



Alteración geomorfológica en relación a las acciones antrópicas en el cauce del río Caplina, Tacna, Perú

Geomorphological alteration in relation to anthropic actions in the Caplina riverbed, Tacna, Peru

Alexander Vilcanqui-Alarcón¹; Edwin Pino-Vargas^{1, *}; Juana Vargas-Bernuy²

¹ Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Departamento de Ingeniería Civil. Tacna, Perú.

² Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Departamento de Arquitectura. Tacna, Perú.

ORCID de los autores

A. Vilcanqui: <https://orcid.org/0000-0002-2103-9268>

E. Pino-Vargas: <https://orcid.org/0000-0001-7432-4364>

J. Vargas-Bernuy: <https://orcid.org/0000-0002-4538-2597>

RESUMEN

Los fenómenos naturales son difíciles de controlar y predecir, pero la gestión de riesgos puede prevenir y reducir los riesgos de inundación por desborde del río Caplina. En este trabajo se buscó determinar las alteraciones antrópicas y características geomorfológicas de la cuenca del río Caplina que generan alto riesgo de inundaciones en su trayectoria. Se utilizó información existente respecto a la hidráulica del río de la cuenca Caplina, realizado por el Proyecto Especial Tacna (PET), Autoridad Nacional del Agua (ANA), Autoridad Local de Agua (ALA), Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y el Instituto Geológico Minero Metalúrgico (INGEMMET). Con el trabajo de campo se logró establecer mapas temáticos referidos a zonas de alteración geomorfológica por acción antrópica y cultivos, lo que permitió determinar zonas propensas a desborde e inundación en puntos críticos. Luego de la evaluación realizada en el área de estudio, se determinó que la zona de estudio tiene un nivel de riesgo y vulnerabilidad muy altas.

Palabras clave: alteración geomorfológica; cuenca Caplina; geomorfología; hidrología.

ABSTRACT

Natural phenomena are difficult to control and predict, but risk management can prevent and reduce the risks of flooding due to the overflow of the Caplina River. This work seeks to determine the anthropic alterations and geomorphological characteristics of the Caplina river basin that generate a high risk of flooding in its trajectory. Existing information was used regarding the hydraulics of the Caplina river basin, carried out by the Tacna Special Project (PET), National Water Authority (ANA), Local Water Authority (ALA), National Meteorology and Hydrology Service (SENAMHI) and the Geological Mining Metallurgical Institute (INGEMMET). With field work, it was possible to establish thematic maps referring to areas of geomorphological alteration due to anthropic action and crops, which made it possible to determine areas prone to overflow and flooding at critical points. After the evaluation carried out in the study area, it was determined that the study area has a very high level of risk and vulnerability.

Keywords: geomorphological alteration; Caplina basin; geomorphology; hydrology.

1. Introducción

El sistema fluvial es uno de los principales paisajes morfológicos del mundo (Coker, 2021). La evolución geomorfológica en el desarrollo de los ríos es controlada por la interacción de la actividad tectónica y los cambios climáticos

(Manjare et al., 2020); el análisis morfométrico permite caracterizar la dinámica de las cuencas hidrográficas y los procesos tectónicos responsables del desarrollo de las cuencas hidrográficas y para respaldar la evaluación del riesgo de inundaciones (Psomiadis et al., 2020).

Wigand et al. (2017) menciona que la mayoría de las ciudades enfrentan riesgos de inundaciones de altos a severos, mientras que el 11% tienen riesgos de medianos a altos. Nieto et al. (2019) precisa una importante relación entre el cambio de la cobertura del suelo y el riesgo de inundaciones como un estudio de caso estratégico en el entorno urbano.

Algunas de las determinaciones de inundación más importantes se realizan mediante técnicas geoespaciales con diferentes softwares como ArcGIS 10.2.2, Global Mapper 18 y Surfer 11 (Dhali & Mukhopadhyay, 2020). Los datos de teledetección se integran con el proceso de jerarquía analítica para determinar las zonas sensibles a las inundaciones (Abdel Hamid et al., 2020). Se puede realizar una evaluación basada en SIG de los flujos de entrada de procesos morfológicos e hidrológicos, el modelado de lluvia-escurrentía y las ecuaciones de regresión utilizando sistemas de información geográfica y técnicas de teledetección (Kudnar, 2020). Asimismo, las variables morfológicas y de la cuenca utilizadas en un estudio se pueden derivar de las imágenes de satélite disponibles en Google Earth, modelos digitales de elevación y mapas relevantes (Ghimire, 2020).

Mayta & Mamani (2018), establecen que para desarrollar el modelo hidráulico del río Caplina, se debe considerar el caudal máximo estimado mediante modelos de transformación logarítmica y métodos estadísticos, y el eje hidráulico de la crecida (correspondiente a los períodos de regresión de 25, 50, 100 y 200 años). Luego, la modelización del programa HEC RAS realiza cálculos hidráulicos simulando el caudal de diferentes ciclos de retorno para obtener los resultados de inundaciones y riesgos en el área de estudio (Choque & Mamani, 2020).

El modelado del programa HEC RAS realiza cálculos hidráulicos simulando el flujo de diferentes períodos de retorno para obtener los resultados de inundaciones y riesgos (Santos et al., 2020). Según Tisnado (2013), es importante analizar los eventos extremos y los resultados muestran que el caudal utilizado en el modelo hidráulico debe tener un período de retorno de 50 años y 100 años. La herramienta informática HEC-RAS, permite importar figuras geométricas creadas en GIS y procesar dicha información. Además, el análisis hidrológico se utiliza para calcular los respectivos caudales de los diferentes períodos de retorno (Frisancho, 2015).

Además, la zona de inundación obtenida por el modelo hidráulico del río Caplina define

claramente el punto crítico de inundación (Choque & Mamani, 2020). De igual forma es importante determinar el caudal máximo para definir la zona marginal del río Caplina en la zona de Río Seco, para un tiempo de retorno TR = 100 años, el caudal máximo líquido es de 91,30 m³/s (Santos et al., 2021).

La evaluación del riesgo de inundación del río Caplina-Uchusuma en el noreste y sureste es moderada, mientras que la población al sur de la ciudad, en la localidad de Gregario Albarracín Lanchipa se siente en riesgo de inundación. La ciudad de Tacna cercado, presenta el riesgo más bajo (Pastrana, 2011).

En este sentido, es importante realizar un trabajo de investigación de acuerdo con las características climáticas de la región (Mairech et al., 2021), ciertas ciudades, sectores y áreas rurales de la región pueden experimentar inundaciones, y su impacto puede agravarse gradualmente, su impacto negativo genera pérdidas de vidas humanas y afecta la economía (Krausmann et al., 2017). Sin embargo, debido a la falta de experiencia y los modelos de predicción de inundaciones existentes, todavía existen problemas con la predicción precisa de inundaciones (Hashim et al., 2019).

Los ríos y las llanuras aluviales son naturalmente dinámicos y complejos, y su forma y función están directamente relacionadas con el flujo (Vietz & Finlayson, 2017). Las actividades en la cuenca o en el río tienen implicaciones importantes aguas abajo para la geomorfología del río (Carabella et al., 2020), los sistemas geomórficos son muy sensibles a los cambios en el flujo y ocurren en un rango de escalas de tiempo y espacio específicos (Giano, 2021); asimismo estos cambios geomórficos tienen implicaciones importantes para la biota y los ecosistemas (Wang et al., 2020). Las modificaciones antropogénicas influyen en los paisajes de los ríos en múltiples escalas, lo que afecta los regímenes de flujo de los ríos y, por lo tanto, la producción de Servicios Ecosistémicos de los ríos (Ekka et al., 2020).

El objetivo de este estudio es determinar las alteraciones y características geomorfológicas por acciones antrópicas en el río Caplina que generan riesgo de inundación en las poblaciones aledañas a su ribera.

2. Material y métodos

Descripción del área de estudio

La zona de estudio se encuentra emplazada en la región Tacna (Figura 1), ubicada en cabecera del

desierto de Atacama, se encuentra en el extremo sur de Perú y norte de Chile. En esta región, la disponibilidad de agua para cubrir las demandas para uso poblacional y agrícola son cada vez más escasas (Garreaud et al., 2003; Garreaud et al., 2010; Houston & Hartley, 2003; Sidahmed, 2017); pero a su vez las últimas décadas se vienen presentando eventos extremos que han generado cambios sustantivos en el régimen hidrológico de ellos ríos en esta región Chile (Pino-Vargas, 2019a; Pino-Vargas et al., 2019b; Pino, 2021; Pino, 2019a, 2019b; Pino et al., 2017, 2018, 2019, 2020).

Asimismo, es notable la complejidad geomorfológica e hidrológica de las corrientes fluviales que drenan los relieves del sistema hídrico de la cuenca Caplina (Pino et al., 2017), en este sentido, existe un encauzamiento ubicado en la carretera Calana-Pachia que desvía el río hacia el margen izquierdo mediante diques longitudinales. Este dique es llamado Defensa de Calana, conformando una sección compuesta hasta el puente ubicado en la carretera Tacna-Pachia, donde existe un estrechamiento de la sección, lo que en épocas de avenidas genera desborde e inundación.

Técnicas geoespaciales

Se emplearon técnicas geoespaciales, realizando la observación de las imágenes satelitales RGB, para la búsqueda visual de huellas máxima de inundación. Nos basamos en información de plataformas libres, que se encuentran disponibles

en la web, como es el Google Earth Engine, la cual combina un catálogo de varios petabytes de imágenes satelitales y conjuntos de datos geoespaciales con capacidades de análisis a escala planetaria y lo pone a disposición de científicos, investigadores y desarrolladores para detectar cambios, mapear tendencias y cuantificar diferencias en la superficie de la Tierra.

Modelos hidrológicos e hidráulicos

Según Vilcanqui (2016), en campo se obtuvo la información necesaria para determinar los parámetros hidráulicos requeridos para el modelado hidráulico del río Caplina; una vez construido el modelo, este permitió predecir el caudal del río Caplina en un punto de interés. Los resultados de estos modelos hidráulicos nos permiten correlacionar estos eventos con los lugares donde se localizaron las huellas visuales de máxima inundación. De esta forma, se procede a establecer las zonas de riesgo y evaluar su vulnerabilidad.

Determinación de riesgo

La gestión de desastres es sinónimo de prevención y atención de los mismos, además de brindar todos los pasos necesarios para que las personas afectadas recuperen sus niveles funcionales luego de haber sido afectadas. Metodológicamente, los términos básicos para determinar el riesgo son: (1) Identificación del peligro, (2) Análisis de la vulnerabilidad y (3) Estimación (cálculo) del riesgo.



Figura 1. Ubicación de la zona de estudio, cuenca Caplina, región Tacna, Perú.

Conceptualmente el peligro es la posibilidad de que un fenómeno natural o provocado por el hombre potencialmente desfavorable de un tamaño determinado ocurra en un área o ubicación conocida, que puede perjudicar pérdidas humanas, pérdidas materiales y pérdidas ambientales. En este sentido procedimos a establecer el nivel de vulnerabilidad, peligro y riesgo en los puntos identificados, obteniendo los siguientes resultados.

3. Resultados y discusión

Las precipitaciones anómalas

Las anomalías de precipitación, presentan una incertidumbre tan grande que no es posible asegurar que los cambios proyectados, hasta finales del siglo XXI, sean atribuibles al cambio climático, debemos precisar que una fracción puede ser parte de la variabilidad natural del sistema (Meseguer-Ruiz et al., 2020). Los cambios que ocurren en las escalas de tiempo interanual y decenal se superponen a una disminución de la precipitación a largo plazo durante el siglo XX (Pfeiffer et al., 2021).

Las inundaciones repentinas han aumentado en varias regiones del mundo, debido a las condiciones geográficas y al cambio climático como lluvias intensas y altas temperaturas (Abdel Hamid et al., 2020). En el caso de la cuenca Caplina, se trata de lluvias generadas en la vertiente del Pacífico, por una anomalía de temperatura en el agua de mar, en los meses de

verano; esto genera lluvias de corta duración, pero muy intensas en la zona baja de la cuenca Caplina, lo que viene ocasionando huaycos con alta tasa de erosión y transporte de sedimentos incrementando su capacidad destructiva.

Estudios recientes sobre la climatología tropical de América del Sur y especialmente el Altiplano (Figura 2), han contribuido en gran medida a una comprensión más profunda de la variabilidad de la precipitación y sus causas en el desierto de Atacama (Rech et al., 2010). Se registra variación de precipitación en el espacio y el tiempo conduciendo a un complejo sistema hidroclimático con varias implicaciones, inundaciones de aguas superficiales en verano asociadas con La Niña e inundaciones de aguas superficiales que ocurren en invierno a lo largo del desierto asociado con El Niño (Manz et al., 2016); en julio, las regiones grandes a lo largo de la costa peruana y en los Andes centrales son muy secas (<10 mm).

Respecto a las anomalías presentadas en la región de estudio, la ciudad de Tacna, ubicada al sur de Perú y frontera con Chile, región emplazada en la cabecera del Desierto de Atacama, en el verano 2020, se suscitaron dos eventos importantes de precipitación, según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y datos de la estación climática automática ubicada en el campus de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

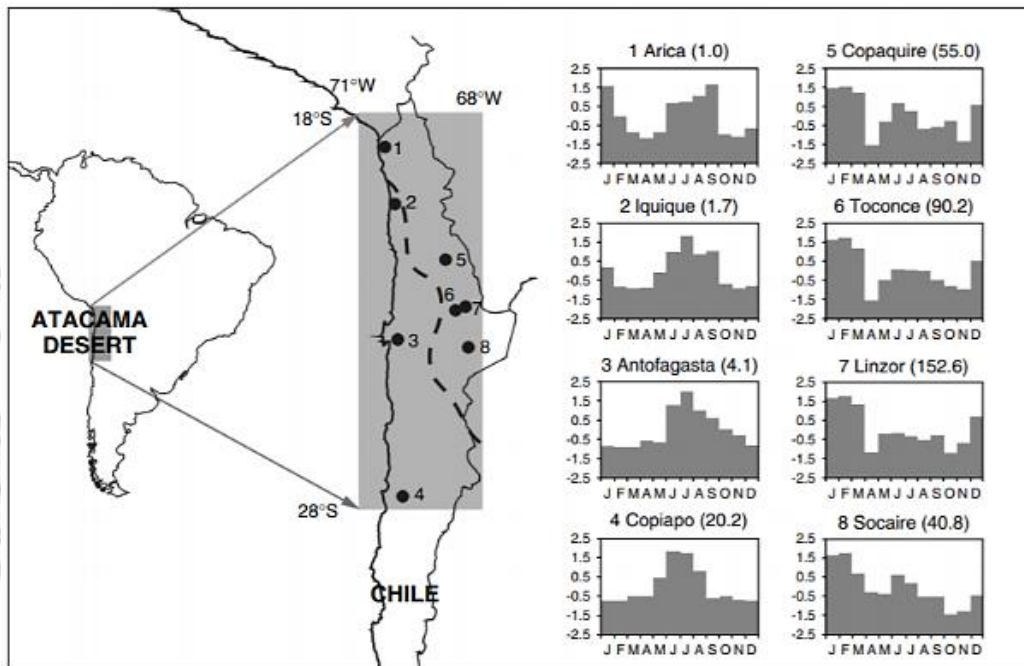


Figura 2. Mapa de ubicación del norte de Chile con hietogramas de frecuencia mensual de lluvias para cuatro estaciones costeras (Manz et al., 2016).

Estos eventos registraron valores de intensidad de precipitación máxima el día 23 de enero 2020 con 10.4 mm/hr y el día 21 de febrero con 16.8 mm/hr (Figura 3), lo que ha provocado flujo tipo aluvión en las quebradas Caramolle y El Diablo, en esta última con pérdidas de tres vidas humanas. El evento del 21 de febrero fue el que genero un aluvión que cobro la pérdida de 3 vidas

humanas y grandes pérdidas económicas en la ciudad. Estas precipitaciones, y los huaycos generados registran un período de retorno de 90 años, en función a lo documentado por Fortunato Zora Carbajal en su libro Tacna, Historia y Folklore, quien describe un huayco en la quebrada del diablo en el verano del año 1927.

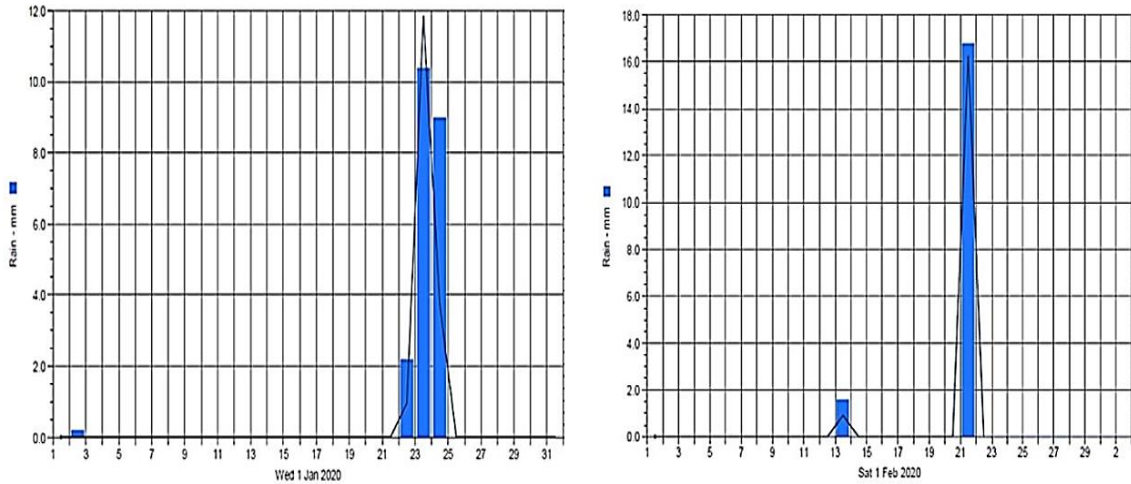


Figura 3. Precipitación registrada el 23 de enero y 21 de febrero 2020, en la ciudad de Tacna y cercanías.

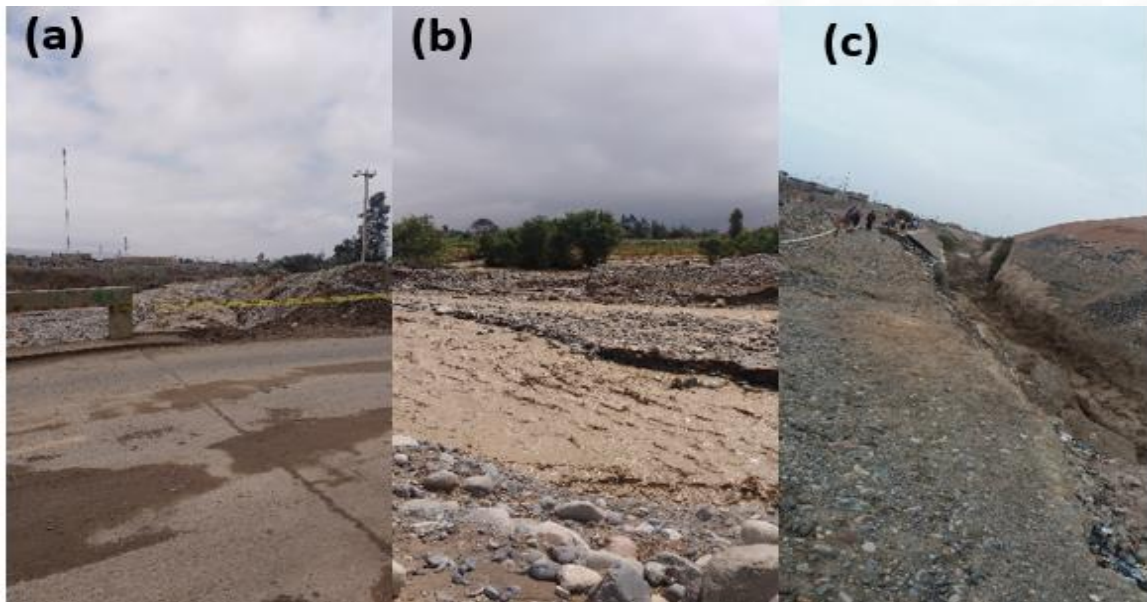


Figura 4. Alteraciones geomorfológicas en cauces, (a) alteraciones geomorfológicos longitudinal puente, (b) alteración en los caudales flujos sedimentarios, (c) Alteración defensas ribereñas.

Alteraciones geomorfológicas

En la Figura 4, se muestran las alteraciones geomorfológicas en los cauces, identificadas en la zona de estudio; alteraciones longitudinales en puentes, donde la geometría dominante es la dimensión lineal, paralela al cauce y normal a la estructura del puente, la alteración en los caudales flujos sedimentarios, carga de material detrítico que corresponde a las características del

flujo y alteración de defensas ribereñas, que son seriamente afectadas por la acción de los huaycos.

Según Pino et al. (2017), a nivel regional, el área de estudio se ubica geomorfológicamente en tres unidades morfoestructurales tales como la Cordillera Occidental, Puna y Flanco disectado de los Andes. La Cordillera Occidental es la unidad geomorfológica más alta y contiene numerosos

eventos volcánicos y delimita la cuenca Caplina con la cuenca Maure. En la [Figura 5](#), se muestra el mapa geomorfológico local de la cuenca Caplina, se identifica las unidades geomorfológicas,

Cordillera occidental, Puna, Flanco Disectado de los Andes, Pampa Costanera, Cordillera de la Costa y Valle.

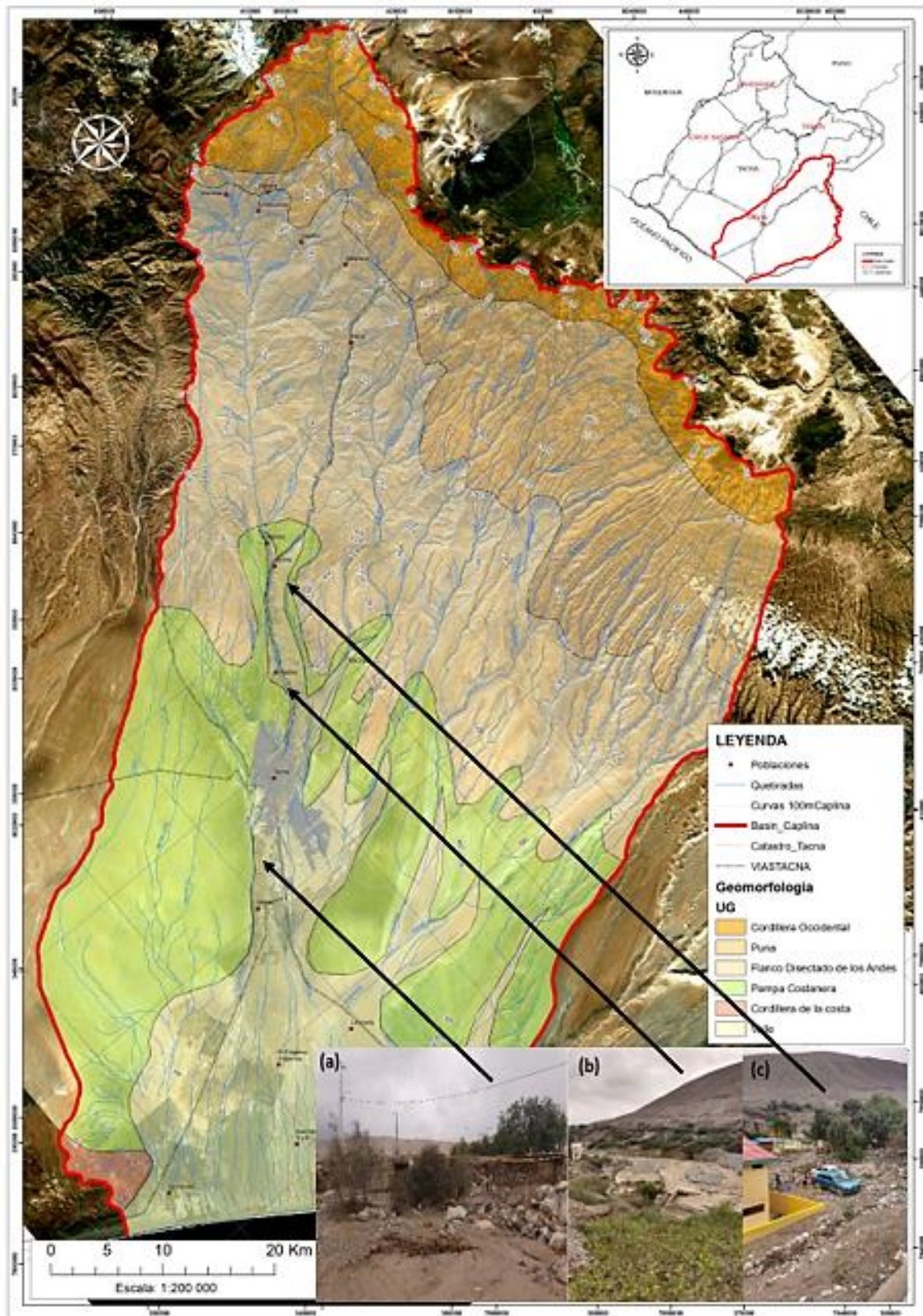


Figura 5. Mapa geomorfológico de la zona de estudio, se identifica las unidades geomorfológicas, Cordillera occidental, Puna, Flanco Disectado de los Andes, Pampa Costanera, Cordillera de la Costa y Valle.

Características de los flujos superficiales

Los cauces en la zona de estudio controlan los flujos de agua, sedimentos y nutrientes del entorno, y a partir de ellos se establecen los gradientes de humedad y temperatura que influyen en las características y utilización de los terrenos adyacentes. Con cierta periodicidad la población e infraestructura ribereña sufre los embates de las crecidas del río Caplina y sus tributarios, debido a su irregular comportamiento, especialmente en cuanto a su dinámica torrencial que se caracteriza por avenidas súbitas y violentas debido a eventos de altas precipitaciones y una alta capacidad de acarreo y arrastre de materiales; mientras existen problemas para interpretar la naturaleza y magnitud de las condicionantes geológicas y geomorfológicas en la disposición de las cuencas fluviales y sus redes de drenaje.

A pesar de la problemática de escasez hídrica que existe en la cuenca Caplina, la alteración geomorfología en esta cuenca, las incertidumbres e interrogantes no resueltas en el ámbito hidrológico y su efecto en la alteración geomorfología son aún más importantes. Estos eventos los podemos asociar a las características de cambio climático que esta región se va

haciendo evidentes en las últimas décadas. Es así que, en el verano del 2020, aparecen evidencias de cambio climático en esta región, lluvias inusuales de alta intensidad en la parte media y baja de la cuenca Caplina y posteriormente vegetación de los cerros donde al menos en los últimos 90 años no se han visualizado (Figura 6).

Zonas de riesgo

Respecto a las zonas de riesgo, se identificaron potencialmente cinco lugares en la provincia de Tacna (Figura 7); Bocatoma Calientes y bocatoma Challata (Pachia), quebrada Caramolle (Cuidad Nueva), quebrada El diablo (alto de la alianza), sector rio seco (Gregorio Albarracín Lanchipa) y quebrada Viñani (Viñani).

Con la información cartográfica generada, procedimos a evaluar el riesgo; siendo este un conjunto de conocimientos, medidas, acciones y procedimientos, sumados al uso racional de la mano de obra y los recursos materiales, orientados a planificar planes y actividades para evitar o reducir el impacto de los desastres. En la Tabla 1 se muestran los valores de peligrosidad y en la Tabla 2 el nivel de vulnerabilidad para la evaluación realizada.

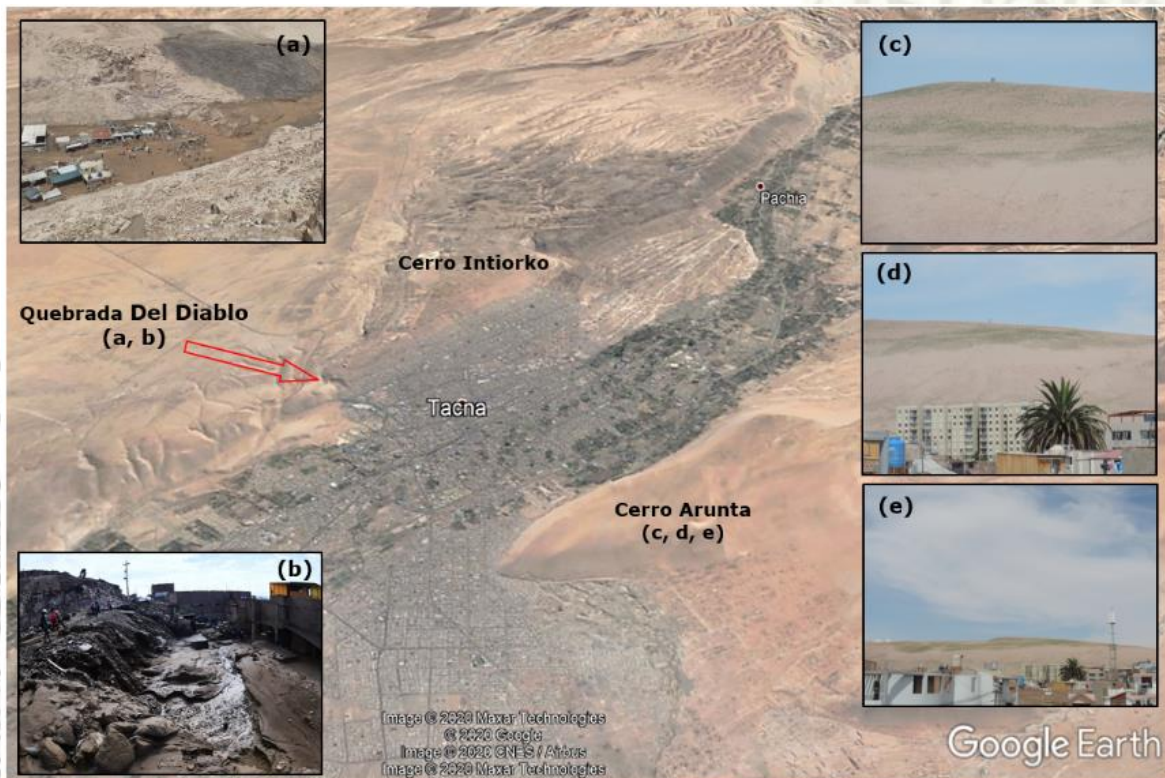


Figura 6. Se registra aluvión margen derecha en la quebrada del Diablo (a, b) y desarrollo de vegetación en la margen izquierda Cerro Arunta (c, d, e), febrero, marzo 2020.

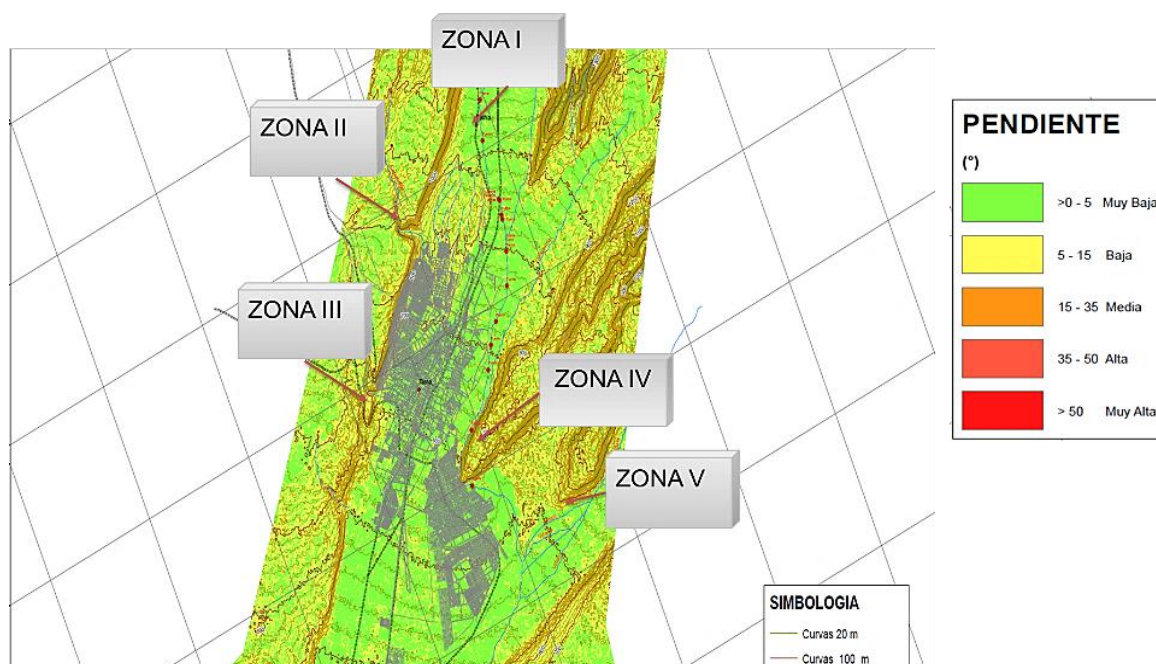


Figura 7. Identificación de las cinco zonas vulnerables en la cuenca del río Caplina.

Tabla 1

Valores para niveles de peligrosidad según las características físicas (CENEPRED, 2016)

ESTRATO/ NIVEL	DESCRIPCION O CARACTERISTICAS	VALOR
PB (Peligro Bajo)	Terrenos planos o con poca pendiente, roca y suelo compacto y seco, con alta capacidad portante. Terrenos altos no inundables, alejados de barrancos o cerros deleznales. No amenazados por peligros, como actividad volcánica, maremotos, etc. Distancia mayor a 500 m. desde el lugar del peligro tecnológico.	1 < de 25%
PM (Peligro Medio)	Suelo de calidad intermedia, con aceleraciones sísmicas moderadas. Inundaciones muy esporádicas, con bajo tirante y velocidad. De 300 a 500 m. desde el lugar del peligro tecnológico.	2 De 26% a 50%
PA (Peligro Alto)	Sectores donde se esperan altas aceleraciones sísmicas por sus características geotécnicas. Sectores que son inundados a baja velocidad y permanecen bajo agua por varios días. Ocurrencia parcial de la licuación y suelos expansivos. De 150 a 300 m. desde el lugar del peligro tecnológico	3 De 51% a 75%°
PMA (Peligro Muy Alto)	Sectores amenazados por alud- avalanchas y flujos repentinos de piedra y lodo ("lloclla"). Áreas amenazadas por flujos piroclásticos o lava. Fondos de quebrada que nacen de la cumbre de volcanes activos y sus zonas de deposición afectables por flujos de lodo. Sectores amenazados por deslizamientos o inundaciones a gran velocidad, con gran fuerza hidrodinámica y poder erosivo. Sectores amenazados por otros peligros: maremoto, heladas, etc. Suelos con alta probabilidad de ocurrencia de licuación generalizada o suelos colapsables en grandes proporciones. Menor de 150 m. desde el lugar del peligro tecnológico	4 De 76% a 100%

Bocatomas Calientes y Challata

En la Figura 8 se muestran diferentes vistas, de las zonas aledañas a las bocatomas Calientes y Challata. Esta zona ha sido afectada en varias oportunidades por desbordes e inundación del río Caplina. Considerando los parámetros dados por CENEPRED (2016), el nivel de vulnerabilidad según los diferentes tipos de descriptores: am-

biental y ecológica, física, económica, social, educativa, cultural e ideológica, política e institucional, científica y técnica. Para la Bocatoma Calientes se calculó un valor ponderado de 87,50%, que indica un nivel de vulnerabilidad muy alta. En el caso de la bocatoma Challata la evaluación de nivel de vulnerabilidad arrojó 87,24%, denotando también un nivel muy alto.

Tabla 2

Valores nivel de vulnerabilidad para niveles bajo, medio, alto y muy alto según condiciones y composiciones (CENEPRED, 2016)

VARIABLE	NIVEL DE VULNERABILIDAD			
	VB < 25 %	VM 26 a 50 %	VA 51 a 75 %	VMA 76 a 100 %
Condiciones Atmosféricas	Niveles de temperatura al promedio normales	Niveles de temperatura ligeramente superior al promedio normal	Niveles de temperatura superiores al promedio normal	Niveles de temperatura superiores estables al promedio normal
Composición y calidad del aire y el agua	Sin ningún grado de contaminación	Con un nivel moderado de contaminación	Alto grado de contaminación	Nivel de contaminación no apto
Condiciones Ecológicas	Conservación de los recursos naturales, crecimiento poblacional planificado, no se practica la deforestación y contaminación	Nivel moderado de explotación de los recursos naturales; ligero crecimiento de la población y del nivel de contaminación	Alto nivel de explotación de los recursos naturales, incremento de la población y del nivel de contaminación.	Explotación indiscriminada de recursos naturales incrementa, la población fuera de la planificación, deforestación y contaminación



Figura 8. Alteraciones geomorfológicas en el cauce, (a) frecuencia alteraciones en los procesos geomorfológicos longitudinales, (b) las llanuras de inundación son alterado por infraestructuras, (c) alteraciones hidrológicas, (d) alteraciones geomorfológicas.

Quebrada Caramolle

La segunda zona de importancia por su vulnerabilidad es la quebrada Caramolle (Figura 9), afectando las asociaciones de vivienda La Unión, Nueva Barranquilla, 28 de agosto, Alto Berlín, 2 de febrero, Ampliación Nueva Ciudad y Pequeños industriales. En esta quebrada se realizó la evaluación de riesgo, obteniéndose un valor de 90,89%, lo que indica un nivel de vulnerabilidad muy alta.

Quebrada El Diablo

La tercera zona vulnerable es la quebrada El Diablo (Figura 10), afecta a las asociaciones de

vivienda La Florida, Virgen de Asunta y Ramón Copaja, en este sentido, realizamos la evaluación de riesgo resultando un valor de 86.98%, que representa al igual que las anteriores una vulnerabilidad muy alta. Este es uno de los puntos críticos de mayor trascendencia, afectó a pobladores de los sectores La Florida, El Mirador y San Pedro, en este sector ocurrió el huaico del 21 de febrero 2020, que dejó como saldo tres personas fallecidas y cuantiosos daños materiales, esto a razón del evento ocurrido en el verano del año 2020, al presentarse eventos extremos de precipitación que activaron la quebrada de El Diablo, sus descargas crecieron súbitamente.

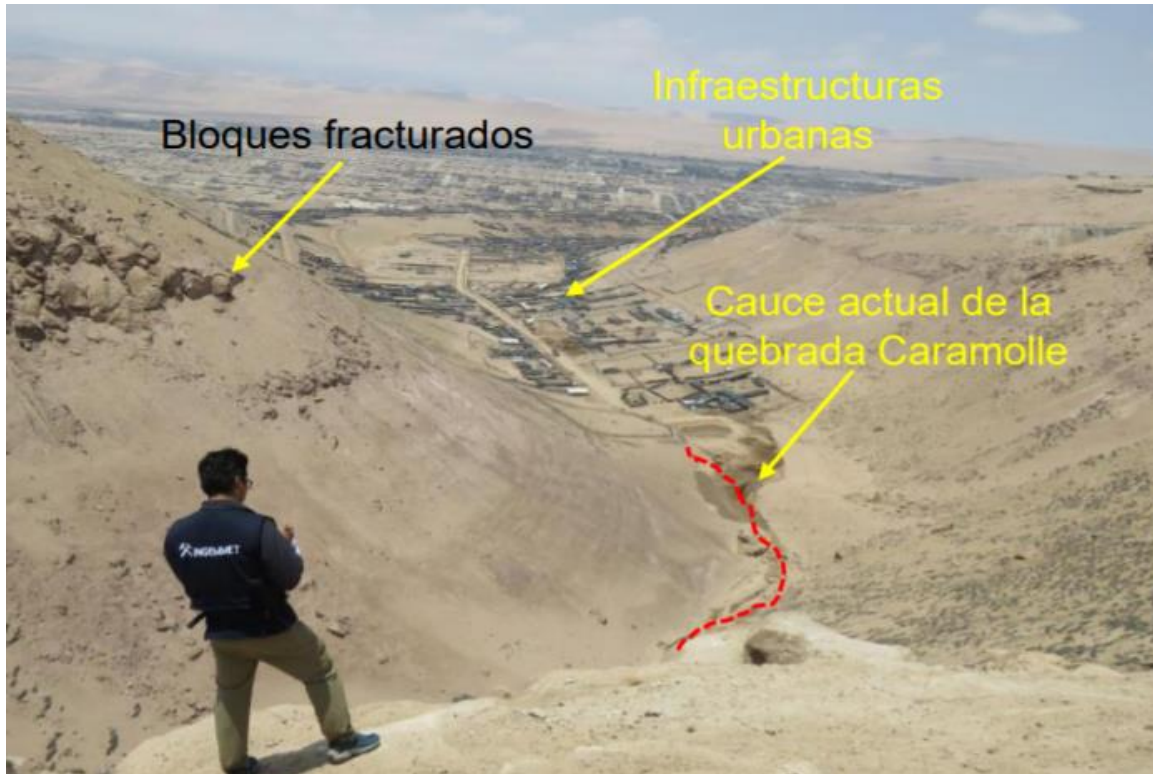


Figura 9. Efecto del huayco ocurrido en febrero 2020 en la quebrada Caramolle (INGEMMET, 2020).



Figura 10. Efecto del huayco ocurrido en febrero 2020 en la quebrada El Diablo, en el sector La Florida.

Río Seco

La cuarta zona vulnerable es en el distrito Gregorio Albarracín Lanchipa, afectando a las asociaciones Los Sauces, Morro 1 y Alfonso Ugarte Etapa II, de la misma manera, se realizó la evaluación de riesgo, obteniéndose un nivel de vulnerabilidad de 94,27%, catalogado como muy alto (Figura 11).

Sector Viñani

La quinta zona vulnerable esta en el distrito Gregorio Albarracín Lanchipa (Viñani) (Figura 12), esta zona ha sido afectada por invasiones informales para crianza de cerdos al interior del cauce de la quebrada. Se realizó la evaluación de riesgo y se obtuvo un nivel de vulnerabilidad de 91,67%, el que representa un valor muy alto.



Figura 11. Puente sobre el río Seco, se observa acumulación de material.

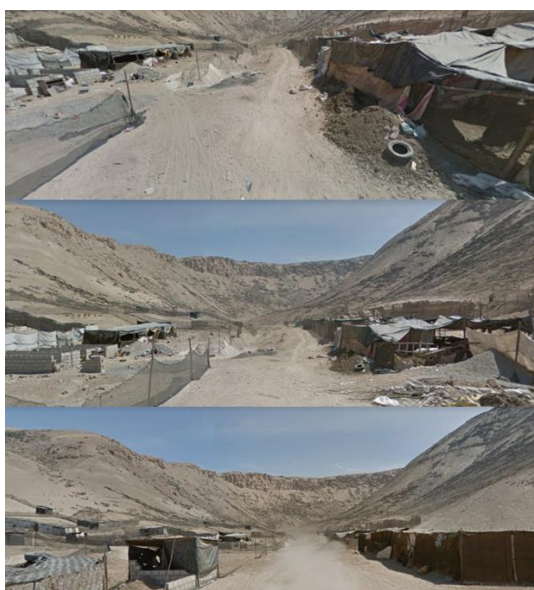


Figura 12. Imágenes de la quebrada Viñani, se visualiza criaderos de cerdo en el cauce de la quebrada.

4. Conclusiones

Los fenómenos naturales son difíciles de controlar y predecir, pero la gestión de riesgos puede prevenir y reducir los riesgos de inundación por desborde del río Caplina. Frente a estos desastres naturales provocados por inundación, la vulnerabilidad se puede reducir porque sus habitantes son conscientes de los riesgos que corren y tienden a implementar planes de emergencia para prevenirlos. Una herramienta importante en estos tiempos es el uso de sistemas de alerta temprana basados en comunicación en tiempo real de los eventos extraordinarios que se presentan respecto a las lluvias extremas. Se basa en el uso de técnicas de transformación precipitación escorrentía, implementadas por ejemplo en el modelo HEC-HMS como uno de los más utilizados a nivel mundial.

Para el área de estudio, en base a las alteraciones geomorfológicas y su relación con las acciones antrópicas en el cauce del río Caplina, se tiene un nivel de riesgo y vulnerabilidad muy alto. Evidencias de esto podemos encontrar en el cambio climático; pues este es un potenciador peligroso que genera anomalías en la precipitación en la zona media y baja de las cuencas costeras al sur del país, en este caso la cuenca Caplina, límite con Chile y a su vez cabecera del desierto de Atacama. Esta situación hace que ocurran eventos extraordinarios de precipitación como del verano de 1927, citado por Fortunato Zora Carbajal, en su libro Tacna Historia y Folklore; asimismo el evento de febrero de 2020, es el más reciente y fue el elemento que activo las quebradas Caramolle y El Diablo, con la consecuente pérdida de vidas humanas, lo que hace que el peligro sea muy alto. Según estos eventos registrados, se evidencia que la recurrencia de estos eventos marca un periodo de retorno de 90 años.

Identificadas las alteraciones geomorfológicas en relación a las acciones antrópicas en el cauce del río Caplina, se debe plantear un modelo de gestión de riesgo por inundación, el cual debe implementarse para salvaguardar la vida de la población, así como la preservación del patrimonio económico ante la ocurrencia de peligros naturales. En este sentido, se debe establecer a futuro un proyecto sobre sistemas de alerta temprana y programas de limpieza y conservación de causes.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann (Tacna, Perú) por facilitar información generada en el marco del proyecto de investigación "Estudio de riesgo y alternativas de protección de la población en la zona de influencia de la quebrada del Diablo, Tacna, Perú" financiado con fondos de canon y sobre canon minero.

Referencias bibliográficas

- Abdel Hamid, H. T., Wenlong, W., & Qiaomin, L. (2020). Environmental sensitivity of flash flood hazard using geospatial techniques. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 6(1), 31–46.
- Carabella, C., Buccolini, M., Galli, L., Miccadei, E., Paglia, G., & Piacentini, T. (2020). Geomorphological analysis of drainage changes in the NE Apennines piedmont area: the case of the middle Tavo River bend (Abruzzo, Central Italy). *Journal of Maps* 16(2), 222–235.
- Choque, R., & Mamani, D. (2020). Modelamiento hidráulico con fines de delimitación de fajas marginales del río Caplina en los distritos de Pachia – Calana. *Universidad Privada de Tacna*, 0(0), 134–135.
- Coker, P. (2021). Book Review: Fundamentals of biogeography. *Progress in Physical Geography. Earth and Environment*, 23(3), 453–454.
- Dhali, M. K., & Mukhopadhyay, S. (2020). Formation, Migration, and Morphodynamic Alteration of 50 Channel Bars in Darjeeling

- Himalayan Piedmont Zone, India. *Air, Soil and Water Research* 13.
- Ekka, A., Pande, S., Jiang, Y., & Zaag, P. van der. (2020). Anthropogenic Modifications and River Ecosystem Services. *Landscape Perspective. Water*, 12(10), 2706.
- Frisancho, F. L. (2015). Análisis de vulnerabilidad mediante modelamiento hidrodinámico del cauce del río seco del Cono Sur de la ciudad de Tacna (Tesis de maestría). *Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann*.
- Garreaud, R. D., Molina, A., & Farias, M. (2010). Andean uplift, ocean cooling and Atacama hyperaridity: A climate modeling perspective. *Earth and Planetary Science Letters*, 292(1–2), 39–50.
- Garreaud, R., Vuille, M., & Clement, A. C. (2003). The climate of the Altiplano: Observed current conditions and mechanisms of past changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 194(1–3), 5–22.
- Ghimire, M. L. (2020). Basin characteristics, river morphology, and process in the Chure-Terai landscape. *Geographical Journal of Nepal*, 13, 107–142.
- Giano, S. I. (2021). Fluvial Geomorphology and River Management. *Water* 2021, 13(11), 1608.
- Hashim, B. M., Sultan, M. A., Attyia, M. N., Al Maliki, A. A., & Al-Ansari, N. (2019). Change detection and impact of climate changes to Iraqi southern marshes using Landsat 2 MSS, Landsat 8 OLI and Sentinel 2 MSI data and GIS applications. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(10), 1-14.
- Houston, J., & Hartley, A. J. (2003). The central andean west-slope rainshadow and its potential contribution to the origin of hyperaridity in the Atacama Desert. *International Journal of Climatology*, 23(12), 1453–1464.
- Krausmann, F., Wiedenhofer, D., Lauk, C., Haas, W., Tanikawa, H., et al. (2017). Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(8), 1880–1885.
- Kudnar, N. S. (2020). GIS-based assessment of morphological and hydrological parameters of Wainganga River Basin, Central India. *Modeling Earth Systems and Environment* 2020 6(3), 1933–1950.
- Mairech, H., López-Bernal, Á., Moriondo, M., Dibari, C., Regni, L., Proietti, P., Villalobos, F. J., & Testi, L. (2021). Sustainability of olive growing in the Mediterranean area under future climate scenarios: Exploring the effects of intensification and deficit irrigation. *European Journal of Agronomy*, 129, 126319.
- Manjare, B. S., Singh, V., & Masurkar, S. P. (2020). Tectonic control on drainage network evolution and evidence of neotectonic activities in of the Wan River sub-basin, Central India. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 597(1), 012022.
- Manz, B., Buytaert, W., Zulkafli, Z., Lavado, W., Willems, B., Robles, L. A., & Rodríguez-Sánchez, J.-P. (2016). High-resolution satellite-gauge merged precipitation climatologies of the Tropical Andes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(3), 1190-1207.
- Mayta, C., & Mamani, E. (2018). Modelación Hidráulica de la Defensa de Calana con el Fin de Determinar la Vulnerabilidad ante Máximas Avenidas (Tesis de pregrado). *Universidad Privada de Tacna*.
- Meseguer-Ruiz, O., Ponce-Philimon, P. I., Baltazar, A., Gujjarro, J. A., Serrano-Notivolí, R., et al. (2020). Synoptic attributions of extreme precipitation in the Atacama Desert (Chile). *Climate Dynamics*, 55(11–12), 3431-3444.
- Nieto, H., Kustas, W. P., Torres-Rúa, A., Alfieri, J. G., Gao, F., et al. (2019). Evaluation of TSEB turbulent fluxes using different methods for the retrieval of soil and canopy component temperatures from UAV thermal and multispectral imagery. *Irrigation Science*, 37(3), 389-406.
- Pastrana, S. F. (2011). Valoración del riesgo de inundación del río Caplina-Uchusuma, y percepción del peligro de la población del distrito Gregorio Albarracín Lanchipa, 2010 (Tesis de maestría). *Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann*.
- Pfeiffer, M., Morgan, A., Heimsath, A., Jordan, T., Howard, A., & Amundson, R. (2021). Century scale rainfall in the absolute Atacama Desert: Landscape response and implications for past and future rainfall. *Quaternary Science Reviews*, 254, 106797.
- Pino-Vargas, E. (2019a). Seguridad hídrica en el acuífero costero La Yarada: desafíos actuales y futuros. *Agroindustrial Science*, 9(2), 219–225.
- Pino-Vargas, E., Montalván-Díaz, I., & Avendaño-Jihuallanga, C. (2019b). La disponibilidad hídrica futura en los ecosistemas de zonas áridas en el Sur de Perú y Norte de Chile. *Agroindustrial Science*, 9(2), 173–178.
- Pino, E., Tacora, P., Steenken, A., Alfaro, L., Valle, A., et al. (2017). Effect of environmental and geological characteristics on water quality in the Caplina river basin, Tacna, Peru. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 8(6), 77-99.
- Pino, E. (2021). Conflicts over the use of water in an arid region: case of Tacna, Peru. *Diálogo Andino*, 65(2021), 406–415.
- Pino, V., E. (2019a). Drones a tool for efficient agriculture: a high-tech future. *Idesia (Arica)*, 37(1), 75–84.
- Pino, V., E. (2019b). El acuífero costero La Yarada, después de 100 años de explotación como sustento de una agricultura en zonas áridas: una revisión histórica. *Idesia (Arica)*, 37(3), 39–45.
- Pino, V., E., Chávarri V., E., & Ramos F., L. (2018). Governability and governance crisis its implications in the inadequate use of groundwater, case coastal aquifer of La Yarada, Tacna, Perú. *Idesia (Arica)*, 36(3), 77–85.
- Pino, V., E., Montalván D., I., Vera M., A., & Ramos F. L. (2019). La conductancia estomática y su relación con la temperatura foliar y humedad del suelo en el cultivo del olivo (*Olea europaea* L.), en periodo de maduración de frutos, en zonas áridas. La Yarada, Tacna, Perú. *Idesia (Arica)*, 37(4), 55–64.
- 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 (Arica)*, 38(3), 21–31.
- Pino, V., E., Ramos Fernández, L., Avalos, O., Tacora, P., Chavarri, E., Angulo, O., Ascencios Templo, D. R., & Mejía, J. (2019). Factores que inciden en el agotamiento y la contaminación por intrusión marina en el acuífero costero de La Yarada, Tacna, Perú. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 10(5), 177–213.
- Pino, V., E., Tacora, P., Steenken, A., Alfaro, L., Valle, A., Chavarri, E., Ascencios Templo, D. R., & Mejía, J. (2017). Efecto de las características ambientales y geológicas sobre la calidad del agua en la cuenca del río Caplina, Tacna, Perú. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 8(6), 77–99.
- Psomiadis, E., Charizopoulos, N., Soulis, K. X., & Efthimiou, N. (2020). Investigating the Correlation of Tectonic and Morphometric Characteristics with the Hydrological Response in a Greek River Catchment Using Earth Observation and Geospatial Analysis Techniques. *Geosciences* 2020, 10(9), 377.
- Rech, J. A., Currie, B. S., Shullenberger, E. D., Dunagan, S. P., Jordan, T. E., et al. (2010). Evidence for the development of the Andean rain shadow from a Neogene isotopic record in the Atacama Desert, Chile. *Earth and Planetary Science Letters*, 292(3–4), 371-382.
- Santos, I., Ticona, E., & Vilcanqui, A. (2021). Modelo hidráulico para delimitación de faja marginal río Caplina Sector Río Seco, distrito G. Albarracín L. - Tacna - 2020. *Ingeniería Investiga*, 3(1), 534–545.
- Sidahmed, A. E. (2017). Recent trends in drylands and future scope for advancement. In *Climate Variability Impacts on Land Use and Livelihoods in Drylands*. Springer International Publishing, 21-57.
- Tisnado, E. C. J. (2013). Modelamiento hidrodinámico para determinar zonas vulnerables en el cauce del Río Seco Zona Urbana - Tacna. *Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann*.
- Vietz, G. J., & Finlayson, B. L. (2017). Geomorphological Effects of Flow Alteration on Rivers. *Water for the Environment. From Policy and Science to Implementation and Management*, 83–100.
- Wang, P., Fu, K., Huang, J., Duan, X., & Yang, Z. (2020). Morphological changes in the lower Lancang River due to extensive human activities. *PeerJ*, 8.
- Wigand, C., Ardito, T., Chaffee, C., Ferguson, W., Paton, S., Raposa, K., Vandemoer, C., & Watson, E. (2017). A Climate Change Adaptation Strategy for Management of Coastal Marsh Systems. *Estuaries and Coasts*, 40(3), 682–693.