



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) i a través del Dipòsit Digital de la UB (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) y a través del Repositorio Digital de la UB (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) service and by the UB Digital Repository (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.

7. POSIBLES FORZAMIENTOS EXTERNOS EN LAS INUNDACIONES DE SUIZA

7. POSIBLES FORZAMIENTOS EXTERNOS EN LAS INUNDACIONES DE SUIZA

7.1. El uso de proxies solares y climáticos: alcance y limitaciones

Si bien no parece existir una relación unívoca entre los diferentes procesos que participan en la generación de las grandes avenidas en Suiza, parecen ser los forzamientos solares y climáticos y su posible influencia en los cambios en la circulación atmosférica los que pueden tener una importancia determinante. Este argumento viene fundamentado por diversos estudios que señalan estas influencias, algunos de los cuales, y entre otros muchos, se detallan a continuación: para la zona de Norteamérica (Knox, 2000); Centroeuropa (Pfister, 1999; Glaser y Stangl, 2004; Brázdil et al., 2006; Glaser et al., 2010); de la Península Ibérica (Barriendos y Martín-Vide, 1998; Benito et al., 2003; Barriendos y Rodrigo, 2006; Thorndycraft y Benito, 2006); y, finalmente, para la zona de Suiza (Schmocker-Fackel y Naef, 2010b; Wetter et al., 2011; Wilhelm et al., 2012; Wirth et al., 2013; Peña y Schulte, 2014; Amann et al., 2015; Peña et al., 2015b,c; Schulte et al., 2014, 2015). A pesar de todas estas contribuciones, no existe un consenso general de cómo influyen estos forzamientos sobre este tipo de eventos extremos y, según algunos estudios, no existe un vínculo claro entre los forzamientos solares con los procesos físicos que han intervenido en el clima, tal como se ha indicado en Mayewski et al. 2004 o Wanner et al., 2008, en una visión de conjunto sobre el Holoceno. De esta manera, ha de ser de vital importancia investigar más profundamente en la línea de cómo los mecanismos atmosféricos interfieren en la aparición de los clústeres de alta frecuencia en las grandes crecidas e inundaciones, tal como también ha sido sugerido por diversos autores (Knox, 2000; Schmocker-Fackel y Naef, 2010a).

El hallazgo de las periodicidades en INU_{SWS} relacionadas con la actividad solar y la variabilidad climática (ver capítulo 6), junto a la simultaneidad observada entre los periodos caracterizados por una alta frecuencia en INU_{SWS} y los registrados en otras regiones de regímenes climáticos y fluviales diferentes (Glaser et al., 2010), sugiere que son los forzamientos solares y climáticos a escala global o hemisférica y los cambios en la circulación general de la atmósfera quienes gobiernan la aparición de estos clústeres temporales de acumulación de grandes inundaciones. Teniendo en cuenta estas consideraciones, con la finalidad de evaluar los

principales procesos que influyen en la aparición de los periodos con una alta probabilidad en las inundaciones en Suiza, se van a utilizar las siguientes variables (un detallado reporte de cada una de las variables se ha realizado en el capítulo 3): cuatro proxies de escala global, hemisférica o regional. El primero en relación a la actividad solar (^{10}Be), el segundo en relación a la variabilidad climática ($\delta^{18}\text{O}$), el tercero en relación a la actividad volcánica y un último referente a la temperatura de los Alpes. Además, se analiza una medida directa instrumental (temperatura media anual de Suiza) y un patrón de variabilidad climática de baja frecuencia vinculado al Atlántico Norte (la Oscilación del Atlántico Norte de verano, en capítulo 8).

Cuando se utilizan el ^{10}Be y el $\delta^{18}\text{O}$ como proxies de la variabilidad solar y climática, respectivamente, hay que tener en cuenta las observaciones que se detallan a continuación. El ^{10}Be , almacenado en el hielo, ha demostrado tener un gran potencial para precisar la actividad solar del pasado (Vonmoos et al., 2006), ofreciendo una oportunidad única para reconstruir la variabilidad solar durante los últimos milenios (Steinhilber et al., 2012). Es importante advertir que la señal de los radionucleidos cosmogénicos contiene también un componente climático introducido por su transporte desde la atmósfera, donde se producen, hasta el archivo natural, donde se almacenan (Aldahan et al. 1998, Vonmoos et al., 2006; Abreu et al., 2012). De esta manera, la concentración de los radionucleidos en una muestra, está integrada por una señal de producción (modulada por la energía solar) y por una señal debida al sistema climático (la mezcla atmosférica, el transporte y la deposición). Por tanto, el ^{10}Be producido durante un lapso de tiempo determinado es eliminado de la atmósfera en un plazo de 1-2 años a través de las precipitaciones, depositándose en el archivo natural (Raisbeck et al., 1981; Vonmoos et al., 2006; Abreu et al., 2012). Esta deposición rápida del ^{10}Be tiene la ventaja que el desfase del proxy solar es casi imperceptible. La desventaja es que en este corto lapso de tiempo no tiene tiempo de mezclarse homogéneamente con el sistema climático. Debida a esta razón pueden haber diferencias regionales y, por ejemplo, señales diferentes entre el Hemisferio Norte y el Sur (Versteegh, 2005)

Por su parte, la concentración de isotopos estables de oxígeno en el agua procedente de la precipitación en forma de lluvia o nieve, ha estado considerada como un potente indicador del paleoclima (Stuiver y Grootes, 2000; Heikkilä et al., 2008). Se ha observado una estrecha relación con algunos parámetros de relevancia climática como la

temperatura del aire en superficie (ver capítulo 3), con unos coeficientes de correlación del orden de 0,5 en escalas temporales de uno a cinco años (Jones et al., 2003). Un punto esencial en la interpretación de la señal temporal generada a partir del análisis del $\delta^{18}\text{O}$ se encuentra en una evaluación adecuada y correcta, concretamente, si esta señal está vinculada a las fluctuaciones climáticas a nivel local o, si también, refleja las fluctuaciones a una escala regional o, incluso, global. Johnsen et al., 2001 observan grandes similitudes en las variaciones del isótopo durante el último periodo glacial y el Holoceno para seis puntos de observación ubicados en Groenlandia (Camp Century, Dye-3, GRIP, GISP2, Renland y NorthGRIP). Sugieren que las variaciones del isótopo de oxígeno retenidas en los registros de hielo son debidas a un cambio climático a escala regional, respondiendo de una manera suficientemente sensible a las fluctuaciones de temperatura detectadas en otros estudios y otros lugares a lo largo del Holoceno. Para épocas más recientes (tres últimas décadas del s. XX), Rozanski et al., 1992 analizan la variabilidad del $\delta^{18}\text{O}$ para registros procedentes del análisis del agua de lluvia para la Europa Central. Señalan que los cambios a largo plazo del isótopo contenido en la precipitación en regiones ubicadas en latitudes medias y altas están estrechamente relacionados con los cambios observados en la temperatura del aire en superficie durante los últimos treinta años del s. XX. Esta similitud en la variabilidad y en las tendencias debe ser debida a que la señal isotópica de la precipitación está controlada por procesos de escala regional, como las condiciones de las regiones fuente de vapor, los patrones de transporte del vapor de agua en la atmósfera, la historia de formación de las masas de aire que comportan la precipitación y la temperatura de la base de la nube (Rozanski et al., 1992).

En definitiva, la utilización de proxies solares y climáticos para evaluar posibles influencias sobre INU, puede generarnos dos tipos de problemas que hay que tener en consideración: en primer lugar, se han identificado desfases temporales entre el número de manchas solares, la producción y la deposición de ^{10}Be (1-2 años) y en el $\delta^{18}\text{O}$ que puede ser de años o incluso décadas; por ejemplo, los desfases reconstruidos entre ^{14}C y los registros $\delta^{18}\text{O}$ durante los mínimos Wolf y Maunder pueden llegar a ser de 40 años (Stuiver et al., 1997; Vonmoos et al., 2006; Abreu et al., 2012); y en segundo lugar, la significación paleoclimática de la señal de los proxies a escala regional o global puede crear alguna ambigüedad en su correcta interpretación. A pesar de estas objeciones, las señales generadas en base a ambos proxies son susceptibles de reproducir las fluctuaciones observadas en la variabilidad solar y climática a lo largo de los últimos milenios (Stuiver y Grootes, 2000; Vonmoos et al., 2006). Además, la comparación entre la concentración ^{10}Be , el número de

manchas solares y los registros de temperatura a partir de los registros de hielo de Groenlandia muestran una buena correlación desde el siglo XVII (Stuiver et al., 1997; Beer et al., 2000). Sin embargo, otros proxies como el $\delta^{18}\text{O}$ están influenciados por la circulación termohalina oceánica además de la actividad solar.

El capítulo analiza desde un punto de vista cualitativo y explica de una forma cuantitativa, las influencias de las pulsaciones climáticas de los últimos 200 años, determinadas a partir de la variabilidad solar y las oscilaciones térmicas, sobre los cambios en la frecuencia de las grandes crecidas en Suiza. El análisis, de esta manera, se vertebrará a través de dos líneas principales, que evalúan los posibles patrones de comportamiento y definir los grupos temporales caracterizados por un aumento de las avenidas severas y catastróficas:

- El análisis de tipo cualitativo se basa en plasmar de forma gráfica la evolución temporal de INU_{sws} con el objetivo de detectar los periodos de avenidas severas y ponerlos en relación con los registros de erupciones volcánicas, ^{10}Be , el $\delta^{18}\text{O}$, el número medio anual de manchas solares, la temperatura reconstruida de verano para los Alpes y la temperatura media anual de Suiza en base a registros instrumentales, con el propósito de evaluar si existen patrones de comportamiento comunes.
- El análisis de tipo cuantitativo tiene como finalidad explicar la variabilidad de los distintos parámetros para facilitar el análisis de las influencias sobre INU_{sws} y, de esta manera, poder definir y explicar los patrones de comportamiento hidro-climáticos que generan los periodos de alta frecuencia en avenidas e inundaciones en Suiza.

7.2. Métodos

Para dar respuesta al primer objetivo planteado, se analizan las asociaciones visuales que pueden tener los forzamientos solares y climáticos y la circulación atmosférica sobre INU_{sws} a partir de una representación gráfica integrada de las variables arriba reseñadas. La evaluación del segundo objetivo se vertebra en un sencillo análisis de las diferentes bases de datos utilizadas, estructurado en las tres siguientes fases (Jain y Lall, 2001; Peña y Schulte, 2014).

1. A partir de la muestra total de 210 años definida por INU_{SWS} (periodo 1800-2010), se crean ocho categorías que involucran los años que cumplen los siguientes requisitos. Por una parte, dos categorías generales que engloban los años con valores de INU_{SWS} menor o igual a 0, y aquellos con valores de INU_{SWS} mayor a 0, es decir, se diferencian en los que años que ha habido crecida muy severa o catastrófica de los que no la ha habido. Por otra parte, los años con crecida se clasifican en 6 categorías diferentes, considerando un INU_{SWS} mayor a 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 y 3,0 veces la desviación estándar (SD), estimada para el periodo 1800-2010.
2. Se calcula la media aritmética de los valores de ^{10}Be , $\delta^{18}O$ y temperatura media anual de Suiza de los años involucrados en cada una de las ocho categorías previamente definidas. De esta manera, se tendrá un valor cuantitativo que sintetiza las características de las variables analizadas para todo el espectro de INU_{SWS} , comprendiendo desde los años sin inundaciones, hasta aquellos años con una o más inundaciones catastróficas. En definitiva, se puede analizar el comportamiento de cada una de las variables en relación a INU_{SWS} según la intensidad de la crecida.
3. Por último, y de nuevo para cada una de las categorías, se realiza un conteo de los años en fase positiva/negativa del ^{10}Be , $\delta^{18}O$ y temperatura media anual de Suiza, con el fin de evaluar el impacto en la evolución de INU_{SWS} .

7.3. Resultados

7.3.1. Análisis cualitativo

Las relaciones entre el índice INU_{SWS} con la actividad volcánica, las anomalías estandarizadas del número medio anual de manchas solares (sunspots, SN), las anomalías de temperatura en los Alpes, del ^{10}Be y del $\delta^{18}O$ quedan sintetizadas en la figura 7.1.

Las anomalías se han calculado a partir de la media y la desviación estándar estimadas en función de la totalidad del periodo considerado (1800-2010) para cada una de las variables. Además, se ha aplicado un filtro gaussiano de paso bajo de 11 años, con la finalidad de eliminar las periodicidades de alta frecuencia, las tendencias y los posibles problemas de auto-correlación. Finalmente, cabe señalar que para la representación

gráfica de INU_{SWS} se ha utilizado el umbral de $INU_{SWS} > 1,5 SD$ con el objetivo de definir de forma más precisa los periodos caracterizados por una alta frecuencia en las crecidas, diferenciándose estos periodos (señalados en gris claro) de aquellos en los que la frecuencia disminuye e incluso desaparece. Remarcar que las escalas del $\delta^{18}O$ y de SN están invertidas para facilitar la interpretación en relación con el resto de índices y proxy climáticos y solares.

7.3.1.1. La influencia solar: posibles relaciones entre el Berilio 10 (^{10}Be) y las inundaciones en Suiza

La concentración de ^{10}Be en el hielo depende de la intensidad de la radiación cósmica, además del transporte y la precipitación atmosférica (Vonmoos et al., 2006). Se ha observado una correlación inversa entre la actividad solar y la concentración de ^{10}Be , por lo que picos máximos en la concentración del radionucleido corresponderían a fases de baja actividad solar, y viceversa (ver en la figura 7.1 la correlación visual existente entre manchas solares y ^{10}Be). Este hecho es debido a que los rayos solares dificultan el paso de la radiación cósmica intergaláctica y amortiguan su llegada a la atmósfera terrestre (McCracken et al., 2002).

La figura 7.1 proporciona evidencias de que los periodos marcados por una alta frecuencia de las inundaciones por regla general corresponden a periodos caracterizados por un predominio de anomalías positivas de ^{10}Be , por lo tanto, se asocian con episodios de baja actividad solar. Este patrón es especialmente marcado durante el mínimo registrado a principios del s. XX. Destacar que el pico identificado en INU_{SWS} entre 1817 y 1855 se corresponde con un periodo caracterizado por un predominio de anomalías de ^{10}Be negativas, si bien las inundaciones se produjeron en la transición hacia el máximo solar que se produjo a mediados del s. XIX. Por último, el máximo del último periodo de alta frecuencia en las inundaciones (después de 2005) corresponde al actual periodo de baja actividad solar.

7.3.1.2. La influencia del clima: correlaciones entre el isotopo de oxígeno $\delta^{18}O$ y las inundaciones en Suiza

Se ha utilizado la evolución temporal de las anomalías estandarizadas del $\delta^{18}O$ como proxy climático, con la finalidad de analizar la variabilidad de

la temperatura en los últimos doscientos años, en las regiones ubicadas en latitudes medias y altas del hemisferio norte, y con el objetivo de evaluar el comportamiento de INU_{SWS} en relación a este parámetro. El registro de $\delta^{18}O$ obtenido del testigo de hielo GISP2 de Groenlandia (Stuiver y Grootes, 2000), influenciado por la dinámica del Atlántico Norte, ofrece un proxy de la variabilidad de la temperatura en las latitudes medias y altas del hemisferio norte.

A pesar de la variabilidad que se ha observado entre las series temporales, las crecidas más severas tienden a concentrarse en periodos donde predominan las anomalías negativas en la concentración del $\delta^{18}O$ (resaltadas en gris oscuro en la figura 7.1), es decir, durante periodos climáticos que pueden calificarse como fríos, principalmente en los pulsos definidos por los periodos 1830-1845, 1880-1930 y durante la década de 1980.

7.3.1.3. La influencia volcánica: asociaciones entre las principales erupciones volcánicas y las inundaciones en Suiza

Se ha utilizado la concentración de sulfatos (SO_2) procedentes de los testigos de hielo de Groenlandia para evaluar el impacto volcánico en INU_{SWS} .

No se observa un patrón claro, se puede sugerir que los periodos con alta frecuencia de inundaciones están conectados a un enfriamiento adicional de la atmosfera debido al impacto de las erupciones volcánicas, especialmente en el tercer grupo de inundaciones, en un periodo cálido desde un punto de vista global, pero con enfriamientos regionales debido a la concentración de aerosoles volcánicos.

7.3.1.4. Temperatura de los Alpes en base a análisis dendrocronológicos

La figura 7.1 indica la reconstrucción de la temperatura de verano en los Alpes a partir de análisis dendrocronológicos (Büntgen et al., 2006; 2011).

El primer clúster de inundaciones se ubica en una fase fría, mientras que el segundo y el tercero son periodos caracterizados por una alternancia de fases si bien hay un dominio de anomalías negativas. El cuarto está en una fase de anomalías positivas.

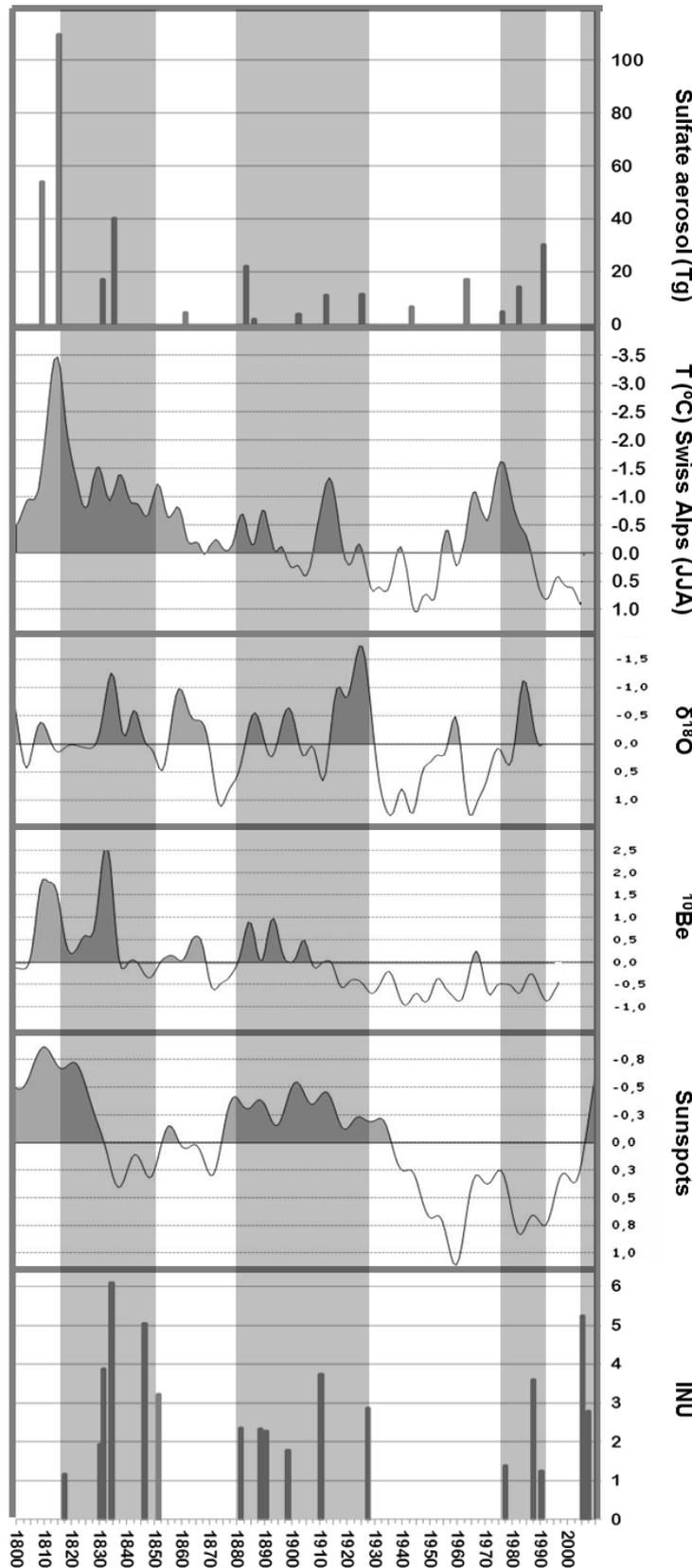


Figura 7.1. Evolución temporal del SO_2 en Tg (sulfatos relacionados con volcanismo), las anomalías estandarizadas de $\delta^{18}\text{O}$, ^{10}Be , manchas solares, temperatura de verano en los Alpes suizos y $\text{INU}_{\text{SWS}} > 1.5 \text{ SD}$ para el periodo 1800-2010. Todas las series se han normalizado y suavizadas con un filtro de paso bajo gaussiano de 11 años, excepto el registro manchas solares suavizado con un filtro de 22 años. El SO_2 y el índice de INU_{SWS} están sin filtrar. Los periodos de alta frecuencia de las inundaciones están marcados en el gráfico. Las escalas del $\delta^{18}\text{O}$ y manchas solares están invertidas.

7.3.1.5. La temperatura media anual de Suiza y la influencia en el índice de daños por inundaciones

Para corroborar estos resultados obtenidos a partir de proxies climáticos y solares, en la figura 7.2 se muestra la temperatura media anual normalizada de Suiza para el periodo 1800-2010 en comparación con INU_{SWS} .

Los dos primeros grupos, entre los años 1817 y 1935, se produjeron durante un periodo de anomalías negativas de temperatura. Además, estos dos grupos están relacionados con pulsos de marcada disminución de la temperatura separados por un gap de inundaciones (1856-1887) que corresponde a un periodo de recuperación de la temperatura (temperatura ligeramente negativa con anomalías en torno a $-0,2$ °C) y de la actividad solar (ver figura 7.1). El pico de crecida correspondiente al verano de 1987 se produce en un periodo en el que las anomalías de temperatura en Suiza fueron ligeramente positivas, pero los datos de $\delta^{18}O$ muestran valores negativos en Groenlandia, indicando la posible influencia de la dinámica del Atlántico Norte. Las inundaciones de 2005 y 2007 se produjeron en una fase claramente cálida en Suiza, que corresponde al máximo contemporáneo.

Sin embargo, la interpretación climática de estos eventos debe realizarse con precaución debido a que los datos de temperatura al final de la serie presentan un ligero descenso al igual que el número de manchas solares disminuyen de forma clara. Como patrón de baja frecuencia de inundación, la figura 7.2 ofrece claras evidencias: las lagunas observadas en la serie temporal de las inundaciones (1852-1880, 1928-1976) están relacionados con tendencias positivas de temperatura. Por otra parte, los grupos de las inundaciones correspondientes a la época más contemporánea (1976-1990 y 2005 en adelante) se enmarcan por una tendencia positiva hacia la máxima temperatura enmarcada en el calentamiento actual.

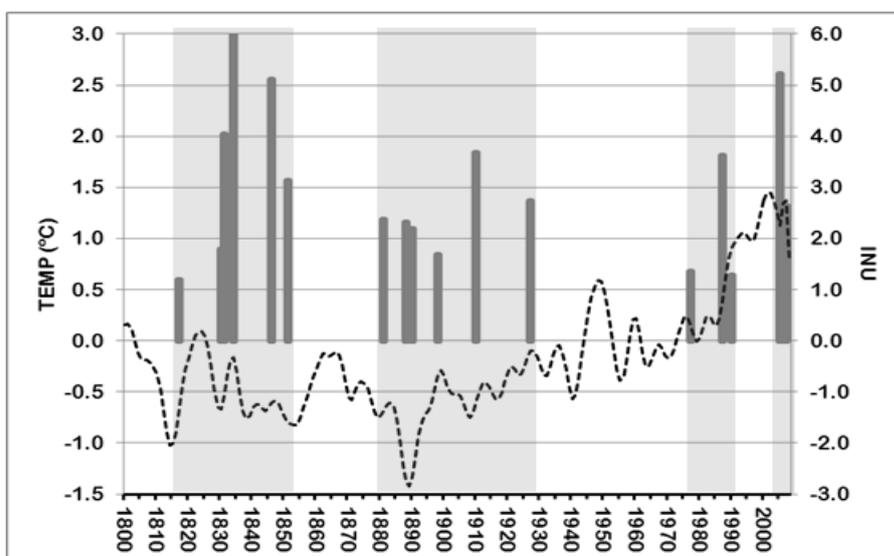


Figura 7.2. Evolución temporal de las anomalías estandarizadas de INU >1.5 SD y la temperatura media anual de Suiza (línea discontinua) para el periodo 1800-2010, esta última se halla normalizada con un filtro gaussiano de paso bajo de 11 años.

7.3.2. Análisis cuantitativo

La tabla 1 muestra los valores medios de las anomalías de ^{10}Be , $\delta^{18}\text{O}$ y temperatura media anual de Suiza en $^{\circ}\text{C}$ (T_m) para cada una de las categorías de INU_{SWS} .

	INU<0	INU>0	INU>0.5	INU>1.0	INU>1.5	INU>2	INU>2.5	INU>3.0
Media ^{10}Be	0,32	0,49	0,46	0,46	0,70	0,52	0,52	0,85
$^{10}\text{Be}+$ (años)	96	16	10	9	9	6	6	4
$^{10}\text{Be}-$ (años)	65	6	4	3	1	1	1	0
Media $\delta^{18}\text{O}$	0,00	-0,14	-0,11	-0,11	-0,23	-0,26	-0,42	-0,82
$\delta^{18}\text{O}+$ (años)	87	11	8	7	5	3	1	0
$\delta^{18}\text{O}-$ (años)	79	11	8	7	7	6	6	4
Media T_m	0,00	-0,02	0,02	-0,04	0,02	0,08	0,31	0,95
T_m+ (años)	91	14	10	8	8	6	6	5
T_m- (años)	93	11	8	8	6	4	2	0

Tabla 7.1.

- Valores medios de las anomalías estandarizadas de ^{10}Be , $\delta^{18}\text{O}$ y T_m para cada una de las categorías de INU (En la parte superior de la tabla).
- Las categorías están definidas en función de un umbral de superación definido a partir de la SD (en la parte central de la tabla).
- Además, se muestran el número de años involucrados (en la parte inferior de la tabla) en fase positiva (+) o en fase negativa (-).

Se presentan los valores resultantes estructurados en ocho columnas, cada una de las cuales viene definida por una categoría de INU_{SWS} , diferenciando entre ausencia de avenida severa o inundación ($INU_{SWS} < 0$) de las que se ha registrado al menos una avenida severa o inundación ($INU_{SWS} > 0$). Las seis columnas restantes listan los resultados elaborados para cada una de las categorías de INU_{SWS} , con un rango que varía de las avenidas de bajo impacto ($INU_{SWS} > 0.5 SD$) a las de más alto impacto ($INU_{SWS} > 3.0 SD$). Las filas aparecen estructuradas en tres bloques correspondientes al ^{10}Be , $\delta^{18}O$ y la Tm. Se presenta en la primera fila de cada bloque la media aritmética correspondiente al total de años que quedarían implicados en cada categoría de INU_{SWS} . En las dos filas restantes, se indica el número de años involucrados en la fase positiva o negativa de cada una de las variables analizadas y para cada categoría de INU_{SWS} .

La media aritmética obtenida de cada una de las variables analizadas, presentan una serie de características que varían en base de la categoría de INU_{SWS} . Los aspectos generales se detallan a continuación:

1. Para todas las categorías, el ^{10}Be presenta valores positivos, incluso para $INU_{SWS} < 0 SD$. Pero es importante señalar que el valor se incrementa a medida que aumenta la categoría de INU_{SWS} , correspondiendo el valor más alto de ^{10}Be a las inundaciones de gran impacto ($INU_{SWS} > 3,0 SD$). De esta manera, los resultados indican que son los periodos caracterizados por una baja actividad solar cuando se observa una mayor posibilidad de aparición de avenidas e inundaciones de gran impacto.
2. Para todo el espectro de INU_{SWS} , la media del $\delta^{18}O$ presenta valores negativos, sugiriendo que INU_{SWS} tiende a concentrarse en periodos fríos. Para $INU_{SWS} < 0$, el valor sigue siendo negativo pero muy cercano a 0. En cambio, el valor medio de $\delta^{18}O$ va disminuyendo a medida que aumenta la categoría de INU_{SWS} , o lo que es lo mismo, aumenta la intensidad de la crecida. Para $INU_{SWS} > 3,0 SD$ el valor medio de $\delta^{18}O$ es muy negativo (-0,82), insinuando que las grandes inundaciones en Suiza se producen durante las fases climáticas frías.
3. Temperatura media anual de Suiza (Tm): Si bien para las crecidas que no superan 2 veces la desviación estándar de INU_{SWS} , el valor medio de la anomalía de temperatura anual en Suiza se sitúa en torno a 0 °C, es a partir de $INU_{SWS} > 2,5 SD$ cuando las anomalías positivas de temperatura se hacen más grandes. Para la categoría de $INU_{SWS} > 3,0 SD$, es decir, la que alberga las avenidas más catastróficas, la

anomalía media anual de temperatura es de 0,95 °C, apuntando que son necesarias pulsaciones cálidas dentro de la fase fría para la aparición de grandes inundaciones.

Al igual que las medias analizadas de cada uno de los bloques, los años implicados en la fase positiva o negativa de las variables analizadas presentan una variabilidad según la categoría de INU_{SWS} . A continuación se detallan las características más importantes:

1. En general hay un predominio de los años con anomalías positivas de ^{10}Be sobre las negativas, destacando la categoría de mayor impacto ($INU_{SWS} > 3,0$ SD) donde las cuatro inundaciones se caracterizan por anomalías por encima de 0.
2. Para las categorías más bajas ($INU_{SWS} < 1,5$ SD), la distribución de años en fase positiva o negativa de $\delta^{18}O$ es la misma. Es a partir de $INU_{SWS} > 1,5$ SD cuando aparecen más años en fase negativa, de forma mucho más evidente a partir de la categoría de $INU_{SWS} > 2,5$ SD. Este resultado indica la preferencia de fases climáticas frías para las crecidas más catastróficas.
3. Temperatura de Suiza (Tm): En todas las categorías hay una mayor acumulación de años en fase positiva (a excepción de la categoría $INU_{SWS} > 1,0$ SD), pero es especialmente en las más severas cuando la acumulación de años cálidos es más tangible, especialmente en $INU_{SWS} > 3,0$ SD, cuando las cuatro inundaciones registradas en esta categoría ocurrieron en años cálidos.

Tal como se había detectado en el análisis cualitativo, se han observado patrones de comportamiento reconocibles que relacionan la variabilidad solar y climática con la frecuencia de las grandes avenidas en territorio suizo, que, de esta manera, refuerza los aspectos detallados en el capítulo anterior. De todas formas, hay que remarcar que existen diferencias destacadas entre las inundaciones de gran impacto, definidas para un valor de INU_{SWS} superior a 2,5 veces la desviación estándar, de las de impacto inferior, que involucran las categorías inferiores al umbral especificado.

7.4. Discusión

Encontrar correlaciones entre los forzamientos potenciales y las inundaciones es una tarea problemática porque no significa que exista una relación de causalidad entre los procesos. Por el contrario, la ausencia de correlaciones no significa necesariamente que los procesos no están relacionados. A lo sumo, las correlaciones indican la existencia de una "conexión estadística", que ayuda en la formulación de hipótesis para entender un problema determinado. Sin embargo, sin un razonamiento físico, las correlaciones son sólo eso, conexiones estadísticas.

Es necesario destacar que la señal generada a partir del índice INU_{SWS} es el resultado final de todo un proceso que integra aspectos tanto naturales como antrópicos, no siendo una respuesta directa a un cambio en el comportamiento de algunas de las variables que participan, sino la culminación de toda una serie de causas que la provocan. Finalmente, hay que tener en cuenta que la longitud de la serie de INU_{SWS} es relativamente corta, abarcando 200 años, por lo que las correlaciones con los proxies solares y climáticos se basan en sólo cuatro periodos de alta frecuencia de inundación y otros tres caracterizados por un decrecimiento significativo de esta frecuencia. Por lo tanto, la relación entre INU_{SWS} y los diferentes proxies climáticos deben interpretarse con cautela y asociaciones simples no deben llegar a explicar un mecanismo causal.

Las grandes avenidas e inundaciones en Suiza parecen venir determinadas por aparecer en pulsaciones climáticas frías de baja frecuencia con acumulación de nieve y/o hielo en las cabeceras, provocada por un episodio de precipitaciones excepcionales en combinación con un episodio de calor importante, entre unos días y varios meses de duración, que provoca la fusión de la nieve y/o hielo en cabeceras (Peña y Schulte, 2014; Peña et al., 2015b,c). A continuación se discutirán detalladamente los procesos implicados.

Los periodos fríos causan el avance de los glaciares. Este mayor almacenamiento de agua a su vez produce un aumento del caudal base y de la escorrentía superficial durante los meses de verano (Stucki et al., 2012). Por otra parte, Schulte et al., 2015 argumentan que hay un descenso altitudinal de la línea de nieves, por lo que aumenta la zona susceptible a los procesos de fusión asociados con episodios de precipitación y aumento de temperatura brusco (por ejemplo, los causadas por los Foehns). Además, la presencia de nieve durante el

verano favorece la existencia de áreas impermeables y suelos saturados en los terrenos adyacentes, por lo tanto, contribuyendo al aumento de la escorrentía superficial en las vertientes. Por ejemplo, varios autores sugieren que la magnitud de las inundaciones más importantes durante el s. XIX coinciden con un aumento de los procesos de fusión provocados por un aumento de los glaciares y de la superficie cubierta por la nieve (inviernos fríos, húmedos; Pfister 1999; Amann et al., 2015), periodos con temperaturas más frescas de verano (Büntgen et al, 2006, 2011; Trachsel et al., 2012), reducción de la actividad solar (Peña et al., 2015b,c; Schulte et al., 2015), aumento de los aerosoles procedentes de las grandes erupciones volcánicas hemisferio norte (Gao et al., 2008) y las fases de clima más seco durante la primavera (Schulte et al., 2015).

El análisis del ^{10}Be indica anomalías positivas del radionucleido en todas las categorías de INU_{sws} , siendo la categoría $\text{INU}_{\text{sws}} > 3,0 \text{ SD}$ la que presenta unos valores más elevados. El resultado revela que la presencia de clústeres de gran intensidad en la frecuencia de las inundaciones en Suiza está relacionada con los periodos caracterizados por una baja actividad solar. De esta manera, los resultados obtenidos parecen estar en concordancia con los obtenidos por Schulte et al. 2008, 2009a, 2009b y 2012, 2014, 2015 del análisis de los registros sedimentarios extraídos de varias secciones de los abanicos deltaicos de la cuenca superior del río Aare (Alpes berneses). Los resultados de los análisis sugieren una relación entre el calendario de eventos de grandes inundaciones registradas en el flanco norte de los Alpes en los últimos 2.600 años y las anomalías positivas de radiocarbono, insinuando un aumento de la frecuencia de las grandes avenidas en periodos de baja actividad solar y, por tanto, durante periodos climáticos caracterizados por unas anomalías térmicas por debajo de los valores normales (Versteegh, 2005). Schulte et al., 2015 proponen la influencia solar como uno de los principales factores desencadenantes de estos eventos hídricos extremos.

Tres periodos de baja actividad solar (reducido número de manchas solares y anomalías positivas de ^{10}Be) se han registrado durante los últimos 200 años. El primer periodo corresponde hasta el año 1840, y corresponde a las etapas finales de la Mínimo Dalton; el segundo periodo entre el año 1880 hasta 1910 (^{10}Be) y 1935 (SN), que corresponde al mínimo solar de 1900; y un tercer periodo comienza después de 2005 alcanzando valores mínimos en 2009. La figura 7.1 proporciona evidencias de que los periodos caracterizados por una alta frecuencia de inundaciones normalmente corresponden a los periodos caracterizados

por un predominio de anomalías positivas de ^{10}Be y, por tanto, asociado con episodios de baja actividad solar. Este patrón fue particularmente marcado durante el mínimo solar de 1900. El periodo de alta frecuencia de inundaciones entre 1817 y 1855 corresponde en gran parte a un periodo caracterizado por anomalías positivas de ^{10}Be , aunque los picos de las inundaciones se produjeron en la transición entre un mínimo solar y un máximo solar. Durante este periodo se produjo un enfriamiento adicional asociado con la erupción del Tambora (1814), además de dos erupciones en los años 1831 y 1835 (figura 7.1). Teniendo en cuenta ambos forzamientos (solar y volcánico), la anomalía de temperatura para este periodo en comparación con la media 1961-1990 fue de alrededor de $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el hemisferio norte (Gao et al., 2008) y $-1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ en los Alpes suizos (Büntgen et al., 2006). Por último, el máximo del último cluster de inundaciones corresponde al actual periodo de baja actividad solar iniciado en los primeros años del s. XXI.

Varios autores (Pfister, 1999; Knox, 2000; Magny et al., 2003; Benito et al., 2003; Schulte et al., 2008; Ortega y Garzón, 2009) sostienen que las variaciones más significativas en la frecuencia de las inundaciones han ocurrido durante las fases de clima frío, especialmente durante las etapas de transición de pulsos climáticos. Este patrón también se ha observado en Suiza durante los últimos 500 años (Schmocker-Fackel y Naef, 2010b; Amann et al., 2015; Schulte et al., 2015), aunque después de la década de 1970 los patrones climático e hídrico cambiaron (Peña et al., 2015b,c). A pesar de las consideraciones arriba apuntadas, la relación entre la frecuencia de las avenidas en Suiza y la temperatura anual de Suiza señala que los años tienden a tener una anomalía térmica positiva en las categorías de mayor impacto ($\text{INU}_{\text{SWS}} > 2.5\text{ SD}$). Este resultado es complementario al obtenido del $\delta^{18}\text{O}$, aunque parezca que puedan entrar en contradicción. Cabe destacar que uno de los mecanismos que ayuda a intensificar una crecida en ámbitos alpinos es el aporte de agua adicional procedente de la fusión de la nieve o del hielo de las cabeceras (Weingartner et al., 2003; Peña y Schulte, 2014). De esta manera, para la formación de nieve y/o hielo en las cabeceras, se necesita de una fase climática fría, proceso que será más efectivo cuanto más largo sea el periodo de tiempo bajo unas condiciones con anomalías térmicas negativas, hecho que favorecerá que la acumulación sea mayor (definido por las anomalías negativas de $\delta^{18}\text{O}$). Dentro de este periodo frío, aparecen episodios cálidos (temperatura que puntualmente puede tener unas anomalías muy positivas) que favorecen la fusión de una parte de la masa de nieve y/o hielo que está acumulada en las cabeceras, normalmente de las partes bajas de los glaciares y las masas de nieve acumuladas durante el invierno, masa de agua en forma líquida que entra

de forma directa en el drenaje de la cuenca, aumentando el caudal base de los ríos y torrentes, e incrementando el riesgo hidrológico.

En definitiva, se trata de un fenómeno complejo, con un gran impacto sobre el terreno, de pocos días de duración, pero con una larga gestación del riesgo hidrológico en base a los meses y a los años anteriores. A partir de las correlaciones de los diferentes proxies podemos deducir que periodos de actividad solar reducida (^{10}Be) y pulsos fríos de baja frecuencia ($\delta^{18}\text{O}$) tienen un impacto significativo en las grandes inundaciones de verano en Suiza. Sin embargo, el modelo lineal de las ocurrencias de inundaciones (por ejemplo, desde 1977) tiene que estar relacionado con la compleja relación entre los mecanismos exógenos, endógenos y autógenos relacionados con el forzamiento climático. Por lo tanto, los cambios hemisféricos o escala global que se producen en la circulación general atmosférica o en las corrientes oceánicas y que afectan las tormentas y los límites de masa de aire (Hirschboeck, 1988; Knox, 2000), han de ser también considerados en la investigación de la variabilidad observada en las inundaciones durante el verano en Suiza.

En el capítulo 8 se analizan los patrones de variabilidad atmosférica de baja frecuencia y su conexión con las inundaciones en Suiza, mientras que el capítulo 9 presenta una tipología sinóptica para los meses de julio y agosto. En el capítulo 10 en base a los resultados obtenidos en estos dos capítulos, se analizan los posibles cambios en los patrones atmosféricos, su influencia en las inundaciones en Suiza y como incide la actividad solar en esta variabilidad. Este análisis final ha de responder al porqué del aumento de las inundaciones durante las fases de baja actividad solar y en las pulsaciones climáticas frías; pero también al porqué de la aparición de clústeres de inundación durante la última fase cálida, ambivalencia que de momento muestran los resultados que se han presentado.