

CAPÍTULO 21

**Cuando en el desierto patagónico los arroyos
braman. Evento extraordinario de abril de 2017
en la cuenca del Arroyo Perdido**

CAPÍTULO 21

GABRIEL KALESS

Facultad de Ingeniería, UNPSJB
gkaless@ing.unp.edu.ar

OSCAR FRUMENTO

CONICET-CENPAT
oscar@cenpat-conicet.gob.ar

ERICO BIANCHI

Facultad de Ingeniería, UNPSJB
geohidroconsultor@gmail.com

MARÍA JESÚS CHACHERO

Facultad de Ingeniería, UNPSJB
mjchachero@gmail.com

RODRIGO BASTIDA

Facultad de Ingeniería, UNPSJB
rodrigo44_27@hotmail.com

SEBASTIÁN IGLESIAS

Facultad de Ingeniería, UNPSJB
siglesias661@gmail.com

PALABRAS CLAVES

EL MIRASOL

EL ESCORIAL

CRECIDAS REPENTINAS

ARROYOS EFÍMEROS

Cuando en el desierto patagónico los arroyos braman. Evento extraordinario de abril de 2017 en la Cuenca del Arroyo Perdido

RESUMEN

Entre los días 6 y 7 de abril de 2017 ocurrió una tormenta intensa en la Meseta Central de la Provincia del Chubut afectando mayormente la cuenca del Arroyo Perdido. El objetivo del presente trabajo es caracterizar dicho evento meteorológico, estimar los caudales que circularon por la red de arroyos efímeros y dar cuenta del impacto que tuvo en la población de la meseta. Se caracterizó la tormenta desde un punto de vista meteorológico y se analizó estadísticamente la probabilidad de ocurrencia. Se elaboró el mapa geológico de la cuenca a fin de caracterizar su capacidad para producir escorrentía. Finalmente, se estimó el caudal máximo en los arroyos Perdido y Salado mediante una metodología de simulación hidráulica en base a relevamientos post-evento. La lluvia diaria medida en distintos establecimientos rurales varía entre 70 y 100 mm, siendo el tiempo de retorno mayor a 400 años (para la precipitación de 70 mm). El caudal máximo en el Arroyo Perdido fue estimado en 2060 m³/s y en el Arroyo Salado, de 1108 m³/s. El evento afectó la infraestructura vial del interior de la provincia de Chubut y a las comunidades de El Escorial y El Mirasol, cuyos pobladores permanecieron aislados por varios días.

INTRODUCCIÓN

Cuando uno escucha relatos de crecidas extraordinarias, de los niveles alcanzados por las aguas torrenciosas, de los desastros producidos, de las viviendas volteadas o arrastradas,

es inevitable preguntarse si realmente habrá sido así ¿Es posible que algo así ocurriera en medio de un desierto? Conviene atender a la palabra “desierto” en sus dos acepciones, por un lado, a las características climáticas de la región patagónica pero también a las vastas extensiones deshabitadas. Quizás ha habido, en la historia de este territorio, eventos aún más exagerados que los que hemos vivido en 2017, pero no hubo testigos o no nos han llegado sus testimonios. Los relatos de eventos extraordinarios más antiguos se encuentran en las crónicas de los colonos galeses, tales como la famosa obra de Williams Hughes (no tenemos conocimiento de relatos de los pueblos originarios). En particular, Hughes relata las crecidas del Río Chubut de principios del siglo pasado, que pusieron a prueba la fortaleza espiritual de los colonos. El desborde del río, que constituye un evento natural responsable de la formación de la planicie de inundación, se transforma en un problema, una inundación, cuando afecta a bienes, infraestructura o pone en riesgo a la población. Es entonces que los eventos naturales irrumpen en nuestras vidas cotidianas y nos llaman la atención. Sin embargo, esa impresión no es perenne y con el tiempo solamente quedan los relatos impresos.

A fines del mes de marzo y principios de abril de 2017 una lluvia de singular intensidad abarcó la zona sureste de la provincia del Chubut. Los efectos sobre la población de Comodoro Rivadavia fueron de tal entidad que movilizaron a toda la comunidad, siendo este libro respuesta a aquel evento. Los efectos de dicho evento también afectaron a las poblaciones del Valle Inferior del Río Chubut, que, si bien se ubican a 350

km al norte, no resultaron indemnes. La lluvia se extendió sobre la cuenca del Río Chico produciendo una crecida extraordinaria no sólo por los volúmenes de agua involucrados sino también por la profusa cantidad de sedimentos arrastrados. El volumen de agua fue retenido por el embalse Florentino Ameghino, pero los sedimentos lograron atravesarlo por vía de las descargas de las turbinas. Avanzaron hasta las comunidades valletanas e impidieron la potabilización, privando a la población del suministro del vital elemento por dos largas semanas. Nos hemos referido sobre este evento en un capítulo que acompaña esta publicación.

Una semana después de la “tormenta de Comodoro Rivadavia” se produjo otro evento de similar magnitud pero que afectó la zona centro-norte de la provincia. Las crecidas de los Arroyos Perdido y Salado (Fig. 1 y 2) son comparables a las reportadas para los sistemas efímeros del ejido de Comodoro Rivadavia (Paredes et al. 2017). Sin embargo, estos eventos no contaron con la misma cantidad de testigos puesto que afectó a las comunas rurales del interior de la provincia, principalmente El Escorial y El Mirasol. Resulta entonces, como objetivo del presente capítulo, producir un testimonio técnico del evento a fin de visibilizarlo y que sea

de utilidad para futuros estudios o proyectos.

CARACTERÍSTICAS FISIGRÁFICAS DE LA CUENCA Y DE LOS ARROYOS

El Arroyo Perdido drena una amplia cuenca de la región central de la Provincia del Chubut. Cuando se considera como punto de síntesis de la cuenca a la confluencia de los arroyos Salado y Perdido la superficie abarcada es de 7411 km², que corresponden a 5975 km² para el área drenada por el Arroyo Perdido y 1436 km² por el Arroyo Salado. La cuenca se extiende entre las latitudes 43° 40' 32" S y 45° 40' 24" S, y las longitudes 67° 36' 59" O y 69° 09' 44" O. Las nacientes del Arroyo Perdido se encuentran en la Sierra de Blancuntre, mientras que las del Arroyo Salado en las sierras de la Ventana y Rosada. Estas serranías conforman el límite norte de la cuenca. Hacia el oeste y el sur linda con la cuenca del Río Chubut. La divisoria de aguas está jalonada por una serie de cerros, tales como el Cerro Negro, Las Chivas, La Paloma, en el confín oeste, y Horqueta Grande, El Indio y la Sierra Chata en el confín sur (Fig. 3).

La cuenca del Arroyo Perdido es de tipo endorreica porque el agua no tiene salida al mar. El agua transportada por el



Figura 1. Vista de la Aldea Escolar de El Mirasol, en primer plano, ubicada sobre la margen del Arroyo Salado.



Figura 2. Vista del Valle del Arroyo Perdido desde la margen izquierda, a la vera de la Ruta Provincial N° 59.

arroyo llega hasta una depresión denominada “Bajo de la Tierra Colorada” al cual también confluyen los aportes del Arroyo Telsen, por el norte. El agua se acumula en este bajo y finalmente vuelve a la atmósfera por evaporación o se infiltra en el suelo. El punto más bajo de la cuenca se encuentra en el Bajo de la Tierra Colorada a una elevación de 64 m sobre el nivel del mar. Para nuestro estudio, la confluencia de los arroyos Perdido y Salado constituye el punto más bajo, con una elevación de 207 m sobre el nivel del mar. Los puntos más altos de la cuenca se encuentran en la Sierra de Blancuntre a 1570 m (Fig. 4).

El Arroyo Perdido se caracteriza por su extensión transversal y bajo calado. En la zona próxima al puente de la Ruta Provincial N° 59, el ancho del arroyo supera los 250 metros. En varios tramos la extensión del arroyo está condicionada por los límites del valle aluvial. Los ríos de ambiente desértico suelen ser anchos y someros debido a la ausencia de vegetación en las márgenes que, a través de las raíces, confieren resistencia al suelo. Además, la ausencia de materiales cohesivos y la presencia de materiales granulares favorecen la escasez de resistencia de las márgenes a la erosión fluvial. La pendiente del fondo es de 0,21%. El material del lecho está

conformado por gravas y arenas.

El Arroyo Salado posee un único cauce bien definido. La pendiente longitudinal media del tramo de estudio es de 0,26%. Como muchos cursos de ambientes áridos, también aquí se distinguen distintos niveles de fondo y formas laterales, por tal motivo el ancho del curso es muy variable y depende de la intensidad de la crecida. Se observa un ancho mínimo de aproximadamente 40 m, en tramos rectos, mientras que en zonas de divergencia del flujo y curvas, el ancho supera los 100 m. El material del lecho es muy variable a lo largo del tramo estudiado. Se realizaron tres muestreos en sitios donde se evidenciaban tamaños claramente distintos. Así, la muestra más fina es de arena con tamaño mediano de 0,80 mm, mientras que la más gruesa, corresponde a granza de 5,2 mm de tamaño mediano. En algunos sectores se observó material más grueso, en el rango de las gravas y cantos rodados que se presume provienen de aportes laterales al cauce y no son removibles por la corriente. Las márgenes están constituidas por material fino que presenta algún grado de cementación por sales. Esto le confiere cohesión (mientras está seco) que permite la presencia de márgenes con escarpadas verticales.

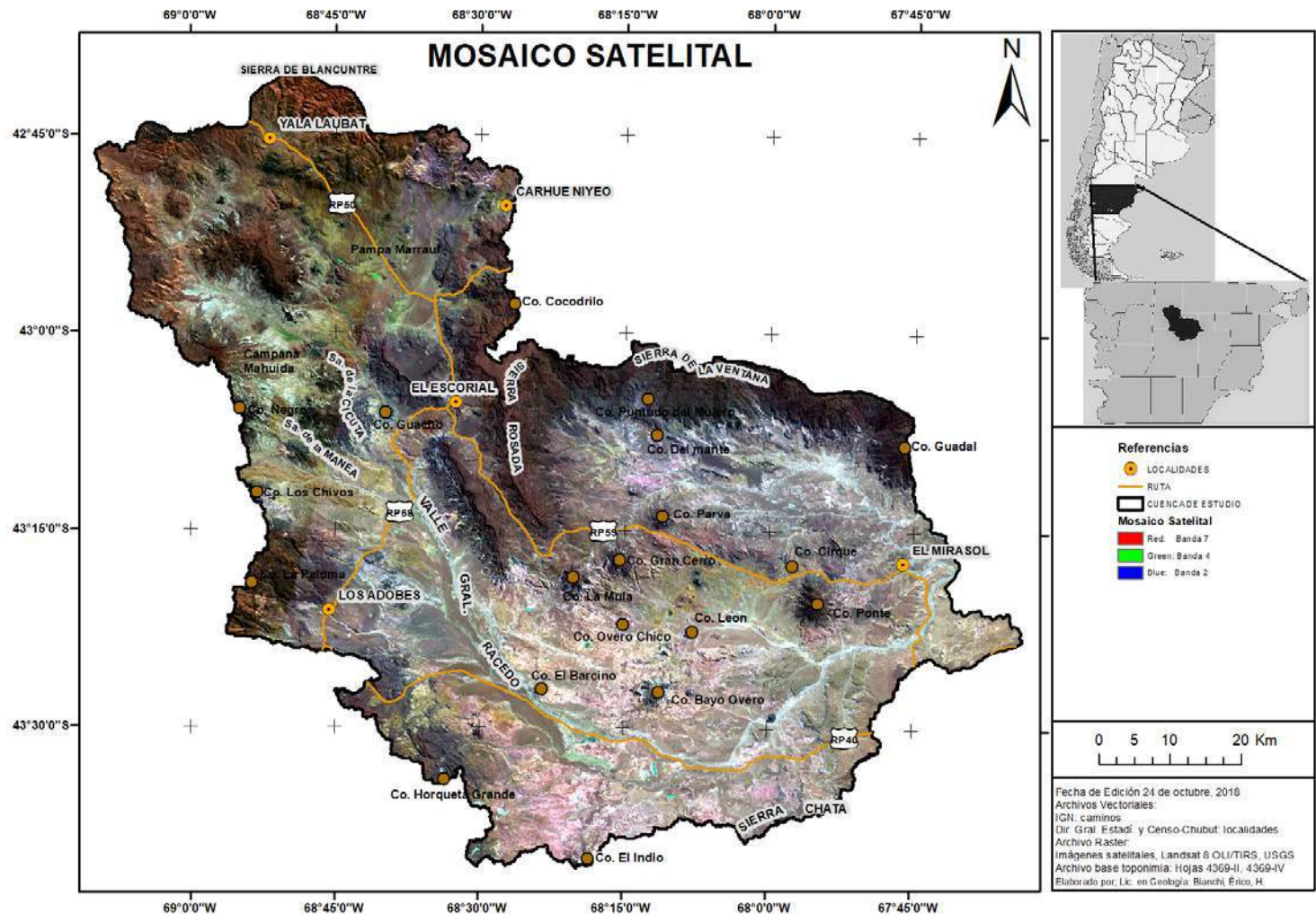


Figura 3. Mosaico de imágenes satelitales de la cuenca del Arroyo Perdido (Fuente: elaboración propia).

ASPECTOS GEOLÓGICOS DE LA CUENCA

Las características geológicas de la cuenca influyen de modo notable en la generación de una crecida, especialmente en la Patagonia extra-andina donde la densidad de cobertura vegetal es muy baja. A fin de aportar al conocimiento de la génesis de los eventos extremos hemos elaborado un mapa geológico (Fig. 5), a partir de las Hojas Geológicas 4369-II Gan Gan y 4369-IV Los Altares, trabajando en escala 1:250.000 (Anselmi et al. 2004; Silva Nieto et al. 2005). Se ratificaron diversos puntos en campo confirmando los afloramientos representados en cada una de las cartas geológicas. La descripción litoestratigráfica se realizó a través del Boletín N° 313 (hoja Geológica 4369-IV), la Hoja Geológica 4369-II carece de dicho documento, y el Boletín N° 267 representativo de la Hoja Geológica 4369-III Paso de Indios, empleado como apoyo descriptivo de aquellas unidades estratigráficas presentes de la Hoja Geológica de Gan Gan.

Con el fin de unificar la nomenclatura de ambas Hojas Geológicas, resumir afloramientos que poseen escasa representatividad y agrupar eventos geológicos, se estableció una nomenclatura vinculada al espacio temporal como unidad litoestratigráfica.

En primer término, se presentará un resumen de las unidades geológicas descritas en cada uno de los boletines. Seguidamente se describirá el comportamiento de las diferentes rocas ante la meteorización física y química, y como actúan los materiales constituyentes de las rocas frente a los eventos de precipitación, movilidad y transporte provocados por una corriente fluvial.

Descripción de las unidades litológicas

1. Rocas metamórficas (Precámbrico sup.). Integrada por la Formación Cushamen - Miembro El Escorial, se componen de calizas cristalinas compactas.
2. Rocas graníticas (Ordovícico-Silúrico-Pérmico). Bajo esta denominación se incluyen a la Formación Mamil Choique, compuesta por dioritas cuarzosas, tonalitas, granodioritas, migmatitas tonalíticas, y la Formación Lipetrén, compuesta por pórfiros graníticos, riolíticos y microgranitos.
3. Complejo volcánico-piroclástico (Jurásico inf. a sup.). Integrada por la Formación Los Mártires, que es un conjunto de rocas efusivas mesosilíceas y ácidas compuestas de andesitas, ignimbritas andesíticas a riolíticas, y tobas y por la Formación Lonco Trapial, agregado de rocas extrusivas y efusivas que incluyen lavas, ignimbritas y aglomerados

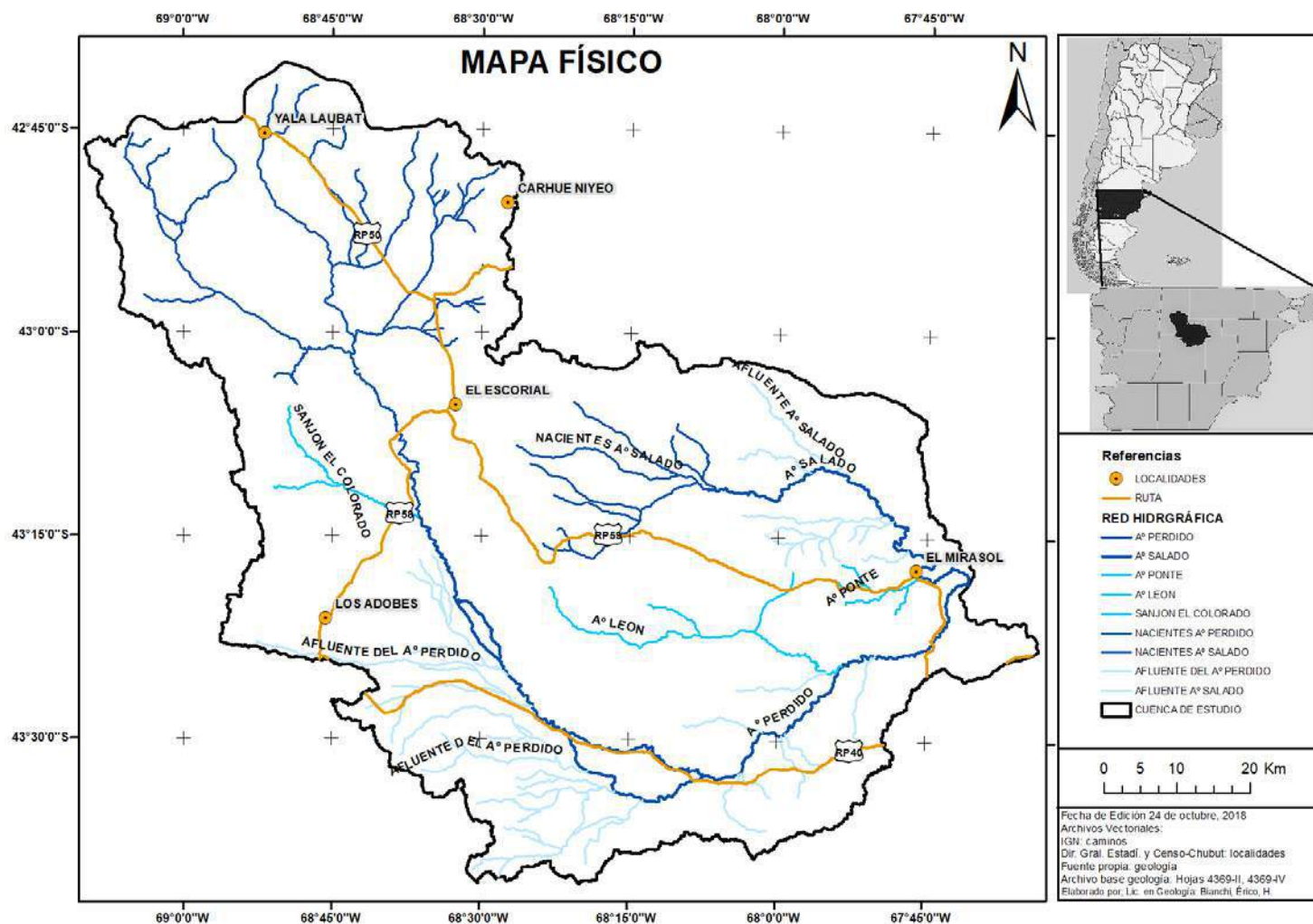


Figura 4. Red hidrográfica de los arroyos Perdido y Salado (Fuente: elaboración propia).

volcánicos de composición andesítica a basandesítica y basáltica, se observan tobas y lapillitas.

4. Rocas continentales jurásicas (Jurásico med. y sup.). Se enmarca bajo esta denominación a la Formación Cañadón Asfalto, en la que se reconocen mantos lávicos básicos con intercalaciones de aglomerados volcánicos, material piroclástico, fangolitas, tufitas, tobas, areniscas, conglomerados, calizas e intercalaciones lávicas.
5. Rocas continentales (Cretácico inf. a sup.); Este Período está representado por rocas incluidas en las Formaciones Los Adobes y Cerro Barcino (Miembro Las Plumas); Formación Bayo Overo; Formación Puntudo Chico; Formación Paso del Sapo y Formación La Colonia, constituyen una secuencia concordante y discordante de conglomerados, areniscas en forma de lentes y bancos de arcillitas, depósitos de tobas y tobas vítreas, tufitas, sedimentitas epiclásticas con y sin aporte piroclástico. Estratos tabulares de areniscas líticas y cuarzosas, arcillitas, arcillitas limosas, limonitas y escasas intercalaciones delgadas de areniscas.
6. Paleógeno y Neógeno: Se incluyen formaciones continentales y rocas ígneas, entre ellas la Formación El Buitre, que consiste de cuerpos sub-volcánicos compuestos por basaltos alcalinos, basanitas, diabasas y gabros de variado tamaño y forma. El Grupo Sarmiento consiste de sedimentitas piroclásticas portadoras de mamíferos, compuesta por tobas, tobas arenosas, areniscas, limolitas y arcillitas tobáceas; por último, el Basalto Sierra Rosada, se compone de rocas básicas, constituyen varios mantos lávicos dispuestos de forma sub-horizontal.
7. Cuaternario: Depósitos que rodean en general a coladas basálticas y se encuentran ubicados en los taludes de las mesetas se denominan Remoción en Masa o Depósitos Rotacionales. 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. En los Depósitos holocenos se agrupan a los depósitos modernos correspondientes a Depósitos de Bajos y lagunas, Depósitos aluviales y coluviales indiferenciados, y Depósitos de planicie aluvial de cursos no permanentes.

EL ROL DE LAS ROCAS EN LA GENERACIÓN DE LAS CRECIDAS

Ante la acción de los agentes atmosféricos las rocas se comportan de forma diferente, manifestando desintegración y/o descomposición según prevalezca la meteorización física, química o biológica, o la combinación de más de un proceso. Las condiciones ambientales de Patagonia exhiben predominio de meteorización física, donde las precipitaciones actúan como agente erosivo a través de sus diversos mecanismos, y como sistema de transporte-depositación del material erosionado.

Provocada la descarga pluvial en una zona, principalmente en las cabeceras de la cuenca, cuando el agua alcanza la

superficie de terreno se genera escorrentía superficial. Esto ocurre en el caso de la unidad estratigráfica 1 siempre y cuando, no posea fracturamiento. El agua comienza a moverse en forma de manto por las superficies rocosas hasta alcanzar incipientes canalizaciones y posteriormente se encauza en la red fluvial. Si las unidades litoestratigráficas presentan fisuras, el agua comienza el proceso de infiltración y puede aportar un cierto volumen al agua subterránea, disminuyendo la cantidad de agua que escurre de forma superficial. Generalmente estas manifestaciones en superficie se aprecian a través de manantiales y mallines (aguadas y vertientes).

Cuando la escorrentía superficial es varias veces superior a la infiltración y a la escorrentía subterránea, el agua de forma súbita llena la red de drenaje, posibilitando, según la cantidad de precipitaciones, que se produzcan anegamientos fuera del cauce fluvial, fuerte erosión, elevado transporte de sedimentos de variado tamaño, inundaciones en centros poblacionales, destrozos en infraestructura, entre otros impactos. Estos eventos, provocan que las componentes de las unidades litoestratigráficas 4-5-6-7, comiencen a desprenderse y dejar de constituir un depósito estable para ser transportadas por el cuerpo ácuo. La energía de la corriente fluvial marcará el tamaño de los materiales transportados, la distancia a la cual depositará dentro del sistema de drenaje y la posición respecto al cauce fluvial.

Las unidades litoestratigráficas 1-2-3-4-5-6, son propensas a desintegrarse por meteorización física produciendo tamaños de materiales que van desde bloques hasta arcillas, predominando el tamaño de guijarro y arenas según su procedencia.

Las unidades 1-2-3 y 4-5-6 (solo los basaltos) son superficies aptas para provocar escurrimiento superficial. Las unidades 4-5-6 (tobas, areniscas y arcillitas) presentan similar condición en aquellas unidades compuestas por materiales poco permeables y muy consolidados.

La unidad 7 (excepto los Depósitos de remoción en masa), al estar compuesta por sedimentos prácticamente friables, constituye el material transportado y re-depositado por los cauces fluviales. Estas texturas (psefíticas, psamíticas y pelíticas) forman parte de las planicies aluviales, terrazas, valles, mallines, bajos, lagunas, cursos fluviales y todas aquellas geoformas presentes en la red de drenaje. De cara a los eventos de precipitación, la Unidad 7 presenta mayor condición de infiltración respecto a escorrentía superficial en las texturas arenosas y acumulación en las texturas arcillosas.

EL EVENTO DE ABRIL DE 2017

A fin de caracterizar el evento meteorológico hemos recurrido a datos obtenidos de modo informal (de establecimientos rurales) y otras fuentes de información global. Los datos reflejan cierta coherencia y todos indican que el evento de los días 6 y 7 de abril fue un evento extremo. No necesaria-

mente este evento está o pudo estar asociado a lo sucedido en Comodoro Rivadavia. No obstante, desde un punto de vista estrictamente meteorológico, la ocurrencia de ambos fenómenos estuvo asociada a una misma causa denominada “bajas segregadas o bajas frías”, interpretando con el término “bajas” a zonas de presión atmosférica baja. Básicamente, estos fenómenos ocurren debido al ingreso de aire frío de la región antártica que interrumpe la circulación “normal” del flujo de aire típico del oeste en estas latitudes, sobre gran parte de la tropósfera (los 10 km de aire más cercanos a la superficie terrestre).

La caracterización de la situación meteorológica asociada al evento del 6 y 7 de abril se hizo utilizando productos del NCEP (National Center Environmental Prediction, de EUA); básicamente datos tridimensionales de presión atmosférica, viento, temperatura (Kalnay et al. 1996) sobre la región comprendida entre las latitudes 35°S y 55°S y las longitudes 50°O y 90°O. Los mismos fueron obtenidos de la página de internet del Physical Sciences Division, Earth System Research Laboratory, NOAA, Boulder, Colorado, <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>.

De manera accesoria a los datos obtenidos de manera informal, se utilizaron además mapas digitales de precipitación diaria construidos con datos de la base GSMaP del Global Rainfall Map in Near-Real -Time (GSMaP_NRT), JAXA Global Rainfall Watch producidos y distribuidos por Earth Observation Research Center, Japan Aerospace Exploration Agency (Okamoto et al. 2005).

En la Figura 6 se grafican las diferencias entre una situación normal de circulación atmosférica y el caso de la interrupción del flujo del oeste y la presencia de la baja segregada asociada a la tormenta del 6 y 7 de abril de 2017. Los paneles superiores corresponden a la hora local 21:00 del día 3 de abril y los paneles inferiores a la misma hora del día 7 de abril, uno de los días de ocurrencia del evento de precipitación. El panel (a) muestra la circulación en altura y el panel (b) la circulación de superficie; se observa en ambos casos que el flujo del aire es predominante del sector oeste (como indican las flechas), las presiones atmosféricas disminuyen hacia las altas latitudes. En los paneles (c) y (d), por otra parte, se observa la interrupción del flujo del oeste tanto en altura como en superficie; el estado maduro de la baja segre-

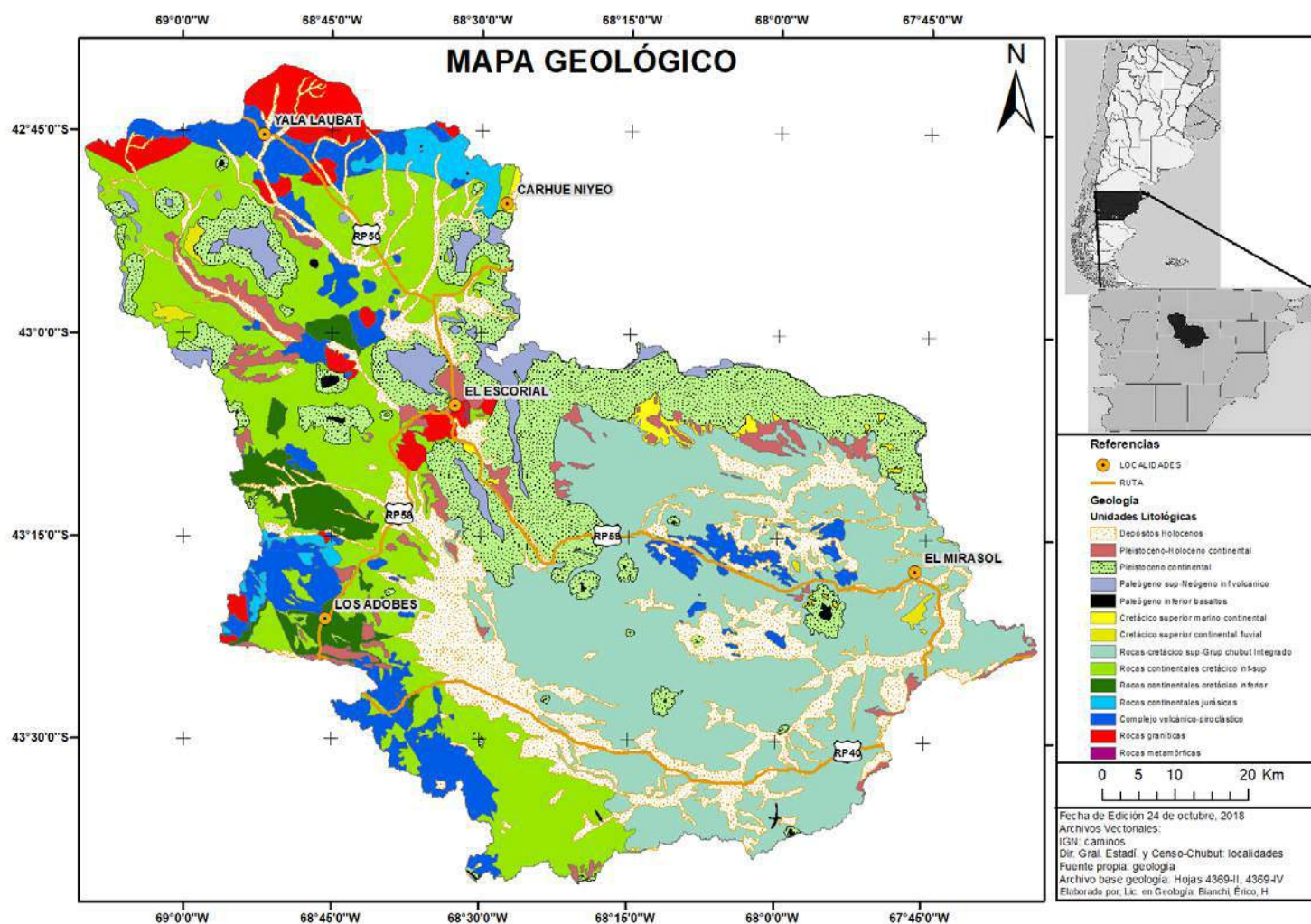


Figura 5. Mapa geológico de la cuenca del Arroyo Perdido (Fuente: elaboración propia).

gada en altura y el centro de baja presión en superficie. Esta última localizada sobre Península de Valdés y que también persiste varios días, aporta vapor de agua proveniente del océano Atlántico que es convertido en precipitación debido al ascenso del aire, típico de estas situaciones.

Cuantificación de la precipitación a partir de los datos GSMaP

Esta base de datos provee información horaria de precipitación basada en una técnica especial de interpretación de imágenes satelitales cuya resolución espacial es de aproximadamente 10 kilómetros. Por un lado, se ha podido reconstruir el campo espacial de precipitación diario, así también como la evolución horaria de la precipitación sobre el área

en la que se encuentra la comuna de El Mirasol. La Figura 7 muestra la precipitación acumulada diaria para los días 6 y 7 de abril (paneles a y b respectivamente). Se desprende de la misma que para el día 7 de abril de 2017 los valores estimados con esta base son representativos del evento de precipitación, indicando particularmente lluvias intensas sobre las cuencas de los arroyos Perdido y Salado.

Las intensidades de precipitación horaria también pudieron estimarse a partir de la base GSMaP. Para ello, se calcularon los promedios areales de la precipitación horaria sobre un área rectangular que contiene a la comuna rural de El Mirasol (Fig. 7). Según esta base, el total acumulado de precipitación correspondiente al día 6 de abril fue de 57 mm y el

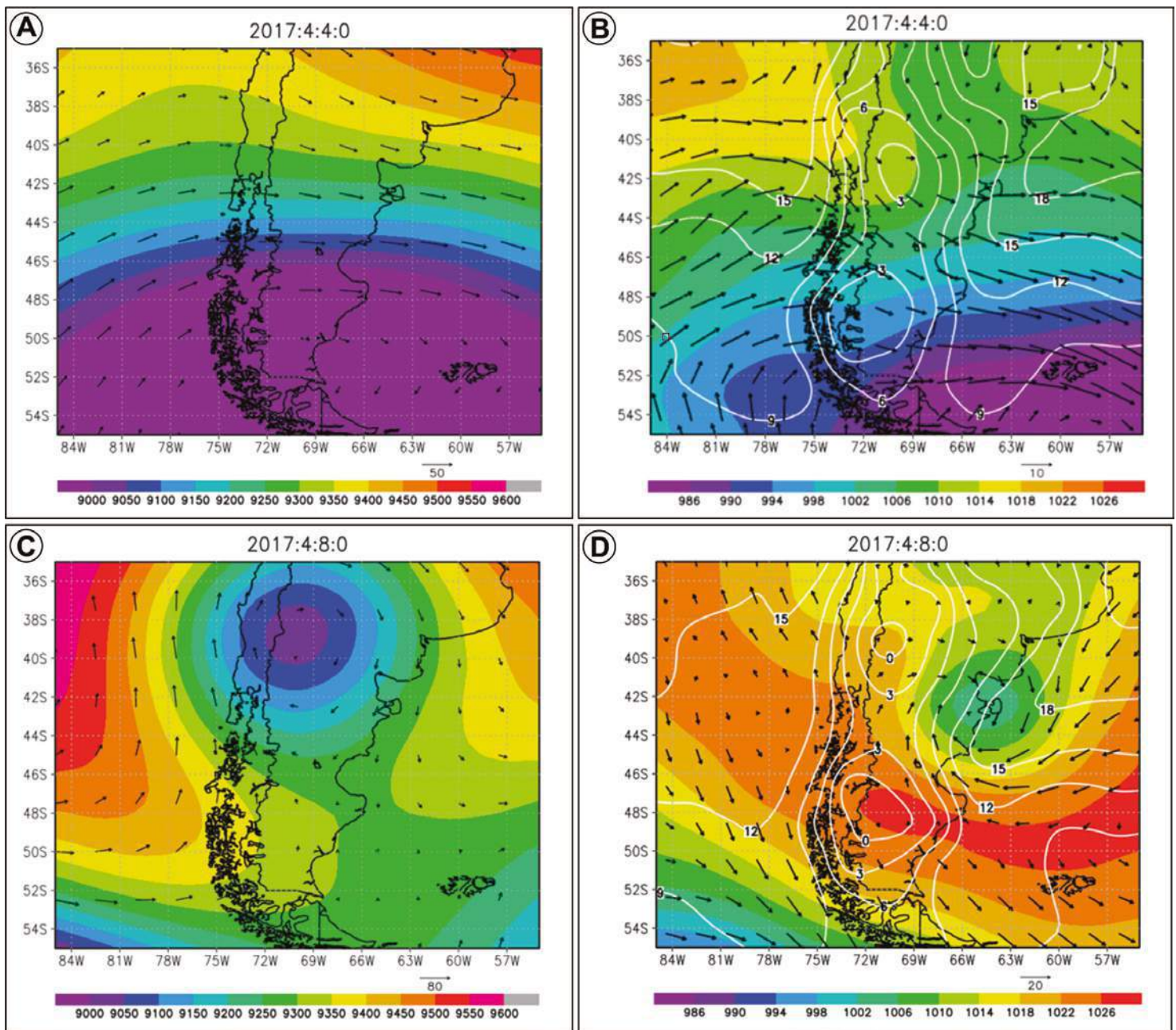


Figura 6. Mapas de la circulación troposférica de altura (panel a y c) y de superficie (panel b y d) para los días 6 y 7 de abril de 2017. En los mapas de superficie se muestra en sombreado la presión atmosférica a nivel del mar en hPa. En los mapas de altura se indica el geopotencial en mgp del nivel de presión 300 hPa. El viento (vectores) en km/h. En los mapas de superficie se indica la temperatura del aire a 2 m del suelo en °C. Los paneles a y b corresponden al 6 de abril, mientras que c y d al 7 de abril de 2017.

total acumulado para el día 7 de abril fue de 137 milímetros. Por otra parte, las intensidades horarias máximas ocurrieron alrededor de la hora 15 del día 7 de abril con un valor que superó los 40 milímetros (Fig. 8).

Se ha encontrado cierta consistencia entre los datos informales aportados por la población local y la reconstrucción realizada a partir de datos GSMaP. En la Tabla 1 se muestran distintos valores de precipitación: la observación de El Mirasol (escuela); los estimados GSMaP; los medidos en dique Ameghino y un valor aportado por un poblador rural de la zona sur de la localidad de Las Plumas. Se puede observar que en Ameghino el valor registrado para los días 6 y 7 de abril difiere significativamente de las otras observaciones y de las estimaciones GSMaP; quizás debido a una localización más marginal al evento, como puede inferirse a partir de la Fig. 7.

Finalmente, se puede presumir que las causas de los eventos extremos de precipitación en la región central y costera de la Patagonia Argentina están asociadas a la ocurrencia de bajas segregadas. Si bien no hay trabajos específicos sobre estas situaciones para esta región, a nivel hemisférico se ha

podido determinar que durante el otoño y el verano se darían las condiciones más apropiadas para la ocurrencia de bajas segregadas (Pinheiro et al. 2017). ¿Cuál es la probabilidad de ocurrencia de este evento?

En este apartado analizaremos el evento meteorológico desde una perspectiva estadística comparándolo con otros eventos ocurridos en la misma región. La estadística es una disciplina que aborda los problemas donde existe una multiplicidad de causas y resulta imposible llevar a cabo experimentos donde se prescindiera de todas las causas con excepción de una. La comprensión de los fenómenos atmosféricos constituye por excelencia un ejemplo de tales problemas.

La información que se dispone para el análisis fue recolectada de modo informal, por no existir estaciones de medición en la propia zona. Se recabó información en la Escuela de El Mirasol, que cuenta con un pluviómetro que recogió 180 mm entre los días 6 y 7 de abril, y datos suministrados por propietarios de establecimientos ganaderos de la zona, ubicados en la cuenca, que se resumen en la Tabla 1.

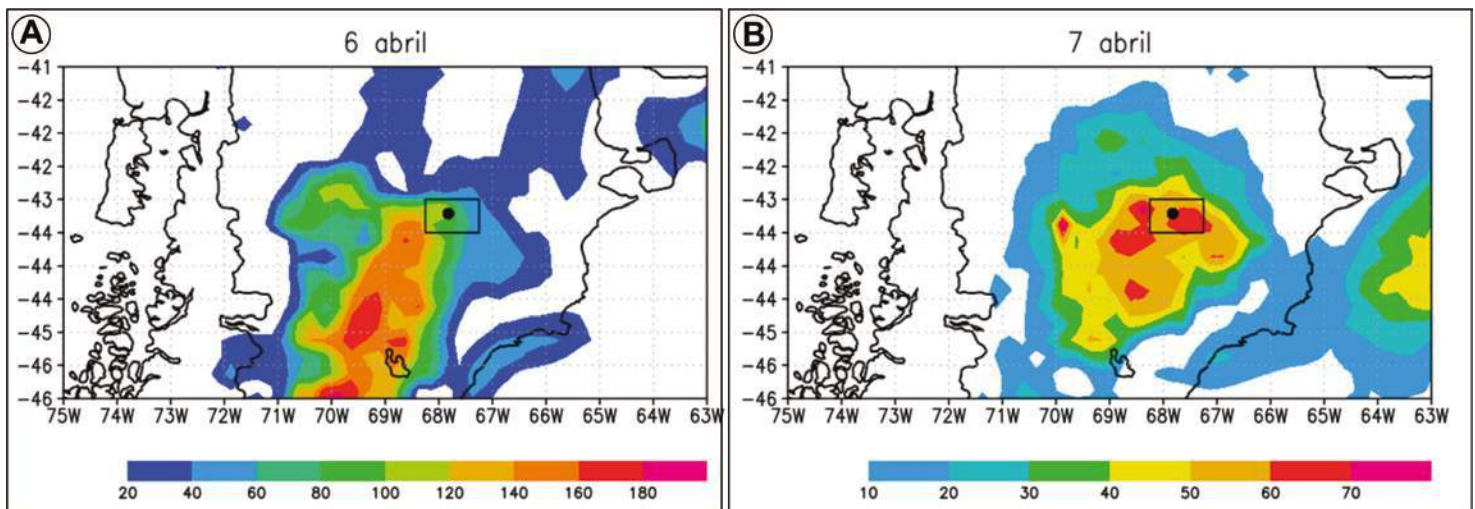


Figura 7. Campos reconstruidos de precipitación diaria a partir de la base GSMaP. Panel (A) valores acumulados correspondientes al día 6 de abril y panel (B) al día 7 de abril de 2017. El recuadro en negro indica el área considerada para obtener la intensidad horaria de precipitación en El Mirasol (punto negro).

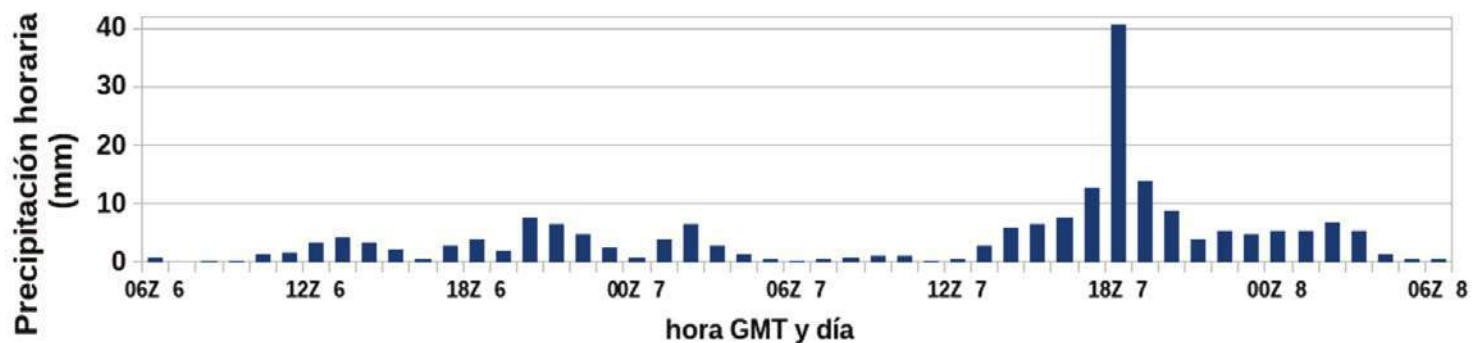


Figura 8. Intensidad de precipitación horaria en mm reconstruida sobre el área de la comuna rural El Mirasol a partir de la base GSMaP para los días 6 y 7 de abril. La intensidad máxima estimada fue de 40,4 mm/h a las 15:00 hora local.

ESTABLECIMIENTO	PP (MM)	OBSERVACIONES
Santa Juana	232	acumulado fin de marzo al 10 de abril
	160	en un día y medio mes de abril
El Picahueso	170	acumulado fin de marzo principios de abril
Huetelen	230	acumulado fin de marzo principios de abril
Don Rafael	260	acumulado fin de marzo principios de abril
	140	en un día y medio
Cerro Manquel	80	en un día
GSMAP	201	Mapas digitales 6/7 de abril
El Mirasol	170 - 180	Poblador local 6/7 de abril
Dique Ameghino	65	Hidroeléctrica Ameghino - 6/7 de abril
Sur de las Plumas	190	6/7 de abril

Tabla 1. Valores de precipitación aportados por la población rural en los alrededores de las cuencas de los arroyos Perdido y Salado y otras fuentes, y estimados a partir de la base GSMaP.

Resulta importante en estos estudios contar con registros de larga duración, caso contrario la comparación carece de relevancia. Otro aspecto importante es la calidad de la información. Por estos motivos hemos seleccionado la estación de Los Altares (Registros de lluvias diarias, período 1944-2017 de la estación ubicada en Los Altares. Datos disponibles en Base de Datos Hidrológica Integrada de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación). Cabe mencionar que dicha estación no se encuentra en la cuenca del Arroyo Perdido, sino que su emplazamiento está a 60 km de distancia del centro de la cuenca. Sin embargo, hemos considerado adecuado su empleo para los fines del presente estudio.

El primer aspecto que abordaremos es el de la precipitación anual. En la Figura 9 se muestra la variación a lo largo del tiempo de la lluvia registrada en Los Altares con un periodo anual. Resulta evidente que existe una gran variación entre años. Mientras que el valor medio de todo el periodo es de sólo 150 mm, el año más seco tuvo una precipitación de 43 mm y el más húmedo de 325 milímetros. En términos estadísticos esta variabilidad se caracteriza mediante el desvío estándar, que se calcula a partir de la diferencia entre los valores individuales y el promedio. Para el caso estudiado el desvío asciende a 64,8 milímetros.

Los datos mostrados en la Figura 9 tienen la particularidad de agruparse en proximidad del promedio y resultan raros los años muy húmedos o extremadamente secos. Johann Gauss, matemático alemán del siglo XVIII, propuso un modelo matemático para dar cuenta de este tipo de distribución que es muy usual en la naturaleza. En la Figura 10 se muestran los datos de precipitación anual y su frecuencia de ocurrencia en el periodo estudiado. La línea continua corresponde al modelo de Gauss aplicado a este caso. Este tipo de modelos nos permite realizar inferencias tales como establecer la probabilidad de que en un año se acumule una lluvia

igual o mayor que 260 mm (precipitación registrada en la Estancia Don Rafael). De la Figura 10 se sigue que para este valor existe una probabilidad del 4,5%.

Volviendo al evento de abril de 2017, los distintos establecimientos muestran que la lluvia diaria estuvo comprendida entre 70 y 100 milímetros. ¿Qué probabilidad hay de que ocurra tal intensidad de lluvia en un día? Para responder esta pregunta es necesario analizar una nueva serie de datos conformada por la precipitación máxima diaria de cada año. A este tipo de serie se lo conoce como “valores extremos” y no sigue el modelo formulado por Gauss. En cambio, uno de los modelos empleados es el desarrollado por el matemático alemán Emil Gumbel a mediados del siglo XX. En la Figura 10 se muestra la comparación entre la serie de 74 lluvias máximas diarias (período 1944-2016) con el modelo ajustado de Gumbel. Utilizando este modelo podemos inferir que

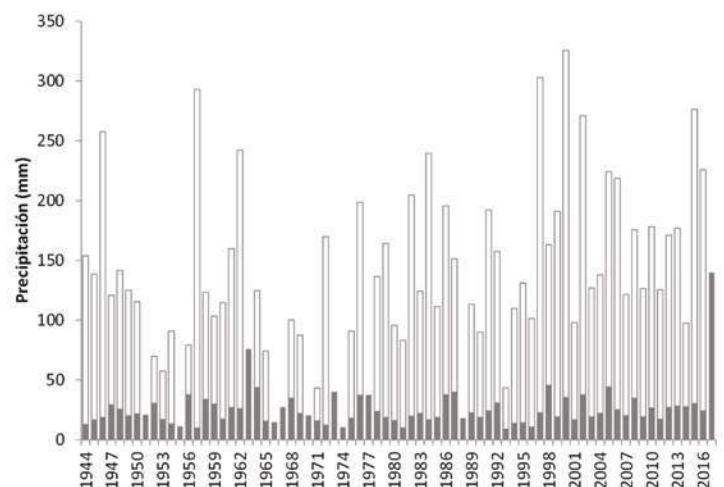


Figura 9. Variación de la lluvia anual (rectángulos blancos) medida en la Estación Los Altares durante el periodo 1944-2016. Se incluye además la precipitación máxima diaria de cada año (rectángulos grises) destacándose el evento del año 2017 (último a la derecha).

una lluvia de 70 mm tiene una probabilidad de ocurrir, o ser excedida, del 0,25% (o una posibilidad entre 400). Para la lluvia de 100 mm la probabilidad es aún menor y queda por fuera de las capacidades predictivas del método (la probabilidad equivale a lanzar una moneda 14 veces y que siempre caiga con la misma cara hacia arriba). En resumen, el evento ocurrido en la cuenca del Arroyo Perdido es de una excepcionalidad tal que su probabilidad es imposible de calcular en base a nuestros registros de lluvias de la zona.

RECONSTRUCCIÓN DE LAS CRECIDAS EN LOS ARROYOS PERDIDO Y SALADO

Habiendo analizado el evento desde el punto de vista hidrológico abordaremos ahora la respuesta de la cuenca que resulta de la combinación del factor lluvia y la geología. El caudal máximo que ocurrió durante la crecida en los arroyos Perdido y Salado fue estimado a partir de mediciones de campo de la geometría de los arroyos, de los niveles alcanzados por la crecida y empleando los principios de la hidráulica. En primer lugar, se definió un tramo para el estudio. En el caso del Arroyo Salado el tramo considerado se ubica aguas arriba de la Aldea Escolar de El Mirasol, ubicado en la latitud 43°13'11,87"S, y longitud 67°49'13,11"O. El tramo relevado tiene una longitud de 2000 m, con un ancho medio del valle de 500 m, mientras que el cauce principal del arroyo tiene un ancho variable entre 40 m y 100 m. Para el caso del Arroyo Perdido elegimos un tramo ubicado a 3 km aguas abajo del puente de la Ruta Provincial N° 59. El tramo tiene una longitud de 1110 m. El cauce del arroyo es muy ancho, alcanzando en algunos sectores los 300 metros.

Los relevamientos se realizaron empleando un equipo GPS de precisión. Se recorrió el arroyo transversalmente para tener la variación lateral del terreno. Este procedimiento se realizó varias veces, materializando así diferentes secciones

del arroyo a lo largo del tramo seleccionado. También se recolectaron muestras del material del lecho para caracterizar la rugosidad del cauce. Este aspecto es importante para estimar la resistencia al flujo.

Un aspecto importante del relevamiento fue la identificación de los niveles de crecida. Si bien a primera vista puede parecer simple, la tarea de reconocer el nivel que alcanzó la crecida, en campo es una actividad que puede resultar compleja. Durante el relevamiento topográfico se recorrió el área de estudio en proximidad al borde del cauce para medir la elevación de los relictos de la crecida. Se utilizaron tres tipos de indicadores: (i) nivel de los detritos flotantes, (ii) nivel de erosión marginal, y (iii) nivel de sedimentos finos (Fig. 11).

La información recopilada en campo se utilizó para simular la crecida empleando el programa HEC-RAS desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos (Brunner 2010). Se trata de un programa que resuelve las ecuaciones físicas que gobiernan el escurrimiento en canales y cursos naturales. Dada la geometría de un canal, el programa determina la profundidad del flujo, es decir el nivel que alcanza la crecida. Como el caudal no es conocido a priori, procedimos del siguiente modo: establecimos un rango posible para el caudal de acuerdo a la experiencia en esta temática. Luego, empleamos el programa y calculamos el nivel de la crecida para cada caudal elegido. El caudal correcto es aquel para el cual los niveles de la superficie libre calculada son similares a los observados en el campo.

La comparación entre niveles calculados y observados se aprecia en la Figura 12. Se trata del caso del Arroyo Salado para el cual se simulaban crecidas con caudales desde 650 m³/s hasta 1200 m³/s. Las mediciones en campo muestran una notable variabilidad, producto de la incertidumbre para

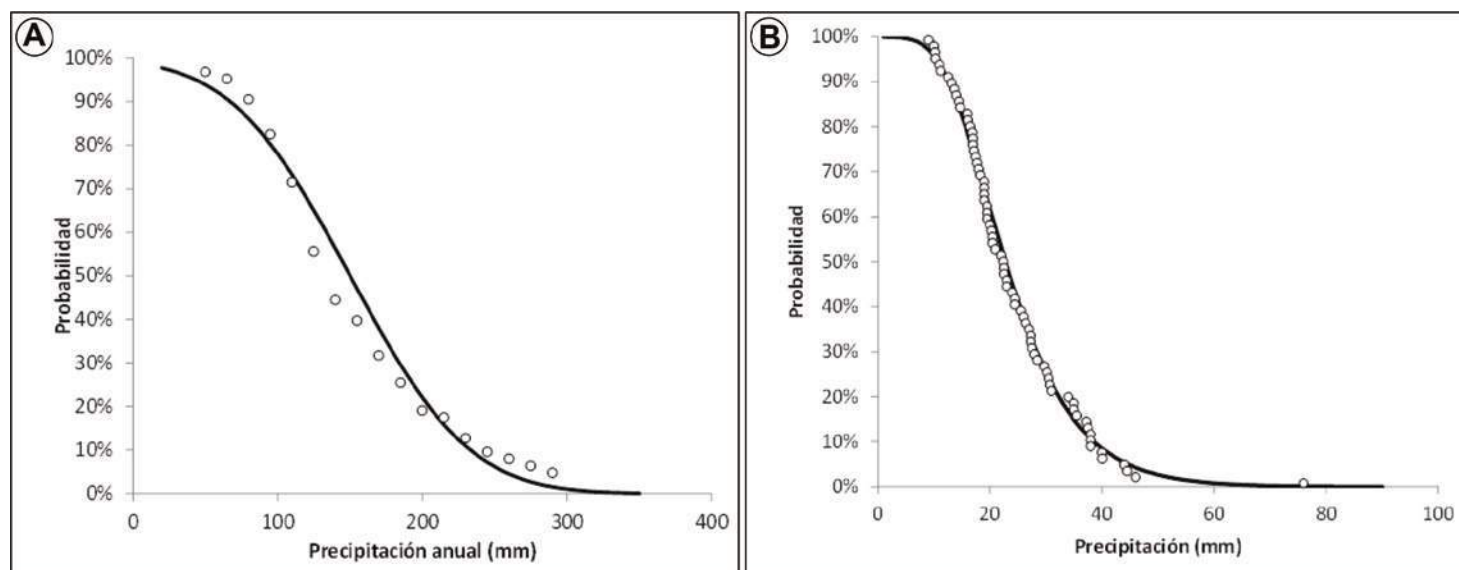


Figura 10. (A) Distribución de probabilidad de las lluvias anuales medidas en Los Altares. Los círculos corresponden a las mediciones del periodo 1944-2016 y la línea continua es el modelo matemático propuesto por Gauss. (B) Distribución de probabilidad de la precipitación máxima diaria registrada en Los Altares. Los círculos corresponden a las mediciones del periodo 1944-2016 y la línea continua es el modelo matemático propuesto por Gumbel.

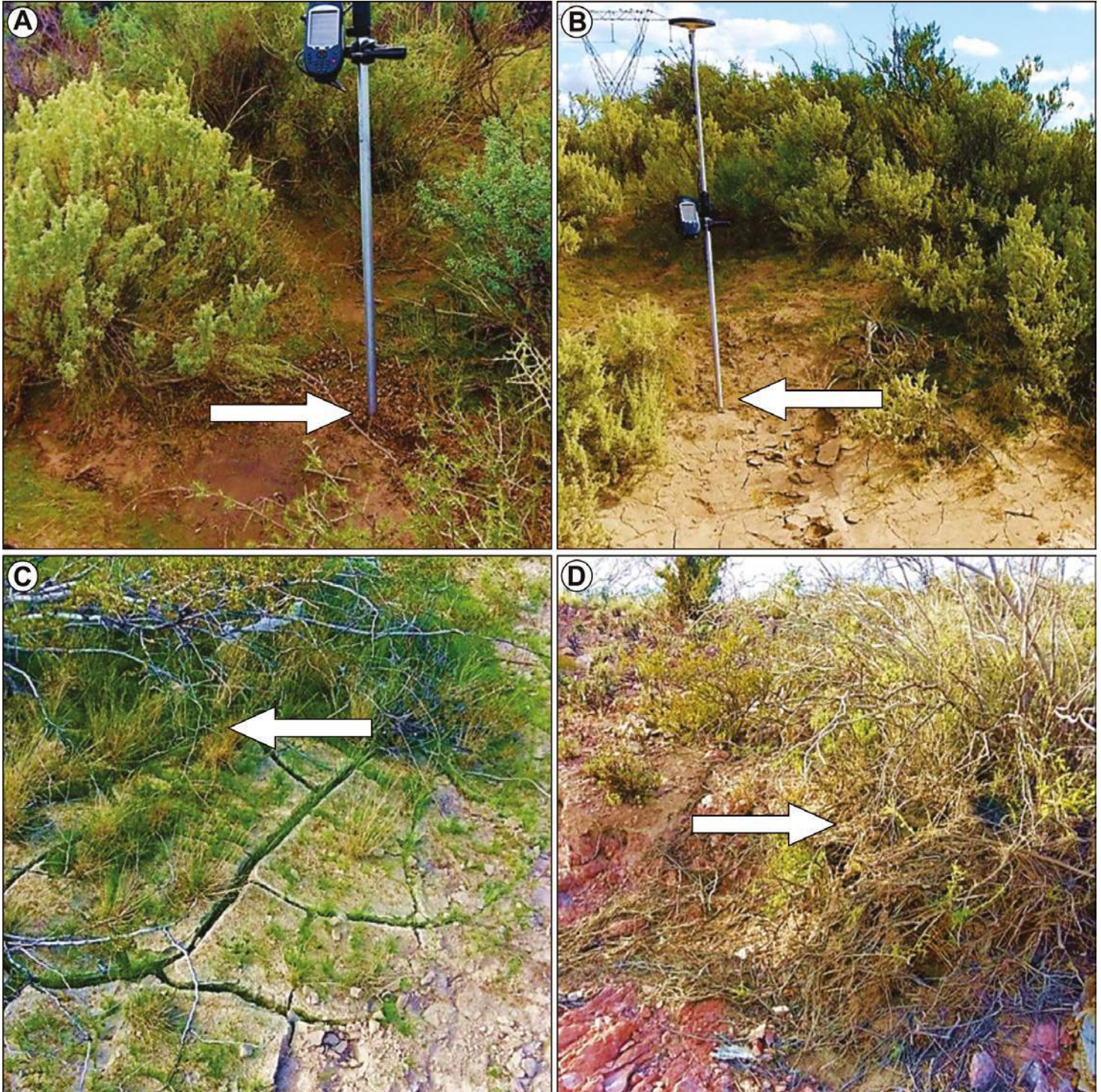


Figura 11. Ejemplos de identificación de niveles máximos alcanzado por la corriente: (A) restos pequeños de detritos vegetales acumulados en sectores de aguas tranquilas, (B) y (C) nivel alcanzado por los sedimentos finos, (d) detritos vegetales retenidos por arbustos.

definir el nivel de la crecida. Sin embargo, se detecta una clara tendencia y una buena concordancia global con el modelo matemático.

A fin de tener un criterio objetivo para seleccionar el caudal que mejor explica las mediciones de campo, procedimos a calcular la diferencia entre el nivel medido y el calculado (denominada “desvío”). El desvío es alto para caudales bajos y también para caudales altos. Esto se debe a que, en el

primer caso, el nivel calculado se ubica muy por debajo de los observados y entonces la diferencia es alta. En el caso contrario, cuando el caudal es alto, los niveles calculados sobrepasan a los observados. Entre estos dos extremos existe un caudal para el cual la diferencia es mínima (Kaless y Bastida 2018). Para el caso del Arroyo Salado, el caudal para el cual la predicción de niveles se acerca a las observaciones es de $1108 \text{ m}^3/\text{s}$. Para el Arroyo Perdido hemos estimado que la crecida tuvo un caudal máximo de $2060 \text{ m}^3/\text{s}$.

¿Qué representan estas cifras? Decir que en el evento de abril de 2017 la crecida en el Arroyo Salado tuvo una intensidad estimada de 1108 m³/s y en el Arroyo Perdido, una de 2060 m³/s requiere que sea contextualizado para apreciar su magnitud extraordinaria. La misma lluvia produjo una crecida en el Río Chubut cuyo caudal pico fue de 371 m³/s. De acuerdo al estudio de los caudales medidos en la estación de aforo de “Los Altares”, corresponde una probabilidad del 17% de que cada año se presente una crecida igual o superior. Por otro lado, en la misma estación se midió en el año 2004 una crecida con un caudal 841 m³/s, al que le corresponde una probabilidad aún más baja, de tan sólo 0,5%. Finalmente, la crecida extraordinaria en el Río Chico tuvo una intensidad máxima estimada en 667 m³/s aproximadamente. En todos los casos citados, el caudal es inferior al estimado para el Arroyo Salado y no alcanza ni a la mitad de la intensidad del evento del Arroyo Perdido. ¿Qué hubiese ocurrido si la tormenta que afectó a la Meseta Central se hubiese producido más al este, en el VIRCH, o más al sur, en la cuenca del Río Chico?

No responderemos aquí a este interrogante. Sin embargo, vale mencionar que la superficie de la cuenca ubicada entre el dique Florentino Ameghino y el VIRCH tiene la misma extensión que la cuenca del Arroyo Salado y que la cuenca del Río Chico es comparable a la cuenca del Arroyo Perdido. No resulta difícil imaginar escenarios similares y, por lo tanto, con consecuencias más severas a las vividas en el VIRCH en abril de 2017.

IMPACTOS DEL EVENTO

Los efectos de la tormenta se produjeron principalmente a través de procesos de erosión hídrica. Las rutas provinciales que cruzan la cuenca, tales como la ruta N°40, N°50 y N°59, se erosionaron principalmente en los lugares donde se combinaron alta pendiente y concentración del flujo. En la Figura 13a se muestra la formación de una cárcava de considerable tamaño a lo largo de una de las banquetas de la Ruta Provincial N°40. La destrucción generalizada de las rutas imposibilitó durante varias semanas la conexión terrestre con las comunidades de la meseta.

En las intersecciones de las vías de comunicación con los cursos de agua la erosión se intensificó en los terraplenes de aproximación. En el caso del Arroyo Ponte (ubicación en Fig. 4) la corriente erosionó el terraplén de la margen izquierda del puente, pero no alcanzó a cortar la calzada (Fig. 13B). En cambio, en el caso del Arroyo Perdido, la erosión avanzó hasta alcanzar el terraplén de la Ruta Provincial N°40 destruyendo el acceso sur al puente. En la Figura 13c se muestra una vista del puente del día 19 de abril cuando fue posible acceder al lugar. El puente tiene una luz libre de 85 m mientras que el cauce que labró la crecida se extiende a 400 m aproximadamente.

También se produjeron daños a las líneas de Alta Tensión de

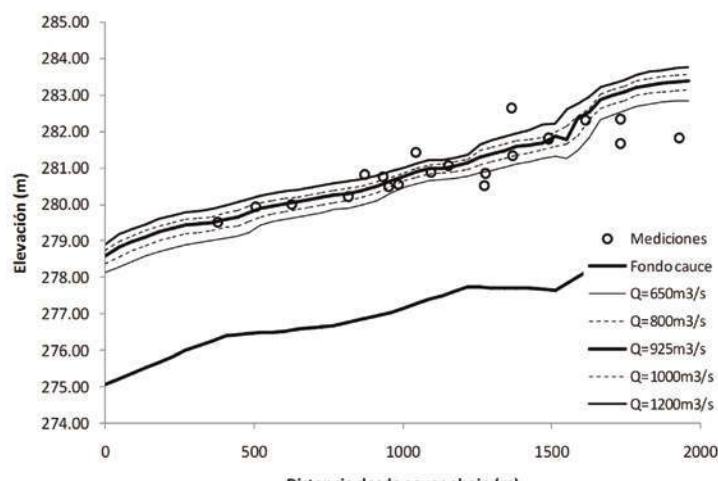


Figura 12. Comparación entre niveles de la crecida observados en campo (círculos blancos) con las predicciones del programa para distintas hipótesis de caudales.

330 KV. Se trata de dos líneas de alta tensión construidas junto con el Complejo Hidroeléctrico Futaleufú en la década de 1970 para abastecer de energía eléctrica a las instalaciones de Aluar. La línea tiene una longitud de 550 km y cruza al Arroyo Salado a 13 km al noreste de El Mirasol. En el tramo próximo al cruce de las líneas, el arroyo produjo una avulsión, cortando una curva y rectificando su trazado. La profusa erosión de las márgenes asciende a 190.000 m³ en tan solo 2,6 km. La erosión lateral del arroyo produjo el colapso de la torre 887/N (Fig. 13D) que fue arrastrada 500 m corriente abajo y desencadenó un colapso en cadena: al caer esta torre produjo esfuerzos de tracción en las torres anterior y siguiente (886/N y 888/N, respectivamente) que finalmente cedieron y también fueron volcadas; a su vez, la caída de la torre 886/N repercutió en la torre 885/N derribándola, mientras que el colapso de la 888/N deformó sensiblemente la estructura de la 889/N pero sin llegar a lograr su colapso. En resumen, cuatro torres de la línea norte fueron derribadas y una resultó severamente deformada. Esto produjo el corte de la transmisión de energía por dicha línea. Con respecto a la línea paralela sur, la torre 885/S fue alcanzada por la corriente. Se produjo fuerte erosión localizada en las bases de la torre, pero no fue suficiente para producir el colapso.

Con respecto a la Aldea Escolar de El Mirasol, la corriente afectó a la infraestructura más próxima al cauce (Figuras 14A y 14B). Las viviendas ubicadas en la ladera oeste del valle se encuentran a suficiente altura para no ser alcanzadas por la corriente. Por el contrario, en las viviendas ubicadas en los sectores más bajos como así también en la escuela y puesto sanitario se produjo el ingreso de una mezcla de agua y sedimentos (Figuras 14C y 14D). En la comunidad de El Escorial, el arroyo Perdido inundó completamente su valle afectando a las viviendas ubicadas a cotas más bajas (Figuras 14E y 14F). La rotura de los caminos mantuvo aislados a los pobladores que, por iniciativa propia, trabajaron en la rehabilitación de las vías de comunicación (Figuras 14G y 14H).



Figura 13. (A) Desarrollo de erosión con formación de cárcava en la banquina de la Ruta Prov. N° 59, (B) erosión del terraplén de aproximación de margen izquierda del puente de la Ruta Prov. N° 59 sobre el Arroyo Ponte, (C) vista desde aguas abajo del puente de la R.P. N° 59 sobre el Arroyo Perdido, (D) Torre 887/N de la línea de alta tensión Futaleufú-Aluar que fue derribada por la corriente y arrastrada 500 metros, (E) vista desde aguas arriba de la torre 885/S con importante erosión de la fundación.

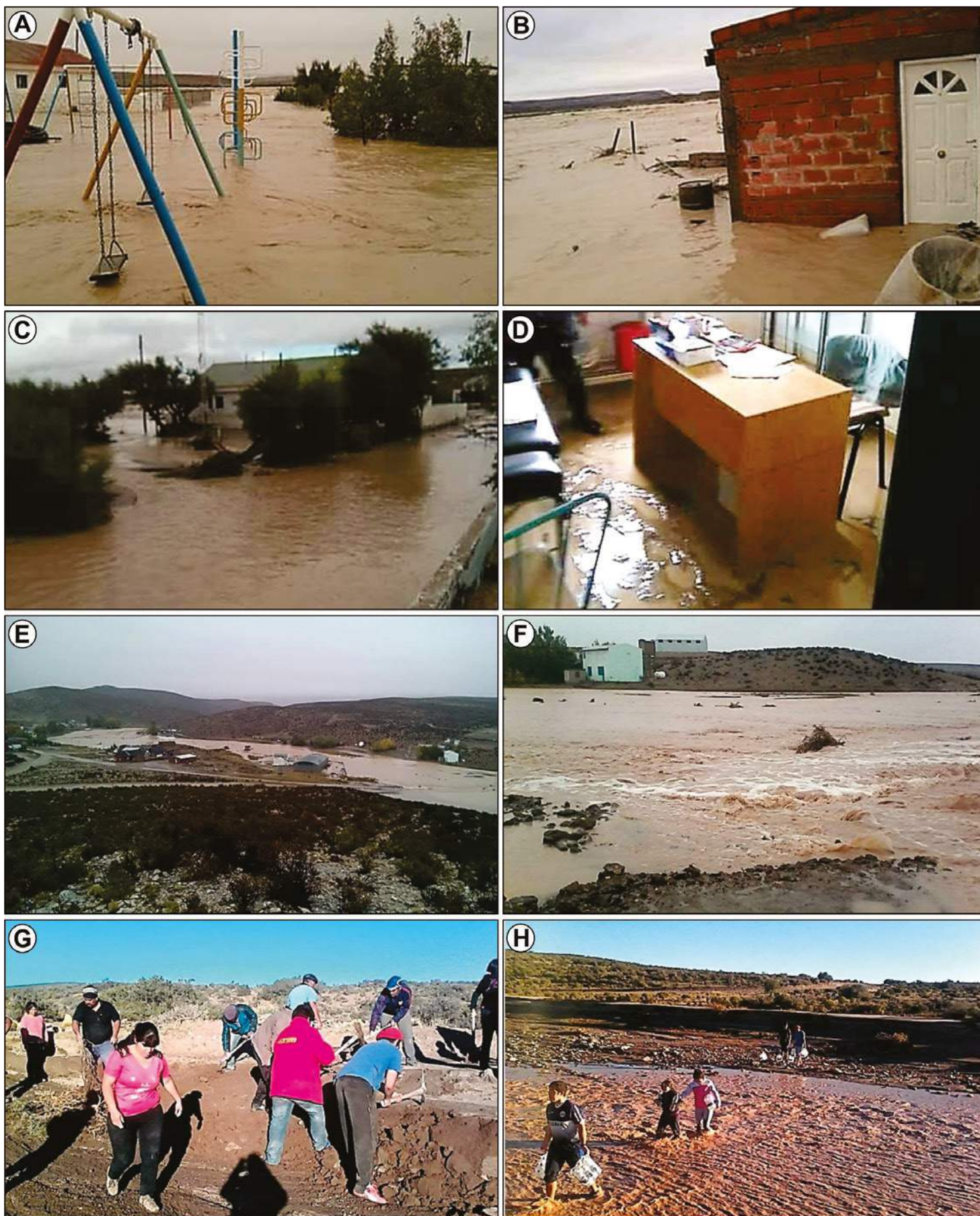


Figura 14. Impacto en las urbanizaciones. (A-B) Inundación de la Aldea El Mirasol por desborde del Arroyo Salado, (C) Vista de la Escuela N° 118, (D) ingreso de agua y sedimentos en el puesto sanitario de la aldea (Fotos, gentileza de Carola Jones). (E-H) Inundación en la comuna de El Escorial: (e) vista general del valle, (F) vista particular del valle inundado, (G-H) pobladores de El Escorial arreglando la R.P. N° 58 para hacerse de las provisiones de agua que les dejaban del otro lado del arroyo (Fotos, gentileza Jaquelin Pallacura).

CONCLUSIONES

En un periodo de solamente dos semanas, entre fines de marzo a principios de abril del 2017, se produjeron dos eventos meteorológicos de intensidades inusuales. El primer evento afectó la zona sureste de la provincia del Chubut cobrando notoriedad por la situación de catástrofe producida en la ciudad de Comodoro Rivadavia. Los ecos de este evento se sintieron en el Valle Inferior del Río Chubut cuando la onda de turbiedad transportada por el Río Chico y Chubut impidió la potabilización, privando de agua potable a la población valletana por cerca de dos semanas. En resumen, gran parte de la población chubutense se vio afectada. Seguidamente, ocurrió un evento de intensidad semejante en la zona de la Meseta Central. A diferencia del precedente, debido a la baja densidad poblacional en esta región los daños, el impacto social y económico fueron menores. En este capítulo hemos

analizado el evento para visibilizarlo y alertar sobre la ocurrencia de otros igualmente severos en la Provincia del Chubut y en la región patagónica en general.

El análisis estadístico muestra que la probabilidad del evento fue excepcionalmente baja. Los caudales estimados mediante relevamientos post-evento arrojan valores altísimos. Para el Arroyo Salado se ha estimado un caudal de 1108 m³/s (aguas arriba de El Mirasol, en correspondencia con el cruce de las líneas de alta tensión - 330 KV) y 2060 m³/s para el Arroyo Perdido a la altura del puente de la Ruta Provincial N°59. Los daños producidos por erosión hídrica se concentraron en la infraestructura vial, inhabilitando puentes y caminos, y en la línea de alta tensión, derribando varias torres. La crecida inundó varias viviendas de El Mirasol y mantuvo aislados a los pobladores de la Meseta Central.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- ▶ **Anselmi, G., Gamba, M.T., Panza, J. y Ardolino, A., 2004.** Hoja Geológica 4369-IV - Los Altares. Boletín 313, Servicio Geológico Minero Argentino.
- ▶ **Brunner, G., 2010.** HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC).
- ▶ **Chow, V.T., Maidment, D. y Mays, H. 1994.** Hidrología aplicada. McGraw-Hill. Colombia.
- ▶ **Kaless, G. y Bastida, R., 2018.** 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, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (en impresión).
- ▶ **Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R. y Joseph, D., 1996.** The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77: 437-470.
- ▶ **Okamoto, T., Iguchi, N., Takahashi, K., Iwanami, T. y Ushio, K., 2005.** The Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) project, 25th IGARSS Proceedings, pp. 3414-3416.
- ▶ **Paredes, J.M., Ocampo, S.M., Foix, N., Olazábal, S.X., Fernández, M.A., Montes, A., Castro, I., Maza, W., Allard, J.O., Rodríguez, S., San Martín, C., Simeoni, A., Mendos, G., Quagliano, J.A., Turra, J.M., Maino, J., Sánchez, F. y Valle, M.N., 2017.** Sistemas fluviales efímeros e inundaciones repentinas de la ciudad de Comodoro Rivadavia: causas, procesos y mitigaciones. Informe Técnico FCNyCS (Res. DFCNyCS 387/17). UNPSJB, p. 1-44. Comodoro Rivadavia.
- ▶ **Pinheiro, H.R., Hodges, K.I., Gan, M.A. y Ferreira, N.J., 2017.** A new perspective of the climatological features of upper-level cut-off lows in the Southern Hemisphere. Climate Dynamics, 48 (1): 541-559.
- ▶ **Silva Nieto D., Márquez, D.G., Ardolino, A. y Franchi, A., 2005.** Hoja geológica 4369-III - Paso de Indios. Boletín 267, Servicio Geológico Minero Argentino.