

¿Los volcanes crecen indefinidamente? Colapso de volcanes en el Noroeste de Argentina

Emilce Bustos¹, Gianluca Norini², Walter Báez¹, Pablo Grosse^{3,4}, Marcelo Arnosio¹, Lucía Capra⁵

¹Instituto de Bio y Geociencias del NOA (IBIGEO, UNSa - CONICET), Argentina. e-mail: emilcebustos@gmail.com

²Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Area della Ricerca CNR - Italy

³Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

⁴Fundación Miguel Lillo, San Miguel de Tucumán, Argentina

⁵Instituto de Geociencias, Campus Juriquilla, Universidad Nacional Autónoma de México, Querétaro, México

Las formas que presentan los volcanes en la actualidad son el resultado de una combinación de procesos constructivos (como la emisión de flujos de lava) y destructivos (como el colapso/destrucción). Los volcanes no pueden crecer de manera indefinida por varias razones. Por un lado, están expuestos a la erosión provocada por la lluvia, el viento y otros agentes naturales. Por otro lado, pueden experimentar cambios en su sistema interno, como el desplazamiento o enfriamiento del magma, o incluso el vaciamiento de su cámara magmática. Además, el propio peso del volcán, sumado a las pendientes cada vez más empinadas que desarrollan con el tiempo, puede llevar al **deslizamiento o colapso del edificio volcánico**, formando una **avalancha volcánica de detritos** (Figura 1). Este es uno de los procesos más importantes en el modelado del paisaje volcánico.

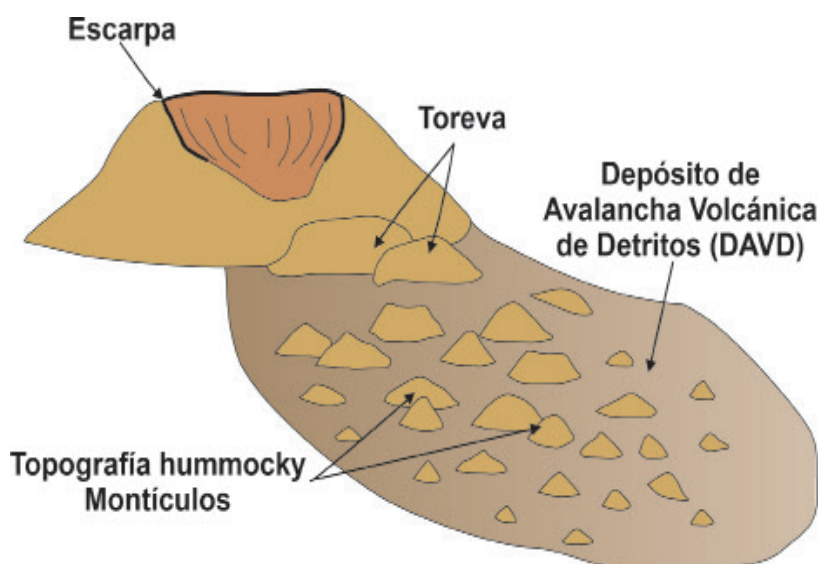


Figura 1. Esquema mostrando un volcán colapsado con su escarpa y el depósito de avalancha volcánica de detritos (DAVD). Se observan los bloques topeva y la morfología superficial de montículos (topografía hummocky). Redibujado de Dufresne et al. (2021)

La primera vez que la humanidad pudo documentar en tiempo real un fenómeno de avalancha volcánica fue en 1980, con la erupción y colapso del Monte Santa Helena, en Estados Unidos (Glicken, 1991, 1996). Las avalanchas volcánicas de detritos son fenómenos comunes (Dufresne et al., 2021), ya que muchos volcanes, incluso aquellos que ya no están activos, pueden colapsar.

Estos colapsos representan una amenaza significativa, ya que pueden causar muertes de manera directa o indirecta. Los volcanes pueden desestabilizarse por diversas razones, como por actividad tectónica, acumulación de peso en las laderas, debilitamiento por procesos hidrotermales, terremotos, intrusión de magma, eventos meteorológicos extremos, o, incluso, sin una causa aparente. Por eso, es importante no subestimar este tipo de fenómenos en la evaluación de la peligrosidad y riesgo volcánico (ver [Montero et al. 2012. Temas B&GNOA, vol.2, n°3](#); [Cirer y Berteza 2023. Temas B&GNOA, vol. 13, n°1](#)).

Avalanchas Volcánicas de Detritos

El colapso de edificios volcánicos forma una **avalancha volcánica de detritos**, que deja como evidencia una cicatriz o escarpa, y un **depósito de avalancha volcánica de detritos** (Figura 1). Se estima que los volcanes compuestos concentran el 75% de las avalanchas volcánicas de detritos reconocidas (Zernack y Procter, 2021). Durante el desplazamiento del material, los mecanismos de transporte generan una serie de rasgos característicos tanto en el relieve (geomorfológicos) como en el interior del depósito (sedimentológicos). Entre los rasgos geomorfológicos se destaca la topografía *hummocky* y los bloques *toreva* (Figura 1). Las características sedimentológicas incluyen megabloques, fracturas tipo *jigsaw* (red de fracturamiento caótico, caracterizado por desplazamientos pequeños de los fragmentos), clastos destrozados (*shattered clasts*) y clastos incorporados del sustrato (Figura 2).

Rasgos geomorfológicos

La zona del volcán en la cual se registra el colapso forma una **escarpa**: una depresión, generalmente en forma de herradura, con paredes empinadas y un piso más o menos plano que marca el área de donde se desprendió el material (Figura 1). En la base del volcán, donde la pendiente cambia bruscamente, suele formarse una **topografía hummocky**, un paisaje irregular compuesto por montículos (o "*hummocks*") rodeados de superficies más planas (Figura 1). Estos montículos se alinean en la dirección en la que se desplazó la avalancha y suelen hacerse más pequeños a medida que se alejan del volcán. Cuando estos montículos se alargan, forman crestas, también alineadas en el sentido del transporte. En la zona más cercana al volcán, a menudo se encuentran grandes bloques conocidos como **bloques Toreva** (Figura 1). Estos bloques tienen poca movilidad y tienden a rotar hacia atrás, es decir, en dirección a la fuente del colapso. Lo interesante es que estos bloques suelen conservar la estructura interna original del volcán, ya que no se desplazan mucho.

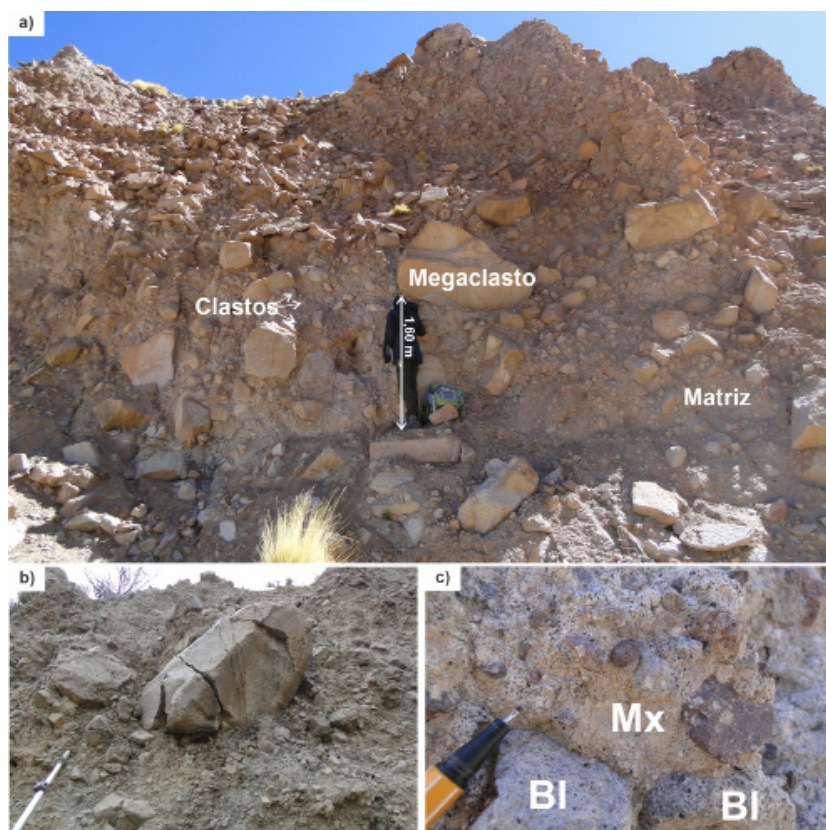
Rasgos sedimentológicos

La estructura interna de estos depósitos se caracteriza por tres componentes:

Megaclastos (>1 m): constituyen porciones relativamente intactas del edificio volcánico que colapsó (Figura 2a). Muchas veces presentan fracturas con un patrón denominado en rompecabezas (*jigsaw*). A medida que aumenta la distancia a la zona de colapso y hacia los márgenes laterales del depósito, el tamaño y número de los megaclastos disminuye, mientras aumenta el porcentaje de matriz. La fragmentación en rompecabezas constituye una red de fracturamiento caótico, caracterizado por desplazamientos pequeños de los fragmentos (Figura 2b). El proceso se asocia con la dilatación de una roca originalmente no fracturada; sin desagregación de los fragmentos. Se observan en todas las escalas y en toda la extensión del depósito.

Clastos (<1 m): corresponde a todos los componentes del depósito con tamaño entre 2 mm y 1 m que están rodeados por una superficie y presentan una homogeneidad litológica interna (Figura 2a).

Matriz: consiste en una mezcla de fragmentos pequeños, con tamaños que abarcan desde arcilla a arena muy gruesa (<2 mm). Incluye todo el material fino ubicado entre partículas más grandes (Figura 2c).



Geometría de las avalanchas volcánicas de detritos

Las escarpas y los depósitos dejados por las avalanchas de material volcánico presentan formas muy particulares (Figura 3). Para poder entender mejor estas formas y compararlas entre sí, se miden distintos aspectos de su geometría, es decir, parámetros morfométricos. En el caso de las escarpas, se obtienen datos como el ancho, el largo, la altura, el ángulo de apertura y el área. Además, su forma en planta (vista desde arriba) puede clasificarse como semicircular, triangular o en forma de anfiteatro. Por otro lado, en los depósitos de avalancha volcánica de detritos (DAVD) se miden parámetros como el ancho, el largo, el área, la altura, el espesor, entre otros.

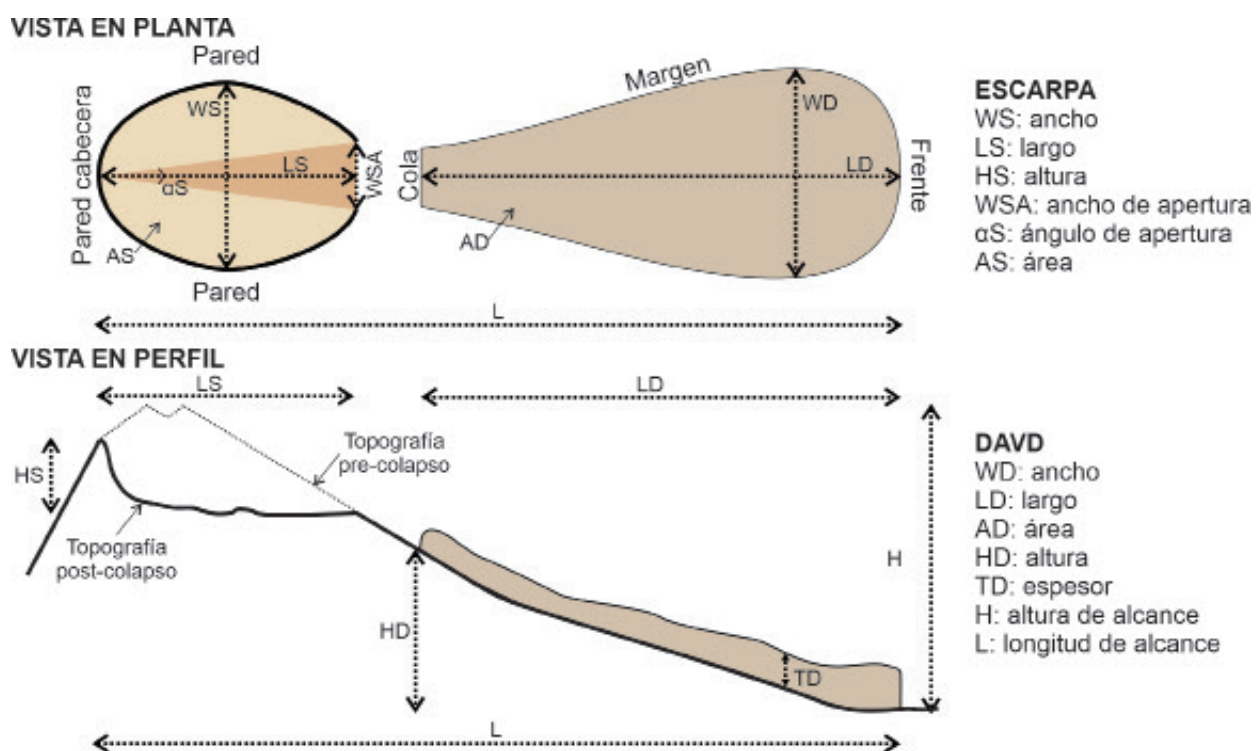


Figura 3. Términos descriptivos y parámetros geométricos de la escarpa (en este caso con forma semicircular en planta) y el depósito de avalancha volcánica de detritos (DAVD) (con forma en planta elongada). Las siglas están en inglés, ya que así figuran en las entradas de la base de datos que se expone a continuación. Tomado de Bernard et al. (2021).

Volcanes, Colapsos y Datos: Explorando las avalanchas de detritos en el Noroeste Argentino

En los Andes Centrales se encuentran algunas de las avalanchas volcánicas de detritos más grandes del mundo. Algunos de los depósitos más conocidos provienen de volcanes como Socompa, Llullaillaco y Lastarria, todos ellos ubicados en la Puna salteña y catamarqueña, límite con Chile.

Los Andes Centrales constituyen una de las zonas volcánicas más relevantes del planeta, con muchos de los volcanes más altos del mundo. Esta región es especialmente adecuada para estudiar

avalanchas de detritos mediante sensores remotos, debido a varias razones: baja tasa de erosión, que favorece la preservación de los depósitos; la predominancia de volcanes de forma cónica y con pendientes empinadas, más propensos al colapso; y un clima árido con escasa vegetación, que permite una excelente visibilidad y análisis a partir de imágenes satelitales.

Una **base de datos** es una colección organizada de información, estructurada para facilitar su acceso, manejo y actualización. En este caso, se creó una **base de datos geoespacial** compilando los eventos de avalanchas volcánicas de detritos del noroeste argentino. Se realizó a partir de mediciones de los parámetros geométricos presentados en la Figura 3 realizadas sobre un modelo digital de elevación (representación tridimensional del terreno que permite observar con detalle las alturas y formas del relieve), con resolución espacial de 12,5 metros (cada píxel representa un área de 12,5 × 12,5 m). Esta base está disponible en la página del IBIGEO (<https://ibigeo.conicet.gov.ar/volcanic-debris-avalanche-database/>). El sitio cuenta con un visor interactivo para explorar los datos y una sección de descargas para acceder a la información completa. Esta base de datos permite almacenar y gestionar la información de forma eficiente y segura, facilita el acceso rápido y preciso a los datos generados, permite compartir información y tomar decisiones basadas en evidencia geoespacial.

¿Cómo se organizan los datos eficientemente?

La arquitectura de la base de datos se basa en la premisa de que toda la información contenida debe ser comparable y consistente, de manera que permita realizar análisis y comparaciones rigurosas. Esta estructura facilita la organización, consulta y relación entre los datos, apoyando tanto el análisis geológico como la gestión del riesgo volcánico. Todos los atributos de la base de datos están georreferenciados. La estructura de la base de datos tiene tres capas principales:

Volcán: archivo de puntos que contiene el nombre del volcán, tipo, coordenadas, composición química, edad, presencia o ausencia de alteración hidrotermal en superficie, presencia o ausencia de colapsos y sus causas si fueran conocidas.

Escarpa: archivo de líneas que registra las escarpas presentes en los volcanes. Contiene columnas con el nombre del volcán al que está vinculada la estructura, nombre de la escarpa, nombre del depósito, grado de preservación, forma en planta, parámetros geométricos calculados (e.g., largo, ancho, ancho de apertura, altura, ángulo de apertura, pendiente, azimuth, área).

DAVD: capa vectorial de polígonos que define la extensión en planta de estos depósitos. La información comprendida en la base de datos incluye datos geométricos del depósito (e.g., largo,

ancho, espesor, volumen, distancia de desplazamiento, etc.), y la forma del depósito.

Más adelante revisamos un ejemplo de los parámetros de la base de datos de avalanchas volcánicas de detritos del volcán Chimpa ubicado en la Puna salteña.

Estas tres capas están vinculadas entre sí mediante el campo común “volcán”. Debido a que sobre la traza de las estructuras tectónicas regionales se desarrollan zonas de alteración hidrotermal (Ver [Salado Paz 2012. Temas B&GNOA, vol. 2, n°2](#)), las cuales constituyen factores que llevan a la inestabilidad de los volcanes, se agregaron esos datos como capas complementarias que enriquecen la base de datos.

Avalanchas volcánicas en los Andes del Noroeste Argentino: una mirada a los colapsos ocultos del pasado geológico

La base de datos sobre avalanchas volcánicas de detritos en el noroeste de Argentina recopila 19 eventos de colapso volcánico cuyas evidencias geológicas quedaron registradas en diferentes zonas de esta región (Figura 4). Cada registro incluye información detallada sobre las escarpas, los depósitos generados por las avalanchas, características morfométricas y datos complementarios relacionados con estructuras geológicas y zonas de alteración hidrotermal. De los 19 eventos documentados, 15 cuentan con información completa tanto de la escarpa como del depósito. Cinco de estos casos ya habían sido estudiados previamente, otros cinco se conocían por trabajos cartográficos o investigaciones regionales, y los nueve restantes fueron identificados por primera vez en esta investigación (Figura 4).

El análisis estadístico de los datos revela relaciones entre diversos parámetros morfométricos y muestra que la mayoría de las avalanchas se desplazaron en direcciones perpendiculares a las principales estructuras tectónicas de la región. Además, se destaca la influencia de las zonas de alteración hidrotermal en la inestabilidad de los edificios volcánicos.

Los colapsos provienen mayoritariamente de volcanes compuestos, siendo los eventos de mayor magnitud aquellos asociados a composiciones dacíticas¹. Las edades estimadas de estos fenómenos se sitúan entre el Mioceno tardío y el Plioceno (aproximadamente de 12 a 2,5 millones de años), aunque la falta de fechamientos radiométricos limita la precisión respecto a su frecuencia.

¹Dacita: roca volcánica de composición intermedia a ácida, con un contenido de sílice (SiO₂) alto, generalmente entre 63% y 69%.

En cuanto a la forma en planta, las escarpas tienden a ser semicirculares, con un ancho que suele duplicar su largo. Los depósitos de avalancha, por su parte, presentan configuraciones alargadas, muchas veces confinadas por valles. Tanto las escarpas como los depósitos muestran valores de los parámetros geométricos muy variables.

Si bien la mayoría de las avalanchas siguen direcciones perpendiculares a los lineamientos geológicos predominantes, se identificaron excepciones notables. En general, los depósitos se concentran a lo largo de la región conocida como lineamiento Calama-Olacapato-Toro (COT, figura 4), con una disposición noroeste-sureste, y también hacia el sur siguiendo el eje norte-sur del arco volcánico (límite Argentina-Chile).

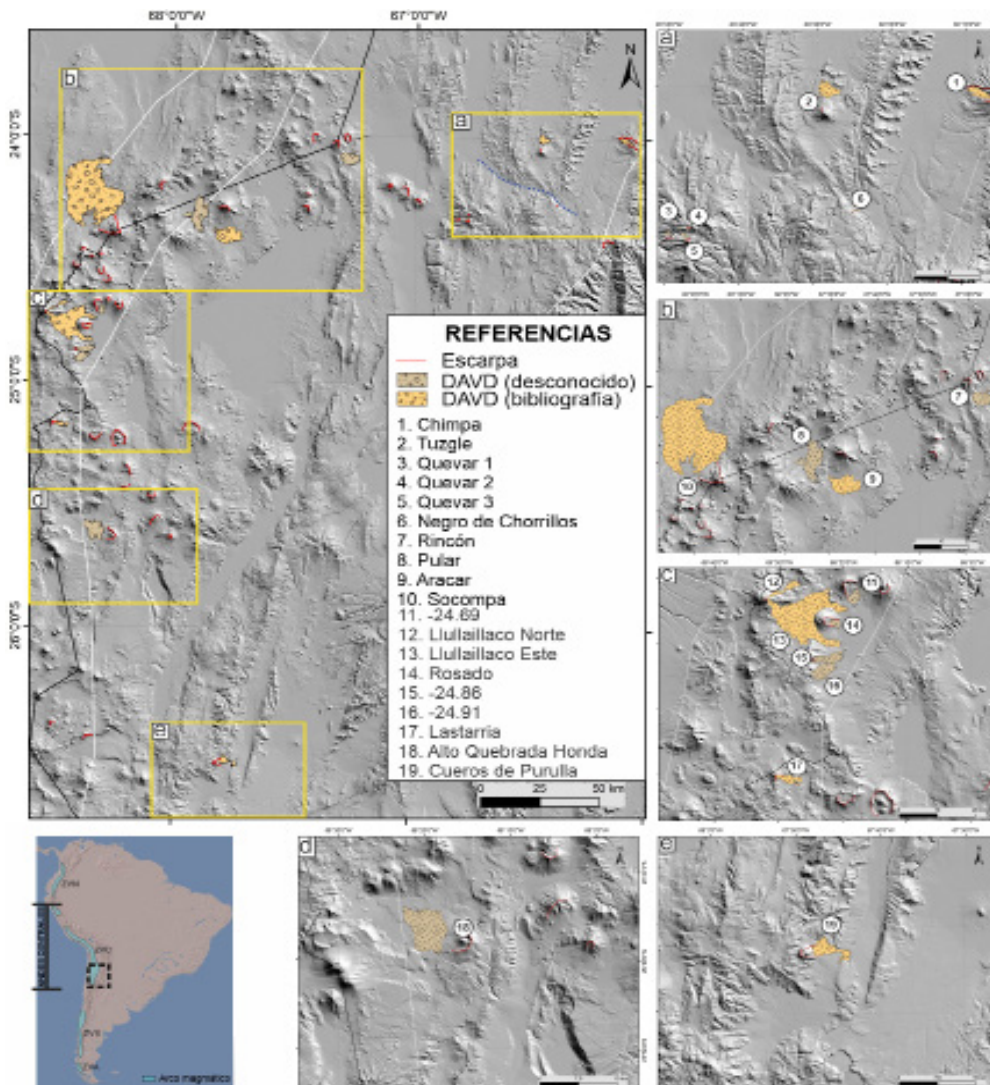


Figura 4: Distribución de escarpas y depósitos de avalanchas volcánicas de detritos en el noroeste argentino. Se representan 19 eventos documentados, 5 en color amarillo que corresponden a los nuevos hallazgos. En color marrón se ilustran los eventos ya documentados en la bibliografía. Con línea azul punteada se marca el lineamiento Calama-Olacapato-El Toro (COT). Modificado de Bustos et al. (2025). Los recuadros amarillos en la figura del margen superior izquierdo muestran el área abarcada por las imágenes a-e. En el margen inferior izquierdo se muestra la zona de estudio en el marco de Sudamérica, la ubicación de los Andes Centrales y de las zonas volcánicas Norte, Central, Sur y Austral (ZVN, ZVC, ZVS y ZVA respectivamente)

Ejemplo de la Avalancha Volcánica de Detritos en el Volcán Chimpa

La Figura 5 muestra un ejemplo del visor interactivo de la base de datos, disponible en la página web del IBIGEO (<https://ibigeo.conicet.gov.ar/volcanic-debris-avalanche-database/>). Se observa la ubicación del volcán (diamante rojo), la traza de las escarpas en líneas rojas, el depósito de avalancha del volcán Chimpa representados como un polígono de color amarillo. También se observan los lineamientos geológicos (en color marrón) y las zonas de alteración hidrotermal (estrella amarilla).

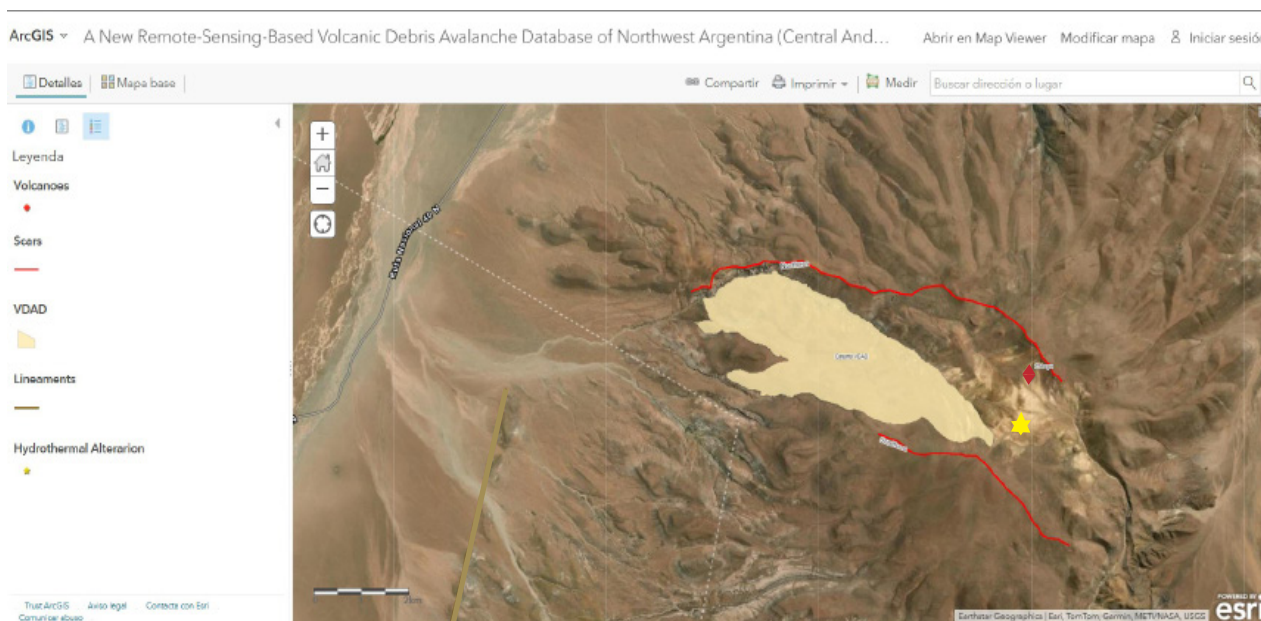


Figura 5. Ejemplo del visor de la base de datos de la avalancha (volcán Chimpa)

A continuación, vemos cómo se almacenan los datos de la base de datos para el mismo ejemplo, el del colapso de la avalancha volcánica de detritos del volcán Chimpa:

Capa Volcán:

Volcán	Chimpa
Tipo	Estratovolcán
Latitud	-24,01
Longitud	-66,09
Composición	Andesítica
Edad	Mioceno Superior (7 Ma)
Alteración hidrotermal	Si
Colapso	Si
Cantidad de colapsos	1

Capa Escarpa: para el caso del volcán Chimpa los parámetros de las escarpas no se calculan porque son rectilíneas y paralelas entre sí.

Volcán	Chimpa
Nombre	Escarpa norte y escarpa sur
Depósito asociado	Casana VDAD
Grado de preservación	Moderadamente definida
Forma en planta	Rectilínea
Largo LS (m)	
Largo LS (km)	
Ancho WS (m)	
Ancho WS (km)	
Ancho de apertura WSA (m)	
Ancho de apertura WSA (km)	
Altura HS (m)	
Ángulo de apertura αS [°]	
Pendiente βS [°]	
Azimut γS [°]	
Área AS [m²]	
Área AS [km²]	
Factor de elongación	
Factor de cierre	
Gatilladores	Tectónica y alteración hidrotermal
Observaciones	Las características propias de las escarpas no permiten realizar las mediciones de los parámetros
Bibliografía	NORINI G, E BUSTOS, M ARNOSIO, W BÁEZ, MC ZULUAGA, M ROVERATO. 2020. Unusual volcanic instability and sector collapse configuration at Chimpa Volcano, Central Andes. <i>Journal of Volcanology and Geothermal Research</i> 393: 106807. BUSTOS E, L CAPRA, M ARNOSIO, G NORINI. 2022. Volcanic debris avalanche transport and emplacement at Chimpa volcano (Central Puna, Argentina): Insights from morphology, grain-size and clast surficial textures. <i>Journal of Volcanology and Geothermal Research</i> , 432, 107671.

Capa depósito (ver abreviaturas en Figura 3):

Volcán	Chimpa
Nombre del depósito	Casana VDAD
Depósito asociado	VDAD
Vista en planta	Elongada
Longitud LD [m]	6817,95
Longitud LD [km]	6,82
Ancho LD [m]	2328,33
Ancho LD [km]	2,33
Área AD [m²]	9248340
Área AD [km²]	9,25
Altura HD [m]	850
Pendiente α [°]	0,12
Longitud de alcance L [m]	7518,38
Longitud de alcance L [km]	7,52
Altura de alcance H [m]	850
Coefficiente de fricción	0,11
Edad	Desconocida
Gatilladores	Tectónica-Alteración hidrotermal
Bibliografía	<p>NORINI G, E BUSTOS, M ARNOSIO, W BÁEZ, MC ZULUAGA, M ROVERATO. 2020. Unusual volcanic instability and sector collapse configuration at Chimpa Volcano, Central Andes. <i>Journal of Volcanology and Geothermal Research</i> 393: 106807.</p> <p>BUSTOS E, L CAPRA, M ARNOSIO, G NORINI. 2022. Volcanic debris avalanche transport and emplacement at Chimpa volcano (Central Puna, Argentina): Insights from morphology, grain-size and clast surficial textures. <i>Journal of Volcanology and Geothermal Research</i>, 432, 107671.</p>

En síntesis...

Es importante destacar que el reconocimiento de estos eventos de colapso por medio de modelos digitales de elevación puede resultar complejo, especialmente en volcanes que han experimentado procesos constructivos posteriores al colapso, los cuales pueden borrar o modificar las evidencias originales de estos fenómenos.

Aunque los parámetros morfométricos ofrecen información valiosa, deben interpretarse con precaución. Por ejemplo, las escarpas pueden haber sido afectadas por erosión o relleno, alterando así su forma original. Los elementos geométricos permiten establecer las características físicas que definen a las avalanchas volcánicas de detritos y, además, funcionan como datos de entrada para modelos numéricos que simulan la dinámica de estos fenómenos. El emplazamiento de una avalancha volcánica de detritos generalmente modifica la topografía local, interrumpiendo y desviando la red hidrológica circundante.

Esta base de datos, accesible a través del sitio web del IBIGEO, representa una herramienta valiosa tanto para investigadores como para organismos nacionales responsables de la evaluación del riesgo geológico, permitiendo un análisis sistemático dentro de un entorno SIG (Sistema de Información Geográfica). Su utilización contribuye a mejorar el entendimiento de la distribución espacial y temporal de las avalanchas volcánicas de detritos en la Zona Volcánica Central de los Andes.

Artículo escrito a partir de la publicación científica Bustos, E, G Norini, W Báez, P Grosse, M Arnosio, L Capra. 2025. A new remote-sensing-based volcanic debris avalanche database of Northwest Argentina (Central Andes). *Landslides*, 22(2), 353-372.

Este trabajo recibió financiamiento de los proyectos de investigación PIBAA 28720210100094CO "Morfología y Arquitectura Interna de Depósitos de Avalancha Volcánicas de Detritos en la Puna Central. Evaluación de la Dinámica de Flujo" y PICT-2021-GRFTI-00145 "Avalanchas Volcánicas de Detritos en los Andes Centrales: Distribución Espacial y Mecanismos de Colapso" dirigidos por Emilce Bustos.

REFERENCIAS

BERNARD B, S TAKARADA, D ANDRADE, A DUFRESNE. 2021. Terminology and strategy to describe volcanic landslides and debris avalanches. Pp 51-73. En Roverato M, A Dufresne, JN Procter (Eds.), Volcanic debris avalanches: from collapse to hazard. Springer book series advances in volcanology.

BUSTOS E, G NORINI, W BÁEZ, P GROSSE, M ARNOSIO, L CAPRA. 2025. A new remote-sensing-based volcanic debris avalanche database of Northwest Argentina (Central Andes). *Landslides*, 22 (2): 353-372.

CIRER M, E BERTEA. 2023. Una ventana al pasado del volcán Láscar, ejemplo de la colaboración científica entre Argentina y Chile en la gestión del riesgo. [Temas Biología y Geología del NOA, 13 \(1\): 5-15.](#)

DUFRESNE A, A ZERNACK, K BERNARD, JC THOURET, M ROVERATO. 2021. Sedimentology of volcanic debris avalanche deposits. Pp 175-210. En: Roverato M, A Dufresne, JN Procter (Eds.), Volcanic debris avalanches: from collapse to hazard. Springer book series advances in volcanology.

GLICKEN H. 1991. Sedimentary architecture of large volcanic-debris avalanches. Pp 99. En Fisher RV, GA Smith (Eds.), Sedimentation in volcanic settings. Special publication. SEPM.

GLICKEN H. 1996. Rockslide-debris avalanche of May 18, 1980, Mount St. Helens volcano, Washington. U.S. geological survey open-file report 96-677, 90p, 5 plates, <https://pubs.usgs.gov/of/1996/0677/>

MONTERO C, VH GARCÍA, S GUZMÁN. 2012. Desastres naturales: ¿se pueden predecir y prevenir los eventos geológicos destructivos? [Temas Biología y Geología del NOA, 2 \(3\): 84-100.](#)

SALADO PAZ N. 2012. Ambientes termales: evidencias de actividad biológica en sistemas termales fósiles (vetas epitermales) y actuales en la laguna de Incachule, Puna Salteña. [Temas Biología y Geología del NOA, 2 \(2\): 54-63.](#)

ZERNACK AV, JN PROCTER. 2021. Cyclic growth and destruction of volcanoes. Pp 311-355. En Roverato M, A Dufresne, JN Procter (Eds.), Volcanic debris avalanches: from collapse to hazard. Springer book series advances in volcanology.