



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.

11. CONCLUSIONES

11. CONCLUSIONES

11.1. Las regiones hidro-climáticas de Suiza

La regionalización hidro-climática muestra dos patrones de variabilidad espacial relacionada con las dos principales fuentes de humedad que afectan Suiza: de una banda los flujos procedentes del Atlántico y de otra los procedentes del Mediterráneo. El primero marca un transecto Oeste-Este (más/menos influencia atlántica relacionado con el grado de continentalidad), mientras que el segundo determina un transecto Norte-Sur (menos/más influencia mediterránea relacionado con flujos cálidos y húmedos de esta zona). La clasificación final presenta cinco regiones diferentes.

- La Región 1 está constituida por el Valais y los cantones del oeste del país.
- La Región 2 está definida por la parte occidental de la vertiente norte de los Alpes y el área meridional de la meseta central de Suiza (Swiss Plateau)
- La Región 3 conformada por los cantones de Grisons, Ticino y Uri, define el flanco sur de los Alpes
- La Región 4 se compone por las montañas en territorio suizo del Jura y la parte septentrional de la Meseta Central.
- Finalmente, la Región 5 integra los cantones de la parte oriental de la vertiente norte de los Alpes

Los dos transectos enfatizan la regionalización basada en el índice estival de daños por inundaciones. La división clásica de Suiza está fundamentada en las tres grandes regiones fisiográficas que definen el territorio, la vertiente norte de la cordillera de los Alpes (1), la vertiente sur de la cordillera (2) y la meseta suiza (3), quedan subdivididas en función de las diferentes fuentes de humedad, hecho que enriquece, delimita y mejora las unidades o regiones objeto de análisis, especialmente la vertiente norte de los Alpes que queda diferenciada en función de su proximidad al Mediterráneo y su grado de continentalidad.

- La región 3, al sur de la cordillera de los Alpes, queda determinada por la influencia mediterránea.
- La región 4, al norte de las montañas del Jura y extremo norte de la meseta suiza está expuesta a los flujos atlánticos.

- La vertiente norte de los Alpes queda dividida en tres regiones (1, 2 y 5) en función de su proximidad a los flujos atlánticos y mediterráneos, haciendo hincapié en la región 2 que marca la intersección de los dos transectos (Atlántico y Mediterráneo). La región 1 de características atlánticas está afectada por los frentes procedentes del oeste, mientras que la región 5 se caracteriza por una mayor continentalidad vinculada a las perturbaciones procedentes del Mediterráneo.

De esta manera la región 2 (la parte occidental de la vertiente norte de los Alpes y el área meridional de la meseta central de Suiza) se presenta en base a esta regionalización como el auténtico *hotspot* de la zona alpina al recibir influencias, tanto de las perturbaciones más frías procedentes del Oeste, como de las más cálidas procedentes del área mediterránea.

11.2. Periodos de mayor frecuencia de inundaciones en Suiza

El sumatorio del número de inundaciones a resolución decadal de INU_{year} para cada región muestra una no-estacionariedad de las diferentes señales. El análisis de las cinco distribuciones sugiere tres patrones espaciales diferentes de evolución decadal de los distintos INU_{year} :

- Un primer periodo, definido como fase A, entre los años 1817 y 1927 en que el número de inundaciones aumentó, principalmente, en las cuencas del oeste y el flanco norte de los Alpes (regiones 1, 4 y 5).
- Entre los años 1927 y 1977 se observa una tendencia de las señales nula o casi inexistente, indicando el largo periodo de ausencia (o gap) de inundaciones graves o catastróficas.
- El tercer periodo, definido como fase B, se extiende de 1977 hasta la actualidad, caracterizado por un aumento de las grandes inundaciones, esencialmente, en el centro y el sur de los Alpes (regiones 2 y 3).

Esta variabilidad a resolución decadal de las inundaciones muy graves y catastróficas podría estar vinculada por factores, tales como la actividad solar o las erupciones volcánicas, que provocan cambios significativos en

las trayectorias de las perturbaciones en relación a la variabilidad de la circulación atmosférica a gran escala y que inciden en la distribución espacial de las precipitaciones extremas.

El índice INU_{sws} capta la variabilidad temporal definida por una alternancia en periodos caracterizados por una alta frecuencia en la aparición de las inundaciones y periodos donde la frecuencia es muy baja o incluso inexistente. De esta manera, se observan pulsos que varían entre los 2 y los 100 años con un aumento de la frecuencia entre los años 1817 hasta 1851, del 1881 al 1927, en el periodo 1977 - 1990 y a partir de 2005.

El gap entre 1927 y 1977 refleja posiblemente la ausencia de condiciones climáticas extremas que podrían provocar grandes inundaciones. La influencia antrópica (construcción de embalses y regularización de los ríos) en este periodo de ausencia de inundaciones graves no es el factor dominante, sino más bien una disminución significativa en los totales de precipitación registrados durante el verano entre los años 1935 y 1977. El aumento de las inundaciones desde 1977 parece ser resultado, tanto de un aumento de la vulnerabilidad, como de los cambios en la señal climática. La regulación de los ríos y la construcción de diques y embalses redujeron sustancialmente los daños causados por las inundaciones pequeñas y medianas después de 1854, pero la mitigación de los efectos de las inundaciones muy graves y catastróficas ha mostrado sólo un éxito limitado, especialmente en las cuencas alpinas superiores. Sin embargo, el uso del suelo más intenso en las antiguas zonas de inundación protegidas por diques fluviales contribuyó al aumento de las pérdidas. Por otra parte, es importante tener en cuenta que el aumento general de la población, los valores de exposición (debido al aumento en el Producto Interior Bruto) y la aglomeración urbana (por ejemplo, Zúrich), han contribuido a unos índices más altos de daños por inundaciones, sobre todo en las últimas décadas. Esto se relaciona con el aumento de los valores de la vulnerabilidad y la exposición en áreas propensas a inundaciones como consecuencia de la expansión de las zonas urbanas.

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

El análisis espectral aplicado al índice estival de daños por inundaciones (INU_{sws}) señala periodicidades significativas en 2, 11 y 105 años. La aplicación de la misma metodología a los proxies procedentes de los

registros sedimentarios extraídos de varias secciones de los abanicos deltaicos de la cuenca superior del río Aare, ha identificado ciclos de inundación comunes a INU_{SWS} con una variación que oscila entre 70 y 150 años. Las periodicidades de los llamados "eventos de 100 años" podrían explicarse por los ciclos solares de escala centenaria, como puede ser el ciclo Gleissberg, ciclo que igualmente ha sido identificado en otros registros sedimentarios, incluyendo aquellos ubicados en el este de Francia, Suiza, Países Bajos, el Reino Unido, España y California.

Por su parte, el análisis espectral cruzado entre las series temporales de INU_{SWS} y el número medio anual de manchas solares (proxy relacionado a la actividad solar) 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 detectada en el análisis (ciclo Hale) se asocia con máximos actividad de solar y una disminución en la frecuencia de inundación. En cambio la ciclicidad de 2 años detectada en INU_{SWS} no parece que esté conectada a la actividad solar.

La evolución sincrónica de los proxies geoquímicos procedentes de los registros sedimentarios con los proxies climáticos y solares sugiere 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. Sugerimos que la influencia de la actividad solar y su impacto sobre la circulación de la atmósfera son dos de los principales factores desencadenantes de las grandes inundaciones en Suiza.

11.4. Patrones paleoclimáticos

A partir de las correlaciones de los diferentes proxies podemos deducir que periodos de actividad solar reducida y pulsos fríos de baja frecuencia tienen un impacto significativo en las grandes inundaciones de verano en Suiza. La magnitud de las inundaciones más importantes durante el s. XIX está relacionada con un aumento de los procesos de fusión provocados por un aumento de la superficie de los glaciares y de la cubierta de la nieve estacional, periodos con temperaturas más frescas de verano, reducción de la actividad solar, aumento de los aerosoles procedentes de las grandes erupciones volcánicas del hemisferio norte y

fases de clima más seco durante la primavera. Sin embargo, el modelo no lineal de las ocurrencias de inundaciones (por ejemplo, desde 1977) tiene que estar relacionado con la compleja relación entre los mecanismos exógenos, endógenos y autógenos relacionados con el forzamiento climático. Por lo tanto, los cambios hemisféricos que se producen en la circulación general atmosférica o en las corrientes oceánicas, y que afectan las tormentas y los límites de masa de aire, han de ser también considerados en la investigación de la génesis de los periodos de alta frecuencia de las inundaciones durante el alto verano en Suiza.

11.5. Cambio de los patrones hidro-climáticos en el periodo 1800-2010 relacionados a las inundaciones en Suiza

Los modelos climáticos indican que los periodos de baja actividad solar del ciclo de 11 años (y su modulación de 85 años), se caracterizan por un desplazamiento de la corriente en chorro hacia el sur y las tormentas intensas asociadas que pueden afectar Europa (estructura de NAO negativa). El esquema de circulación general a escala global presentado recuerda al principal patrón de variabilidad del Pacífico, el Niño y la Oscilación del Sur (ENSO), y concretamente 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, ciclicidades que son también significativas en INU_{SWS} . Por tanto, se podría sugerir que la fase fría del ENSO influye en la variabilidad de las inundaciones en Suiza. La circulación atmosférica zonal en el Atlántico Norte se intensifica justo antes y durante la fase de máximo desarrollo del Niño, mientras que se observa una relajación durante la transición del ENSO hacia la fase fría (o la Niña).

Se han identificado 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 arriba presentado y se puede denominar como Patrón Atlántico, caracterizado por perturbaciones atlánticas procedentes de altas latitudes. En cambio, el segundo patrón en relación a la fase cálida del periodo analizado se puede denominar como Patrón Mediterráneo, dominado por la masa cálida y húmeda mediterránea y rompe con el modelo general.

Teniendo en cuenta estos resultados, la síntesis del estudio se presenta a continuación:

- Se puede señalar un patrón de inundación espacial para la fase final de la Pequeña Edad de Hielo (Fase A, periodo frío), que afecta principalmente a la parte norte y occidental de Suiza, mientras que un segundo patrón influye en la parte central y sur durante el calentamiento observado en los últimos decenios (fase B, periodo cálido).
- Este cambio en la distribución espacial de las inundaciones está explicado por un cambio de los patrones atmosféricos que afectan a las frecuencias de las inundaciones en Suiza durante los últimos doscientos años: la Oscilación de Verano del Atlántico del Norte persiste en fase negativa (= Configuración en Omega, ver capítulo 8), durante los últimos pulsos fríos de la Pequeña Edad de Hielo (Patrón Atlántico: periodos de inundación 1817-1851 y 1881-1927), mientras que las fases positivas de SNAO prevalecen durante la fase cálida de las últimas cuatro décadas (Patrón Mediterráneo: clústeres de inundación a partir de 1977).
- Estos resultados son consistentes con la tendencia de la serie temporal de la SNAO para el periodo 1800 - 2010 (véase la figura 8.4 y parte central de la figura 10.5): la prueba de significación de tendencias de Mann-Kendall muestra una tendencia positiva y significativa a un nivel de confianza del 95%. Por contra, el análisis de la tendencia del modo PCA 5, Configuración en Omega, muestra una tendencia negativa y significativa a un nivel de confianza del 95%, resultado que es lógico dado que este modo representa la fase negativa de la SNAO.
- Este cambio del principal modo de variabilidad atmosférica también es perceptible en la distribución de la precipitación media diaria a escala europea: en los estados finales de la Pequeña edad de Hielo dominan una distribución atlántica, mientras que el calentamiento actual muestra una distribución eminentemente mediterránea. Este hecho es también observado por [Bladé et al., 2011](#) que reflexionan sobre el papel de la SNAO en diversos escenarios climáticos futuros. Este modo de variabilidad atmosférica emerge como un patrón cálido relacionado con precipitaciones en el arco mediterráneo. Es lícito pensar que si

esta dinámica continua, sin tener en cuenta la influencia de la actividad solar en las próximas décadas, puede haber un aumento de las precipitaciones intensas (no los totales estivales) en esta zona durante el verano, si bien también, su irregularidad. De todas las maneras, tal como muestran los resultados de la tesis hay que tener en cuenta otros mecanismos como la actividad solar y, aunque no se ha analizado pero si mencionados, el estado físico de las cuencas y la influencia de las actividades humanas.

- El distinto origen de las perturbaciones explica los cambios en los patrones hidro-climáticos. La pulsación climática fría se relaciona a una trayectoria de las depresiones con dirección noroeste a sureste u oeste en relación al origen atlántico de las bajas presiones, afectando por tanto a la mitad septentrional y occidental del territorio suizo. En cambio, la cálida está en relación con perturbaciones de carácter mediterráneo afectando el este y sur de Suiza.
- Destacar que la región central (región 2: parte occidental de la vertiente norte de los Alpes y área meridional de la meseta central de Suiza, ver capítulo 5) está relacionada con los dos patrones: el Atlántico y el Mediterráneo. Además, existe una conexión de esta región central con la mitad norte del territorio: muchos de los ríos que nacen en esta parte de los Alpes transcurren por los altiplanos septentrionales de Suiza en dirección hacia el norte de Europa. Los flujos atmosféricos relacionados con el Patrón Atlántico pueden inducir a precipitaciones intensas en las partes altas de las cuencas provocando inundaciones y propagándose hacia las partes bajas de los ríos que ocupan el norte del país.
- El análisis de las series temporales de precipitación en relación a los patrones sinópticos asociados a las inundaciones registradas en Suiza también muestran el cambio de patrón: una disminución de los patrones de precipitación debidos a las perturbaciones atlánticas durante el periodo 1948-2010 y un aumento de los patrones debido a perturbaciones mediterráneas.
- Si bien pueden haber indicios de la conexión del último clúster detectado en INU_{SWS} con el calentamiento global, la aparición de inundaciones en pulsaciones cálidas detectadas en los registros sedimentarios y la reconstrucción a partir de fuentes documentales en los últimos 800 años (donde la acción del hombre en el clima era prácticamente nula) y de características

similares al periodo cálido actual (rompiendo con el esquema general pulsación fría → aumento inundaciones), aportan evidencias de la posibilidad de la aparición de inundaciones en pulsaciones cálidas, no conectadas con el calentamiento global, y que estas pueden ser de magnitud igual o incluso más catastróficas que las registradas durante las pulsaciones frías (inundaciones de 1762 y 2005).

De esta manera, los resultados presentados explicarían la aparición de las inundaciones durante las pulsaciones climáticas frías. 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, de estado casi permanente y con trayectorias de las perturbaciones al sur de su ubicación habitual. Este patrón se ha definido como paleo-NAO, es decir, el estado decadal de la circulación atmosférica del Atlántico Norte, siendo el modo dominante durante las pulsaciones climáticas frías y de baja actividad solar. Pero los resultados también explican la aparición de clústeres de inundación y grandes inundaciones catastróficas durante el actual calentamiento global que rompe con el patrón predominante observado en los últimos 3000 años (como indican los registros sedimentarios de la cuenca superior del río Aare) y para los últimos pulsos fríos de la Pequeña Edad de Hielo (como señala INU_{SWS}). El análisis de la señal de INU_{SWS} en relación a los patrones atmosféricos indica que es la fase positiva de la SNAO la dominante durante las últimas cuatro décadas. Las intensas y persistentes precipitaciones de origen mediterráneo que caracterizan la pulsación cálida 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. Este patrón cálido también se ha observado en épocas pasadas con las que está relacionada la inundación de 1762, cuando la influencia del hombre era mínima.

11.6. Reflexiones finales

No se quiere dar por acabado el discurso sin recordar otros factores que inciden decisivamente en los resultados obtenidos. Hay que tener en cuenta que nuestro índice estival de daños por inundaciones, tanto el regional como el global, y a partir del cual se articula todo el análisis, se ha construido en base a los daños producidos por las inundaciones durante los meses de julio y agosto. Por tanto, se trata de un índice más influenciado por vulnerabilidad (factores antrópicos) que por la peligrosidad (causas naturales). La metodología utilizada para su construcción está basada precisamente en el concepto teórico de riesgo, en base al producto de la exposición por la vulnerabilidad. El índice aquí presentado no está analizado en base a factores naturales, no se han tenido en cuenta aspectos más hidrológicos como pueden ser el análisis de los caudales y las frecuencias en que aparecen. A pesar de esta consideración apuntada, hay evidencias que uno de los factores que explicarían las dos fases contrapuestas observadas (A y B) de la distribución decadal del número regional de las inundaciones en Suiza, estaría relacionado con dos patrones atmosféricos opuestos, el Atlántico y el Mediterráneo, produciéndose una transición de una fase a otra como consecuencia del paso de una pulsación climática fría a una cálida.

De todas las maneras, para los más puristas quedarían diversas preguntas sin responder:

- El impacto antrópico en las zonas inundables aumenta la exposición de los bienes y, por tanto, la vulnerabilidad. Hay que recordar que en Suiza, debido a su topografía, la población tiende a asentarse en los fondos de los valles. Estudios pioneros se vienen realizando en el marco del Grupo de Investigación PaleoRisk, ubicado en la Facultad de Geografía de la Universidad de Barcelona, donde por ejemplo, se ha analizado la emigración de la población de los fondos de los valles hacia zonas más seguras y viceversa, y que estos flujos migratorios están altamente correlacionados con los clústeres de inundación observados para Suiza.
- Se ha visto a lo largo del estudio que la zona central de los Alpes (ej. los Alpes Berneses) es la zona más afectada por las inundaciones debido a su ubicación, estando afectada tanto por los flujos atlánticos como los mediterráneos. La presión turística en esta zona es muy importante, donde el flujo es continuo durante casi todo el año, por tanto, ¿es cierto que el aumento de

la frecuencia de las inundaciones durante la pulsación cálida observada en esta zona central de los Alpes es debido a un cambio de tendencia en los patrones atmosféricos o está en relación a la mencionada presión turística?

- Por último, de menor entidad, está el tema rural, eminentemente centrado en el pastoreo y prácticas relacionadas, como el cultivo de herbáceas para su alimento. Si bien es un sector en recesión, hay zonas en donde sigue presente y vigente, como puede ser precisamente, la zona de los Alpes Berneses. La presión de este sector hacia las vertientes de las cuencas fluviales a través de la deforestación para obtener pastizales ha llegado a ser muy intensa, si bien esta presión está cada vez más en retroceso. Entonces, ¿cómo pueden influir estas prácticas en la generación de inundaciones?

Todos estos temas se están trabajando de forma interdisciplinaria en el marco del Grupo de Investigación PaleoRisk y desde donde se está intentando dar una solución integral a estos problemas.