



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.

6. ANÁLISIS TEMPORAL DE LAS SERIES EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

6. ANÁLISIS TEMPORAL DE LAS SERIES EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

6.1. Introducción

6.1.1. Generalidades

Muchos de los registros geológicos que intentan explicar los cambios climáticos y ambientales basándose en variables proxy, presentan ciclicidades que han sido atribuidas a forzamientos extraterrestres (Borgmark, 2005). Si bien las ciclicidades más conocidas son los cambios en la órbita terrestre (ciclos de Milankovitch), con periodicidades de centenares de miles de años, existen ciclos con una escala decadal o centenal relacionados con el ciclo solar. Las recientes medidas por los radiómetros instalados en los satélites indican que pequeños cambios en la irradiación solar puede producir cambios en la circulación general atmosférica como sugieren eventos como la Pequeña Edad de Hielo (Haigh, 2003), si bien, todavía no existe un vínculo claro entre el forzamiento solar y su incidencia en las inundaciones, con los procesos físicos que han intervenido en el clima, tal como indican Wanner et al. (2008) en su visión de conjunto sobre el holoceno.

6.1.2 Ciclos solares

El ciclo de 11 años (que es equivalente al ciclo magnético de 22 años o ciclo Hale) es debido a una acción de dínamo magneto-hidrodinámica producida por una regeneración periódica del campo magnético solar en la base de la zona de convección. Periodicidades superiores a 11 años, tales como la de 210 (ciclo Suess) o de 90 (ciclo Gleissberg) años, pueden ser debidas a sub-armónicos (es decir, múltiplos enteros) de la periodicidad primaria de 11 años (Feynman y Gabriel, 1990). Los armónicos son vibraciones que se producen conjuntamente a múltiplos enteros de la frecuencia fundamental o primaria; por ejemplo, los armónicos que acompañan a la nota de una cuerda de guitarra (Gauthier, 1999). La oscilación primaria se define en base a un periodo λ , una frecuencia $f_s = 1/\lambda$, y unos armónicos en $N \cdot f$ (o λ/N) para $N > 1$. Los armónicos pares más significativos ($N=2$ y $N=4$) están superpuestos a la oscilación primaria; sin embargo, los armónicos impares significativos ($N=3$ y $N=5$), suelen ocurrir entre las oscilaciones

primarias y de esta manera, son visibles. Se han detectado oscilaciones de alta frecuencia produciendo sub-harmónicos de largo periodo. Los sub-harmónicos son vibraciones que se producen en frecuencias más bajas que la frecuencia primaria. Geométricamente los sub-harmónicos pueden ser generados por sistemas caracterizados por osciladores forzados no lineales. El escenario más común es cuando un oscilador de este tipo sufre "un periodo de duplicación" produciendo oscilaciones periódicas mejorando las componentes de baja frecuencia a expensas de las componentes de alta frecuencia (ruido rojo en la señal observada en el espectro). Además, si el sistema se comporta de forma caótica, ciertos osciladores forzados no lineales pueden producir sub-harmónicos de potencia 2 respecto a la frecuencia primaria y un aumento de la frecuencia espectral con el periodo.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, [Feynman y Gabriel \(1990\)](#) justifican el ciclo Gleissberg como un sub-harmónico del ciclo de manchas solares (11 años) sugiriendo que la dínamo solar opera en un régimen caótico cerca del régimen periódico de duplicación. Es el ciclo Gleissberg (también conocido como el ciclo secular o el ciclo de 80 a 90 años) el que tiene (junto con el de Schwabe) una influencia más evidente en el clima ([Feynman y Gabriel, 1990](#)). El ciclo Gleissberg se define como una modulación de la amplitud y la frecuencia del ciclo solar de 11 años si bien su significado físico no está claro todavía ([Kuklin, 1976](#)). De hecho, el término "ciclo" no se ha utilizado correctamente en este caso ya que su duración puede variar entre 60 y 120 años ([Mouradian, 2002](#)), y quizás un término más apropiado podría ser "variación". Las técnicas de análisis espectral aplicadas al número de manchas solares indican picos a diferentes frecuencias en el rango arriba señalado. Por ejemplo, [Rozelot \(1994\)](#) detecta picos entre 59 y 98 años, mientras que [Prestes et al. \(2006\)](#) obtienen un pico a 101 años. [Richards et al. \(2009\)](#) indican que la señal varía en función del método utilizado, reportando picos espectrales a 87, 98 y 102 años.

Finalmente, aparecen periodicidades de periodo más corto que se superponen al ciclo de 11 años, siendo la de 2 años (Oscilación Cuasi-Bienal, QBO) la que aparece más frecuentemente en la literatura referente a la conexión solar-terrestre y los parámetros atmosféricos (ej. [Sakurai, 1981](#); [Kulcar y Letfus, 1988](#); [Djurovic y Paquet, 1993](#)). El origen de la QBO se explica por las corrientes de flujo magnético que de forma periódica fluyen hacia los polos solares ([Howard y LaBonde, 1981](#)). Basándose en las observaciones de helicidad magnética, [Zhang y Bao,](#)

1998 propusieron un modelo solar basado en una dínamo magnético de doble ciclo: una primera dínamo que opera en la base de la zona de convección debido a la cizalladura radial (ciclo de 11 años o Schwabe) y la segunda en la parte superior de la zona de convección (con periodicidad de 2 años) debido a la cizalladura latitudinal (Benevolenskaya, 1998, 2000). De todas las maneras existe un debate en torno a este ciclo de 2 años ya que muchos análisis lo atribuyen a oscilaciones internas del sistema climático (Baldwin et al., 2001), posición esta última que se adopta en la tesis (ver capítulo 10).

6.1.3. Actividad solar, clima e inundaciones

Una gran parte de la literatura paleoclimática ha detectado en diferentes proxys climáticos periodicidades diferentes a la primaria de 11 años (ciclo Schwabe), dando lugar a numerosas interpretaciones dependiendo de la naturaleza del parámetro analizado y su sensibilidad a la actividad solar, el método utilizado y el tamaño de los registros. Como se comporta el forzamiento solar en la variabilidad climática es uno de los temas más polémicos en la investigación climática (Czymzik et al., 2015). Existen un gran número de relaciones empíricas que indican una influencia solar sobre el clima a escala regional, a partir del análisis de variables como la temperatura, la precipitación, la circulación atmosférica y la frecuencia e intensidad de los extremos hidrometeorológicos (Bond et al, 2001; Gray et al, 2010; Lockwood, 2012; Wirth et al, 2013; Adolphi et al, 2014; Peña et al., 2015b,c; Schulte et al., 2015).

Los ciclos solares más importantes tienen periodos de aproximadamente 2.500 (ciclo de Hallstatt), 1.100, 710, 510, 350, 208 (ciclo de Suess), 150, 104 y 87 (ciclo de Gleissberg) años, y a menudo han sido reconocidos en los proxys climáticos del Holoceno (por ejemplo, Denton y Karlén, 1973; Viau et al, 2006; Wanner et al, 2008; Debret et al, 2009; Yu et al, 2011; Wirth et al., 2013). Bond et al. (2001) propusieron la ocurrencia de eventos fríos con una periodicidad de ~1500 años, basado en el aumento de las concentraciones ice-rafted debris en el Atlántico Norte. Este ciclo es detectado en la reconstrucción de las inundaciones de los Alpes (Wirth et al., 2013). También, Wanner et al. (2011) propusieron seis eventos fríos durante el Holoceno a escala global, que coinciden en parte con los eventos de Bond et al. (2001). Sin embargo, no encontraron una periodicidad subyacente y, por lo tanto, afirman que los eventos son controlados por las variaciones en la actividad solar y los cambios en la circulación termohalina, así como por la variabilidad interna del sistema climático. En general, la comparación de los picos de actividad de

inundación de los Alpes (Wirth et al., 2013) con los eventos fríos descritos por Bond et al. (2001) y por Wanner et al. (2011) indican periodos comunes en 8,2, 6,2, 5,5, 4,7, 2,7, 1,3 y 0,5 kyr (kilo-años) BP.

Denton y Karlén (1973) proponen un control solar en las fluctuaciones de los glaciares alpinos al observar un patrón similar con el registro de ^{14}C (Stuiver et al., 1998), que, de hecho, se relaciona estrechamente con el registro de ^{10}Be utilizado para reconstrucciones de la Irradiancia Solar Total (TSI, Steinhilber et al., 2009). Los avances de los glaciares en 6-5, 3,4-2,4, 1,3-0,1 kyr BP coinciden con una mayor actividad de las inundaciones en la vertiente sur de los Alpes, y excepto para el periodo 3,4-2,4 kyr BP, también en el norte de la cordillera alpina. Además, Wirth et al. (2013) indican que el avance de los glaciares alpinos entre 4 y 3 kyr BP, que posiblemente fue más importante que el avance registrado durante la LIA (Schimmelpfennig et al., 2012), coincide aproximadamente con la alta ocurrencia de inundaciones en la vertiente sur de los Alpes durante el periodo 3,4-2,4 kyr BP.

6.2. Métodos

El análisis espectral es una herramienta útil para explorar la información inherente en las series temporales paleoclimáticas en el dominio de la frecuencia (Schulz and Statterger, 1997; Schulz and Mudelsee, 2002; Borgmark, 2005).

El problema más común a la hora de interpretar las señales en el dominio de la frecuencia es estimar el ruido inherente en toda serie paleoclimática para detectar las frecuencias que son significativas. El ruido blanco (White Noise) es un ruido constante a todas las frecuencias por lo que se puede considerar que es estacionario (no hay cambios de tendencia significativos), recibiendo el calificativo de Gaussiano cuando la distribución de frecuencias es normal. En cambio, el ruido rojo (Red Noise) es detectable en el espectro de las series temporales mostrando una disminución de la amplitud espectral a medida que aumenta la frecuencia (Hasselmann, 1976; Schulz and Mudelsee, 2002).

De los métodos que existen para realizar un análisis espectral, los más ampliamente utilizados son dos: el método de Blackman-Tukey (Jenkins and Watts, 1968) y el Maximum Entropy Spectral Analysis-MESA (Burg, 1967). El mayor inconveniente de estos métodos es que requieren series

uniformemente espaciadas en el tiempo. En general, este requerimiento no es satisfecho por las series paleoclimáticas cuyo espaciado temporal no es constante y, por lo tanto, para aplicar los métodos arriba citados es necesario algún tipo de interpolación. [Schulz and Statteger \(1997\)](#) demuestran que la interpolación produce un sesgo significativo al alterar el espectro estimado de las series temporales mejorando las componentes de baja frecuencia a expensas de las componentes de alta frecuencia. De esta manera, el espectro estimado de una serie temporal interpolada se vuelve demasiado “rojo” (aumento del ruido rojo) comparado con el verdadero espectro. Para solucionar este problema proponen la transformación de Lomb-Scargle Fourier (LSFT; [Lomb, 1976](#); [Scargle, 1982, 1989](#)) para series no uniformemente espaciadas en el tiempo en combinación con el procedimiento de Welch-Overlapped-Segment-Averaging (WOSA; [Welch, 1967](#); [Percival y Walden, 1993](#)) para llegar a obtener unas estimaciones espectrales matemáticamente consistentes.

En el presente estudio se va aplicar el método propuesto por [Schulz and Statteger \(1997\)](#) para el análisis de las avenidas e inundaciones en los últimos 200 años en Suiza y la comparación con las periodicidades obtenidas a partir de proxis solares (Irradiancia Solar Total, manchas solares) y climáticos (contenido de $\delta^{18}\text{O}$ en los testigos de hielo polar, reconstrucciones de temperatura y precipitación a partir de registros dendrocronológicos: [Cook y Kairiukstis, 1992](#); [Zanzi et al., 2007](#); [Büntgen et al., 2006; 2011](#)) y de los registros sedimentarios obtenidos en el flanco norte de los Alpes ([Schulte et al., 2015](#)). El método permite un análisis de alta resolución temporal, con el objetivo de detectar ciclos a una escala decadal. Para dar respuesta a estos objetivos se utilizarán los software científicos SPECTRUM ([Schulz and Statteger, 1997](#)) para el análisis del espectro y la detección del ruido blanco y el REDFIT ([Schulz and Mudelsee, 2002](#)) para la detección del ruido rojo. El análisis de estos tipos de ruido es de vital importancia para la detección de las frecuencias significativas ([Schulz and Mudelsee, 2002](#)).

Finalmente, para evaluar, validar y explicar ciclicidades comunes detectadas en las series temporales, se ha realizado un análisis espectral cruzado ([Schulz y Statteger, 1997](#)) mediante el módulo de análisis espectral bivalente del software SPRECTRUM. Este programa analiza los espectros cruzado, de coherencia y de fase para resumir la covariancia de las series temporales en el dominio de la frecuencia ([Shackleton, 2000](#)).

Estos algoritmos matemáticos demuestran la significación de los picos del espectro y de los ciclos predominantes, pero son incapaces de evaluar las estimaciones de error. El esquema metodológico descrito no incorpora la evaluación de los errores que se puedan haber introducido en una fase anterior del proceso. Los errores más comunes pueden derivar de la inexactitud en la edad de los modelos de profundidad de los registros (sedimentarios, testigos de hielo) y de la tendencia lineal de las secuencias de datos (Borgmark, 2005).

La metodología se ha ensayado con éxito en el marco de los proyectos de investigación multidisciplinario Fluvalps-3000, Fluvalps-plus y Fluvalps-Iberia. Se centran en la variabilidad del Holoceno Tardío y la dinámica fluvial histórica en cuencas alpinas en base a los registros sedimentarios de los últimos tres mil años extraídos de los abanicos deltaicos formados por los ríos Lütschine, Lombach y cuenca superior del río Aare (valle de Hasli) en los Alpes Berneses (Schulte et al., 2009, 2014, 2015). Entre otros muchos, uno de los objetivos principales ha sido relacionar las grandes inundaciones derivadas de los registros sedimentarios con los forzamientos solares y climáticos. La serie temporal de alta resolución muestra que durante los últimos 2.600 años las inundaciones catastróficas tienen un intervalo de recurrencia de 370 años, coincidiendo con anomalías positivas de radiocarbono y periodos fríos en los Alpes, mientras que los episodios de menor entidad tienen intervalos promedio que varían entre los 113 años y 105 años, sugiriendo que la agradación en el periodo tratado fue provocada por las inundaciones centenarias.

6.2.1. El análisis espectral univariante

El presente estudio aplica técnicas de análisis espectral para investigar los patrones cíclicos en el índice estival de daños por inundaciones en Suiza (INU_{SWS}) comparándolas con las ciclicidades obtenidas del análisis de los registros sedimentarios procedentes de la cuenca superior del río Aare y otros proxys climáticos y solares. Se ha aplicado la transformación de Lomb-Scargle Fourier para detectar ciclicidades y evaluar el ruido blanco. Para la evaluación del ruido rojo se ha utilizado el parámetro autorregresivo de primer orden, AR(1), aplicado directamente a las series temporales.

6.2.1.1. Programa SPECTRUM: evaluación del ruido blanco

El software científico SPECTRUM permite el análisis de series espaciadas irregularmente en el tiempo dentro del dominio de la frecuencia. De esta manera, los datos paleoclimáticos, que usualmente cumplen esta característica, se pueden procesar directamente sin necesidad de interpolación. El programa consta de diferentes módulos: el primero permite un análisis armónico para la detección de señales periódicas; un segundo módulo computa un análisis espectral para una sola variable; y el tercero realiza un análisis espectral cruzado, el cual no requiere un eje temporal común de las dos series procesadas. Un cuarto módulo complementa los análisis reseñados con parámetros estadísticos que permiten la evaluación de los resultados obtenidos. El último módulo permite exportar los resultados como archivos de texto, además de herramientas adicionales para la visualización de datos.

En nuestro análisis se ha utilizado un análisis armónico con el objetivo de detectar señales periódicas en los registros con presencia de ruido (Percival y Walden, 1993) y no uniformemente espaciadas en el tiempo. El programa SPECTRUM (Schulz and Statteger, 1997), cuyas rutinas asumen que el ruido es de tipo blanco, está basado en un periodograma calculado a partir de la transformación Lomb-Scargle Fourier (LSFT) utilizando una ventana rectangular en combinación con el Welch-Overlapped-Segment-Averaging (WOSA).

Las rutinas del programa utilizan el test de Fisher (1929) y el de Siegel (1980) para la evaluación del ruido blanco. Ambos tests postulan que la hipótesis nula indica que la señal es puro ruido blanco. La diferencia entre ambos métodos estriba en que Fisher definió el test para señales con una única periodicidad, mientras que Siegel lo redefinió para aquellos casos que existan hasta tres componentes en las series temporales. Por esta razón se ha rechazado la utilización del test de Fisher¹. Las frecuencias significativas de las señales paleoclimáticas se evaluarán a partir del test de Siegel (para 2-3 componentes periódicos) usando un nivel de significación de 0,05 ($\alpha=0,05$) y una lambda de 0,4 ($\lambda=0,4$), parámetro que señala un nivel de alarma del 99.6%. La hipótesis nula se rechaza cuando el valor empírico T_λ es superior al valor teórico $t_{\lambda,\alpha}$ ($T_\lambda > t_{\lambda,\alpha}$). En este caso, uno o más componentes periódicos están presentes en la serie temporal.

¹ De todas maneras se han utilizado ambos tests cuando se ha evaluado las periodicidades referentes a la actividad solar en base al número de manchas solares para dar mayor consistencia al análisis.

6.2.1.2. Programa REDFIT: evaluación del ruido rojo

El supuesto subyacente en los tests presentados (Fisher y Siegel), las series temporales tienen fondo de ruido blanco, rara vez se cumple para los registros paleoclimáticos. En cambio, es más frecuente enfrentarse con datos que muestran un ruido de fondo rojo (Mann y Lees, 1996). Es decir, el problema de las series paleoclimáticas estriba en la presencia de un segundo tipo de ruido debido a la existencia de ciclos intrínsecos a las series. Con un simple análisis de ruido blanco pueden aparecer falsos picos en el periodograma que con el test de Siegel pueden llegar a ser aceptados. La evaluación de este segundo tipo de ruido ayuda a la validación de los picos espectrales.

El espectro de ruido rojo de los registros ha sido estimado con el software REDFIT (Schulz and Mudelsee, 2002). Este programa estima el parámetro autorregresivo de primer orden, AR(1), directamente para series temporales no espaciadas uniformemente en el tiempo y transforma este modelo hacia el dominio temporal de la frecuencia. Las frecuencias obtenidas a partir de los espectros de las señales paleoclimáticas se comparan con el AR(1) y se evalúa su verdadera significación. De esta manera, se introduce la evaluación del ruido rojo en el modelo para completar la certificación de los picos espectrales significativos y refutar las falsas frecuencias.

6.2.2. El análisis espectral cruzado. El módulo de análisis espectral bivariante del programa SPECTRUM.

El análisis espectral puede ser ampliado al estudio simultáneo de dos registros, de forma que se pueda analizar la conexión entre ellas. Relaciona los ciclos de las series temporales con el fin de obtener el grado de “asociación” (Granger, 1964). Existen diferentes métodos que relacionan dos o más series temporales para detectar ciclicidades comunes en el dominio de la frecuencia, entre los cuales el más usado es el análisis del espectro cruzado aplicado a series paleoclimáticas (Lourens, 1996; Shackleton, 2000; Turney et al., 2004; Tian et al., 2008). Este método parte del supuesto que las dos variables son estacionarias, es decir, sin tendencia y media constante. Además, es una herramienta de análisis exploratorio en el caso de no conocer a priori en qué banda de frecuencia o frecuencias queda contenida la mayor parte de la varianza de las series temporales. Los componentes del análisis del espectro cruzado

son la coherencia y la fase. Son tres las cuestiones que se plantean en este tipo de análisis:

1. ¿Qué proporción de la varianza queda explicada por cada una de las frecuencias, tomando las dos series temporales de manera individual? Esta pregunta es respondida a través del periodograma o análisis de espectro para cada una de las series, cuestión que ha quedado explicada en el apartado 6.2.1.
2. Dentro de esta banda de frecuencias, ¿cómo están correlacionadas el par de series temporales? Esta cuestión se responde a través de la coherencia de espectro.
3. Identificadas las frecuencias comunes, ¿cuál es la relación de fase entre las series? El análisis se realiza a través de fase de espectro.

El proceso de análisis es el siguiente: en primer lugar se elimina la tendencia de cada una de las series temporales y se calcula el periodograma individual de las series con el objetivo de identificar si existen picos espectrales comunes. En segundo lugar se aplica el análisis espectral cruzado. En este caso se ha utilizado el módulo bivariante del programa SPECTRUM (Schulz and Statteger, 1997). El software considera el espectro cruzado, de poco valor estadístico al no poder establecer niveles de significación de los picos espectrales, la coherencia espectro y la fase de espectro, por lo que sólo se realiza el análisis de estos dos últimos.

- La coherencia de espectro determina el porcentaje de variación de las series para una banda de frecuencia específica. Esta estimación es útil e interpretable sólo para aquellas frecuencias que explican una parte importante de la varianza. Por lo tanto, el primer filtro es el conjunto de frecuencias que contribuyen significativamente a la varianza total. De esta manera, la coherencia da una medida de la dependencia entre las dos series.
- Si la coherencia es grande, sólo entonces tiene sentido evaluar la fase de espectro con la finalidad de tener las características de la relación entre las dos series. También es posible evaluar el desfase temporal entre las series, pero el software SPECTRUM permite una alineación temporal entre las dos series. Una cuestión primordial es la definición de hipótesis previas sobre las series analizadas porque pueden aparecer desfases de $\pm 180^\circ$ (Schulz and Statteger, 1997). En nuestro caso, el análisis del

estado de la cuestión referente a las paleoinundaciones reporta que los periodos de frecuencia en inundaciones aparecen en pulsos o periodos fríos (Schulte et al., 2008, 2015; ver la discusión en el apartado 6.3.2). De esta manera, resulta necesario cambiar de signo a la serie de daños por inundaciones (INU_{sws}) para captar esta relación inversa y evitar off-sets o desplazamientos en la fase de espectro.

Este conjunto de estadísticos provee las herramientas necesarias para estudiar el grado de asociación y la relación en el dominio de la frecuencia entre cualquier par de series. En resumen, la interpretación de los ciclos comunes se ha realizado a partir del espectro cruzado para identificar los ciclos, el de coherencia para validarlos y el de fase con la intención de buscar una explicación plausible a los ciclos identificados.

6.3. Análisis espectral de las grandes inundaciones

6.3.1. Análisis de INU_{sws} : la identificación de las periodicidades significativas

La parte superior de la figura 6.1 representa gráficamente el análisis harmónico de INU_{sws} con el objetivo de detectar periodicidades en los registros con presencia de ruido (Schulz y Statteger, 1997; Schulz y Mudelsee, 2002; Borgmark, 2005). El análisis identifica señales periódicas que están por encima del nivel de falsa alarma definida mediante la prueba de Siegel, en un intervalo de frecuencias (f_s) que varían entre 0,005 y 0,011, con un pico máximo a 0,009; en 0,082; entre 0,103 y 0,105, con un pico máximo a 0,105; y entre 0,391 y 0,413, con un pico máximo en 0,393. No se ha detectado ruido rojo en la señal al nivel de alarma del 99,6% (parte inferior de la figura 6.1). Así, el análisis harmónico indica picos espectrales significativos (Periodo (años) = $1/f_s$) entre 92 y 184 años con un pico espectral máximo en 110 años; entre 10 y 12 años con un pico espectral máximo a los 10 años; y entre 2 y 3 años con un pico espectral máximo situado en 2 años.

Los dos primeros ciclos pueden corresponder a los ciclos Schwabe ($11,04 \pm 2,02$ años) y Gleissberg ($88,6 \pm 21$ años). Este tipo de procesos periódicos seculares han sido reportados en una amplia variedad de fenómenos climáticos (Peristykh y Damon, 2003). El ciclo de 2 años

podría corresponder a la Oscilación Cuasi-Bienal (Ebdon, 1975; Baldwin et al., 2001, Giorgetta et al., 2002), que como se ha indicado es un ciclo de alta frecuencia que podría estar provocado por la dinámica solar que actúa en la parte superior de la zona de convección debido a la cizalladura latitudinal (Benevolenskaya, 1998, 2000); o causado por un cambio bianual del flujo estratosférico en la atmósfera tropical, modulando los efectos de las ondas extra tropicales (Baldwin et al., 2001; ver capítulo 11).

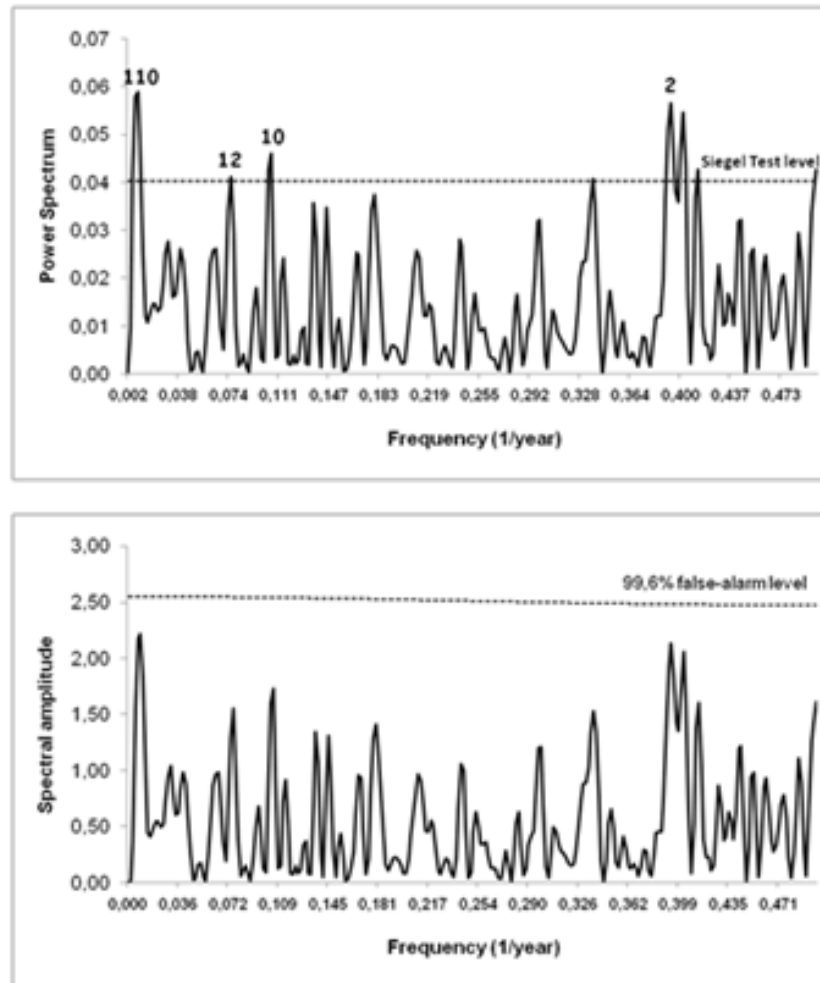


Figura 6.1. Parte superior. Análisis armónico de INU. La línea representa el nivel crítico para la prueba de Siegel. Las frecuencias significativas se muestran en años. Parte inferior. Modelo autorregresivo de primer orden de INU para la evaluación del ruido rojo. La línea muestra el nivel de falsa alarma del 99,6%.

6.3.2. El Análisis espectral cruzado entre el número medio anual de manchas solares y las grandes inundaciones

6.3.2.1. Consideraciones generales

Se ha aplicado un análisis armónico al número medio anual de manchas solares para el periodo 1700-2011. Los resultados se muestran en la figura 6.2 donde se manifiestan los principales ciclos solares a escala centenal y decadal. Por otra parte, los resultados son coherentes con estudios similares (ver figura 3 en Richards et al., 2009, página 10).

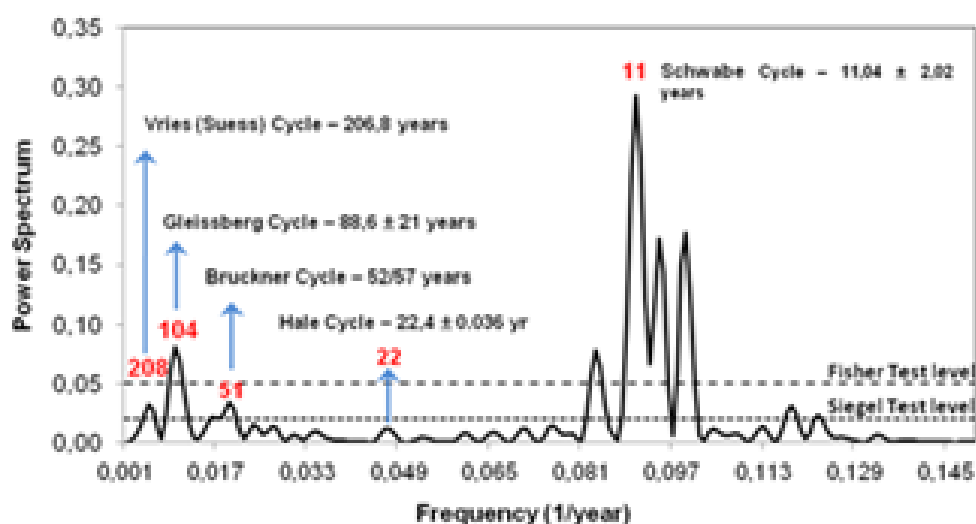


Figura 6.2. Análisis armónico del número medio anual de las manchas solares. Las dos líneas horizontales representan los niveles críticos para las pruebas de Fisher y Siegel. Se destacan las frecuencias significativas y los principales ciclos solares.

Para considerar la dependencia de los picos espectrales, se ha aplicado un análisis espectral cruzado tomando como variables de entrada INU_{SWS} y el número medio anual de manchas solares con el objetivo de analizar el espectro cruzado, la coherencia y la fase de espectro (figura 6.3). Es importante señalar que se ha cambiado el signo de INU_{SWS} antes de empezar el análisis con el objetivo de prevenir un offset artificial en la fase de espectro de $\pm 180^\circ$. De esta manera, los ángulos negativos indican que la frecuencia máxima en las inundaciones se produce durante actividad solar mínima y viceversa: para máximos valores de INU_{SWS} se espera que correlacionen con mínimos valores de actividad solar, tal como indican algunos estudios (Denton y Karlen, 1973; Magny, 1993; van Geel et al., 1996; Bond et al., 2001; Versteegh, 2005; Schulte et al.,

2008, 2015). La justificación se relaciona a una oscilación climática de escala milenaria basada en periodos donde una pulsación fría-húmeda se alterna con una cálida-seca. El ciclo es similar, por ejemplo, al ritmo de avance y retraimiento de los glaciares en la zona alpina (Holzhauser et al., 2005). Este hecho también fue observado por Pfister (1999) en su análisis de las inundaciones en Suiza: las épocas de avance de los glaciares coincidían con clústeres de inundaciones. Holzhauser et al., 2005 a partir de una comparación entre las fluctuaciones del glaciar Gran Aletsch y las variaciones en los registros ^{14}C , demuestran que el avance de los glaciares coincidía con picos de radiocarbono, es decir, periodos de menor actividad solar, apoyando la hipótesis de que las variaciones en la actividad solar fue un factor motriz importante en las oscilaciones climáticas en Europa Central y Occidental durante el Holoceno tardío.

6.3.2.2. El significado de las periodicidades comunes

Se han detectado periodicidades comunes con INU en las frecuencias 0.010 ($\cong 100$ años) y 0.090 ($\cong 11$ años).

A pesar de la difícil interpretación del espectro cruzado al depender de los valores absolutos de las periodicidades detectadas en las variables originales (por esta razón no se muestran los intervalos de confianza, figura 6.3, parte superior), la distribución de frecuencias espectrales indican las dos periodicidades comunes detectadas (104 y 11 años) más una tercera que se ubica en 22 años ($f_s = 0,045$). La coherencia de espectro (figura 6.3, parte central) muestra vínculos significativos en las frecuencias para las que el espectro cruzado sugirió la presencia de componentes periódicos (fijando el nivel de falsa alarma para un $\alpha=0.1$). Por último, teniendo en cuenta que a INU se le cambió de signo al inicio del análisis, la fase de espectro indica que ángulos negativos se relacionan con valores positivos de INU y negativos de actividad solar, mientras que ángulos negativos significan valores negativos de INU y positivos de actividad solar. La figura 6.3 (parte inferior) indica ángulos negativos de $-117 \pm 20^\circ$ en $f_s = 0,010$, y $-98 \pm 48^\circ$ en $f_s = 0,090$. En cambio, el ángulo es positivo ($132 \pm 19^\circ$) en $f_s = 0,045$.

El análisis espectral cruzado sugiere, en definitiva, que las periodicidades comunes detectadas en 11 (ciclo Schwabe) y 104 (ciclo Gleissberg) años, se caracterizan por una frecuencia elevada en las crecidas y están relacionados con periodos de baja actividad solar (ángulos negativos en la fase de espectro), mientras que existe una ciclicidad en 22 años (ciclo

Hale) que se relaciona con máxima actividad solar y una disminución de la frecuencia en las crecidas (ángulos positivos en la fase de espectro).

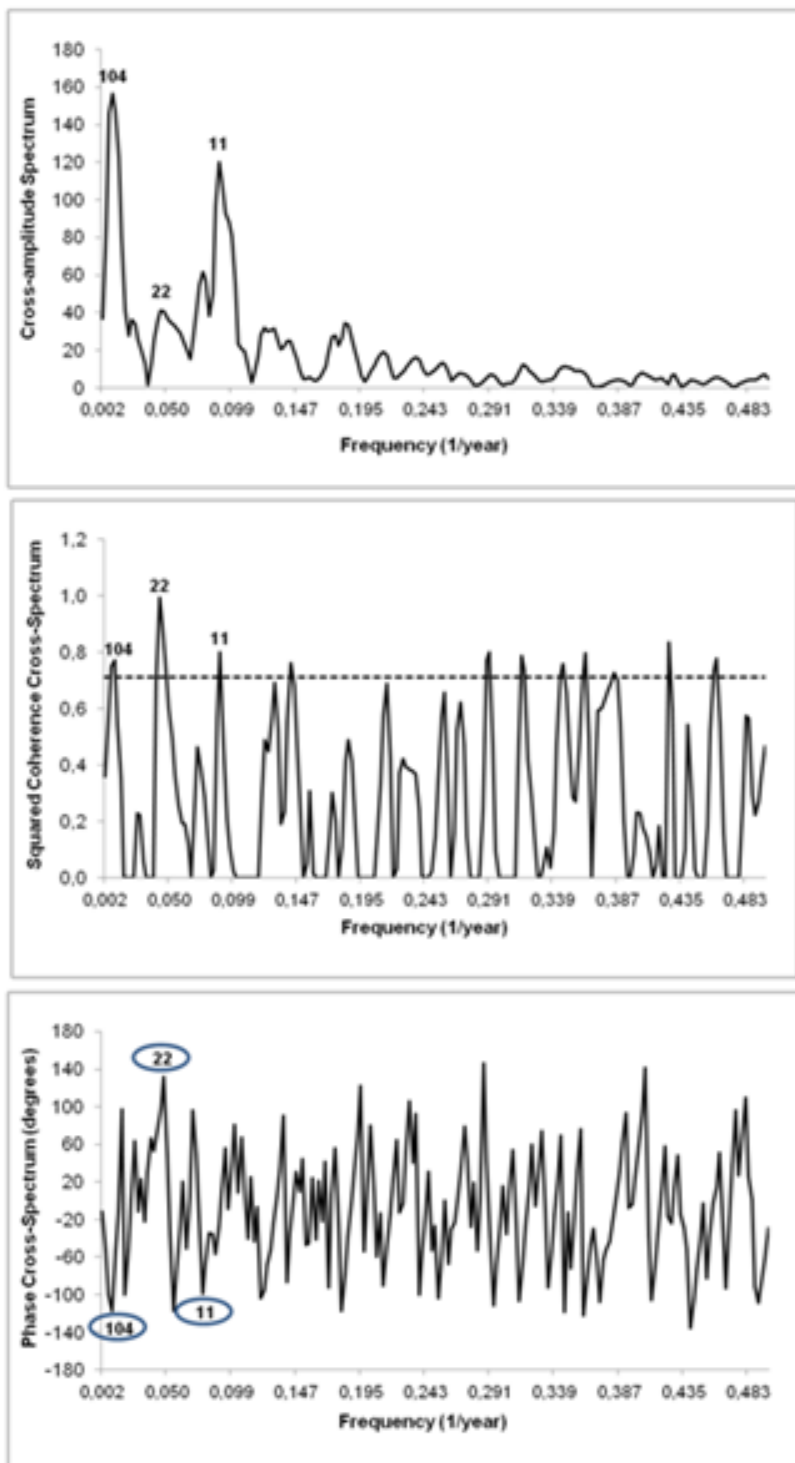


Figura 6.3. Análisis espectral cruzado entre INU y el número anual de manchas solares. Parte superior: Espectro cruzado. Las frecuencias significativas están etiquetadas en años. Parte central: Espectro de coherencia. La línea indica el nivel de falsa alarma para $\alpha = 0,1$. Parte inferior: espectro de fase. El signo de los datos INU se ha cambiado antes del análisis a fin de evitar un desplazamiento de fase artificial de $\pm 180^\circ$. Los ángulos negativos indican que la frecuencia máxima en las inundaciones se produce durante actividad solar mínima y viceversa.

6.4. Influencia de la variabilidad solar en las inundaciones de Suiza

6.4.1. Discusión de las periodicidades obtenidas

Hay que ser cauteloso a la hora de interpretar los resultados obtenidos del análisis espectral, pero el modelo AR(1), donde se evalúa la posibilidad que el espectro sólo muestre ruido rojo, permite una validación robusta de las periodicidades significativas detectadas. Además, las periodicidades resultantes son dependientes de la exactitud de la cronología relacionada con la serie temporal analizada. Por tanto, siempre habrá incertidumbres en los resultados obtenidos en el análisis. Por esta razón se recomienda describir periodos e intervalos más que años definitivos (Borgmark, 2005).

En las últimas décadas la relación sol-clima ha sido objeto de análisis (Beer et al., 2000; Solanki y Fligge, 2000; Haigh, 2003; Versteegh, 2005; Gray et al 2010; Vonmoos et al., 2006), proponiendo el forzamiento solar como una de las posibles causas impulsoras de la variabilidad climática y de la aparición de periodos de alta frecuencia de inundaciones (Benito et al., 2003; Vaquero, 2004). Mediante la aplicación del análisis espectral al índice de daños por inundaciones (INU_{SWS} ; Peña y Schulte, 2014; Peña et al., 2015b,c) y a los proxies procedentes de los registros sedimentarios extraídos de varias secciones de los abanicos deltaicos de la cuenca superior del río Aare (Alpes berneses, Schulte et al., 2008; Schulte et al., 2015), se han identificado ciclos de inundación comunes con una variación que oscila entre 70 y 150 años. La periodicidad de los llamados "eventos de 100 años" (según Glaser et al., 2010) podría explicarse por los ciclos solares de escala centenaria (ver figura 6.2), como puede ser el ciclo Gleissberg, ciclo que igualmente ha sido identificado en otros registros sedimentarios (Castagnoli, et al., 1994; Versteegh, 2005), incluyendo aquellos ubicados en el este de Francia, Suiza, Países Bajos, el Reino Unido, España, EEUU, Nueva Zelanda o Argentina (véase, por ejemplo, Magny et al., 2003; Versteegh, 2005). De esta manera, se propone la influencia de la actividad solar y su impacto sobre la circulación de la atmósfera como dos de los principales factores desencadenantes de las grandes inundaciones en Suiza.

La figura 6.4 muestra la evolución temporal del número medio anual de manchas solares (línea delgada), suavizada con un filtro gaussiano de paso bajo de 22 años (línea gruesa) y su relación con INU_{SWS} (los periodos de mayor frecuencia de inundaciones, ver figura 5.4b, están

señalados en amarillo enmarcados por un cuadrado de líneas a trazos). Para el periodo comprendido entre 1700 y 2010 se han identificado tres ciclos Gleissberg. Cada ciclo queda definido como el periodo comprendido entre dos mínimos absolutos: el primero comprende los años 1711 y 1810 con unos 100 años de duración, el segundo se extendería entre el año 1811 hasta el año 1901, con una duración de 90 años, mientras que el tercero se alargaría hasta nuestros días, con una duración aproximada de 99 años. Se tratan de ciclos entre 90 y 100 años de duración, con un periodo de baja actividad solar que puede variar entre 25 y 35 años (señalados en color azul en la figura 6.4) y una fase de máxima actividad solar que se caracteriza por la presencia de un primer máximo, seguida de una fase de transición donde la actividad solar suele descender para después alcanzar un segundo máximo (identificados en la figura 6.4 por el color salmón).

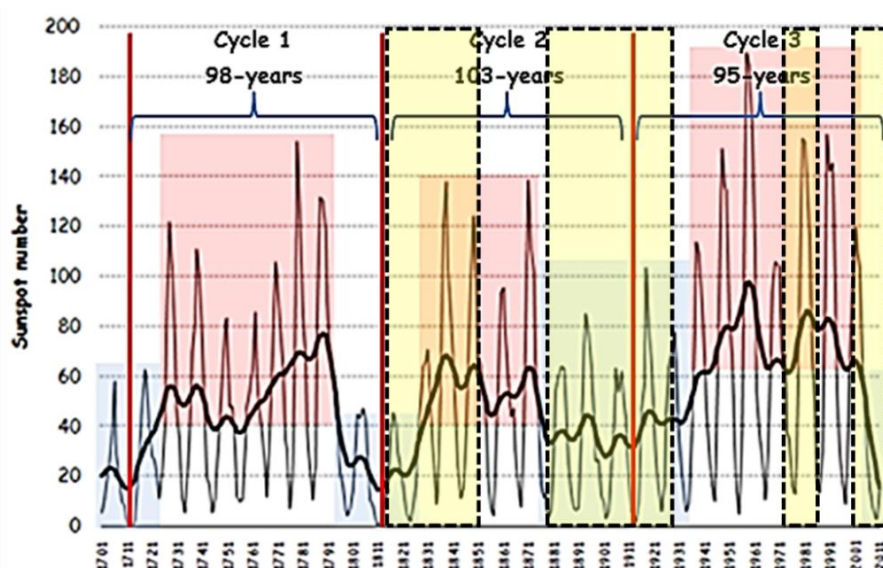


Figura 6.4. Evolución temporal del Número de manchas solares (1700-2010) suavizada con un filtro gaussiano de 22 años. El filtro señala los ciclos Gleissberg (aprox. 98 años) indicando tres ciclos en los últimos 310 años. Se resaltan las fases de baja actividad solar (color azul) y de alta actividad solar (color rojo). Finalmente, se señalan los periodos de $INU > 2,5 SD$ (color amarillo).

La primera, segunda y cuarta pulsación del índice INU_{SWS} se encuentran situadas en un periodo de baja actividad solar, mientras que la tercera se inserta en el máximo moderno, pero en el momento de transición entre las dos cimas que caracterizan cada ciclo. De forma general, parece señalar que las variaciones más significativas en la frecuencia de las avenidas aparecen durante las pulsaciones frías (Knox, 2000; Schulte et al, 2015), especialmente en sus estadios iniciales y finales (Benito, 2006; Ortega y Garzón, 2009), hecho que también aparece constatado en Suiza (Schmocker-Fackel y Naef, 2010).

El análisis de los registros sedimentarios en el flanco norte de los Alpes (Schulte et al., 2008; 2015) indica que las avenidas de gran magnitud en los últimos 2.600 años coinciden con anomalías positivas de radiocarbono, es decir, con una disminución de la actividad solar. Contrariamente, Wilhelm et al. (2012) observan a través de los registros sedimentarios lacustres para los últimos 1.500 años en la vertiente sur de los Alpes una relación entre máxima actividad solar y periodos con máxima frecuencia de las crecidas. Sin embargo, indican que un aumento de la humedad en el norte y oeste de Europa está en relación a fases de baja actividad solar. Para el norte de Suiza (incluyendo vertiente norte de los Alpes y Swiss Plateau), Schmocker-Fackel and Naef, 2010 reportan una alta frecuencia en las crecidas de los últimos 500 años en los estadios finales del Mínimo Spörer, Mínimo Maunder y Mínimo Dalton, este último correspondería a la primera pulsación observada en INU_{SWS} .

En definitiva, el resultado obtenido a partir del análisis espectral cruzado reafirma alguna de las aseveraciones arriba apuntadas. Las periodicidades comunes y significativas detectadas en el espectro de coherencia de 11 (ciclo de Schwabe) y 100 años (ciclo de Gleissberg) relacionan una alta frecuencia de las inundaciones con una actividad solar baja (ángulos negativos en el espectro de fase). Por otra parte, la ciclicidad detectada de 22 años (ciclo Hale) apunta una relación entre la actividad solar máxima y una disminución de la frecuencia de inundaciones (ángulos positivos en el espectro de fase). Esta frecuencia bi-decadal del índice INU_{SWS} con valores máximos de actividad solar es confirmado por el análisis de proxis climáticos del oeste de los Estados Unidos, donde se han identificado desde el año 1700 ciclos de sequías con un periodo de 22 años (Cook y Stockton, 1997; Briffa, 2000).

6.4.2. Comparación de las periodicidades obtenidas con los registros sedimentarios y los proxis climáticos

En la sección 6.4.1 se ha indicado la existencia de periodicidades comunes entre INU_{SWS} y los registros sedimentarios en la vertiente norte de los Alpes (Schulte et al., 2015). En esta sección se analizan estos resultados de forma más detallada.

Se ha reconstruido un registro de paleo-inundaciones para los últimos 2.600 años a partir de los testigos sedimentarios de alta resolución extraídos de la llanura de inundación del valle de Hasli (46°41'N, 6°04'E), ubicado en la vertiente norte de los Alpes suizos (Schulte et al., 2015, ver figura 6.5). Los proxis naturales compilados a partir de los datos

sedimentarios, geoquímicos y geomorfológicos se calibraron a través de fuentes documentales y datos instrumentales. De los 14 eventos extremos registrados históricamente en el periodo comprendido entre 1480 y 1875, año que finaliza la corrección hidráulica del curso principal, 12 eventos fueron identificados por las capas sedimentarias de grano grueso relacionadas con periodos de inundación. De esta manera, tanto los datos geomorfológicos como los históricos e instrumentales, proporcionan evidencia de las inundaciones históricas graves y catastróficas.

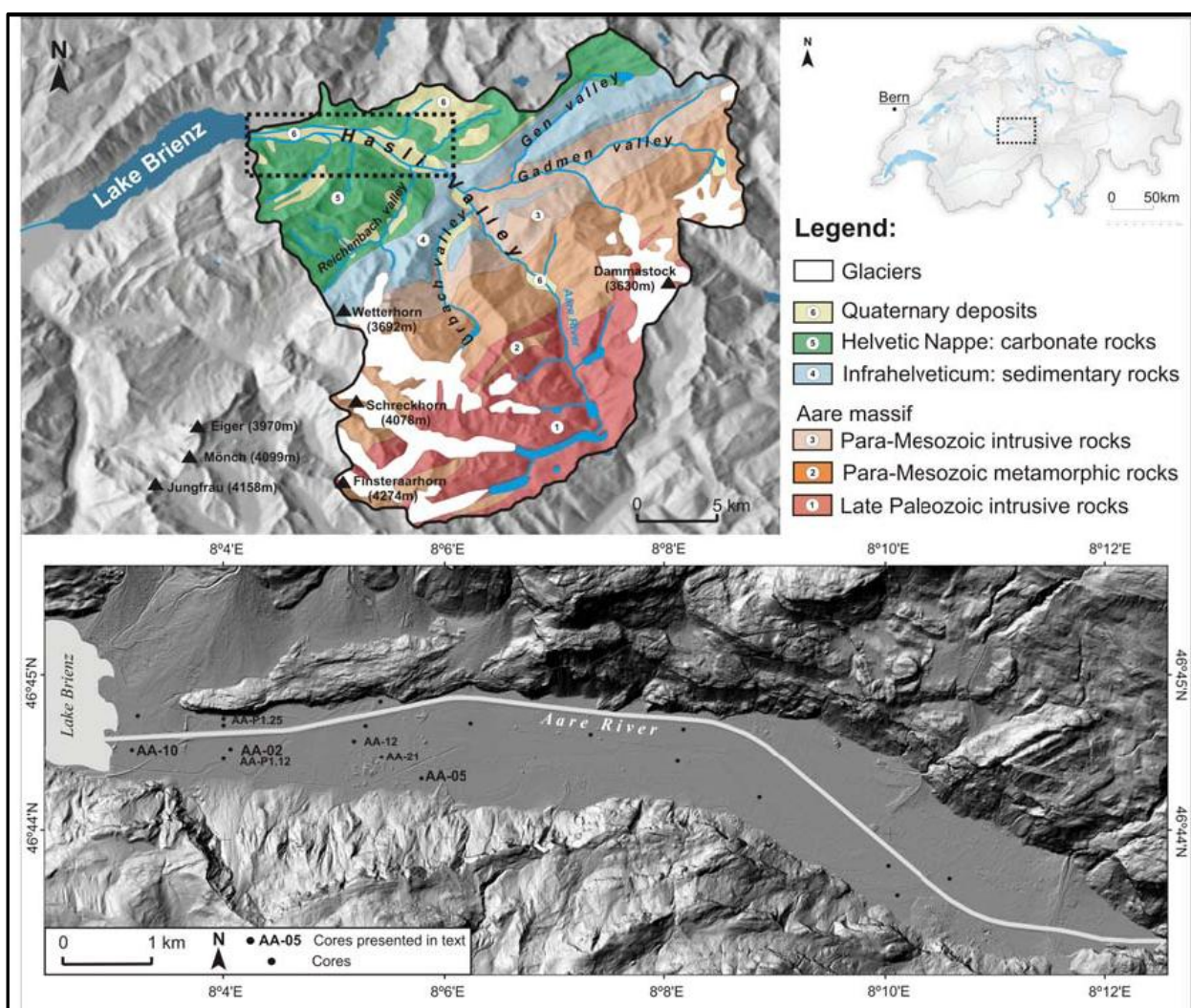


Figura 6.5 Geología de la cuenca superior del río Aare y DTM del valle de Hasli. Los puntos negros en el DTM indican la ubicación de los testigos sedimentarios analizados. Fuente original: Schulte et al., 2015

Para generar los proxies a partir de los sedimentos procedentes de la llanura deltaica, se analizó la variabilidad geoquímica (Al, Si, S, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Rb, Sr, Zr, Pb, Br y Cu) de los testigos sedimentarios siguiendo

una serie de pasos. En primer lugar, las series de elementos individuales se representaron frente a la litología, la textura y el total de carbono orgánico en función de la profundidad de la muestra. En segundo lugar, cada uno de los elementos se dividieron por el Titanio (Ti), dada su estabilidad durante los procesos de transporte y meteorización (Kylander et al., 2011), con la finalidad de eliminar posibles alteraciones de los elementos químicos durante su manipulación en el laboratorio. En tercer lugar, se aplicó un Análisis en Componentes Principales (PCA) a estos cocientes para explorar la variabilidad de los datos geoquímicos (Schulte et al., 2015) con el fin de crear un proxy robusto que registre las paleo-inundaciones.

Se retuvieron los dos primeros factores y las puntuaciones (scores) se representaron en función del tiempo para la comparación con los registros paleoclimáticos, tales como las series reconstruidas de temperatura y precipitación de los Alpes (Büntgen et al., 2011), el registro de $\delta^{18}\text{O}$ de Groenlandia (GISP2, Reimer et al., 2004), la Irradiación Solar Total (TSI, Steinhilber et al., 2012) y el vulcanismo (Gao et al., 2008). Cuando los resultados del primer factor se representan en función de la profundidad, se detectan toda una serie de pulsos agradacionales en los depósitos sedimentarios, indicando un cambio en las tasas de sedimentación (ver figura 6.6 y figura 6.7d). Las puntuaciones negativas del factor coinciden con un total de 26 niveles de inundación de grano grueso, definiendo siete periodos de alta frecuencia de crecidas: 1250-1350, en torno a 1390, 1420-1480, 1550-1620, 1650-1720, 1762 y 1811-1851.

La Figura 6.6 ilustra la correlación visual entre el Factor 1 (proxy que indica una mayor agradación de materiales gruesos de las partes elevadas de la cuenca dominada por rocas plutónicas) y los valores de $\delta^{18}\text{O}$ del registro GISP2 de Groenlandia. Las curvas muestran un patrón muy similar, sugiriendo que puntuaciones negativas correlacionan con un clima más frío en Groenlandia, mientras que los procesos de formación del suelo (puntuaciones positivas) relacionados a una disminución de la erosión en el valle se correlacionan con pulsos de clima más templado. Aunque las tendencias en los proxis geoquímicos parecen mostrar una estrecha relación con el $\delta^{18}\text{O}$, se plantea la cuestión si pueden existir desfases entre las dos series de datos; por ejemplo, los valores de $\delta^{18}\text{O}$ pueden registrar retrasos de 0 a 40 años en relación con la tasa de producción del ^{14}C (Stuiver et al, 1997; Versteegh, 2005), parámetro que ha sido utilizado para la datación de los sedimentos.

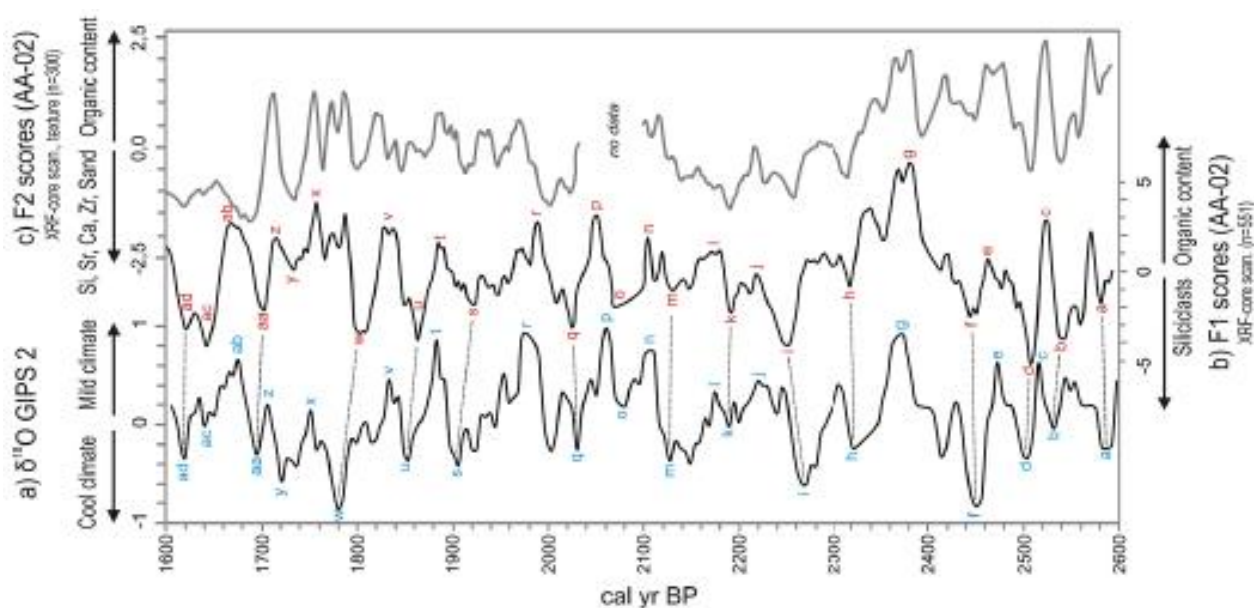


Figura 6.6. Comparación de a) el registro procedente de los testigos de hielo procedentes de Groenlandia (GISP2; [Stuiver et al, 1997](#)) y b) las puntuaciones del Factor 1 del registro sedimentario AA-02 (ver figura 6.6) para el periodo 2600-1600 años cal AP. Los valores negativos (clima frío y alta frecuencia de inundaciones) se señalan por líneas discontinuas. Máximos y mínimos de las dos series ($\delta^{18}\text{O}$ y Factor 1) se marcan con las letras "a" a "ad". c) Se representa las puntuaciones del Factor 2 para la comparación. Fuente original: [Schulte et al., 2015](#).

Los posibles vínculos entre la frecuencia de las inundaciones y la variabilidad climática regional se muestran en la figura 6.7 revelando la variabilidad cuasi-cíclica de las puntuaciones del Factor 1. Las máximas puntuaciones se relacionan con procesos de formación del suelo in situ durante los periodos de baja frecuencia de inundaciones y de erosión del suelo en la cuenca. Estos periodos correlacionan con valores positivos de TSI ([Steinhilber et al., 2012](#)), una temperatura de verano elevada (JJA) en los Alpes europeos ([Büntgen et al., 2006; 2011](#)) y unas anomalías positivas de precipitación durante primavera tardía y comienzo del verano ([Büntgen et al., 2006; 2011](#)) en los periodos 1350-1410, 1500-1560, en torno a 1660 y de 1720 a 1810. Según [Schulte et al., 2015](#), la combinación de primaveras húmedas y veranos cálidos podría producir un aumento del caudal base durante finales de la primavera y principios del verano, incrementando el riesgo en base a la peligrosidad durante los meses de julio y agosto, periodo definido como la temporada crítica para las inundaciones de gran tamaño (el 92% en el valle del Hasli se producen en este periodo).

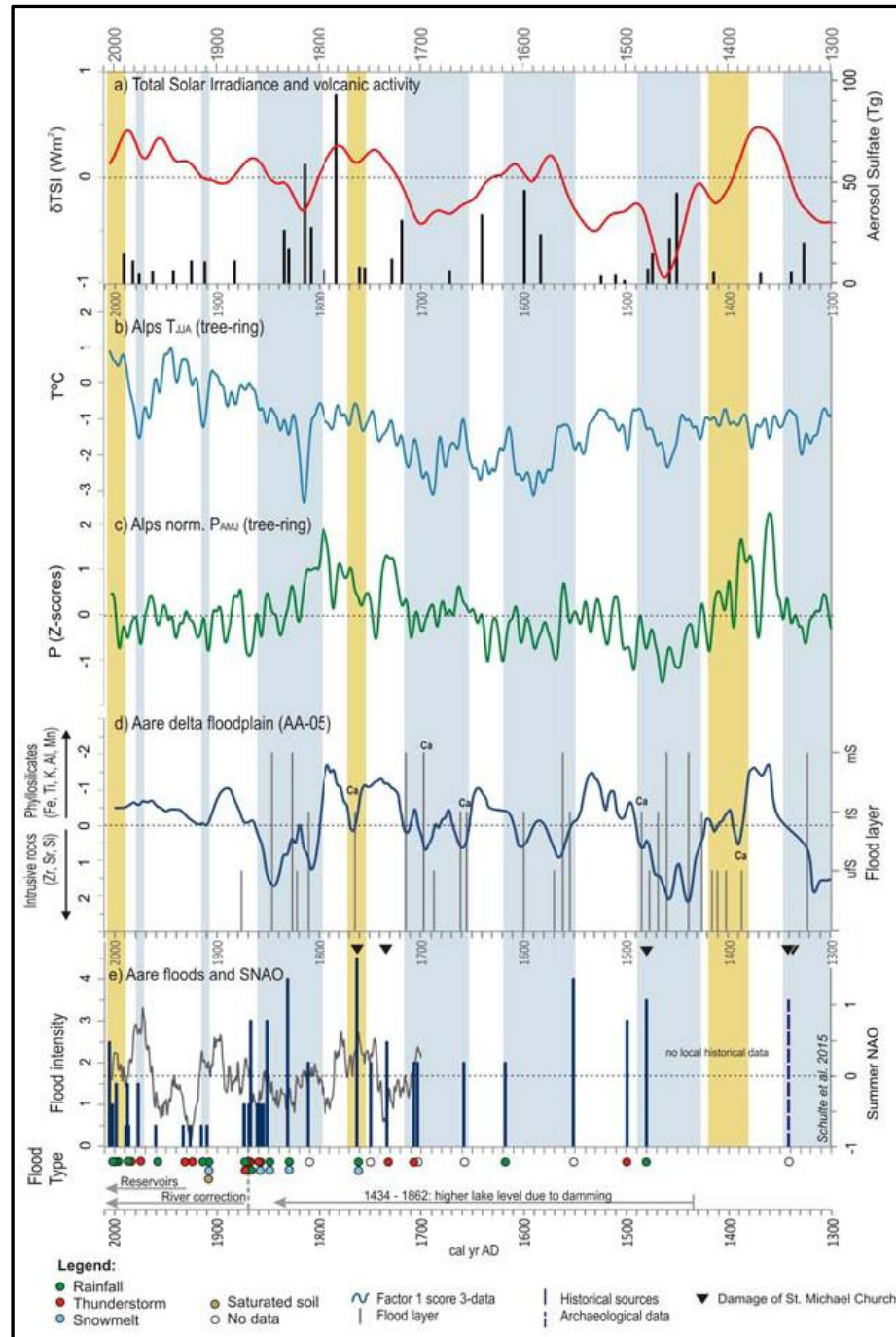


Figura 6.7. Comparación entre las inundaciones históricas del Hasli-Aare, el registro de paleo-inundaciones, la variabilidad solar, la actividad volcánica y proxies climáticos (Periodo: 1300-2010). Fuente original: Schulte et al., 2015.

- a) Media móvil centrada de 40 años de Irradiación Solar Total (Steinhilber et al., 2012) y la inyección anual de aerosoles de sulfato volcánico a la estratosfera, referidos al hemisferio norte (Gao et al., 2008).
- b) Anomalías de temperatura del verano (filtro de paso bajo gaussiano de 13 años) en los Alpes reconstruidas a partir de las series dendrocronológicas (Büntgen et al., 2006).
- c) Anomalías de precipitación de primavera (filtro de paso bajo gaussiano de 13 años) en los Alpes reconstruidas a partir de las series dendrocronológicas (Büntgen et al., 2006).
- d) Proxy de paleoinundaciones de la llanura deltaica del río Aare en el Valle de Hasli (Lothar et al., 2015): puntuaciones del Factor 1 y niveles de inundación de grano grueso de inundación (uFS = limosa de arena fina; fS = arena fina; mS = arena media).
- e) Cronología de las principales inundaciones del río Aare (valle de Hasli) a partir de evidencias documentales, arqueológicas y geomorfológicas. Los triángulos representan los daños de la iglesia Sankt Michael causadas por el río Albach (Meirengen).

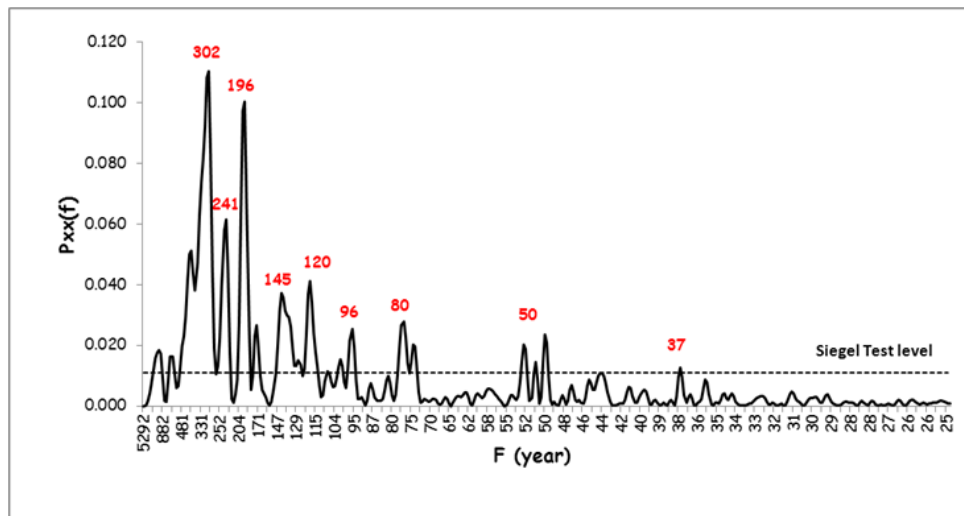
Por último, se ha utilizado el coeficiente producto-momento de correlación lineal (Maddy y Brew, 1995) para expresar las similitudes entre las series. Los resultados muestran correlaciones negativas y significativas (p -valor $<0,01$; $N = 566$ valores) entre las puntuaciones del Factor 1 y la precipitación de los Alpes entre finales de la primavera y principios del verano ($r = -0,46$), la temperatura de verano ($r = -0,32$) y el TSI ($r = -0,53$).

De esta manera, el análisis realizado proporciona evidencia de que las frecuencias de la variabilidad referentes a los procesos hídricos extremos en Suiza son similares a los ciclos de registros paleoclimáticos de los Alpes, Europa y el Atlántico Norte y, además, están en consonancia con los ciclos solares. Por otra parte, la evolución sincrónica del proxy geoquímico procedente de los registros sedimentarios y el $\delta^{18}\text{O}$ procedente del GISP2 apunta al hecho de que las inundaciones en la vertiente norte de los Alpes están influenciados no sólo por factores locales, sino por factores regionales y por la variabilidad inherente al clima del hemisferio norte.

Debido al patrón cuasi-cíclico que muestra el Factor 1 y la posible correlación con la temperatura de verano y la precipitación de primavera reconstruida en los Alpes (Büntgen et al., 2011), se ha aplicado el análisis espectral, con el fin de valorar ciclicidades comunes, al Factor 1 (Schulte et al., 2015; figura 6.8) y a diversos proxys solares y climáticos (ver tabla 2). Las periodicidades menores a 60 años no se han considerado debido a la magnitud de los intervalos de incertidumbre en la calibración del modelo cronológico de los depósitos fluviales.

De acuerdo con los resultados, el análisis espectral aplicado al Factor 1 muestra periodicidades de 80, 96, 120 y 196 años. Todos los ciclos obtenidos son muy similares a las periodicidades obtenidas de los testigos de hielo de Groenlandia del GISP2 (65, 73, 130 y 200 años) y la irradiancia solar total (86, 105, 129 y 207 años). Las series dendrocronológicas sugieren ciclos en la precipitación de primavera reconstruida para los Alpes en 73, 139 y 269 años y para la temperatura de 65, 73, 130 y 200 años. La aparición de los ciclos Gleissberg y el ciclo Suess (ciclo de 211 años) en las series de datos analizados, refrendados por el ciclo de 100 años identificado en INU, proporciona evidencias de que la influencia de forzamiento solar puede ser considerada como un importante motor de las inundaciones en la vertiente norte de los Alpes.

White Noise



Red Noise

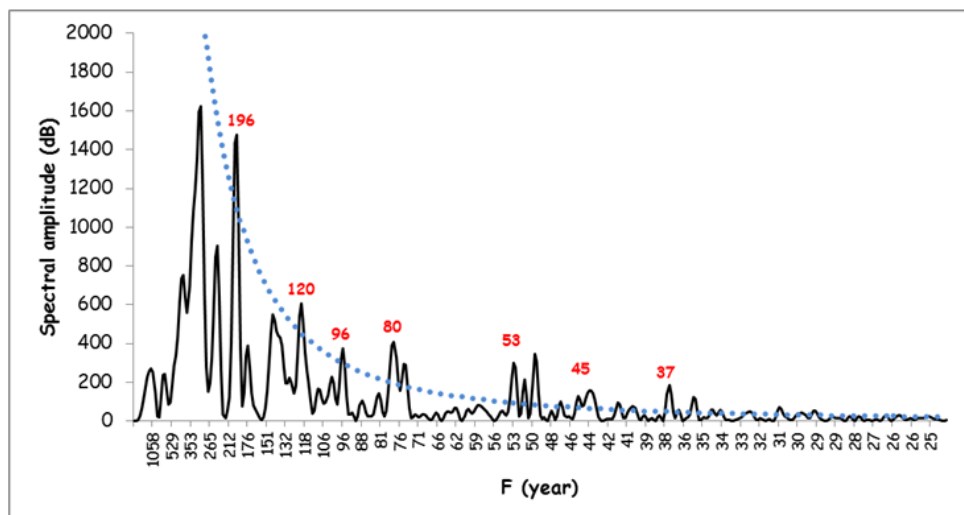


Figura 6.8. Análisis espectral del Factor 1 (Schulte et al., 2015). La línea discontinua de color negro en la figura superior es el nivel de significación del test de Siegel. La línea discontinua de color azul es el nivel de falsa alarma del 99,6%. Se destacan en color rojo los picos espectrales significativos en años.

Proxy	Solar		North Atlantic		Europe		Alps		Lower Hasli Valley (Aare)					Switzerland	
	Solar Cycles	$\delta^{14}\text{C}$ (1)	TSI (2)	GIPS 2 $\delta^{18}\text{O}$ (3)	NAO (4)	Reconstruct. T(JJA) (4)	Tree-ring T(JJA) (5)	Tree-ring P(AMJ) (5)	AA-2/5 compos. -	AA-2 Factor 1	AA-5 Factor 1	AA-10 Factor 1	Hasli-Aare Flood intensity	Flood damage index (INU _{5ws}) (6)	
Period (yr cal BP)		1575-4785	2600	1575-4785	450	650	650	1200	950	2600	2600-1600	650	650	470	208
Periodicities		-	-	69	65	61	64	65	-	-	63	-	60	60	-
	Gletsberg	81	86	81	80	78	78	-	-	80	84	78	86	89	-
		104	105	105	100	110	-	-	-	96	100	95	102	-	105
	Suess	-	129	-	-	-	-	130	139	120	-	-	-	-	-
		211	207	208	-	-	-	200	192	196	205	190	184	[175]	-

Tabla 6.1. Comparativa de las periodicidades de las series temporales paleoclimáticas, los proxies de inundación en el valle de Hasli (Schulte et al., 2015) y el índice de daños por inundaciones en Suiza (INU).

- (1) Reimer et al. (2004)
- (2) Steinhilber et al. (2012)
- (3) Stuiver et al. (1997)
- (4) Luterbacher et al. (2002)
- (5) Büntgen et al. (2011)
- (6) Peña y Schulte (2014).

A modo de conclusión:

- El análisis espectral cruzado muestra que las periodicidades detectadas en los espectros de coherencia y de fase de 11 (ciclo de Schwabe) y 104 años (ciclo Gleissberg) están relacionados con una alta frecuencia de las inundaciones y una baja actividad solar, mientras que la ciclicidad de 22 años detectadas (ciclo Hale) se asocia con solar máximos de actividad y una disminución en la frecuencia de inundación.
- La evolución sincrónica de los proxies geoquímicos procedentes de los registros sedimentarios de la cuenca superior del río Aare (valle del Hasli) con los proxies climáticos y solares sugieren que las inundaciones en los Alpes no sólo están influenciadas por factores locales, sino por factores regionales y por la variabilidad inherente al clima del hemisferio norte.
- Se sugiere que los cambios en la circulación atmosférica a gran escala (forzamiento autógeno) y la actividad solar (forzamiento exógeno) influyen en la aparición de los periodos de grandes inundaciones en Suiza, aunque no existe un consenso general en cuanto a cómo el forzamiento solar ha afectado la dinámica del clima y las inundaciones en los últimos siglos.

Los factores motrices especificados se discuten con un mayor detalle en el capítulo 7 (forzamientos solares y climáticos), mientras que en el capítulo 10 se analizan los cambios en la circulación atmosférica debidos a estos forzamientos durante los últimos 200 años.

