

# EVENTOS EXTREMOS EN CUENCAS DE MONTAÑA DE RÉGIMEN PLUVIONIVAL EN EL CONTEXTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO.

**Rodolfo Iturraspe**<sup>(1) (2)</sup> y **Adriana Urciuolo**<sup>(1) (2)</sup>

(1) Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Argentina

(2) Dirección General de Recursos Hídricos, Prov. de Tierra del Fuego, Argentina. [iturraspe@tdfuego.com](mailto:iturraspe@tdfuego.com)

**Citar como:** Iturraspe, R. y A. Urciuolo, (2010). Eventos extremos en cuencas de montaña de régimen pluvionival en el contexto del cambio climático. En: Criterios para la determinación de crecidas de diseño en sistemas climáticos cambiantes. Paoli, C. y Malinow, G. (eds.). Ediciones U.N.L. Santa Fe. Pag 67-78. ISBN 978-987-657-371-9

## RESUMEN

La definición de parámetros hidrológicos requeridos para el diseño de obras hidráulicas y para el manejo de los recursos hídricos orientado a la prevención de riesgos requiere establecer presunciones confiables relativas a la ocurrencia de eventos extremos. El paradigma del cambio climático, hoy indiscutible, pero que sin embargo no era objeto de especial preocupación antes de la década del 80, ha dado lugar en los últimos años a la discusión en la materia dado el grado de incertidumbre en la previsión de valores extremos que se motiva en la identificación de tendencias definidas en series hidrológicas y climáticas. Atendiendo a este problema y considerando que la región austral de Argentina presenta características particulares en materia de tendencias climáticas, y que las cuencas con cabeceras en la Cordillera presentan contribuciones de origen nival, este artículo analiza las situaciones que dan lugar a crecidas extraordinarias en diferentes tipos de cuencas de régimen pluvionival de Tierra del Fuego, en base al análisis de casos. Paralelamente se presentan resultados sobre tendencias observadas en materia de precipitación y temperatura para finalmente discutir y formular consideraciones relativas a las implicancias del cambio y la variabilidad climática sobre la frecuencia de situaciones desencadenantes de eventos extremos y considerar recomendaciones tendientes al logro de previsiones más confiables.

## ABSTRACT

Design of civil hydraulic projects and planning of water management linked to risks prevention require to determine hydrological parameters in order to make secure provisions related to the extreme events occurrence. The climate change paradigm is nowadays out of discussion, but before the 80' decade it was not object of a special attention for planning and hydraulic projects design. As a consequence of identified trends of hydrological and climatic series, more clearly denoted in the last decades, and the better knowledge related to the human-induced climate change, classical methodologies based on the assumption of stationary conditions for extreme values estimation has been revised in the last years and the interest and discussion on this matter have raised.

From this focus, and considering that the southern region of Argentina presents particular features on climatic trends, as well as a rain-snow regime for the water basins with heads on the mountain range – different as that of the Argentinean basins of the large plains – this paper explains, on the basis of study cases, the typical situations that originates extraordinary floods in different kinds of basins of Tierra del Fuego. In other hand, we show results related to local precipitation and temperature trends, concluding on discussion and conclusions about the significance of the climate change and climate variability on the frequency and magnitude of extreme events. Final recommendations leading to achieve more reliable results are proposed.

Palabras clave: eventos extremos, cambio climático, Tierra del Fuego.



## INTRODUCCIÓN

Las clásicas metodologías para el análisis de las crecidas de proyecto se basan en gran medida en el análisis de series históricas extensas - ya sea de caudales máximos o de precipitaciones- o bien de eventos extremos observados, bajo el supuesto de que en el futuro se mantendrá una similar distribución estadística a la observada en el pasado. No obstante, la identificación de tendencias en las variables climáticas definitorias de crecidas extraordinarias indica que en escenarios futuros es factible que se produzcan cambios en las características y en la frecuencia de este tipo de eventos, lo que genera incertidumbre al momento de establecer parámetros de diseño de obras hidráulicas y para la toma de decisiones vinculadas al manejo de los recursos hídricos. Milly (2008) en su artículo "*Stationarity is dead*", publicado en *Science*, es contundente en su conclusión sobre cómo el cambio climático desvirtúa la básica hipótesis de condición estacionaria para las variables hidrológicas, que históricamente ha dado sustento a las metodologías asumidas para el manejo de disponibilidad de agua, demandas y riesgos. Knox (2000) plantea, en base a estudios paleohidrológicos que pequeñas variaciones en las medias de variables climáticas producen grandes cambios en los extremos.

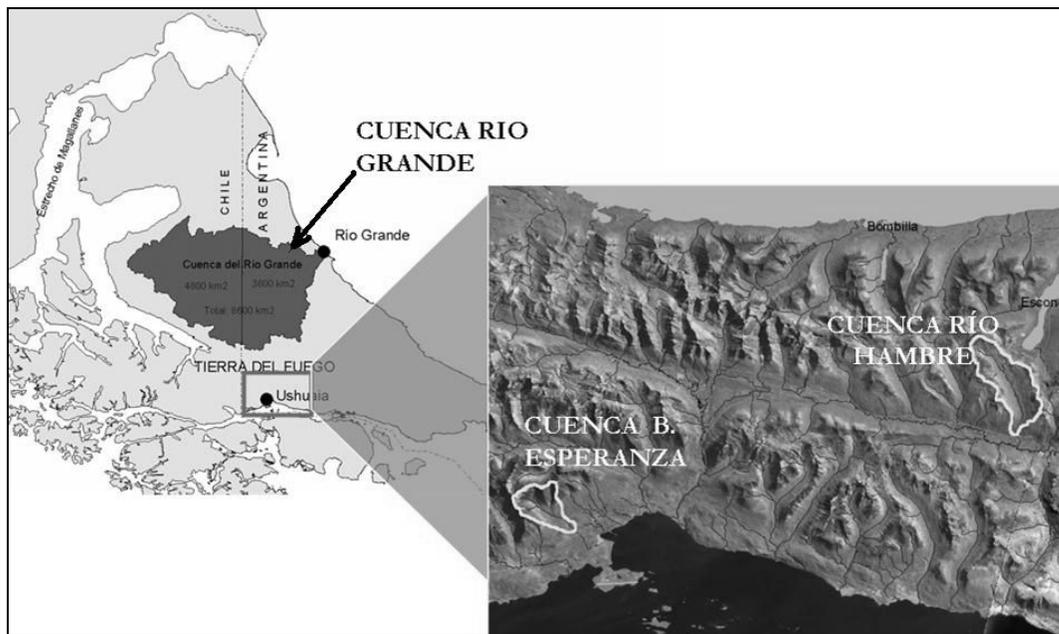
Las tendencias detectadas en el comportamiento hidrológico de los ríos del sur de Sudamérica no son homogéneas debido a que si bien el incremento de la temperatura responde a un patrón general relativamente homogéneo, en materia de precipitación se verifican contrastes entre diferentes regiones y difiere además la respuesta de las cuencas a la variabilidad climática, ya sea por diferencias en la naturaleza de los procesos dominantes en el contexto del ciclo hidrológico como por los distintos usos de la tierra en dichas cuencas.

En el caso de Tierra del Fuego, donde el escurrimiento responde a un régimen pluvionival, las precipitaciones, vinculadas a sistemas frontales y al pasaje de centros de baja presión, presentan baja intensidad, lo que mitiga la magnitud y la frecuencia de las grandes crecidas. Esta condición da lugar a que la ocurrencia de eventos extremos esté condicionada a la concurrencia de varios factores concomitantes.

El objetivo de este trabajo es identificar aspectos relevantes de las condiciones desencadenantes de eventos extremos en cuencas de la provincia más austral de la República Argentina, analizar aspectos locales de la variabilidad climática y tendencias detectadas para finalmente vincular ambos aspectos y considerar influencias de las tendencias climáticas sobre la frecuencia e intensidad de los eventos extremos.

## METODOLOGÍA

El análisis de los factores que condicionan las crecidas extremas en cuencas de montaña de régimen pluvionival se desarrolla a partir de tres casos de estudio, que corresponden a cuencas de diferente escala y elevación (figura 1): la del Río Grande, la mayor de Tierra del Fuego (8680km<sup>2</sup>), con cabeceras en cordillera pero con gran desarrollo en el ambiente de transición y de estepa; en tanto que las restantes son propias del ambiente de cordillera: la cuenca del río Hambre (18,9 km<sup>2</sup>), que es subcuenca del río Lasifashaj y la cuenca del A°. Buena Esperanza (12.9 km<sup>2</sup>), situada en proximidades de la ciudad de Ushuaia. El objeto de los casos de estudio no es la formulación de un reporte exhaustivo de cada evento sino identificar evidencias de las condiciones más propicias que desencadenan las crecidas extraordinarias, en un medio donde, como ya se ha expresado, la intensidad de precipitación reviste siempre características moderadas, debido a la ausencia de situaciones meteorológicas convectivas.



**Figura 1.** Localización de las cuencas de Tierra del Fuego consideradas para el estudio de casos.

Debido a que las series disponibles de datos de caudal presentan corta duración y discontinuidades, ha sido necesario enfocar el análisis en los eventos extremos observados. En la cuenca del Río Grande, el carácter reciente de la inundación del invierno de 2006 ha facilitado la obtención de información. Las situaciones en las otras cuencas fueron analizadas en detalle en el marco del proyecto EPIC FORCE (Unión Europea), por cuanto fueron unidades piloto sobre las que se trabajó en la identificación, reconstrucción y modelación de eventos extremos.

Iturraspe et al (2007) presentan información detallada sobre las cuencas representativas del ambiente de cordillera, así como de la reconstrucción y análisis de los eventos extremos, que en el caso del A°. Buena Esperanza fue modelado en la Universidad de Newcastle utilizando el modelo distribuido SHETRAN (Abbot, 1986; Bathurst, 2006)

El estudio de tendencias de temperatura y precipitación se ha efectuado a partir de la extensa serie de datos de la estación Ushuaia, considerando hasta 1997 observaciones de la estación del antiguo Aeropuerto, en tanto que para años posteriores se utilizaron datos de la estación meteorológica del CADIC, localizada en una situación muy próxima a la del antiguo Aeropuerto Ushuaia. El análisis involucra la variabilidad a nivel anual y estacional, y en el caso de la precipitación, los máximos anuales correspondientes a las observaciones diarias. Finalmente se evalúa, en base a las evidencias disponibles, el efecto de las tendencias y cambios observados en las variables climáticas más significativas sobre posibles cambios en la frecuencia de las condiciones desencadenantes de eventos extraordinarios.

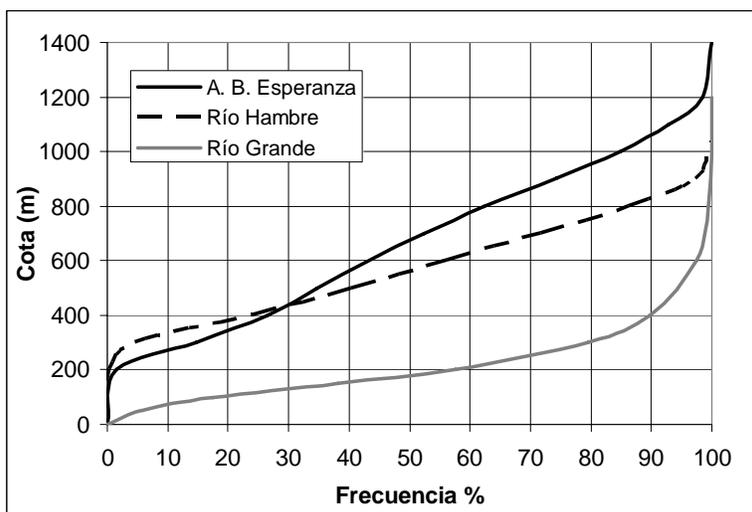
## RESULTADOS

Las crecidas en Tierra del Fuego pueden ser producidas por:

- Lluvias intensas (precipitación líquida en la mayor parte de la cuenca)
- Fusión de la nieve estacional
- Combinación de ambas situaciones (lluvia sobre nieve)

Según se describe a continuación y de acuerdo a lo que se puede apreciar en los diferentes casos de estudio, los tipos de eventos desencadenantes adquieren diferente relevancia según las

características de las cuencas. Uno de los factores determinantes es la altimetría de cada cuenca, que en los casos seleccionados presenta contrastes, según se puede apreciar en la figura 2. En cuencas en las que dominan cotas bajas, el manto de nieve estacional es inestable y predominan las precipitaciones líquidas sobre la mayor parte de la cuenca, aún en invierno. En la medida que las cuencas se desarrollan en mayor proporción sobre cotas elevadas, las lluvias de invierno sólo se manifiestan en los niveles inferiores, en tanto que predomina la acumulación de nieve en los niveles más altos. Otro factor a considerar es la extensión de las cuencas. Las de mayor dimensión, exceptuando la del Fagnano, se corresponden con la vertiente Norte y tienen desarrollo importante sobre tierras bajas del ambiente ecotonal de transición, por debajo de los 200 m.



**Figura 2.** Curvas hipsométricas correspondientes a las cuencas analizadas. Se aprecia en el caso del río Grande que el 90% de la superficie se localiza debajo de los 400 m.

### Estudio de caso 1: Cuenca del río Grande

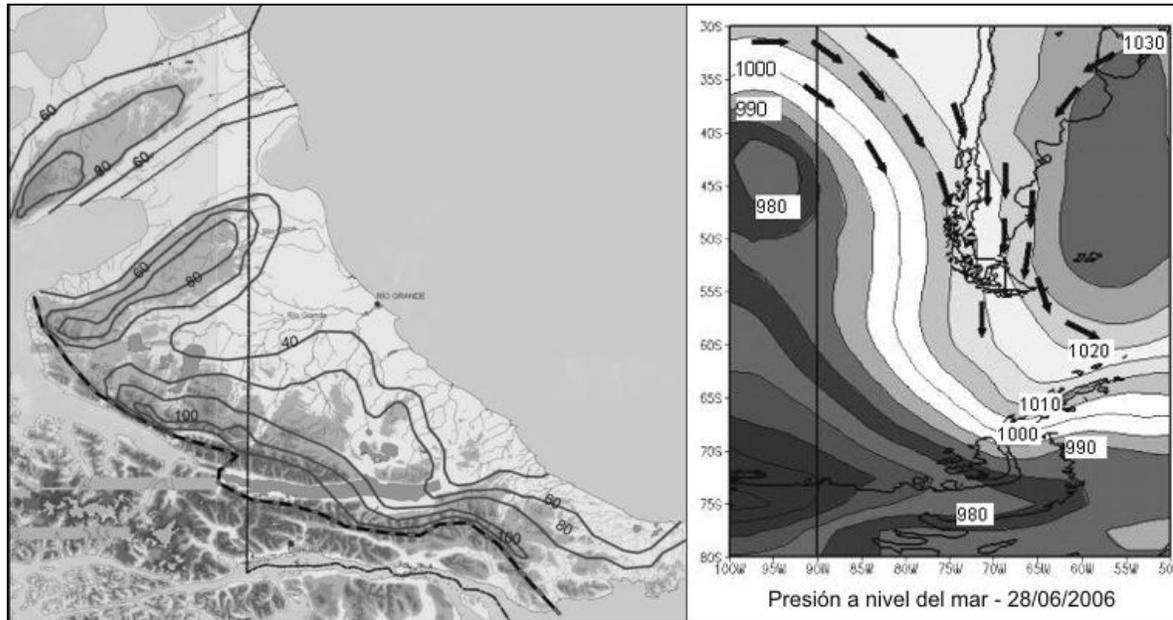
El 30/6/2006, se produjo una inundación sin precedentes en registros históricos, por los niveles alcanzados por las aguas, por su permanencia y por la extensión del área de afectada. Fue resultado de condiciones antecedentes particulares y una anomalía climática desencadenante. El primer semestre de 2006 presentó características húmedas en el centro y Norte de la Provincia, con precipitaciones próximas al total anual que duplicaron las del mismo período del año 2005. Una crecida previa al evento, ocurrida 1/5/2006 que superó las máximas anuales ordinarias, es indicadora de las condiciones antecedentes.

En este contexto, en junio se registraron importantes nevadas y promediando el mes, un centro de alta presión se instaló en la región determinando condiciones muy frías y congelamiento del suelo (mínimas en Tolhuin de  $-18^{\circ}\text{C}$ ). Hacia fin de junio este anticiclón se desplazó a la altura de Islas Malvinas y un centro de baja presión se posicionó al Oeste de TdF (figura 3). Esta situación sinóptica indujo el ingreso de aire cálido y húmedo desde el Norte, provocando lluvias entre el 28 y el 30/6 (en algunas estaciones también el día 27). En la zona costera no fueron éstas excepcionales (36 mm en R. Grande y 40,5 mm en Ea. M. Behetty) pero en cordillera, por elevación y enfriamiento del aire húmedo estas cifras se multiplicaron (102 mm en Paso Garibaldi, 400 m s.n.m.). La temperatura permitió precipitación en forma líquida en cotas altas, acelerando la fusión de la nieve. Así, se conjugaron varias situaciones:

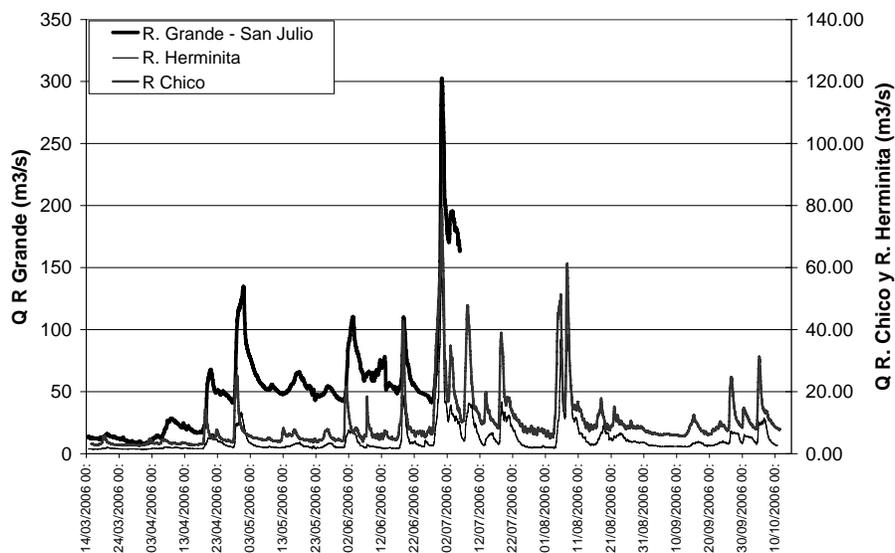
- Excepcional situación de humedad previa y presencia de nieve almacenada en zonas altas.
- En las zonas bajas lluvias moderadas a intensas, sobre suelo congelado, sin capacidad de infiltración y humedales sobresaturados, dio lugar a elevado coeficiente de escorrentía.

- Lluvias muy intensas y acelerado proceso de fusión de la nieve en la Cordillera y en la transición, producido por la acción conjunta del ingreso de aire cálido y las lluvias.

Debido a la dimensión de la cuenca, el factor que predispuso el evento fue la condición extraordinaria de humedad antecedente, que en las cuencas pequeñas de cordillera, de más rápida respuesta, es de menor significación. Las figuras 3 y 4 muestran las isohietas de la tormenta y los caudales de crecida en tanto que la figura 5 ilustra la magnitud de la inundación.



**Figura 3.** Isohietas del 28 al 30/6/06. La línea punteada indica el límite sur del área en que la tormenta tuvo intensidad significativa. El mapa de la derecha muestra los sistemas de alta (al E) y baja presión (al W) que indujeron el desplazamiento de aire cálido y húmedo hacia TdF. Normalmente estos sistemas tienen un posicionamiento relativo opuesto.



**Figura 4.** Crecidas de los ríos Grande, Herminita y Chico, en proximidades del límite. La escala de referencia para los dos últimos es la de la derecha. El registro del Río Grande se interrumpió luego de que el data logger fuera cubierto por el agua. Se estima en 500 a 550 m<sup>3</sup>/s el máximo caudal en la desembocadura del R. Grande el 30/6/2006. Lluvias en Julio prolongaron el anegamiento de áreas rurales. Tres picos previos a la máxima crecida superan 100 m<sup>3</sup>/s, cada uno es de la magnitud de una crecida máxima anual.

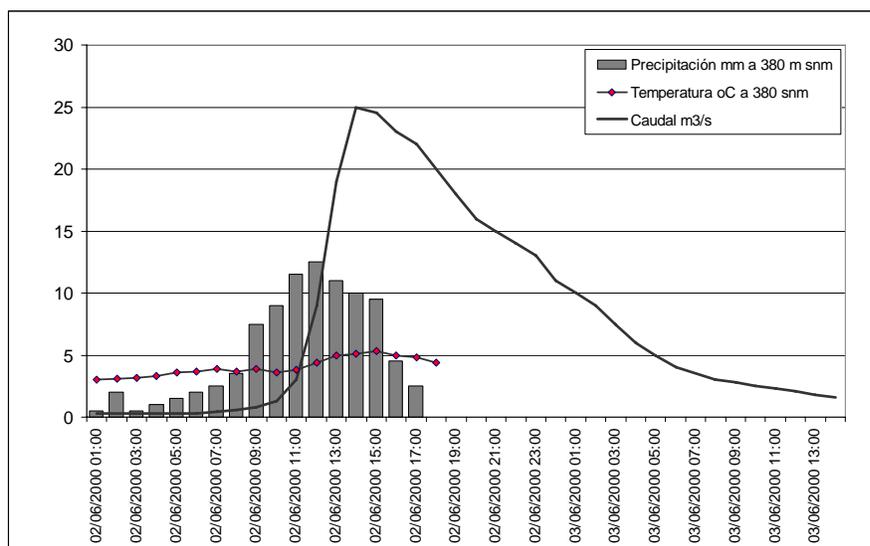


**Figura 5.** Río Grande, desde el Puente de la Rta N. 3, el 1/7/2006 a las a las 17 hs.

### Estudio de caso 2: Cuenca del río Hambre

Las cuencas de montaña se caracterizan por su rápida respuesta a los eventos climáticos, por lo cual las precipitaciones intensas son determinantes de avenidas importantes. Sin embargo, debido al gradiente altitudinal de temperatura, sobre los 800-900 m las precipitaciones se producen en forma sólida durante la mayor parte del año, lo cual restringe las posibilidades de crecidas extraordinarias en cuencas con significativo desarrollo altitudinal.

La cuenca del río Hambre, afluente del río Lasifashaj, si bien corresponde al ambiente de cordillera, es relativamente baja, con un 85% de su superficie por debajo de los 800 m s.n.m. Tal condición da lugar a que en episodios cálidos de fines de otoño y comienzos de invierno se puedan producir eventos de lluvia sobre nieve, ya que la acumulación comienza en estas cuencas a partir de mayo, tal como ocurriera en el caso del máximo evento observado, ocurrido el 2/6/2000. Las características del evento se muestran a continuación la figura 6 y en la tabla 1



**Figura 6.** Precipitación, temperatura e hidrograma de crecida del 2/6/2000 en la cuenca del río Hambre

Precipitación total:	91.5 mm
Duración:	17 hs
Temperatura (a 380 m.s.n.m)	entre 3,5 y 5,2 oC
Q max	25 m <sup>3</sup> /s
Qmax/Qmed=	41
Tipo de evento:	Lluvia sobre nieve

**Tabla 1.** Características del evento del 2/6/2000 en la cuenca del río Hambre

La torrencialidad de estos cursos da lugar a consecuencias adicionales a las que ordinariamente se derivan de las grandes avenidas. Las crecidas anuales ordinarias tienden a producir acumulaciones de troncos sobre tramos de cauces, que son removilizadas por las crecidas extraordinarias, generando acarreo de mayor magnitud como ocurriera en el año 2000 en el río Cambaceres (figura 7), cuyas cabeceras se encuentran relativamente próximas a las del río Hambre.



**Figura 7.** Gran concentración de troncos transportados por el río Cambaceres que produjeron daños en el puente de la ruta Provincial en el año 2000.

El transporte de grandes volúmenes de fragmentos leñosos es un factor de riesgo muy importante para todo tipo de instalaciones ubicadas sobre el cauce y en el valle de inundación, en particular para los puentes, ya que generan obstrucción del escurrimiento, incremento de los niveles y fuertes solicitaciones sobre las estructuras. El riesgo potencial de este tipo de eventos depende de la cantidad de material leñoso existente en la cuenca con posibilidad de ser movilizado. Mao et al (2008), determinaron para la cuenca del Buena Esperanza una tasa de 120 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup> en la cuenca y 76 m<sup>3</sup>km<sup>-1</sup> en el cauce, valores que son más elevados en cuencas con mayor proporción de bosque que en la del B. Esperanza (36%).

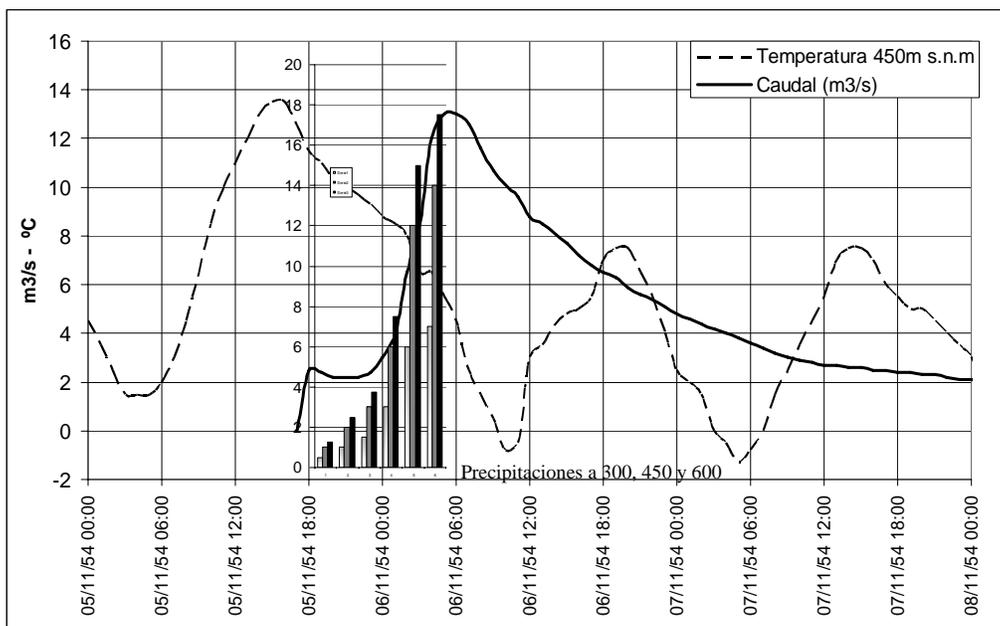
### **Estudio de caso 3: cuenca del A°. Buena Esperanza.**

Esta cuenca, de importante desarrollo altitudinal presenta condición torrencial, propiciada por la fuerte pendiente general dada por un desnivel de 1200m en un tramo de 5300m. Su altitud mediana es de 680m (figura 2) y 1/3 de la superficie total se localiza sobre 800 m s.n.m. La orografía determina un fuerte incremento de la precipitación. Las observaciones en la zona urbana de Ushuaia a 250 m altura, duplican las correspondientes a las obtenidas al nivel del mar.

De acuerdo a registros hidrométricos disponibles desde el año 2000, en ningún caso la máxima crecida anual se produjo durante el período invernal. Tampoco se conocen antecedentes ocurridos en años precedentes al indicado. La mayor frecuencia de crecidas máximas anuales corresponde al período Noviembre-Diciembre, y en menor medida a Enero-Marzo. Esto es debido a que los

episodios lluviosos que se producen en invierno sólo afectan el tramo inferior de la cuenca, tomando la forma de nevadas en las cabeceras. El período de lluvias en la alta cuenca corresponde a Noviembre-Marzo, pudiendo excepcionalmente abarcar octubre y/o abril, pero el mayor potencial de ocurrencia de crecidas extremas está vinculado a eventos de lluvia sobre nieve (Iturraspe et al, 2009) lo que se produce en Noviembre-Diciembre, cuando en las cabeceras queda todavía una importante reserva de nieve estacional, cuya fusión puede ser inducida por lluvia.

El máximo evento en esta cuenca tuvo lugar el 5 de noviembre de 1954 (figura 8), luego de nevadas excepcionales en agosto-septiembre y de un posterior período frío en octubre, que estabilizó el manto de nieve y retrasó el proceso de fusión (Iturraspe et al, 2007, 2009). La lluvia que desencadenó la crecida fue importante (42 mm a nivel del mar) pero no tanto como para producir un evento extremo en forma independiente. La temperatura no fue tampoco excepcional pero permitió la ocurrencia de precipitación líquida en toda la cuenca, que aportó energía adicional y aceleró la fusión de la nieve.



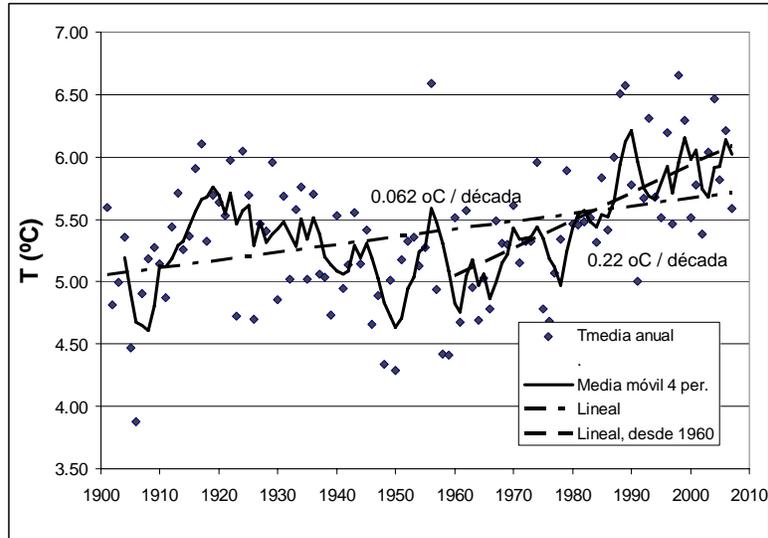
**Figura 8.** Información correspondiente al evento extremo correspondiente al A°. Buena Esperanza el 5/11/1954, según Iturraspe et al (2007, 2009)

Precipitación total:	42 mm en Ushuaia
Duración:	10 hs
Temperatura (a 450 m s.n.m)	5 a 14 oC
Q max:	13 m3/s
Qmax/Qmed:	36
Tipo de evento:	Lluvia sobre nieve
Condición antecedente:	Gran acumulación de nieve en meses previos

**Tabla 2.** Características del evento del 5/11/1954 en la cuenca del A° Buena Esperanza.

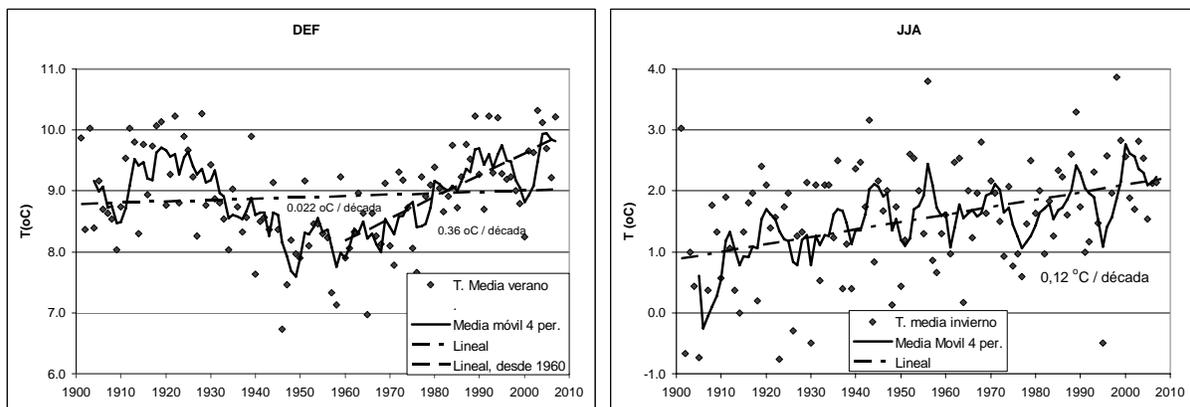
## Tendencias climáticas en Tierra del Fuego

La temperatura media anual se incrementó durante el siglo XX en aproximadamente  $0.62\text{ }^{\circ}\text{C}$ , es decir, en términos similares a los valores globales, (de  $0,6 \pm 0,02^{\circ}\text{C}$  según IPCC, 2001). Sin embargo el mayor incremento se evidenció a partir de la década del 60, con una tendencia incremental de  $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{década}$  (figura 9).



**Figura 9.** Evolución de la temperatura media anual en Ushuaia desde 1901. Se aprecia notable diferencia entre la pendiente de la recta de ajuste de la serie completa y la de las observaciones posteriores a 1960.

El análisis de tendencias de valores estacionales muestra contrastes entre verano (DEF) e invierno (JJA). En el primer caso se observa una tendencia positiva muy débil al considerar todo el período y un comportamiento no homogéneo, con una época fría hacia mediados del siglo pasado e incremento muy marcado desde la década del 60. Los registros invernales muestran un incremento uniforme y un buen ajuste lineal, con pendiente de  $0,12\text{ }^{\circ}\text{C}$  por década (figura 10). A nivel secular el incremento de la temperatura media anual es explicado en mayor medida por la tendencia invernal.

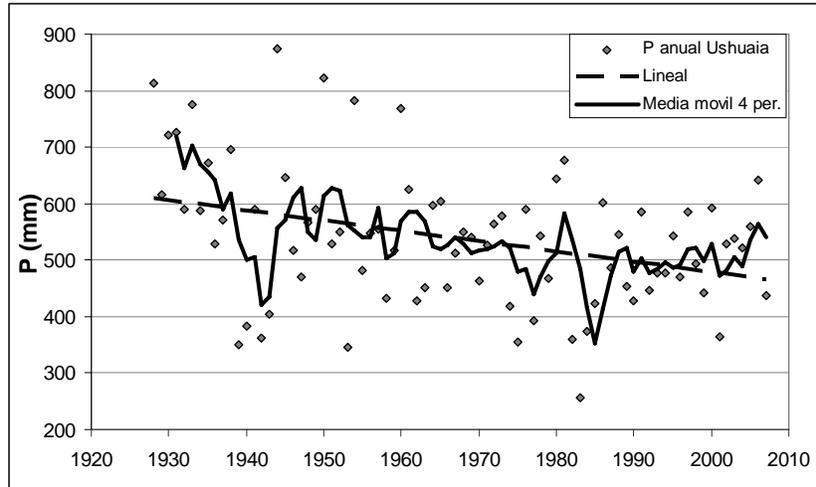


**Figura 10.** Evolución de medias de verano (DEF) e invierno (JJA) de temperatura en Ushuaia desde 1901.

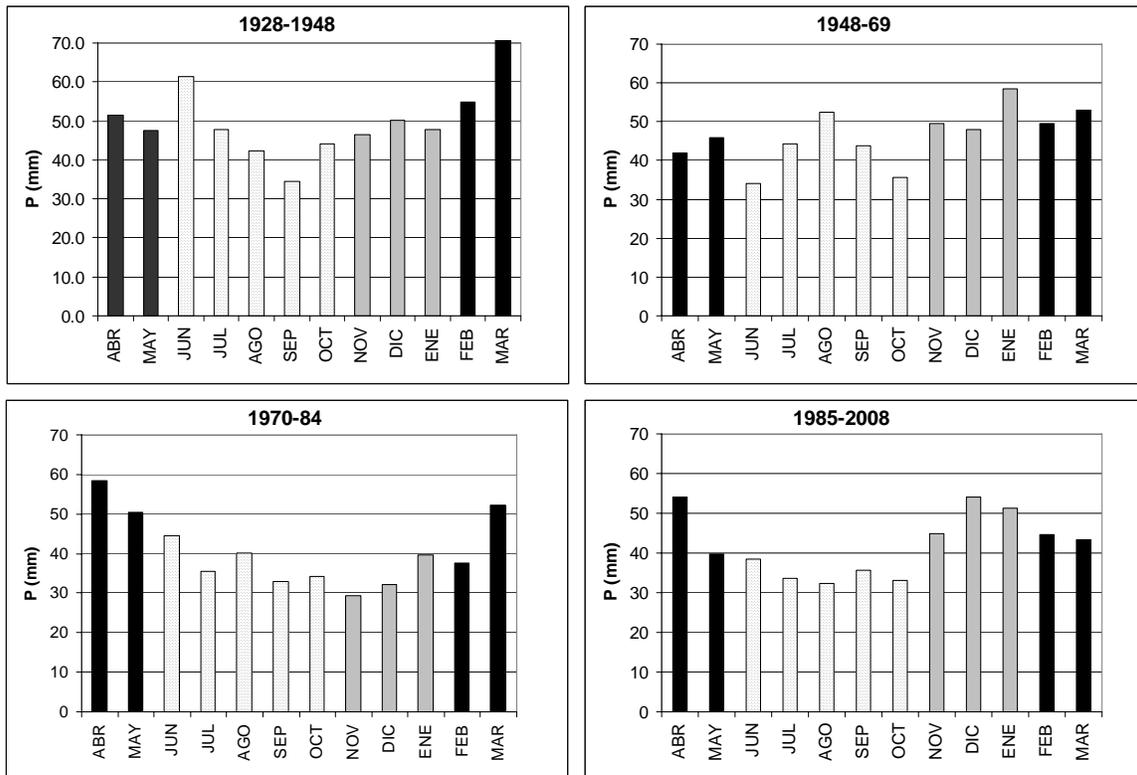
En materia de precipitación, según los registros de Ushuaia la tendencia es netamente decreciente, aunque con un incipiente incremento en la última década (figura 11). Si bien no hay marcada estacionalidad en el régimen de precipitaciones, se advierten cambios en la distribución estacional al analizar diferentes períodos de la serie histórica, con una importante reducción en los valores

mensuales durante el invierno (figura 12), lo que complementado por el incremento de la temperatura implica una reducción en la acumulación de la nieve estacional.

A nivel de precipitaciones máximas anuales, se aprecia una tendencia decreciente (figura 13), en concordancia con el comportamiento de la serie anual.



**Figura 11.** Precipitación anual en Ushuaia por año hidrológico (1927-2007)

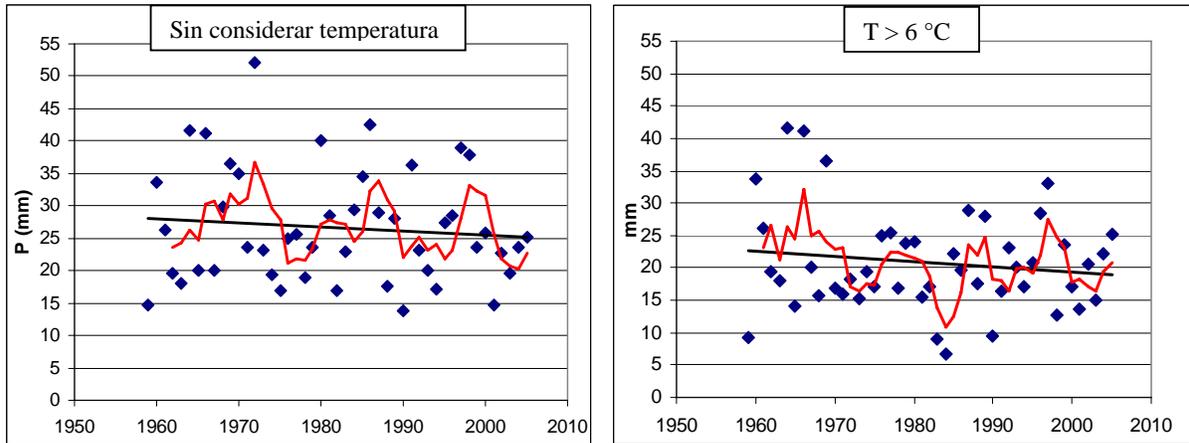


**Figura 12.** Cambios en la distribución de la precipitación mensual en Ushuaia. Se distinguen los períodos en que domina la factibilidad de situaciones de nevadas, lluvia sobre nieve y lluvias luego del agotamiento del stock de nieve estacional.

▨ Predominio de nevadas (acumulación)

▤ Episodios de lluvia sobre nieve

■ Precipitación pluvial dominante (sin nieve acumulada)



**Figura 13.** Tendencia decreciente en las precipitaciones máximas diarias en Ushuaia durante el período 1958-2007. La figura de la derecha muestra los casos con temperatura media diaria a nivel del mar  $> 6^{\circ}\text{C}$ , situación en la que se produce precipitación líquida en la mayor parte de la cuenca.

El comportamiento de los glaciares es un importante indicador del cambio climático. En la actualidad cuatro glaciares de Tierra del Fuego son monitoreados y se realiza en los mismos balance de masa. Durante el siglo XX el circo del glaciar Martial perdió  $2/3$  de la superficie englazada (Strelin e Iturraspe, 2007). Si bien la recesión glaciaria se ha manifestado durante todo el siglo XX, en muchos casos la mayor retracción se produjo desde 1970, en concordancia con el incremento de la temperatura y la disminución de la precipitación. Un caso típico es el del glaciar Vinciguerra que perdió desde 1970 el 46% de su extensión (Iturraspe et al, 2009)

### Efectos de las tendencias climáticas sobre las máximas crecidas

Considerando temperatura y precipitación como las dos variables climáticas que influyen conjuntamente en la determinación de los eventos extremos, las series de datos indican la no estacionalidad en el comportamiento estadístico de estas variables, principalmente en relación a la temperatura, cuyo comportamiento está vinculado al calentamiento global. El resultado evidente es un régimen térmico invernal más templado que propicia precipitaciones líquidas más frecuentes en esta época del año alcanzando áreas más elevadas, donde el manto de nieve puede ser significativo luego de un período precedente frío y húmedo. Las cuencas bajas y de mediana altitud serían las más afectadas ya que al incrementarse la frecuencia de eventos de precipitación líquida, aumentaría la probabilidad de ocurrencia de eventos extraordinarios como los que han sido descriptos para las cuencas mencionadas como casos 1 y 2. Sin embargo este efecto se atenúa por dos factores: a) la tendencia decreciente de la precipitación anual, lo que también se evidencia en los máximos anuales en 24 hs. y b) por la reducción en la magnitud de la acumulación de nieve estacional en las cuencas, y en su permanencia. Esta combinación de condiciones que producen efectos contrapuestos genera incertidumbre en las predicciones relativas a crecidas extremas.

La observación de crecidas históricas indica una reducción de la frecuencia de eventos máximos en cuencas altas de cordillera como la del Buena Esperanza, muy cercana a la ciudad de Ushuaia, probablemente debido a que la disminución de la acumulación de nieve estacional da lugar a la desaparición temprana de este reservorio en relación a la temporada de ocurrencia de episodios pluviales en cabeceras. Por otra parte, la reincidencia de crecidas extraordinarias en cuencas de montaña de altitud moderada y la crecida extraordinaria de 2006 en cuencas de la estepa y transición serían consecuencia de inviernos más templados en combinación con el incremento en las precipitaciones que se advierte a partir del año 2000, mas allá de que en 2006 concurren anomalías cuya probabilidad de reiteración es desconocida.

## DISCUSIÓN.

El IPCC, (2001, 2007) atendiendo a la opinión científica de mayor consenso, adjudica un peso importante a la componente antrópica del cambio climático y proyecta incrementos en la temperatura global entre 2 y 4 °C para el siglo XXI, de acuerdo a predicciones de diferentes modelos. Tales proyecciones indican aumentos tres a seis veces superiores a los que se produjeron durante el siglo XX. Un incremento de 4°C implicaría para la mayoría de las cuencas de la Provincia de Tierra del Fuego la transformación del actual régimen pluvionival en pluvial.

Por otra parte es muy difícil establecer conjeturas sobre el comportamiento de los sistemas climáticos regionales ante tal incremento en la energía de la atmósfera. Pequeños cambios en la localización dominante de los centros de alta y baja presión podrían producir importantes cambios en el régimen regional de precipitaciones.

De los resultados obtenidos a nivel regional surgen interrogantes:

a- ¿La tendencia negativa de la precipitación otorga condiciones de seguridad al extrapolar precipitaciones máximas aplicando leyes estadísticas para valores extremos?

b- Cómo considerar la influencia de los cambios en la distribución estacional de las precipitaciones sobre la frecuencia futura de eventos extraordinarios?

Seguramente la situación opuesta, a la expresada en **a-**, es decir una tendencia positiva induce la subestimación en la proyección probabilística de los eventos extremos bajo hipótesis de condición estacionaria, por lo cual podría esperarse que la estimación sobre un sesgo decreciente lleve a resultados con mayor margen de seguridad. No obstante, no existe certeza de que la tendencia negativa observada en las series no se revierta. Existen indicios en tal sentido en la última década, como ya ha sido indicado y por otra parte el IPCC (2007) considera un escenario con incremento moderado de precipitaciones en la región para el siglo XXI.

Como comentario a la segunda pregunta, puede decirse que los cambios observados en la distribución estacional de precipitaciones no indican tendencias extrapolables sino variabilidad. No es posible por lo tanto aseverar que se agudizará la reducción de precipitaciones invernales y/o el incremento en el período estival, o si por lo contrario, se restablecería la distribución típica de principios o mediados de siglo. Lo cierto es que tales cambios influyen en la definición de la modalidad más probable desencadenante de futuros eventos extraordinarios. Shaleen et al (2000) expresan que alteraciones estacionales en precipitación y temperatura derivados de pequeños cambios en el estado de la línea de base del clima pueden tener significantes impactos en la frecuencia y magnitud de las grandes crecidas.

El caso de cuencas con régimen pluvionival, dependiente de dos variables principales: precipitación y temperatura requiere de análisis bi-variado de frecuencias de los eventos extremos, a los que Benestad et al (2007) denominan eventos extremos complejos. En estos casos es evidente que la metodología tradicional de análisis de extremos de una variable, que generalmente es la precipitación no responde a la interpretación de este tipo de problema, y esto es independiente de la incidencia del cambio climático. Los problemas derivados del régimen pluvionival de las cuencas de Tierra del Fuego y de la sensibilidad de eventos extremos a la variabilidad climática se replican, con los matices propios de cada caso en gran parte de la eco-región Andino-Patagónica y si bien la bibliografía internacional muestra experiencias con aplicaciones innovadoras al análisis de valores extremos clásicamente estacionario, hay muy pocos trabajos a nivel regional o nacional con nuevos enfoques en este sentido. Asimismo es necesario trabajar en la continua actualización de los

escenarios climáticos factibles, así como en la escala de detalle, especialmente en los ambientes de montaña fuertemente transicionales, de notables contrastes, como ocurre en Tierra del Fuego.

## **CONCLUSIONES**

Las evidencias a nivel regional ratifican el carácter no estacionario de variables climáticas determinantes de crecidas extremas que generan incertidumbre en la estimación de los valores extremos esperados. Es necesario en consecuencia incorporar nuevas metodologías al manejo de los recursos hídricos en materia de diseño de obras y prevención de riesgos que permitan considerar la sensibilidad del régimen hidrológico a las tendencias climáticas identificadas, evitando como base única el análisis estadístico clásico de series históricas.

Particularmente en el caso de cuencas con régimen de escurrimiento pluvionival, dependiente de dos variables principales, que además responden a un comportamiento no estacionario, el análisis de eventos extremos alcanza un mayor nivel de complejidad. Al momento de definir parámetros de diseño de obras hidráulicas, normalmente el objetivo es asegurar la durabilidad y operación de la obra con márgenes de probabilidad más o menos estrictos según el caso durante la vida útil de la misma. Pero en ciertos casos, como en el de las grandes presas asentadas aguas arriba de poblaciones, debe asegurarse que la estructura resista los eventos extremos sin probabilidad de falla, no sólo durante la vida útil de la misma sino durante el tiempo que la estructura permanezca en su emplazamiento. Por ello el caudal de diseño es el correspondiente a la crecida máxima probable, pero además debería agregarse que esta condición debe ser satisfecha para cualquier escenario climático probable, lo cual es un concepto que normalmente no es considerado.

Esta nueva pauta obliga a apelar a metodologías que reduzcan el nivel de incertidumbre en el diseño, tales como la incorporación de modelos no estacionarios al análisis de valores extremos (Xu-Feng, 1997, El Adlouni, 2008). La validación en estos casos, debe propender a realizarse utilizando herramientas modernas de modelación matemática y simulación en tiempo continuo con las que se compruebe la respuesta de la cuenca bajo los diferentes escenarios climáticos considerados, teniendo en cuenta además escenarios de desarrollo y cambios en el uso de la tierra.

Es evidente que se abre un nuevo paradigma para la ingeniería de proyecto y en general para el manejo de los recursos hídricos que implicará la necesidad de contar con información geográfica muy pormenorizada y con series de datos más extensas y detalladas, así como incorporar más variables, que alimentarán modelos matemáticos más complejos y precisos. Se requerirán nuevos insumos, basados en escenarios climáticos, que deberán atender a los requerimientos del caso: frecuente actualización, mejor resolución espacio-temporal y especial énfasis en eventos extremos a nivel diario. Se espera que con los avances en las ciencias de la atmósfera, tales escenarios tiendan a reducir incertidumbre y a mejorar en convergencia. La incorporación de proyecciones del desarrollo socioeconómico y el análisis de su impacto en el uso de la tierra y en el manejo de los recursos hídricos es el otro aspecto de gran importancia a ser considerado.

## **Agradecimientos**

Los autores agradecen al personal técnico de la Dirección de Recursos Hídricos de Tierra del Fuego por el importante trabajo de campo realizado que ha permitido la obtención de información hidroclimática de base. El presente trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto EPIC FORCE, Unión Europea (Contrato INCO-CT2004-510739), los proyectos financiados por GEF-PNUMA denominados “Estudios Glaciológicos para la planificación de usos del agua en escenarios de cambio climático” y “Estrategias de ordenación de recursos hídricos para la cuenca binacional del Río Grande de Tierra del Fuego” y los proyectos de la UNPSJB “Monitoreo de glaciares

vinculados a las fuentes de agua de la ciudad de Ushuaia” y “Glaciología, Hidrología e Hidroinformática aplicadas a la investigación del impacto del cambio climático sobre los glaciares y el régimen de los cursos de montaña de Tierra del Fuego”

## REFERENCIAS

- Abbott, M., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J.** (1986). An introduction to the European hydrological system –Système hydrologique European (SHE). 2: Structure of a physically based, distributed modelling system. *J. of Hydrology* 87, 61-77
- Bathurst, J. C. & P. E. O'Connell** (2006) Future of distributed modelling: The Systeme Hydrologique European, *Hydrologica Processes* (6)- 3, 265-2177
- Benestad, R. E. and Haugen, J. E.** (2007). On complex extremes: flood hazards and combined high spring-time precipitation and temperature in Norway. *Climate Change*: 85, pp381-486
- El Adlouni, S. and Ouarda, T. B. M. J.** (2008) Comparaison des méthodes d'estimation des paramètres du modèle GEV non-stationnaire, *Revue des Sciences de l'Eau*, 21(1), 35–50, 2008.
- IPCC** (2001). *Climate Change 2001: The Physical Science Basis*. (eds.) J. T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden and D. Xiaosu. Working Group 1 Contribution to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- IPCC** (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* Solomon, S, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Iturraspe R, Urciuolo A, Guerrero V, Gaviño M, Collado L, Sarandón R, Burns S.** (2007). Report on basin response for Argentina (D18), in: EPIC FORCE PROJECT Deliverables. Newcastle Univ. URL: [www.ceg.ncl.ac.uk/epicforce/assets/D18.pdf](http://www.ceg.ncl.ac.uk/epicforce/assets/D18.pdf)
- Iturraspe, R., Urciuolo, A., Strelin, J., Iturraspe, R.<sup>(h)</sup>, Camargo, S. y Pacheco, J.** (2009). El retroceso del Glaciar Vinciguerra como respuesta al cambio climático en los Andes de Tierra del Fuego, Argentina. En: *Glaciares, nieves y hielos de América Latina. Cambio climático y amenazas*. López Arena y Ramírez Cadena (Compiladores). Ingeominas. Bogotá, Colombia.
- Iturraspe, R., Urciuolo, A. and Bathurst, J.** (2009). Caracterización de crecidas extremas en Tierra del Fuego. *Actas del XXII Congreso Nacional del Agua, Puerto Madryn, 2009*.
- Knox, J.C.** (2000) Sensitivity of modern and Holocene floods to climate change. *Quaternary Science Rev.* 19, 439-457.
- Mao, L., Burns, S., Comiti, F., Andreoli, A., Urciuolo, A., Marcelo Gaviño-Novillo, M., Iturraspe, R. y Lenzi, M.A.** (2008). Acumulaciones de detritos leñosos en un cauce de montaña de Tierra del Fuego: análisis de la movilidad y de los efectos hidromorfológicos. *Bosque* 29(3), 2008.
- Milly PC, Betancourt J, Falkenmark M, Hirsch RM, Kundzewicz ZW, Lettenmaier DP, Stouffer RJ.** *Climate change* (2008). Stationarity is dead: whither water management? *Science*. 2008 Feb 1;319(5863), pp 573-574
- Strelin, J., Iturraspe, R.,** 2007. Recent evolution and mass balance of Cordón Martial glaciers, Cordillera Fueguina Oriental. *Glob. Planet. Change.* (59) pp 17-26
- Shaleen J. and Upmanu L.** (2000). Magnitude and timing of annual maximum floods: Trends and large-scale climatic associations for the Blacksmith Fork River, Utah. *Water Resources Research*, Vol 36, 12, pp 3641–3651.
- Xu-Feng N.** (1997). Extreme value theory for a class of nonstationary time series with applications. *The Annals of Applied Probability* 1997, Vol. 7, 2, pp. 508-522