

EL IMPACTO DE LAS INUNDACIONES EN LA ZONA NORTE DEL DESIERTO DE ATACAMA: UNA REVISIÓN HISTÓRICA SISTEMÁTICA DE LOS EVENTOS EN EL PERIODO 1911 A 2022

THE IMPACT OF FLOODS IN THE NORTHERN AREA OF THE ATACAMA DESERT: A SYSTEMATIC HISTORICAL REVIEW OF THE EVENTS IN THE PERIOD 1911 TO 2022

César Avendaño-Jihuallanga^a <https://orcid.org/0000-0002-5172-0337>
 Edwin Pino-Vargas^b <https://orcid.org/0000-0001-7432-4364>
 Jorge Espinoza-Molina^c <https://orcid.org/0000-0003-2236-8335>
 Fredy Cabrera-Olivera^d <https://orcid.org/0000-0003-1429-8728>
 Lía Ramos-Fernández^e <https://orcid.org/0000-0003-3946-7188>
 Eduardo Chávarri-Velarde^f <https://orcid.org/0000-0002-8445-8996>
 Eusebio Ingol-Blanco^g <https://orcid.org/0000-0002-0421-399X>
 Bertha Vera-Barrios^h <https://orcid.org/0000-0002-6411-8361>
 David Ascenciosⁱ <https://orcid.org/0000-0001-6161-5162>

Resumen

Las inundaciones y los flujos de escombros son las principales amenazas para los medios de vida de las personas y tienen un gran impacto en el desarrollo en todo el mundo. En el Desierto de Atacama, estos eventos son frecuentes y capaces de causar desastres y daños a la población, infraestructura y sectores productivos. En este artículo investigamos el impacto de eventos de inundaciones y flujos de detritos en la región de Tacna, ubicada en el Desierto de Atacama. Para evaluar estos impactos, revisamos y analizamos el registro de eventos de flujo de escombros que ocurrieron desde 1911 hasta 2022, así como el registro de eventos ENOS en la región de estudio, en el período 4.000 a.C. al 2022. Los resultados muestran que más de 20 eventos de inundaciones y flujos de detritos han ocurrido en la región de Tacna en los últimos 100 años causando grandes daños directos e indirectos a la población, infraestructura urbana y rural como viviendas, puentes, carreteras y áreas agrícolas. Además, a pesar de la evidencia de estos hechos, no hemos aprendido las lecciones de nuestros antepasados y en pleno siglo XXI seguimos exponiéndonos a esta situación.

Palabras claves: Amenaza natural, inundaciones, flujos de detritos, Región Tacna, Desierto de Atacama.

Abstract

Flood events and debris flows are the main threats to people's livelihoods and significantly impact development worldwide. In the Atacama Desert, these events are frequent and capable of causing disasters and damage to the population, infrastructure, and productive sectors. This article investigates the impact of flood events and debris flows in the Tacna region, located in the Atacama Desert. The record of debris-flow events from 1911 to 2022 and ENSO events in the study region from 4000 BC to 2022 were reviewed and analyzed to assess these impacts. The results show that more than 20 flood events and debris flows have occurred in the Tacna region in the last 100 years, causing substantial direct and indirect damage to the population and urban and rural infrastructure such as homes, bridges, roads, and agricultural areas. Furthermore, despite the evidence of these events, we have not learned the lessons of our ancestors, and in the 21st century, we continue to expose ourselves to this situation.

Keywords: Natural hazard, floods, debris flows, Tacna region, Atacama Desert.

Fecha de recepción: 08-08-2023 Fecha de aceptación: 28-06-2024

^a Universidad Nacional del Santa, Chimbote, Perú. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú. Correo electrónico: cavendanoj@unjb.edu.pe.

^b Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú. Correo electrónico: epinov@unjb.edu.pe.

^c Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú. Correo electrónico: jespinozam@unjb.edu.pe.

^d Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú. Correo electrónico: fcabrerao@unjb.edu.pe.

^e Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. Correo electrónico: liarf@lamolina.edu.pe.

^f Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. Correo electrónico: echavarri@lamolina.edu.pe.

^g Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. Correo electrónico: eingol@lamolina.edu.pe.

^h Universidad Nacional de Moquegua, Moquegua, Perú. Correo electrónico: bverab@unam.edu.pe.

ⁱ Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. Correo electrónico: dascencios@lamolina.edu.pe.

Los daños causados a nivel mundial por desastres naturales, incluyendo terremotos, inundaciones, ciclones, huracanes, sequías e incendios forestales, entre otros, ascendieron a US\$ 300 mil millones por año, con una tendencia de crecimiento anual en el rango de 5% y 7% durante la última década (Rentschler et al. 2022). De estos desastres, las inundaciones son las principales amenazas para los medios de vida de las personas y el impacto en el desarrollo en todo el mundo. Asimismo, el 23% de la población mundial está directamente expuesta a inundaciones (Rentschler et al. 2022; Winsemius et al. 2016).

Las inundaciones son peligros naturales que causan impactos ambientales y socioeconómicos negativos a nivel local y regional. Además, las vidas humanas, las instalaciones y la infraestructura se ven frecuentemente amenazadas por este evento natural (Kalogeropoulou et al. 2023; Ortega et al. 2022; Stillwell 1992). En el mundo, los peligros de lluvias intensas son muy recurrentes y crecientes, provocando severos daños a la infraestructura e incluso provocando muertes cada año (Cabral et al. 2023; Roldán et al. 2022). Las inundaciones son probablemente la razón principal del declive de las culturas en muchas partes del mundo (Jia et al. 2021).

Por otro lado, los flujos de escombros son peligros naturales devastadores debido a su aparición repentina, movimiento rápido, aumento del flujo de material y zona de salida expansiva (Huang et al. 2022). Los flujos de escombros y los deslizamientos de tierra en general son fenómenos catastróficos a nivel mundial, ya que la población mundial y la urbanización crecen en magnitud y cobertura geográfica; por lo tanto, es necesario ampliar el enfoque, la investigación, el monitoreo y el modelado a escala continental y global (Kuriyama y Fubelli 2022; Yang et al. 2023). Los flujos de escombros, que causan enormes pérdidas económicas y trágicas pérdidas de vidas todos los años, plantean serias amenazas para los asentamientos humanos (Huang et al. 2022; Wei et al. 2021). En los últimos años, varios desastres naturales han afectado al mundo, especialmente el flujo de escombros que causa enormes pérdidas y requiere una larga recuperación (Gan et al. 2019). Las mediciones in situ de alta calidad son esenciales para la evaluación de peligros de los eventos de flujo de escombros (Mercurio et al. 2021; Rom et al. 2023).

El flujo de escombros y las inundaciones podrían aumentar en las próximas décadas debido al cambio climático. Las proyecciones de cambio climático indican impactos negativos en los sistemas hidrológicos, con cambios significativos en la precipitación y la temperatura en muchas partes del mundo, lo que resulta en inundaciones y sequías (Espinoza-Molina et al. 2022; Pino-Vargas y Ascencios 2022). Además, el cambio climático podría aumentar la presión sobre la infraestructura de control de inundaciones existente (Lashford et al. 2022). Por otro lado, en regiones áridas y

semiáridas, los impactos más críticos de El Niño Oscilación del Sur [ENOS] y el cambio climático global están asociados con eventos de precipitación extrema y sequías de varios años. En el desierto de Atacama, los desastres aluviales son el resultado de eventos extremos de lluvia ocurridos en el período de marzo a septiembre bajo condiciones de El Niño, y durante la fase cálida de la Oscilación Decadal del Pacífico (Ortega et al. 2019).

En regiones hiperáridas como el desierto de Atacama, estas amenazas son capaces de desarrollarse rápidamente, provocando catástrofes (Pino-Vargas y Chávarri-Velarde 2022; Roldán et al. 2022). La ocurrencia de aluviones durante el siglo XX se abordó a partir del estudio de crónicas periodísticas, registros instrumentales de precipitación y la observación de secciones de depósitos aluviales que contienen restos históricos de origen antrópico (Vargas et al. 2000). Un factor determinante en las condiciones de flujo de detritos corresponde al contenido de sal del suelo. Esto se define y describe cómo el concepto "Dominio Salino del Norte de Chile" y es resultado de la combinación de factores geológicos, geomorfológicos, climáticos y paleoclimáticos (Araos 2018; Rodríguez et al. 2017; Sarricolea et al. 2017). Una comparación de datos arqueológicos en el desierto de Atacama y la zona árida de Australia muestra el impacto del ENOS durante los últimos 5000 años (Williams et al. 2007).

Asimismo, los regímenes climáticos se encuentran entre los componentes más importantes del medio ambiente a aprender en paisajes áridos, ya que la meteorología controla la disponibilidad del agua (Loyola et al. 2019). Aunque el aprendizaje social es un elemento clave de la gobernanza multinivel del riesgo de inundaciones, se ha estudiado poco (den Boer et al. 2019). Para proceder con un enfoque de gestión de inundaciones basado en el riesgo, el requisito fundamental es comprender la dinámica del riesgo de una llanura aluvial e identificar el parámetro principal que debe abordarse principalmente para reducir el riesgo (Tariq et al. 2020). Los estudios sobre el flujo de detritos son relevantes debido a sus potenciales efectos negativos sobre las comunidades humanas y la infraestructura en sus áreas de influencia (Ortega et al. 2022). Un proyecto de desarrollo de capacidades de respuesta debe centrarse en ubicar las áreas de origen y salida de los flujos de escombros causados por las fuertes lluvias en la cuenca y en evaluar la intensidad del flujo de escombros (Puglisi et al. 2013).

El sistema de estanques en cascada, que surgió ya en el siglo V a.C. en la zona seca de Sri Lanka, ha sido descrito como una de las prácticas de gestión del agua más antiguas del mundo (Hewawasam y Matsui 2022). La prevención contra la vulnerabilidad y los riesgos por fenómenos naturales fue muy importante para las sociedades de la Civilización Caral (5.000 a.C.), los centros urbanos se establecieron en terrazas

sobre el nivel del valle (Pino-Vargas 2019). Para prevenir el riesgo de inundaciones, los romanos no solo realizaron importantes obras públicas sino que establecieron normas técnico-jurídicas para inducir tanto a los individuos como a las comunidades a hacerse cargo del problema, estas normas fueron escritas en documentos públicos (Maganzani 2023). La progresión histórica y las tendencias evolutivas en las estrategias de control de inundaciones han llevado a soluciones basadas en la naturaleza (Chiu et al. 2021).

A pesar que se han realizado varios estudios técnicos y científicos en la región Tacna emplazada en la cabecera del desierto de Atacama, incluido el cambio climático (Espinoza-Molina et al. 2022; Pino-Vargas y Chávarri-Velarde 2022; Pino-Vargas y Ascencios 2022; Pocco et al. 2023), pocos estudios abordan eventos de máxima precipitación que generan flujos hiperconcentrados provocando desastres en la población, infraestructura, etc. y qué lecciones se aprendieron de estos eventos recurrentes.

En consecuencia, el objetivo principal de esta investigación es evaluar el impacto de eventos de inundaciones y flujos de detritos a través de la revisión y análisis de información local e investigaciones relacionadas con estos eventos ocurridos en la región árida de Tacna, ubicada en el borde norte del núcleo hiperárido del Desierto de Atacama. Este análisis será de gran utilidad para los tomadores de decisiones en la región y para reducir el impacto de estos desastres en las próximas décadas.

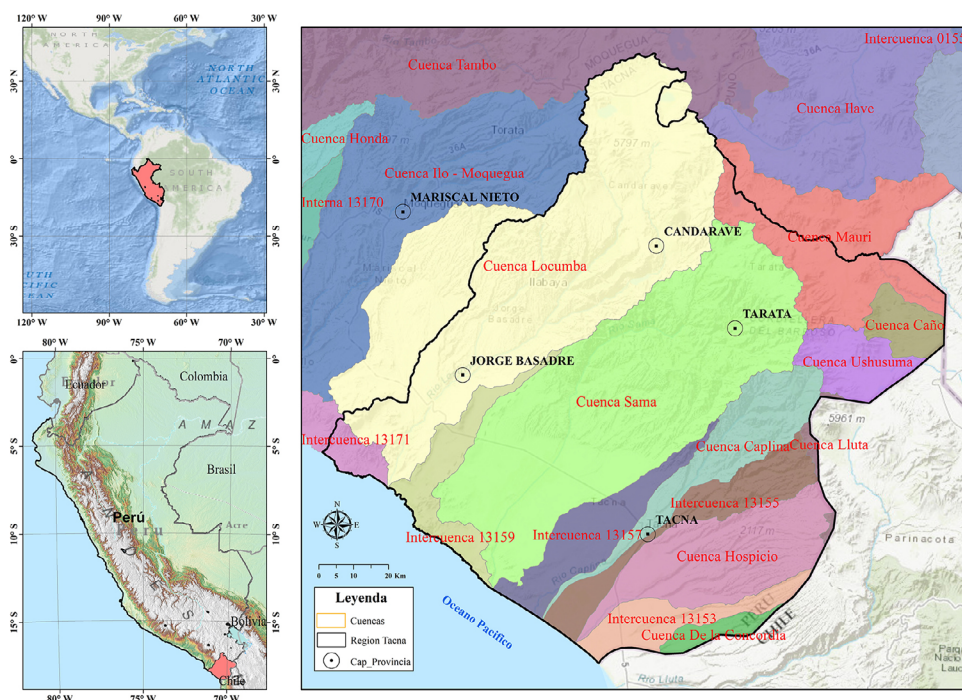
Los resultados del análisis de la información revisada sobre eventos de inundaciones y flujos de escombros ocurridos en el área de estudio nos ayudarán a responder preguntas de investigación como las siguientes: ¿Qué impactos han causado las inundaciones y flujos de escombros en la región Tacna del Desierto de Atacama? ¿Cuáles son las lecciones no aprendidas sobre la frecuente ocurrencia de estos eventos en el área de estudio? En síntesis, se busca demostrar un relato de hechos históricos, su recurrencia, los efectos que tuvo y las acciones implementadas.

Materiales y métodos

Descripción del área de estudio

La región sur del Perú está ubicada en la región norte del desierto de Atacama, caracterizada por un clima hiperárido con poca precipitación; tiene elevaciones que van desde los 0 hasta los 5.660 msn y un área total aproximada de 4.230 km² (Pino-Vargas et al. 2022; Pino et al. 2020; Vera et al. 2021). Limita al oeste con la cuenca Sama, mientras que al este limita con la cuenca Concordia, compartida por territorio peruano y chileno, y la cuenca Lluta, perteneciente a territorio chileno (Figura 1). La región presenta dos tipos de clima según su ubicación: un clima cálido-templado, desértico, con una amplitud térmica moderada en las zonas cercanas a la costa y un clima frío-húmedo en las partes altas de la cuenca (Pino et al. 2020; Pino-Vargas y Ascencios-Templo 2021). La temperatura en la cuenca baja es de 19°C con escasas precipitaciones del orden de los 6 mm/año, en cambio en las zonas altas la temperatura es de 4°C con precipitaciones del orden de los 350 mm/año.

Figura 1
Mapa de ubicación de la zona de estudio



Las actividades económicas de la zona se basan en la actividad agrícola, principalmente el cultivo del olivo, con más de 40.000 ha cultivadas en 2020 y regadas con agua extraída del acuífero de Caplina (Machaca-Pillaca et al. 2022). Esta situación ha generado la sobreexplotación de las aguas subterráneas utilizadas para cubrir la demanda de riego y uso doméstico de la población (Narvaez-Montoya et al. 2022; Pocco et al. 2023; Vera et al. 2021).

Metodología empleada

En general, el proceso metodológico para abordar este trabajo de investigación consistió en una revisión de la literatura existente sobre el contexto histórico del desierto de Atacama, enfocándose en su clima, geografía, condiciones socioeconómicas, recopilación de información y resumen de estudios y registros previos sobre el flujo de detritos, flujos hiperconcentrados e inundaciones en la región Tacna, localizada en el borde norte del núcleo hiperárido del Desierto de Atacama.

La recopilación de información proviene de distintas fuentes, como registros históricos publicados, fundamentalmente, en reportes técnicos, artículos científicos, revistas, entre otros. Con ello se definió un marco de tiempo para la revisión histórica, tal como se aprecia en la Tabla 1 y Tabla 2; buscando ordenar y actualizar el conocimiento de estos fenómenos. Asimismo, se identificaron los eventos significativos dentro del marco de tiempo definido y se llevó a cabo una clasificación de las inundaciones en función de la fecha, duración, magnitud, causas e impactos. Cabe resaltar que los eventos fueron organizados en una secuencia cronológica para investigar patrones a lo largo del tiempo.

Por otro lado, un enfoque basado en la climatología e hidrología fue utilizado para proporcionar información esencial sobre las condiciones que provocaron la ocurrencia de El ENOS e inundaciones en el desierto de Atacama. La comprensión de estas condiciones ayudó a interpretar las inundaciones históricas y sus desencadenantes. Asimismo, la combinación de un enfoque de ocurrencia de eventos históricos y su distribución geográfica para analizar la distribución espacial y el impacto geográfico de las inundaciones en el desierto de Atacama, con un análisis cualitativo de la vulnerabilidad de las poblaciones y la influencia de algunos factores antrópicos fueron utilizados en esta investigación. La combinación de estos enfoques permitió una comprensión del impacto de las inundaciones en la zona norte del desierto de Atacama, considerando tanto la dimensión histórica como la contemporánea.

Es preciso indicar que es evidente la falta de registros continuos de estos fenómenos, que permitan establecer acciones de mitigación o medidas que reduzcan la vulnerabilidad de las personas y las actividades económicas que realizan en esta región.

Las consecuencias catastróficas documentadas relacionadas con estos eventos climáticos resaltan la necesidad de mejorar su comprensión para preparar a las comunidades para este peligro latente y el impacto amplificado esperado relacionado con el cambio climático, pero también debido a la creciente exposición relacionada con la expansión urbana hacia las más susceptibles y vulnerables zonas inestables (Moreiras et al. 2021). El desierto de Atacama, considerado el más seco de la tierra, se encuentra en una zona remota y agreste, donde la documentación de procesos hidro sedimentarios históricos y recientes es escasa (Alcayaga et al. 2022).

El Desierto de Atacama

Este desierto ha sido catalogado por varios investigadores como uno de los más áridos del mundo, su mayor extensión está en el norte de Chile y su cabecera se encuentra en la región sur del Perú. Este desierto es el más seco y antiguo de la Tierra (Arenas-Díaz et al. 2022; Azua-Bustos et al. 2022; Bull et al. 2018), y muestra una combinación única de extremos ambientales (sequedad extrema, los niveles de radiación ultravioleta más altos de la tierra, y suelos altamente salinos y oxidantes), lo que explica por qué se investiga en gran medida como un modelo analógico de Marte durante casi 20 años (Azua-Bustos et al. 2022).

Se requieren nuevos conocimientos para mejorar la evaluación de peligros desde una perspectiva de ingeniería en ambientes áridos como el desierto de Atacama, estudios que consideren el flujo de lodo, tomando en cuenta los procesos de erosión y deposición (Garcés et al. 2022). Se estimó por primera vez en el desierto de Atacama un solo evento de tormenta extrema a tasas de erosión a largo plazo, se calculó una erosión media de 1,3 mm para el evento de marzo de 2015 que impactó la parte más austral (Aguilar et al. 2020).

En el hiperárido desierto de Atacama, la disponibilidad de agua juega un papel crucial para permitir la supervivencia de las plantas, junto con la escasez de lluvia, se presenta con frecuencia niebla marina advectiva a lo largo del escarpe costero, alimentando sistemas aislados mono-específicos de vegetación (Contreras et al. 2022). Los eventos de precipitación poco comunes en esta región pueden dejar rastros geomorfológicos duraderos y tener fuertes impactos en la biota (Böhm et al. 2021; Manríquez-Tirado 2019).

Se han identificado cinco inundaciones recientes cargadas de sedimentos en una playa en el Desierto de Atacama, los eventos no están directamente relacionados con episodios ENOS o eventos climáticos regionales, y la concentración de sedimentos no se correlaciona con la magnitud del evento de lluvia (Alcayaga et al. 2022; Mendonça 2017). Hace 68 ka se hizo un registro de precipitaciones en la zona norte del Desierto de Atacama, los hallazgos entre registros climáticos de sitios continentales y marinos sugieren una fuerte heterogeneidad de precipitaciones y se concluye que es

causada por marcadas diferencias en el patrón de clima dominante y cambios de la lluvia de verano predominante en el norte a la lluvia de invierno en el sur (Diederich et al. 2020).

Flujo de escombros

Son flujos muy rápidos a extremadamente rápidos (3 a 5 m/s) impulsados por la gravedad y compuestos por una mezcla de escombros y agua (Hungar et al. 1984). En el mundo en siglos pasados se han producido flujos de escombros de gran volumen (Martí et al. 1997). En regiones áridas, ocasionalmente se observan flujos de escombros cuando fuertes lluvias golpean laderas empinadas con materiales no consolidados (Garcés et al. 2022; Siman-Tov y Marra 2023). Comparando tormentas desencadenantes y no desencadenantes, se observa que la intensidad de la lluvia por sí sola es insuficiente para explicar el fenómeno, por lo que tenemos la posibilidad de que la lluvia previa pueda representar un factor crítico para el desencadenamiento de estos flujos en ambientes áridos (Siman-Tov y Marra 2023; Stolle et al. 2015). Las fuertes precipitaciones pueden estar precedidas por períodos húmedos, condiciones normales o secas, y aun así dar lugar a estos flujos (Clark 1987).

En el pasado, las clasificaciones de las mezclas de agua y sedimentos que fluyen se han basado principalmente en diferencias cualitativas relativas en el estilo y la velocidad del movimiento, así como en la morfología y sedimentología del depósito (Cabral et al. 2023). Actualmente se presenta una clasificación más cuantitativa y físicamente relevante, basada en umbrales de comportamiento reológico (Pierson y Costa 1987). El volumen inicial no siempre determina el volumen del flujo (Hungar et al. 1984; Lei et al. 2022), en general, los flujos de escombros con volúmenes iniciales pequeños, pueden aumentar rápidamente en varios o incluso decenas de órdenes de magnitud en volumen a través de procesos de arrastre y erosión en la fuente (Hungar et al. 1984; Lei et al. 2022; Shang et al. 2003; Wang et al. 2021; Zaginaev et al. 2019). Utilizando el 36Cl, como método de estimación del tiempo, se concluye que existe un fuerte control climático que influyó en la formación de abanicos fluviales en la región (Cesta y Ward 2016).

Fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENSO) y flujo de detritos

A diferencia de los países del hemisferio norte, en el Perú la instrumentación adecuada para la observación del clima se inició recién en la segunda década del siglo XX y, puntualmente, en algunas regiones del país, razón por la cual el Perú no cuenta con información anterior al año 1965 sobre este fenómeno. ENSO es una fluctuación interanual en la temperatura de la superficie del mar y la presión del aire en el Océano Pacífico ecuatorial (Hu et al. 2019; Jadhav et al. 2015; Trenberth 1997). Los efectos históricos del ENSO han variado considerablemente en extensión geográfica e

intensidad, y los eventos se clasifican de diversas formas como Débiles, Moderados, Fuertes o Muy Fuertes (Keefer et al. 2003). ENSO es una parte crítica de la variabilidad climática global interanual, y su intensidad tiene implicaciones importantes para los peligros naturales inducidos por la lluvia en muchos países vulnerables (Emberson et al. 2021). Es probable que el impacto de los deslizamientos de tierra inducidos por la lluvia sea modulado por la fuerza de ENSO, pero la naturaleza de esta conexión y dónde es más relevante siguen sin restricciones (Delle Rose 2022; Emberson et al. 2021).

Catorce capas sedimentarias ricas en materia orgánica en los depósitos Quebrada de los Burros, en la costa sur del Perú (departamento de Tacna), se encuentran entre dos unidades de flujo de detritos, atribuidas a ENSO, en 8.980 cal año a.p. y después de 3.380 cal año p.a., respectivamente (Fontugne et al. 1999). Reconstruidas las inundaciones entre 1978 y 2019, la concentración de sedimentos y el volumen de eventos hiperconcentrados no se correlacionan con los eventos de lluvia, lo que sugiere que no existe correlación con ENSO (Alcayaga et al. 2022).

Hechos recientes en el área de influencia

La costa de Perú ha experimentado recientemente cambios dramáticos en el paisaje y destrucción de activos durante los eventos de precipitación debido a ENSO (Delle Rose 2022). Un evento de precipitación extrema se presentó durante la segunda quincena de enero de 2020 en el desierto de Atacama, desde Tacna, Perú hasta Iquique, Chile (18-21°S), las lluvias se prolongaron por varios días provocando inundaciones, daños importantes a la infraestructura y afectando a la población en uno de los desiertos más secos del mundo (Vicencio-Veloso 2020). En cuanto al flujo de escombros producido a raíz del evento de lluvia del 21 de febrero de 2020, que ocasionó pérdida de vidas humanas, esta fue consecuencia del derrumbe de un terraplén informal construido a modo de trocha, ubicado 2 km aguas arriba de la zona urbana denominada La Florida (Ciudad de Tacna) (Pino-Vargas et al. 2022; Pino-Vargas y Chávarri-Velarde 2022). El 8 de febrero de 2019 ocurrió un evento de este tipo que destruyó la comunidad de Mirave en el sur del Perú, la cual estaba ubicada en las áreas de transporte y almacenamiento de escombros (Savio et al. 2019).

A lo largo de la costa sur de Perú, los únicos depósitos sedimentarios de inundación modernos son los producidos por el ENSO Muy Fuerte de 1982-1983 y 1997-1998 y el ENSO Plurianual Fuerte de 1991-1995, que causó inundaciones locales en 1992-1993 (Keefer et al. 2003).

Conocimiento regional actual y pasado

La integración de las comunidades locales e indígenas las ha llevado a desarrollar conocimientos y prácticas probados

en el tiempo para prepararse, mitigar, responder y recuperarse de los impactos de los peligros naturales (Hadlos et al. 2022). A menudo se da por sentado que la reducción del riesgo de desastres basada en la comunidad sirve como mecanismo para la inclusión del conocimiento local en la reducción del riesgo de desastres (Šakic-Trogrlic et al. 2022).

En los andes de Perú y Bolivia existen tres cuencas lacustres principales: el lago Titicaca, el lago Poopó y el grupo Coipasa-Uyuni, que durante los últimos milenios han registrado condiciones ambientales muy variables en sus sedimentos (Wirrmann y Mourguiart 1995). Registros paleolimnológicos y arqueológicos que abarcan 3.500 años del lago Titicaca y el altiplano boliviano-peruano demuestran que el surgimiento de la agricultura (1.500 a.C.) y el colapso de la civilización Tiwanaku (1.100 d.C.) (Binford et al. 1997; Ortloff y Kolata 1993), coincidió con períodos de cambios abruptos y profundos identificados como cambio climático (Binford et al. 1997).

Resultados y Discusión

Eventos ENOS identificados

En Perú, el monitoreo climático data de 1965, cuando se instalaron las primeras estaciones meteorológicas, por lo

que el registro del fenómeno ENSO antes de esa fecha no presenta un registro basado en monitoreo climático sino en evidencia histórica de daños. La Tabla 1, muestra la recopilación de información sobre el fenómeno para el período w4.000 a.C. al año 2022.

Eventos de flujo de escombros en la región

A base de registros históricos y monitoreo climático, en la Tabla 2, muestra la recopilación de información sobre el fenómeno del flujo de detritos en el período 1911 a 2022. En esta tabla se han incluido eventos que fueron recopilados de diversas fuentes bibliográficas.

Con respecto al control del flujo de escombros en la antigüedad. En la costa peruana, las acciones para prevenir la vulnerabilidad y los riesgos por flujo de escombros son evidentes en la Civilización Caral que data del año 5.000 a.C. (Pino-Vargas 2019). Existe evidencia de que los centros urbanos fueron construidos sobre el nivel del valle, situación que garantiza la protección de los cursos de agua y aumentos bruscos de caudal (Figura 2).

Figura 2

Vista panorámica de los depósitos fluviales a lo largo del río Supe



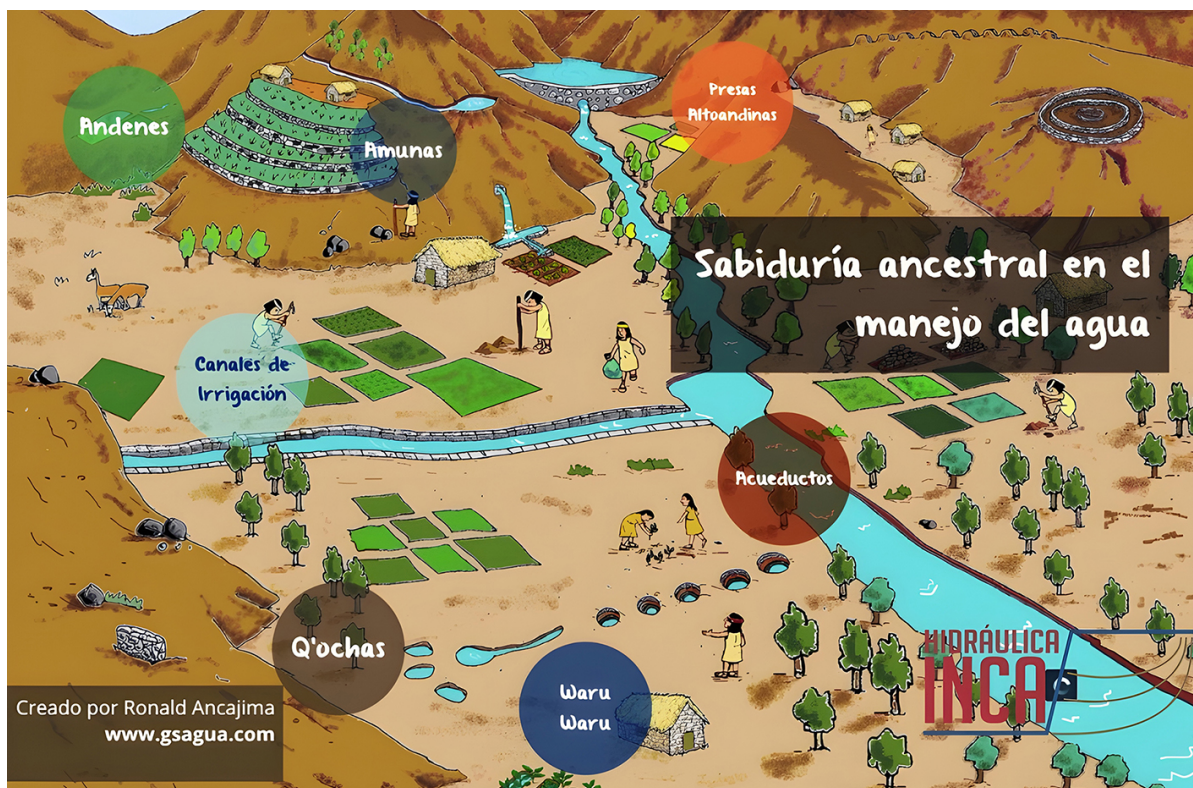
TF0 Terrazas: lecho del río; TF1: tierras de cultivo y TF2: plataforma sobre la que se construyó Caral (Carlotto et al., 2011).

Los Incas, en los Andes peruanos, recuperaban agua de las montañas para aumentar su disponibilidad durante la estación seca a través de un sistema de infiltración conocido como Amuna (Ancajima 2017; GSAGUA 2024). Esta técnica utilizada por los Incas consistía en aprovechar la permeabilidad del suelo para inducir la infiltración y reducir el flujo superficial. Definitivamente, esto resolvió dos problemas:

el primero, mitigar el efecto del flujo superficial, y el segundo, inducir la infiltración para recargar los acuíferos para que esta agua pueda ser utilizada en épocas de sequía en la zona baja (Figura 3). Hay algunas posiciones de arqueólogos que sostienen que fueron los Wari alrededor del año 700 d.C. quienes idearon este método.

Figura 3.

Sistema ancestral Inca para el manejo del agua



(Ancajima 2017; GSAGUA, 2024)

Este conocimiento ancestral inca es avalado por un grupo de investigadores del Imperial College London y el IMHEA (Iniciativa Regional para el Monitoreo Hidrológico de los Ecosistemas Andinos). Se ahondó en el conocimiento de las prácticas y sistemas indígenas de uso del agua, se concluye que en ciertas comunidades andinas la escasez de agua nunca fue un problema (GSAGUA 2024).

En cuanto al área de trabajo, el sitio arqueológico Quebrada Los Burros se encuentra a 170 msnm y a dos kilómetros de la línea de costa actual, situación que no debería haber cambiado mucho en los últimos diez mil años (Lavallée et al. 2011). En efecto, debido a la naturaleza abrupta de la línea de costa y la estrechez de la plataforma continental en este sector, el ascenso postglacial del océano no afectó el trazado de la costa salvo de manera insignificante. Los análisis

realizados sugieren para la primera fase una sucesión de breves ocupaciones y posibles contactos con el altiplano (Lavallée et al., 2011). Es decir, los antiguos habitantes de la quebrada Los Burros se asentaron en la zona menos vulnerable al flujo de escombros.

Ubicación actual de la población y zonas agrícolas

Los grupos más vulnerables tienden a estar económicamente restringidos a vivir en lugares relativamente baratos y más peligrosos, a menudo obligados a vivir en áreas topográficamente estrechas debido a la expansión y el desarrollo (Santi et al. 2011). Los impactos generales del flujo de escombros a escala global desde 1950 hasta 2011 registraron 213 eventos con 77.779 muertes (Dowling y Santi 2014). En la actualidad, en pleno siglo XXI, las ciudades del mundo se desarrollan en zonas altamente vulnerables al flujo de escombros.

Un evento de lluvia con un período de retorno mayor a 100 años, en marzo de 2012, afectó los valles profundamente ubicados en la Precordillera de la Región de Tarapacá, norte de Chile, afectando gravemente a la población y la agricultura de la zona (Sepúlveda et al. 2014). El evento hidrometeorológico extraordinario de marzo de 2015 en la cordillera de los Andes provocó severas inundaciones en el sur del desierto de Atacama (Izquierdo et al. 2021).

En el caso de la ciudad de Arequipa, en el sur de Perú y muy cercana al área de estudio, el mapeo de vulnerabilidad ha llevado a identificar una alta vulnerabilidad ante futuras inundaciones o flujos destructivos en áreas urbanas y agrícolas (Thouret et al. 2014). En la región Tacna, los eventos de precipitaciones extraordinarias de enero y febrero de 2020 revelaron que gran parte de la infraestructura vial, servicios, edificaciones y áreas agrícolas, no están diseñadas tomando en cuenta las condiciones climáticas (Pino-Vargas et al. 2022).

En este sentido, es necesario establecer normas de seguridad y adaptación de los edificios a las condiciones climáticas actuales.

La Figura 4, muestra la ubicación de los principales puntos de ocurrencia de eventos extremos relacionados con el flujo de escombros, la Zona 1 y 2 corresponden a la ciudad de Tacna, la Quebrada del Diablo y el Río Seco. La zona 3 corresponde a la población de Mirave en la provincia Jorge Basadre ubicada en la desembocadura de la quebrada y la zona 4 la quebrada Los Burros que desemboca en el Océano Pacífico. Estas 4 zonas han sido identificadas debido a que fueron las que en mayor medida se activaron en la última década. Según las referencias citadas en este trabajo, en esta región existe evidencia de variabilidad y cambio climático, lo que ha revelado la vulnerabilidad de la población y los servicios básicos, interrupción de las rutas de transporte local, regional y nacional, servicio de agua, entre otros.

Figura 4.

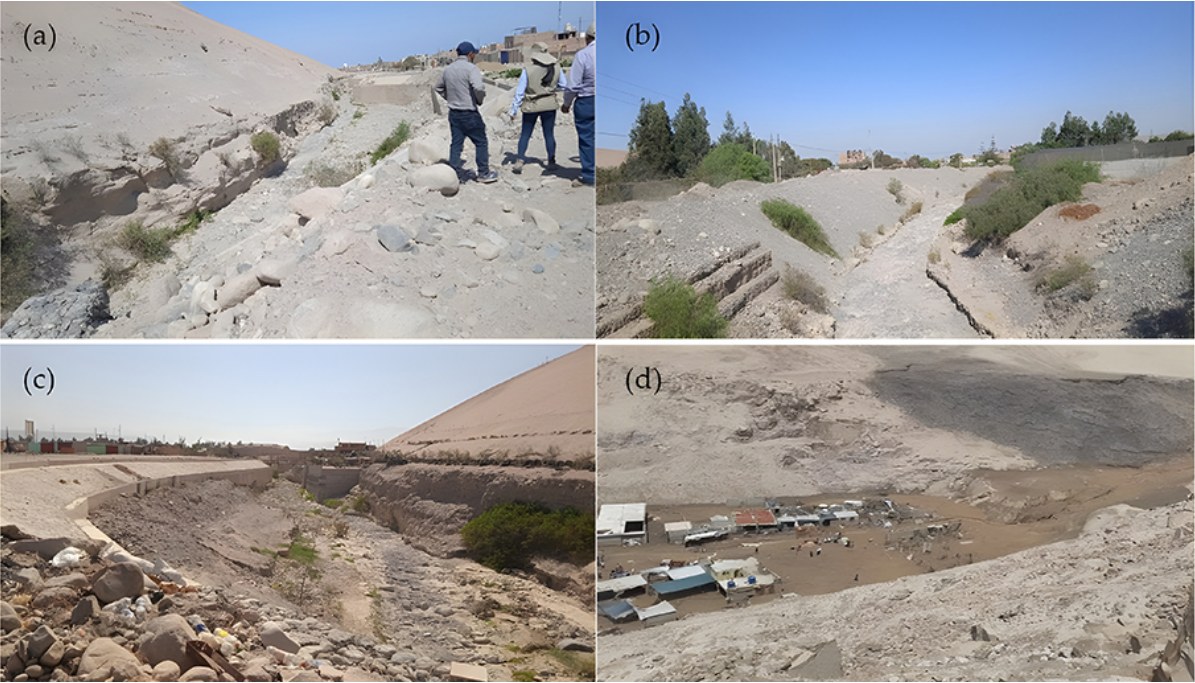
Ubicación de las 4 zonas identificadas para el flujo de escombros en el área de estudio



La Figura 5, muestra imágenes de las zonas 1 y 2, el río Seco y el arroyo del Diablo en la ciudad de Tacna. Este tipo de situaciones es recurrente no solo en la región de estudio sino también en muchas ciudades del país y del mundo. En la Figura 6, observamos imágenes de los hechos ocurridos en la zona 3, en esta quebrada se ubica el poblado de

Mirave, y las edificaciones y áreas agrícolas entre otros elementos antrópicos están deficientemente ubicados e incluso invaden el propio tramo del río. La Figura 7, muestra la zona 4, correspondiente a la quebrada Los Burros, mostrando el efecto del flujo de escombros en la vía y la falta de una estructura de cruce.

Figura 5.
Zona 1 y 2



(a) Construcciones que invaden el tramo del cauce Río Seco, Tacna, Perú. (b) Una estructura de protección mal diseñada genera cambios abruptos en el régimen de caudales. (c) Muros de encauzamiento socavados y a la derecha terrenos de cultivo y viviendas en el límite con el cauce del río Caplina (d) Asentamiento urbano en la desembocadura del Arroyo del Diablo

Figura 6
Zona 3



(a y b) Flujo de escombros en la zona del estadio de fútbol en la parte alta del pueblo.



(c, d, e, f, g y h) Efectos del flujo de escombros en la población

Figura 7
Zona 4



(a y c) Efectos del flujo de escombros en el arroyo Los Burros. (b y d) Morfología y vegetación en el arroyo Los Burros

Lecciones no aprendidas

Si bien existen evidencias pasadas y recientes de la variabilidad y cambio climático en esta región caracterizada como hiper árida por su ubicación en la cabecera del Desierto de Atacama, es notorio que no hemos aprendido las lecciones del pasado. Los eventos extraordinarios de precipitación que generan flujos de escombros son recurrentes y, en esta región y en todo el mundo, han generado desastres.

Asimismo, como se ha documentado, las civilizaciones antiguas, incas y preincas ubicaron sus construcciones habitacionales y desarrollaron sus actividades agrícolas para la producción de alimentos en zonas de mayor altitud que los cauces de los ríos o arroyos, situación que corresponde eminentemente a un claro propósito de la gestión de riesgos. Por el contrario, actualmente nuestros pueblos, ciudades, infraestructura y zonas agrícolas, entre otros, se encuentran en zonas de alto riesgo de desbordamiento e inundación por el flujo de escombros.

Una situación más alarmante es que hemos invadido la franja intangible de los cauces y nos hemos asentado en la desembocadura de los barrancos, lo que sin duda aumenta ostensiblemente el riesgo. Para esta región de estudio, en la Tabla 1, hemos recopilado información sobre eventos ENSO extraordinarios en el período 4.000 a.C. hasta el año 2022, y en la Tabla 2, eventos de flujo de escombros en el periodo de 1911 a 2022. Esta información nos muestra que estos eventos son recurrentes en el tiempo, las culturas antiguas tenían un manejo claro de estos eventos y no permitían ser afectados por estos, sino que, por el contrario, lo aprovechaban como transporte de nutrientes a las terrazas inferiores para mejorar los cultivos y como sistema de recarga de aguas subterráneas que utilizaban en la zona baja de las cuencas.

Asimismo, sugerimos la creación de un equipo técnico multisectorial liderado por la Autoridad Nacional del Agua del Perú que involucre a la academia, cuya misión será brindar soluciones y un plan de mediano y largo plazo que integre medidas estructurales y no estructurales para reducir los impactos de estos eventos en las próximas décadas.

Conclusiones

Desde 1911 hasta 2022, ocurrieron varios eventos de inundaciones y flujos de escombros en el área de estudio, que causaron enormes daños directos e indirectos a la población y a la infraestructura urbana y rural, como casas, puentes, caminos, áreas agrícolas y otros sectores productivos. Sin embargo, actualmente no existe un plan con una visión de mediano y largo plazo que incorpore medidas estructurales y no estructurales para mitigar los próximos eventos.

De acuerdo con la recopilación de información histórica sobre cambios abruptos en la normalidad de las variables climáticas y la presencia del fenómeno ENSO, así como la identificación de eventos clasificados como flujo de detritos, podemos concluir que nuestros antepasados tenían claras las condiciones naturales del sistema hidrológico y desarrollaron sus actividades agrícolas y sus asentamientos humanos en lugares menos vulnerables. Utilizaron terrazas altas sobre el nivel de los ríos y quebradas secas, de tal manera que ante eventos extremos de precipitación no sufrieran los impactos de la naturaleza.

En las condiciones actuales, debemos afirmar que estas lecciones de nuestros ancestros y la evidencia reciente del flujo de escombros, no fueron totalmente aprendidas, y en pleno siglo XXI, nos hemos acostumbrado a construir en zonas vulnerables a estos eventos, desarrollando asentamientos humanos en el fondo de las quebradas, haciendo agricultura en terrazas inundables de ríos, construyendo caminos sin elementos de cruce para quebradas secas, entre otros aspectos.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú, Vicerrectorado de Investigación e Instituto de Investigación por brindar los fondos de canon, sobre canon y regalías mineras para el desarrollo del proyecto "Mitigación del riesgo de desborde e inundación basado en una propuesta de valoración de espacio público sostenible en zonas áridas", aprobado con R.R. N°13626-2024-UNJBG. Asimismo a H2O UNJBG, Grupo de Investigación del Agua.

TABLAS

Tabla 1

Registro de eventos ENOS en la región de estudio en el período 4.000 a.C. a 2022

Periodo	Descripción/Categoría	Referencia
4000 a.C.	La geomorfología, los estudios de sedimentos y la paleontología indican que el Fenómeno ENOS ha ocurrido durante al menos 40,000 años.	(Sociedad Geográfica de Lima 1911)
400 d.C.	Investigaciones arqueológicas demuestran que cambios climáticos drásticos afectaron la costa central del Perú	(Huertas Vallejos, 2001)
200 – 700 d.C.	La cultura Moche en la costa norte del Perú, una próspera civilización sufrió los estragos de un prolongado e implacable episodio ENOS	(Huertas Vallejos, 2001)
1500, 1525-26, 1531-32, 1535, 1539-41, 1544, 1546-47, 1552-53, 1558-61, 1565, 1567-68, 1574, 1578-79, 1581-82, 1585, 1587-89 y 1596.	Siglo XVI, se describen fenómenos meteorológicos anómalos	(Couper-Johnston, 2000)
1600-01, 1604, 1607-08, 1618-19, 1621, 1624, 1626, 1630-31, 1635, 1641, 1647, 1650, 1652, 1655, 1661, 1671, 1681, 1683-84, 1687-88, 1692, 1694-95 and 1697.	Siglo XVII, se describen fenómenos meteorológicos anómalos	
1701	Fuerte	(Reluz & Carlos Guillermo Carcelén Reluz 2011)
1707-1709	Moderado	
1715-1716	Fuerte	
1718	Moderado	
1720	Muy fuerte	
1723	Moderado	
1728	Muy fuerte	
1736	Fuerte	
1740 y 1744	Moderado	
1747	Fuerte	
1750, 1755-1756, 1761, 1764, 1768	Moderado	
1775	Fuerte	
1778-1779	Moderado	
1783	Fuerte	
1784 y 1786	Moderado	
1791	Muy fuerte	
1701, 1703-04, 1707-09, 1713-14, 1715-16, 1718, 1720, 1723, 1725, 1728, 1731, 1734, 1734, 1737, 1744, 1747-48, 1751, 1754-55, 1761-62, 1765-66, 1768-70, 1772-73, 1776-78, 1782-84, 1785-86, 1790-93, 1794-97 y 1799	Siglo XVIII, se describen fenómenos meteorológicos anómalos	(Couper-Johnston, 2000; Michael H. Glantz 1996)

Periodo	Descripción/Categoría	Referencia
1802-04, 1806-07, 1810, 1812, 1814, 1817, 1819, 1821, 1824-25, 1827-28, 1830, 1832-33, 1835-36, 1837-39, 1844-46, 1850, 1852-53, 1857-59, 1860, 1862, 1864, 1865-66, 1867-69, 1977-78, 1880, 1865, 1888-89, 1891, 1896-97 y 1899-1900	Siglo XIX, se describen fenómenos meteorológicos anómalos	
1902-1903, 1905-1906, 1911-1912, 1914-1915, 1918-1919, 1923-1924, 1925-1926, 1930-1931, 1932-1933, 1939-1940, 1941-1942, 1951-1952, 1953-1954, 1957-1958, 1965- 1966, 1969-1970, 1972-1973, 1976-1977, 1982-1983, 1986-1987, 1991-1992, 1994-1995 y 1997-1998	Siglo XX, se describen fenómenos meteorológicos anómalos	
1982-1983	En la costa norte presentó anomalías entre +8 °C a +10 °C, con precipitaciones de 3000 mm entre septiembre y mayo, generando inundaciones. En el sur, creó sequía y un grave déficit de precipitaciones.	(Quinn et al. 1987)
1992	Anomalías de precipitaciones excesivas en el norte del país y sequías en el sur	(Broecker et al., 1998)
1997-1998	En la costa norte presentó anomalías de +10 °C, con precipitaciones de 3000 mm entre septiembre y mayo, generando inundaciones. En el sur, generó sequía y un severo déficit de precipitaciones	(SENAMHI 2017; Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [Senamhi] 2014)
2009	Hay que abordarlo como una forma de desorden temporal o como una forma de abundancia periódica en el norte y déficit en el sur.	(Caramanica et al., 2020)
2015-2016	Las anomalías oceánicas y atmosféricas observadas en el Pacífico reflejan un fuerte evento ENOS que continúa evolucionando. El consenso en los modelos predictivos globales sugiere que el fenómeno podría alcanzar su máxima intensidad entre los meses de noviembre de 2015 y enero de 2016.	(USAID 2015)
2017	Eventos extremos de lluvia y temperaturas extremas del aire registrados durante el fenómeno ENSO en el verano de 2017.	(SENAMHI 2017)
2020-2022	Es habitual que La Niña alterné con su opuesto, el fenómeno ENSO, pero esto no ha ocurrido en los últimos tres años (entre 2020 y 2022).	(Revista digital de la cámara de comercio de Lima 2023)

Tabla 2

Registro de eventos de flujo de detritos en la región de estudio para el período 1911 a 2022.

Fecha	Localización geomorfológica	Localización política	Daños producidos
02/01/1911	Pampa Litoral y Flanco Disectado	Provincia de Tacna	La inundación de la vía férrea Tacna-Arica
02/15/1911	Pampa Litoral y Flanco Disectado	Ciudad de Tacna	Desbordamiento del río Caplina inunda área de cultivo
02/27/1927	Pampa Litoral y Flanco Disectado	Ciudad de Tacna y Mirave	Desborde del río Caplina inunda la ciudad de Tacna y las zonas de cultivo. Entrada de la Quebrada del Diablo y Caramolle en la ciudad de Tacna y de la Quebrada Mirave en Ilabaya Destrucción total de dicha localidad
01/03/1949	Pampa Litoral y Flanco Disectado	Provincia de Tacna	Entran los ríos Caplina y Uchusuma, inundando las zonas de cultivo de Calientes, Pocollay, Las Vilcas y la estación agrícola, y muere el campesino Juan Mamani. Las defensas de Calana evitan la inundación de la ciudad de Tacna
Third week of the month of January 1998	Cordillera de la Costa	Distrito de Ite y Provincia de Jorge Basadre	Específicamente en el distrito de Ite, ubicado a 107 km al norte de la ciudad de Tacna, dejando como víctimas a 200 familias en precaria situación económica. sus viviendas fueron inundadas por las precipitaciones pluviales cuyos techos de esteras no soportaron las lluvias. Las autoridades dotaron de carpas con colchones de calamina y frazadas para paliar el problema de una población desprevenida y acostumbrada a no presenciar la lluvia
01/25/1998	Pampa Litoral y Flanco Disectado	Provincia Jorge Basadre	En la madrugada del 25 de enero, un violento derrumbe azotó la localidad de Ilabaya, ubicada a 120 km al NE de Tacna, dejando dos muertos, varios desaparecidos y heridos en medio de fuertes lluvias (Diario El Comercio. 26/01/1998). La información muestra que el flujo de escombros destruyó decenas de casas, puentes y caminos aledaños; además de graves daños en las dos centrales hidroeléctricas de Aricota, que provocaron apagones en la ciudad de Tacna y racionamientos nocturnos. El derrumbe también derribó varios postes de alta tensión, dejando a Tacna sin energía eléctrica por más de 6 horas
01/26/1998	Pampa Litoral y Flanco Disectado	Provincia Jorge Basadre	Tres deslizamientos de tierra ocurrieron en el valle de Ilabaya, dejando dos residentes muertos, una docena de desaparecidos y 700 familias afectadas. Las fuertes lluvias produjeron deslizamientos en diferentes partes de la cuenca del río Locumba, causando graves daños a la central hidroeléctrica Aricota y destruyendo once torres de alta tensión ubicadas a lo largo de los valles de Curibaya y Ticapampa. Las localidades de Locumba e Ilabaya quedaron sin luz, agua potable y sin servicio telefónico, por lo que se pusieron en funcionamiento dos motores provisionales de la central térmica de Calana, ubicada a 20 km al este de la ciudad de Tacna. Asimismo, las inundaciones se llevaron de sus cimientos 20 casas, 300 cabezas de ganado y se perdieron cerca de 500 ha de cultivos en los valles de Locumba, Mirave Ilabaya, Ticapampa y Curibaya, este último devastando 200 ha de cultivos cerca de sus riberas. En general, los campesinos dejaban sus casas y ganado para trasladarse a la sierra donde pasaban la noche. Por otra parte, un puente sobre el río Locumba se derrumbó y dos quedaron completamente cubiertos de lodo y rocas, y en Ilabaya, otros dos puentes quedaron destruidos. Para la zona afectada, la ayuda fue enviada por puente aéreo debido a que el Ministerio de Transporte anunció la afectación de 400 km2 de la vía no pavimentada, cuyas obras de reparación tardaron varios meses

Fecha	Localización geomorfológica	Localización política	Daños producidos
01/20/2008	Cordillera de la Costa	Provincia de Tacna, Distrito de Sama Las Yaras	Se produjo un flujo de lodo que mató a una persona. Interrumpen carretera costera Tacna-Ilo
07/21/2009	Cordillera de la Costa	Provincia de Tacna, Distrito de Sama Las Yaras	Se registró una avalancha de lodo, pero no hubo pérdidas humanas, solo paralización del tránsito, personal de la Policía de Carreteras y Seguridad Ciudadana de Ite desvió el tránsito y realizó labores de limpieza
03/11/2015	Pampa Litoral y Flanco Disectado	Provincia Jorge Basadre	El caudal del río Locumba aumentó a 75 m ³ /s alertando a la población cercana al cauce a alejarse. El desbordamiento del río arrasó varias hectáreas de cultivos de cebolla y maíz, así como 20 ha de terrenos baldíos, también hubo pérdida de animales y daños en viviendas en el distrito de Ilabaya (Diario Sin Fronteras, 11/03/2015). Asimismo, el río Locumba se salió de su cauce en la parte baja del puente Mirave, y en la zona de Pachana cayeron dos postes de alta tensión, colapsó el puente Ticapampa y quedó dañado el puente peatonal Piñapa. Las aguas desbordadas también invadieron campos de cultivo en las zonas de Piñapa, Aurora y Chaucalana
03/25/2015	Cordillera de Costa	Provincia de Tacna, Distrito de Sama Las Yaras	Ocurrió un flujo de lodo que cubrió aproximadamente 5 km de la carretera costera, atrapando cinco vehículos, sin pérdidas humanas
03/26/2015	Pampa Litoral y Flanco Disectado	Pueblo de Mirave, distrito de Ilabaya	Aproximadamente a las cinco de la tarde se activa la quebrada donde se encuentra el poblado de Mirave, provocando un fuerte flujo de lodo y piedras, que afecta viviendas, vías de comunicación y zonas de cultivo. En detalle, el derrumbe arrasó con vehículos, viviendas, instituciones educativas, animales y campos de cultivo, y cuatro personas desaparecieron
07/03/2017	Cordillera de Costa	Provincia de Tacna distrito de Sama Las Yaras	Presencia de flujo de lodo, pero no hubo pérdidas humanas, solo paralización del tránsito por bloqueo de vía
08/10/2017	Cordillera de Costa	Provincia de Tacna distrito de Sama Las Yaras	Ocurrió ingreso de lodo que afectó carretera Costanera por algunas horas
01/27/2019	Pampa Litoral y Flanco Disectado	Provincia de Tacna	El río Caplina aumenta su caudal y desborda los puentes. Se registra precipitación de 29,3 mm en 5 horas de duración
01/31/2019	Pampa Litoral y Flanco Disectado	Provincia de Tacna	Los arroyos que cruza la carretera Panamericana Sur entre la ciudad de Tacna y la localidad de Tomasiri están activados y los pontones están desbordados. También se activan la quebrada de El Diablo y Caramolle, se retiene el caudal hiperconcentrado del primero en el cruce de la carretera a Tarata. El Caramolle inunda parcialmente la zona de Barranquilla y estuvo muy cerca de inundar la subestación eléctrica del Parque Industrial. Se registra precipitación de 29.0 mm en 4 horas de duración
02/08/2019	Pampa Litoral y Flanco Disectado	Pueblo de Mirave, Distrito de Ilabaya y Pueblo de Calientes, Provincia de Tacna	En Mirave, el impacto en la salud de las personas: 570 familias fueron afectadas (1 fallecido, 1 lesionado y 2 desaparecidos). Impacto en infraestructura: 450 viviendas fueron afectadas. Impacto en vías de comunicación: 3 puentes fueron afectados. Impacto en saneamiento ambiental: Barrios afectados sin servicios básicos (agua y alcantarillado). En Calientes (Tacna) se activan e inundan quebradas aledañas al balneario del mismo nombre, la entrada de la quebrada Palca corta el camino al balneario de Calientes, y se aísla a turistas y pobladores. Arroyo Seca en el sector Viñani estuvo cerca de desbordarse

Fecha	Localización geomorfológica	Localización política	Daños producidos
02/21/2020	Pampa Litoral y Flanco Disectado	Ciudad de Tacna	Cuatro muertos, vehículos enterrados bajo espesas capas de lodo, cientos de casas inundadas al borde del colapso, montones de escombros, saqueos y pánico total dejó la caída de un feroz derrumbe en la ciudad de Tacna, tras la activación de la Quebrada del Diablo a causa de las fuertes lluvias. Los sectores más afectados son La Florida, La Rotonda, San Pedro, Ramón Copaja y Avenida Hipólito Unanue. Se registró una precipitación máxima el 23 de enero de 2020 con 21,8 mm y el 21 de febrero con 18,4 mm, ambas con una duración de 4 horas
01/01/2021	Flanco y cumbre disecionados	Distrito de Ticaco provincia de Tarata	Aproximadamente a las 16:00 horas, producto de las intensas lluvias, se presentó un deslave que afectó la carretera Tarata - Candarave, kilómetro 114, el río Murmuntani, el anexo Challaguaya y zonas de cultivo de pan, en el distrito de Ticaco, provincia de Tarata. Destruyó la recién inaugurada toma de agua de Sibayo
03/02/2022	Flanco y cumbre disecionados	Distrito de Estique provincia de Tarata	Fuertes lluvias que provocaron deslizamiento de tierra afectando viviendas y canales de riego

Referencias

Aguilar, G., Cabré, A., Fredes, V., & Villela, B.
2020. Erosion after an extreme storm event in an arid fluvial system of the southern Atacama Desert: an assessment of the magnitude, return time, and conditioning factors of erosion and debris flow generation. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 20:1247–1265.

Alcayaga, H., Soto-Alvarez, M., Laronne, J. B., Caamaño, D., Mao, L. y Urrutia, R.
2022. Runoff volume and sediment yield from an endorheic watershed generated by rare rainfall events in the Atacama Desert. *Geomorphology* 400.

Analysis in Arid Zones: Application in La Chimba Basin in Antofagasta, Atacama Desert (Chile). *Water* 14:2225.

Araos, F.
2018. Navegando en aguas abiertas: tensiones y agentes en la conservación marina en la Patagonia chilena. *Revista de Estudios Sociales* 64:27–41.

Arenas-Díaz, F., Fuentes, B., Reyers, M., Fiedler, S., Böhm, C., Campos, E., Shao, Y., & Bol, R.
2022. Dust and aerosols in the Atacama Desert. *Earth-Science Reviews* 226.

Azua-Bustos, A., González-Silva, C., & Fairén, A. G.
2022. The Atacama Desert in Northern Chile as an Analog Model of Mars. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* 8.

Binford, M. W., Kolata, A. L., Brenner, M., Janusek, J. W., Seddon, M. T., Abbott, M., & Curtis, J. H.
1997. Climate Variation and the Rise and Fall of an Andean Civilization. *Quaternary Research* 47:235–248.

Böhm, C., Reyers, M., Knarr, L., & Crewell, S.
2021. The Role of Moisture Conveyor Belts for Precipitation in the Atacama Desert. *Geophysical Research Letters* 48.

Broecker, W. S., Peacock, S. L., Walker, S., Weiss, R., Fahrenbach, E., Schroeder, M., Mikolajewicz, U., Heinze, C., Key, R., Peng, T.-H., & Rubin, S.
1998. How much deep water is formed in the Southern Ocean? *Journal of Geophysical Research: Oceans* 103:15833–15843.

Bull, A. T., Andrews, B. A., Dorador, C., & Goodfellow, M.
2018. Introducing the Atacama Desert. *Antonie van Leeuwenhoek* 111:1269–1272.

Cabral, V., Reis, F., Veloso, V., Correa, C., Kuhn, C., & Zarfl, C.
2023. The consequences of debris flows in Brazil: a historical analysis based on recorded events in the last 100 years. *Landslides* 20:511–529.

Cámara de Comercio.
2023. Los estragos de un eventual Fenómeno de El Niño Costero. *Revista Digital*.

- Caramanica, A., Huaman Mesia, L., Morales, C. R., Huckleberry, G., Castillo B., L. J., & Quilter, J.
2020. El Niño resilience farming on the north coast of Peru. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117:24127–24137.
- Carlotto, V., Shady, R., Manosalva, D., Velarde, T., & Pari, W.
2011. *Geología de la Ciudad Sagrada de Caral*. INGEMMET. Boletín, Serie I: Patrimonio y Geoturismo; Nº 5, Lima, Perú.
- Cesta, J. M., & Ward, D. J.
2016. Timing and nature of alluvial fan development along the Chajnantor Plateau, northern Chile. *Geomorphology* 273:412–427.
- Chiu, Y.-Y., Raina, N., & Chen, H.-E.
2021. Evolution of Flood Defense Strategies: Toward Nature-Based Solutions. *Environments* 9:2.
- Clark, G. M. 1
1987. Debris slide and debris flow historical events in the Appalachians south of the glacial border. *Debris Flows/Avalanches*, Editado por J. Costa y G. Wieczorek, pp. 125–138.
- Contreras, S., Landahur, M., García, K., Latorre, C., Reyers, M., Rethemeyer, J., & Jaeschke, A.
2022. Leaf wax composition and distribution of *Tillandsia landbeckii* reflects moisture gradient across the hyperarid Atacama Desert. *Plant Systematics and Evolution* 308:8.
- Couper-Johnston, R.
2000. *El Niño: The Weather Phenomenon That Changed the World*. Hodder & Stoughton.
- Delle Rose, M.
2022. Landscape Modifications Ascribed to El Niño Events in Late Pre-Hispanic Coastal Peru. *Land* 11:2207.
- Den Boer, J., Dieperink, C., & Mukhtarov, F.
2019. Social Learning in Multilevel Flood Risk Governance: Lessons from the Dutch Room for the River Program. *Water* 11:2032.
- Diederich, J. L., Wennrich, V., Bao, R., Büttner, C., Bolten, A., Brill, D., Buske, S., Campos, E., Fernández-Galego, E., Gödicke, P., Ninnemann, L., Reyers, M., Ritter, B., Ritterbach, L., Rolf, C., Scheidt, S., Dunai, T. J., & Melles, M.
2020. A 68 ka precipitation record from the hyperarid core of the Atacama Desert in northern Chile. *Global and Planetary Change* 184:103054.
- Dowling, C. A., & Santi, P. M.
2014. Debris flows and their toll on human life: a global analysis of debris-flow fatalities from 1950 to 2011. *Natural Hazards* 71:203–227.
- Emberson, R., Kirschbaum, D., & Stanley, T.
2021. Global connections between El Niño and landslide impacts. *Nature Communications* 12:2262.
- Espinoza-Molina, J., Acosta-Caipa, K., Chambe-Vega, E., Huayna, G., Pino-Vargas, E., & Abad, J.
2022. Spatiotemporal Analysis of Urban Heat Islands in Relation to Urban Development, in the Vicinity of the Atacama Desert. *Climate* 10:87.
- Fontugne, M., Usselman, P., Lavallée, D., Julien, M., & Hatté, C.
1999. El Niño Variability in the Coastal Desert of Southern Peru during the Mid-Holocene. *Quaternary Research*, 52:171–179.
- Gan, L., Wang, Y., Lin, Z., & Lev, B.
2019. A loss-recovery evaluation tool for debris flow. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 37:101165.
- Garcés, A., Zegers, G., Cabré, A., Aguilar, G., Tamburrino, A., & Montserrat, S.
2022. A modeling methodology to study the tributary-junction alluvial fan connectivity during a debris flow event. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 22:377–393.
- Hadlos, A., Opdyke, A., & Hadigheh, S. A.
2022. Where does local and indigenous knowledge in disaster risk reduction go from here? A systematic literature review. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 79:103160.
- Hewawasam, V., & Matsui, K.
2022. Traditional Water Governance Practices for Flood Mitigation in Ancient Sri Lanka. *Climate* 10:69.
- Ancajima, R.
2024. <https://hidraulicainca.com/acerca-de-hidraulica-inca/uso-ancestral-del-territorio-en-el-per/asi-afrontaban-los-incas-los-fenomenos-naturales-en-el-tahuantinsuyo/>
- GSAGUA,
2024. <https://hidraulicainca.com/acerca-de-hidraulica-inca/infraestructura-ancestral-para-el-desarrollo-uturo-programa-nacional-de-recuperacion-de-los-sistemas-de-andenes-para-el-afianzamiento-hidroico/>
- Hu, Z.-Z., Huang, B., Zhu, J., Kumar, A., & McPhaden, M. J.
2019. On the variety of coastal El Niño events. *Climate Dynamics* 52:7537–7552.
- Huang, Y., Sun, J., & Zhu, C.
2022. Mechanism and Prevention of Debris Flow Disaster. *Water* 14:1143.

- Huertas Vallejos, L.
2001. *Diluvios Andinos : a través de las fuentes Documentales*. Fondo Editorial Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima.
- Hungr, O., Morgan, G. C., & Kellerhals, R.
1984. Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. *Canadian Geotechnical Journal* 21:663–677.
- Izquierdo, T., Abad, M., Gómez, Y., Gallardo, D., & Rodríguez-Vidal, J.
2021. The March 2015 catastrophic flood event and its impacts in the city of Copiapó (southern Atacama Desert). An integrated analysis to mitigate future mudflow derived damages. *Journal of South American Earth Sciences* 105:102975.
- Jadhav, J., Panickal, S., Marathe, S., & Ashok, K.
2015. On the possible cause of distinct El Niño types in the recent decades. *Scientific Reports* 5:17009.
- Jia, M., Li, C., Mao, X., Zhang, D., Wei, C., & Liu, H.
2021. Climate–human–environment interactions in the middle Yangtze Basin (central China) during the middle Holocene, based on pollen and geochemical records from the Sanfangwan Site. *CATENA* 204:105357.
- Kalogeropoulos, K., Tsanakas, K., Stathopoulos, N., Tsesmelis, D. E., & Tsatsaris, A.
2023. Cultural Heritage in the Light of Flood Hazard: The Case of the “Ancient” Olympia, Greece. *Hydrology* 10:61.
- Keefer, D. K., Moseley, M. E., & DeFrance, S. D.
2003. A 38 000-year record of floods and debris flows in the Ilo region of southern Peru and its relation to El Niño events and great earthquakes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 194:41–77.
- Kurilla, L. J., & Fubelli, G.
2022. Global debris flow susceptibility based on a comparative analysis of a single global model versus a continent-by-continent approach. *Natural Hazards* 113:527–546.
- Lashford, C., Lavers, T., Reaney, S., Charlesworth, S., Burgess-Gamble, L., & Dale, J.
2022. Sustainable Catchment-Wide Flood Management: A Review of the Terminology and Application of Sustainable Catchment Flood Management Techniques in the UK. *Water* 14:1204.
- Lavallée, D., Julien, M., Béarez, P., Bolaños, A., Carré, M., Chevalier, A., Delabarde, T., Fontugne, M., Rodríguez-Loredo, C., Klaric, L., Usselman, P., & Vanhaeren, M.
2011. Quebrada de los burros: Los primeros pescadores del litoral pacífico en el extremo sur peruano. *Chungará* 43:333–351.
- Lei, Z., Wu, B., Wu, S., Nie, Y., Cheng, S., & Zhang, C.
2022. A material point-finite element (MPM-FEM) model for simulating three-dimensional soil-structure interactions with the hybrid contact method. *Computers and Geotechnics* 152:105009.
- Loyola, R., Núñez, L., & Cartajena, I.
2019. What’s it like out there? Landscape learning during the early peopling of the highlands of the south-central Atacama desert. *Quaternary International* 533:7–24.
- Machaca-Pillaca, R., Pino-Vargas, E., Ramos-Fernández, L., Quille-Mamani, J., & Torres-Rua, A.
2022. Estimación de la evapotranspiración con fines de riego en tiempo real de un olivar a partir de imágenes de un drone en zonas áridas, caso La Yarada, Tacna, Perú. *Idesia* 40:55–65.
- Maganzani, L.
2023. Rivers and flood risk management in rural areas: some evidence from classical Roman law. *Water History*.
- Manríquez-Tirado, Hermann; Mansilla-Quiñones, Pablo y Moreira-Muñoz, Andrés
2019. Hacia una conservación integrada del paisaje bio-geocultural de Atacama. *Diálogo Andino* 60:141-152.
- Martí, C., Valero, B., & García-Ruiz, J. M.
1997. Large historical debris flows in the central Spanish Pyrenees. *Physics and Chemistry of the Earth* 22:381–385.
- Mercurio, C., Martinello, C., Rotigliano, E., Argueta-Platero, A. A., Reyes-Martínez, M. E., Rivera-Ayala, J. Y., & Conoscenti, C.
2021. Mapping Susceptibility to Debris Flows Triggered by Tropical Storms: A Case Study of the San Vicente Volcano Area (El Salvador, CA). *Earth* 2:66–85.
- Mendonça, Magaly
2017. Monzón Sudamericano: La integración de la circulación amazónica y altiplánica y las variabilidades climáticas del altiplano andino chileno. *Diálogo Andino* 54:21-30.
- Michael H. Glantz.
1996. *Currents of Change: El Niño's Impact on Climate and Society*. Ed. C. University.
- Moreiras, S. M., Sepúlveda, S. A., Correas-González, M., Lauro, C., Vergara, I., Jeanneret, P., Junquera-Torrado, S., Cuevas, J. G., Maldonado, A., Antinao, J. L., & Lara, M.
2021. Debris Flows Occurrence in the Semiarid Central Andes under Climate Change Scenario. *Geosciences* 11:43.
- Narvaez-Montoya, C., Torres-Martínez, J. A., Pino-Vargas, E., Cabrera-Olivera, F., Loge, F. J., & Mahlknecht, J.
2022. Predicting adverse scenarios for a transboundary coastal aquifer system in the Atacama Desert (Peru/Chile). *Science of The Total Environment* 806:150386.

- Ortega, C., Vargas, G., Rojas, M., Rutllant, J. A., Muñoz, P., Lange, C. B., Pantoja, S., Dezileau, L., & Ortlieb, L.
2019. Extreme ENSO-driven torrential rainfalls at the southern edge of the Atacama Desert during the Late Holocene and their projection into the 21th century. *Global and Planetary Change* 175:226–237.
- Ortega, J. C. B., Bendezu, M. A. L., Savio, A. A. Del, & Canales, F. A.
2022. Effect of lithological and geotechnical characteristics on the generation of debris flows in the arid basin of Mirave, Peru. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 17:1–18.
- Ortloff, C. R., & Kolata, A. L.
1993. Climate and Collapse: Agro-Ecological Perspectives on the Decline of the Tiwanaku State. *Journal of Archaeological Science* 20:195–221.
- Pierson, T. C., & Costa, J. E.
1987. Archaeological classification of subaerial sediment-water flows. *Debris Flows/Avalanches*, pp. 1–12.
- Pino-Vargas, E.
2019. *La Hidrología en el tiempo: una Revisión Histórica*. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.
- Pino-Vargas, E., & Chávarri-Velarde, E.
2022. Evidencias de cambio climático en la región hiperárida de la costa sur de Perú, cabecera del desierto de Atacama. *Tecnología y Ciencias Del Agua* 13:333–376.
- Pino-Vargas, E., Chávarri-Velarde, E., Ingol-Blanco, E., Mejía, F., Cruz, A., & Vera, A.
2022. Impacts of Climate Change and Variability on Precipitation and Maximum Flows in Devil's Creek, Tacna, Peru. *Hydrology* 9:10.
- Pino-Vargas, E. M., & Ascencios, D. R.
2022. Sostenibilidad del cultivo de olivo bajo un enfoque climatológico en una región árida, cabecera del desierto de Atacama. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 23:e2652.
- Pino-Vargas, Edwin, & Ascencios-Templo, David.
2021. The implementation the closure as a tool to control the degradation of the coastal aquifer la yarada, Tacna, Perú. *Diálogo Andino* 66:489-496.
- Pino V., Edwin.
2021. Conflicts over the use of water in an arid region: case of Tacna, Peru. *Diálogo Andino* 65:405-415.
- Pino V., E., Ramos F., L., Mejía M., J., Chávarri V., E., & Ascencios T., D.
2020. Medidas de mitigación para el acuífero costero La Yarada, un sistema sobreexplotado en zonas áridas. *Idesia* 38:21–31.
- Pocco, V., Chucuya, S., Huayna, G., Ingol-Blanco, E., & Pino-Vargas, E.
2023. A Multi-Criteria Decision-Making Technique Using Remote Sensors to Evaluate the Potential of Groundwater in the Arid Zone Basin of the Atacama Desert. *Water* 15:1344.
- Puglisi, C., Falconi, L., Lentini, A., Leoni, G., & Prada, C. R.
2013. Debris Flow Risk Assessment in the Aguas Calientes Village (Cusco, Perú). In *Landslide Science and Practice*, pp. 519–526. Springer Berlin Heidelberg.
- Quinn, W. H., Neal, V. T., & Antunez De Mayolo, S. E.
1987. El Niño occurrences over the past four and a half centuries. *Journal of Geophysical Research* 92:14449.
- Reluz, C. G. C., & Carlos Guillermo Carcelén Reluz.
2011. La visión ilustrada de los desastres naturales en Lima durante el siglo xviii. *Cuadernos de Geografía* 20:55–64.
- Rentschler, J., Salhab, M., & Jafino, B. A.
2022. Flood exposure and poverty in 188 countries. *Nature Communications* 13:3527.
- Roldán, F., Salazar, I., González, G., Roldán, W., & Toro, N.
2022. Flow-Type Landslides
- Rodríguez, A.; Alborno, C. y Tapia, A.
2017. Geomorfología del área de Putre, andes del norte de Chile: acción volcánica y climática en su modelado. *Diálogo Andino* 54:7-20.
- Rom, J., Haas, F., Hofmeister, F., Fleischer, F., Altmann, M., Pfeiffer, M., Heckmann, T., & Becht, M.
2023. Analysing the Large-Scale Debris Flow Event in July 2022 in Horlachtal, Austria Using Remote Sensing and Measurement Data. *Geosciences* 13:100.
- Šakic-Trogrlic, R., Duncan, M., Wright, G., van den Homberg, M., Adeloye, A., & Mwale, F.
2022. Why does community-based disaster risk reduction fail to learn from local knowledge? Experiences from Malawi. *International journal of Disaster risk Reduction* 83:103405.
- Santi, P. M., Hewitt, K., VanDine, D. F., & Barillas Cruz, E.
2011. Debris-flow impact, vulnerability, and response. *Natural Hazards* 56:371–402.
- Sarricolea, P.; Meseguer, O. y Romero-Aravena, H.
2017. Tendencias de la precipitación en el norte grande de Chile y su relación con las proyecciones de cambio climático. *Diálogo Andino* 54:41-50.
- Savio, A. A. Del, Astocahuana, S. I. Q., & Navarro, L. F. C.
2019. Numerical Simulation of Debris Flows of the Catastrophic Event of February 2019 in Mirave – Peru. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science* 14:1.

- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI].
2014. *El fenómeno El Niño en el Perú*.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI].
2017. *Informe Técnico El Niño Costero 2017 Condiciones Termoplumiométricas a Nivel Nacional*.
- Sepúlveda, S. A., Rebolledo, S., McPhee, J., Lara, M., Cartes, M., Rubio, E., Silva, D., Correia, N., & Vásquez, J. P.
2014. Catastrophic, rainfall-induced debris flows in Andean villages of Tarapacá, Atacama Desert, Northern Chile. *Landslides* 11:481–491.
- Shang, Y., Yang, Z., Li, L., Liu, D., Liao, Q., & Wang, Y.
2003. A super-large landslide in Tibet in 2000: background, occurrence, disaster, and origin. *Geomorphology* 54:225–243.
- Siman-Tov, S., & Marra, F.
2023. Antecedent rainfall as a critical factor for the triggering of debris flows in arid regions. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 23:1079–1093.
- Sociedad Geográfica de Lima.
1911. *Memoria Anual 1908*.
- Stillwell, H. D.
1992. Natural hazards and disasters in Latin America. *Natural Hazards* 6:131–159.
- Stolle, A., Langer, M., Blöthe, J. H., & Korup, O.
2015. On predicting debris flows in arid mountain belts. *Global and Planetary Change* 126:1–13.
- Tariq, M. A. U. R., Farooq, R., & van de Giesen, N.
2020. A Critical Review of Flood Risk Management and the Selection of Suitable Measures. *Applied Sciences* 10:8752.
- Thouret, J.-C., Ettinger, S., Guitton, M., Santoni, O., Magill, C., Martelli, K., Zuccaro, G., Revilla, V., Charca, J. A., & Arguedas, A.
2014. Assessing physical vulnerability in large cities exposed to flash floods and debris flows: the case of Arequipa (Peru). *Natural Hazards* 73:1771–1815.
- Trenberth, K. E.
1997. The Definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78:2771–2777.
- USAID, O.
2015. *El Niño Oscilación del Sur (ENOS) 2015-16, Región-Latinoamérica y el Caribe*.
- Vargas, G., Ortlieb, L., & Rutllant, J.
2000. Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur. *Revista Geológica de Chile* 27:157–176.
- Vera, A., Pino-Vargas, E., Verma, M. P., Chucuya, S., Chávarri, E., Canales, M., Torres-Martínez, J. A., Mora, A., & Mähknecht, J.
2021. Hydrodynamics, Hydrochemistry, and Stable Isotope Geochemistry to Assess Temporal Behavior of Seawater Intrusion in the La Yarada Aquifer in the Vicinity of Atacama Desert, Tacna, Peru. *Water* 13:3161.
- Vicencio-Veloso, J. M.
2020. Analysis of an extreme precipitation event in the Atacama Desert in January 2020 and its relationship to humidity advection along the Southeast Pacific. *Atmósfera*.
- Wang, W., Yin, Y., Wei, Y., Zhu, S., Li, J., Meng, H., & Zhao, R.
2021. Investigation and characteristic analysis of a high-position rockslide avalanche in Fangshan District, Beijing, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 80:2069–2084.
- Wei, L., Hu, K., & Liu, J.
2021. Quantitative Analysis of the Debris Flow Societal Risk to People Inside Buildings at Different Times: A Case Study of Luomo Village, Sichuan, Southwest China. *Frontiers in Earth Science* 8.
- Williams, A., Santoro, C., Smith, M., & Latorre, C.
2007. El impacto de ENSO en el desierto de Atacama y la zona árida de Australia: análisis exploratorios de series temporales arqueológicas. *Chungará* 40:245–259.
- Winsemius, H. C., Aerts, J. C. J. H., van Beek, L. P. H., Bierkens, M. F. P., Bouwman, A., Jongman, B., Kwadijk, J. C. J., Ligtoet, W., Lucas, P. L., van Vuuren, D. P., & Ward, P. J.
2016. Global drivers of future river flood risk. *Nature Climate Change* 6:381–385.
- Wirmann, D., & Mourguiart, P.
1995. Late Quaternary Spatio-temporal Limnological Variations in the Altiplano of Bolivia and Peru. *Quaternary Research* 43:344–354.
- Yang, Y., Tang, C., Cai, Y., Tang, C., Chen, M., Huang, W., & Liu, C.
2023. Characteristics of Debris Flow Activities at Different Scales after the Disturbance of Strong Earthquakes—A Case Study of the Wenchuan Earthquake-Affected Area. *Water* 15:698.
- Zaginaev, V., Petrakov, D., Erokhin, S., Meleshko, A., Stoffel, M., & Ballesteros-Cánovas, J. A.
2019. Geomorphic control on regional glacier lake outburst flood and debris flow activity over northern Tien Shan. *Global and Planetary Change* 176:50–59.