

## RIESGO DE CRECIDA POR ROMPIMIENTO DE DIQUES DE HIELO EN LA CUENCA DEL PLOMO, ANDES CENTRALES (33° S): PERSPECTIVAS A PARTIR DE EVENTOS HISTÓRICOS

M. CORREAS-GONZALEZ<sup>1\*</sup>, S.M. MOREIRAS<sup>1,2</sup>,  
V. JOMELLI<sup>3</sup>, G. ARNAUD-FASSETTA<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA) – Centro Científico Tecnológico (CCT), CONICET, Avda. Ruiz Leal s/n. Parque General San Martín, CP 5500, Mendoza, Argentina.

<sup>2</sup>Departamento de Agrícola Aplicada, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo, Almirante Brown 500, M5528AHB Chacras de Coria-Luján de Cuyo, Mendoza, Argentina.

<sup>3</sup>Laboratoire de Géographie Physique – CNRS (UMR 8591), Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne 1, Place Aristide Briand, 92195 Meudon, Francia.

<sup>4</sup>Laboratoire PRODIG – CNRS (UMR 8586), UFR Géographie, Histoire, Économie et Sociétés, Université de Paris, 5 rue Thomas Mann, 75205 Paris, Cedex 13, Francia.

**RESUMEN.** *Las regiones montañosas son altamente sensibles a los cambios climáticos actuales, afectando los procesos naturales y los peligros asociados (i.e. retroceso glaciar, desestabilización de laderas, formación y/o agrandamiento de lagos proglaciares). Destacan entre estos eventos las crecidas abruptas producto del colapso de diques de hielo glaciar, conocidas por su acrónimo en inglés como IDLOF (Ice-Dammed Lake Outburst Flood), que implican un gran impacto socioeconómico debido a su alto poder destructivo. Frente a los pronósticos de aumento en frecuencia e intensidad de eventos potencialmente peligrosos, se hace necesario el análisis del riesgo al cual están expuestas las comunidades locales. El objetivo de esta investigación fue evaluar la peligrosidad, vulnerabilidad y el riesgo de IDLOF en los valles de los ríos Plomo y Mendoza en escenarios actuales. Para ello analizamos diferentes eventos IDLOF ocurridos en el río Plomo que fue represado en al menos tres ocasiones por el glaciar en surge Grande del Nevado del Plomo (GNP) produciendo seis crecidas en el período 1788-2018. Casi un siglo después del evento más catastrófico ocurrido en 1934, han tenido lugar grandes cambios en la ocupación y usos del suelo del valle del río Mendoza, exponiendo nuevos elementos vulnerables a los peligros naturales de la región. Nuestros resultados evidencian un mayor grado de riesgo debido al aumento de la vulnerabilidad como consecuencia de una mayor exposición del hábitat asociado principalmente a la creciente actividad turística y nuevos usos*

*del suelo. Esto pone de manifiesto la necesidad urgente de implementar medidas de ordenación territorial en las regiones andinas.*

***Ice-dammed lake outburst flood risk in the Plomo basin, Central Andes (33° S): Perspectives from historical events***

**ABSTRACT.** *High mountain regions are extremely sensitive to current climate change affecting natural processes and related hazards (i.e. glacier retreat, slope instability, formation and enlargement of proglacial lakes). Ice-Dammed Lake Outburst Floods (IDLOFs) are highlighted among these phenomena and reach a greater socio-economic impact due to their highly destructive power. Facing on forecasting of more frequency and intensity of dangerous events, risk analysis of communities exposed is required. The purpose of this research was to assess the hazard, vulnerability, and risk against IDLOF in the Plomo and Mendoza valleys in current scenarios. We analyze historical IDLOF events occurred in the Plomo River that was dammed at least three times by surges of the Grande del Nevado del Plomo glacier (GNP) generating six outburst floods in the 1788 - 2018 period. Almost one century after the most catastrophic event in 1934, many changes in land usage and occupation along the Mendoza valley have occurred, exposing new vulnerable elements to natural hazards in this area. Our findings show a greater risk mainly due to higher vulnerability as a consequence of higher habitat exposition associated with increasing tourist activity and land-use changes. This fact exposes an urgent necessity of land-use planning in Andean regions.*

**Palabras clave:** diques de hielo, crecidas abruptas, riesgos naturales, mapa de riesgos, Andes Centrales.

**Key words:** Ice-dam, outburst floods, natural risks, risk mapping, Central Andes.

Recibido: 17 Abril 2019

Aceptado: 28 Octubre 2019

\*Correspondencia: Mariana Correas González, Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA) – Centro Científico Tecnológico (CCT), CONICET, Avda. Ruiz Leal s/n, Parque General San Martín, CP 5500 Mendoza, Argentina. Email: mcorreas@mendoza-conicet.gob.ar

## **1. Introducción**

Las crecidas abruptas por colapso de lagos de origen proglaciar (*Glacial Lake Outburst Flood - GLOF*) implican la liberación repentina de enormes cantidades de agua sin importar la causa, mecanismo de rotura del represamiento o el tipo de lago implicado (Evans y Clague, 1994) constituyendo una de las principales amenazas naturales que afectan a las montañas englazadas del mundo (Evans y Clague, 1994; Clague *et al.*, 2012; Iribarren Anaconda *et al.*, 2015; Wilson *et al.*, 2018). A su vez, se pueden distinguir

los IDLOFs (*Ice-Dammed Lake Outburst Flood*) asociados a las crecidas originadas por el colapso de lagos sub, intra, supraglaciares o represados por el glaciar (Clague y Mathews, 1973; Korup y Tweed, 2007; Rojas *et al.*, 2014). Los lagos proglaciares pueden formarse en valles montañosos marcados por el retroceso glaciar a partir de la acumulación de agua detrás de una morrena o en las depresiones excavadas por los glaciares o bien detrás de diferentes elementos que obstruyan un curso de agua tales como deslizamientos o glaciares tipo *surge* (Costa y Schuster, 1988; Korup y Tweed, 2007; Carrivick y Tweed, 2013).

Son múltiples las razones que hacen de este tipo de crecidas eventos potencialmente peligrosos. En general, los GLOFs e IDLOFs implican caudales de uno o más órdenes de magnitud que las crecidas resultantes de precipitaciones intensas y la onda de crecida generada, de varios metros de alto, puede desplazarse a velocidades de 20 a 30 km/h dependiendo del volumen de agua drenado, el mecanismo de rotura del represamiento y la topografía aguas abajo (Costa y Schuster, 1988; Clague *et al.*, 2012). A su vez, la crecida produce un intenso proceso de erosión y transporte de sedimentos (Breien *et al.*, 2008) capaz de transformarse en un flujo de derrubios potencialmente catastrófico (Clague *et al.*, 2012). Por otra parte, el número creciente de habitantes y actividades (*i.e.* turismo, generación hidroeléctrica, minería) emplazadas en las zonas de alta montaña, aumenta la exposición de elementos vulnerables a estos peligros (Kääb *et al.*, 2005) creando nuevas y/o más graves situaciones de riesgo.

En el contexto del calentamiento global actual, marcado por una mayor retracción y adelgazamiento de los glaciares, un incremento en la formación y/o agrandamiento de lagos glaciares en regiones montañosas en descongelamiento es esperable (Kääb *et al.*, 2005; Frey *et al.*, 2010; Carrivick y Tweed, 2013; Emmer *et al.*, 2014; Wilson *et al.*, 2018). En los Andes Centrales se ha constatado un fuerte retroceso glaciar (Cobos y Boninsegna, 1983; Espizúa, 1986; Cobos, 2002; Leiva, 2002) implicando una mayor desestabilización de laderas y la formación y/o agrandamiento de lagos proglaciares (Iribarren Anacona *et al.*, 2015; Wilson *et al.*, 2018). De hecho, según Iribarren Anacona *et al.* (2015) al menos 100 GLOFs han ocurrido en 31 lagos entre 1780 y el presente en los Andes Extratropicales. Esta nueva realidad enfatiza la necesidad de desarrollar más estudios sobre riesgos naturales. En general, dichos estudios han estado centrados en la evaluación de la peligrosidad (Leone y Vinet, 2006), subestimando la vulnerabilidad, o bien carecen de mediciones integrales de dicha dimensión que incluyan tanto la vulnerabilidad física como social (Hegglin y Huggel, 2008). Es el caso del tratamiento del riesgo de GLOF e IDLOF en el valle del río Mendoza, donde los estudios han abordado las causas del represamiento (King, 1934; Helbling, 1935; Razza, 1935; Prieto, 1986; Bruce *et al.*, 1987; Espizúa y Bengochea, 1990; Ferri Hidalgo *et al.*, 2012), las consecuencias del IDLOF (King, 1934; Prieto, 1986; Harrison *et al.*, 2015), y la peligrosidad a partir de la simulación de máximas crecidas posibles (Fernández *et al.*, 1991). Sin embargo, no se han abordado las dimensiones de la vulnerabilidad ni el riesgo frente a esta problemática. El objetivo de este estudio fue analizar el riesgo de IDLOF a lo largo del valle del río Mendoza basado en la ocurrencia de eventos históricos causados por el represamiento del río Plomo debido al avance en *surge* del glaciar Grande del Nevado del Plomo.

## 2. Área de estudio y antecedentes de IDLOFs históricos

El área de estudio se extiende al noroeste de la provincia de Mendoza (Argentina), en los Andes Centrales, y a lo largo de los valles de los ríos Plomo, Tupungato y Mendoza. Abarca una extensión longitudinal de 150 km desde el lugar donde se forma el lago temporal del Plomo ( $33^{\circ} 07' 21''$  S y  $69^{\circ} 59' 25''$  W) hasta la localidad de Cacheuta (Fig. 1). La cuenca del río Plomo ( $33^{\circ}$ S) reviste especial interés ya que corresponde a la región glaciada más extensa de los Andes Centrales (Corte y Espizúa, 1981; Espizúa y Bengochea, 1990) donde se localizan dos glaciares con comportamiento de *surge*, el Grande del Juncal (GJ) y el Grande del Nevado del Plomo (GNP), capaces de represar el río Plomo y generar lagos proglaciares potencialmente peligrosos que podrían producir crecidas abruptas similares a las que ocurrieron en el pasado.

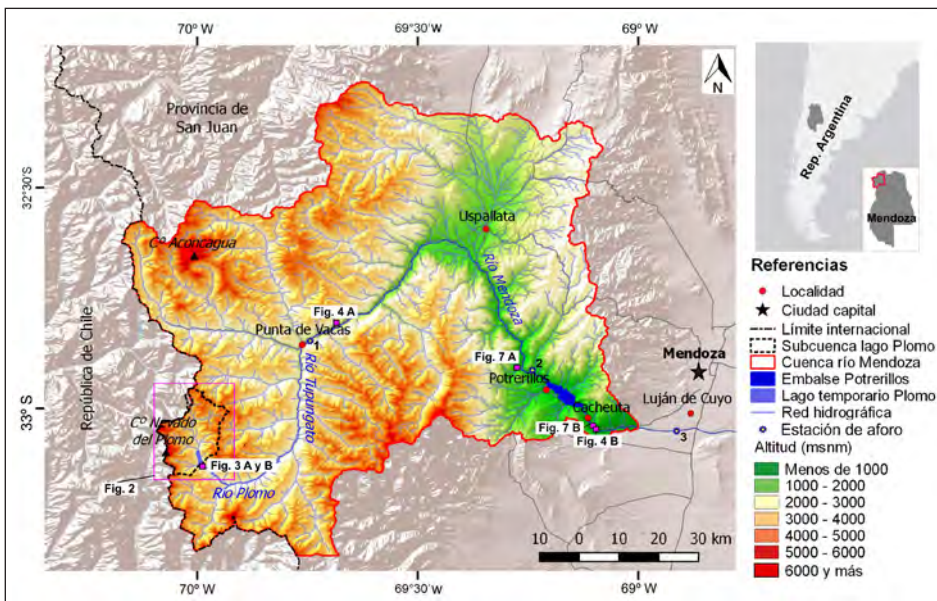


Figura 1. Mapa de riesgo de IDLOF en la subcuenca del río El Plomo, afluente del Tupungato, Mendoza.

Al menos seis eventos de IDLOFs se han producido en el río Plomo (Tabla 1), siendo el primer registro fehaciente el del 10 de enero de 1934. Esta crecida adquirió una magnitud catastrófica causando una veintena de víctimas mortales, interrumpió las comunicaciones por tierra con Chile y destruyó importantes infraestructuras (King, 1934; Diario Los Andes, 1934; Helbling, 1935). El volumen de agua liberado se estimó entre  $60 \times 10^6 \text{ m}^3$  (King, 1934) y  $54 \times 10^6 \text{ m}^3$  (Fernández *et al.*, 1991). Dado que se desconocía la causa de la crecida, denominada localmente “aluvión”, se envió una expedición con el fin de analizar el origen del mismo, y sus observaciones quedaron plasmadas en los informes de King (1934, 1935). Helbling (1935), quien había explorado la región entre los años 1908-1912 y generado una cartografía muy precisa a escala 1:25.000 del valle

Tabla 1. Avances extraordinarios del glaciar Grande del Nevado del Plomo e IDLOFs en la cuenca del río Mendoza entre 1786 y 2018.

Fecha	Características surge glaciar			Características lago temporal			Características IDLOF				Fuente
	Avance total (en m)	Tasa de avance (m d <sup>-1</sup> )	Dimensiones dique (a x h) (en m)	Lago glaciar	Largo x ancho (en m)	Volumen (x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	IDLOF	Fecha	Caudal pico (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Daños	
1786	S/d	S/d	S/d	✓	-	-	✓	22/01/1788	S/d	✓	Prieto (1986)*
1927?-34	900	25	600 x 80	✓	3.000 x 1.100	60	✓	10/01/1934	2887 <sup>^</sup> 3000 <sup>^^</sup>	✓	King (1934); Hebling (1935); Espizua (1986)
1962-74	1.200	S/d	-	✗	-	-	✓	16/01/1934	1350 <sup>^^</sup>	✗	Diario La Libertad (1934)
1984	2.500	16	-	✓	2.800 x 1.100	54,1	✓	14/02/1985	321 □; 337,5 □□	✗	Falaschi <i>et al.</i> , (2018)
	-	-	800 x 70	✓	S/d	21	✓	22/02/1985	172,6 □; 200,5 □□	✗	Bruce <i>et al.</i> (1987); Fernández <i>et al.</i> (1991); BDHI (2019); Pitte <i>et al.</i> (2016)
2007	3.000	35	600 x ?	✓	1.500 x 700	20	✓	13/03/1985	175 □; 162 □□	✗	Harrison <i>et al.</i> (2015); Pitte <i>et al.</i> (2016)

S/d: sin datos. \*inferido por datos históricos. ^ Caudal estimado en Punta de Vacas; ^^ Caudal estimado en el dique Cípolletti; □ Caudal medido en la estación de Punta de Vacas; □□ Caudal medido en la estación de Guido.

del Plomo (Helbling, 1919), coincidió con los mencionados informes. El aluvión había sido generado por el colapso de un lago represado por el glaciar GNP, que había avanzado unos 900 m desde su posición en 1909 hasta alcanzar Roca Pulida, bloqueando el valle principal (Fig. 2).

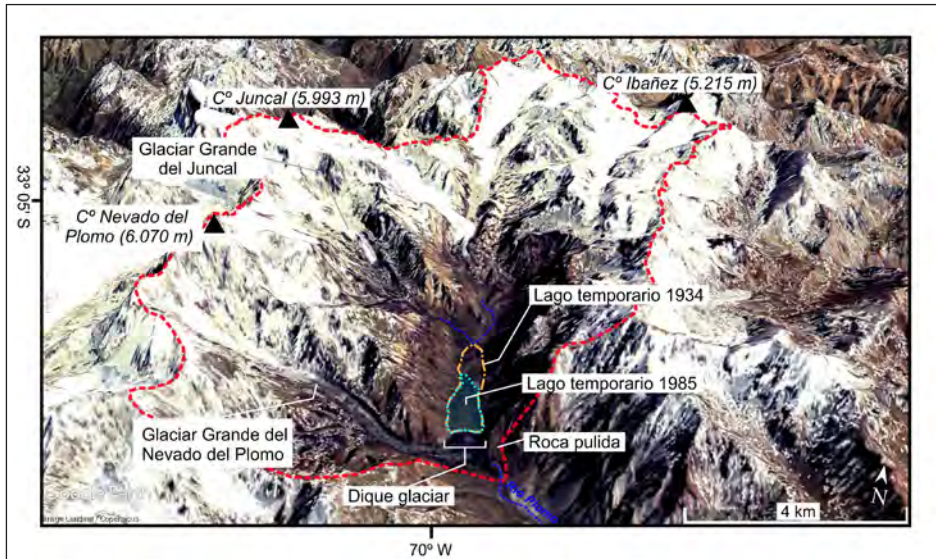


Figura 2. Imagen Landsat 5 TM (30/12/1984) que muestra el avance extraordinario del glaciar Grande del Nevado del Plomo por el valle tributario y el represamiento del río Plomo en el valle principal. El lago medía 1,8 km de largo por 700 m de ancho. En los días posteriores, siguió aumentando de tamaño y luego se vació en tres crecidas sucesivas en los meses de febrero y marzo. Imagen tomada de Google Earth.

La cuenca del Plomo tiene un relieve abrupto con grandes elevaciones como el Cerro Nevado del Plomo (6070 m s.n.m.) y el Cerro Juncal (5993 m s.n.m.) que han permitido la preservación de extensos glaciares, aunque presentan un importante retroceso de sus frentes constatado entre 1909 y 1974 (Espizúa, 1986). Más aún, según el último inventario de glaciares (IANIGLA-Inventario Nacional de Glaciares, 2018a, b, c y d) la superficie glaciada en la cuenca del río Mendoza experimentó una reducción de 11,6% respecto al área inventariada para 1981 (Corte y Espizúa, 1981). El río Plomo tiene un caudal medio en verano de  $9,2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  (en Fernández *et al.*, 1991) y junto con los ríos Santa Clara y Blanco conforman el río Tupungato con un caudal medio anual de  $23,52 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Éste último, es el principal afluente del río Mendoza (caudal medio anual de  $45,89 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) que abastece de agua dulce a 1,2 millones de habitantes en el Gran Mendoza (INDEC, 2019) y al oasis norte, polo de producción agrícola, vitivinícola e industrial del norte de la provincia. A lo largo del valle del río Mendoza, se localizan numerosos emprendimientos y actividades turísticas, funciona el embalse y la central hidroeléctrica Potrerillos y se emplaza la ruta nacional N° 7 y corredor bioceánico central que conecta Buenos Aires-Valparaíso, por el que circulan 2,3 millones de personas al año (BID, 2010).

Este segmento de los Andes Centrales se caracteriza por un clima árido. La temperatura media del mes más cálido (enero) oscila entre 0° y 5° C en rangos altitudinales que van desde los 1550 m s.n.m. a 3200 m s.n.m., aunque los registros son escasos debido a las limitadas estaciones meteorológicas ubicadas a lo largo del valle del río Mendoza. La Cordillera de Los Andes actúa como barrera orográfica a las masas de aire húmedas procedentes del Océano Pacífico, lo que genera un marcado gradiente de precipitaciones Oeste-Este que va de 500 mm anuales en el sector de la Cordillera Frontal hasta los 200 mm hacia el sector más oriental (Norte, 2002). Los caudales de los ríos están fuertemente vinculados a la acumulación de las nevadas invernales (Masiokas *et al.*, 2006) las cuales se ven afectadas por la Oscilación Sur El Niño (ENSO). Así, durante las fases cálidas del ENSO (El Niño) los caudales superan la media debido a mayores precipitaciones nivas durante el invierno (Masiokas *et al.*, 2013, Lauro *et al.*, 2019).

### 3. Materiales y métodos

La valoración del riesgo de IDLOF se realizó considerando datos de diversas fuentes de información. Se tuvieron en cuenta los informes previos (Tabla 2) y se revisaron los artículos de los periódicos locales de la época (Diario La Libertad, 1934; Diario Los Andes 1934, 1985). Posteriormente, se analizaron en ArcGis 10.2 imágenes satelitales ópticas de resolución y fechas variables existentes en la base de capas abiertas (*open layers plugging*) según disponibilidad en Google Earth (Imágenes CNES/Astrium 2016, CNES/Astrium 2013 y Landsat 2010). En el mencionado entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG) se digitalizaron los elementos expuestos o vulnerables (escala 1:15.000) considerando las infraestructuras ubicadas en la margen de los ríos Plomo, Tupungato y Mendoza. Se consideraron instalaciones críticas como carreteras y puentes, la localización de los centros poblados y de las superficies construidas, principalmente destinadas a actividades turísticas.

Tabla 2. Resumen de antecedentes y estudios previos en la cuenca del río Plomo.

Antecedentes y estudios previos en la cuenca del río Plomo	Fuente
1786: Exploradores de nuevas rutas a Chile avistaron un lago desde el paso Pircas (33° 15' S)	Prieto (1986)
1788: Una gran inundación que se habría originado en la laguna del Plomo afectó a la antigua ciudad de Mendoza.	
1909-1912: Primer relevamiento topográfico y fotogramétrico de la cuenca del río Tupungato.	Helbling (1919)
1919: Carta topográfica del río Plomo a escala 1:25.000	
10/01/1934: IDLOF catastrófico produjo cuantiosos daños y 20 víctimas mortales	Diario Los Andes (1934)
1934-1935: Se constató que la crecida abrupta del 10/01/1934 se produjo por el colapso de un dique de hielo formado por el glaciar GNP	King (1934, 1935), Helbling (1935) y Razza (1935)

Antecedentes y estudios previos en la cuenca del río Plomo	Fuente
1962-1974: Evidencias de un nuevo <i>surge</i> del glaciar GNP registradas en fotografías aéreas. No produjo represamiento del río Plomo	Espizúa y Bengochea (1990); Falaschi <i>et al.</i> (2018)
1981: Primer inventario de glaciares de la cuenca del río Mendoza relevó 647 km <sup>2</sup> de superficie cubierta por glaciares	Corte y Espizúa (1981)
Feb.-Mar. 1985: Nuevo <i>surge</i> y represamiento del río Plomo. Se produjeron 3 IDLOFs en los meses de febrero y marzo. Investigadores y técnicos midieron parámetros del lago y del dique de hielo	Bruce <i>et al.</i> (1987)
1986: Estudio de las fluctuaciones de los frentes de los glaciares de la cuenca del Plomo confirmó el retroceso generalizado de los glaciares desde 1909 y la existencia de dos glaciares tipo <i>surge</i> : el GNP y el GJ	Espizúa (1986)
1991: Simulación matemática de la crecida abrupta de 1985	Fernández <i>et al.</i> (1991)
2006: Nuevo <i>surge</i> y represamiento del río Plomo, formó un lago de pequeñas dimensiones y no generó IDLOF	Ferri Hidalgo <i>et al.</i> (2012), Harrison <i>et al.</i> (2015)
2018: Nuevo inventario de glaciares. La cuenca del Plomo alberga el 51% (292,32 km <sup>2</sup> ) de los glaciares de la cuenca del río Mendoza (572,14 km <sup>2</sup> )	IANIGLA-ING (2018)

Los parámetros morfométricos de la cuenca tales como área, pendiente y definición de la red hidrográfica se extrajeron de manera automática empleando las herramientas de análisis espacial (*spatial analyst tools*) en base al modelo digital de elevaciones MDE-Ar (45 m x 45 m) provisto por el Instituto Geográfico Nacional de Argentina (disponible en <http://www.ign.gov.ar>). Se empleó dicho modelo ya que presenta mejor correspondencia con las condiciones del territorio argentino que los modelos SRTM v4.1 y ASTER GDEM (IGN, 2014). Se delimitó también de manera manual la planicie de inundación del río para el posterior análisis de la vulnerabilidad a partir de la identificación de elementos expuestos.

Para el análisis del riesgo, se caracterizaron sus componentes amenaza y vulnerabilidad. Se entiende por amenaza natural a todo fenómeno de origen natural susceptible de producir víctimas mortales o heridos, daños a la propiedad y/o disrupción del normal funcionamiento de la vida de una sociedad (Rojas y Martínez, 2011). En este trabajo, definimos la amenaza a partir de las propiedades de los IDLOFs históricos teniendo en cuenta características vinculadas al fenómeno de *surge* glaciar, al lago proglaciar y a la crecida abrupta en sí. Estos datos permitieron precisar la magnitud de los eventos históricos estableciendo los escenarios conocidos (i.e. análisis retrospectivo) frente al potencial desarrollo de una nueva laguna y posterior IDLOF. Posteriormente, a la amenaza definida de manera cualitativa se le asignó un índice específico, que varía de bajo (1) a alto (3), considerando además otras variables como: la distancia con respecto al lago temporal, el ancho del lecho mayor del río y la llanura de inundación, la carga sedimentaria disponible y la posición en relación a otros cuerpos de agua (Tabla



3). Con todo ello se elaboró un mapa temático con la zonificación de la peligrosidad de IDLOF. Respecto a la definición del índice de peligrosidad (y de vulnerabilidad), cabe aclarar que, si bien la misma se realizó en base a los datos recabados sobre los IDLOFs históricos, las características geomorfológicas de la cuenca y de ocupación del valle, existe en la definición de los mismos una componente subjetiva apoyada en la opinión y experiencia de expertos. La dificultad de transformar variables cualitativas a cuantitativas es reconocida como un desafío a resolver, dado que implica la pérdida de información, así como también cierto grado de subjetividad (Hegglin y Huggel, 2008; Emmer y Vilímek, 2013). Sin embargo, esta conversión es necesaria para poder integrar las diferentes variables.

*Tabla 3. Índice y caracterización de peligrosidad del valle del río Mendoza frente al peligro de IDLOF en el río Plomo, afluente del río Tupungato. Mendoza.*

<b>Nivel de peligrosidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Índice</b>
Bajo	Zona localizada a más de 70 km del lago temporal del Plomo donde el lecho mayor del río sobrepasa los 400 m de ancho favoreciendo la disipación de la energía de la crecida y de la altura de la ola, con disponibilidad de material suelto susceptible de cargar el flujo con sedimentos.	1
Medio	Zona localizada a más de 100 km del lago temporal del Plomo donde el lecho mayor del río mide menos de 400 m de ancho favoreciendo la concentración de la energía de la crecida y el incremento de la altura de la ola, con disponibilidad de material suelto susceptible de cargar el flujo con sedimentos.	2
Alto	Zona localizada a menos de 70 km del lago temporal del Plomo donde el lecho mayor del río mide menos de 400 m de ancho favoreciendo la concentración de la energía de la crecida y el incremento de la altura de la ola, con disponibilidad de material suelto susceptible de cargar el flujo con sedimentos.	3
	Zona localizada a más de 100 km del lago temporal del Plomo y ocupada por el embalse Potrerillos (450 Hm <sup>3</sup> ) que, de ser alcanzado por un IDLOF, podría impactar en la estabilidad del dique con consecuencias graves para las poblaciones ubicadas aguas abajo.	3

Por otra parte, la vulnerabilidad entendida como la susceptibilidad de una comunidad y sus bienes a ser dañada por un fenómeno peligroso, es una dimensión del riesgo que depende tanto de la exposición (vulnerabilidad física) como de las condiciones sociales, económicas, culturales de la población (vulnerabilidad social) (Reghezza, 2006). En este trabajo contemplamos la vulnerabilidad asociada a la exposición ya que las construcciones ubicadas en la zona de estudio corresponden principalmente a hábitat de tipo temporal, vinculadas al turismo o al sistema de control aduanero (paso internacional). Se tuvieron en cuenta los siguientes elementos: localización y tamaño

de los centros poblados (exposición del hábitat); localización de instalaciones críticas tales como escuelas, centrales hidroeléctricas, trazado de carreteras y puentes (viales y ferroviarios); localización de infraestructuras turísticas y afluencia turística, y por último, el registro de daños producidos por el IDLOF de 1934. Se definió un índice de vulnerabilidad de manera cualitativa con una valoración numérica de 1 a 3 (Tabla 4) que sirvió de base para la elaboración de una zonificación de la vulnerabilidad frente a los IDLOFs.

*Tabla 4. Índice y evaluación de la vulnerabilidad del valle del río Mendoza frente al peligro de IDLOF en el río Plomo, afluente del río Tupungato. Mendoza.*

Nivel de vulnerabilidad	Descripción	Índice
<b>Bajo</b>	Zona sin hábitat permanente o población expuesta, con baja frecuentación turística y de montañistas y sin registro de daños a causa de la crecida abrupta de 1934.	1
<b>Medio</b>	Zona con hábitat temporal (complejos turísticos) en creciente desarrollo expuesto y fuerte frecuentación turística y de montañistas, que fue afectada gravemente por la crecida de 1934.	2
<b>Alto</b>	Zona con fuerte exposición de hábitat permanente y temporal (complejos turísticos y hotel), con importante frecuentación turística y de montañistas; infraestructura de gran envergadura expuesta (dique Potrerillos y central hidroeléctrica) localizada en la zona más gravemente afectada por la crecida de 1934.	3

La zonificación plasmada en los mapas temáticos de peligrosidad y vulnerabilidad se realizó por medio de la identificación de unidades espaciales homogéneas, esto es, zonas en las que se reconoce una continuidad de las características analizadas y que puede ser definida como una unidad de análisis y, en este caso, como una región con igual nivel de peligrosidad, vulnerabilidad o riesgo, según el caso. La valoración del riesgo se estableció a partir de la superposición de los mapas temáticos de peligrosidad y vulnerabilidad. De este modo se detectaron nuevas subunidades espaciales homogéneas que indican la coexistencia espacial de un nivel de peligrosidad y de vulnerabilidad específico en esa región (Tabla 5). El nivel o grado de riesgo se estableció en función de la Ecuación 1:

$$R_i = A_i \cdot V_i \quad (\text{Ec.1})$$

donde  $R_i$  (Riesgo) es el nivel de riesgo definido para un área siendo el producto entre el índice de peligrosidad ( $A_i$  -Amenaza o Peligro) y el índice de vulnerabilidad ( $V_i$  -Vulnerabilidad) en la misma zona. De esta manera, el riesgo final presenta valores que varían de 1 a 9 reinterpretados en una escala cualitativa de riesgo que varía de bajo a alto (Tabla 5).

Tabla 5. Caracterización y evaluación del riesgo de IDLOF en el valle del río Mendoza por colapso del lago temporal del río Plomo, afluente del Tupungato. Mendoza.

Nivel de riesgo	Descripción	Índice
<b>Bajo</b>	Zona localizada a más de 70 km del lago temporal del Plomo donde el lecho del río sobrepasa los 400 m de ancho favoreciendo la disipación de la energía de la crecida y de la altura de la ola y sin elementos expuestos (ni población ni infraestructura).	1
<b>Medio-Bajo</b>	Zona localizada a menos de 70 km del lago temporal del Plomo donde el lecho del río mide menos de 400 m de ancho favoreciendo la concentración de la energía de la crecida y de la altura de la ola y con una exposición mínima de elementos críticos dado que la población se emplaza sobre la terraza aluvial y hay baja actividad de montañistas.	2 y 3
<b>Medio-Alto</b>	Zona localizada a más de 100 km del lago temporal del Plomo donde el lecho del río mide menos de 400 m de ancho favoreciendo la concentración de la energía de la crecida y de la altura de la ola y con una exposición considerable de elementos críticos como consecuencia de la intensa frecuentación turística y de la existencia de infraestructuras viales expuestas, en coincidencia con las zonas más afectadas por el IDLOF de 1934 y con el área de mayor desarrollo de emprendimientos turísticos.	4 a 6
<b>Alto</b>	Zona localizada a más de 100 km del lago temporal del Plomo donde se ha construido un embalse (450 Hm <sup>3</sup> ) que podría sufrir una disfunción en caso de IDLOF. Aguas abajo del embalse se observa una fuerte exposición del hábitat como consecuencia del estrechamiento del valle y de una concentración media de población agravada por una intensa actividad turística y en coincidencia con la zona más gravemente afectada por el IDLOF de 1934.	9

## 4. Resultados

### 4.1. Inventario de surges, IDLOFs históricos, características y alcances

En un período de 230 años, el glaciar GNP produjo cinco avances extraordinarios represando el río Plomo en tres oportunidades que generaron seis IDLOFs de diferentes magnitudes y alcances, cuyas características quedan resumidas en la Tabla 1.

El primer registro que se tiene de un lago proglaciar en la cuenca del Plomo corresponde a 1786 cuando unos exploradores que buscaban nuevas rutas para cruzar a Chile divisaron desde el paso Pircas una gran laguna al fondo del valle (Prieto, 1986). Dos años más tarde se produjo una gran inundación que, según el relato de unos viajeros, se habría originado en la laguna del Plomo y descendió repentinamente por el valle, interrumpiendo las comunicaciones entre Mendoza y Chile. Este evento produjo daños en la primitiva ciudad de Mendoza, aunque no se registraron víctimas mortales (Prieto,

1986). Por su parte, Helbling (1935) había indicado un avance previo del GNP y un posible represamiento cuando analizó las morrenas que descendían por el valle del glaciar GNP hasta Roca Pulida, confirmando la existencia de otros avances en el pasado.

En los 150 años subsiguientes, no se documentaron crecidas asociadas a IDLOFs a lo largo del valle del Tupungato, posiblemente debido a lo incompleto de los registros o la inaccesibilidad de la zona. Posteriormente, un nuevo IDLOF afectó gravemente al valle del río Mendoza el 10 de enero de 1934. En un vuelo que se realizó en los días posteriores a la catástrofe se observó que la crecida se había generado tras el colapso de un dique de hielo (Fig. 3 A) localizado sobre el lecho del río Plomo (Diario La Libertad, 1934). Dos grandes sumideros (molinos glaciares) en la superficie glaciar de 60 m de diámetro por 5 m de profundidad indicarían que el techo del túnel colapsó por subsidencia, ocasionando la liberación súbita del agua con un caudal de salida estimado en  $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Helbling, 1935). Este mecanismo de colapso, es considerado el más peligroso ya que produce la liberación abrupta de grandes cantidades de agua en muy poco tiempo (Walder y Costa, 1996). Si bien se observaron siete niveles sucesivos de lago (Razza, 1935 y Reichert, 1957, en Espizúa, 1986) que indicarían que el mismo existió durante siete años, Helbling (1935) estableció una analogía con el *surge* del glaciar GJ de 1909-1910 y sugirió que el avance del glaciar GNP se habría producido de manera rápida en un lapso de algunas semanas a meses. Estas diferencias en las observaciones impiden establecer con exactitud cuándo se inició el *surge* que represó al río hasta enero de 1935. Por otra parte, en la localidad de Punta de Vacas se estimó que el caudal fue de  $2887 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  mientras que en Cipoletti (170 km aguas abajo del lago) se calculó un caudal de 3000 a  $3500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (King, 1934). Este incremento del caudal evidencia el poder de arrastre de estos procesos, que aumentan en volumen y carga sedimentaria a medida que se desplazan aguas abajo, erosionando las barrancas y márgenes del río (Breien *et al.*, 2008; Jacquet *et al.*, 2017). La existencia de un manto de derrubios, de 1,5 m de espesor, depositado en el lecho del río Plomo en los 4 km inmediatamente aguas abajo del dique (King, 1934) constata este poder de erosión y arrastre. Por otra parte, datos

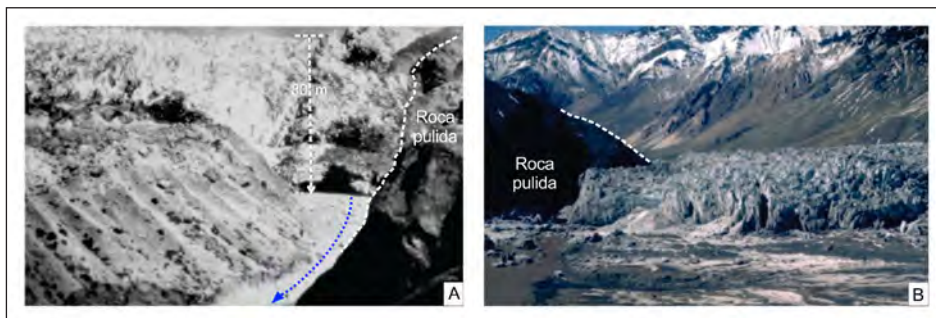


Figura 3. (A) Vista al norte del surge del glaciar GNP ocurrido en 1934. El glaciar descendiendo por el valle desde el oeste y su frente está cerca de Roca Pulida (a la derecha de la imagen). La línea punteada azul indica la dirección de salida del agua a través de un túnel subglaciar. (B) Vista hacia el sur del surge del glaciar GNP ocurrido en febrero de 1985. El río El Plomo fluye a través de un túnel en el glaciar junto a la Roca Pulida, que se encuentra a la izquierda de la imagen. Fotografías tomadas por (A) King, W.D.O. (1935) y (B) Haerberli, W., ambas en Harrison *et al.* (2015).

recogidos en periódicos de la época indican que la onda de crecida superó los 7 m de alto y se desplazaba a  $20 \text{ km h}^{-1}$ , alcanzando los 12 m de alto en el sector de Cacheuta donde se estrecha el cauce del río (Diario Los Andes, 1934). El registro de daños producidos incluyó la destrucción de la estación de trenes (Fig. 4 A), de la central hidroeléctrica y un hotel en Cacheuta (Fig. 4 B), la rotura de siete puentes y de 12 km de vías férreas en el sector entre Uspallata y Potrerillos y la muerte de al menos 18 personas (Diario Los Andes, 1934). Además, 75.000 Ha de cultivo quedaron sin riego por largo tiempo (Diario La Libertad, 1934). Los daños y pérdidas fueron estimados en seis millones de pesos argentinos (1934 USD\$  $\cong$  1.800.000).

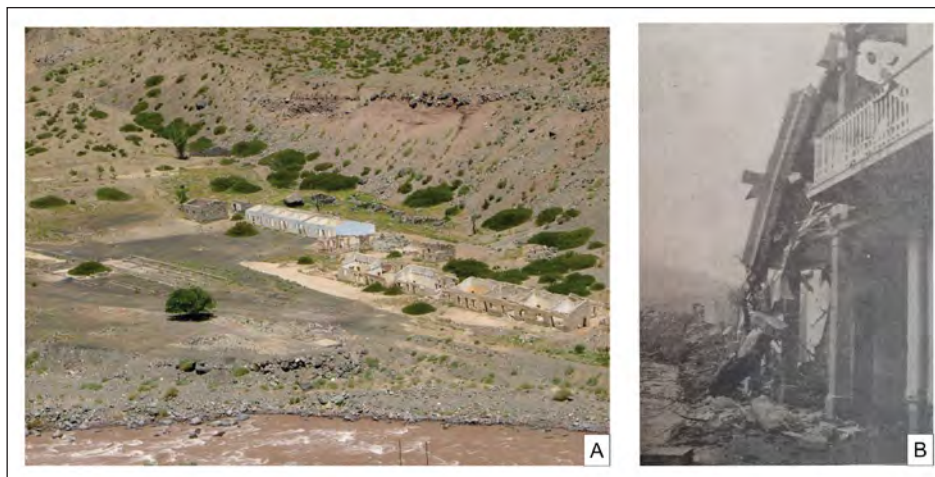


Figura 4. Daños ocasionados por el IDLOF del 10 de enero de 1934. (A). Fotografía tomada desde la ruta (RN 7) hacia el este donde se observan las ruinas de la estación de trenes, ubicada a 80 km del lago temporal. (B) Vista hacia el sur de los daños ocasionados en el hotel de Cacheuta, ubicado 150 km aguas abajo del lago temporal. Este sector del valle registró los mayores daños debido a la destrucción total de la central hidroeléctrica y del hotel y el registro de víctimas mortales.

En el verano de 1985 se produjeron tres IDLOFs del tipo progresivo (Haerberli, 1983) debido al vaciamiento paulatino de un nuevo represamiento que se formó en 1984 (Fig. 3 B). Los caudales pico registrados fueron de un orden superior al caudal normal del río Mendoza, pasando de  $45,89 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  a  $321 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ,  $172 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  y  $175 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  respectivamente, medidos en el aforo de Punta de Vacas. La detección de dichos caudales inusuales advirtió sobre la posibilidad de un nuevo represamiento (Bruce *et al.*, 1987). Por ello, el gobierno de la provincia de Mendoza encomendó al Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA) y a Agua y Energía Eléctrica, la realización de una campaña de exploración para estudiar este hecho. Así, en febrero de 1985 se confirmó la existencia de un nuevo lago temporal formado por el bloqueo del río Plomo, producto del *surge* del glaciar GNP. A partir de observaciones realizadas *in situ*, se estimó un volumen máximo del lago de  $55 \times 10^6 \text{ m}^3$ ; siendo el volumen almacenado en el momento de la medición de  $12,1 \times 10^6 \text{ m}^3$ ; en tanto que el caudal que se incorporaba

al lago era de  $11 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ; la tasa de aumento de la altura del lago era 7 cm por día; la altura del dique de hielo era 70 m y la diferencia de altura entre el nivel del agua en el momento de la medición, en relación al nivel máximo alcanzado, era de 39 m (Bruce *et al.*, 1987). De acuerdo con imágenes satelitales, el movimiento en *surge* del glaciar GNP debió comenzar entre febrero y abril de 1984 (fin del verano en el Hemisferio Sur) avanzando considerablemente durante ese invierno y represando al río Plomo después del 14 de Noviembre de 1984 hasta formar un lago de 1,65 km de largo por 600 m de ancho en sólo nueve días (Espizúa y Bengochea, 1990).

Un último *surge* se produjo en 2007, el cual generó un pequeño y efímero represamiento del río Plomo que duró nueve días (Ferri Hidalgo *et al.*, 2012). El agua drenó de manera gradual a través de un túnel subglaciar, impidiendo la formación de un lago de dimensiones considerables (Harrison *et al.*, 2015; Pitte *et al.*, 2016). Estudios recientes establecieron un período de quiescencia para el glaciar GNP de 20 a 30 años (Falaschi *et al.*, 2018), lo que indicaría una mayor frecuencia de eventos *surges* y mayor posibilidad de formación de un lago temporal en el futuro.

#### 4.2. Mapa de peligrosidad de IDLOF

El mapa de zonificación de peligrosidad de IDLOF a lo largo de los valles de los ríos Plomo, Tupungato y Mendoza (Fig. 5) muestra los sectores expuestos a distintos niveles de amenaza. Considerando que la amenaza disminuye con la distancia existente entre el lago represado y los elementos expuestos, se tomó este factor como una característica clave en la valoración de la peligrosidad ya que, *a priori*, a mayor proximidad al lago mayor es la exposición a la energía potencial de la crecida. A su vez, la altura de la onda de crecida es condicionada por el ancho del lecho mayor del río que contribuye a disipar o concentrar la altura de la crecida. Esto se ve en el sector de Cacheuta, donde si bien la distancia al lago temporal es de 150 km, el hecho de que el río se encajone en el valle, incide fuertemente en el grado de peligrosidad identificado para ese sector. Por otra parte, las crecidas abruptas tienen la capacidad de erosionar y transportar enormes cantidades de material suelto no consolidado pudiendo transformar la crecida original en un flujo hiperconcentrado o flujo de derrubios (Breien *et al.*, 2008) a la vez que incrementa varias veces el volumen total movilizado debido a su poder de arrastre. Sin embargo, esta característica debe ser matizada por las razones anteriormente mencionadas. Por otra parte, la presencia del dique y embalse Potrerillos aguas abajo, evidencia cierto peligro ya que podría comportarse como cuerpo de agua interconectado con el lago temporal del Plomo (Emmer y Vilímek, 2014). La estabilidad de esta represa se puede ver comprometida con un ingreso de agua masivo como el generado por el IDLOFs histórico del 1934. En ese caso, tanto el potencial colapso del dique Potrerillos como su disfuncionamiento ocasionarían graves consecuencias en la región.

#### 4.3. Mapa de vulnerabilidad frente a los IDLOFs

El mapa de vulnerabilidad frente a los IDLOFs zonifica el valle del río a partir de la ponderación de las zonas más gravemente afectadas durante el IDLOF de 1934 (Fig. 6). Si bien esta zona de alta montaña no se encuentra densamente poblada como otras

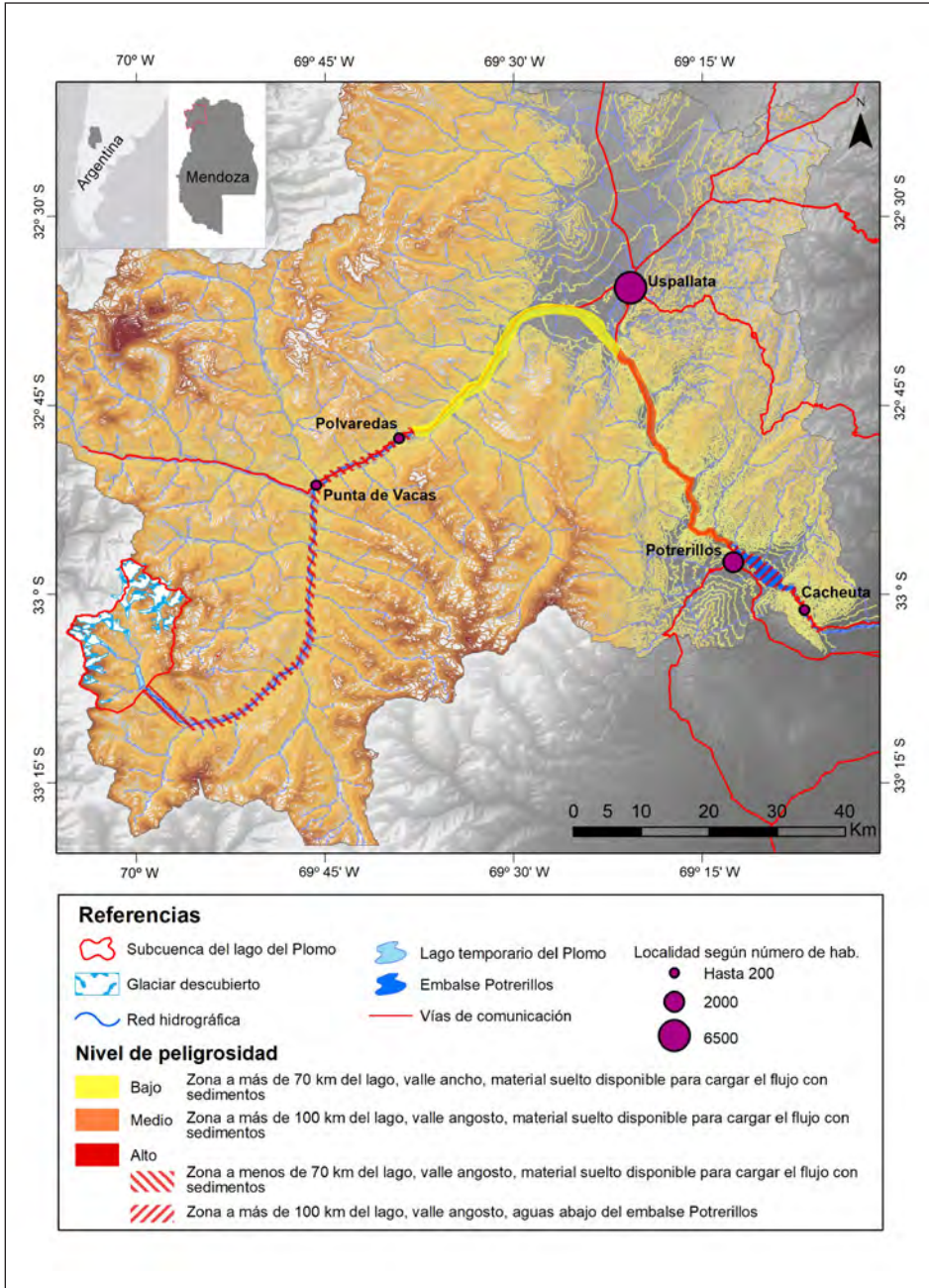


Figura. 5. Mapa de peligrosidad de IDLOF en la subcuenca del río El Plomo, afluente del Tupungato, Mendoza, Argentina.

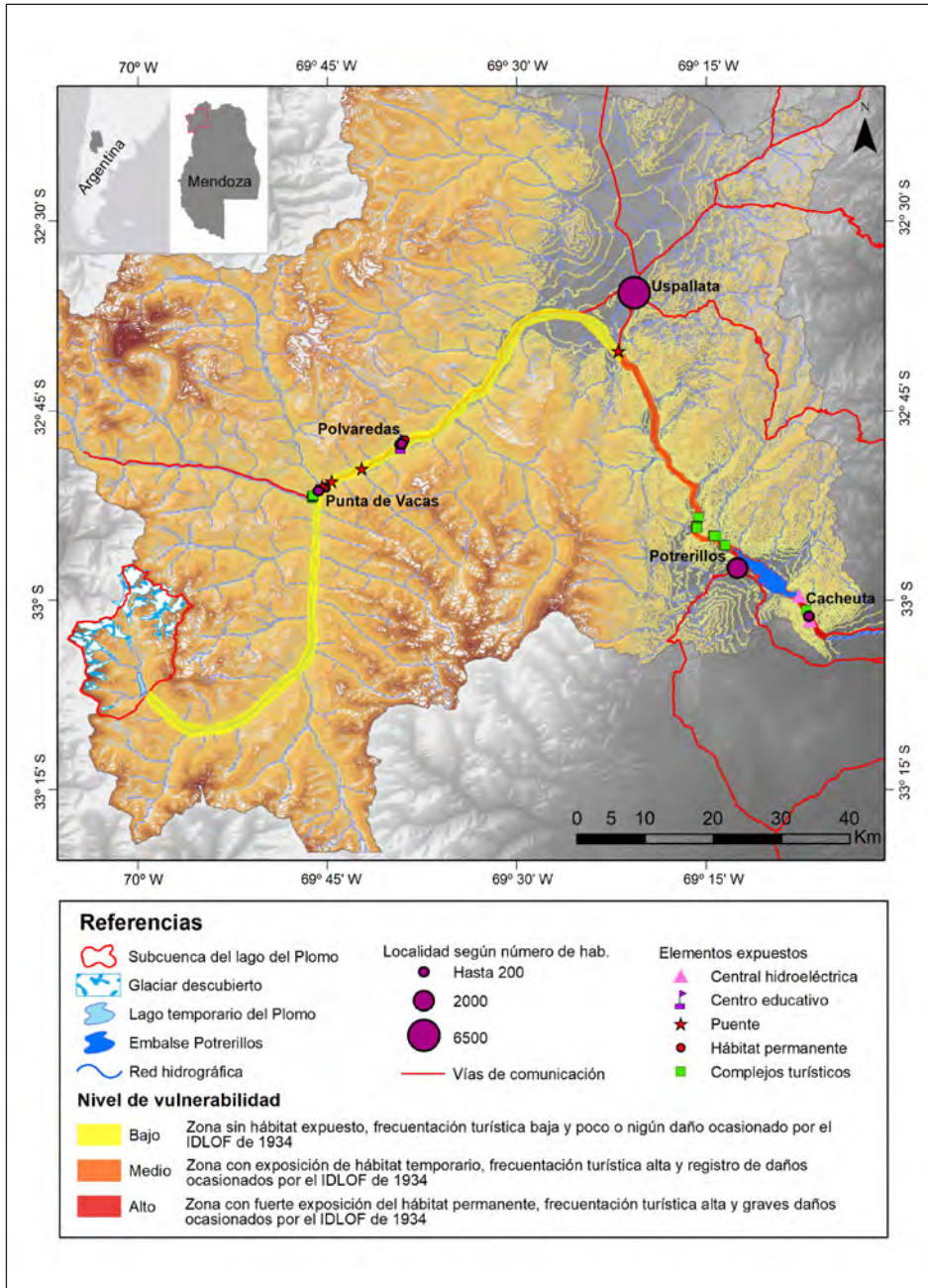


Figura 6. Mapa de vulnerabilidad frente a los IDLOF en la subcuenca del río El Plomo, afluente del Tupungato, Mendoza, Argentina.



regiones montañosas del mundo, destaca fundamentalmente la existencia de la ruta internacional N° 7, que conecta Argentina con Chile y constituye el único paso para vehículos de transporte de pasajeros y de cargas a lo largo de 800 km en la Cordillera de Los Andes. Dicha ruta concentra alrededor del 65 % del tráfico total terrestre entre ambos países, con un tránsito promedio diario anual de 3000 vehículos (Dirección Nacional de Vialidad, 2018) y un promedio mensual de 100.000 viajeros (Aduana Chilena, 2018). En cuanto a los centros poblados, existen tres pequeñas villas a lo largo del valle del río Mendoza: Punta de Vacas, Polvaredas y Cacheuta, con 50 a 150 habitantes. Potrerillos cuenta con 2000 habitantes y la ciudad de Uspallata tiene más de 5600 habitantes (INDEC, 2019). Todas ellas están ubicadas fuera de la llanura de inundación del río; sin embargo, existen nuevos elementos a considerar en el análisis de la vulnerabilidad tales como complejos turísticos y de deportes de aventura instalados en las riberas del río Mendoza (Fig. 7 A y B) así como también en las márgenes del embalse Potrerillos, lugar que reúne a miles de turistas durante los meses cálidos. Estas consideraciones respecto a la alta ocupación y tránsito temporal del valle contrarrestan el hecho de que el mismo presente una baja densidad de población asociada al hábitat permanente, elevando la vulnerabilidad de la población.



*Figura 7. Nuevos elementos expuestos al peligro de crecida abrupta: (A) Vista hacia el norte del valle del río Mendoza. Se observa un complejo turístico emplazado en la planicie de inundación del río. Foto tomada por Villarreal, R. (B) Vista hacia el norte de las instalaciones del nuevo hotel termal Cacheuta, emplazadas en el mismo lugar que fuera devastado por la crecida de 1934. Obsérvese cómo se encajona el río.*

Por otra parte, actualmente no existe un sistema de alerta temprana que advierta sobre la presencia de un nuevo lago y sólo existe un monitoreo del caudal del río Tupungato en la estación de aforo de Punta de Vacas, ubicada 51 km aguas abajo del glaciar del Plomo. De hecho, aumentos inusuales del caudal advirtieron las crecidas de 1985 (Bruce *et al.*, 1987). Si bien se realiza el análisis periódico de imágenes satelitales, son comunes condiciones de alta nubosidad en la zona que limitan la identificación de un nuevo *surge* y/o la formación del lago.

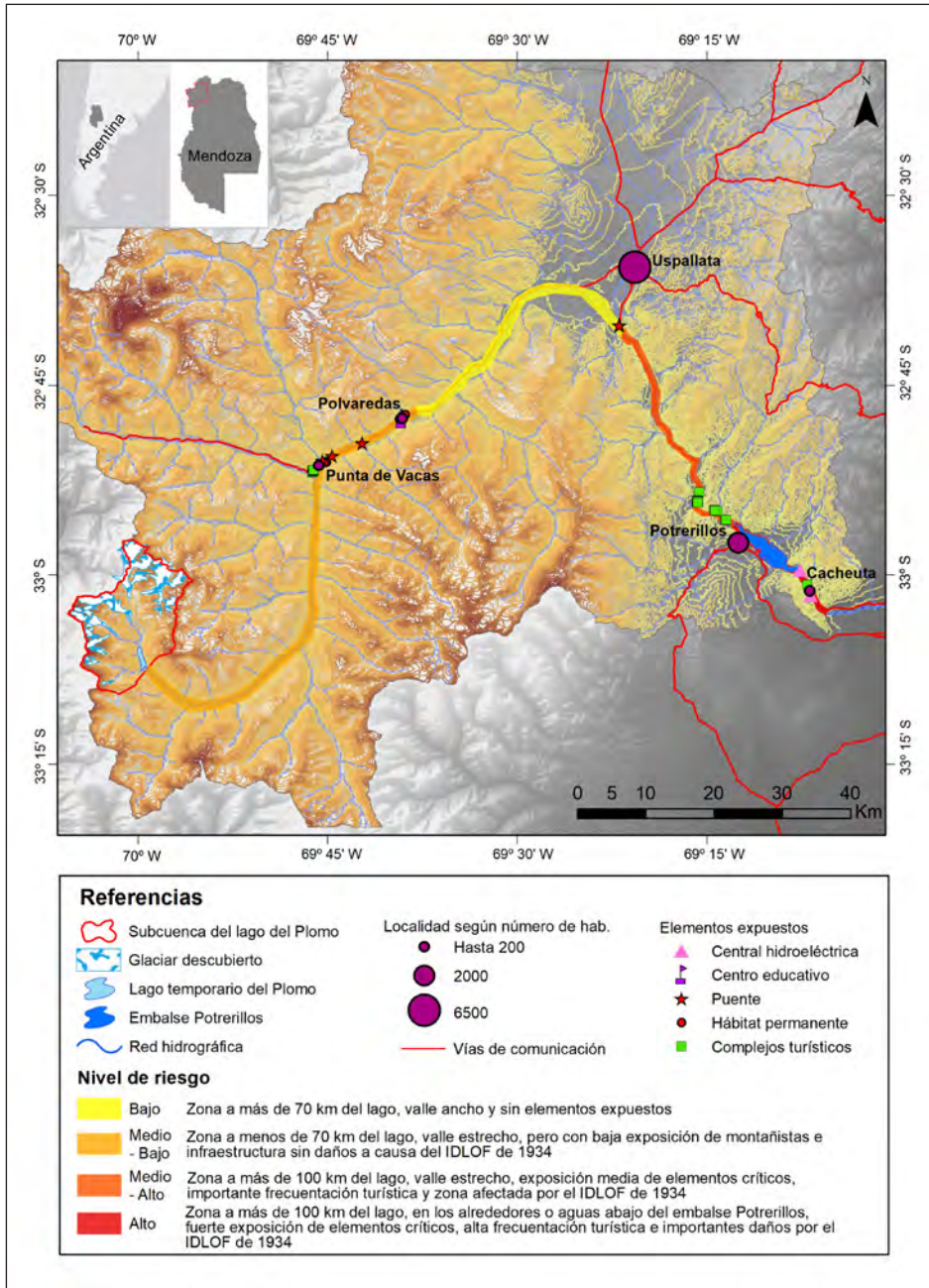


Fig. 8. Mapa de riesgo de IDLOF en la subcuenca del río El Plomo, afluente del Tupungato, Mendoza.

#### **4.4. Mapa de riesgo de IDLOF**

El mapa de riesgo de IDLOF (Fig. 8) en el segmento comprendido entre la zona de formación del lago temporal de la cuenca del Plomo y la localidad de Cacheuta (150 km aguas abajo) revela 4 zonas con distintos niveles de riesgo:

La zona con riesgo bajo se encuentra entre la localidad de Polvaredas y el puente de Uspallata. Corresponde a una zona con baja exposición de la población o de infraestructuras. Si bien la localidad más poblada se ubica en este segmento, queda excluida porque se emplaza fuera de la llanura de inundación del río Mendoza.

- i) La zona con riesgo medio-bajo se identificó inmediatamente aguas abajo de la ubicación de la zona de formación del lago temporal del Plomo y se extiende hasta la localidad de Polvaredas. Esta zona es la más expuesta a la energía de la crecida, siendo el grado de peligrosidad alto, pero debido a la escasa exposición de personas y/o actividades se consideró que el riesgo es moderado a bajo. Este sector es visitado principalmente por montañistas ocasionales o personal militar (Gendarmería) por coincidir con el límite con Chile.
- ii) La zona con riesgo medio-alto corresponde al sector definido entre el puente de Uspallata y el embalse Potrerillos. Se consideró que el riesgo aumenta teniendo en cuenta el estrechamiento del valle que favorece la concentración de la energía y el aumento de la altura de la onda de crecida. Además, en esta zona se registraron importantes daños por causa del IDLOF de 1934. Por último, ésta es la zona en la que se están desarrollando actualmente nuevos emprendimientos turísticos y deportivos en las proximidades de la margen del río Mendoza o en su llanura de inundación, por lo que se tuvo en cuenta el aumento de la ocupación temporal del valle y la exposición como agravantes del grado de vulnerabilidad.
- iii) Finalmente, la zona con riesgo alto se localizó en el sector comprendido entre el embalse Potrerillos y la localidad de Cacheuta, fundamentalmente por el impacto que ocasionaría el aporte repentino de agua proveniente de una crecida abrupta a otro cuerpo de agua, poniendo en grave peligro a las poblaciones localizadas aguas abajo. Además, se desconoce el impacto que ocasionaría el transporte masivo de sedimentos al embalse, lo que podría afectar el correcto funcionamiento y/o estabilidad del mismo. Finalmente, este sector coincide con la zona más gravemente afectada por el IDLOF de 1934 debido al pronunciado estrechamiento del valle y a presencia de grandes infraestructuras críticas, tales como la central hidroeléctrica, e importantes instalaciones turísticas.

### **5. Discusión**

La evaluación de riesgo implica la doble tarea de analizar tanto la peligrosidad como los elementos expuestos junto con su vulnerabilidad (Leone y Vinet, 2006). Hasta el momento, en el valle del río Mendoza se realizaron estudios específicos referidos a la fluctuación de los glaciares (Espizúa, 1986; Leiva *et al.*, 1989; Leiva, 2002; Espizúa

y Maldonado, 2007; IANIGLA-Inventario Nacional de Glaciares, 2018e), a los eventos históricos de *surge* del glaciar GNP y el peligro asociado al colapso del dique de hielo (Helbling, 1935; Prieto, 1986; Bruce *et al.*, 1987; Espizúa y Bengochea, 1990; Ferri Hidalgo *et al.*, 2012; Harrison *et al.*, 2015) o a las características del IDLOF y sus consecuencias (King, 1935; Bruce *et al.*, 1987; Fernández *et al.*, 1991; Harrison *et al.*, 2015). Sin embargo, el análisis y la evaluación de la vulnerabilidad no había sido abordado, y por lo tanto, tampoco el riesgo de crecida abrupta. En este trabajo, por medio de la identificación de los usos del suelo y actual ocupación del valle, se incorporó la dimensión de la vulnerabilidad en base a la exposición, tanto permanente como estacional, permitiendo de este modo realizar el análisis y la evaluación del riesgo de IDLOF en el valle del río Mendoza.

La metodología propuesta para la evaluación del riesgo de crecida abrupta se basa en el registro de eventos históricos y el análisis de datos que pueden ser recabados a partir de imágenes satelitales, tales como ocupación, usos del suelo, y características morfológicas del valle, a partir del uso de SIGs. Este tipo de análisis puede ser replicado en otras regiones o cuencas teniendo en cuenta las limitaciones del mismo. En primer lugar, la metodología se basa en la necesaria existencia de eventos previos que permitan delimitar la extensión de la crecida así como también de las áreas afectadas para poder definir los niveles de peligrosidad y vulnerabilidad. Estas variables son válidas para evaluar casos de crecidas abruptas múltiples provenientes de un mismo lago, asociadas mayormente al rompimiento de diques de hielo (Fernández *et al.*, 1991; Dussaillant *et al.*, 2009). Sin embargo, no se aplica a casos de crecidas abruptas provenientes de diques morrénicos o por deslizamientos, ya que por lo general éstos producen una única crecida, dado que tras la misma el represamiento presenta un canal de salida que regula el nivel del lago, limitando la posibilidad de nuevas crecidas de gran magnitud. Para estos casos, será necesario considerar otros parámetros para evaluar la posible magnitud de la crecida abrupta tales como extensión del área inundable, volumen del lago, caudal pico y topografía aguas abajo, entre otros (McKillop y Clague, 2007; Emmer y Vilímek, 2013; Emmer y Vilímek, 2014).

Los lagos formados en los últimos *surges* del glaciar GNP en 1985 y 2007 tuvieron dimensiones discretas en comparación con el represamiento de 1934. Siguiendo con esta tendencia, se prevé la formación de lagos de pequeñas dimensiones en el futuro con posibles vaciamientos progresivos. Esta especulación, junto a la inexistencia de un lago represado actualmente, indicaría una peligrosidad de IDLOF nula o baja en el valle del río Mendoza. Sin embargo, cambios en el uso del suelo, el desarrollo de nuevas actividades turísticas y recreativas en el valle y una mayor circulación de transporte de cargas y de pasajeros aumentan la exposición de la población, intensificando la vulnerabilidad. En este sentido, se conocen ejemplos a nivel mundial de ocurrencia de GLOFs catastróficos, producto del colapso de lagos considerados pequeños. Tal es el caso del lago Zyndan en Kirguistán (0,0422 km<sup>2</sup>) que colapsó en 2008 produciendo grandes daños en infraestructuras y víctimas mortales. Por su parte, el GLOF del lago Dig Tsho (Nepal) en 1985 no sólo produjo pérdidas económicas por tres millones de dólares y dejó incomunicadas a las comunidades ubicadas aguas abajo, sino que además destruyó parte del sendero principal empleado por los montañistas para acceder al campo

base del Monte Everest, aunque sin víctimas mortales (ICIMOD, 2011). Estos hechos demostraron que: i) lagos considerados pequeños pueden ser altamente peligrosos teniendo en cuenta la vulnerabilidad de la población e infraestructuras expuestas aguas abajo; y ii) que la ocupación estacional de la montaña asociada al turismo y/o actividades deportivas condiciona la vulnerabilidad de igual modo que el hábitat permanente.

En el contexto del calentamiento global, la retracción de las lenguas glaciares ha favorecido la generación de nuevos lagos proglaciares detrás de morrenas en las regiones montañosas de los Andes (Emmer y Vilímek, 2013; Iribarren Anacona *et al.*, 2014; Emmer *et al.*, 2016; Kougkoulos *et al.*, 2018; Wilson *et al.*, 2018). Sin embargo, en los Andes Centrales la formación de lagos glaciares inestables presenta una tendencia decreciente, debido a la migración de los frentes de los glaciares hacia cotas más elevadas y laderas más empinadas, limitando la posibilidad de formación de cuerpos de agua. Así, nuestros resultados coinciden con los estudios realizados en los Andes Centrales y Patagónicos (Wilson *et al.*, 2018). En concordancia con el retroceso glaciar generalizado que se observa en los glaciares de los Andes Centrales (Espizúa, 1986; Espizúa y Bengochea, 1990; Leiva, 2002), la ubicación del frente del glaciar GNP en cotas superiores (Falaschi *et al.*, 2018) implicaría mayor recorrido de la lengua glaciar durante los avances extraordinarios, reduciéndose así las posibilidades de represar el río Plomo. No obstante, numerosas cuestiones quedan sin resolver respecto a los mecanismos generadores, intensidad y duración de los *surges* del glaciar GNP (y de los glaciares en *surge* en general) que impiden prever el alcance de futuros avances extraordinarios.

Por otra parte, se desconoce el grado de riesgo asociado al colapso de otros tipos de represamientos (*i.e.* por deslizamientos) que escasamente han sido analizados en esta región (Di Tommaso y Fauqué, 2005; Moreiras *et al.*, 2012). No se descarta la formación de nuevos represamientos de éste tipo como consecuencia de una mayor inestabilidad de laderas debido a la degradación del permafrost (Clague *et al.*, 2012; Huggel *et al.*, 2013; Iribarren Anacona *et al.*, 2015). Recientemente, se han identificado represamientos temporales asociados a deslizamientos en la cuenca alta del río Mendoza que podrían replicar situaciones de riesgo similares a las ocasionadas por el vaciamiento del lago temporario del Plomo. Crecidas abruptas asociadas al colapso de represamientos por deslizamiento se han registrado en otros sectores de los Andes Centrales, como es el caso de la Laguna Los Erizos en la provincia de San Juan (al norte de Mendoza) en el año 2005 (D'Odorico *et al.*, 2009; Perucca y Angillieri, 2009). Estos eventos, aunque aislados y de baja frecuencia, han tenido gran impacto debido al aumento súbito del caudal del río, la fuerte velocidad y poder de arrastre y extenso recorrido de varias decenas a cientos de kilómetros desde su fuente. Así, la evaluación del riesgo debe ajustarse a una peligrosidad cambiante y una vulnerabilidad que tiende a crecer por el desarrollo rural en áreas de montaña y la ejecución de nuevas infraestructuras, fundamentalmente centrales hidroeléctricas (Kääb *et al.*, 2005).

La zonificación del valle del río Mendoza según el nivel de riesgo frente a los IDLOFs que aquí proponemos, constituye un novedoso aporte a tener en cuenta para la ordenación territorial y la gestión del riesgo en este valle. Futuras investigaciones deberán abordar otros aspectos clave en el estudio de las crecidas abruptas, tales como el

impacto geomorfológico de potenciales GLOFs e IDLOFs en las cuencas de los Andes Centrales a partir del transporte y depósito de sedimentos, especialmente en los sectores en los que se prevé el desarrollo de nuevas infraestructuras de generación hidroeléctrica. Por otra parte, queda pendiente el desafío de realizar una cartografía que integre todos los peligros de origen geológico que afectan al valle del río Mendoza a fin de proveer una visión holística de la dinámica natural del medio y las posibles consecuencias de eventos potencialmente peligrosos para la población y sus actividades.

## 6. Conclusiones

El valle del río Mendoza, como otras regiones de alta montaña del mundo, está sujeto a procesos dinámicos como el retroceso de glaciares, desestabilización de laderas y formación y/o agrandamiento de lagos glaciares, siendo particularmente sensible a los peligros naturales que pueden verse afectados por el cambio climático. Específicamente, en este valle el riesgo de IDLOF no ha sido contemplado en el ordenamiento territorial ni en los diferentes emprendimientos turísticos que allí se emplazan. Este riesgo inexorable está asociado a la presencia de un glaciar de tipo *surge* capaz de obstruir durante las fases activas el normal drenaje del río Plomo, generando un lago temporal potencialmente peligroso para la población e infraestructuras que se encuentran aguas abajo.

Demostramos en este estudio que el nivel de riesgo de IDLOF en los valles de los ríos Plomo y Mendoza varía de bajo a elevado y proponemos una zonificación. Constatamos que el nivel de riesgo no depende de escenarios de mayor peligrosidad asociada al fenómeno natural, ya que el retroceso glaciar vinculado al cambio climático limitaría la intensidad de los *surges* experimentados por el glaciar GNP como consecuencia de la elevación de su cota, y por lo tanto, de la susceptibilidad del glaciar de represar al río Plomo. En cambio, en la zona de estudio el riesgo de IDLOF está principalmente asociado a un aumento de la vulnerabilidad como consecuencia de una mayor exposición del hábitat debido a cambios en la ocupación del suelo (construcción de un embalse) y a una frecuentación turística tendente a crecer (complejos turísticos ubicados sobre la llanura de inundación del río y desarrollos recreativos en sectores de playas del río Mendoza). Asimismo, no se descartan riesgos asociados a represamientos naturales generados por deslizamientos. Por todo esto, se constata la importancia de desarrollar estudios de riesgos en las zonas de alta montaña que sustenten una ordenación del territorio cada vez más necesaria, a la vez que se incorpore en los planes de gestión integral de riesgo de desastres.

## Agradecimientos

Los autores agradecen las aportaciones y comentarios realizados por los revisores, que sin duda permitieron mejorar la calidad de este trabajo. Este estudio se realizó en el marco del Programa ANLAC (Amenazas Naturales en Los Andes Centrales) dirigido por S.M. Moreiras y formó parte de la tesis de maestría de M. Correas González, financiada por el programa Bec. Ar del Ministerio de Educación, Cultura, Ciencia y Tecnología de la Nación Argentina.

## Referencias

- Aduana Chilena 2018. Servicio Nacional de Aduanas - Cuadros y Series Estadísticas. Disponible en: <http://www.aduana.cl/cuadros-y-series-estadisticas/aduana/2016-09-14/143317.html>. (Último acceso: 15/01/2019).
- BDHI. 2019. *Base de Datos Hidrológica Integrada*. Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica. Disponible en: <http://bdhi.hidricosargentina.gob.ar/> (Último acceso: 20/02/2019).
- BID. 2010. *Estudio binacional para la optimización del paso de frontera sistema Cristo Redentor*. BID. 29 pp. Disponible en <https://www.mininterior.gov.ar/planificacion/pdf/Resumen-Ejecutivo-Cristo-Redentor.pdf>
- Breien, H., De Blasio, F.V., Elverhøi, A., Høeg, K. 2008. Erosion and morphology of a debris flow caused by a glacial lake outburst flood, Western Norway. *Landslides* 5 (3), 271-280. <https://doi.org/10.1007/s10346-008-0118-3>.
- Bruce, R.H., Cabrera, G.A., Leiva, J.C., Lenzano, L.E. 1987. The 1985 surge and ice dam of Glaciar Grande del Nevado del Plomo, Argentina. *Journal of Glaciology* 33, 131-132. <https://doi.org/10.3189/S0022143000005475>
- Carrivick, J.L., Tweed, F.S. 2013. Proglacial lakes: character, behaviour and geological importance. *Quaternary Science Reviews* 78, 34-52. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.07.028>.
- Clague, J.J., Huggel, C., Korup, O., McGuire, B. 2012. Climate change and hazardous processes in high mountains. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 69 (3), 328-338.
- Clague, J.J., Mathews, W.H. 1973. Magnitude of Jökulhlaups. *Journal of Glaciology* 12 (66), 501-504. <https://doi.org/10.3189/S0022143000031907>.
- Cobos, D.R. 2002. Fluctuaciones glaciarias en la cuenca superior del Río Atuel. En: *IANIGLA, 30 Años de Investigación Básica y Aplicada en Ciencias Ambientales*. Zeta Ed., Mendoza, pp. 171-174.
- Cobos, D.R., Boninsegna, J.A. 1983. Fluctuations of some glaciers in the upper Atuel River basin, Mendoza, Argentina. En: J. Rabassa (Ed.), *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*. Balkema, Rotterdam, pp. 61-82.
- Corte, A.E., Espizúa, L.E. 1981. *Inventario de glaciares de la cuenca del río Mendoza*. Mendoza, Argentina. IANIGLA-CONICET, 62 pp.
- Costa, J.E., Schuster, R.L. 1988. The formation and failure of natural dams. *Geological society of America Bulletin* 100 (7), 1054-1068. [http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606\(1988\)100<1054:TFAFON>2.3.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606(1988)100<1054:TFAFON>2.3.CO;2).
- Dirección Nacional de Vialidad. 2018. SIG-Vial. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/vialidad-nacional/sig-vial> (Último acceso: 8/02/2019).
- Diario La Libertad. 12 de Enero 1934. *Resultó imponente el paso de la creciente sobre el dique Cipoletti*. p. 3. Hemeroteca Pública Legislativa de la Provincia de Mendoza.
- Diario La Libertad. 17 de Enero 1934. *Una nueva creciente descendió en el día de ayer por el río Mendoza*. p. 6. Hemeroteca Pública Legislativa de la Provincia de Mendoza.
- Diario La Libertad. 21 de Enero 1934. *Las causas de la creciente*. p. 4. Hemeroteca Pública Legislativa de la Provincia de Mendoza.
- Diario Los Andes. 11 Enero 1934. *Una extraordinaria creciente ha interrumpido toda comunicación entre Argentina y Chile*. p. 1.
- Diario Los Andes. 12 Enero 1934. *Proporciones de catástrofe adquirió el aluvión*. p. 1.
- Diario Los Andes. 13 Enero 1934. *Medio millón de pesos se pedirá a la nación*. p. 1.
- Diario Los Andes. 14 Marzo 1985. *La nueva erogación en el dique del río Plomo no revestía problema para pobladores y obras*. p. 4.
- Diario Los Andes. 17 Marzo 1985. *En las primeras horas de ayer en el río Mendoza hubo una nueva creciente aunque no de gran magnitud*. p. 4.

- Di Tommaso, I.M., Fauqué, L. 2005. Estimación del volumen de agua embalsada en paleolagos generados por endicamientos naturales en la cuenca del río Mendoza. *Contribuciones técnicas del Proyecto GEOSAT-AR*, pp. 155-159.
- D'Odorico, P.E., Pérez, D.J., Sequeira, N., Fauqué, L. 2009. El represamiento y aluvión del río Santa Cruz, Andes Principales (31° 40'S), provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65 (4), 713-724.
- Dussaillant, A., Benito, G., Buytaert, W., Carling, P., Meier, C., Espinoza, F. 2010. Repeated glacial-lake outburst floods in Patagonia: An increasing hazard? *Natural hazards* 54 (2), 469-481. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9479-8>.
- Emmer, A., Vilímek, V. 2013. Review Article: Lake and breach hazard assessment for moraine-dammed lakes: an example from the Cordillera Blanca (Peru). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13 (6), 1551. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1551-2013>.
- Emmer, A., Vilímek, V. 2014. New method for assessing the susceptibility of glacial lakes to outburst floods in the Cordillera Blanca, Peru. *Hydrology and Earth System Sciences* 18 (9), 3461-3479. <https://doi.org/10.5194/hess-18-3461-2014>.
- Emmer, A., Vilímek, V., Klimeš, J., Cochachin, A. 2014. Glacier retreat, lakes development and associated natural hazards in Cordillera Blanca, Peru. En: W. Shan, Y. Guo, F. Wang, H. Marui, A. Strom (Eds.), *Landslides in cold regions in the context of climate change*. Environmental Science and Engineering. Springer, Cham, pp. 231-252. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-00867-7\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-319-00867-7_17).
- Espizúa, L.E. 1986. Fluctuations of the Rio del Plomo glaciers. *Geografiska Annaler* 68A (4), 317-327. <https://doi.org/10.1080/04353676.1986.11880183>.
- Espizúa, L.E., Bengochea, J.D. 1990. Surge of Grande del Nevado Glacier (Mendoza, Argentina) in 1984: Its Evolution through satellite Images. *Geografiska Annaler* 72A (3-4), 255-259. <https://doi.org/10.1080/04353676.1990.11880321>
- Espizúa, L.E., Maldonado, G. 2007. Glacier variations in the Central Andes (Mendoza province, Argentina) from 1896 to 2005. En: O. Scarpati, A. Jones (Eds.), *Environmental change and rational water use*, Orientación Gráfica Editora, Buenos Aires, pp. 353-366.
- Evans, S.G., Clague, J.J. 1994. Recent climatic change and catastrophic geomorphic processes in mountain environments. *Geomorphology* 10 (1-4), 107-128. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(94\)90011-6](https://doi.org/10.1016/0169-555X(94)90011-6).
- Falaschi, D., Bolch, T., Lenzano, M.G., Tadono, T., Lo Vecchio, A., Lenzano, L. 2018. New evidence of glacier surges in the Central Andes of Argentina and Chile. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 42 (6), 792-825. <https://doi.org/10.1177/0309133318803014>.
- Fernández, P.C., Fornero, L., Maza, J., Yañez, H. 1991. Simulation of flood waves from outburst of glacier-dammed lake. *Journal of Hydraulic Engineering* 117 (1), 42-53. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1991\)117:1\(42\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1991)117:1(42)).
- Ferri Hidalgo, L., Espizúa, L.E., Pitte, P. 2012. Grande del Nevado del Plomo glacier surge (AR 3304). En: M. Zemp, et al. (Eds.), *WGMS - Fluctuations of Glaciers 2005-2010*, Volume X. ICSU(WDS)/IUGG(IACS)/ UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland. Publication based on database version, 49 pp. doi: 10.5904/wgms-fog-2012-11.
- Frey, H., Haeblerli, W., Linsbauer, A., Huggel, C., Paul, F. 2010. A multi-level strategy for anticipating future glacier lake formation and associated hazard potentials. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10 (2), 339-352. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-339-2010>.
- Haeblerli, W. 1983. Frequency and characteristics of glacier floods in the Swiss Alps. *Annals of Glaciology* 4, 85-90. <https://doi.org/10.3189/S0260305500005280>.
- Harrison, W.D., Osipova, G.B., Nosenko, G.A., Espizúa, L., Kääh, A., Fischer, L., Huggel, C., Craw Burns P.A., Truffer, M., Lai, A.W. 2015. Glacier surges. En: J.F. Shroder, W. Haeblerli,



- C. Whiteman (Eds.), *Snow and ice-related hazards, risks and disasters*. Academic Press, Boston, pp. 437-485. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394849-6.00013-5>.
- Hegglin, E., Huggel, C. 2008. An integrated assessment of vulnerability to glacial hazards: A case study in the Cordillera Blanca, Peru. *Mountain Research and Development* 28 (3-4), 299-309. <https://doi.org/10.1659/mrd.0976>.
- Helbling, R. 1919. Beiträge zur topographischen Erschliessung der Cordilleras de los Andes zwischen Aconcagua und Tupungato. *Sonderabdruck aus dem XXII Jahresbericht des Akademischen Alpenclubs*, Zurich. 77 pp.
- Helbling, R. 1935. The origin of the Río Plomo ice-dam. *The Geographical Journal* 85 (1), 41-49.
- Huggel, C., Gruber, S., Korup, O. 2013. Landslide hazards and climate change in high mountains. En: J.F. Shroder (Ed.), *Reference module in earth systems and environmental sciences, from treatise on Geomorphology*. Elsevier, Amsterdam 13, 288-301. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00367-5>
- IANIGLA-Inventario Nacional de Glaciares 2018a. *Informe de la subcuenca del río Tupungato. Cuenca del río Mendoza*. 60 pp. IANIGLA-CONICET, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. Disponible en: [http://www.glaciaresargentinos.gob.ar/?page\\_id=475](http://www.glaciaresargentinos.gob.ar/?page_id=475). (Último acceso: 15/02/2019).
- IANIGLA-Inventario Nacional de Glaciares 2018b. *Informe de las subcuencas de los ríos de las Cuevas y de las Vacas. Cuenca del río Mendoza*. IANIGLA-CONICET, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 75 pp. Disponible en: [http://www.glaciaresargentinos.gob.ar/?page\\_id=475](http://www.glaciaresargentinos.gob.ar/?page_id=475). (Último acceso: 15/02/2019).
- IANIGLA-Inventario Nacional de Glaciares 2018c. *Informe de las subcuencas del arroyo Uspallata y del sector Cordillera del Tigre. Cuenca del río Mendoza*. IANIGLA-CONICET, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 64pp. Disponible en: [http://www.glaciaresargentinos.gob.ar/?page\\_id=475](http://www.glaciaresargentinos.gob.ar/?page_id=475). (Último acceso: 15/02/2019).
- IANIGLA-Inventario Nacional de Glaciares 2018d. *Informe de las subcuencas de los ríos Blancos y Sector del Cordón del Plata. Cuenca del río Mendoza*. IANIGLA-CONICET, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 66 pp. Disponible en: [http://www.glaciaresargentinos.gob.ar/?page\\_id=475](http://www.glaciaresargentinos.gob.ar/?page_id=475). (Último acceso: 15/02/2019).
- IANIGLA-Inventario Nacional de Glaciares 2018e. *Resumen ejecutivo de los resultados del Inventario Nacional de Glaciares*. 27 pp. IANIGLA-CONICET, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. Disponible en: [http://www.glaciaresargentinos.gob.ar/?page\\_id=2571](http://www.glaciaresargentinos.gob.ar/?page_id=2571). (Último acceso: 15/02/2019).
- ICIMOD 2011. *Glacial lakes and glacial lake outburst floods in Nepal*. Kathmandu: ICIMOD.
- IGN 2014. *Modelo Digital de Elevaciones de la República Argentina MDE-Ar*. Instituto Geográfico Nacional, 32 pp. Disponible en: [http://www.ign.gob.ar/archivos/Informe\\_MDE-Ar\\_45m.pdf](http://www.ign.gob.ar/archivos/Informe_MDE-Ar_45m.pdf)
- INDEC 2019. Proyecciones de población por departamento. Provincia de Mendoza. Disponible en: [https://www.indec.gob.ar/nivel4\\_default.asp?id\\_tema\\_1=2yid\\_tema\\_2=24yid\\_tema\\_3=119](https://www.indec.gob.ar/nivel4_default.asp?id_tema_1=2yid_tema_2=24yid_tema_3=119). (Último acceso: 12/01/2019).
- Iribarren Anacona, P., Mackintosh, A., Norton, K.P. 2015. Hazardous processes and events from glacier and permafrost areas: lessons from the Chilean and Argentinean Andes. *Earth Surface Processes and Landforms* 40 (1), 2-21. <https://doi.org/10.1002/esp.3524>.
- Jacquet, J., McCoy, S.W., McGrath, D., Nimick, D.A., Fahey, M., O'kuinghttons, J., Friesen, B. A., Leidich, J. 2017. Hydrologic and geomorphic changes resulting from episodic glacial lake outburst floods: Río Colonia, Patagonia, Chile. *Geophysical Research Letters* 44 (2), 854-864. <https://doi.org/10.1002/2016GL071374>.
- Kääb, A., Reynolds, J.M., Haeberli, W. 2005. Glacier and permafrost hazards in high mountains. En: U.M. Huber, H.K. M. Bugmann, M.A. Reasoner (Eds.), *Global change and mountain Regions*. Springer, Dordrecht, 23, 225-234. [https://doi.org/10.1007/1-4020-3508-X\\_23](https://doi.org/10.1007/1-4020-3508-X_23).

- King, W.D.V.O. 1934. The Mendoza River Flood of 10-11 January 1934-Argentina. *The Geographical Journal* 84 (4), 321-326. <https://doi.org/10.2307/1786696>.
- King, W.D.V.O. 1935. El aluvión del río Mendoza de enero de 1934. *La ingeniería*, Buenos Aires, 309-313.
- Kougkoulos, I., Cook, S.J., Jomelli, V., Clarke, L., Symeonakis, E., Dortch, J.M., Edwards, L.A., Merad, M. 2018. Use of multi-criteria decision analysis to identify potentially dangerous glacial lakes. *Science of the Total Environment* 621, 1453-1466. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.083>.
- Korup, O., Tweed, F. 2007. Ice, moraine, and landslide dams in mountainous terrain. *Quaternary Science Reviews* 26 (25-28), 3406-3422. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.10.012>.
- Lauro, C., Vich, A. I.J., Moreiras, S. 2019. Streamflow variability and its relationship with climate indices in western rivers of Argentina. *Hydrological Sciences Journal* 64 (5), 607-619. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1594820>.
- Leiva, J.C. 2002. La situación actual de los glaciares andinos. En: D. Trombotto Liaudat, R. Villalba (Eds.), *IANIGLA, 30 Años de investigación básica y aplicada en ciencias ambientales*. Zeta Ed., Mendoza, pp. 181-185.
- Leiva, J.C., Lenzano, L.E., Cabrera, G.A., Suarez, J.A. 1989. Variations of Rio Plomo Glaciers, Andes Centrales Argentinos. En: J. Oerlemans (Ed.), *Glacier fluctuations and climatic change*. Glaciology and Quaternary Geology, vol 6. Springer, Dordrecht, pp. 143-151. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-7823-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-94-015-7823-3_9).
- Leone, F., Vinet, F. 2006. La vulnérabilité, un concept fondamental au coeur des méthodes d'évaluation des risques naturels. En: *Analyses géographiques*. Coll. Géorisques., Publications Université Paul-Valéry, Montpellier 1, pp. 9-26.
- Norte, F. 2000. Mapa climático de Mendoza. En: M.E. Abraham (Coord.), *Catálogo de recursos humanos e información relacionada con la temática ambiental en la región andina argentina*. Disponible en: <https://www.mendoza-conicet.gob.ar/ladyot/catalogo/cdandes/cap03.htm#inhalt>.
- Masiokas, M.H., Villalba, R., Luckman, B.H., Le Quesne, C., Aravena, J.C. 2006. Snowpack variations in the Central Andes of Argentina and Chile, 1951-2005: Large-scale atmospheric influences and implications for water resources in the region. *Journal of Climate* 19 (24), 6334-6352. <https://doi.org/10.1175/JCLI3969.1>.
- Masiokas, M.H., Villalba, R., Luckman, B.H., Montaña, E., Betman, E., Christie, D., Le Quesne, C., Mauget, S. 2013. Recent and historic Andean snowpack and streamflow variations and vulnerability to water shortages in central-western Argentina. *Climate Vulnerability* 5, 213-227. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-384703-4.00522-0>.
- McKillop, R.J., Clague, J.J. 2007. A procedure for making objective preliminary assessments of outburst flood hazard from moraine-dammed lakes in southwestern British Columbia. *Natural Hazards* 41 (1), 131-157. <https://doi.org/10.1007/s11069-006-9028-7>.
- Moreiras S.M., Lauro C., Mastrantonio L. 2012. Stability analysis and morphometric characterization of palaeo-lakes of the Benjamin Matienzo Basin-Las Cuevas River, Argentina. *Natural Hazards* 62 (2), 593-611. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0095-7>.
- Perucca, L.P., Angillieri, M.Y.E. 2009. Evolution of a debris-rock slide causing a natural dam: the flash flood of Río Santa Cruz, Province of San Juan - November 12, 2005. *Natural Hazards* 50 (2), 305-320. <https://doi.org/10.1007/s11069-008-9341-4>.
- Pitte, P., Berthier, E., Masiokas, M.H., Cabot, V., Ruiz, L., Ferri Hidalgo, L., Gargantini, H., Zalazar, L. 2016. Geometric evolution of the Horcones Inferior Glacier (Mount Aconcagua, Central Andes) during the 2002-2006 surge. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 121 (1), 111-127. <https://doi.org/10.1002/2015JF003522>.

- Post, A. 1969. Distribution of surging glaciers in western North America. *Journal of Glaciology*, 8 (53), 229-240. <https://doi.org/10.3189/S0022143000031221>.
- Prieto, M. del R. 1986. The glacier dam on the Rio Plomo: A cyclic phenomenon? *Zeitschrift fur Gletscherkunde und Glazialgeologie* 22 (1), 73-78.
- Razza, L. 1935. El glaciar del Nevado del Plomo. *Revista Geográfica Americana* 4 (25), 22-238.
- Reghezza, M. 2006. La vulnerabilité: Un concept problématique. En: F. Leone, F. Vinet (Eds.), *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. Analyses géographiques*. Publications Université Paul-Valéry, Montpellier. pp 35-40.
- Rojas, O., Mardones, M., Arumí, J.L., Aguayo, M. 2014. Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos. *Revista de Geografía Norte Grande* 57, 177-192. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022014000100012>.
- Rojas, O., Martínez, C. 2011. Riesgos naturales: Evolución y modelos conceptuales. *Revista Universitaria de Geografía* 20 (1), 83-116. ISSN: 0326-8373.
- Walder, J.S., Costa, J.E. 1996. Outburst floods from glacier-dammed lakes: the effect of mode of lake drainage on flood magnitude. *Earth Surface Processes and Landforms* 21 (8), 701-723. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199608\)21:8%3C701::AID-ESP615%3E3.0.CO;2-2](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199608)21:8%3C701::AID-ESP615%3E3.0.CO;2-2).
- Wilson, R., Glasser, N.F., Reynolds, J.M., Harrison, S., Iribarren Anaconda, P., Schaefer, M., Shannon, S. 2018. Glacial lakes of the Central and Patagonian Andes. *Global and Planetary Change* 162, 275-291. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.01.004>.