



## Datos preliminares sobre la evolución geomorfológica del abanico aluvial de Lima, y sus implicaciones en el análisis de los riesgos asociados al cambio climático

S. Villacorta<sup>1</sup>, T. De Torres<sup>2</sup>, M. Llorente<sup>3</sup>, L. Ayala<sup>1</sup>, C. Pérez-Puig<sup>2</sup>, J. Macharé<sup>4</sup>, C. Benavente<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), Lima, Perú

<sup>2</sup> Universidad Politécnica de Madrid, España

<sup>3</sup> Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Madrid, España

<sup>4</sup> Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú

### RESUMEN

El estudio planteado se refiere al origen y dinámica geológica del abanico de Lima, ubicado en la costa central del Perú. Para prever como se desarrollarían los eventos geo-hidrológicos futuros, se busca conocer sus relaciones con los procesos de cambio climático (deglaciación) o tectonismo.

En este artículo se presenta una iniciativa conjunta del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) en convenio con el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), para la investigación de estos

fenómenos, en la búsqueda de promover en el Perú investigaciones sobre paleo-inundaciones.

La metodología a utilizar incluye análisis de fotografías aéreas, ortofotos e imágenes de satélite, elaboración de modelos digitales de alta resolución, levantamiento de columnas estratigráficas, y muestreo y dataciones isotópicas.

Los avances realizados hasta la fecha son el análisis de la información disponible y generación de la cartografía geomorfológica preliminar que han permitido dilucidar hipótesis sobre la evolución del abanico y proyectar las siguientes investigaciones.

### 1. Introducción

En la rampa que desciende de los Andes del Perú central hasta la costa del océano Pacífico, donde se encuentra el abanico de Lima, la aridez ha sido la principal característica climática desde hace mucho tiempo, como consecuencia del levantamiento de los Andes y la influencia de la corriente de Humboldt (Villacorta et al., 2014). La sequía permanente se pone de manifiesto en la presencia de depósitos de arenas finas, cuya removilización eólica (por acción del viento) requiere condiciones extremadamente secas como las actuales.

El abanico de Lima ocupa áreas que pertenecen a la región de Lima Metropolitana y a la provincia constitucional de El Callao. El paleo-Rímac estuvo ubicado más al suroeste, entre Miraflores y el Morro Solar. Según Le Roux et al. (2000), el continuo movimiento de la Placa de Nazca permitió la subsidencia y el inicio de una

transgresión marina durante el Pleistoceno (~1.7 Ma), seguida por la deposición de conglomerados que representan el retrabajamiento fluvial de morrenas glaciares. El abanico aluvial de Lima no sólo documenta los cambios tectónicos sino que también registra una combinación de los procesos climáticos. Un basculamiento tectónico causó la migración del río Rímac hacia el norte, y los canales abandonados del sur fueron rellenados por limolitas y lodolitas (Aleman et al., 2006).

Hoy día se interpreta mayoritariamente que los abanicos aluviales reflejan los continuos procesos de deposición a partir de pequeños conos de deyección, característicos de muchos ambientes de montaña (p.e., Saito & Oguchi, 2005), especialmente en zonas para-glaciares (Ryder, 1971). Según Le Roux et al. (2000), las facies del cono aluvial de Lima sugieren un depósito en un ambiente de

alta energía dominado por canales entrecruzados que rápidamente cambiaban de posición.

La investigación busca principalmente determinar la génesis del abanico del río Rímac y evaluar si su formación responde a cambios climáticos o a tectonismo (subsistencia por actividad de fallas). Para ello se pretende realizar una comparación del depósito de Lima (abanico del río Rímac) con los estudiados en Majes, Nazca, Chincha, y Cañete. Del mismo modo se busca evaluar el comportamiento del río Rímac en la parte baja de la cuenca ante lluvias excepcionales, como durante un evento de tipo *El Niño Southern Oscillation* (ENSO), que generan inundaciones y flujos de detritos. Estos eventos, registrados desde por lo menos 1911, han generado importantes impactos sociales y económicos, afectando incluso al PBI nacional (Miranda & Chávez, 2012).

La metodología usada para cumplir estos objetivos incluye trabajos de gabinete, campo, y laboratorio. Los trabajos de gabinete previos incluyeron un análisis geográfico (interpretación de fotografías aéreas, ortofotos, e imágenes de satélite) y la elaboración de modelos digitales al detalle. Los trabajos de campo incluyen actividades como el levantamiento de columnas estratigráficas y un muestreo de unidades geomorfológicas para obtener sus dataciones numéricas. El levantamiento de columnas estratigráficas, además de su utilidad en el registro litológico, permite inferir los procesos físicos que dieron lugar a los depósitos del

paleo-Rímac expuestos en los acantilados de la Costa Verde.

### 2. Geología y geomorfología

El abanico aluvial del río Rímac, cuyas cabeceras se encuentran en las cumbres más altas de la sierra de la región de Lima (aproximadamente 5000 m s.n.m.), es una geoforma disectada hacia el oeste por la erosión marina, que generó los acantilados de la Costa Verde.

La variación granulométrica de los diferentes niveles que lo componen reflejarían las fluctuaciones del caudal en relación con las oscilaciones en las dimensiones de los glaciares de la cordillera de los Andes del Perú central (Villacorta et al., 2014).

Entre los distritos de La Victoria y El Agustino, el abanico de Lima está interrumpido por relieves sedimentarios erosionados como los cerros San Cosme, El Pino, y La Atarjea, que conforman su parte más distal (Fig. 1). El material del abanico fosiliza además cuerpos de granodiorita y diorita del Batolito de la Costa, con edades entre 84 y 102 Ma (Pitcher, 1977).

La mayor parte del área evaluada corresponde a depósitos de glaciares y abanicos posiblemente coalescentes, que alcanzan centenares de metros de espesor (600 m en su parte más profunda; Arce 1984), coincidiendo con el cauce y la desembocadura del río Rímac.

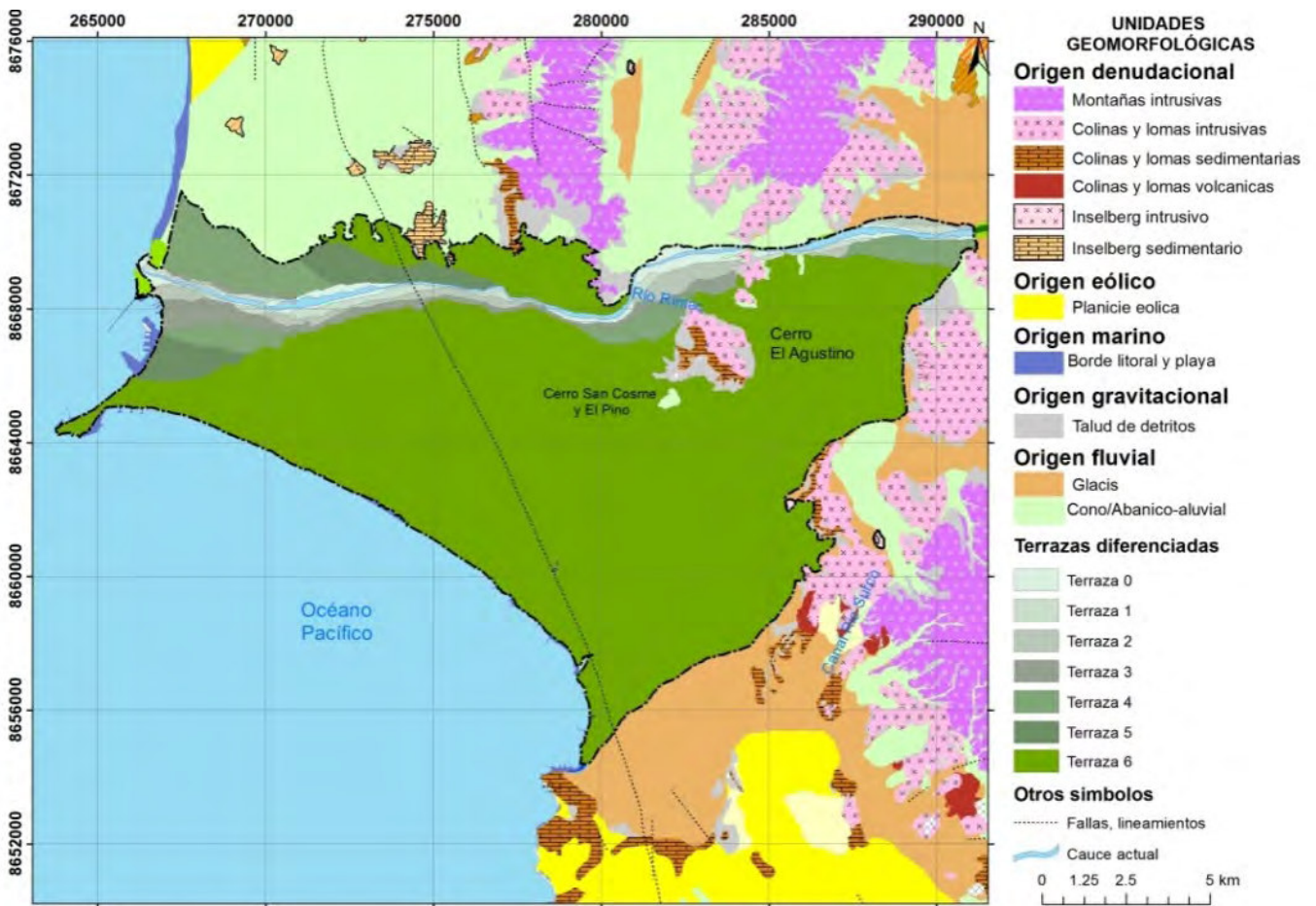


Figura 1. Geomorfomas identificadas en el área de estudio.

### 3. Génesis y características

Cobbing (1982) infirió que la zona central donde se encuentra el abanico de Lima se formó gracias al hundimiento de bloques fallados. No obstante, no se han encontrado evidencias suficientes para confirmar esta hipótesis. Posiblemente al área que ocupa el cono de deyección del río Rímac se formó cuando las condiciones climáticas eran de clima semi-árido, lo que podría corresponder al final de un periodo de glaciación.

El registro sedimentario de la sección transversal expuesta en el acantilado proporciona ideas en cuanto al desarrollo y evolución de los depósitos que conforman el abanico de Lima, el cual se compone básicamente de flujos aluviales, tales como paleocauces, arroyadas en mantos, y travertinos (Fig. 2).

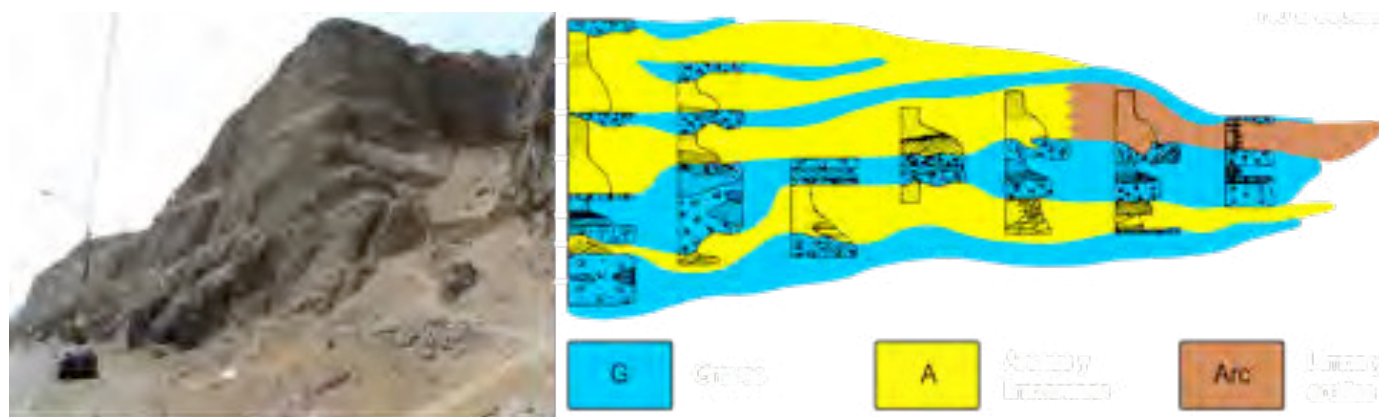
#### 3.1. Secuencia sedimentaria en el abanico de Lima

La Figura 2 muestra que la parte basal del abanico consiste de areniscas, limolitas, y lodolitas (argilitas). La caída relativa del nivel del mar entre 1.3 y 0.62 Ma permitió la deposición de conglomerados grano-

soportados, heterométricos y polimícticos. El deshielo y el desplazamiento de lenguas glaciares hacia altitudes superiores durante estadios cálidos resultaron en el depósito de gravas gruesas en abanicos aluviales coalescentes.

Según Giles et al. (2002), los ciclos menores de manera general presentan secuencias estrato-decrecientes con dominio de facies conglomerádicas, que a su vez se agrupan en secuencias grano-crecientes, típicas de la progradación de abanicos aluviales. Los conglomerados presentan bases erosivas y gradan a areniscas, limolitas, y lodolitas según ciclos estrato- y grano-decrecientes. Estos ciclos quedan interrumpidos por horizontes de caliche que representan episodios de no-deposición.

Las areniscas a menudo rellenan paleocanales y cuerpos lenticulares con estratificación cruzada. Algunos conglomerados están imbricados y no hay ninguna correlación entre tamaño de clastos y el espesor de las capas, por lo que se les asocia a flujos de detritos interestratificados con conglomerados (Aleman et al., 2006).



**Figura 2.** Sedimentos estratificados de la Costa Verde, Lima. A: arenas; G: gravas; Arc: arcillas y limos. En la secuencia se identifica barras arenosas, paleocauces y travertinos en la base. Vista en la Bajada de Armendáriz (fotografía: Luis Ayala).

#### 3.2. Edad del abanico

Lissón (1907) habría descubierto en el techo del abanico de Lima un molar de *Equus curvidens* de edad pleistocena, pero la ubicación exacta de este molar fósil corresponde en realidad a la cuenca del río Mantaro, por lo que no se puede asociar al abanico de este estudio.

Según Le Roux et al. (2000), el depósito estaría influenciado por el levantamiento causado por la subsidencia de la Dorsal de Nazca durante el Mioceno tardío-Plioceno, que ha sido interpretado como la causa de la incisión profunda del río Rímac. Sin embargo es posible que sea más joven y represente el último pulso del levantamiento andino (Teves, 1975; Aleman et al., 2006).

### 4. Análisis preliminar del paleoclima

El clima actual del desierto costero de Lima es hiperárido y muy húmedo. En el área estudiada se observa la asociación de procesos morfogenéticos con mayor

capacidad erosiva, lo que hace presumir que los relieves actuales pueden reflejar que el modelado durante las últimas dos o tres decenas de miles de años indica que las condiciones climáticas semi-áridas debieron ser predominantes a lo largo de ese periodo (Villacorta et al., 2014). Según Baker (1977), los ambientes áridos tienden a ser fluvialmente más activos que las regiones húmedas, y se ha demostrado un aumento de dicha actividad en los abanicos, como resultado de aridez climática (Harvey & Wells, 1994): es decir, se produce un incremento en el aporte de sedimentos a los flujos de detritos después de un cambio climático desde muy seco a muy húmedo (p.e., Al-Farraj, 1996).

En la actualidad, la frecuencia de las lluvias es de aproximadamente 30 a 50 años (Capel, 1999), y su intensidad no permite el desarrollo de una cubierta vegetal ni un funcionamiento importante en los conos de deyección de la costa peruana. Sin embargo, según Craig (1968), el ambiente muy húmedo de neblina favorece en las lomas una condensación que permite vivir a la vegetación.

## 5. Amenazas asociadas al cambio climático

Según el IPCC (2007), las amenazas derivadas del cambio climático incrementarían la frecuencia, intensidad, duración, y cambio estacional de ocurrencia de procesos climáticos extremos, y los eventos asociados: inundaciones, deslizamientos, y los fenómenos El Niño y La Niña (ENSO), así como la llegada de un nuevo fenómeno, El Dana, con vientos cálidos calientes provenientes del Atlántico, que cruzan la Cordillera andina (cada vez con glaciares más reducidos) incrementando las precipitaciones.

Este último evento habría sido el causante del desastre ocurrido en el verano del 2012 en Chosica (Lima) e indicaría que, a pesar de que los eventos de tipo ENSO de 1997-98 y 1982-83 desencadenaron procesos de inundación, erosión fluvial, y flujos de detritos, los mismos también podrían producirse en épocas "normales".

Las áreas susceptibles a inundaciones en Lima Metropolitana se han identificado desde un punto de vista geomorfológico y en base al inventario de eventos (Villacorta et al., 2014). Ejemplos destacables de procesos desencadenados por lluvias excepcionales en Lima son las inundaciones en la cuenca baja del río Rímac del año 1970, en que la duración de la lluvia fue de 5 horas y produjo incluso cataratas en la quebrada de Armendáriz en Barranco. En 1982-1983 las lluvias afectaron al sector de Carmen de la Legua; las inundaciones producidas en febrero de 1998 en la quebrada Huaycoloro afectaron al centro de Lima, así como los flujos de detritos de 2012 en Chosica.

## 6. Discusión

En cuanto a la edad del abanico, no existen dataciones que permitan conocer las edades de los niveles que pueden diferenciarse en los acantilados de la Costa Verde. Sin embargo, evidencias geomorfológicas en la sierra indican que las montañas y el Altiplano estuvieron cubiertos por capas de hielo durante el Pleistoceno final. Por lo tanto, el subsecuente deshielo debe haber alimentado cursos fluviales durante periodos prolongados.

A pesar de que el contexto regional parece haber sido idóneo para los ciclos de aluvionamiento y encajamiento que en otros dominios morfoclimáticos suelen construir amplias llanuras aluviales, en la región de Lima Metropolitana apenas se han diferenciado 6 niveles de terrazas (Fig. 1), cuyo desarrollo está limitado a un estrecho borde entorno al río Rímac. La mayor parte del piedemonte de las estribaciones andinas está ocupado por el abanico de Lima y glaciares.

## 7. Perspectivas de la investigación

La clave de la investigación es el realizar una comparación del abanico de Lima con los estudiados en Majes (Steffen et al., 2010), Nazca, Chíncha, y Cañete. En estos trabajos se ha determinado que existe una elevada erosión cuaternaria ligada al cambio climático, expansión

del lago Titicaca y similares en el Altiplano. Los principales desafíos del proyecto, se refieren a la integración de la investigación dentro de los modelos geomorfológicos y sedimentológicos más amplios de la costa peruana. Además, se necesita observar la asociación del abanico con sus factores morfoclimáticos, lo que se relaciona con el debate sobre la relación del clima, tectónica, y cambio de nivel de base en las antiguas secuencias de sedimentos de los abanicos aluviales. Otros estudios sobre abanicos aluviales del Cuaternario reconocen en la tectónica un control primario para su ubicación y entorno; sin embargo en tales investigaciones las secuencias de los materiales depositados responderían principalmente a controles climáticos (Harvey & Wells, 1994).

Para el caso del abanico de Lima, las evidencias de control tectónico se podrían determinar observando si el encajamiento del cauce sigue algún patrón, o si el abanico presenta asimetría; así como en su relación respecto al abanico del río Chillón, adyacente por el lado norte, el cual podría estar relacionado a un control estructural neotectónico. Una descripción pormenorizada de los materiales y sus relaciones espaciales irá aportando más ideas al respecto. En base al levantamiento de columnas estratigráficas, sobre todo en los paleocauces encontrados (como el del río Surco), y dataciones numéricas que podrían correlacionarse con datos registrados en sedimentos de lagos y barbas glaciares, morrenas, y lagunas de origen glaciar, se podría obtener información de gran interés para conocer la evolución del clima y sus efectos en esta región de Sudamérica.

## 8. Conclusiones

El proyecto pretende contribuir a las investigaciones sobre geomorfología y paleo-inundaciones en el Perú.

El proyecto permitirá generar herramientas útiles para la ordenación del territorio, la prevención de desastres, y el conocimiento geológico del área de Lima.

Los avances preliminares incluyen la cartografía geomorfológica de detalle y el levantamiento de columnas estratigráficas en los acantilados de la Costa Verde.

## Referencias

- Alemán, A., Benavides, V., León, W. 2006. Estratigrafía, sedimentología y evolución tectónica del área de Lima. Guía de campo n° 11 (segunda edición), p. 10-14, 46-56, y 90-91.
- Al-Farraj, A. 1996. Late Pleistocene geomorphology in Wadi Al-Bih, northern U.A.E. and Oman, with special emphasis on wadi terraces and alluvial fans. PhD Thesis, University of Liverpool.
- Arce, J. 1984. Estructura geológica del subsuelo Rímac-Chillón. Sociedad Geológica del Perú, volumen jubilar LX Aniversario en homenaje al Dr. Georg Petersen G., Lima, fasc. 1, 12 p.

- Baker, V. 1977. Stream channel response to floods, with examples from central Texas. *Geological Society of America Bulletin*, v. 88, p. 1057–1071.
- Capel, J. 1999. Lima, un clima de desierto litoral. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense, Madrid*, v. 19, p. 25–45.
- Cobbing, E. 1982. The segmented Coastal Batholith of Peru; its relationship to volcanicity and metallogenesis. *Earth-Science Reviews*, v. 18, p. 241–251.
- Craig, A. 1968. Marine desert ecology. Office of Naval Research, Geography branch, 213 p.
- Giles, B., Marocco R., Jacay, J. 2002. Depósitos de ríos trezados conglomerádicos del abanico aluvial del río Rímac. Resúmenes, IX Congreso Peruano de Geología, p. 25.
- Harvey, A., Wells, S. 1994. Late Pleistocene and Holocene changes in hillslope sediment supply to alluvial fan systems: Zzyzx, California. In: Millington, A.C. & Pye, K. (eds), *Environmental change in drylands: Biogeographical and geomorphological perspectives*, Wiley, p. 67-84.
- IPCC, 2007. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: R.K. Pachauri & A. Reisinger (eds.), Geneva, p. 104.
- Le Roux, J., Tavares, C., Alayzac, F. 2000. Sedimentology of the Rímac-Chillón alluvial fan at Lima, Peru, as related to Plio-Pleistocene sea-level changes, glacial cycles, and tectonics. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 13, p. 499–510.
- Lisson, 1907. *Geología de Lima y sus alrededores*. Gil, Lima.
- Miranda, L., Chávez, S. 2012. Perfil y escenarios climáticos de Lima Metropolitana. *Actualidad Gubernamental*, nº 50.
- Pitcher, W. 1977. The Anatomy of a batholith. *Journal of the Geological Society (London)*, v. 135, p. 157–182.
- Ryder, J. 1971. The stratigraphy and morphology of paraglacial alluvial fans in south-central British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 8, p. 279–298.
- Saito, K., Oguchi, T. 2005. Slope of alluvial fans in humid regions of Japan, Taiwan, and the Philippines. *Geomorphology*, v. 70, p. 147–162.
- Steffen, D., Schlunegger, F., Preusser, F. 2010. Late Pleistocene fans and terraces in the Majes valley, southern Peru, and their relation to climatic variations. *International Journal of Earth Sciences, (Geologische Rundschau)*, v. 99, p. 1975-1989.
- Teves, N. 1975. Aspectos sedimentarios y estructurales del sector costanero frente a la dorsal de Nazca. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, v. 50, p. 87–98.
- Villacorta, S., Núñez, S., Benavente, C., Pari, W., Fidel, L. 2015. Peligros geológicos en el área de Lima Metropolitana y la región Callao. *Boletín del INGEMMET, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*. v. 59, 151 p.