



UNIVERSITAT DE  
BARCELONA

## La reconstrucción de la dinámica fluvial y su conexión con la variabilidad climática a partir de fuentes documentales y registros instrumentales

Juan Carlos Peña Rabadán

**ADVERTIMENT.** La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX ([www.tdx.cat](http://www.tdx.cat)) i a través del Dipòsit Digital de la UB ([diposit.ub.edu](http://diposit.ub.edu)) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

**ADVERTENCIA.** La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR ([www.tdx.cat](http://www.tdx.cat)) y a través del Repositorio Digital de la UB ([diposit.ub.edu](http://diposit.ub.edu)) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

**WARNING.** On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX ([www.tdx.cat](http://www.tdx.cat)) service and by the UB Digital Repository ([diposit.ub.edu](http://diposit.ub.edu)) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

## **5. ÍNDICE ESTIVAL DE DAÑOS POR AVENIDAS E INUNDACIONES (INU)**

## 5. ÍNDICE ESTIVAL DE DAÑOS POR AVENIDAS E INUNDACIONES (INU)

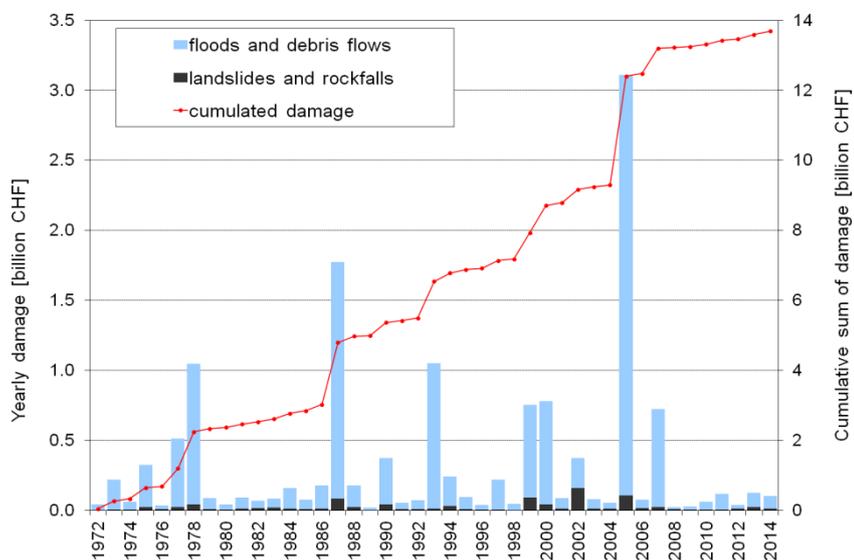
### 5.1. Estado de la cuestión

Se ha observado un aumento de la frecuencia de los daños por inundaciones en Suiza, con una marcada tendencia positiva a partir de los años 70 del siglo pasado (Gees, 1997; Hegg et al., 2000) y, en consecuencia, un aumento de los perjuicios relacionados a riesgos hidromorfológicos. La figura 5.1 muestra la evolución de los daños debidos a aspectos hídricos (barras en color azul) y los debidos a aspectos geomorfológicos (barras en color negro) en la Confederación Helvética entre los años 1972 y 2014. La figura muestra que la totalidad de los daños causados suman un valor de casi 13.700 millones de francos suizos (teniendo en cuenta la inflación tomando como base el año 2007), si bien estos daños están relacionados a unos pocos eventos. El evento del 21/22 de agosto 2005 con daños por valor de casi 3.000 millones de francos suizos, ha sido la inundación más con más daños en Suiza desde 1972.

Figura 5.1. Evolución de los daños por inundaciones y movimientos de tierras en el periodo comprendido entre el año 1972 y 2014 (teniendo en cuenta la inflación tomando como base el año 2007).

Fuente:

<http://www.wsl.ch/fe/gebirgshydrologie/HEX/projekte/schaden-datenbank/index> EN.



Los datos geomorfológicos, históricos e instrumentales proporcionan evidencias de daños y estimaciones de descarga de las inundaciones históricas graves y catastróficas (Schulte et al., 2015). A diferencia de las estaciones de aforo urbanas (por ejemplo, la estación de Basel-Rhein, en funcionamiento desde el año 1808), las series de datos instrumentales referentes a mediciones hidrológicas en los Alpes se remontan a los

últimos 100 años y muchas de las series se ven afectadas por la falta de inundaciones que se produjo entre los años 1937 y el 1977 (Gees, 1997). El problema fundamental estriba en que las pulsaciones seculares del clima (por ejemplo, durante la Pequeña Edad de Hielo) y los eventos extremos de baja frecuencia no pueden ser registrados por estas series de corta duración. Por esta razón, es difícil evaluar con confianza las inundaciones con un periodo de retorno de >200 años utilizando series instrumentales y, por tanto, se han de utilizar otro tipo de métodos. Por ejemplo, la reconstrucción de las inundaciones a partir de fuentes documentales como crónicas, memorias, pinturas y marcas de inundación, proporcionan datos de Suiza durante aproximadamente los últimos 750 años (Röthlisberger, 1991; Pfister, 1999; Wetter et al., 2011), abarcando los últimos ciclos climáticos del Holoceno: el final del Periodo Cálido Medieval, la Pequeña Edad de Hielo y el calentamiento del siglo XX.

La precisión y la continuidad de las series de datos de las inundaciones históricas pueden variar con el tiempo. En particular, la información sobre las categorías de pequeño y medio impacto es limitada antes del año 1850. Los datos se hicieron más fiables a partir de esta fecha, en primer lugar por la creación de la Ley Federal suiza relativa a la regulación de los sistemas fluviales en el año 1854 y, en segundo lugar, a la mayor información disponible en la prensa. En cambio, en referencia a los episodios de inundaciones graves y catastróficas, varios autores (Röthlisberger, 1991; Gees, 1997; Pfister, 1999; Wetter et al., 2011) señalan que, en general, la información está bien registrada en el conjunto de Suiza debido a su gran impacto en la sociedad.

La reconstrucción de las inundaciones se puede realizar utilizando diferentes métodos (Pfister, 1988; Pfister y Hächler-Tanner, 1991). Las mediciones de caudales se iniciaron a mediados del siglo XIX. Los valores extremos permiten cuantificar y categorizar las inundaciones siendo este método de reconstrucción el preferido por ingenieros y sirve principalmente como base para el cálculo de las probabilidades de inundación. El problema principal del método es que los niveles registrados durante el s. XX han estado en muchas regiones de Europa por debajo de los niveles alcanzados durante las últimas etapas de la Pequeña Edad de Hielo (Glaser et al., 2005; Wetter et al., 2011; Schulte et al., 2015; Benito et al., 2015).

Para la reconstrucción de las inundaciones históricas hay que recurrir a otras fuentes que fundamentalmente son tarea del historiador. Se basan en fuentes escritas de varios tipos y en las llamadas fuentes tangibles (marcas de inundación, restos arqueológicos):

- Las fuentes escritas se han utilizado principalmente para preparar cronologías de inundación, en el contexto de las reconstrucciones climáticas o como marco para abordar los temas ambientales e históricos. La compilación de estas fuentes, a menudo muy heterogéneas, implica una serie de problemas de código crítico que acaban siendo ignorados por la mayoría de los investigadores, pero no así por los historiadores (Pfister y Hächler-Tanner, 1991; Barriendos y Martín-Vide, 1998).
- Las marcas de inundación se han empleado para la reconstrucción de caudales históricos y paleo-caudales. Se basan en los avances en el campo de la hidrología y de los modelos hidrológicos (Wetter et al., 2011; Benito et al., 2015).

Una de las peculiaridades de las fuentes históricas es que son particularmente sensibles a los fenómenos extremos. En los siglos XVI y XVII los eventos, por lo general, están descritos de forma breve y lacónica, pero se supone que las inundaciones graves y catastróficas han sido registradas en su totalidad (Pfister y Hächler-Tanner, 1991). Durante el siglo XVIII los informes se detallan de forma más minuciosa desde un punto de vista espacial y temporal, relacionándose cada vez más a causas meteorológicas (Pfister y Hächler-Tanner, 1991). Ya en el siglo XIX las descripciones de las grandes catástrofes hídricas están escritas por profesionales o laicos educados, relacionando el daño a un valor monetario. Así pues, la base de la fuente de datos no siempre es uniforme, aunque la información desde el siglo XVIII es densa y, por tanto, excluyendo cada vez más los problemas de homogeneidad (Pfister y Hächler-Tanner, 1991).

En Suiza los trabajos de Pfister (1988, 1999) y posteriormente de Hächler-Tanner (1991) o de Röthlisberger (1991) y la compilación realizada por Gees (1997), esta última es la utilizada en esta tesis, trataron de abordar el problema desde un enfoque interdisciplinario:

- La creación de una cronología de inundaciones fue realizada teniendo en cuenta los enfoques descritos anteriormente, pero con una perspectiva histórico-crítica, por lo que los datos así obtenidos se interpretaron desde su base con un objetivo

científico. Las reconstrucciones resultantes y los resultados alcanzados pueden ser utilizados no sólo para un conocimiento de los eventos extremos en el pasado, sino también para la investigación histórica y las ciencias sociales.

- Las reconstrucciones se crearon a partir de la documentación procedente de historias y estudios regionales, monografías locales, diarios, crónicas, informes oficiales de daños, actas de consejos de ayuntamientos, datos procedentes de la ingeniería hidrológica, hidráulica y forestal, literatura científica y revistas cantonales.
- Cada fuente se evaluaba desde un punto de vista histórico-crítico. Del análisis de las crónicas se ha deducido que existe una mezcla de datos fiables y no fiables, donde la tasa de error puede llegar a ser del 50% (Pfister y Hächler-Tanner, 1991). Los informes de testigos oculares identificados como autores de la fuente escrita u oral, se certifican como fuentes seguras. Los detalles no contemporáneos al evento son incluidos sólo en aquellos casos en los que el evento en cuestión ya era conocido de fuentes seguras.
- La clasificación de la magnitud de las inundaciones se realizó en función de los daños recopilados y la superficie de las zonas afectadas. A parte de la cantidad estimada de los daños realizadas por expertos (a partir de 1834), se tuvieron en cuenta aquellos elementos objetivos de descripciones de daños que ofrecen una mayor garantía de comparabilidad entre los siglos, como puede ser la destrucción de puentes, presas, carreteras, casas y la información sobre las zonas inundadas.

## **5.2. Métodos. El índice INU: índice hídrico estival de daños por inundaciones**

Se aborda un análisis de la frecuencia de las grandes avenidas en Suiza para el periodo 1800-2010. Si bien es cierto que existen para la Confederación Helvética detalladas descripciones de avenidas y grandes inundaciones (Vischer, 1989, 2003; Hächler, 1991; Rötliberger, 1991, 1992; Lehmann y Naef, 2003; Gees, 1997, 1998; Burger, 2008; Hilker et

al., 2009; Schmocker-Fackel y Naef, 2010a), e incluso el uso de diferentes índices hídricos como parámetros para estudios en variabilidad climática e hídrica (Pfister and Dietrich-Felber, 2008; Schmocker-Fackel and Naef, 2010a, 2010b), se ha creado un índice hídrico basado en los daños producidos por las grandes avenidas que sintetiza tanto la severidad de los eventos como su extensión espacial.

La finalidad es determinar la variabilidad y la frecuencia de las inundaciones a partir de una combinación de registros instrumentales con otros proxy-data siendo las fuentes documentales las que adquieren una mayor importancia para tal propósito. La validación y calibración del índice permite la reconstrucción climática causante de los eventos hídricos extremos a través de la más que probable conexión con los forzamientos endógenos (clima) y exógenos (actividad solar), y reconocer como estos forzamientos influyen en los cambios que de forma cíclica se producen en los modos de circulación atmosférica a gran escala y los patrones de circulación sinóptica causantes del riesgo hídrico. Estos cambios en la circulación atmosférica han sido identificados como uno de los motores y los responsables en las fluctuaciones de la frecuencia de las grandes avenidas y las inundaciones detectadas durante la última época del Holoceno (Knox, 2000; Wanner et al., 2004; Schmocker-Fackel y Naef, 2010a).

El índice por daños debidos a inundaciones se calcula por separado para cada una de las regiones definidas y de forma integrada para la totalidad de Suiza, con el objetivo de evaluar los diferentes patrones que explican la variabilidad temporal en la frecuencia de las avenidas e inundaciones. De esta manera, el índice (INU) se estima, en primer lugar, a partir de una segmentación en regiones de la matriz que contiene la información hídrica (ver capítulos 2 y 4), y en segundo lugar, a partir de una aproximación del fenómeno analizado al concepto de riesgo (R), en el que se combinan los conceptos de Exposición (E) y Vulnerabilidad (V), a partir de la relación  $R = E * V$ , es decir, el riesgo asociado a un suceso.

La estimación de E se realiza a partir de los daños generados por las avenidas e inundaciones como señal de la exposición de los bienes. La categoría de cada uno de los daños se ha definido en el capítulo 2. A cada una de las categorías se le otorga una magnitud, de tal modo que, para las avenidas o inundaciones catalogadas como 'l' se les otorga un valor de 1, las definidas como 'm' se les asigna un valor de 2, las 's' tendrán un valor de 20, a las 'vs' el valor será de 50, mientras que las 'c' se les asigna un valor de 100. El resultado final es que cada episodio queda sintetizado por un valor de E que varía entre 2 y 100, facilitando un análisis de la

frecuencia del riesgo analizado. La estimación de  $V$ , definida simplemente como una distribución espacial del fenómeno, se hace en base a los cantones que han estado implicados en la inundación. Finalmente, aplicando la expresión anterior obtenemos un valor de  $R$  para cada evento.

$$R_K = \sum_{i=1}^m E_i * V_i \quad (1)$$

donde  $K$  es el número de identificación de la inundación (ordinal de 1 a  $N$ , siendo  $N$  el número total de las inundaciones identificadas a partir de los registros documentales e instrumentales);  $m$  es el número de los cantones afectados en la inundación número  $K$ ;  $E_i$  es el daño producido por la inundación  $K$  y en el cantón  $i$ ; y  $V_i$  es la vulnerabilidad de la inundación  $K$ . En nuestro caso siempre  $V_i = 1$  ya que el número de cantones implicados viene determinado por  $m$ .

El índice INU se calcula a partir de la integración de todos los valores de  $R$  con una resolución anual:

$$INU_{year} = \sum_{i=1}^j \sum_{K=1}^n R_K \quad (2)$$

$INU_{year}$  es el valor de INU para un año determinado;  $j$  es el número de los meses (de 1 a 12);  $n$  es el número de eventos en un mes  $j$  dado. Finalmente, cada  $INU_{year}$  está estandarizado, basado en la media y la desviación estándar, parámetros calculados para el periodo 1800-2010.

### 5.3. Resultados

Un total de 382 inundaciones de categoría muy severa (vs) y catastrófica (c) han afectado Suiza en el periodo 1800-2010. Los cantones más afectados (ver figura 5.2) son las regiones 2 (vertiente norte de los Alpes y meseta central) y 3 (vertiente sur de los Alpes).

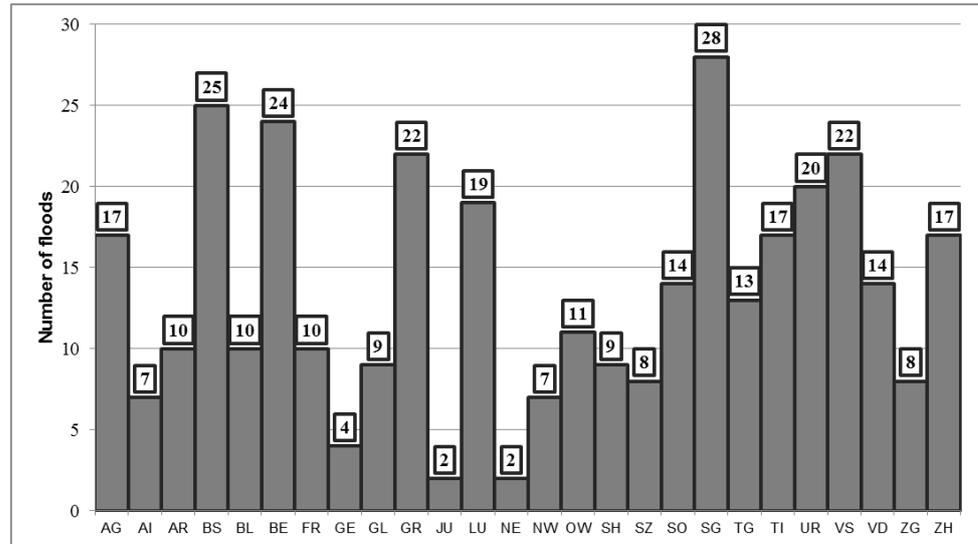


Figura 5.2. Distribución cantonal de las inundaciones de categoría vs y c en el periodo 1800-2010.

### 5.3.1. Distribución mensual y anual de las inundaciones en Suiza

Existe un marcado ritmo anual y estacional (ver figura 5.3) siendo la época estival (meses de junio, julio y agosto) donde se concentra más de un 60% de eventos de este tipo, aumentando hasta el 71% si incluimos el mes de septiembre, periodo que correspondería al verano extendido. La distribución mensual muestra un máximo en el mes de agosto con un 25% del total de los eventos y dos mínimos localizados en los meses de febrero y diciembre con un 2%, siendo los meses invernales cuando existe el mínimo anual con un 6% del total. Finalmente añadir que, durante el periodo analizado, las inundaciones de categoría vs y c se han registrado en gran parte durante los meses de julio y agosto. Similares resultados reportan [Schmocker-Fackel and Naef \(2010a\)](#) en que las inundaciones son predominantes entre junio y octubre, mientras que de noviembre a febrero sólo se registran el 10% del total, aumentando al 20% en Basel y la cuenca del Thur. Para los Alpes Berneses, ([Schulte et al., 2015](#)) señalan que 33 de los 35 sucesos notificados (94%) se produjeron durante el periodo de verano extendido (entre los meses de junio a septiembre). Esta distribución temporal es consistente con los hallazgos de [Weingartner et al. \(2003\)](#), que analizó los datos de inundación instrumentales de 85 cuencas alpinas en Suiza. Además en los últimos 500 años no observan ningún cambio en las frecuencias estacionales. Igualmente [Wetter et al., 2011](#) certifican que el 52% de las mayores inundaciones que afectaron a Basel en verano, principalmente se registraron en julio y agosto. [Aebischer \(1997\)](#) muestra cómo estos

eventos extremos están causados por episodios de lluvia intensa en combinación con un nivel alto del flujo de base debido a la fusión de la nieve y una isocero situada a 2.500 m por lo que nieva sólo en partes altas, aumentando la superficie para la generación de escorrentía.

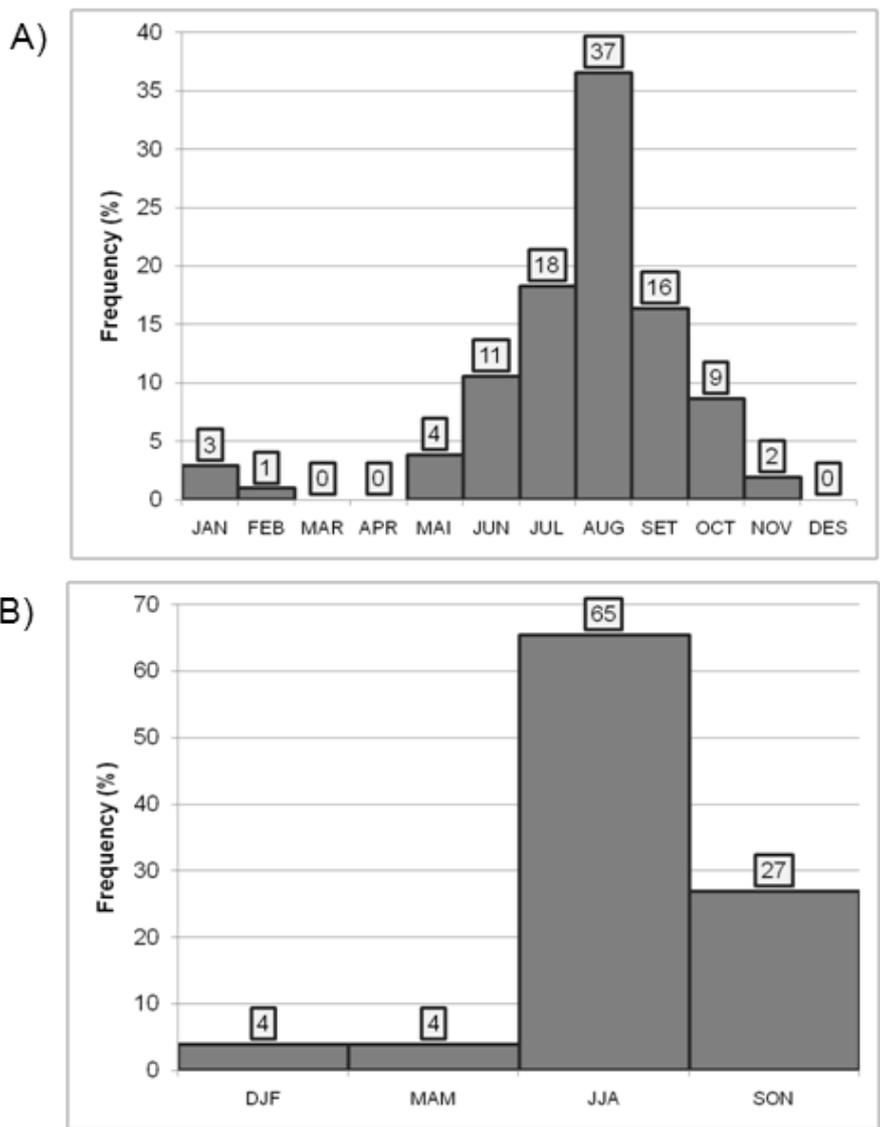


Figura 5.3.

A) Distribución mensual de las inundaciones en Suiza de categoría muy grave (vs) y catastrófica (c) para el periodo 1800-2009.

B) Distribución estacional de las inundaciones de categoría vs y c. DEF: diciembre-enero-febrero; MAM: marzo-abril-mayo; JJA: junio-julio-agosto; SON: septiembre-octubre-noviembre.

Es por esta última razón que el análisis se centrará en el denominado High Summer definido para los meses de julio y agosto que con un porcentaje que supera el 45% (90 eventos) del total de las inundaciones identificadas, no sólo facilita el tratamiento estadístico reduciendo el tamaño de la muestra pero incluyendo los eventos más violentos (la mayoría de las inundaciones catastróficas (c; 60%) en el periodo 1800-2010 ocurrieron durante estos dos meses), sino que, además, es en estos dos meses cuando el clima de verano en el sector del Atlántico Norte de

Europa está sintetizado por un patrón principal de variabilidad anual que es paralelo a la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) de invierno. Este patrón es conocido como la Summer NAO (ver capítulo 8), y queda definido para los meses de julio y agosto como la principal Función Empírica Ortogonal (EOF) observada para la presión media a nivel del mar en la zona extra-tropical y ejerciendo una fuerte influencia en las lluvias del norte de Europa, la temperatura y la nubosidad a través de cambios en la posición de la trayectoria de las tormentas no sólo en el Atlántico Norte (Folland et al., 2009), sino también en otras zonas más meridionales del continente europeo (Bladé et al., 2011).

### 5.3.2. INU anual estandarizado: Los periodos de alta y baja frecuencia de las inundaciones

La figura 5.4a muestra el índice anual de daños por inundaciones de acuerdo con la contribución de cada región. El índice  $INU_{year}$  captura la alta variabilidad temporal de las inundaciones que muestran una alternancia de periodos de alta frecuencia con periodos de ausencia o muy baja frecuencia. La ventaja que ofrece el  $INU_{year}$  es que facilita el proceso de las series temporales desde un punto de vista estadístico. La figura 5.4b muestra los valores anuales para Suiza. La información mostrada se ha obtenido a partir de la siguiente expresión:

$$INU_{SWS} = \left( \sum_{i=1}^N INU_{year_i} \right) * \frac{1}{N} \quad (3)$$

donde  $INU_{SWS}$  es el valor del índice integrado de Suiza para un año determinado,  $i$  es el número de región,  $INU_{year}$  es el índice anual para la región  $i$  y  $N = 5$  (número total de regiones). Por último, el nuevo conjunto de datos se normalizó por la media y la desviación estándar del periodo 1800-2010. Se indican aquellos periodos con una alta frecuencia de inundaciones (el sombreado gris en la figura 5.4b) identificados con respecto a los valores  $INU_{SWS}$  que superan la media más de 1,5 veces la desviación estándar.

El primer periodo definido por una alta frecuencia de las grandes inundaciones (figura 5.4b) se extiende desde 1817 hasta 1851; el segundo periodo de 1881 a 1927, a pesar de que algunas inundaciones se siguen produciendo, aunque con menos frecuencia, hasta 1951 (ver figura 5.4a); los dos últimos periodos se registraron en el periodo 1977-1990 y del año 2005 hasta la actualidad. Desde el año 1800, el evento de inundación registrado durante agosto del 2005 fue el que ha causado los daños más

grave (3,1 millones de francos suizos), seguido por la inundación del verano de 1987 (1,77 millones de francos suizos).

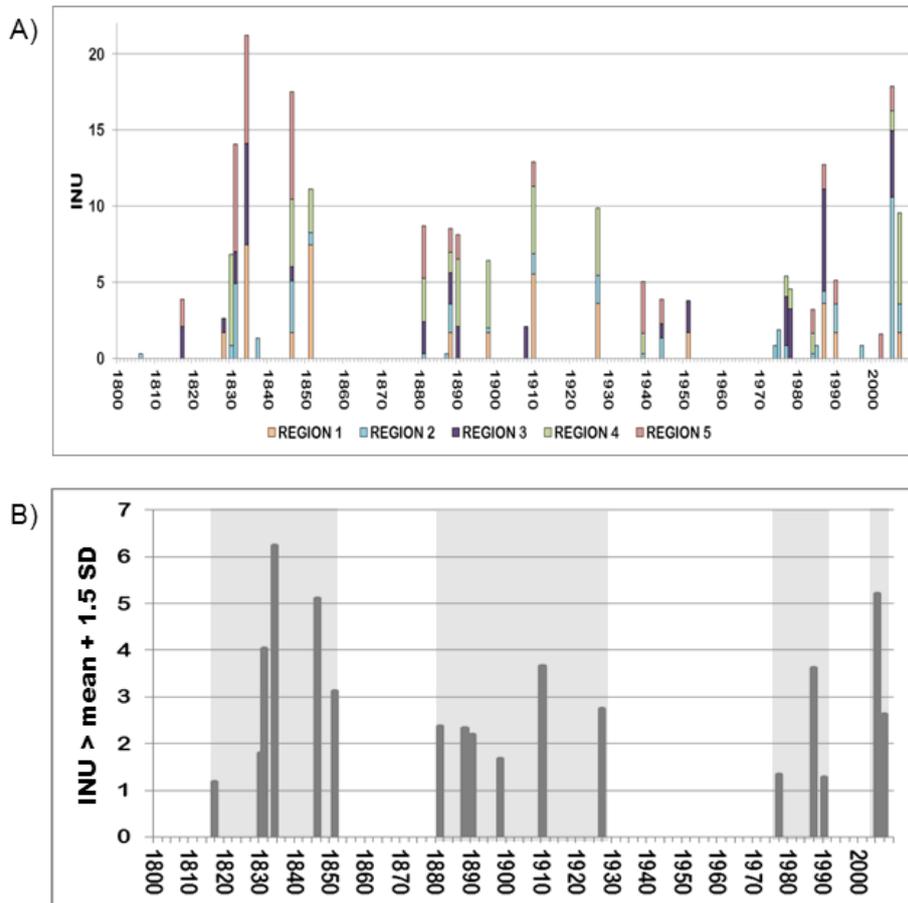


Figura 5.4.

A) Índice de daños por inundaciones regionalizado en Suiza para el período 1800-2010.

B) Valores de  $INU_{sws}$  que han superado 1,5 veces la desviación estándar. Los periodos con alta frecuencia de las inundaciones se encuentran sombreados en gris.

## 5.4. Discusión

La información original disponible (con una resolución cantonal) ha permitido hacer diversos ensayos previos para la estimación del índice INU con el fin de decidir la mejor aproximación a la variabilidad de las grandes inundaciones en Suiza. Se han analizado tres métodos, siempre en base a la metodología explicada en el apartado 5.4: el primero estima  $INU_{sws}$  para la totalidad de Suiza (índice integrado) a partir del número de cantones implicados; el segundo en base a la superficie ponderada de los cantones, por tanto, también se trata de un índice integrado; y el tercero a partir de la regionalización hidro-climática de Suiza. Los dos primeros han presentado serias limitaciones, mientras que el tercero se puede considerar como una solución de compromiso de los dos anteriores, minimizando los problemas detectados.

- La estimación del índice  $INU_{sws}$  a partir del número de cantones implicados. Limitaciones.

En un principio se calculó el índice de daños por inundaciones para toda Suiza teniendo en cuenta las pérdidas generadas para cada cantón en base a la ecuación (1). El problema fue precisar la vulnerabilidad ( $V$ ) de cada evento. La idea de determinar  $V$  en base a los cantones involucrados puede parecer, a primera vista, una solución sensata. Sin embargo, los resultados obtenidos mostraron un importante sesgo debido a las superficies diferentes de los cantones. A modo de ejemplo, vamos a suponer un evento de inundación de daño  $E$  similar, por ejemplo, en torno a los 120 millones de francos suizos, y una extensión espacial similar: la cuenca del Thur y el Oberland bernés. En el primer caso,  $V$  es igual a 5 ya que implica a los cantones de AI, AR, SG, TG, ZH (ver tabla 2.1 en el capítulo 2); en el segundo caso  $V$  es igual a 1 al involucrar sólo el cantón de Berna (BE). Es decir, en el primer caso se asume que un 20% de Suiza se ve afectada (5/26, siendo 26 el número total de cantones); en el segundo caso menos de un 4% (1/26) del territorio suizo se vería involucrado. Se trata pues de una diferencia significativa. Además, abordar el problema desde este punto de vista afectaba dramáticamente los resultados finales:

- En el caso de la cuenca del Thur: los daños de 120 millones de francos suizos de un evento catastrófico equivale a una  $E = 100$  y una  $V = 5$ . Por lo tanto, según la ecuación (1),  $R = 500$
- En el caso del Oberland bernés: los daños de 120 millones de francos suizos de un evento catastrófico equivale a una  $E = 100$  pero la  $V = 1$ , por lo que  $R = 100$ .

Teniendo en cuenta estas consideraciones, los resultados obtenidos muestran diferencias muy importantes que resultan de la sobreestimación de los daños debidos a la superficie del número de cantones implicados. Es decir, cantones de pequeño tamaño tienden a tener más peso que cantones de mayor superficie. Debido a este problema se ha procedido al ensayo presentado en el punto siguiente.

- El índice  $INU_{SWS}$  a partir del método del área ponderada. Limitaciones.

El problema planteado reveló como posible solución dar un peso ( $W$ , adimensional) a cada uno de los cantones en relación a su extensión. El método utilizado fue el siguiente.  $W$  se calculó en base a la superficie de Zúrich, que es el cantón de mayor población relación a su superficie, siendo el peso igual a la unidad en este cantón, y para el resto de cantones, se dividía su superficie entre la de Zúrich. El valor de  $W$  sustituía al valor  $V_i$  en la ecuación (1):

$$R_K = \sum_{i=1}^m E_i * W_i \quad (4)$$

donde  $W_i$  es el peso de cada cantón.

La solución parecía razonable pero entonces emergieron nuevos problemas que igualmente estaban implícitos la estimación de  $INU_{SWS}$  en base al número de cantones: no se tenía en cuenta los factores geográficos, muy especialmente la demografía y los bienes expuestos. También se podrían reseñar otros como la topografía o la ubicación de los embalses. El problema se invirtió respecto al punto anterior: cantones pequeños con gran densidad demográfica y, por consiguiente, con bienes expuestos, perdían importancia a favor de los grandes, especialmente situados en el sur con una densidad menor y bienes expuestos menores (ver capítulo 2, apartado 2.1.3). En definitiva, se observó una sobrevaloración de los cantones de mayor superficie con una baja densidad demográfica respecto a los daños detallados.

- Una solución de compromiso: el índice  $INU$  en base a la regionalización hidro-climática de Suiza.

A pesar del importante inconveniente que supone una clasificación construida a partir de las unidades administrativas (cantones) y que en algunos casos puede incluir diferentes unidades fisiográficas, la regionalización hidro-climática final muestra, tal como se ha indicado en el capítulo 4, dos patrones de variabilidad espacial relacionada con las principales fuentes de humedad que afectan Suiza: la procedente del Mediterráneo y la

del Atlántico. El primer patrón se define por una sección transversal norte-sur, mientras que el segundo está vinculado a una sección transversal de oeste a este. Teniendo en cuenta estos resultados, la clasificación final presenta cinco regiones diferentes que son consistentes con otras clasificaciones hidrográficas desarrolladas para Suiza. No es una solución óptima pero tiene la ventaja que minimiza los problemas arriba apuntados. El cálculo del índice de daños por inundaciones en base a esta clasificación homogeniza los resultados finales al contar cada región hidroclimática con una extensión y bienes expuestos comparables. De esta manera, el índice captura de manera más objetiva y homogénea la alta variabilidad temporal de las inundaciones que muestran la alternancia de periodos de alta frecuencia de grandes inundaciones con los de muy baja frecuencia. A pesar de todo, hay que tener en cuenta que la división del área de investigación en cinco regiones a partir de unidades de carácter administrativo, incluso llevada a cabo con métodos estadísticos adecuados, puede dificultar una interpretación dinámica más precisa. Quizás hubiera sido más coherente y sencillo distinguir con precisión entre las vertientes norte y sur de los Alpes, tal como han indicado algunos autores (Schmocker-Fackel and Naef, 2010a). Pero dada la gran información disponible y en base de los meritorios resultados obtenidos en la regionalización, hemos creído conveniente utilizar las cinco regiones, mucho más homogéneas desde un punto de vista geográfico que la simple división norte-sur, para explicar la dinámica y mecanismos de la variabilidad de las inundaciones en el país alpino.

#### **5.4.1. Patrones espaciales en la evolución del número de inundaciones**

La evolución temporal del índice  $INU_{year}$  acumulado es mostrada en la figura 5.5. La gráfica se ha construido a partir del sumatorio con una resolución decadal de los valores de  $INU_{year}$  de cada región (valores mostrados en tanto por ciento). La bisectriz (línea negra) indicaría una distribución temporal perfecta de  $INU_{year}$ , es decir, revelaría que la señal es estacionaria, hecho que no es cierto tal como se ha visto en el apartado 5.3.2 con una alternancia de periodos de alta y baja actividad.

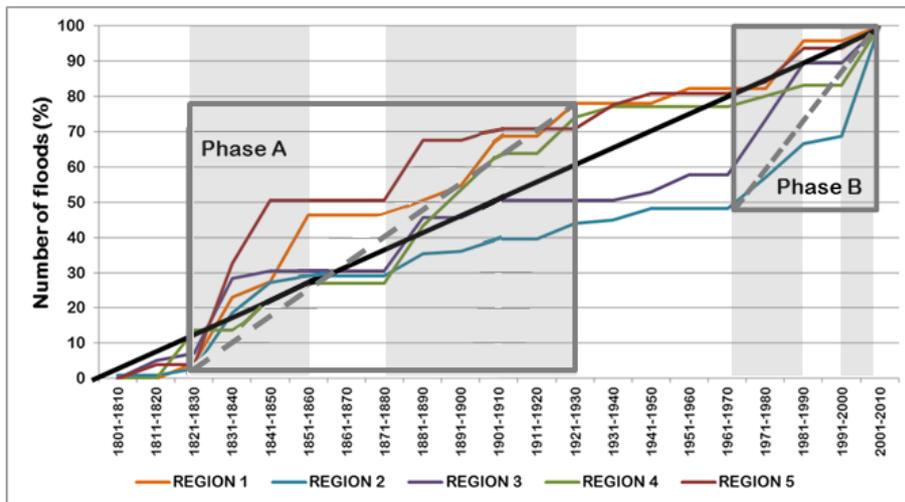


Figura 5.5. Evolución temporal la acumulación de las inundaciones (en %, a resolución decadal) para cada región: las frecuencias acumuladas se obtienen sumando las frecuencias absolutas de los años. La línea negra indica la bisectriz del cuadrante donde la distribución sería perfecta. En color gris los periodos de alta frecuencia en inundaciones.

La no-estacionariedad de las diferentes señales regionales es evidente en la figura 5.5. El análisis de las distribuciones sugiere dos patrones, espaciales diferentes de evolución decadal de los distintos  $INU_{year}$  en un grupo determinado.

- Un primer periodo, definido como fase A entre los años 1820 y 1910 en el que el número de inundaciones aumentó en las cuencas del oeste y el flanco norte de los Alpes (regiones 1, 4 y 5, ver capítulo 4).
- Entre los años 1910 y 1970 se observa una tendencia de las señales nula o casi inexistente, indicando el largo periodo de ausencia de inundaciones de gran magnitud (VS o C) señalado por varios estudios (ver sección 5.1).
- El tercer periodo, definido como fase B, se extiende de 1970 hasta la actualidad caracterizado por un aumento de las grandes inundaciones en el centro y el sur de los Alpes (regiones 2 y 3, ver capítulo 4).

Esta variabilidad a resolución decadal de las inundaciones muy graves y catastróficas podría estar vinculada a los cambios en los patrones de precipitaciones extremas en relación a la variabilidad de la circulación atmosférica a gran escala (Frei et al., 2000). Por su parte, Schmocker-Fackel y Naef (2010a) sugieren que estos cambios en los patrones de circulación atmosférica todavía no están bien definidos para Suiza.

#### 5.4.2. Análisis de los periodos de alta y baja frecuencia de las inundaciones en Suiza

El índice  $INU_{SWS}$  capta la alta variabilidad temporal que viene definida por una alternancia en periodos caracterizados por una alta frecuencia en la aparición de las inundaciones y periodos en donde la frecuencia es muy baja o incluso insistente. De esta manera, se observan pulsos que varían entre los 2 y los 100 años con un aumento de la frecuencia en torno a los años 1820, 1850, 1870 y a partir de 1970 ([Schmocker-Fackel and Naef, 2010b](#))

##### 5.4.2.1. Periodos de alta frecuencia y coherencia con otras zonas de Europa

El índice  $INU_{SWS}$ , que resume la distribución temporal de la frecuencia de inundaciones muy graves y catastróficas en Suiza, presenta cuatro periodos de afectación significativa: el primero se extiende desde 1817 hasta 1851, el segundo entre 1881 y 1927, el tercero abarca desde 1977 hasta 1990 y el cuarto se inició en 2005 (Fig. 5.4b). Estos periodos coinciden en gran medida con los reportados en otros estudios para Suiza ([Hächler-Tanner, 1991](#); [Pfister y Hächler-Tanner, 1991](#); [Röthlisberger, 1991](#); [Gees, 1997](#); [Pfister, 1999](#); [Schmocker-Fackel y Naef 2010b](#)), y, además, con los periodos identificados en España, Italia y la República Checa ([Barriendos y Rodrigo, 2006](#); [Camuffo y Enzi, 1996](#); [Brázdil et al, 2006](#)). En cuanto al análisis llevado a cabo por [Schmocker-Fackel y Naef \(2010b\)](#) en diversas cuencas suizas del flanco norte de los Alpes, la alternancia de periodos de alta y baja frecuencias de inundación coincide con las pulsaciones detectadas en nuestro estudio.

La influencia de la variabilidad climática sobre las inundaciones en las últimas décadas, [Knox \(2000\)](#) afirmó que las altas frecuencias de grandes inundaciones observadas en muchas regiones desde principios de la década de 1950 se produjeron durante un periodo de aumento de la temperatura global y que la ocurrencia de inundaciones extremas durante el Holoceno se asocia a menudo con los cambios climáticos rápidos. En Suiza, la frecuencia de inundaciones en muchas cuencas ha aumentado desde la década de 1970 ([Gees, 1997](#); [Pfister, 1999](#)). Sin embargo, [Schmocker-Fackel y Naef \(2010a\)](#) consideran que las frecuencias de inundación observadas durante las últimas cuatro décadas no exceden el rango registrado durante los últimos cinco siglos.

El aumento de las inundaciones registrado por  $INU_{SWS}$  desde 1977 parece ser resultado de tanto un aumento de la vulnerabilidad, como de los cambios en la señal climática. De acuerdo con [Gees \(1997\)](#), la regulación de los ríos, y la construcción de diques y embalses redujo sustancialmente los daños causados por las inundaciones pequeñas y medianas después de 1854, pero la mitigación de los efectos de las inundaciones muy graves y catastróficas mostró sólo un éxito limitado, especialmente en las cuencas alpinas superiores. Sin embargo, el uso del suelo más intenso en las antiguas zonas de inundación protegidas a partir del final del s. XIX por diques fluviales contribuyó al aumento de las pérdidas: el aumento de confianza en la mitigación tecnológica a partir de estructuras hidráulicas conlleva a una reducción de las inundaciones leves y medias, aumentando el periodo de retorno de las inundaciones, por lo que la población se asienta en áreas de riesgo durante eventos de mayor magnitud que exceden a las construcciones de defensa ([Gees, 1997](#); [Tinner et al., 2003](#)). Por otra parte, es importante tener en cuenta que el aumento general de la población, los valores de exposición (debido al aumento en el Producto Interno Bruto) y la aglomeración urbana (por ejemplo, Zúrich), han contribuido a unos índices más altos de daños por inundaciones, sobre todo en las últimas décadas. Con respecto a este factor, [Glaser et al. \(2010\)](#) encontraron que aunque el número de eventos hidrológicos extremos disminuyó con respecto al s. XIX, las estimaciones de las pérdidas totales son sustancialmente mayores. Esto se relaciona con el aumento de los valores de la vulnerabilidad y la exposición en áreas propensas a inundaciones como consecuencia de la expansión de las zonas urbanas.

Por otra parte el análisis de la distribución temporal de  $INU_{SWS}$  sugiere que los periodos de alta frecuencia de las inundaciones tienen una ciclicidad de alrededor 90 años. Este periodo es muy similar al observado en Alemania: por ejemplo, [Glaser y Stangl \(2004\)](#) reportan clústeres de inundaciones durante el último milenio con un periodo que oscila entre 30 y 100 años, mientras que para el norte de Suiza estos ciclos varían entre 30 y 120 años ([Schmocker-Fackel y Naef, 2010b](#)). En nuestra opinión, el  $INU_{SWS}$  es un índice robusto que captura la variabilidad de la frecuencia de las grandes inundaciones, mostrando una distribución de los clústeres no homogénea en el tiempo.

[Pfister \(1999\)](#) reconstruyó las inundaciones de los ríos Rhein, Rhône y Reuss y del lago Maggiore en base a fuentes documentales y datos instrumentales durante los últimos 500 años, sugiriendo que los

principales grupos de inundaciones se produjeron durante los periodos fríos de la Pequeña Edad de Hielo. El último pulso de inundación entre 1827 y 1875 detectado por Pfister (1999) corresponde al primer periodo identificado en nuestro estudio (1817-1851). Sin embargo, la Pequeña Edad de Hielo también incluyó periodos sin actividad de inundaciones en las cuencas alpinas y que coincidió con periodos de baja actividad solar, como el Mínimo de Maunder (Pfister, 1999).

#### 5.4.2.2. Análisis de los periodos de baja frecuencia

El periodo de alta frecuencia de inundaciones entre 1820 y 1940 identificado por Schmocker-Fackel y Naef (2010b) aparece en  $INU_{sws}$  como dos pulsos separados por un periodo temporal de vacío de inundaciones (1851-1881; Fig. 5.4). Sin embargo, los resultados compilados por Pfister (1999) de las cuencas Rhône, Reuss/Linth y Alpenrhein muestran una alta frecuencia de inundaciones de 1860 a 1875. Esta discrepancia puede explicarse en parte por los diferentes métodos de procesamiento estadístico aplicados a las categorías de datos de inundaciones y por las diferencias en el número de cuencas analizadas (número de muestras). Además,  $INU_{sws}$  sólo tiene en cuenta las inundaciones muy graves y catastróficas que se han producido durante los meses del alto verano (julio y agosto), mientras que Pfister (1999) incluye el número total de eventos en todas las estaciones. Cabe destacar que todos los autores (Hächler-Tanner, 1991; Pfister y Hächler-Tanner, 1991; Röthlisberger, 1991; Gees, 1997; Pfister, 1999; Schmocker-Fackel y Naef 2010b) descartan cualquier posible no homogeneidad de los datos con respecto a inundaciones muy graves y catastróficas, en base a que tanto la prensa como la administración local ha prestado una considerable atención a los eventos hidrológicos extremos después de la aplicación de la ley federal suiza relativa al establecimiento de subvenciones a la corrección de los ríos a partir de 1854. Sin embargo, existe un consenso en la literatura que a mayor edad del evento (y, por lo tanto, el daño asociado), menos precisos son los umbrales para definir las categorías en base a los daños.

Una segunda laguna se observa en  $INU_{sws}$  entre 1944 y 1972 (ver las figuras 5.4 y 5.5) que refleja, posiblemente, la ausencia de condiciones climáticas extremas que podrían provocar grandes inundaciones. Pfister (1999) sostiene que la influencia antropogénica (usos del suelo y la deforestación) en las grandes inundaciones durante este periodo no es el factor dominante, sino más bien una disminución significativa en los totales de precipitación registrados durante el verano entre los años 1935

y 1975. Una disminución en el número de inundaciones también es reportado por [Schmocker-Fackel y Naef \(2010b\)](#) para el norte de Suiza entre 1940 y 1970, y [Wetter et al. \(2011\)](#) observan un periodo de muy baja frecuencia de las inundaciones en la ciudad de Basilea (Rhein) para el periodo 1877-1999 y en Lindau (Lago Constanza) para el intervalo temporal comprendido entre 1910 y 1999.

### 5.4.3. Consideraciones finales

El índice de daños por inundaciones en Suiza,  $INU_{sws}$ , emerge como un índice capaz de captar la variabilidad en la frecuencia de las grandes inundaciones, mostrando una distribución de clústeres no homogéneos en el tiempo y unos patrones temporales coincidentes con otras zonas del continente europeo. Así, y con respecto a la discusión sobre el futuro de los eventos extremos como consecuencia del calentamiento global actual, el índice bicentennial puede contribuir a: ¿Es posible vincular el cambio observado en las frecuencias de las grandes crecidas en Suiza a los forzamientos endógenos y exógenos?

Si es cierto que todavía no se han establecido los mecanismos que explican los cambios en la frecuencia de las inundaciones ([Pfister, 1999](#); [Schmocker-Fackel and Naef, 2010b](#)) y sin existir una relación directa y unívoca entre clima y las inundaciones, dada la complejidad de mecanismos que las producen en medios alpinos ([Wanner et al., 2004](#)), una de las grandes incertidumbres es, sin duda, el impacto del cambio global sobre las grandes inundaciones. De esta manera, se puede abordar la respuesta de las inundaciones a través de las relaciones con diversos forzamientos solares y climáticos a partir de diferentes proxis, y a la vez, como influyen estos forzamientos en la dinámica general de la atmósfera, que tal como se ha señalado ([Frei et al., 2000](#); [Schmocker-Fackel and Naef, 2010a](#); [Peña et al., 2015b,c](#); [Schulte et al., 2015](#)), apunta como uno de los factores para la generación de grandes inundaciones en los medios alpinos.