

Análisis geológico y numérico del flujo de lodo de la quebrada El Tejado del 31 de enero de 2022, Quito - Ecuador

Liliana Paulina Troncoso¹, Gustavo Córdoba Guerrero², Jorge Vallejo Morillo², Nicolás Rondal¹, Luis Pilatasig¹, Elías Ibadango¹, Stalin Solano¹, Andrés Gorki Ruiz¹, Cristian Zura¹, Francisco Viteri¹, Alex Mateus¹, Rafael Alulema¹, Andrés Murillo¹, Rai Torres¹, Alexis Cantares¹, Jorge Ordóñez³ y Gustavo Pinto¹

¹ Carrera de Geología, FIGEMPA,, Universidad Central del Ecuador- lptroncoso@uce.edu.ec

² Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Nariño, Colombia- gcordobaguerrero@gmail.com

³ Dirección Metropolitana de Gestión de Riesgos del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito

Palabras clave: Flujo de lodo, Complejo volcánico Pichincha, Titan2F

INTRODUCCIÓN

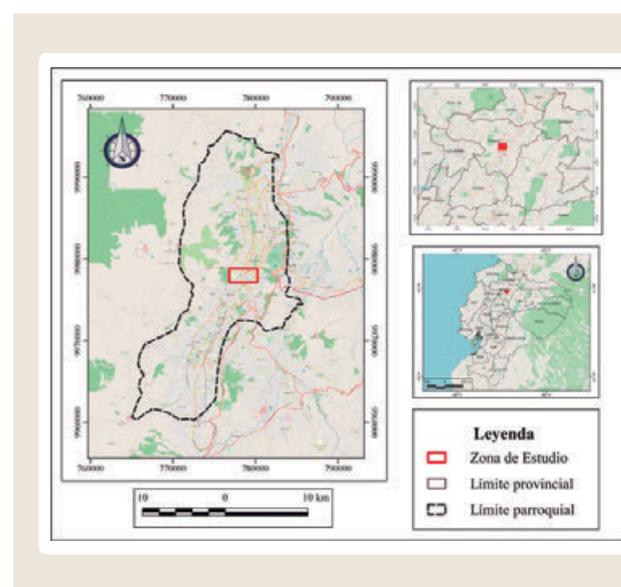
El Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), capital del Ecuador, está localizada en una cuenca a 2800 m.s.n.m. en el denominado Valle Interando. Se desarrolla en un contexto geológico marcado por la presencia de las laderas asociadas al complejo volcánico Pichincha al oeste y una serie de colinas, expresión de un sistema de fallas inversas al este.

En el límite urbano occidental del DMQ existen cerca de 85 quebradas que se alimentan del agua de escorrentía del Complejo volcánico Pichincha, y a lo largo de la historia y desarrollo de la ciudad, han sido reemplazadas o modificadas por rellenos o alcantarillado (Fernández, 1990). La relación de la ciudad con las quebradas ha sido compleja debido a que son utilizadas como sitios para desalojo de basura, acumulación de escombros y la falta de políticas públicas o el incumplimiento de las mismas ha permitido un alto grado de exposición a fenómenos vinculados a la evolución y funcionamiento de dichos drenajes, como son movimientos en masa, hundimientos, flujos de lodo, inundaciones, entre otros.

Desde el siglo XIX se ha documentado en la prensa escrita quiteña la afectación por flujos de lodo en sitios relacionados a drenajes intervenidos por el humano. Siendo uno de los más recordados el flujo de lodo o aluvión de La Gasca (sector residencial relacionado a la zona de estudio), del 25 de febrero de 1975, con un volumen aproximado de 52 000 m³, un espesor del depósito de 20 a 50 cm, que movilizó escombros, bloques de tamaño métricos, fragmentos de árboles y dejó como resultado dos muertos, destrucción parcial de varias viviendas, automóviles y la afectación a las vías del sector (Feininger, 1975).

A finales de los años 90 y en la primera década del siglo XXI se realizaron intervenciones ingenieriles (obras estructurales de mitigación) a varios de los drenajes de las laderas del Pichincha, incluida la quebrada El Tejado, mediante la construcción de presas de embalse de cemento armado, presas de tierra, diques, rejillas para la retención de lodo, túneles de desvío de las aguas, canalización parcial de algunas quebradas, entre otras obras (Sierra, 2009).

Desde el año 2019 la ciudad comenzó a enfrentar de nuevo la afectación directa por flujos de lodo generados en los drenajes intervenidos de las laderas del Pichincha, siendo el caso de mayor impacto por el número de víctimas mortales (más de 20) el ocurrido la tarde del 31 de enero de 2022, caso de estudio de la presente propuesta.



► Fig. 1 – Mapa de ubicación de la zona de estudio relacionado con el flujo de lodo de la quebrada El Tejado. Tomado de Rondal (2022).

Flujo de lodo de la quebrada El Tejado

La zona de deposición e impacto del flujo de lodo de la quebrada El Tejado, se localiza en el sector centro norte de la ciudad de Quito (Fig. 1).

El 31 de enero de 2022 aproximadamente a las 18:00 (hora local) (Dirección Metropolitana de Gestión de Riesgos, 2022) producto de las intensas lluvias en la cuenca, se produjo un flujo de lodo que afectó a los sectores denominados La Comuna y La Gasca. El análisis de los archivos multimedia publicados en redes sociales sugiere que una hora antes del evento se reportó al SISECU-911 el taponamiento del colector en la quebrada El Tejado (Sánchez, 2022).

El flujo de lodo recorrió una distancia de 3.2 km desde el sector de La Comuna (desde el colector) hasta la Avenida 6 de diciembre (UCE, 2022) y considerando su comportamiento se dividió en 4 secciones (Fig. 2) (Rondal, 2022):

1. La zona de impacto directo
2. Eje norte (Calle Núñez de Bonilla)
3. El eje sur (Avenida La Gasca)
4. La zona distal (Avenida 6 de diciembre)

El eje norte y sur no pueden ser considerados una misma sección debido a que sus comportamientos (como flujo y depósito) son totalmente diferentes y son resultado de estructuras antrópicas (escombrera de origen urbano) que erosionó el eje norte en su desarrollo.

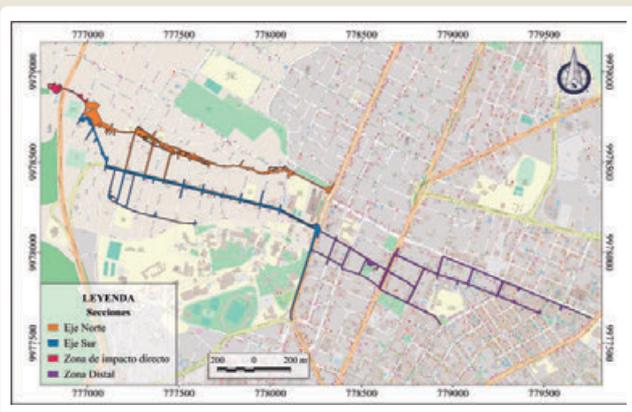
Rondal (2022) señala que la zona de impacto directo (zona roja en la Fig. 3) corresponde al sector de La Comuna y de acuerdo con el video de la cámara de seguridad del conjunto residencial "Colinas de la Gasca" (UTM: 776943.23, 9978750.99) a las 18:09 (tiempo local), el material acumulado en el colector se desbordó y avanzó hasta la cancha de vóley Belisario Quevedo. En esta zona el flujo mostró un comportamiento turbulento, arrastrando automóviles, troncos de hasta 3 metros, cercas de malla y escombros hasta de 1.5 metros de longitud. Este sector se consideró como una zona de erosión debido a las pendientes entre 12° y 5° de inclinación y el espesor del depósito fue de hasta de 1 cm.



► Fig. 3 – Zonas de afectación, Sector La Comuna. Tomado de Rondal, 2022.

El flujo del lodo al llegar a la cancha Belisario Quevedo destruyó la estructura asociada y se llevó a cerca de 50 personas que se encontraban ahí en ese momento (Radio Pichincha, 2022). En esta zona el flujo se dividió en 2 ramales, uno que continuó por la calle N24C al norte y la otra por la calle José Berrutieta hasta llegar a la Avenida La Gasca, al sur (Fig. 3).

En el caso del eje norte, el flujo abarcó desde la cancha de vóley a lo largo de las calles N24C y Núñez de Bonilla hasta la avenida América y las transversales Francisco Lizarazu, Domingo Espinar y Fernández de Recalde de oeste a este (Fig. 4).



► Fig. 2 – Secciones del depósito del aluvión de la quebrada El Tejado. Tomado de Rondal, 2022.



► Fig. 4 – Zonas de afectación eje norte. Tomado de Rondal, 2022.

Esta sección del flujo tuvo un comportamiento distinto al eje sur debido a que, al este de la cancha de vóley, separado por un talud de 35° de inclinación, se encontraba una escombrera con material de origen urbano no consolidado. El talud causó un efecto de cascada que provocó el impacto directo del flujo en el depósito generando un efecto erosivo que permitió enriquecer de material (sedimentos y escombros) al flujo norte (Fig. 5).



► Fig. 5 – Zona de afectación del eje norte. Detalle de la influencia del flujo de lodo sobre la escombrera (zona con escalones tipo terraza en el cuadro rojo) y la presencia del talud al este de la cancha de vóley. Tomado de El Comercio, (2022).

En el eje sur el flujo avanzó a lo largo de la calle José Berrutieta y las avenidas La Gasca y América, se observó el aporte de material hacia la calle Diego Zorrilla al sur por el pasaje Atacames y las calles Francisco Javier Lizarazu y Romualdo Navarro (Fig. 6).

En la avenida La Gasca el flujo tuvo una alta capacidad de carga transportando automóviles, contenedores de basura, escombros y troncos de hasta 2.5 metros, el espesor promedio del depósito a lo largo de la avenida fue de 5 centímetros. En esta sección se observó un comportamiento de olas debido a que la fracción de material más grande (hasta 4 metros) se depositó y la parte acuosa se acumuló y desbordó nuevamente generando este fenómeno (Rondal, 2022). De manera adicional se señala que la huella de la inundación máxima, dejada en las paredes, en la Avenida La Gasca fue de aproximadamente 35 centímetros.

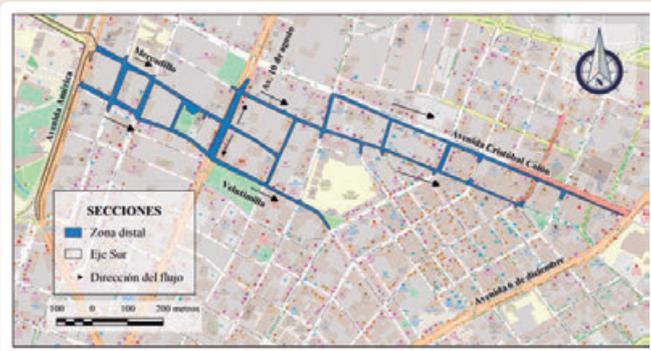


► Fig. 6 – Zonas de afectación en el eje sur. Tomado de Rondal, 2022.

El flujo llegó hasta la intersección con la avenida América a las 18:38 (tiempo local) (Sistema de videovigilancia del ECU911, 2022) y durante 30 minutos el flujo se desarrolló con un promedio de 4 olas por minuto (Rondal, 2022).

En la zona distal el flujo avanzó siguiendo el cauce de la calle Alonso de Mercadillo afectando a las transversales hasta llegar a las avenidas principales como la 10 de agosto, Cristóbal Colón y 6 de diciembre. Durante el levantamiento de información realizado el 2 de febrero de 2022 se determinó que el depósito en esta zona estaba conformado de material primario y removilizado. El espesor promedio fue de 5 cm, a excepción de la avenida 10 de agosto y su intersección con la calle Alonso de Mercadillo en donde se acumuló una gran cantidad de material abarcando un área total de 2937 m² con un espesor promedio de 54.9 cm. La

mayor zona de acumulación se encontró en las inmediaciones del parque Santa Clara de Millán (Fig. 7 y Fig. 8). El cambio de comportamiento en el espesor se debe a que en la zona se evidenció la presencia de una depresión topográfica (propia del territorio) y la influencia de las estructuras (desniveles de las calles) que actuaron como barreras al avance del flujo de lodo hacia el este.



► Fig. 7 - Zonas de afectación en el eje distal Tomado de Rondal (2022).

La acumulación del material detallado en la Fig. 8 fue resultado del cambio de pendiente de la calle Mercadillo, desde la avenida América hasta la altura del colegio Spellman con un valor de 5° que gradualmente cambia a 0° . Los parterres de la avenida 10 de agosto también influyeron en la deposición del material en la zona, ya que presentan un desnivel de 26 centímetros, haciendo que el flujo choque con esta estructura y se desvíe hacia los lados por la avenida Ignacio de Veintimilla al sur y la calle Luis Cordero al norte (Fig. 8).



► Fig. 8 - Detalle de la zona de acumulación en el eje distal en el sector del Parque Santa Clara de Millán, Calle Mercadillo y Avenida 10 de Agosto. Tomado de Rondal (2022).

Las mayores afectaciones se registraron en la zona de impacto directo y el saldo total del evento fueron 28 fallecidos, 52 heridos y 1 persona desaparecida; los daños materiales provocados a los inmuebles incluyeron un total de 55 viviendas afectadas, de las cuales 7 colapsaron, 27 fueron declaradas no habitables y 14 con cerramientos colapsados, además afectó a 555 personas pertenecientes a 160 familias (Municipio de Quito, 2022). En toda la zona de afectación se identificó el colapso del sistema de alcantarillado, el cierre total o parcial de vías de transporte, caída de poste de energía eléctrica, lucro cesante de locales comerciales, entre otros.

Características generales del depósito

De acuerdo a Rondal (2022), el depósito del flujo de lodo cubrió un área de $122\,790.74\text{ m}^2$, extendiéndose un máximo de 3.2 km hacia el este y 500 m de norte a sur. El volumen del depósito sólido fue de $7\,162.77\text{ m}^3$ y del flujo considerando sólidos y líquidos fue de $46,218.91\text{ m}^3$, estos valores corresponden a un flujo de tamaño pequeño, con una velocidad muy rápida (0.75 m/s) y con la suficiente cantidad de agua que le permitió comportarse como un líquido de acuerdo con la clasificación de Cruden y Varnes (1996). Los valores de volúmenes señalados no pueden ser considerados como finales debido que existen incertidumbres relacionadas a la pérdida de material en la red de alcantarillado y en los pisos subterráneos de varias edificaciones.

El depósito estaba conformado por 3 tipos de materiales: orgánico (hojas, ramas o pedazos de corteza), antrópico (fragmentos de concreto, ladrillos, carbón y plásticos) y litológico, constituido por clastos de pómez, fragmentos de roca de composición andesítica y dacítica y fragmentos minerales de cuarzo, plagioclasa, anfíboles y magnetita. La fuente de los componentes litológicos corresponde al Complejo Volcánico Pichincha descrito en los trabajos de Barberi et al. (1992) y Robin et al. (2010) como un complejo compuesto por dos edificios: Rucu Pichincha (comprende andesitas ácidas, básicas y dacitas) y el Guagua Pichincha que corresponde al centro activo del complejo (formado principalmente por depósitos de flujos piroclásticos y caída de pómez).

El análisis textural permitió determinar que los fragmentos de andesitas y dacitas son subangulosos a

subredondeados, en tanto que los fragmentos minerales de plagioclasa, cuarzo y anfíboles fueron angulosos a subangulosos. Las propiedades mencionadas indican que el material litológico y mineral no sufrió intensos procesos de transporte y su fuente era proximal. En cambio, los fragmentos de pómez (pertenecientes a la misma fuente) estaban redondeados debido a la acción erosiva del tipo de transporte en la quebrada y su baja resistencia a la abrasión (Rondal, 2022).

Con respecto a los componentes antrópicos se resalta que se relaciona con la ocupación e influencia de las actividades humanas desde los 3000 m.s.n.m hasta la zona del colector en la quebrada El Tejado. Otra fuente que alimentó de material al depósito, fue la escombrera con materiales de origen antrópico no consolidado, ubicada al este de la cancha de vóley Belisario Quevedo (Fig. 3 y Fig. 5).

Modelamiento del evento

Para realizar este tipo de análisis, se requiere el uso de un programa capaz de modelar las condiciones bifásicas de este tipo de flujos, para lo cual se recurre en este trabajo al programa Titan2F, que simula mezclas de agua-sólido con distintas concentraciones sobre un modelo digital de elevación (DEM) o de terreno (DTM). El DEM se obtuvo gracias al Municipio del Distrito Metropolitano de Quito con resolución de un metro por pixel. Este programa describe diferentes características del flujo simulado como la velocidad, concentración de sólidos y presión dinámica para cada punto de la malla computacional. Titan2F requiere como datos de entrada: las coordenadas de localización de la pila de material inicial, su altura, velocidad y concentración de sólidos (Córdoba et al, 2018).

Para tener en cuenta el intrincado canal que son las calles, se recurrió a extraer la información catastral del sector de La Gasca en el DEM. La información catastral utilizada, se restringe con el levantamiento del área de influencia del flujo, como se observa en la Fig. 9. Una vez extraídos los bloques de edificios, se procede a corregir y alisar el DEM por posibles errores o vacíos en el mismo, o como resultado de la extrusión. La Fig. 9 muestra el resultado de esta operación, donde se observan sobre el DEM, curvas de nivel y los bloques de edificaciones.



► Fig. 9 – Modelo digital de elevación con curvas de nivel del sector afectado por el deslave del 31 de enero de 2022. Se pueden observar que se han extruido sobre el DEM los bloques construidos permitiendo delinear las calles por donde sucedió el flujo.

Una vez realizado el tratamiento del DEM, se procedió a definir las condiciones iniciales que aseguren un modelamiento con condiciones muy similares a las presentadas en el evento real. El volumen de sólidos depositado fue de aproximadamente 7.000 m³. Para el estimar el volumen total a modelar, se analizó la huella del flujo y se la comparó con el espesor medio del depósito, lo cual permitió deducir como una primera aproximación, un porcentaje de agua de aproximadamente 37%, resultando en un volumen total que fluyó por las calles, bajo lo asumido, de unos 19.000 m³. Tras un análisis fotográfico del volumen de escombros movilizad por el impacto del deslave se dedujo que su volumen incorporado, incluyendo el agua, debió ser de unos 8.000 m³; por tanto se tiene para el deslave de la quebrada El Tejado unos 11.000 m³. La pila correspondiente a los escombros se ubicó en el lugar que fue usado como escombrera. Debido al alto costo computacional del modelamiento, se optó por ubicar el material proveniente directamente de la quebrada El Tejado dentro del perímetro urbano. Se realizaron varias pruebas dividiendo este volumen en varias pilas. Un análisis aproximado de la velocidad de llegada de la avalancha al túnel indicó que debió ser de alrededor de 2.5 m/s. Sin embargo, sea cual fuere la configuración y cantidad de las pilas en que se dividió el volumen, se encontró que a la salida del túnel la velocidad resulta aproximadamente entre 4 m/s. Por otra parte, iniciar la pila dentro del túnel, condujo a inestabilidades computacionales que se prefirió evitar. Por lo anterior se optó por ubicar dos pilas contiguas de material justo a la salida del túnel, con 5.000 m³ y 6.000 m³, como se observa en la Fig. 10.



► Fig. 10 – Ubicación de las pilas de material iniciales. En azul, el material proveniente de la quebrada El Tejar, a la salida del túnel. En rojo la pila de material correspondiente a los escombros que fue incorporado por el flujo.

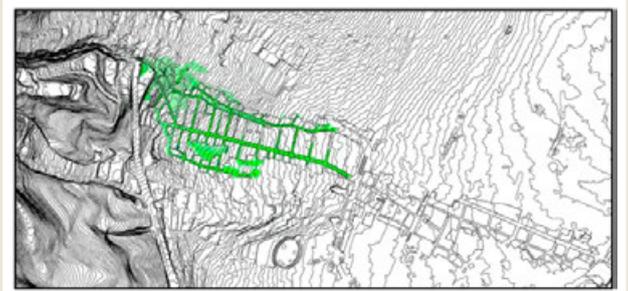
El siguiente parámetro que requiere Titan2F es la concentración inicial de sólidos. Del análisis de los depósitos, como el contenido de humedad, huella del flujo y profundidad del depósito, como se menciona más arriba, se llegó a estimar una concentración volumétrica de sólidos media de un 37%.

Con estas condiciones iniciales de entrada, se procede a realizar la simulación. Es de notar que debido a la complejidad del canal artificial en que se convierten las calles, se tiene un alto costo computacional, del orden de un día y medio de cómputo por cada minuto simulado. La Fig. 11 muestra cómo el flujo se dispersa en dos ramas. La rama norte incorpora los escombros y por inercia avanza acelerada y peligrosamente por las calles N24C y Núñez de Bonilla, con presiones dinámicas capaces de derribar y arrastrar personas, y de afectar muros no confinados que sufran impacto frontal. En la rama sur fluye más lentamente con gran control topográfico donde un pequeño talud casi vertical desvía esta rama hacia la Avenida La Gasca. Adicionalmente la rama norte, por la calle Francisco Lizarazu aporta material al flujo de la rama sur llegando a la Avenida La Gasca antes que el flujo que desciende originalmente por esa rama.

El modelo muestra que pasados 8 minutos se ha definido claramente el flujo entre las calles Núñez de



► Fig. 11 – El deslave a los 60 segundos de simulación. Se nota como el flujo se ha dividido en dos ramas principales. Detalles en el texto.



► Fig. 12 – El flujo después de 8 minutos después de su paso por el túnel. Nótese que, a ese tiempo, la rama sur es la que más material lleva consigo.

Bonilla y la Avenida La Gasca, notándose como la rama norte continúa aportando material a la rama sur, en especial cuando se presentan alteraciones estructurales que fuerzan al flujo a desviarse por los ramales que conectan a estas calles, como se ve en la Figura 12. Lo anterior resulta en que gran parte del flujo fluya por la rama sur. La velocidad media predicha por el programa a este tiempo es de aproximadamente 0.8 m/s.

El modelo muestra también las oleadas que se forman unas en cambios topográficos y otras cuando llega el aporte de material desde las calles ortogonales al flujo. Estas oleadas se pueden corroborar con los videos tomados por la ciudadanía.

Discusión y conclusiones

El flujo de lodo del 31 de enero de 2022 de la quebrada El Tejado fue detonado por las intensas lluvias registradas en la cuenca, pero agravado por el componente antrópico relacionado con la presencia de las obras de mitigación dentro del drenaje, el diseño de las vías y la existencia de escombreras de origen urbano en la zona de impacto.

De acuerdo al volumen del depósito (menos de 10000 m³) y la extensión (3.2 km), este evento es considerado como de pequeña magnitud, que debido a la alta exposición de la población y a las dinámicas del territorio (presencia de una estructura deportiva), generó un desastre local con más de 28 víctimas mortales y 1 persona desaparecida.

En conclusión, el flujo de lodo, aunque puede ser considerado como relativamente pequeño, ocasionó un desastre debido a la ausencia de políticas públicas de planificación y uso del territorio, así como a la falta de herramientas del cumplimiento de las mismas.

El aporte tanto de los estudios geológicos como los resultados de las simulaciones numéricas desarrolladas en este trabajo, ayudaron a entender la dinámica del flujo al entrar a la ciudad de Quito, particularmente el efecto de colocar material en la ruta del deslave, el cual fue incorporado por el flujo, aumentando su volumen, inercia e impacto.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo brindado por las autoridades de la Universidad Central del Ecuador, la Facultad de Ingeniería en Geología, Mina, Petróleos y Ambiental y la Carrera de Geología para el levantamiento de la información en la zona afectada. Los análisis granulométricos fueron realizados gracias a la ayuda de los laboratorios de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la UCE. El análisis del comportamiento del flujo de lodo fue gracias al acceso brindado a los vídeos de las cámaras de vigilancia por parte del Sistema Integrado de Seguridad del ECU-911. El modelamiento se realizó en las instalaciones del Grupo de Investigación Grama de la Universidad de Nariño, Colombia.

REFERENCIAS

- ▶ Barberi, F., Coltelli, M., Ferrara, G., Innocenti, F., Navarro, J., & Santacroce, R. (1988). Plio-Quaternary volcanism in Ecuador. *Geol. Mag.*, 1-14.
- ▶ Cordoba, G., Sheridan, M.F., Pitman, B., 2018. Titan2F code for lahar hazard assessment: derivation, validation and verification. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 70, 611-631.
- ▶ Cruden, D. (1991). A Simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43, 27-29.
- ▶ Dirección Metropolitana de Gestión de Riesgos. (2022). Aluvión sector La Comuna y La Gasca. Informe de Puesto de Mando. Quito.
- ▶ El Comercio. (Febrero de 2022). Especiales El Comercio, Aluvión en La Gasca. El Comercio. Obtenido de <https://especiales.elcomercio.com/2022/02/aluvion-la-gasca-galeria-donaciones-mapa/#galeria>
- ▶ Feiniger, T. (1976). El Flujo de escombros en La Gasca. Un informe científico. Quito: Boletín de la Sección Nacional del Ecuador.
- ▶ Fernández, M. (1990). El medio físico de Quito: sus limitaciones y su incidencia en la adaptación del hombre. Quito.

- ▶ Radio Pichincha . (02 de Febrero de 2022). Obtenido de Situación en La Comuna y La Gasca, tras aluvión: <https://www.facebook.com/PichinchaRadio/videos/696725658415957/>
- ▶ Rondal Viscaíno, N. (2022). Caracterización del depósito del flujo de lodo de la quebrada El Tejado, Quito, 31 de enero del 2022 (Bachelor's thesis, Quito: UCE).
- ▶ Sánchez, K. (2022). [@Lesliekatherine2]. (4 de febrero del 2022). Esto fue lo que realmente pasó, pero jamás me imagine que sera una catástrofe [Video]. Obtenido de: https://www.tiktok.com/@lesliekatherine2/video/7060274235595427078?is_from_webapp=1&sender_de_vice=pc&web_id=7110656154522748421.
- ▶ Robin, C., Samaniego, P., Le Pennec, J. L., Fornari, M., Mothes, P., & Van Der Plicht, J. (2010). New radiometric and petrological constraints on the evolution of the Pichincha volcanic complex (Ecuador). *Bulletin of volcanology*, 72(9), 1109-1129.
- ▶ Sierra, A. (2009). La política de mitigación de los riesgos en las laderas de Quito: ¿qué vulnerabilidad combatir? *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, (38(3)), 737-753.
- ▶ Sistema de Videovigilancia del ECU911. (31 de enero de 2022). La Gasca y Francisco Viteri
- ▶ Universidad Central del Ecuador, Comisión Técnica. (2022). ANÁLISIS PRELIMINAR DEL FLUJO DE LODOS DE LA QUEBRADA EL TEJADO. Quito.