fosilífero destacable.

Unidad 5: Rocas continentales (edad Cretácico inf.); Conformada por la Formación Los Adobes, constituidos por conglomerados de colores rojizos, castaños grisáceos y amarillentos, amarillos verdosos, clastos de variado tamaño polimícticos aglutinados por una matriz arenosa. Las areniscas se presentan como lentes o estratos tabulares. Los bancos de arcillitas presentan colores rojizos y castaños, raramente amarillentos, en general contienen niveles tobáceos.

Unidad 6: Rocas continentales (edad Cretácico Inf.-Sup.); La descripción de la Formación Cerro Barcino queda supeditada a los miembros Puesto la Paloma y Cerro Castaño, corresponden a depósitos de tobas, tufitas, sedimentitas epiclásticas con y sin aporte piroclástico (areniscas, areniscas tobáceas, arcillitas, limonitas, calizas en forma subordinada. El primero presenta coloración verdosa pálida como característica general, el segundo se distingue por los colores castaños, amarillentos y blanquecinos.

Unidad 7: Rocas Cretácico Sup-Grupo Chubut integrado: El Miembro Las Plumas presenta tobas de grano fino bien estratificadas, de color rojizo, castaño rojizo, rosado hasta amarillento y gris blanquecino. Se observaron estratos tabulares de areniscas líticas y cuarzosas de coloración rojo pálido. Son comunes capas de areniscas de grano mediano, areniscas conglomerádicas y conglomerados, siendo variable la porción de material piroclástico.

Formación Bayo Overo, corresponden a depósitos constituidos por tobas vítreas de colores verdes, anaranjados, rosados y amarillentos, en general dispuesta en bancos tabulares. Las fracciones epiclásticas las componen areniscas de grano fino y grueso de colores castaños y amarillo rojizo, los conglomerados presentan aporte polimíctico.

Unidad 8: Rocas continentales fluvial (edad Cretácico sup.); La Formación Puntudo Chico muestra areniscas amarillentas, blanco amarillentas, algo castaños rojizo pálidas, el tamaño de grano es mediano a grueso. Intercalan lentes de sabulitas y conglomerados de matriz arenosa fina a mediana, escasas y poco potentes bancos de limonitas. Es común encontrar fragmentos de troncos silicificados, restos de gasterópodos, calcretes y paleosuelos.

Formación Paso del Sapo, la unidad está integrada por areniscas cuarzosas de diferentes granulometrías, granos con buena selección, escasa matriz limosa y cemento calcáreo-ferruginoso responsable de la coloración rojiza. Se evidencian intercalaciones de areniscas conglomerádicas y conglomerados finos de matriz arenosa.

Unidad 9: Rocas marino-continental (edad Cretácico sup.); Formación La Colonia constituida por arcillitas, arcillitas limosas, limonitas y escasas intercalaciones delgadas de areniscas. Las texturas pelíticas presentan coloración verdosa y verde grisácea, forman bancos tabulares con laminación plana. Las texturas psamíticas poseen colores castaños-verdosos hasta castaño rojizo,

presentan bancos lenticulares o tabulares con estratificación entrecruzada en ciertos casos. El contenido fosilífero de la formación es abundante, Ostreas, restos de vértebras de saurios marinos, ostrácodos.

Unidad 10: Paleógeno inferior basaltos (edad Paleógeno inf.): Formación El Buitre son cuerpos subvolcánicos compuestos por basaltos alcalinos, basanitas, diabasas y gabros de variado tamaño y forma, constituyen cuerpos intrusivos de carácter concordante (tipo lopolito y lacolito), también se comportan como filones capa, y de forma discordante: chimeneas y diques. En general presentan colores grisáceos oscuros y negro, textura afanítica o porfírica escasa, en algunos ejemplares se reconocen pequeñas amígdalas rellenas de ceolitas o ceolitas y cloritas.

Unidad 11: Paleógeno sup. – Neógeno inf. volcánico: Grupo Sarmiento, sedimentitas piroclásticas terciarias portadoras de mamíferos, que afloran principalmente en el centro de la provincia del Chubut, se las divide en cuatro formaciones; Casamayor; Muster; Deseado y Colhué Huapi. La unidad está compuesta por tobas, tobas arenosas, areniscas, limolitas y arcilitas tobáceas, en general de coloración gris blanquecino. Por lo general, las tobas pardo amarillentas presentan estratificación, restos indeterminables de mamíferos, moldes de raíces y bioturbación. Las tobas amarillo blancuzcas, muestran nidos de véspidos, restos de mamíferos, paleosuelos con moldes de raíces. Las limolitas y arcilitas algo arenosas muestran colores amarillo grisáceo claro.

Basalto Sierra Rosada, se componen de rocas básicas, constituyen varios mantos lávicos dispuestos de forma subhorizontal, coronando el paleorelieve, se las localiza en los sectores superiores de las serranías. Las lavas presentan estructuras cordadas a vesicular, es muy común la presencia de disyunción columnar. Los basaltos son alcalinos de color gris oscuro a negro, las coloraciones rojizas se deben a óxidos de hierro ferroso.

Unidad 12: Pleistoceno continental: Los depósitos correspondientes al conjunto de rocas que rodean en general a coladas basálticas terciarias y se encuentran ubicados en los taludes de las mesetas se denominan Remoción en Masa o Depósitos Rotacionales. Los más destacados se localizan en las sierras; Rosada y de la Ventana. A su vez, se desarrollan en los alrededores de cerros aislados o conos volcánicos. Están constituidos por bloques de basalto irregulares y variado tamaño, en ocasiones acompañan bloques de sedimentitas terciarias dispuestos de forma infrayacente.

Unidad 13: Pleistoceno tardío – Holoceno continental: Aquí se incluyen depósitos de cobertura de pedimentos de Niveles: I-II-II e indiferenciados. Corresponden a depósitos de gravas, arenas y limos subordinados con diferente grado de consolidación dependiendo de su antigüedad y formación. Se reconocen al nivel I como el más elevado y antiguo. El nivel II, intermedio, se desarrolla sobre sedimentitas cretácicas. El nivel III, topográficamente más bajo de los tres niveles, se disponen sobre márgenes del Arroyo Perdido y Arroyo Salado. Los niveles indiferenciados están asociados a los bordes de los depósitos de remoción en masa y en las márgenes de elevaciones de terrenos sedimentarios. Todos los depósitos conforman capas delgadas de variado espesor, tabulares y de posición subhorizontal.

Unidad 14: Depósitos holocenos: Bajo esta denominación se agrupan a los depósitos modernos correspondientes a depósitos de bajos y lagunas; depósitos aluviales y coluviales indiferenciados; depósitos de planicie aluvial de cursos no permanentes. Los primeros ocupan pequeños bajos y depresiones de carácter temporario, rellenas de sedimentos limosos, limo-arcillosos, arcillosos y arcillo-arenosos finos, de coloración castaña clara y grisácea. En ocasiones se observan costras salinas en los alrededores del bajo a modo de aureola. Los segundos se componen de gravas subordinadas, arenas finas a gruesas, limos y escasas arcillas como matriz o interdigitado. Son depósitos poco consolidados a sueltos, fácilmente atacables por los agentes erosivos. Los depósitos de planicie aluvial se reconocen en los cursos y cauces de mayor jerarquía, arroyo Perdido, Salado, etc. Presentan colores castaños, grisáceos amarillentos, en ocasiones se reconocen intercalaciones de capas conglomerádicas. En superficie muestran clastos y guijarros de variado tamaño, arena gruesa, disperso, material fino. En las márgenes de los cauces principales

se reconocen depósitos eólicos de variado tamaño, forma y espesor, compuestos por material arenoso bien seleccionado.

La Figura 3, muestra el resultado obtenido de la clasificación.

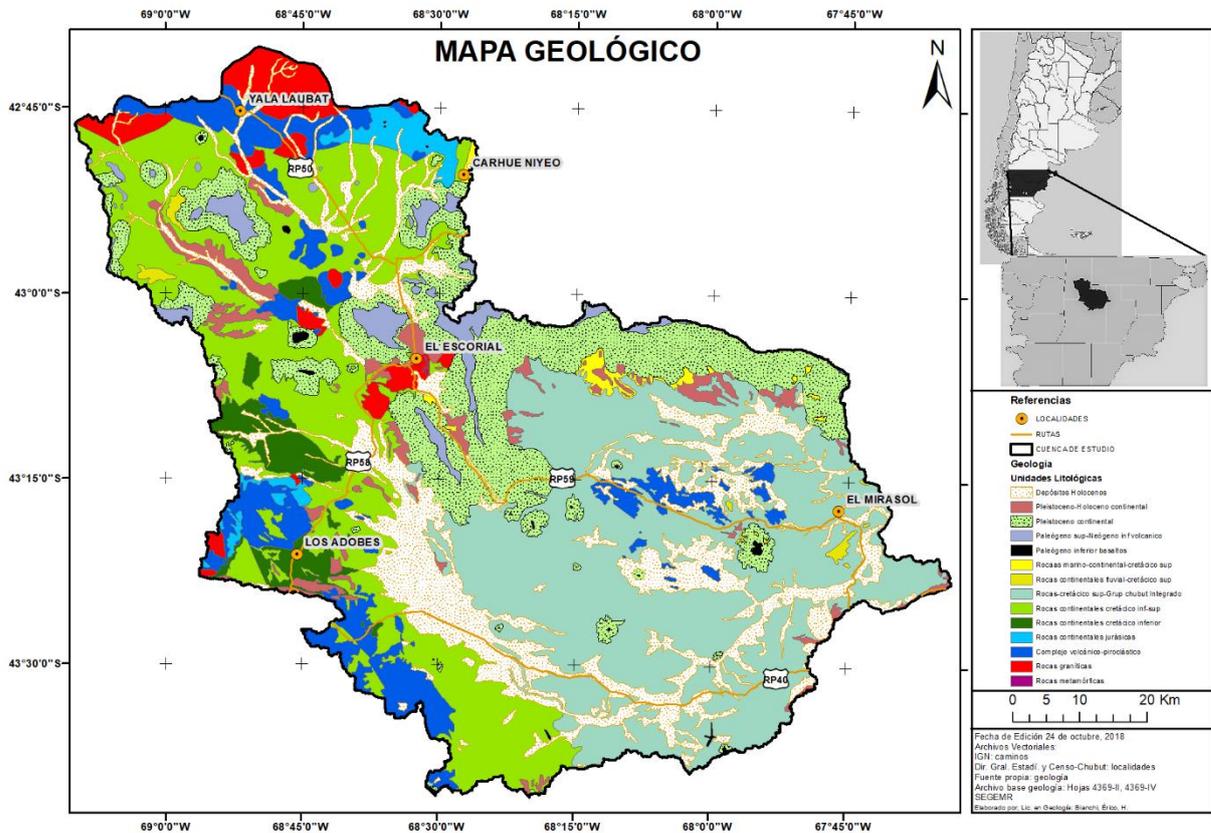


Figura 3. Mapa de unidades geológicas integradas.

Comportamiento de las unidades geológicas ante las precipitaciones

La clasificación de respuesta a la esorrentía ha sido elaborada considerando las siguientes variables de análisis: comportamiento mecánico de las rocas, características composicionales, tipo de textura, estructura y sedimentos que constituyen las unidades litoestratigráficas presentes en las subcuencas de estudio.

Las acciones de los agentes atmosféricos actúan, sobre las rocas, con diferentes grados de intensidad generando desintegración y/o descomposición según prevalezca la meteorización física, química y biológica, o la combinación de más de un proceso.

Las unidades litoestratigráficas 1 hasta 11, que carecen de fracturamiento y/o cierto grado de meteorización, se comportan de forma impermeable o semi-impermeable bajo efecto de las precipitaciones. El agua comienza a moverse en forma de manto o arroyada por las superficies rocosas hasta alcanzar incipientes canalizaciones y posteriormente encausarse en la red fluvial. En aquellas unidades que presentan cierto grado de diaclasamiento y/o meteorización se produce el proceso de infiltración, incorporando un determinado volumen a las aguas subterráneas, obteniendo como resultado una disminución de la cantidad de agua que escurre superficialmente. Generalmente, estas manifestaciones en superficie se aprecian a través de los manantiales y mallines (vertientes y aguadas).

Las unidades 5-6-7-8-9-11-13, son susceptibles a la erosión, principalmente fluvial, permitiendo el desprendimiento de bloques de variado tamaño y su consecuente transporte por la corriente. Por otra parte, las unidades 1 hasta 12, son propensas a ser desintegradas por meteorización física produciendo tamaños variados desde bloques hasta arcillas. En general, predomina el tamaño de guijarro y arenas dependiendo de la procedencia.

Las unidades 5-6-7-8-9-11, compuestas principalmente por tobas, areniscas y arcillitas, presentan características poco permeables debido al estado de consolidación. Sin embargo, aquellos estratos que presenten cierto grado de meteorización o fracturamiento poseen la capacidad de infiltración y se comportan como unidades permeables o semi-permeables.

El comportamiento que presenta la unidad 12 permite una gran capacidad de infiltración, actúa como un sistema muy permeable. Asimismo, se encuentra suprayacente a unidades impermeables, motivo por el cual, disminuye el escurrimiento superficial. En este sentido, la unidad 13, en los niveles gravo-arenosos que presenten bajo grado de compactación admite una gran capacidad de infiltración, comportándose como entidades semipermeables o permeables.

Finalmente, la unidad 14 al estar compuesta por sedimentos friables constituye el material transportado y re-depositado por los cauces fluviales, motivo que provoca una condición favorable para el desarrollo del proceso de infiltración, destacando una entidad muy permeable. Estas texturas; psefticas, psamíticas y pelíticas forman parte de las planicies aluviales, terrazas, valles, mallines, bajos, lagunas, cursos fluviales, y todas aquellas geoformas vinculadas con la red de drenaje.

Clasificación de las unidades geohídricas: respuesta a la escorrentía

Escorrentía Alta

Compuesta por las siguientes unidades: *1*: calizas cristalinas muy compactas, *2b*: cuerpos graníticos sin diaclasamiento con bajo grado de meteorización, *3a* y *3b*: vulcanitas soldadas con baja expresión de diaclasas y bajo grado de meteorización, *4*: secuencia volcanosedimentaria compacta sin diaclasamiento y con bajo grado de meteorización, *5*: facies principales sedimentarias en ocasiones silicificadas, muy compactas, *7*: facies principales sedimentarias constituyen terrazas estructurales muy compactas, *9*: facies sedimentarias de textura fina y muy fina muy compactas, *10*: basaltos, cuerpos gábricos y diques masivos, *11*: conjunto volcanoclástico compacto, con ciertas expresiones prismáticas, disyunción columnar.

Escorrentía Moderada

Compuesta por las siguientes unidades: *2a*: granitoides diaclasados con grado medio de meteorización, *6*: facies sedimentarias con intercalaciones volcánicas presentan un diaclasamiento somero y planos de estratificación, *8*: sedimentitas de texturas gruesas y finas presencia de porosidad primaria en las facies sin cementación.

Escorrentía Baja

Compuesta por la unidad *12*: depósitos gravitacionales compuestos por grandes bloques, gravas gruesas sin cemento y escasa matriz fina.

Escorrentía Muy Baja

Compuesta por las unidades *13*: gravas y arenas con bajo grado de consolidación, presencia de porosidad primaria, *14*: gravas finas, arenas y texturas finas friables.

Intersección de capas vectoriales

La respuesta obtenida a partir del cruce de capas vectoriales: geología integrada y subcuencas, se expresa en la figura 4.

Aplicación de la geología a la producción de escorrentías: Caso de estudio, cuenca hidrográfica del Arroyo Pedido. Patagonia, Argentina..

Para el caso de la subcuenca Arroyo Ponte representa el mayor porcentaje la categoría de escorrentía *Alta*: una media de 80,33% de la superficie total de la subcuenca, constancia de una elevada capacidad de escurrimiento superficial ante un evento de precipitación, mientras que, la clase *Muy Baja*, el 10,56%. Por otra parte, la subcuenca Arroyo Perdido y tributarios, que insume la mayor distribución areal de la cuenca, presentó una cuantificación equitativa entre las categorías *Alta* y *Moderada*, suma un porcentaje de 70,43%, el 29, 57% se reparte de forma desigual entre las clases *Baja*: 10,35% y *Muy Baja*: 19,22%. Finalmente, la subcuenca Arroyo Salado presenta una distribución uniforme, entre aquellas unidades de menor y mayor grado de capacidad de escorrentía, clases *Muy Baja* y *Baja* suman un valor de 50,85%, categoría *Alta*: 46,63%, respectivamente (tabla 1).

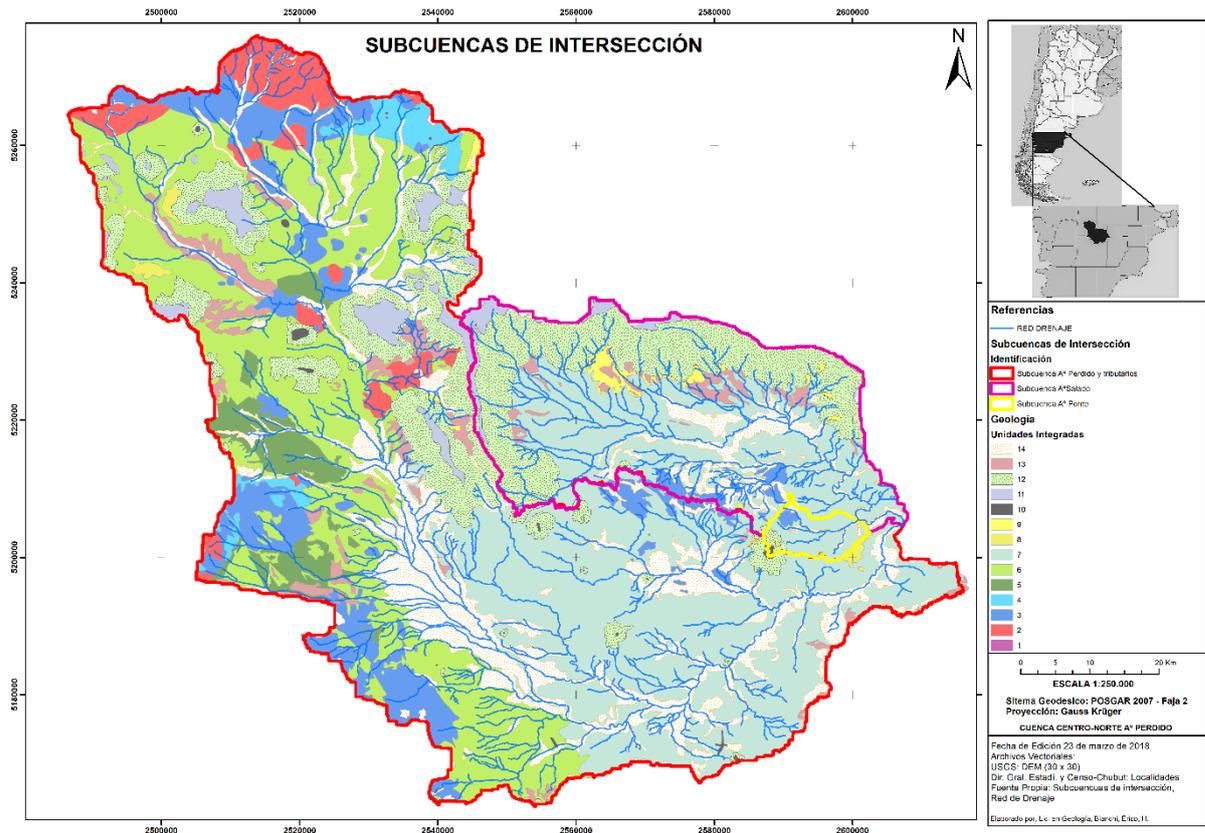


Figura 4. Cruce de información de capas vectoriales.

Tabla 1. Porcentajes de las categorías de respuesta hidrológica

Subcuenca	Superficie (km ²)	Categorías de Respuesta Hidrológica			
		Porcentaje de cobertura respecto de área			
		Alta	Moderada	Baja	Muy Baja
A° Perdido y tributarios	5885,83	40,08	30,35	10,35	19,22
A° Salado	1.466,95	46,63	2,52	36,09	14,76
A° Ponte	83,21	80,33	1,45	7,65	10,56

La figura 5, expresa los resultados de la clasificación propuesta.

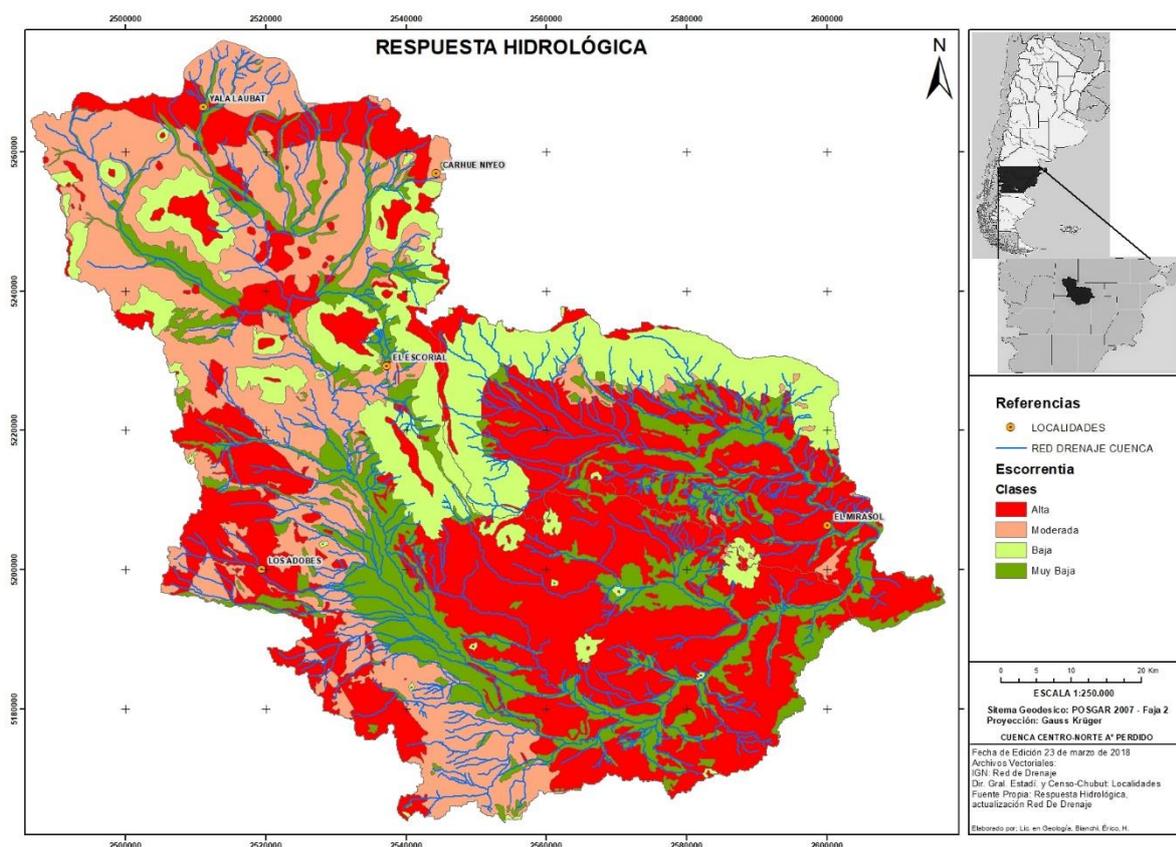


Figura 5. Mapa de unidades de respuesta hidrológica

Los resultados indican que las unidades geológicas tipificadas como *Altas* gobernarían la producción de escorrentía en las subcuentas establecidas. No obstante, la distribución de las unidades litológicas y su comportamiento juega un rol importante como respuesta a las precipitaciones. La presencia de clase *Alta* en zonas de cabecera en la subcuenca Arroyo Perdido, produce un volumen de escorrentía cuantioso que es absorbido parcialmente en su tránsito por zonas de clase *Muy Baja*, para volverse a incrementar en la porción baja de la cuenca. Por otra parte, la subcuenca del Arroyo Salado, presenta una situación de contraste, donde, en la zona de cabecera domina la clase *Baja* y a medida que el flujo de agua se concentra transita la zona de clase *Alta*, situación que genera el desborde de la red de drenaje. Finalmente, la subcuenca del Arroyo Ponte derrama la totalidad de las aguas precipitadas.

CONCLUSIÓN

El estudio revela que mediante la aplicación de simples atributos geológicos sustentados por técnicas SIG, se logra realizar una cartografía y llevar a cabo una valoración de las posibles superficies de escorrentía en la cuenca de estudio. A grandes rasgos, el resultado obtenido de la combinación de las variables utilizadas, se aproxima bastante a la realidad si se consideran los análisis efectuados en campo y el ejemplo acaecido con el evento meteorológico del año 2017.

No obstante, el método aplicado debería ser perfeccionado y contrastado con experiencias cuantificables en la propia cuenca de estudio. Además de ello, sería conveniente realizar más salidas de campo con la intención de continuar las descripciones de las cualidades de cada tipo rocoso y verificar con un nuevo evento meteorológico extremo el comportamiento de las mismas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la hospitalidad y colaboración de numerosos pobladores rurales que nos permitieron el acceso a los arroyos. En particular agradecemos a Rosa Vidal, directora de la Escuela Nro. 118 de la Aldea El Mirasol, a Sebastián Sánchez, director de la Escuela Nro. 212 de El Escorial, y a José Oroquieta dueño de la Estancia La Nueva Alicantina, por abrirnos las puertas y albergarnos durante las salidas al campo.

REFERENCIAS

- Anselmi, G., Gamba, M., Panza, J. (2004). Boletín N° 313, Hoja Geológica 4369-IV Los Altares, escala 1:250.000. SEGEMAR.
- Ardolino, A., Lizuain, A., Salani, F. y Pezzuchi, H. (1999). Hoja Geológica 4369-II Gan Gan, escala 1:250.000. SEGEMAR.
- Camarasa Belmonte, A., López García, M., y Pascual, J. (2006). Análisis mediante SIG de los parámetros de producción de escorrentía. Repositori d'Objectes Digitals per a l'Ensenyament la Recerca y la Cultura, 49-63 p. CORE.
- Camarasa-Belmonte, A., Caballero López, M^a P., y Iranzo García, E. (2018). Cambios de uso del suelo, producción de escorrentía y pérdida de suelo. Sinergias y compensaciones en una rambla mediterránea (Barranc del Carraixet, 1956–2011). Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, 78, 127–153.
- Francés, F., Marco, J., y Llorens, V. (2000). “Un ejemplo de análisis regional del riesgo de inundación en el marco de la planificación territorial”, Serie Geográfica, n° 9: 237-249 p. Depto. Geografía, Universidad de Alcalá.
- Franzosi, C. (2010). Aplicaciones del sensor Landsat. Buenos Aires, Argentina. Obtenido de Universidad de Buenos Aires.
- Petrakis, M., Giannakopoulos, C., y Lemesios, G. (2012). Report on observed changes and responses to climate change worldwide and in Cyprus. CYPADAPT -- development of a national strategy for adaptation to climate change adverse impacts in Cyprus (Report, deliverable 1.1). LIFE10 ENV/CY/000723.
- Silva Nieto, D., Márquez, M., Ardolino, A. y Frnachi, M. (2005). Boletín N° 267, Hoja Geologica 4369-III Paso de Indios, escala 1:250.000. SEGEMAR.
- Skoulikidis, N., Sabater, S., Datry, T., Morais, M., Buffagni, A., Dörflinger, G., Tockner, K. (2017). Non-perennial Mediterranean rivers in Europe: status, pressures, and challenges for research and management. *Science of the Total Environment*, 577: 1–8.

RECOMENDACIONES PARA AUTORES

Generales

Cuadernos de ingeniería civil hidráulica admitirá solicitudes de publicación de artículos científicos y tecnológicos, comunicaciones, tesis y tesinas, trabajos y artículos de difusión de interés editorial, que serán sometidos a revisión y arbitraje previo por un Consejo Revisor (CR).

Los artículos no aceptados quedarán a disposición de los autores.

Idioma: Español.

Formato archivo: MS Word 2007, o versión superior.

Tamaño papel: A4, orientación general en vertical.

Diseño de página: márgenes simétricos. Superior, inferior y exterior de 2 cm. Interior de 3 cm. Encuadernación 0. Diseño encabezado y pie de página 2 cm.

Numeración de páginas: centrada, a pie de página (a cargo de la edición).

Fuente texto normal: Time New Roman 12.

Párrafo normal: alineación justificada, sin endentar, espaciado anterior 0, posterior 6 puntos.

Extensión: para artículos se sugiere no superar 25 páginas.

Color: blanco y negro, tonos de grises (no incluir figuras a color, salvo consulta previa).

Primera página

Primera línea: título del trabajo, en mayúscula, fuente "Time New Roman 12", negrita, párrafo centrado, espaciado 6 puntos posterior.

Segunda línea: autor/autores (Nombre/s Apellido/s), seguido de superíndice identificador de referencia de la institución, si corresponde. fuente "Time New Roman 12", párrafo centrado, espaciado 6 puntos posterior.

Líneas siguientes: Instituciones, precedidas del superíndice de referencia. Dirección. Email y teléfono del primer autor. fuente "Time New Roman 12", párrafo centrado, espaciado 6 puntos posterior.

Seguidamente el resumen, contenido máximo en una página. El título del resumen utilizará texto tipo TITULO 1. Líneas siguientes normales. Al final del resumen, se indicará en línea aparte el texto "Palabras clave:" seguido de las palabras de referencia y búsqueda.

Se recomienda incluir un "abstract" en inglés (opcional). Se admite también un resumen en portugués o francés, siempre que la totalidad de resúmenes no exceda una página.

Partes del artículo: a modo de sugerencia, no excluyente, se propone ordenarlos en resumen, introducción, materiales y métodos, resultados y discusión, conclusiones, referencias, anexos si corresponde.

Títulos

Título 1: para los títulos principales, fuente Arial 12, mayúscula, negrita, alineación centrada, espaciado anterior 18 puntos, posterior 12 puntos.

Título 2: Para los títulos secundarios, fuente Arial 12, mayúsculas y/o minúsculas, negrita, alineación izquierda, espaciado anterior 12 puntos, posterior 12 puntos.

Título 3: Para los títulos de tercer nivel, fuente Time New Roman 12, mayúsculas y/o minúsculas, negrita, alineación izquierda, espaciado anterior 12 puntos, posterior 6 puntos, según el siguiente ejemplo:

TITULO 1

Título 2

Título 3

Figuras

Las figuras deben ser claras y legibles, simples, de buena calidad digital, preferentemente insertadas como imagen (metarchivo mejorado, metarchivo de windows, jpg) y comprimidas para “impresiones” de buena calidad. Centrada. El tamaño debe ocupar preferentemente todo el ancho de la ventana (16 cm), y el alto que se desee. Salvo excepción justificada, en blanco y negro o tonos de grises.

Para el texto interior en figuras, se sugiere fuente Time New Roman o Arial 10 (mínimo). El texto descriptivo debe ser conciso, fuente Time New Roman 10, Negrita, párrafo centrado, espaciado 6 puntos antes y después. Inmediatamente abajo de la figura. Deben numerarse secuencialmente, precedidas por “figura n”, en el orden que se citan en el texto.

Tablas

Las tablas deben tener solo la información indispensable para explicar el texto que se desarrolla. Preferentemente ocupar todo el ancho de la ventana (16cm). Fuente mínima Time New Roman 10. Con bordes y recuadros de trazo simple. Párrafos interiores sin endentar. Es preferible no trazar líneas intercolumnas verticales ni resaltados. Los encabezados de columnas centrados, en negrita. Las notas al pie de la tabla tamaño 10, alineación izquierda.

El título o texto descriptivo conciso, centrado, fuente Time New Roman 10, Negrita, párrafo, espaciado 6 puntos antes y después, ubicado inmediatamente arriba de la tabla. Deben numerarse secuencialmente, precedidas por “tabla n”, en el orden que se citan en el texto.

Todas las tablas deben estar citadas en el texto. Pueden ir intercaladas en el texto (preferente), o en un anexo al final.

Citas bibliográficas

Utilizar el formato autor-año para las citas bibliográficas. Las referencias bibliográficas se ordenan al final del documento, por orden alfabético, basado en “texto normal”, párrafo sangría Francesa 1,25, primer nombre del primer autor, restantes autores con primer inicial.

Algunos ejemplos de referencias.:

Para artículos en revistas:

Autor 1, Autor 2 y Autor 3. (Año). Título del artículo. *Nombre de la revista en cursivas*, ISSN, volumen, (número del fascículo entre paréntesis, seguida de dos puntos y páginas inicial-final ligadas por un guion):

Para artículos en Congresos, Simposios

Autor 1 y Autor 2. (Año). Título del trabajo. En: “título del evento”, ISBN (si corresponde). lugar, págs.

Para artículos electrónicos (exclusivamente):

Autor 1, Autor 2. (fecha de publicación en web). Título del artículo. *Nombre de la revista en cursivas* seguido de [on line], Volumen abreviado como “Vol N”, artículo abreviado como “Art # nn” <sitio web>, ISSN (opcional),

Para libros:

Autor 1, Autor 2. (año). *Título del libro en cursivas*, edición, páginas. Editorial, ciudad, país.

Para tesis, tesina:

Nombre/s Apellido/s autor. Grado de tesis. (Año). Título de la tesis. Universidad o institución que otorga el grado, ciudad, país. Sitio web (opcional).

Para patentes:

Nombre Autores. (Año). Título de la patente. Patente N°. País.

Formas de presentación:

Entrega personal, o correo postal, por Nota de solicitud de publicación, dirigida a “Sr. Director, cuadernos de ingeniería civil hidráulica”, adjuntando dos (2) copias impresas y soporte digital del trabajo en MS Word.

Cuadernos de ingeniería civil hidráulica
Av. 9 de Julio 25
CP 9100 – Trelew
Pcia del Chubut – Rep. Argentina



Volumen 4 No. 1 – Año 2020
1ra. Edición, 200 ejemplares

CD-DICH

Editora del Centro de Documentación del Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica

Facultad de Ingeniería

Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco
Av. 9 de Julio 25, CP 9100, Trelew, Chubut, Rep. Argentina
Diciembre de 2020

Este nuevo número de *Cuadernos de Ingeniería Civil Hidráulica (CICH)*, se ha titulado *EVENTOS SEVEROS EN AMBIENTES DE CLIMA SEMIÁRIDO. CASOS DE LA PATAGONIA CENTRAL CUENCA DEL RIO CHUBUT, Y OTRAS CUENCAS MENORES DE LA MESETA EN LA REGIÓN CENTRAL DE LA PATAGONIA ARGENTINA*, en razón de incorporar en sus publicaciones el análisis y tratamiento de eventos severos recientes.

El artículo inicial refiere a un resumen en forma de compendio cronológico de investigaciones en cuencas y sistemas hidrológicos mixtos y aplicaciones de casos regionales, en un período que abarca desde 1985 a 2018, desarrollados en línea de investigación del Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica de la Facultad de Ingeniería (UNPSJB). El trabajo reunió para cada proyecto un detalle de los temas tratados, los investigadores participantes, y la producción científica más relevante en materia de publicaciones y presentaciones en eventos de ciencia y técnica.

Seguidamente, se expone un trabajo referido a “huellas” de las crecidas extraordinarias en la Patagonia semiárida (Argentina), sus tipologías de improntas, modelo teórico y resultados preliminares. Refiere a las crecidas repentinas en sistemas fluviales efímeros de nuestra región Patagónica, donde por estas características se carece en general de datos hidrométricos, recurriendo a reconstruir los eventos en base a las marcas dejadas por la corriente, y el apoyo de modelos hidrológicos de aplicación (HEC-RAS e IBER).

En similar línea de estudios le sigue un trabajo referido al estudio de caudal máximo de inundaciones históricas en arroyos efímeros de la Patagonia semiárida, en Argentina.

Finalmente se agrega un trabajo geológico de aplicación a una cuenca hidrográfica del Arroyo Perdido, ubicada en la región central de la Patagonia (Argentina).

Nota editorial

ISSN 1853-8479



1853-8479(201108)1:1<>;1-R