



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.

10. PATRONES ATMOSFÉRICOS QUE INCIDEN EN LA VARIABILIDAD DE INUNDACIONES

10. PATRONES ATMOSFÉRICOS QUE INCIDEN EN LA VARIABILIDAD DE INUNDACIONES

10.1. Introducción

Se ha observado una variabilidad decadal del índice estival de daños por inundaciones en Suiza y existen indicios de que la no-estacionariedad del índice está relacionada con la configuración fisiográfica de Suiza (capítulo 5), la actividad solar (capítulo 6), proxis solares y climáticos (capítulo 7) y la dinámica del Atlántico Norte (capítulo 8). Respecto a este último aspecto [Schmocker-Fackel y Naef \(2010\)](#) sugieren que estos cambios en los patrones atmosféricos relacionados con las inundaciones todavía no están bien definidos para Suiza.

En el presente capítulo se van a describir los cambios que se producen en los mecanismos atmosféricos inducidos tanto por la actividad solar como por la variabilidad climática y que pueden afectar a la variabilidad del índice estival de daños por inundaciones. A partir de un análisis bibliográfico, siendo conscientes de las limitaciones que puede suponer esta tarea (apartado 10.2), se va establecer un esquema general que sirva de marco para, en primer lugar, interpretar la variabilidad de la circulación atmosférica entre las fases de baja/alta actividad solar y, por tanto, durante las pulsaciones climáticas frías/cálidas, especialmente en los periodos anteriores al impacto antrópico industrial; en segundo lugar, entender los mecanismos (probablemente atmosféricos inducidos por la propia variabilidad del clima y por la actividad solar) que pueden causar las periodicidades detectadas de forma estadística en INU_{SWS} (ver capítulo 6): 2, 11 y 105 años. A partir de una metodología integrada (apartado 10.3), se van a generar patrones hidro-climáticos (apartado 10.4) en base a las relaciones entre el índice estival de daños por inundaciones en Suiza y la dinámica del Atlántico Norte pero teniendo en cuenta los factores topográficos, la actividad solar, los forzamientos climáticos y la dinámica del Atlántico Norte. El esquema conceptual generado en el apartado 10.2 ha de ayudar a contextualizar y entender los patrones hidro-climáticos. Estos últimos han de contribuir a una mejor comprensión de la aparición de las inundaciones mayoritariamente en pulsaciones climáticas frías, a la vez que entender la anomalía observada en este comportamiento en la pulsación cálida actual.

Hay que ser cautelosos en la valoración de las conclusiones y tener en cuenta que esta metodología no ha de explicar el proceso completo al

existir factores relevantes que no se han podido analizar en el marco de la presente tesis, como por ejemplo el estado físico de las cuencas y el impacto antrópico en el paisaje y la gestión de los sistemas fluviales, temas que son de indudable importancia en el momento de gestionar el riesgo.

10.2. Mecanismos atmosféricos inducidos por los forzamientos solares y climáticos que influyen en las inundaciones

Gran parte de las relaciones entre las inundaciones de verano en Suiza y la topografía, la actividad solar, la variabilidad climática y los modos de variabilidad atmosférica de baja frecuencia que se han presentado en los capítulos 5, 6, 7 y 8, se basan en simples asociaciones visuales y estadísticas, las cuales sugieren unos vínculos que no son suficientes para indicar un mecanismo causal. La detección de estos mecanismos depende de cómo el sistema fluvial responde a un forzamiento particular. Teniendo en cuenta que el sistema puede responder de manera no-lineal, el resultado puede ser muy diferente tomando como punto de partida tan solo la función del forzamiento (Gray et al., 2010). Una posibilidad para dar solución al problema es el uso de modelos climáticos que tienen el potencial de simular la variabilidad espacial y temporal del sistema como resultado de un forzamiento particular y varias simulaciones pueden ser llevadas a cabo para evaluar su variabilidad interna. De esta manera, existen estudios que se han centrado en el forzamiento climático (Mangini et al., 2005; Büntgen et al., 2006) o el solar (Shindell et al., 1999; Haigh et al. 2003; Ineson et al., 2011), destacando el estado de la cuestión del tema realizado por Gray et al., 2010.

Se ha sugerido la importancia que tiene la presencia de la nieve estacional y del hielo permanente en la generación de las grandes avenidas en los medios alpinos, dependiendo este volumen de los episodios fríos de alta frecuencia y de las pulsaciones frías de baja frecuencia. Para la zona de los Alpes, se ha observado que estas pulsaciones y las fases de baja actividad solar están íntimamente relacionados tal como muestra el estudio de Büntgen, (2006). Correlaciones entre la actividad solar y el número de manchas solares con la temperatura de verano reconstruida en la zona alpina para el periodo 755-2004 a partir de la información extraída de los anillos de los árboles, muestran valores de 0.64 (con la

actividad solar) y 0.58, con el número de manchas solares (Büntgen, 2006).

Por su parte, Mangini et al., 2005 en base a la composición isotópica de las estalagmitas de la cueva de Spannagel ubicada en la zona central de los Alpes de los últimos 2.000 años, señalan que la relación entre la temperatura y la composición isotópica (correlación estadística que está justificada en el capítulo 3, apartado 3.4.3, de esta tesis) es el resultado de una combinación de diferentes tipos de precipitación, siendo esta más pesada con una temperatura elevada y viceversa. Igualmente, se ha observado que la composición isotópica depende de las fuentes de origen y las trayectorias de la precipitación: las trayectorias que cruzan el continente con origen en el Atlántico, con temperatura más baja, la composición isotópica de la precipitación es más ligera. En cambio, las trayectorias procedentes del Mediterráneo, con temperatura más alta, la composición es más pesada. Es muy importante señalar que la propia dinámica atmosférica del Atlántico Norte junto con la ubicación de Suiza, provoca que las cuencas de los ríos alpinos reciban precipitación con trayectorias procedentes tanto de altas latitudes (Atlántico) como de las bajas latitudes (Mediterráneo).

Finalmente hay que hacer notar la buena correlación entre la temperatura de los Alpes (reconstruida a partir de la composición isotópica de las estalagmitas) y el ^{14}C (Mangini et al., 2005). Este hecho puede sugerir que la actividad solar juega igualmente un papel importante en la composición isotópica de la precipitación en los últimos 2.000 años. En base a esta buena conexión, la actividad solar no sólo puede influir en la aparición de los periodos fríos en la zona alpina, tal como se ha visto en los párrafos anteriores (Mangini et al., 2005; Büntgen, 2006), sino que además explicaría las fuentes de la precipitación y, por tanto, la posición de la trayectoria de las tormentas. Teniendo en cuenta esta conexión entre la actividad solar y los proxys climáticos en la zona de los Alpes, la influencia de la actividad solar en los mecanismos atmosféricos se analiza a continuación.

10.2.1. Mecanismos atmosféricos inducidos por la actividad solar

La influencia de la actividad solar en el clima se ha insinuado frecuentemente, basándose en correlaciones con variables meteorológicas (van Geel et al., 1999; Ineson et al., 2011). Comparaciones de observaciones con simulaciones realizadas a partir de modelos climáticos basados en el balance de la energía muestran que

entre el 41% y el 64% de variabilidad de la temperatura anterior a la época industrial (pre-1850) son debidos a cambios en la irradiación solar y la actividad volcánica (Crowley et al., 2000).

Los primeros modelos climáticos (ver por ejemplo la compilación de Gray et al., 2010) se basaban en establecer relaciones entre la actividad solar y el clima a partir de los cambios en la Irradiancia Solar Total (TSI) en la baja atmosfera sin tener en cuenta la radiación ultravioleta (UV) que actúa fundamentalmente en la estratosfera. La mayor parte de la radiación infrarroja (IR) pasa a través de la atmosfera sin obstáculos. Sólo hay que tener en cuenta la parte de la IR que es dispersada por las nubes, las moléculas contenidas en el aire y la absorción debida al vapor de agua. De esta manera, la IR calienta directamente la superficie terrestre. La UV en cambio es absorbida en la estratosfera, causando un calentamiento como resultado del proceso de producción de ozono, provocando un aumento de la emisión de calor hacia la troposfera (Haigh, 2003). Las mediciones contemporáneas a partir de sensores instalados en satélites (ej. Spectral Irradiance Monitor) indican que pequeñas variaciones en la UV pueden producir variaciones en la temperatura y ocasionar cambios significativos en el clima (Shindell, et al, 1999; Haigh, 2003; Gray et al., 2010).

Cambios en la actividad solar producen dos tipos de mecanismos diferentes: un primer mecanismo que involucraría la troposfera (cambios en la TSI) acoplándose con la estratosfera, mientras que un segundo mecanismo involucra la estratosfera (cambios en la UV) y se acoplaría con la troposfera. Ambos mecanismos actúan conjuntamente y explicarían que pequeños cambios en la irradiación solar provocan importantes cambios en la señal climática, incluyendo desplazamientos (norte/sur) de la trayectoria de las tormentas en las latitudes medias.

El primer mecanismo, referido en la literatura anglosajona como bottom-up mechanism (Gray et al., 2010), se define por cambios de la evaporación y la humedad en los niveles más bajos de la atmosfera que pueden llegar a provocar una alteración en las células de Hadley y Walker, así como en los modos de variabilidad extra tropicales. Este mecanismo estaría relacionado con el efecto más evidente de la variabilidad solar en el clima: el balance de energía media de la Tierra a través de variaciones de la TSI. Sin embargo, las evidencias procedentes de las observaciones de distintas variables en superficie indican que son más importantes los cambios a escala regional que a escala global. Estas

observaciones sugieren que existe un mecanismo amplificador (Haigh, 2003) y posibles feedbacks asociados a estos cambios como puede ser una disminución de la nubosidad y, por lo tanto, un aumento de la irradiación incidente en algunas regiones tropicales y subtropicales (Meehl et al., 2009; ver figura 10.1).

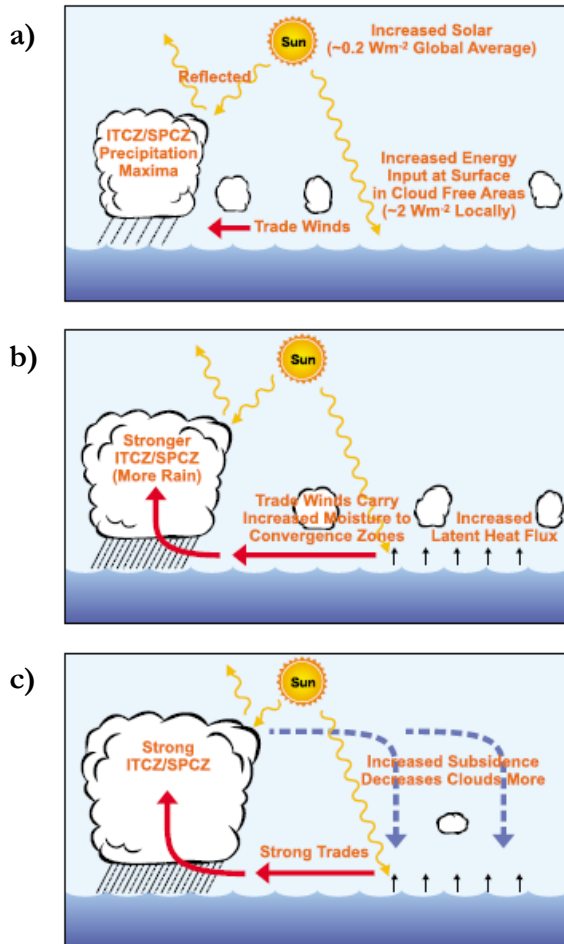


Fig. 10.1. Esquema de los procesos involucrados en la amplificación de la señal del acoplamiento entre la atmósfera y el océano Pacífico en relación a los años caracterizados por un máximo solar.

(Fuente original: Gray et al., 2010)

Durante los máximos solares (ej. el relacionado con el ciclo de 11 años o ciclo Schwabe) la circulación tropical queda modificada por el siguiente mecanismo. Existe un aumento de la absorción en superficie de la irradiación relacionada al máximo solar en las zonas oceánicas libres de nubes (ver figura 10.1a). Como respuesta hay un aumento de la evaporación y este aumento de la humedad provoca una convergencia en las zonas de precipitación (Zona de Convergencia Intertropical, ITCZ) que intensifica la precipitación máxima y los movimientos verticales asociados, dando lugar a una intensificación de los vientos alisios y temperaturas de la superficie del mar más frías debido al efecto conocido como upwelling, es decir, los vientos alisios tienden a conducir las corrientes superficiales del océano a la derecha de la dirección del viento por efecto de la rotación de la tierra, produciendo una surgencia de aguas profundas más frías (ver figura 10.1b). Este fortalecimiento de la

circulación también potencia la subsidencia subtropical (ver figura 10.1c), que da por resultado un feedback positivo reduciendo la formación de nubes en estas zonas y, de esta manera, produciendo un incremento adicional del forzamiento solar en la superficie (Meehl et al., 2009; Gray et al., 2010). Finalmente, esta extensión de la ITCZ y del alta subtropical puede implicar un desplazamiento hacia los polos de las circulaciones zonales, que en latitudes medias y en el Hemisferio Norte significaría un desplazamiento de la trayectoria de las tormentas hacia más altas latitudes.

Por su parte, Broccoli et al., 2006 observan que un enfriamiento del Hemisferio Norte puede estar debido a un desplazamiento hacia el sur de la ITCZ junto con cambios en los vientos alisios y una respuesta asimétrica de la circulación de Hadley. Aunque no lo relacionan directamente a la actividad solar, sino por intercambios de calor entre los trópicos y las latitudes medias, es importante tener en cuenta esta interconexión entre una migración hacia el sur de la ITCZ y un posible enfriamiento del Hemisferio Norte. En definitiva, para explicar las modulaciones obtenidas de las observaciones y de los mecanismos arriba reseñados, parcialmente se pueden explicar por variaciones en la TSI pero que son necesarios añadir los flujos del calor sensible y latente para completar la explicación, sugiriendo una posible interconexión con las variaciones observadas en las células de Hadley y de Walker (Gray et al., 2010).

El segundo mecanismo, referido en la literatura especializada up-bottom mechanism (Gray et al., 2010), se define por un cambio en la temperatura y vientos de la estratosfera como consecuencia en los cambios de la irradiación UV y por consiguiente en la producción del ozono. Estos cambios influyen en los gradientes térmicos verticales liderando cambios en el viento zonal y cambios en las ondas planetarias. Durante los mínimos solares hay una menor producción de ozono como respuesta a una menor actividad solar y por consiguiente un enfriamiento de la estratosfera. Hay una alteración de los gradientes verticales de temperatura, especialmente en los trópicos, por lo que la convección disminuye, la célula de Hadley se contrae y produce un desplazamiento hacia el sur de los vientos zonales.

Los resultados de los modelos climáticos globales incluyendo una parametrización de la química de la estratosfera muestran que los cambios en la producción del ozono como consecuencia de un

aumento/disminución de la actividad solar pueden actuar en el clima (Shindell et al, 1999), reproduciendo oscilaciones de 11 años. Se observa que cambios inducidos en la estratosfera penetran en la troposfera, demostrando la importancia de un acoplamiento de tipo dinámico entre estratosfera y troposfera. Durante el invierno boreal, los modelos muestran un aumento de ozono estratosférico entre periodos de baja y alta actividad solar del 2 al 4% (Shindell et al, 1999). Este aumento del ozono produce variaciones de temperatura en estos niveles que puede variar entre 1 y 2 grados (Ineson et al. 2011). Estas variaciones influyen directamente en cambios en la altura geopotencial.

Ambos mecanismos muestran un escenario muy parecido en los periodos de baja actividad solar con una periodicidad de 11 años: una configuración atmosférica caracterizada por anomalías de presión negativa en Europa en relación a una relajación de la circulación zonal y un desplazamiento hacia el sur de la trayectoria de las tormentas que afectaría la zona alpina. Este resultado podría ser una posible explicación acerca de que la periodicidad de 11 años (ciclo Schwabe) señalada en el análisis espectral cruzado, entre el número anual medio de manchas solares y INU_{SWS} , coincida con fases de actividad baja solar (ver capítulo 6). Hurrell y van Loon, 1997 señalan variaciones cuasi-decadales en la variabilidad de este patrón de circulación atmosférica de baja frecuencia durante los últimos 130 años, que coincidiría, de esta manera, con los resultados de los modelos climáticos.

La configuración atmosférica anteriormente descrita lideraría periodos de anomalías térmicas negativas en la Europa Central y Occidental (penetración de aire frío proveniente del este del continente en relación a la masa de aire siberiana) y una trayectoria de las tormentas desplazada hacia el sur. Este hecho favorecería un aumento de la precipitación y, en definitiva, la aparición de nieve y/o de hielo en las cuencas de los ríos alpinos, especialmente en sus cabeceras, siendo este uno de los factores de relevancia en la generación de las inundaciones en Suiza: fusión pronunciada de forma brusca de nieve y/o hielo a finales de la primavera y el verano (inundaciones a escala regional, Weingartner et al., 2003) que provocan un aumento adicional del caudal de los sistemas fluviales. De esta manera, el riesgo hidrológico es crítico en episodios de calor durante los meses estivales (ver anomalías positivas de la temperatura en años de INU_{SWS} positivo en la Tabla 7.1, Capítulo 7) cuando ocurren conjuntamente con configuraciones atmosféricas veraniegas que dan lugar a lluvias convectivas o advectivas, generando un significativo aumento de la esorrentía que se encuentra con unos cursos de los ríos

con el cauce en bank-full por el deshielo, no pudiendo desaguar el exceso de escorrentía de una manera eficiente (Peña y Schulte, 2014).

Parecida explicación podría servir para el ciclo detectado en INU_{SWS} de 105 años (ciclo Gleissberg), la variación de la intensidad del cual es, más o menos, del mismo orden que el de los ciclos de 11 años pero con la diferencia de que se produce en un periodo mucho más dilatado (ver capítulo 6) y con tiempo suficiente como para ocasionar cambios mucho más apreciables en el sistema climático.

10.2.2. La periodicidad de 2 años detectada en INU: la Oscilación Cuasi-Bienal.

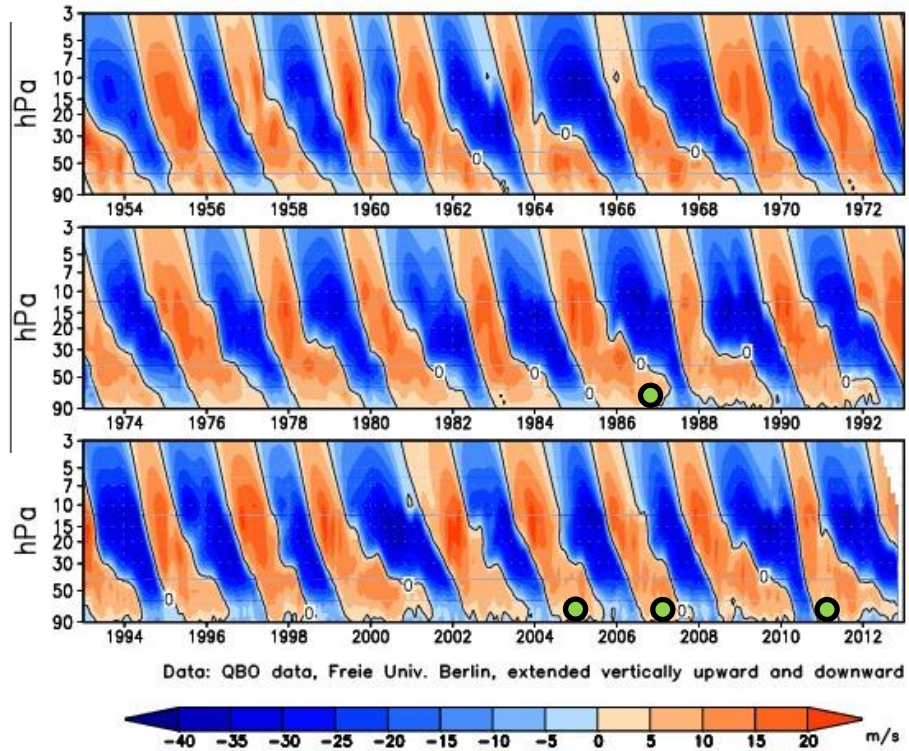
La periodicidad de 2 años que emerge del análisis en el dominio de la frecuencia de la señal INU_{SWS} (ver capítulo 6), no parece estar conectada con la actividad solar al no salir como significativa en el análisis espectral cruzado pero si en el análisis espectral de INU_{SWS} . Sugerimos que esté relacionada con un forzamiento endógeno del sistema atmosférico conocido como la Oscilación Cuasi-Bienal (QBO). La QBO domina la variabilidad de la estratosfera ecuatorial (entre 15 y 60 km de altitud) produciendo una oscilación de vientos del este (QBO-E) a oeste (QBO-W) en estas latitudes, con un periodo variable pero con un promedio de aproximadamente 28 meses (Baldwin et al., 2001). La figura 10.2 muestra la oscilación de cambio de componente en los vientos estratosféricos con una predominancia de la fase QBO-E (colores azules) alternándose según la periodicidad arriba indicada con la fase QBO-W (colores rojos). La presente tesis no es el marco para profundizar y analizar el origen, los mecanismos y las implicaciones climáticas de este proceso, pero para más información Baldwin et al., 2001 hacen un excelente trabajo de recopilación del estado de la cuestión, el debate originado acerca de su importancia climática y la participación a escala global que tiene esta oscilación en la circulación atmosférica general. En nuestro trabajo sólo se va a hacer referencia a las posibles implicaciones que puede tener la QBO en la aparición de las grandes avenidas e inundaciones en Suiza. Si bien se trata de un mecanismo predominantemente tropical, afecta al flujo estratosférico a una escala global, modulando los efectos de las ondas extra-tropicales. Los efectos de la QBO, entre otros, incluyen una influencia sobre la circulación de la estratosfera en el hemisferio norte. La fase QBO-W a menudo coincide con un debilitamiento de la corriente en chorro en el Atlántico provocando pulsaciones frías en

Europa y el este de EE.UU, mientras que la fase QBO-E, normalmente coincide con pulsaciones más templadas en el este de EEUU y una fuerte corriente en chorro sobre el Atlántico con fases climáticas más templadas y húmedas en Europa (Ebdon, 1975).

Fig. 10.2. Sección tiempo-altura geopotencial del componente zonal del viento mensual medio (ciclo estacional eliminado), para el periodo 1954-2012. Los colores rojos representan la fase QBO-W mientras que los azules es la fase QBO-E.

Fuente original: www.geo.fu-berlin.de/en/met/ag/strat/projekte/qbo

Los puntos verdes son las cuatro últimas grandes inundaciones registradas en Suiza.



La inclusión de la QBO en los modelos climáticos con una alta resolución vertical muestran que durante fases de baja actividad solar predomina una fase de viento del oeste de la QBO (Gray et al., 2010), si bien hay modelos que reproducen esta fase de manera espontánea sin incluir datos de la QBO (Haigh, 2003): la fase del oeste puede provocar un enfriamiento del hemisferio norte en latitudes medias por un desplazamiento hacia el sur de la trayectoria de las tormentas, comportando el consiguiente aumento del riesgo hidrológico durante el verano en los medios alpinos. Este último hecho puede demostrar que a pesar del debate existente en torno a las influencias de la QBO en el clima global (Takahashi, 1996, Scaife et al 2000, Giorgetta et al 2002) desde su descubrimiento en los años 50 del siglo pasado por investigadores de la Oficina Meteorológica Inglesa (Graystone, 1959), la oscilación puede llegar a explicar la ciclicidad bianual que aparece en la señal de INU_{SWS} . En la figura 10.2 se han señalado con puntos verdes las cuatro últimas grandes inundaciones que han afectado al territorio suizo (1986, 2005, 2007 y 2011) y todas ellas coinciden precisamente con la fase de vientos de oeste (QBO-W).

10.2.3. Esquema atmosférico general que explica las inundaciones en Suiza

La aparición de clústeres de inundaciones en Suiza durante los periodos de baja actividad solar en relación a un desplazamiento de la corriente en chorro hacia el sur y las tormentas intensas asociadas que pueden afectar Europa, podrían ser parcialmente explicadas por los efectos amplificadores de la estructura atmosférica que provoca anomalías positivas y/o negativas de precipitación en los trópicos. Estos efectos amplificadores son consecuencia de las teleconexiones en el sistema climático. El término teleconexión se define generalmente como una respuesta atmosférica vinculada a forzamientos remotos tales como cambios en la temperatura superficial del mar o en los patrones de presión atmosférica. El término se aplica generalmente a una alteración en la circulación atmosférica, que es persistente y con efectos a escala continental o planetaria. Sin embargo, una definición más completa debe referirse a cualquier transmisión de un efecto más allá de la ubicación en la que se produjo un(os) determinado forzamiento(s). Los cambios localizados de la temperatura superficial del mar pueden provocar importantes efectos en las circulaciones atmosféricas. Debido a ello son capaces de alterar la localización e intensidad de las áreas de convección y lluvias sobre los océanos. Estas áreas tienen la capacidad, a su vez, de desplazar grandes cantidades de calor/frío hacia las zonas altas de la troposfera induciendo alteraciones de la circulación atmosférica en estos niveles, que rápidamente pueden perturbar los movimientos atmosféricos a gran escala.

El esquema de circulación general atmosférica está caracterizado por un desplazamiento de las precipitaciones en el Pacífico tropical hacia el oeste, con fuertes lluvias sobre la parte occidental del Pacífico, Indonesia y el Océano Índico oriental. Este hecho puede conducir a la aparición de una zona de altas presiones en el noreste del Pacífico forzando una ondulación de la corriente en chorro en el Atlántico y su desplazamiento hacia el sur. Este desplazamiento queda explicado por al menos dos mecanismos. En primer lugar, la baja de las Aleutianas (ubicada entre Alaska y el Japón) pierde intensidad provocando una reducción en la amplitud de las ondas a escala planetaria en la troposfera superior y fortaleciendo el jet estratosférico que, consecuentemente, vigoriza la componente meridional de la corriente en chorro en el Atlántico. En segundo lugar, los vientos del norte que afectan los Estados Unidos, asociados a esta configuración, advectan una masa de aire frío hacia el

sur, dando lugar a fuertes gradientes térmicos entre América del Norte y el Océano Atlántico tropical, amplificando la probabilidad del desarrollo de los grandes ciclones. Este esquema puede coexistir junto a vientos del oeste en la troposfera superior sobre el Pacífico oriental exacerbando el flujo de perturbaciones en la corriente en chorro del Atlántico. Esta estructura coincide con la Oscilación Cuasi-Bienal (QBO-W).

Este esquema arriba descrito recuerda al principal patrón de variabilidad del Pacífico, el Niño y la Oscilación del Sur (ENSO), y concretamente el que se produce durante la fase normal o fría. Este patrón está en relación con una modificación de las corrientes marinas con un periodo estimado entre 2 y 11 años (Polonsky et al., 2004), ciclicidades que son también significativas en INU_{sws} . Por tanto, y siempre teniendo en cuenta las reservas que supone una afirmación de este tipo, se podría sugerir que la fase fría del ENSO influye en la variabilidad de las inundaciones en Suiza al estar relacionada con una ondulación de la corriente en chorro en Europa y, por tanto, un desplazamiento de la trayectoria de las tormentas hacia el sur. Rogers (1984) y Polonsky y Sizov (1991) han señalado que la circulación atmosférica zonal en el Atlántico Norte se intensifica justo antes y durante la fase de máximo desarrollo del ENSO en fase positiva mientras que se observa una relajación durante la transición del ENSO hacia la fase fría. Los modelos climáticos acoplados océano-atmósfera, teniendo en cuenta también las variaciones en el TSI y los cambios térmicos en la estratosfera producidos por la variabilidad solar dan como resultado de forma espontánea en los periodos de baja actividad solar un esquema semejante al ENSO en fase negativa, la QBO-W en la zona del Pacífico y la ondulación de la corriente en chorro en el Atlántico (Haigh, 2003; Broccoli et al., 2006; Gray et al., 2010).

Por tanto, existen fundamentadas evidencias que uno de los mecanismos (entre otros) que participan en los procesos de inundación en los sistemas fluviales en medios alpinos están fuertemente influenciados por el forzamiento solar y por la dinámica del Atlántico Norte, básicamente, en cambios en la circulación atmosférica y a la presencia de un sistema de bajas presiones en el dominio europeo debido a un desplazamiento hacia el sur de la trayectoria de las tormentas.

10.3. Análisis integral de la incidencia de la variabilidad atmosférica en las inundaciones en Suiza

Para determinar las posibles asociaciones entre la variabilidad del índice por daños por inundaciones en Suiza y los cambios en la circulación atmosférica en el sector oriental del Atlántico Norte, se ha optado por una aproximación metodológica donde se integran los métodos utilizados en los capítulos 9 y 10 (ver figura 10.3). La finalidad es la evaluación de la incidencia de los patrones atmosféricos en las inundaciones en Suiza, analizar la evolución temporal y detectar cambios que sean capaces de explicar la variabilidad decadal y contextualizarla con la actual pulsación cálida. A continuación se describen cada uno de los pasos implicados en la metodología.

1. Se han construido los composites de los meses de julio y agosto (Comp_SLP CLUn) de la presión estandarizada media reducida a nivel del mar (EMSLP) de los años que integran cada uno de los clústeres definidos por INU_{SWS} (ver capítulo 5). Se han construido tres composites, los dos primeros para la época climática fría, el primero de 1817 a 1851 (Comp_SLP CLU1) y el segundo de 1881 a 1927 (Comp_SLP CLU2), mientras que el tercero comprende la época cálida, por lo que aglutinará los dos últimos clústeres, de 1977 a 1990 y a partir del año 2005 (Comp_SLP CLU3).
2. A partir de la utilización del Análisis Mutivariable aplicado a la variable EMSLP, se calcularon los principales modos de variabilidad atmosférica (PCA, capítulo 8) en el dominio europeo a partir de un Análisis en Componentes Principales en modo S (parte izquierda figura 10.1), mientras que los patrones sinópticos (ST, capítulo 9) que afectan los meses de julio y agosto a Europa se han determinado a partir una red neuronal de tipo artificial (parte derecha figura 10.1). De esta manera, se va abordar el tema desde una aproximación tanto desde una perspectiva climática (parte izquierda figura 10.1) como meteorológica (parte derecha figura 10.1).
3. Los Comp_SLP CLUn se han relacionado con los PCA y los ST por separado a partir del coeficiente de correlación espacial de Pearson para determinar que modos de variabilidad atmosférica de baja frecuencia y que patrones sinópticos están conectados

con los clústeres de INU_{sws} . Además, se ha investigado la distribución especial de la precipitación tanto a escala general, Europa, como regional, Suiza.

4. Por último, a partir del test de Mann-Kendall (Mann 1945; Kendall 1975; Gilbert 1987) se han analizado las tendencias de cada uno de los patrones atmosféricos para evaluar los posibles cambios en la variabilidad de las inundaciones en Suiza.

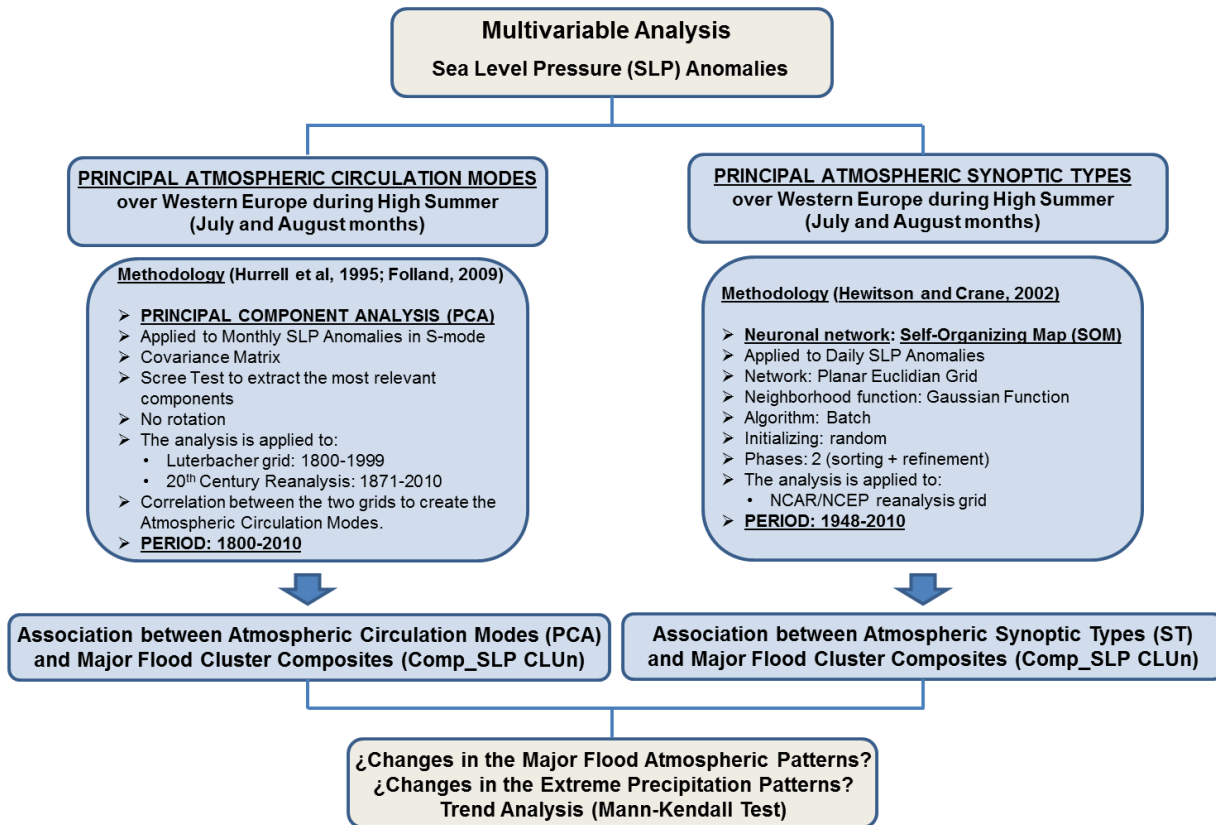


Figura 10.3. Esquema metodológico para evaluar la incidencia de los patrones atmosféricos en las inundaciones en Suiza, distinguiendo las metodologías utilizadas para la determinación de los patrones de variabilidad atmosférica de baja y alta frecuencia para una ulterior integración.

10.4. Resultados

Los resultados se vertebran en función de los pasos apuntados, es decir, (1) descripción de los Comp_SLP CLUn para cada uno de los grupos de inundación identificados para Suiza, (2) las posibles conexiones con los modos de variabilidad de baja frecuencia (PCA) y (3) las relaciones con los tipos sinópticos (ST). El análisis de los cambios en los patrones hidro-climáticos (4) se deja para el apartado de discusión.

10.4.1. Composiciones de circulación atmosférica en la baja troposfera para los periodos de alta frecuencia en inundaciones

Se han identificado tres Comp_SLP CLUn relacionados con los tres clústeres de inundación identificados en Suiza. La figura 10.4 relaciona la evolución de estos clústeres con la temperatura (parte superior de la figura 10.4), con el fin de diferenciar los periodos climáticos cálidos y fríos, mientras que la distribución espacial de las EMSLP relacionadas con cada clúster se muestra en la parte inferior de la figura 10.4. Es muy importante remarcar que son configuraciones de verano, exactamente de los meses de julio y agosto.

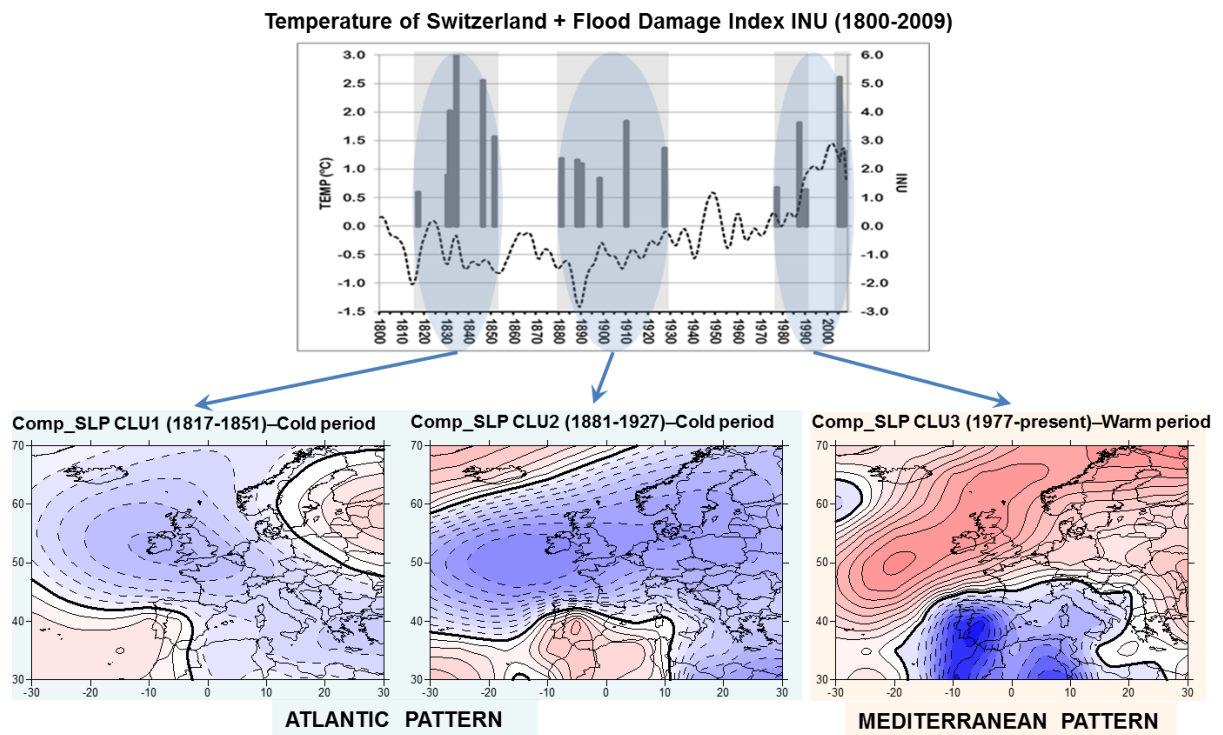


Figura 10.4. Composites de anomalías de presión estandarizada a nivel del mar (sin unidades) de los años que participan en cada periodo de inundación. Los colores azules indican anomalías de presión negativa, mientras que los rojos señalan anomalías positivas. La línea gruesa muestra la isolínea 0.

Durante el periodo climático frío (1800-1927) dominan dos configuraciones atmosféricas similares caracterizadas por una baja atlántica que prevalece en gran parte de la Europa occidental. Esta situación general favorece el tránsito de sistemas frontales provenientes del Atlántico, relacionados con una disposición zonal debida a un desplazamiento hacia el sur de la corriente en chorro. Se pueden observar pequeñas diferencias entre los dos patrones. El Comp_SLP

CLU1 se caracteriza por una configuración atmosférica claramente en Omega, fruto de un bloqueo anticiclónico debido a un centro de altas presiones situadas al este de la península escandinava, obligando a las perturbaciones a coger una dirección noroeste a sudeste, por tanto, asociadas a unas situaciones climáticamente más frías. El Comp_SLP CLU2 está definido por una configuración atmosférica más zonal con un flujo del oeste, mostrando un desplazamiento de la trayectoria de las tormentas al sur de su emplazamiento habitual, de características climáticas no tan frías como la anterior dada la zonalidad de los centros de acción.

Por su parte, el periodo climático cálido, entre el 1977 y la actualidad, definido por el Comp_SLP CLU3 e integra los clústeres 3 y 4 de INU_{SWS} , viene marcado por un bloqueo anticiclónico al norte de Europa y bajas presiones a la zona mediterránea. Por tanto, las masas cálidas y húmedas provenientes de esta zona favorecen la inestabilidad atmosférica por la diferencia de temperatura entre los distintos niveles de la troposfera (convección) y agravada por la trayectoria de las perturbaciones que siguiendo una dirección Este-Noreste, las masas de aire se ven obligadas a ascender orográficamente pudiendo provocar precipitaciones de larga duración (advección). Por tanto, se trata de un patrón que promueve tanto la convección (masa de aire cálida y húmeda) provocando precipitaciones de alta intensidad, como la advección (flujo del Este-Noreste más ascenso orográfico a lo largo de la cordillera de los Alpes) instando a precipitaciones de varios días de duración con una cantidades acumuladas que pueden ser extremadamente abundantes (ej. inundaciones de 1987 y 2005).

En definitiva, se identifican dos patrones atmosféricos diametralmente opuestos que explican los meses de julio y agosto con $INU_{SWS} > 0$ en Suiza para el periodo 1800-2010. El primer patrón que correspondería al periodo climático frío coincide plenamente con el esquema presentado en apartado 10.2 y se puede denominar como Patrón Atlántico, caracterizado por perturbaciones atlánticas procedentes de altas latitudes. El segundo patrón en relación a la fase cálida del periodo analizado se puede nombrar como Patrón Mediterráneo, dominado por la masa cálida y húmeda mediterránea y rompe con el modelo propuesto en el apartado 10.2. Además, se puede observar como a medida que se ha ido produciendo el calentamiento de las últimas décadas (a partir de 1977), el bloqueo anticiclónico ubicado al este de la península escandinava que caracteriza la pulsación climática fría se ha ido desplazando hacia el oeste, ubicándose en el sector nororiental del Atlántico Norte durante la pulsación actual cálida, con un periodo de transición (entre 1871 y 1927).

10.4.2. Asociación entre las composiciones (Comp_SLP CLUn) y los patrones de variabilidad atmosférica de baja frecuencia (PCA)

La asociación entre los Comp_SLP CLUn y los patrones de variabilidad atmosférica de baja frecuencia (PCA) se ha realizado a partir del coeficiente de correlación espacial de Pearson (ver tabla 10.1).

	PCA 1	PCA 2	PCA 3	PCA 4	PCA 5	PCA 6
Comp_SLP CLU1	-0.22	0.18	-0.70	-0.11	0.45	-0.35
p-value	0.01	0.04	0.00	0.18	0.00	0.00
Comp_SLP CLU2	-0.63	-0.52	-0.11	0.18	0.27	-0.03
p-value	0.00	0.00	0.19	0.04	0.00	0.72
Comp_SLP CLU3	0.54	-0.19	-0.02	-0.26	-0.24	0.08
p-value	0.00	0.03	0.84	0.00	0.00	0.38

Tabla 10.1. Coeficiente de correlación espacial de Pearson entre los modos principales de variabilidad atmosférica (PCA) y los composites de los años correspondientes a los periodos de inundación (Comp_SLP CLUn). Los valores en rojo indican la significación estadística (p-valor). Las celdas marcadas en color amarillo señalan los patrones que tienen una correlación positiva y estadísticamente significativa (p-valor = 0.00).

Para el periodo climático frío, el Patrón Atlántico definido por los Comp_SLP CLU1 y Comp_SLP CLU2, es el PCA número 5 (Configuración en Omega) el que obtiene unos coeficientes de correlación positivos y significativos, mientras que este patrón correlaciona negativamente y de forma significativa con el Patrón Mediterráneo (Comp_SLP CLU3). Contrariamente, para la pulsación cálida, Patrón Mediterráneo (Comp_SLP CLU3) es el PCA número 1 (SNAO) el que tiene una correlación positiva y significativa y en cambio ésta es negativa y significativa con los Comp_SLP CLU1 y Comp_SLP CLU2 (Patrón Atlántico).

La figura 10.5 sintetiza las características de cada uno de los patrones en base al Comp_SLP CLUn y el PCA (en la parte izquierda de la figura 10.5), el análisis de tendencia (Test de Mann-Kendall, en la parte central de la figura 10.5) y distribución de la precipitación a escala europea¹ (en la parte derecha de la figura 10.5). Las singularidades arriba descritas emergen de una forma más evidente.

¹ Se ha utilizado la rejilla de anomalías de precipitación procedentes de: http://eca.knmi.nl/download/ensembles/data/Version10.0/Grid_0.50deg_reg/

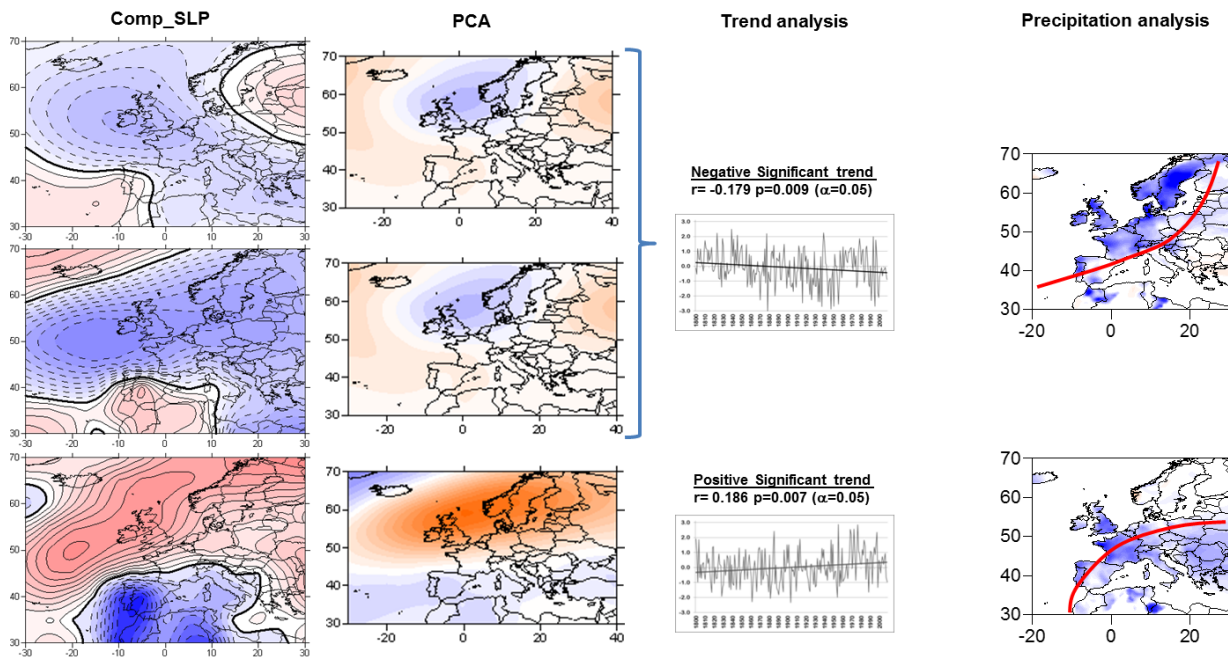


Figura 10.5. Composites de EMSLP (Comp_SLP) junto con el correspondiente patrón de variabilidad atmosférica de baja frecuencia (PCA), el análisis de tendencia (test de Mann-Kendall) y el patrón de precipitación correspondiente a los años involucrados en cada clúster de inundación. Las leyendas de los mapas son mismas que las figuras 10.4 (Comp_SLP), 8.3 (PCA). La precipitación representa las anomalías estandarizadas de precipitación media diaria (sin unidades), entre -0,5 y 0. No se han representado las anomalías positivas con el fin de enfatizar más las zonas afectadas por la precipitación.

Patrón atlántico:

1. Los composites de las anomalías de presión correspondientes a los periodos de inundación número 1 y 2 (Comp_SLP CLU1 y Comp_SLP CLU2) correlacionan positiva y significativamente con el PCA 5 (Configuración en Omega), mientras que la correlación es negativa y significativa con la composición número 3 que corresponde al periodo climático cálido.
2. Este patrón se caracteriza por la baja del Atlántico que domina la circulación atmosférica. Este patrón definido a partir de una configuración en omega es similar a la fase negativa de la Oscilación de Verano del Atlántico Norte (SNAO).
3. El análisis de tendencias muestra una tendencia negativa y significativa.
4. El patrón de precipitación es de régimen típicamente oceánico implicando el sector occidental del continente europeo.

Patrón Mediterráneo:

1. La composición de las anomalías de presión correspondientes al periodo de inundación número 3 (Comp_SLP CLU3) correlaciona positiva y significativamente con el PCA 1 (Oscilación de Verano del Atlántico Norte) mientras que la correlación es negativa y significativa con los composites número 1 y 2 que corresponden al periodo climático frío.
2. Este modelo se caracteriza por altas presiones sobre el norte de Europa y bajas presiones en el área mediterránea.
3. El análisis de tendencias muestra una tendencia positiva y significativa.
4. El patrón de precipitación presenta una distribución de las anomalías diarias que afectan especialmente a todo el arco mediterráneo.

10.4.3. Tipos sinópticos (ST) de los meses de julio y agosto causantes de las inundaciones de verano en Suiza

Se ha correlacionado espacialmente (coeficiente de Pearson) cada uno de los 35 tipos sinópticos (neuronas) determinados en el capítulo 9 con los tres Comp_SLP CLUn (ver figura 10.6) con el fin de aislar los tipos sinópticos que están relacionados con INU_{sws} . Para facilitar la identificación de las neuronas, la red neuronal se ha adjuntado en la parte superior de la figura 10.6. Se han escogido como representativas aquellas neuronas que tengan un coeficiente de correlación con Comp_SLP CLUn superior a 0,5. La configuración espacial de EMSLP correspondiente a cada Comp_SLP CLUn aparece en la parte inferior de la figura 10.6.

En general, las neuronas que han obtenido una mejor correlación se sitúan en la parte superior de la red: en la parte derecha se ubican las correspondientes a la fase climática fría (Patrón Atlántico) y en la izquierda las neuronas relacionadas a la cálida (Patrón Mediterráneo).

Neuronal Network: synoptic types (ST)

N(0,4)	N(1,4)	N(2,4)	N(3,4)	N(4,4)	N(5,4)	N(6,4)
N(0,3)	N(1,3)	N(2,3)	N(3,3)	N(4,3)	N(5,3)	N(6,3)
N(0,2)	N(1,2)	N(2,2)	N(3,2)	N(4,2)	N(5,2)	N(6,2)
N(0,1)	N(1,1)	N(2,1)	N(3,1)	N(4,1)	N(5,1)	N(6,1)
N(0,0)	N(1,0)	N(2,0)	N(3,0)	N(4,0)	N(5,0)	N(6,0)

Correlation: ST and Comp_SLP CLU1

-0.34	-0.46	-0.46	-0.19	0.15	0.30	0.09
-0.10	-0.25	-0.05	0.28	0.64	0.63	0.26
-0.10	-0.03	0.18	0.28	0.40	0.58	0.31
-0.19	-0.05	0.21	0.15	0.25	0.06	0.08
-0.12	0.02	0.14	0.04	-0.06	-0.20	-0.30

Correlation: ST and Comp_SLP CLU2

0.17	0.18	0.12	0.26	0.50	0.56	0.36
0.21	0.18	-0.01	0.01	0.30	0.44	0.29
-0.01	-0.14	-0.36	-0.34	-0.23	0.02	0.20
-0.09	-0.34	-0.23	-0.30	-0.18	0.03	0.35
-0.21	-0.38	-0.35	-0.32	-0.22	-0.03	0.16

Correlation: ST and Comp_SLP CLU3

0.28	0.29	0.45	0.38	-0.04	-0.51	-0.53
-0.01	0.20	0.54	0.51	-0.07	-0.46	-0.55
-0.16	0.05	0.58	0.46	0.08	-0.46	-0.60
-0.18	0.27	0.43	0.31	-0.15	-0.56	-0.81
-0.23	0.05	0.45	0.30	-0.22	-0.50	-0.61

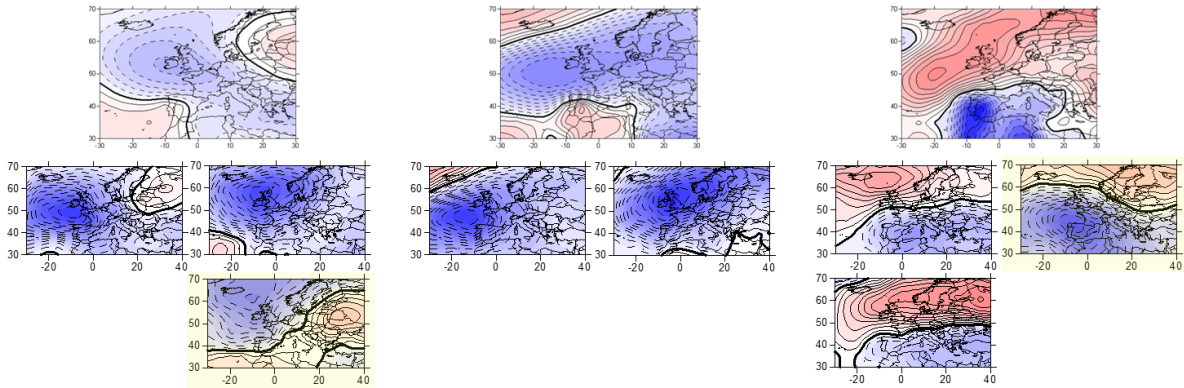


Figura 10.6. Tipos sinópticos (ST) causantes de las inundaciones muy graves y catastróficas en Suiza. Se han seleccionado aquellos tipos que correlacionan con Comp_SLP CLUn $\geq 0,5$. En color verde los tipos sinópticos con un coeficiente de correlación positivo más alto. Las leyendas de los mapas son mismas que las figuras 10.4 (Comp_SLP) y 9.2 (ST). La precipitación representa las anomalías estandarizadas de precipitación media diaria (sin unidades), entre -0,5 y 0. No se han representado las anomalías positivas con el fin de enfatizar más las zonas afectadas por la precipitación.

Patrón Atlántico:

Vendría definido por las siguiente neuronas: N(2,5), N(3,4), N(3,5), N(4,4) y N(4,5). Según la clasificación realizada en el capítulo 9 (apartado 9.5), se relacionan a los patrones sinópticos generales 6 (Baja Atlántica) y 7 (Circulación Zonal). Al venir definido el Patrón Atlántico por dos tipologías diferentes (Comp_SLP CLU1 y Comp_SLP CLU2), existen diferencias en la configuración atmosférica de las neuronas que explican el patrón.

- Comp_SLP CLU1. Integra las neuronas N(2,5), N(3,4) y N(3,5), siendo la segunda neurona la que tiene un coeficiente de correlación más elevado, por tanto, estaría ligada al patrón sinóptico 6 definido como Baja Atlántica. En el capítulo 9 se ha definido por un tipo de circulación de tipo meridional (noroeste a sudeste) canalizada por el centro de bajas presiones atlánticas y las altas presiones al noreste del continente europeo. Por tanto, las perturbaciones provienen de altas latitudes acompañadas de aire frío. Las anomalías de precipitación negativas se distribuyen

por la parte atlántica del continente europeo, exceptuando Escandinavia e Islandia, dada la posición desplazada hacia el sur del área de bajas presiones.

- **Comp_SLP CLU2.** Queda explicado por las neuronas N(4,4) y N(4,5), si bien es la segunda la que tiene un nivel de asociación más elevado, por tanto, estaría relacionada con el patrón sinóptico 7 definido como Circulación Zonal. Se caracteriza por una disposición zonal de los centros de acción, pero desplazada hacia el sureste, siendo la configuración típica de la fase negativa de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y de la SNAO. Las anomalías negativas de precipitación se distribuyen por el cuadrante noroccidental del continente europeo quedando al margen (anomalías positivas) todo el arco mediterráneo. Las precipitaciones están en relación a frentes de dirección oeste a este a una latitud superior a 50° N.

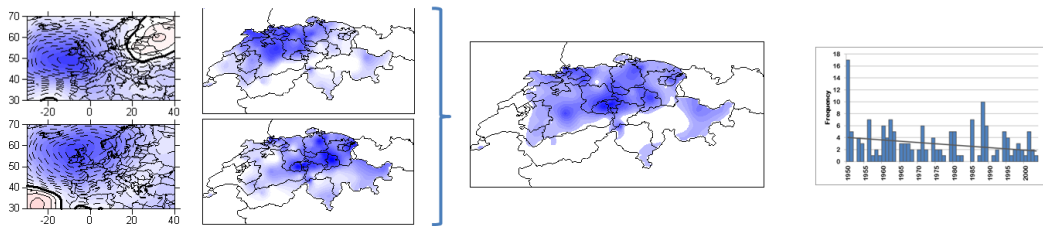
Patrón Mediterráneo:

Estaría definido por las neuronas N(2,2), N(3,2) y N(2,3), ocupando casi el centro de la red neuronal. La N(2,2) sería el tipo sinóptico característico relacionado con el patrón general 4: Oscilación de Verano del Atlántico Norte (ver capítulo 9; SNAO). Es el patrón con un mayor número de neuronas (casi un tercio de la red neuronal) y está justificado porque se corresponde con el principal modo de variabilidad atmosférica de baja frecuencia para los meses de julio y agosto: la SNAO (ver capítulo 8). Se caracteriza por un bloqueo anticiclónico al norte del continente europeo y bajas presiones muy laxas al sur del dominio analizado. La distribución de las anomalías de precipitación muestra valores negativos en todo el arco mediterráneo y positivos al norte de Europa.

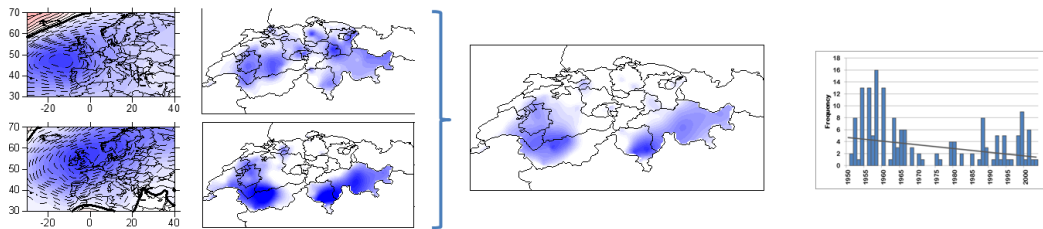
Las inundaciones registradas durante los meses de julio y agosto en Suiza se explicarían por ocho tipos sinópticos, de los cuales cinco estarían relacionados con la fase climática fría y se encuadrarían en los patrones sinópticos generales Configuración en Omega y Circulación Zonal. Las inundaciones enmarcadas en la fase cálida quedarían relacionadas con tres patrones de los cuales el que tiene mayor grado de asociación se encuadra dentro del patrón sinóptico general Oscilación de Verano del Atlántico Norte.

Este tipo de situaciones sinópticas se pueden relacionar con la distribución de la precipitación en Suiza para evaluar si ha habido algún cambio de patrón pluviométrico en el periodo 1948-2010. La figura 10.7 señala para los seis patrones sinópticos con mayor grado de asociación con las inundaciones veraniegas de Suiza, la distribución de la precipitación y la tendencia asociada al patrón pluviométrico. No se ha analizado el test de significación de esta tendencia al considerar el periodo de análisis demasiado breve para tal menester. Paralelamente a la variabilidad observada en los patrones sinópticos, los pluviométricos muestran una evolución parecida.

SYNOPTIC TYPES AND PRECIPITATION ANALYSIS RELATED TO FLOOD CLUSTER NUMBER 1



SYNOPTIC TYPES AND PRECIPITATION ANALYSIS RELATED TO FLOOD CLUSTER NUMBER 2



SYNOPTIC TYPES AND PRECIPITATION ANALYSIS RELATED TO FLOOD CLUSTER NUMBER 3

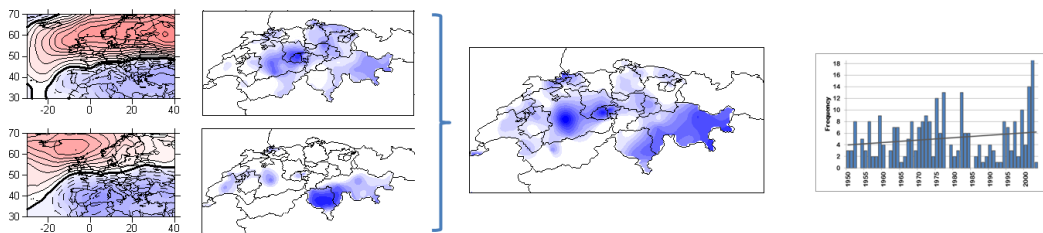


Figura 10.7. Patrones de precipitación de los dos tipos sinópticos principales para cada Comp_SLP (en la parte izquierda de la figura) junto con el patrón de precipitación medio (en la parte central de la figura) y la tendencia (en la parte derecha de la figura). Las leyendas del mapa ST es la misma que la figura 9.2. La precipitación representa las anomalías estandarizadas de precipitación media diaria (sin unidades), entre -0,5 y 0. No se han representado las anomalías positivas con el fin de enfatizar más las zonas afectadas por la precipitación.

Patrón Atlántico:

Se diferencian entre las Comp_SLP CLUn que componen el patrón por las diferencias de flujos a escala sinóptica observados.

- Comp_SLP CLU1. El flujo del noroeste a sudeste lidera una trayectoria de las perturbaciones procedentes de altas latitudes, provocando que en Suiza la distribución de la precipitación venga definida por un dipolo pluviométrico de tipo orográfico. La cordillera de los Alpes ejerce de barrera de los flujos reseñados, concentrando la precipitación al norte de la cordillera siendo esta más escasa en la vertiente sur de la misma. La tendencia es negativa con una concentración de veranos con superávit pluviométrico al principio de la serie siendo esta claramente menor al final de la misma.
- Comp_SLP CLU2. El flujo del oeste que lidera este patrón provoca una trayectoria zonal de las perturbaciones al continente europeo. La distribución de la precipitación en Suiza está definida por anomalías pluviométricas al oeste del país aunque también aparecen en el sur, por lo que el dipolo oeste-este no queda tan definido como el norte-sur del Comp_SLP CLU1. Posiblemente se deba al hecho que algunas perturbaciones estén en relación con flujos del suroeste afectando la vertiente sur de los Alpes. La tendencia es negativa con una clara concentración de veranos con superávit pluviométrico al inicio de la serie, siendo esta menor al final.

Patrón Mediterráneo:

El flujo del Sur o del Este-Noreste que lidera este patrón provoca una trayectoria de las perturbaciones que en muchas ocasiones siguen la Vb (van Bebbber, 1891) que recorre la cordillera de los Alpes, provocando lluvias de alta intensidad (masa cálida y húmeda procedente del Mediterráneo) y de larga duración (situaciones estacionarias debidas al bloqueo anticiclónico al norte del continente Europeo. La distribución de la precipitación muestra un patrón pluviométrico caracterizado por anomalías positivas al sur y gran parte del eje central de los Alpes y al nordeste del país. La tendencia es positiva con de años con superávit de precipitación en la década comprendida entre el 1975 y el 1985, pero

sobre todo a partir del año 2000, coincidiendo con los clústeres de inundación identificados en INU_{SWS} .

10.5. Discusión

Los composites de EMSLP de clústeres de INU_{SWS} (Comp_SLP CLUn) y el análisis de tendencias realizado para el periodo 1871-2010 en base a las puntuaciones de cada uno de los modos de variabilidad atmosférica de baja frecuencia relacionados con los Comp_SLP CLUn (parte central figura 10.3; ver también capítulo 8) y de los patrones de distribución de la precipitación (ver figuras 10.5 y 10.7), indican que dos patrones de configuración diametralmente diferente explican las pulsaciones climáticas fría y cálida. La primera vendría dominada por un patrón Atlántico (en consonancia al esquema general presentado en el apartado 10.2) mientras que la segunda por un patrón Mediterráneo. Además, este cambio es observado en el análisis de tendencias: existe una tendencia negativa y significativa del Patrón Atlántico y, en cambio, una tendencia positiva y significativa del Patrón Mediterráneo. Este cambio señala que en la actualidad las inundaciones favorecidas por perturbaciones atlánticas tienen menos peso en favor a las depresiones procedentes de la zona Mediterráneo y, por tanto, siendo consecuencia de la evolución climática observada de una fase fría a una cálida.

10.5.1. Patrones hidro-climáticos

Si bien se han analizado de una manera muy sutil en la tesis aspectos tan importantes en la generación de inundaciones como pueden ser el grado de saturación del suelo y el impacto antrópico en la cuenca (construcción de embalses, corrección de cursos, deforestación y presión en las zonas potencialmente inundables), de los resultados presentados la SNAO emerge como uno de los principales mecanismos que explican la sensibilidad de los sistemas fluviales suizos a los eventos hidrológicos extremos. El primer patrón (clústeres de inundación 1 y 2) de carácter plenamente atlántico está definido por la Configuración en Omega (PCA 5). Este tipo de configuración no deja de ser la fase negativa del principal modo de variabilidad atmosférica para los meses de julio y agosto: la SNAO. El segundo patrón de carácter mediterráneo (clústeres de inundación 3 y 4) está controlado por la fase positiva de la SNAO. De esta manera, las inundaciones en Suiza están gobernadas por los procesos atmosféricos que operan tanto en el Atlántico Norte durante las fases frías, frentes fríos canalizados por la baja atlántica, como en la

zona del Mediterráneo durante las fases climáticas cálidos, perturbaciones procedentes de los golfos de Génova y Venecia. Sobre la base de la relación entre la dinámica del Atlántico Norte, la actividad solar, la variabilidad climática y la topografía de Suiza con el índice estival de daños por inundaciones, dos patrones hidro-climáticos podrían ser formulados para explicar la variabilidad del índice en el periodo 1800-2010 (ver figura 10.8).

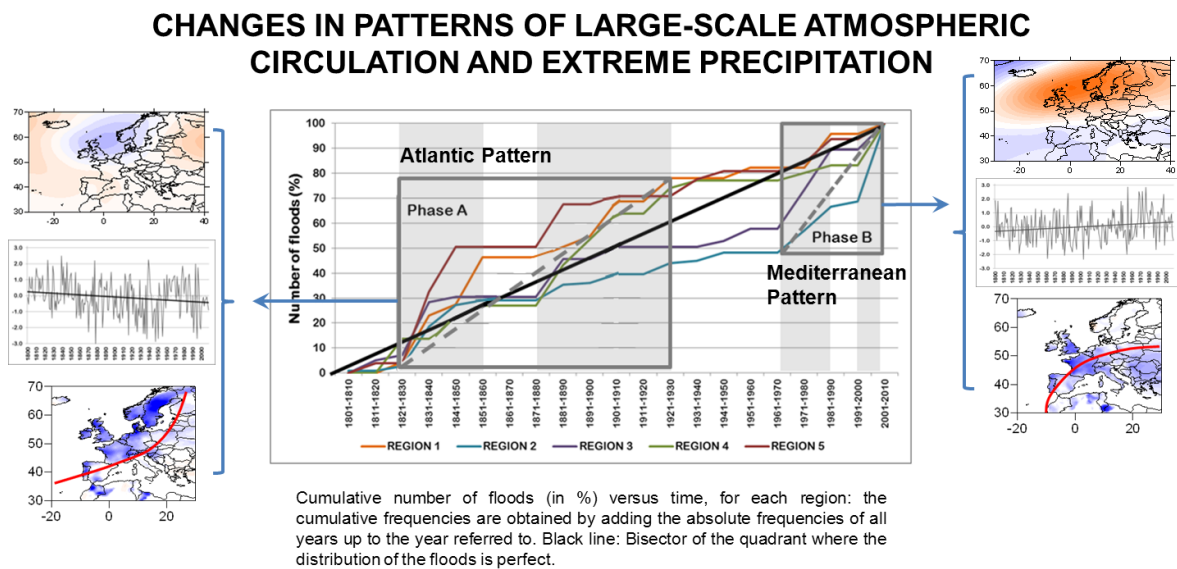


Figura 10.8. Patrones hidro-climáticos que inciden en las inundaciones de Suiza (Peña et al., 2015c). Parte izquierda y derecha de la figura muestra las configuraciones atmosféricas y pluviométricas asociadas junto con el análisis de tendencia. La parte central de la figura señala la evolución decadal del número de inundaciones para cada región (ver capítulo 5). Se señalan la Fase A (Patrón Atlántico) y la Fase B (Patrón Mediterráneo) en función del aumento de las funciones. Destacar la fase con ausencia de este fenómeno entre 1930 y 1977.

El primer patrón hidro-climático (1800-1930, Fase A) se relaciona con una influencia atlántica (Patrón Atlántico). Se asocia a periodos de baja actividad solar (valores positivos de ^{10}Be , ver capítulo 7) y pulsos climáticos fríos en Groenlandia (valores negativos de $\delta^{18}\text{O}$, ver capítulo 7) y en los Alpes noroccidentales (anomalías de temperatura negativas). Durante estos pulsos fríos la acumulación de nieve y hielo en las cabeceras es significativa, debido a una configuración en omega típicamente atlántica, aumentando el riesgo de inundaciones catastróficas durante años de carácter cálido (ej. veranos dominados por la fase positiva de la SNAO), cuando los procesos de fusión contribuyen notablemente a los caudales estivales. Así pues, las tres inundaciones catastróficas registradas durante este periodo (1831, 1848 y 1910) se

produjeron en veranos caracterizados por esta situación. De todas las maneras, las configuraciones sinópticas características que producen inundaciones muy graves ('vs', ver capítulo 5) están generalmente asociadas con el modo de variabilidad atmosférica a gran escala definido como la fase negativa de la SNAO (configuración en omega). Se caracteriza por frentes fríos procedentes del Atlántico, con una trayectoria noroeste al sureste (primer clúster de inundación, 1817-1851) o del oeste (segundo clúster de inundación, 1870-1927), canalizados por un centro de bajas presiones ubicada al sector oriental del Océano Atlántico. Esta configuración es muy similar a la definida por [Jacobeit et al. \(2006\)](#) y que se asocian con las grandes inundaciones de verano en ocho cuencas de Europa Central (Rhein, Maine, Mosel, Donau, Weser, Elbe, Spree y Oder). La persistencia de esta situación produce lluvias importantes sobre Suiza y, en consecuencia, llegando a provocar inundaciones que pueden tener un impacto considerable en el territorio, afectando a las personas y sus bienes ([Pfister, 1999](#)). Las regiones más afectadas en Suiza son las regiones 1 (Valais y los cantones del oeste del país) y 4 (montañas Jura orientales y Swiss Plateau).

El segundo patrón hidro-climático (Fase B) se asocia directamente con fases positivas de la SNAO (Patrón Mediterráneo). Las depresiones que afectan este modo suelen estar conectadas a los ciclones atlánticos que se intensifican sobre el mar Mediterráneo, siguiendo una trayectoria noreste a norte-noreste a lo largo de los Alpes ([Blöschl et al. 2013](#)). Esta trayectoria es conocida como la Vb ([van Bebber, 1891](#)) y produce precipitaciones intensas de larga duración debido a: (1) el alto contenido de vapor de agua de la masa de aire impulsada desde el Mediterráneo; (2) el ascenso de esta masa provocada por la orografía; y (3) el aumento de la inestabilidad atmosférica en relación a las anomalías negativas de la temperatura y la altura geopotencial que se produce en los niveles bajos y medios de la troposfera. Además, la generación de inundaciones durante las fases cálidas se ven potenciadas por el estado de las cabeceras de las cuencas que ven reducidas la extensión de los glaciales y de las nieves estacionales, aumentando la superficie efectiva de la cuenca para generar flujos superficiales y caracterizándose estas áreas por unos suelos en régimen de saturación casi permanente, favoreciendo la escorrentía superficial. Además, se han registrado inundaciones provocadas por las rupturas súbitas de los lagos represados por los glaciares (en relación al retroceso que padecen en pulsaciones cálidas) que dan lugar a inundaciones violentas a una escala más local ([Schulte et al., 2015](#)). Las regiones más afectadas en Suiza son las Regiones 2 (la parte occidental del flanco norte de los Alpes), 3 (Grisons más flanco sur de los Alpes) y 5 (parte oriental del flanco norte de los Alpes). Resultados similares han

sido reportados por [Grebner \(1997\)](#) y [Pfister \(1999\)](#). Concluyen que esta configuración atmosférica provoca inundaciones catastróficas, especialmente en la región de los Alpes. [Mudelsee et al. \(2004\)](#) para las inundaciones del verano del río Oder y el Elba en Europa centro-oriental aplicaron el point-wise biserial correlation coefficient entre los eventos de inundación con la presión reducida a nivel del mar y la altura geopotencial de 500 hPa. Obtuvieron un patrón muy parecido al SNAO en fase positiva propuesto en la presente tesis. [Müller y Kaspar \(2011\)](#) señalan resultados similares para las inundaciones de verano en las cuencas del Mura y del Drava (sudeste de los Alpes), ríos transfronterizos típicos de las laderas orientales de la cordillera. Las inundaciones en estos ríos se relacionan de forma habitual con flujos de humedad procedentes del este o del norte en el nivel geopotencial de 850 hPa. Esta configuración se asocia con los ciclones que se intensifican sobre el mar Mediterráneo, afectando el centro de Europa a medida que avanzan hacia el noreste a lo largo de la trayectoria Vb. Estos resultados están en concordancia con los hallazgos reportados por [Schmocker-Fackel y Naef \(2010\)](#) en el sentido de que los periodos de alta frecuencia de las inundaciones en las zonas de los Alpes suizos están en fase con las inundaciones del verano de la República Checa ([Brázdil, 2006 et al.](#)), Italia ([Camuffo y Enzi, 1996](#)) y la mitad oriental de la Península Ibérica ([Barriendos y Rodrigo, 2006](#)), mientras que la relación no es tan significativa si se compara con las ocurrencias de inundaciones observadas en Alemania ([Glaser y Stangl, 2004](#)).

Estos dos patrones hidro-climáticos están en concordancia con los resultados de [Mangini et al., 2005](#) en base a la composición isotópica de las estalagmitas de la cueva de Spannagel (ver apartado 10.2). La composición isotópica de la cueva depende de las fuentes de origen y las trayectorias de la precipitación: las trayectorias que cruzan el continente con origen en el Atlántico, con temperatura más baja, la composición isotópica de la precipitación es más ligera. En cambio, las trayectorias procedentes del Mediterráneo, con temperatura más alta, la composición es más pesada. En definitiva, este análisis podría justificar el hallazgo de la presente tesis de dos patrones hidro-climáticos diferentes.

10.5.2. Relación entre los mecanismos atmosféricos inducidos por la actividad solar y los patrones hidro-climáticos en Suiza

Los resultados presentados para Suiza justifican la aparición de forma mayoritaria de las inundaciones durante las pulsaciones climáticas frías especialmente, los periodos caracterizados por unas anomalías negativas de temperatura y positivas de precipitación (Amann et al., 2015), tal como también han manifestado otros autores (Gees, 1996; Pfister, 1999; Schmocker-Fackel y Naef, 2010; Wanner et al., 2011; Wirth et al., 2013; Amann et al., 2015; Peña et al., 2015b,c; Schulte et al., 2015). Los clústeres de inundación en Suiza durante estas pulsaciones vienen explicados por la fase negativa de la SNAO caracterizada por una configuración muy parecida a la NAO negativa (poca diferencia de presión entre Islandia y las islas Azores y bloqueo anticiclónico siberiano, ver figura 10.8), de estado casi permanente durante estas pulsaciones y con trayectorias de las perturbaciones al sur de su ubicación habitual. Esta configuración, similar a la descrita en el apartado 10.2, explicaría los hallazgos de diversos autores (Haigh et al., 2003; Gray et al., 2010, refiriéndose a este patrón como paleo-NAO (Wanner et al., 2008). Se define como el estado decadal de la circulación atmosférica del Atlántico Norte, siendo el modo dominante durante las pulsaciones climáticas frías y baja actividad solar (Wirth et al., 2013).

Pero además, los resultados expuestos en la tesis muestran un segundo patrón que explican la aparición de clústeres de inundación y grandes inundaciones catastróficas durante pulsaciones cálidas, en relación a la fase positiva de la SNAO en las que las intensas y persistentes precipitaciones de origen mediterráneo (Peña et al., 2015b,c), se superponen a otros factores que pueden potenciar la generación de las inundaciones como pueden ser la acción antrópica, la falta de cobertura de nieve en cabeceras (aumentando la superficie de la cuenca susceptible de generar escorrentía) y la saturación casi permanente de los suelos debido a los procesos de deshielo en estas zonas culminantes de los sistemas fluviales, favoreciendo el flujo superficial (Schulte et al., 2015).

Se observa un cambio de comportamiento en los patrones y este cambio podría parecer que está en relación con el calentamiento global (potenciado por acción antrópica) observado en las cuatro últimas décadas, si bien es cierto que se ha observado cierta relajación del calentamiento en los últimos años (IPCC, 2014). En la apartada de la justificación de la tesis (ver capítulo 1) uno de los puntos importantes del trabajo era el conocimiento del comportamiento del fenómeno a partir de los datos observados para obtener un patrón de comportamiento

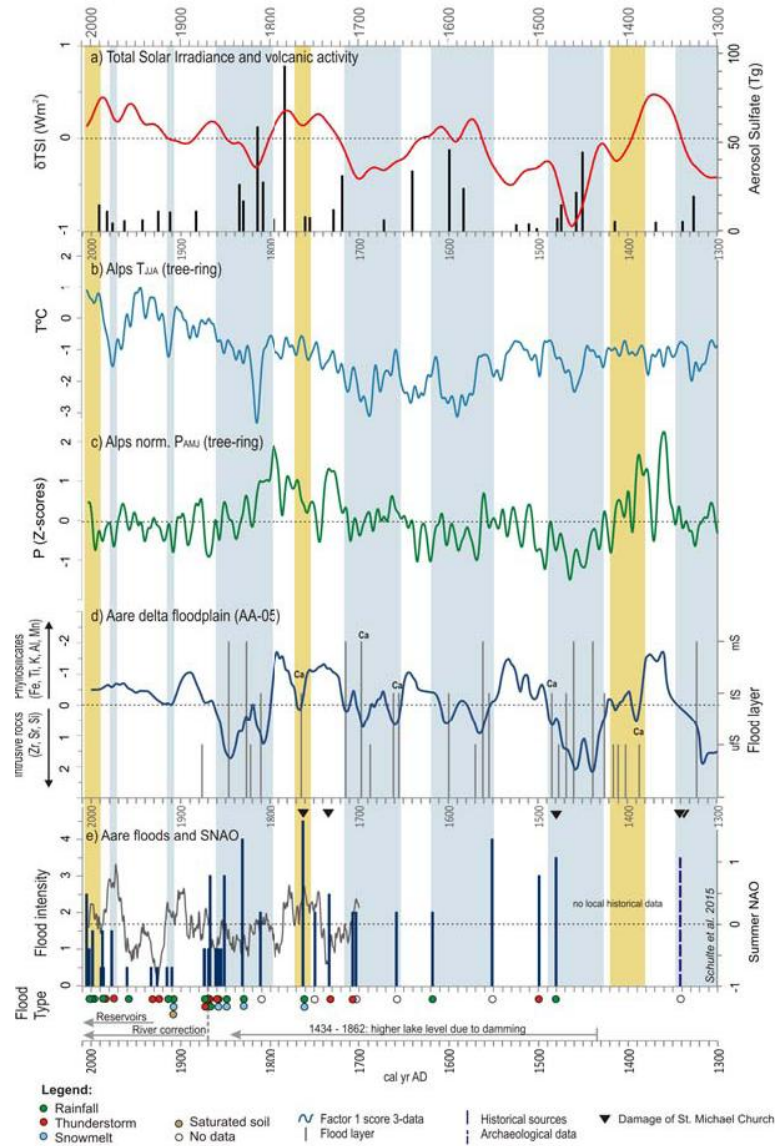
objetivo y poder comparar con periodos pasados con una ausencia de observaciones, identificados a partir de proxys tales como los registros sedimentarios, sedimentos procedentes de lagos o fuentes documentales, entre otros muchos. Por otra parte, la primera de las dos hipótesis apuntadas (ver capítulo 1) se define como: la señal temporal de las inundaciones en Suiza no es estacionaria y muestra una variabilidad mayoritariamente relacionada con las fases de baja actividad solar y pulsaciones climáticas frías tal como se ha detectado en otras zonas.

Del análisis de la señal de INU_{sws} se deduce que mayoritariamente las inundaciones catastróficas se han producido en pulsaciones frías (1831, 1848, 1910) y sólo la del 2005 se ha producido en el periodo cálido. Los registros sedimentarios e inundaciones históricas en el valle del Hasli (cuenca superior del río Aare, Alpes Berneses) para el periodo 1300-2010 (ver figura 10.9, presentada también en el capítulo 6), muestra un comportamiento similar: mayoritariamente los clústeres de inundación aparecen durante pulsaciones frías (bandas azules en la figura 10.9).

Pero se observa un segundo comportamiento que relaciona pulsos cálidos con periodos de alta frecuencia de inundaciones (bandas naranjas de la figura 10.9 en torno a los años 1400, 1750 y 2000). Si el análisis se centra en el segundo periodo (~1750) nos encontramos con la inundación más catastrófica de los últimos 800 años en el valle del Hasli: la de principios de julio de 1762. Estuvo relacionada a un episodio de precipitación de cuatro días y temperatura elevada que conllevó a una fusión de la nieve en cabeceras (Röthlisberger, 199; Schulte et al., 2015) en relación a una alta actividad solar y un periodo de dominio de la fase positiva de la SNAO (ver figura 8.5c). Esta inundación presenta unas características similares a la acaecida en agosto del 2005 y en el mismo valle: valores altos de actividad solar, temperaturas de verano moderadamente altas y valores de SNAO en fase positiva, si bien el papel de la nieve fue menor.

Figura 10.9. Comparación entre las inundaciones históricas del Hasli-Aare, el registro de paleo-inundaciones, la variabilidad solar, la actividad volcánica y los proxis climáticos (Periodo: 1300-2010). Figura original en 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 son los años con daños de la iglesia Sankt Michael causadas por el río Albach (Meiringen).



Por lo tanto, en respuesta a la primera hipótesis planteada en la tesis (ver capítulo 1), se puede afirmar que mayoritariamente las inundaciones en Suiza aparecen agrupadas en fases de baja actividad solar y pulsaciones frías, pero que, además, aparecen clústeres anómalos en algunos pulsos cálidos que pueden llegar a ser igual o más catastróficas. La explicación puede estar en la superposición de varios mecanismos no tan sólo atmosféricos (lluvias de alta intensidad y gran duración relacionadas al patrón Mediterráneo) sino también, como ya se ha apuntado anteriormente, de otros mecanismos potenciadores como pueden ser el estado de la cuenca y la acción antrópica en las zonas inundables.

Respecto a la segunda hipótesis planteada (ver capítulo 1): el cambio observado del patrón hidro-climático en Suiza a partir del año 1977 coincidiendo, precisamente, con la última pulsación climática cálida. Los

escenarios futuros resultantes de los modelos climáticos para la región de los Alpes muestran ascensos térmicos mucho más grandes que los pronosticados en otras zonas (aproximadamente de +0,25 °C por década hasta mediados del siglo XXI y de +0,36 °C por década para la segunda mitad (Gobiet et al., 2014) relacionando la pulsación cálida actual con el calentamiento global. El incremento observado de las inundaciones en este periodo podría estar relacionado con este hecho, dado que también se ha observado un cambio en el patrón, pasando de un modelo general relacionado con fases de baja actividad solar y pulsaciones frías (flujos zonales debidos a una configuración similar a la NAO negativa), a un patrón dominado por los flujos meridionales procedentes del Mediterráneo. Sin rehusar todo el debate en torno al calentamiento global (IPCC, 2014), el patrón hidro-climático cálido definido para Suiza a partir de 1977, ha servido para explicar los periodos anómalos observados en el pasado que de manera puntual rompían con el esquema general para Suiza (patrón predominante frío: actividad solar baja con alta frecuencia en la inundaciones: Schulte et al., 2015). De esta manera, si bien existen indicios del calentamiento global en relación al clima, no se puede concluir que el último clúster de inundaciones en Suiza esté conectado a éste ya que se han observado pulsaciones igualmente anómalas respecto al esquema general en el pasado de características muy similares.

De esta manera, los dos patrones hidro-climáticos presentan un esquema general generado a partir de los datos observados, proxies solares y climáticos, junto con datos documentales, que ha servido para explicar los mecanismos que inducen a las inundaciones durante las fases frías detectadas por los registros sedimentarios en la cuenca superior del río Aare y entender el funcionamiento de los periodos anómalos en relación a las pulsaciones cálidas.