



Análisis de Mitigación Estructural de Lahares en el Poblado de Melipeuco, Derivados del Volcán Llaima, Chile, Valor de la Ciencia Mapuche, de la Observación Permanente.

Structural Mitigation Analysis lahars in the Melipeuco Town, Derivatives Llaima Volcano – Chile, Value of Mapuche Science, Permanent Observer.

Álvaro Amigo¹, Carolina Silva¹, Patricio Saavedra²

INFORMACIÓN DEL ARTICULO

Historial del artículo:

Recibido
23-09-2014
Aceptado
27-09-2014
Publicado
10-11-2014

Palabras Claves:
Modelación numérica
Mitigación estructural
Saberes Mapuche

Article history:

Received
23-09-2014
Accepted
27-09-2014
Available
10-11-2014

Keywords:
Lahar
Digital Model
Structural measures

¹Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN Ministerio de Minería - Gobierno de Chile)

²Universitat de Barcelona (Master UB-UAB)
Patriciosaavedrap@gmail.com, teléfono: 56-09-76997580

Resumen

El Poblado de Melipeuco está ubicado a 14 km del cráter del estratovolcán Llaima este volcán es considerado uno de los volcanes más activos de latino américa. Desde el año 1640 a la actualidad, presenta 50 erupciones documentadas. Los lahares del volcán Llaima se originan, en su mayoría, por la súbita descarga de agua subglacial generada por la rápida fusión de nieve y/o hielo durante las etapas álgidas de una erupción y también de la incorporación de los productos generados durante la erupción que los causa.

En esta investigación se han modelado zonas de inundación por flujos laháricos mediante el programa computacional LAHARZ, usando volúmenes de lahares de otros volcanes ubicados en los Andes del Sur como el Villarrica, Calbuco y Chaitén. El desarrollo de las medidas estructurales (mantención de obras y obras nuevas), combinadas con medidas no estructurales (monitoreo instrumental, educación, planes de evacuación, etc.), es considerado fundamental en la prevención y mitigación del riesgo por flujos laháricos. Conocer el entorno natural como medida de mitigación es un aspecto fundamental que este trabajo rescata. Es por ello que se le otorga un carácter intercultural a través de la consideración de los saberes mapuche. Esto para profundizar en la eficiencia y eficacia de las intervenciones, en tanto, la sobrevivencia exitosa de esta cultura en la zona aportará, sin duda, simples pero efectivas recomendaciones para saber dónde edificar y disminuir una variable importante, la exposición a los riesgos naturales.

Abstract

The town of Melipeuco is settled 14 km south of the Llaima volcano. It is considered one of the most active volcanoes of Latin America. More than 50 eruptions have been recorded from 1640 to date. The lahars of Llaima volcano originated by the sudden discharge of sub-glacial water derived from the rapid melting of snow and ice during the aligid stage of the eruptions. In addition, the incorporation of the products generated during the eruption itself, increase flow volumes. Also moraine deposits are efficiently incorporated into the flows.

Inundation areas downstream from the volcano have been estimated using a numerical model. In this case the LAHARZ model was used. The volumes considered for simulations are similar to those estimated for volcanoes in the southern Andes, such as Villarica, Calbuco and Chaiten volcanoes. The development of facilities is considered fundamental to mitigate the potential effects of lahar flows. These facilities, however, should be accompanied by unstructured measures such as education and emergency plans. Knowing the natural environment is a key aspect of risk mitigation and a fundamental part of this project. Because of that it is given a strong intercultural character from the consideration of the Mapuche and their knowhow. This greatly increases the efficiency of all development by sharing the knowledge of the local people. This will, without a doubt, provide information on safer construction site selection and will limit an important risk factor, the exposure to natural hazards.

Introducción

Para diseñar obras de ingeniería que aporten a la mitigación estructural es necesario obtener información respecto de los parámetros físicos de los lahares. Datos en torno a sus volúmenes, caudales, velocidad son requeridos para establecer tiempos en planes de evacuación de la población y como datos para elaborar modelaciones numéricas. Lo anterior debe vincularse al establecimiento de cuáles son las zonas más vulnerables, de tal manera, que el análisis de mitigación estructural realmente sirva a la reducción del impacto sobre las estructuras existentes y a la planificación de obras futuras.

Lo indicado es un objetivo principal del estudio, al que se agrega rescatar el conocimiento ancestral mapuche. Este es fundamental para entender la mitigación desde un posicionamiento epistemológico-que la ciencia debe considerar- pertinente a los saberes y prácticas de las personas que se ven afectadas por estas en la zona. Es así que nuestro análisis incorpora una mirada interdisciplinaria que cruza los saberes occidentales (geología, ingeniería) con aquellos conocimientos construidos al respecto por las comunidades mapuches.

Para llevar a la práctica lo indicado se escogió la zona de Melipeuco Región de la Araucanía, Chile. Allí se encuentra el volcán Llaima considerado uno de los volcanes más activos de Latinoamérica.

Zona de Estudio: A lo largo de Sudamérica, la Cordillera de los Andes presenta cuatro segmentos con volcanismo activo (López et al., 1995), lo cual es consecuencia de la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. La Zona Volcánica Sur (ZVS), localizada entre las latitudes de Santiago de Chile y Coihaique (33-46°S), es el segmento de mayor longitud, con 1.450 km. Corresponde, además, al sector con la mayor actividad eruptiva andina, abarcando 31 volcanes con registro histórico de erupciones, entre ellos dos de los volcanes más activos de Sudamérica: Llaima y Villarrica. De este modo, esta zona concentra cerca de 120 erupciones históricas desde 1558, que constituyen aproximadamente el 30% de las erupciones documentadas a lo largo de los Andes chilenos. (Naranjo y Moreno., 2005).

El estratovolcán Llaima (latitud 38°41,5'S, longitud 71°44'W, altura 3.125 m s.n.m.). Desde el año 1640 a la actualidad presenta 50 erupciones documentadas. Los rasgos más significativos en su estilo eruptivo durante los últimos cuatro siglos, es que ha seguido un modelo claramente fisural y de flanco, con centros de emisión ubicados entre los 2.000 y 2.250 m s.n.m.. Estos centros de emisión se ubican hacia los flancos norte y sur, alineados según una orientación NNE. (Naranjo y Moreno., 2005). El poblado de Melipeuco está ubicado al sureste del volcán Llaima a 14 km del cráter. Esta localidad, se encuentra en una zona de muy alto peligro, suscepti-

ble de ser afectada por lahares, durante erupciones originadas en el edificio principal y/o en los cráteres adventicios orientales, tales como las ocurridas entre los siglos XVII a XX (Moreno y Naranjo, 2003). Situado en la región de La Araucanía, la más pobre de Chile (CASEN, 2011), con una población de 2.572 personas (CENSO, 2002 y la actualización realizada posteriormente a nivel de municipalidad con la aplicación de la Ficha de Protección Social aplicada a toda la comuna entre los meses de Enero y Abril del año 2007).

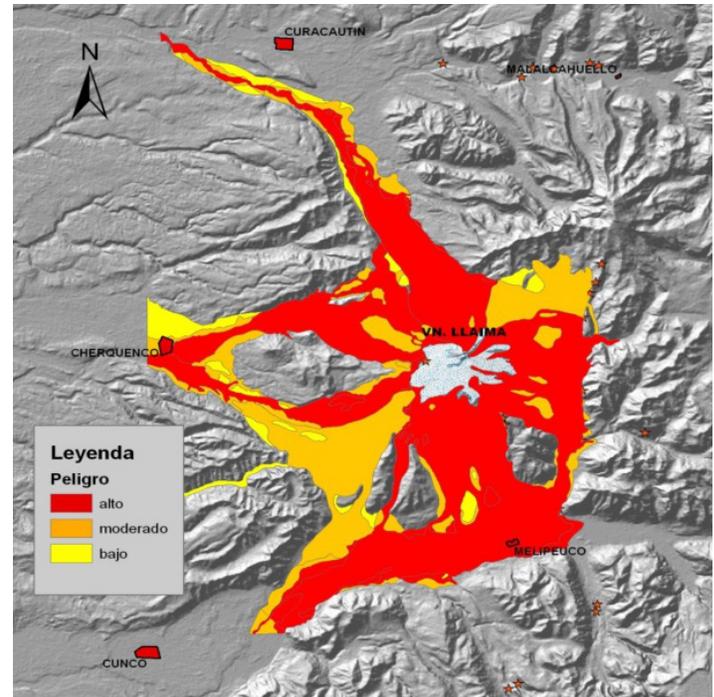


Figura 1: Mapa de Peligros Volcánicos del volcán Llaima, en colores rojo, naranja y amarillo, las zonas que pueden ser afectadas por coladas de lavas y/o lahares durante un evento eruptivo, y en recuadros rojos, la ubicación de los poblados cercanos, de norte a sur, Curacautín, Malalcahuello, Cherquenco, Melipeuco, Cunco; escala 1:75.000. (Fuente: Moreno y Naranjo 2003).

Ubicación y Accesos

El volcán Llaima está ubicado en la IX Región de la Araucanía, Provincia de Cautín (38°41,5'S-71°44'W), 85 km en línea recta al este de la ciudad de Temuco, dentro del Parque Nacional Conguillío-Los Paraguas, comuna de Vilcún. El acceso al volcán se puede realizar a través de tres rutas principales desde la ruta 5 Sur. A los sectores noreste y norte del volcán se accede por el camino pavimentado que une victoria Victoria con Curacautín (56 km) o mediante la ruta pavimentada desde Lautaro (57 km). La parte occidental se alcanza por el camino pavimentado desde la localidad de Cajón hacia Cherquenco (45 km), hasta las canchas de esquí Llaima (21 km). Al sector sur se accede desde Temuco a Melipeuco (107 km). La zona oriental del volcán se puede rodear mediante un camino que une las localidades de Melipeuco y Curacautín (77 km). Por otra parte, el sector occidental se puede rodear caminos secundarios que unen las localidades de Melipeuco con Cherquenco y esquí Llaima con Captrén.

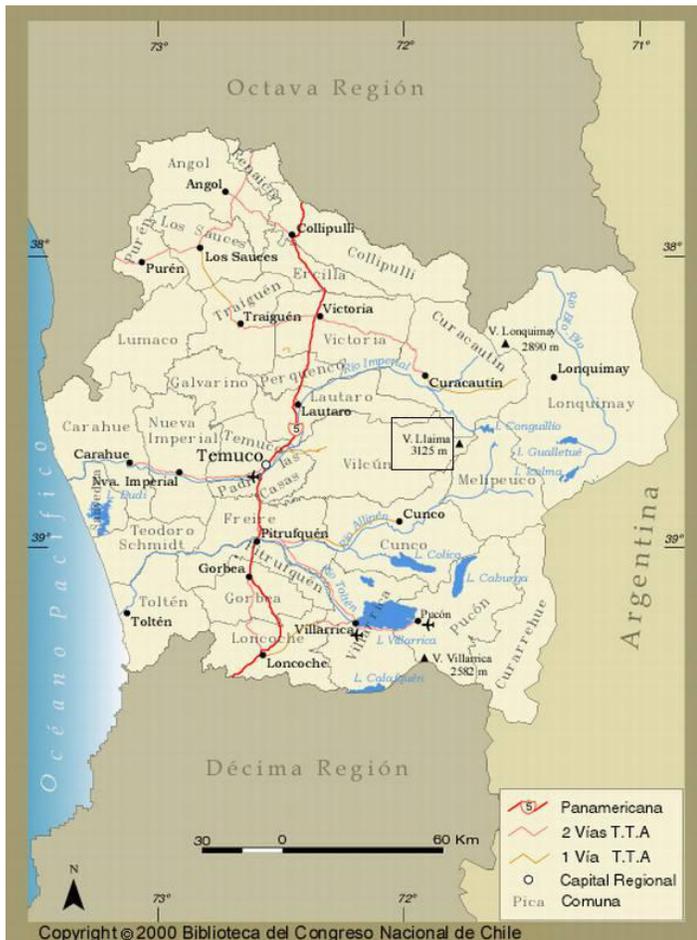


Figura 2: Ubicación y accesos al volcán Llaima. (Fuente: Tomado y modificado de <http://imageshack.us/photo/my-images/709/mapallaima.jpg/>)

Geología del Volcán Llaima

El volcán Llaima cubre una área elíptica de unos 500 km² y tiene un volumen de alrededor de 400 km³, por lo cual es uno de los volcanes más voluminosos de la ZVS. Su base presenta una altitud media de 740 m. s.n.m. y el cono volcánico se eleva hasta 3.125 m. s.n.m., con 50 erupciones documentadas desde el año 1640 hasta 2012. (Naranjo y Moreno, 2005). En su primera etapa, edificada durante sucesivas erupciones de lava fluida tanto del conducto central como de sus flancos dieron origen a un volcán de escudo, sobre el cual se desarrolló un cordón fisural de dirección noreste en su flanco occidental. Con posterioridad, se edificó el cono principal de aproximadamente 1.400 m de altura. El edificio presenta dos cimas y la más prominente es la septentrional, con una altura de 3.125 m. s.n.m, separada de la cima sur de 2.930 m. s.n.m. por un portezuelo de 750 m de longitud. Producto de las erupciones del 2008-2009 el cráter principal se encuentra obstruido por conos piroclásticos y ya no presenta fumarolas permanentes, la cumbre sur

presenta restos de un pequeño cono de escorias anidado en otro mayor, ambos con débiles fumarolas y abiertos hacia el sureste debido a un deslizamiento. El complejo volcánico comprende cerca de 40 conos adventicios de escorias, situados principalmente en su flanco occidental y nororiental, según un alineamiento principal de 25 km de longitud y dirección noreste. Otros se encuentran en el flanco suroccidental.

Según diversos criterios geológicos, en el volcán Llaima se han definido tres unidades evolutivas. La primera representada por el volcán escudo (Llaima Ancestral), que comprende una secuencia de lavas andesítico-basálticas, y más escasas basálticas y andesíticas (52,5-56,64% SiO₂). Este primer y voluminoso habría alcanzado, sobre su base, una altura similar a la actual.

Sus coladas más tardías, en consecuencia, se emplazaron bajo lenguas glaciales. El volcán Llaima Ancestral habría colapsado durante una gran erupción explosiva (13 ka), que generó una caldera y un depósito ignimbrítico andesítico-basáltico con un volumen estimado en 24 km³. Esta etapa explosiva continuó hasta los 7 ka con erupciones plinianas y flujos piroclásticos dacíticos y andesíticos. Una segunda unidad de tipo fisural se construyó en el flanco occidental y norte del volcán, y comprendió numerosos centros eruptivos adventicios (Llaima Fisural). Los materiales emitidos comprenden andesitas-basálticas a andesitas (54-58,6% SiO₂) y los centros adventicios son ligeramente más silíceos que el volcán principal edificado a continuación.

La construcción del edificio o cono volcánico principal (tercera unidad) de tipo combinado estratovolcán-mixto, se habría iniciado con posterioridad a los 3 ka, con un periodo efusivo y explosivo con emisión de lavas y piroclastos de composición andesítico-basáltica predominante y con basaltos francos (51-55,7% SiO₂).

Los Lahares

El término “lahar” es una palabra del idioma de Java (Indonesia) que se utilizó para describir a una “brecha volcánica transportada por el agua”. Los lahares (Pierson and Scott, 1999) son divididos en base a la relación sedimento/agua en: flujos de escombros (debris flows) y flujos hiperconcentrados (hyperconcentrated flows, Pierson and Scott, 1985), (Pierson, Smith & Lowe, 1991) y transformaciones que llevan a la formación de flujos normales de corriente (normal streamflows). En la actualidad hay una tendencia de usar flujo de escombros y lahar como sinónimos, para enmarcar todo el espectro de este tipo de flujos, en donde la fase hiperconcentrada es simplemente la respuesta a la dilución del lahar por incorporación de agua (lahar runout) (Iverson and Vallance, 2001, Murcia, 2008).

Los Lahares del Volcán Llaima se originan, en su mayoría, por la súbita descarga de agua subglacial generada por la rápida fusión de nieve y/o hielo durante las etapas álgidas de una erupción. Los fragmentos primarios de los depósitos laháricos provienen principalmente de depósitos morrénicos removidos en sectores de alta pendiente y también de los productos generados durante la erupción que los causa. Los depósitos de morrenas sobre los flancos del volcán son eficientemente incorporados e incrementan la masa de flujos laháricos. (Naranjo y Moreno 2005).



Figura 3. Ciclo eruptivo del volcán Llaima del año 2008-2009, flanco sur occidental al S. (Fuente: SERNAGEOMIN Chile)

Los Lahares del Volcán Llaima se originan, en su mayoría, por la súbita descarga de agua subglacial generada por la rápida fusión de nieve y/o hielo durante las etapas álgidas de una erupción. Los fragmentos primarios de los depósitos laháricos provienen principalmente de depósitos morrénicos removidos en sectores de alta pendiente y también de los productos generados durante la erupción que los causa. Los depósitos de morrenas sobre los flancos del volcán son eficientemente incorporados e incrementan la masa de flujos laháricos. (Naranjo y Moreno 2005).

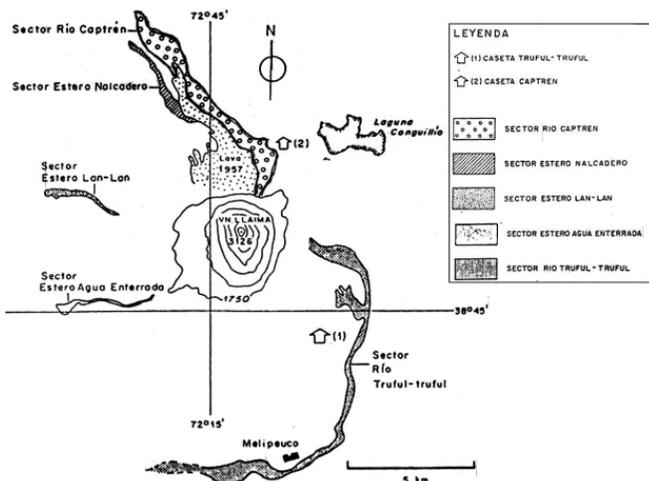


Figura 4: Mapa esquemático que muestra la distribución de los flujos laháricos del Volcán Llaima (Fuente: Quinteros, 1991)

Parametros de los Lahares

La peligrosidad asociada con los lahares se atribuye a su magnitud (volumen y extensión), la cual a su vez depende del volumen de agua disponible, del gradiente y de la profundidad de las barrancas o drenajes, de la fluidez del flujo y de la cantidad de material suelto en los alrededores del volcán. La magnitud del lahar también se relaciona con los componentes de la erupción volcánica, como son, el tipo de erupción, la frecuencia, magnitud y duración del evento y con el volumen del aporte de agua. La duración del evento eruptivo es un factor que influye significativamente en la determinación del volumen y en la magnitud del caudal líquido que se genera. (A. Martínez et al., 2006).

Velocidad (m/s): Pierson (1998) publica un método empírico para estimar tiempos de viajes para flujos de masas volcánicas húmedas. Donde se basa en datos históricos, el principal enfoque utilizado en este estudio fue: (a) obtener datos empíricos fiables sobre el tiempo de viaje para los flujos de masas húmedas de diferentes caudales y tipos de numerosas volcanes (algunos datos sobre los flujos no volcánicos se utiliza cuando los datos sobre flujos volcánicos no estaban disponibles); (B) agrupar estos datos de acuerdo con el caudal, un factor relacionado con la velocidad del flujo y por lo tanto a su tiempo inverso de viajes.

$$Q=V.A=V.d.w$$

Donde Q: Caudal, m³/s; V: Velocidad del flujo; A: Área transversal del flujo (m²); d: Profundidad del canal; w: Ancho del canal.

Y (C) se correlacionan por grupos distancia desde la fuente (variable independiente) contra el tiempo de viaje (variable dependiente), con el fin de obtener ecuaciones de regresión que podrían ser utilizados para estimar flujo de los tiempos de viaje en otros volcanes. Debido a que las tasas de flujo por lo general disminuyen con la distancia recorrida (Pierson 1995), caudales cercanos a la fuente se utilizaron en las regresiones. Los caudales cercanos a la fuente se define como el caudal pico medidos o estimados tan cerca como sea posible la fuente de flujo, por lo general entre 0 y 15 km de la cima del volcán, que es la zona donde las descargas máximas se caracterizan por ser más grande (Pierson, 1995).

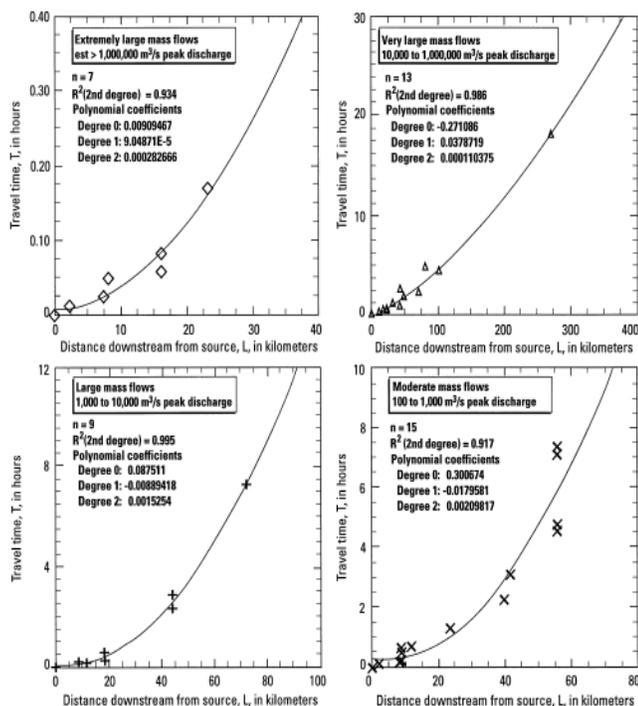


Figura 4: Mapa esquemático que muestra la distribución de los flujos lahárlicos del Volcán Llaima (Fuente: Quinteros, 1991)

El Caudal (m³/s).

Mizuyama et al. (1992) proponen una fórmula para caudales máximos de flujos volcánicos húmedos. A partir del volumen de los flujos.

- $Q_p = 0.0188 V^{0.790}$ (para flujos ricos en arcilla) y
- $Q_p = 0.0135 V^{0.780}$ (para flujos granulares),

Donde Q_p es el caudal máximo de descarga y V es el volumen de flujo. Las curvas de regresión proporcionan una base empírica para estimar el tiempo de viaje de flujos de masas potencialmente catastróficos. Estas relaciones También proporcionan una base empírica para la verificación o calibración modelos predictivos de ordenador.

Metodología

El presente trabajo se ha realizado aplicando métodos de simulación numérica mediante el uso del modelo LAHARZ y DEM ASTER. El estudio se desarrolla a partir de los datos recogidos en campo, identificando zonas de inundación pasadas o potenciales.

Simulación de Lahares

Modelos digitales de terreno (Digital Elevation Model, DEM). El uso de modelos numéricos computacionales para la simulación de zonas de inundación debido a flujos lahárlicos, requiere la utilización de modelos digitales de terreno (DEMs) sobre los cuales éstos sean aplicados. Los DEMs se pueden obtener de diversas fuentes y, a través de diferentes métodos. Cada uno de estos modelos tiene su fuente de error, por lo que se requiere un estudio de sensibilidad en los diferentes modelos a utilizar con cada uno de ellos. Asimismo, es necesario efectuar un análisis de las ventajas y desventajas de los diferentes DEMs, para determinar el que mejor se ajusta a los propósitos deseados (Castruccio, 2008). En este análisis se utilizará como DEMs el ASTER.

El ASTER (siglas de Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) es uno de varios sensores que lleva el satélite Terra de la NASA, orbita la tierra a 705 km de altura, con un intervalo de repetición de 16 días. El ASTER consta de 3 subsistemas que proveen una capacidad multiespectral de 14 bandas. Las bandas 3N y 3B poseen una resolución espacial de 15 m y corresponden al par estereográfico utilizado para generar el DEM. El DEM fue construido utilizando el software ENVI 4.2, con una resolución horizontal de 30 m, que es el doble de la resolución espacial de la imagen, debido a la mayor confiabilidad que la obtenida con una resolución mayor (Huggel et al., 2007).

LAHARZ es un programa computacional, desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos en 1998 (Iverson y Schilling, 1998) que permite delinear zonas de peligro volcánico, asociadas a la posible inundación generada por flujos lahárlicos a través de un método semiempírico. Este modelo está implementado en el ambiente ArcGIS y ha sido ampliamente utilizado en el mundo en diversos volcanes alrededor del mundo (Schilling et al., 2001; Canuti et al., 2002; Stevens et al., 2002; Hubbard et al., 2006, por citar algunos ejemplos). El método utiliza una combinación de análisis dimensional y estadístico para determinar las áreas de inundación transversal (A) y planimétricas (B) generadas por el flujo lahárlico, en función del volumen de éste (Figura 11), a través de una serie de ecuaciones en que asume una masa y densidad constante y, por lo tanto, un volumen constante, se llega a las siguientes relaciones

(los detalles de la derivación de las ecuaciones se encuentran en Iverson et al 1998):

$$A = CV^{2/3}$$

$$B = cV^{2/3}$$

En que V es el volumen del lahar, C y c son constantes adimensionales.

Para calcular las constantes adimensionales C y c, se utilizan los datos de volumen e inundación de 27 lahares en 9 volcanes determinados a partir de depósitos y observaciones de lahares recientes, más algunos datos de experimentos en flujos de volumen más pequeño. Las ecuaciones quedan de la siguiente manera, modificadas por Castruccio 2008, para el volcán Villarrica.

$$A = 0,005 V^{2/3}$$

$$B = 200 V^{2/3}$$

Con estas 2 ecuaciones se puede predecir las áreas de inundación producidas por lahares de diferentes volúmenes. El punto en el cauce a partir del cual el flujo lahático comienza a inundar es definido por la intersección del cauce con el límite de la zona de peligro cercano, definido por el usuario, de acuerdo a la geología e historia eruptiva del volcán (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998). El uso de este programa computacional presenta las siguientes ventajas y desventajas:

Ventajas:

Facilidad y rapidez en el uso del programa, lo que permite resultados en poco tiempo, para luego analizarlos. Economía de recursos, solo se necesita un modelo digital de terreno del área que se desea estudiar, lo que permite realizar la delimitación de las zonas de peligro en áreas de difícil acceso o que no han sido estudiadas anteriormente.

Desventajas:

Se utilizan simplificaciones, como el uso de un volumen constante, la determinación arbitraria del punto de partida del cual comienza a depositar un flujo lahático y considerar que un evento lahático consiste en un solo pulso. Calibrados con depósitos y flujos laháticos y no laháticos, ocurridos en otros lugares que pueden tener un comportamiento muy distinto al de los volcanes chilenos de los Andes del Sur. Es un modelo semi-empírico y no físico, lo que impide estudiar la dinámica del flujo, o incorporar propiedades reológicas al modelo. (Castruccio, 2008).

Riesgo Geológico

El riesgo geológico es el resultado de la ecuación $R = P \times E \times V \times Valor$ Donde R=Riesgo; P=Peligrosidad es la probabilidad de ocurrencia de un Fenómeno Natural, su magnitud y frecuencia en el tiempo son condiciones importantes.

E= Exposición es la probabilidad de ser afectado por un fenómeno natural, por ejemplo por un lahar.

V= Vulnerabilidad, es el aporte del elemento a afectar por ejemplo la materialidad, calidad de una vivienda.

Valor= Es el costo en vidas humanas y/o socio-económicos de los elementos bajo riesgo, en general es un valor económico.

En general la mitigación estructural se centra en la disminución de la variable exposición, reduciendo cuales quiera de estas variable a cero el resultado de la ecuación será cero, no hay riesgo.

Técnicas de Mitigación

Hay dos tipos básicos de las medidas de prevención y mitigación de los desastres relacionados con los lahares:

Medidas estructurales, Las medidas estructurales se refieren a la intervención física mediante el desarrollo o refuerzo de obras de ingeniería, interviniendo directamente en la vulnerabilidad, por ejemplo, instalaciones de control de erosión (activo). Las medidas no Estructurales donde se encuentran el desarrollo de programas preventivos, por ejemplo, sistemas de alerta y evacuación, reglamentos de uso del suelo (pasivo). Ambos tipos se combinan para producir medidas eficaces para prevenir y reducir el daño de los flujos de escombros.

El desarrollo de las medidas estructurales es considerado fundamental para la prevención de los flujos de escombros. En Japón esta tecnología se ha desarrollado considerablemente y se denomina ingeniería "SABO" (Sabo, termino japonés para referirse al control de la erosión mediante obras (Mizuyama, 2008). Ejemplos de algunas instalaciones construidas en terreno son presas que detienen los flujos, áreas de dispersión y áreas deposición de flujos, embalses de decantación, zonas de dispersión forestadas, diques y canales de orientación del flujo, drenaje de presas naturales o lagos volcánicos mediante túneles, construcción de canales de drenaje, entre otros. Se requieren medidas no estructurales durante la construcción de las medidas estructurales y también después del finalizar la construcción de las obras para que puedan ser más eficientes en términos de protección. Las obras para controlar el flujo de escombros se pueden clasificar en (Fig. 6):

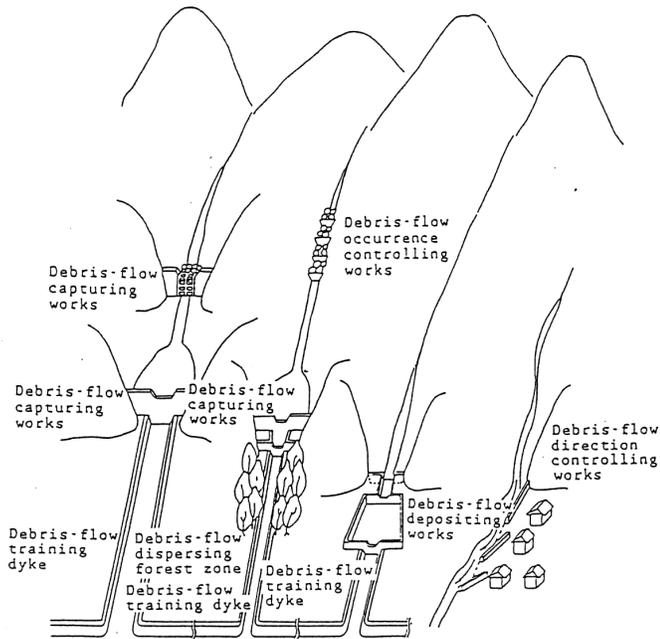


Figura 6: Esquema Principales obras para la prevención de desastres por flujos de escombros, (Fuente: T. Yamada, 1993)

- 1) Obras de reducción de la ocurrencia de un flujo
- 2) Obras que detienen el flujo.
- 3) Obras de canalización para controlar la trayectoria del flujo
- 4) Diques de orientación del flujo
- 5) Dispersión del flujo en zonas forestadas.
- 6) Embalses de decantación de los flujos.

Es necesaria una combinación de múltiples unidades o diferentes estrategias, ya que las instalaciones individuales suelen ser insuficiente. El tamaño de la instalación y las estrategias utilizadas variarán de acuerdo a las condiciones topográficas locales, la viabilidad de la construcción, el costo, la capacidad de volumen del río y fuerzas externas, etc. Lo esencial para la reducción eficaz del peligro de desastre y el daño, es la implementación de las medidas tanto estructurales como las no estructurales, juntas y en combinaciones apropiadas que respondan a las condiciones de descargas de los sedimentos de cada volcán en particular. (T. Yamada, 1993).

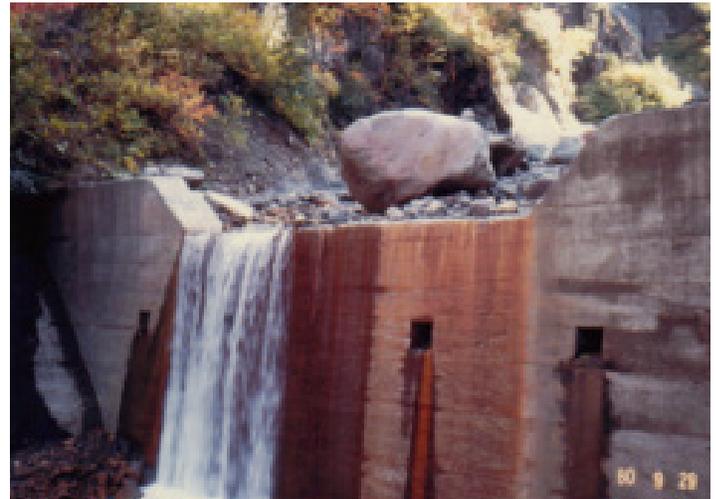


Figura 7. Presa de hormigón SABO (tipo cerrado), detiene y drena el agua del flujo de escombros. Se usa como estructura extremo aguas arriba (Fuente: Mizuyama, T.; 2008)



Figura 8. Presa SABO de tubos de acero (tipo abierto) ha atrapado grandes rocas del flujo escombros en la isla de Rishiri-Japón en 2007. (Fuente: Mizuyama, T.; 2008)



Figura 9. Presa SABO de tubos de acero, se usa como estructura extremo aguas abajo del torrente de arrastre. Su apertura es pequeña, casi igual al diámetro de las rocas transportadas en la parte delantera de flujo de escombro. (Fuente: Mizuyama, T.; 2008).



Figura 10. Presa SABO de concreto con hendidura. Las barras de acero se han instalado en la ranura, la rendija actúa como drenaje quitándole el agua al flujo y el muro detiene las rocas. (Fuente: Mizuyama, T.; 2008).



Figura 11. Muestra planta del Pueblo de Chaitén sobre una imagen de Google Earth de enero de 2013 y en rojo el trazado para el enrocado del lado sur para el año 2013 en la que se aprecian los enrocados construidos en la ribera norte el año 2010-2011.



Conocer el entorno natural como medida de mitigación, saberes del pueblo mapuche.

Como es de conocimiento socio histórico, los antiguos LOF Mapuche (comunidades Mapuche), constituyeron la base social familiar y de linaje de la estructura política del territorio Mapuche. Estos fueron instalados en un proceso de larga data, en teorías que sostienen un proceso superior a los 10 mil años.

El momento uno de la instalación de un LOF territorial Mapuche, responde a las mismas circunstancias y condiciones que se generó en todo el proceso de asentamiento humano de todos los seres humanos del mundo. Los Mapuche lo hicieron partir de concepciones cosmovisionales muy profundas, que la tierra donde se instalaron, fue entregada y asignada por la divinidad, y por entidades tutelares de poderes sobrenaturales, como que en el caso mapuche llamamos en la propia lengua vernácula, "NEWEN".

Txeg-Txeg y Kay-Kay, ese Newen, permitió que la tierra emergiera de las aguas, y en ese espacio físico emergido, se instalaron los mapuche en el momento UNO de esos tiempos inmemoriales. Así el Epew, plantea claramente que el asentamiento UNO de los Mapuche, incidió para que se diera por principio cósmico, divino, el sentido de propiedad colectiva de su territorio. (Ñanculef, 2008).

La cosmología mapuche ubica su propio origen después de un gran diluvio provocado por la gran serpiente de los mares, Kai Kai; la otra gran serpiente de la tierra Treng Treng que habita sobre los volcanes, aconseja a los hombres de subir hasta a las cimas para protegerse; todo quedó inundado y todo comenzó de nuevo con el gran diluvio (Epeu Mapuche), esto no es otra cosa, de cómo la ciencia mapuche de la observación permanente del territorio explica los efectos de los procesos naturales de subducción en la región, la gran actividad sísmica que provoca estragos. La serpiente Kai Kai, serpiente marina representa a mi juicio, la corteza oceánica o sea, la placa de nazca que desliza por debajo de la continental representada por la serpiente Treng Treng, la serpiente de tierra, simboliza la tierra y la salvación del hombre del diluvio e inundaciones, en general de las catástrofes naturales. Es bueno enfatizar cómo la cosmogonía, las creencias, los mitos y leyendas se forjan para dar explicaciones del entorno que les rodea y que en esas circunstancias generan estrategias de sobrevivencia que se ubican entre líneas en dichas historias y también en los planteamientos verbales de los habitantes.

En mapudungun, dialecto mapuche existe una palabra "ina rumen", palabra compuesta que significa la observación constante, de algún fenómeno o del algo que se estudia permanentemente, es lo que la cultura de los pueblos originarios han hecho por siglos, por lo que el conocimiento que dominan sobre los aspectos naturales son envidiables a la ciencia occidental, lo que vuelve su cono-

cimiento profundo y no superficial, por ejemplo yo comienzo el texto diciendo que el estrato Volcán Llaima, desde el año 1640 a la actualidad presenta 50 erupciones documentadas (conocimiento occidental), El pueblo mapuche de la zona lleva observando y conviviendo con el Ngen del volcán, siglos este registro no está en una biblioteca o en una página web, está en los conocimientos transmitidos de generación en generación a sus comunidades.

El nombre del territorio del Llaima se debe al volcán (zeguiñ) del mismo nombre. Los relatos orales y los testimonios de cronistas dicen que el antiguo nombre del volcán era Chañel, por tener la forma de una mano con sus dedos. Luego de una gran erupción, el Chañel (mano) cambió su forma, pasando a llamarse Llaima (venas de sangre). (Linker, S.; Neira, P.; Romero, I; 2011).

El ser humano, y en especial la cultura mapuche estableció y establece relaciones con la naturaleza, la que es vista como un ser vivo que interactúa con los humanos. Los Ngen son los dueños y protectores de todas las "cosas" de la naturaleza, y la fuente de donde nace el newen (fuerza) del mapuche. En la cultura mapuche hay poderes (Newen) buenos y malos, capaces de proteger, enriquecer, y darle beneficios a las personas, pero también capaces de enfermar, empobrecer y hasta matar a los enemigos de sus dueños. El mundo de las aguas: ríos, lagos y mar. El mundo de la tierra, el mundo de los cielos, el mundo subterráneo, o de las fuerzas del mal, están poblados de seres y espíritus que interactúan con el mapuche, los enferman y alivian, protegen o arruinan. (Linker, S.; Neira, P.; Romero, I; 2011).

Considerando lo anterior se hace una división del territorio mapuche en relación a ecosistemas existen territorios destinados a los Ngen donde no es posible edificar o alterar de alguna manera, estos lugares que tienen un dueño, en este contexto puedo citar el "Gillatuwe" es el espacio territorial en el cual la comunidad mapuche realiza sus rogativas y ceremonias de carácter sagrado; Los "Menoko" son ecosistemas de agua donde convergen el Agua y la Tierra, y donde se generan el nacimiento de una serie de plantas medicinales únicas en su especie. Los "Txayenko" son un espacio único expresado por un pequeño salto de agua o cascada, en muchos casos asociados al ceremonial del "gillatun". Usualmente es reconocido como lugar propiciatorio, en el que se realizan oraciones para pedir por el bienestar personal y de la comunidad. Los "Pitxantus" son espacios eco sistémicos donde crecen asociados una serie de plantas relacionadas a la Pitxa que los hace ser un espacio único como un microentorno natural expresado en un humedal donde se recrea y mantiene un sistema de flora y fauna autóctona. Los "Malin" que son tierras bajas inundables, crece una flora y fauna endémica de humedal; Etcétera.

Todos estos y otros lugares de significación cultural están protegidos por el Ngen y por el mapuche por lo que no hay lucha entre estos dos mundos, los mapuches ubican sus casa en lugares altos

no inundables, destinan otros para agricultura, para ganadería y bosques.

En el caso particular de los riesgos asociados a los lahares ubican sus casas en lugares donde existen cerros de roca maciza (granitos) que genera un verdadero muro natural a la defensa de flujos laháricos, capaz de frenar y/o desviar el torrente; otro lugar de ubicación es a continuación de un bosque, este ayudará a detener rocas y disminuir las velocidades de los flujos que vienen desde el volcán y de cerros en pendiente; a continuación de canales, grietas, depresiones naturales que sirven como canales para desviar torrentes que vienen pendiente abajo; en lugares que hay menos productos piroclásticos como bombas volcánicas y rocas rodada cerro abajo, el tamaño de estos de igual forma es importante, esto indicaría que generalmente no llegan este tipo de producto a esa zona disminuyendo el riesgo de incendios y aplastamiento; Saber la ubicación de los ríos y riachuelos es importante a la hora de súb-

tas inundaciones por derretimiento de nieve o glaciares que están arriba en el volcán; Es importante observar si en las laderas del volcán o cerros existen formaciones rocosas o islas de vegetación que puedan desviar y reducir los tamaños de los flujos; observar la vegetación si es antigua o joven, si es antigua los flujos no pasan por esa parte si es más joven es muy probable que la vegetación antigua haya sido arrancada por los torrentes laháricos y ha nacido otra vez; El color del suelo, espesores de sus capas y las composiciones dirán si se trata de un flujo de detritos, flujo de lahar, o suelo firme. Lo observado en terreno indica claramente que las comunidades mapuches son las más protegidas frente a riesgos de lahares en el sector estudiado. Todas estas simples pero útiles observaciones son necesarias a la hora de decidir donde construir. Todas actúan directamente como obras de mitigación estructural natural. Que simplemente se centra en utilizar la naturaleza como ayuda en la prevención del riesgo disminuyendo la variable exposición al riesgo natural de lahares.

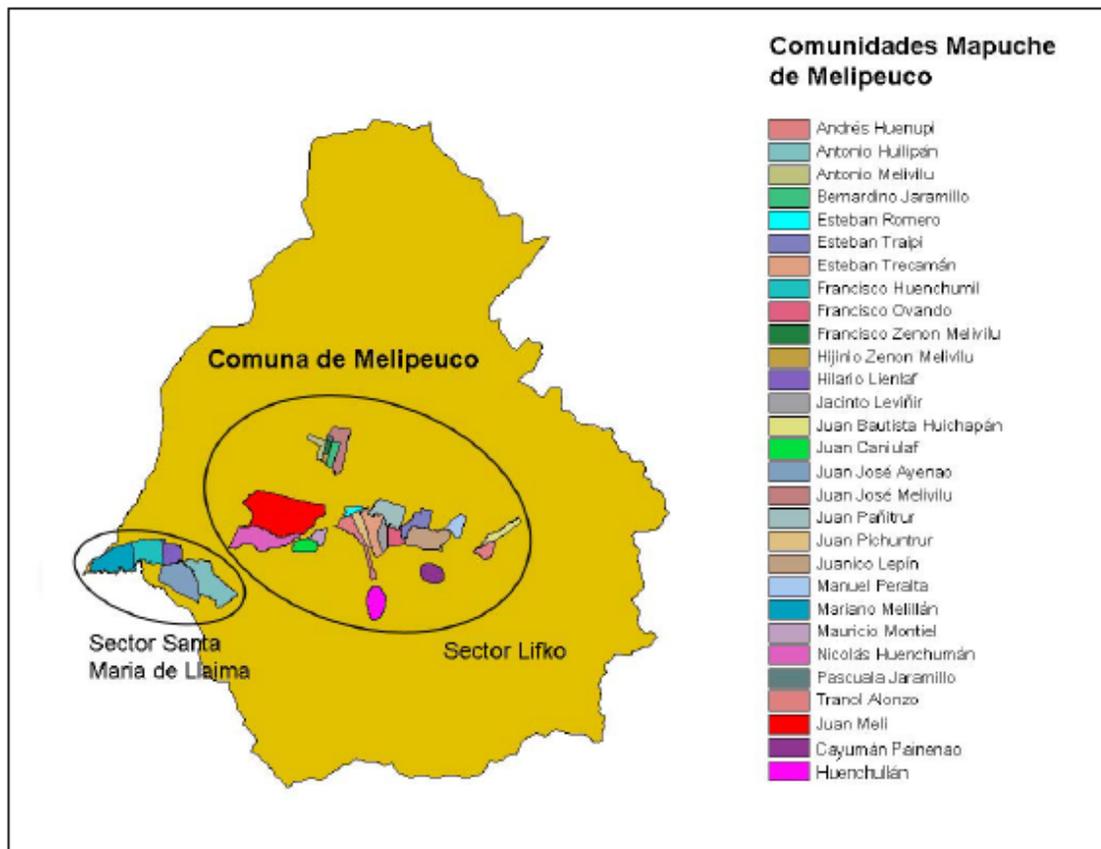


Figura 12. Mapa de comunidades mapuche de Melipeuco (Tomado y modificado de Linker, S.; Neira, P.; Romero, I; 2011)

Resultados más significativos

La cumbre y los flancos del volcán Llaima presentan seis glaciares que descienden hasta la cota 1.500 m. Entre ellos, los más extensos son el occidental y suroccidental con una superficie de unos 19 km² y un volumen total de agua equivalente estimado en 533x10⁶ m³. Se puede calcular el máximo volumen de lahar posible, multiplicando el volumen de agua equivalente por un factor de 2 o 3 para obtener el volumen de lahar. Eso da 1000 o 1500x10⁶ m³ lo que supera en un orden de magnitud los máximos mundiales de lahares generados por flujos piroclásticos. Los glaciares no se funden todos al mismo tiempo ni necesariamente en su totalidad. Con los ejemplos históricos, se podría hacer algunas estimaciones más realistas.

Para determinar el rango de volúmenes a modelar, se utilizan datos de lahares de volcanes ubicados en los Andes del Sur, Volcán Villarrica con volumen máximo de 100x10⁶ m³ y un volumen mínimo de 5x10⁶ m³, basados en las erupciones de 1940, 1948 y 1971 (Naranjo y Moreno 2004; Castruccio, 2008) y datos del volcán Calbuco con un rango de volúmenes de 5-50x10⁶ m³, erupción de 1961. (Lahsen et al., 1985; Castruccio, 2008) y el volcán Chaitén con un rango de 5-10x10⁶ m³ (SERNAGEOMIN, 2013). Por lo que, para el volcán Llaima se harán pruebas de simulación con volúmenes a partir de 1x10⁶ m³, 5x10⁶ m³, 10x10⁶ m³ y 50x10⁶ m³ con un factor H/L= 0,25 y un escenario extremo con volúmenes de 100x10⁶ m³, 500x10⁶ m³, 1000x10⁶ m³, 5000x10⁶ m³, factor H/L= 0,15 compararemos estos resultados con los mapas existentes para verificar la veracidad de la simulación.

Modelización Obtenida

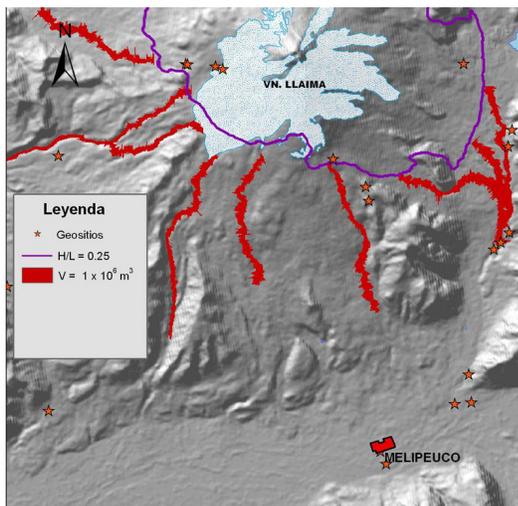


Figura 13. Zonas inundadas para un factor H/L=0,25 y un Volumen de 1X10⁶ m³, para este factor H/L y Volumen el pueblo de Melipeuco no se ve afectado. Probabilidad Alta de ocurrencia (Escala: 1:75.000)

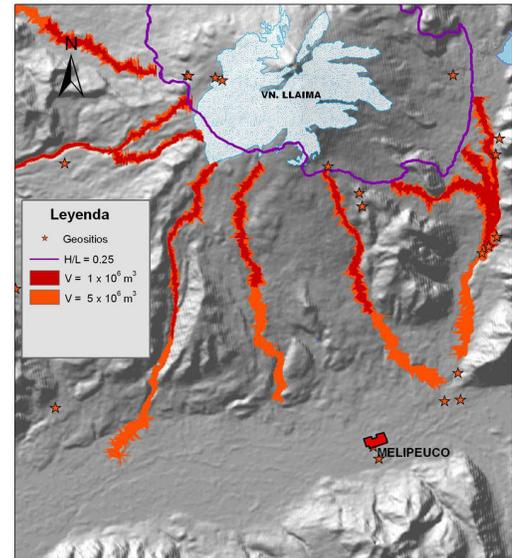


Figura 14. Zonas inundadas para un factor H/L=0,25 y un Volumen de 1X10⁶ m³ y 5X10⁶ m³, para este factor H/L y Volúmenes el pueblo de Melipeuco no se ve afectado. Pero si el lahar entra al río Truful- Truful. Podrían generarse inundaciones o pequeñas presas de material de escombros. Probabilidad media de ocurrencia (Escala: 1:75.000).

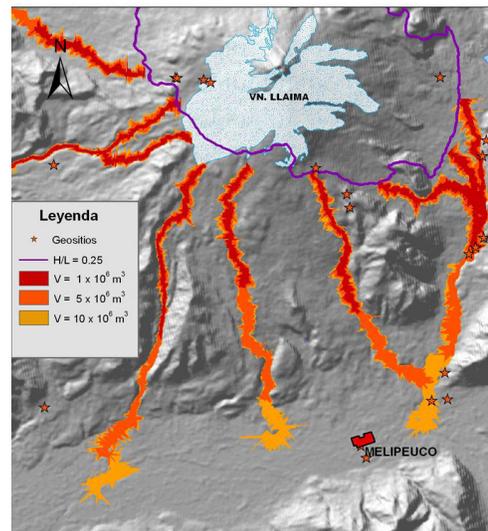


Figura 15. Zonas inundadas para un factor H/L=0,25 y un Volumen de 10X10⁶ m³, para este factor H/L y volumen el pueblo de Melipeuco no se ve afectado. Pero si el lahar entra al río Truful- Truful. Se generan inundaciones y presas de material de escombros. Probabilidad Media a Baja de ocurrencia (Escala: 1:75.000).

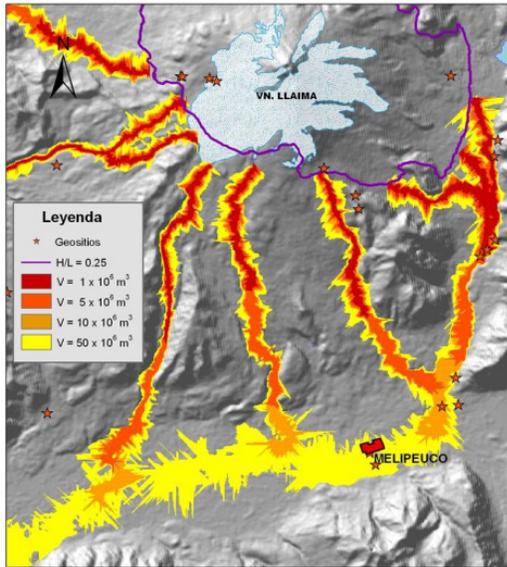


Figura 16. Zonas inundadas para un factor H/L=0,25 y un Volumen de 50x106 m3, para este factor H/L y volumen el pueblo de Melipeuco se ve afectado por el lahar. el lahar entra bloquea totalmente el río Truful- Truful. Este escenario lahárico es catastrófico para el pueblo. Probabilidad Baja de ocurrencia (Escala: 1:75.000).

Escenario extremo (baja probabilidad)

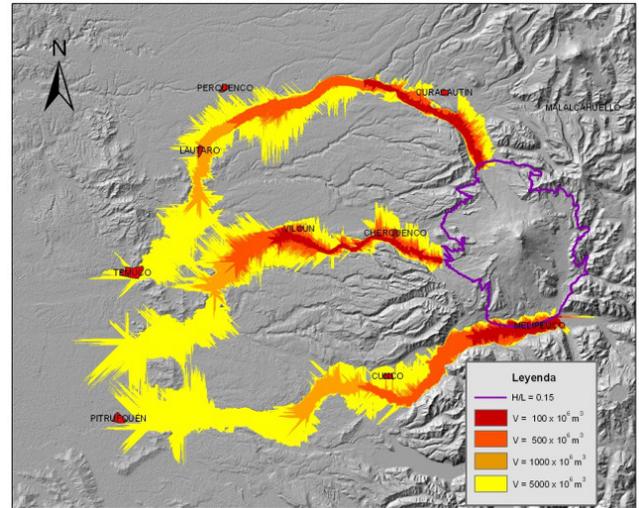


Figura 18. Para un escenario lahárico extremo poco probable con volúmenes de hasta 5000x106 m3, el pueblo de Melipeuco desaparece y los flujos laháricos llegan hasta la capital de la región Temuco, afectando a la gran mayoría de los poblados (Escala: 1:100.000).

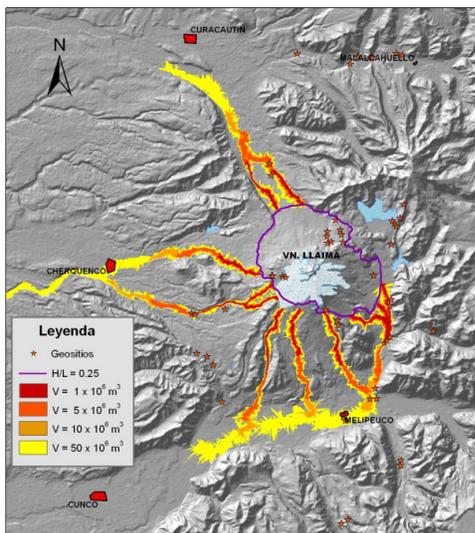


Figura 17. Modelación Resumen de posibles lahares en el volcán Llaima. Para el escenario de la figura 15 con mayor alcance panorámico, vemos que no solamente el pueblo de Melipeuco se ve afectado con el escenario lahárico con un volumen de 50x106 m3 y un H/L= 0,25 si no que también el pueblo de Cherpenco pertenece a la la comuna de Vilcún. (Escala: 1:75.000).

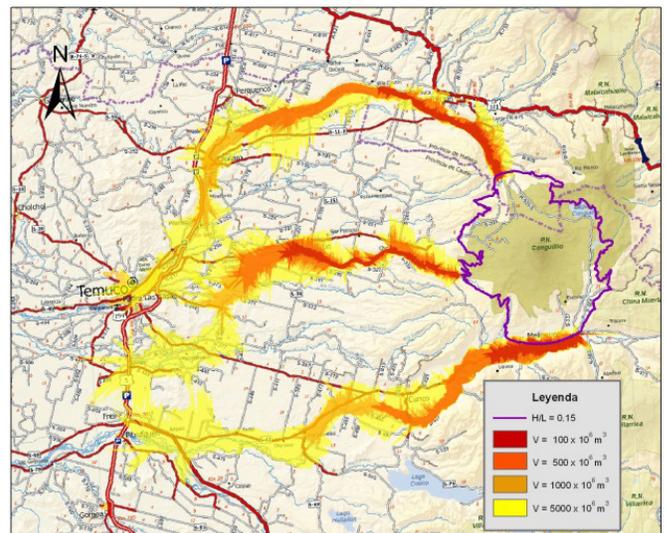


Figura 19. Muestra como se ve afectada toda la vitalidad de la región, dejandola totalmente incomunicada, con muchas perdidas en infraestructura vial, además de vidas humanas. Catastrófico total (Escala: 1:100.000).

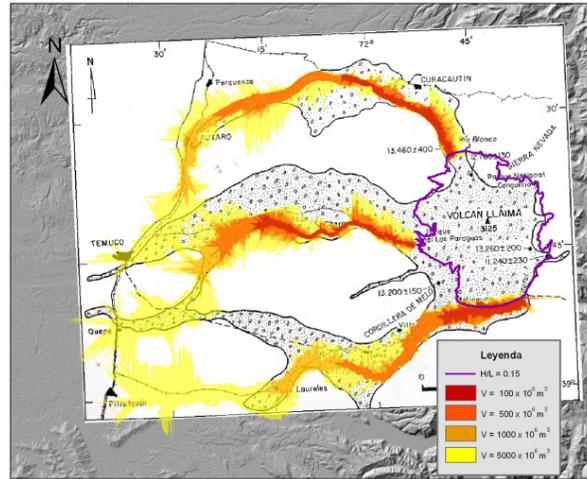


Figura 20. Muestra cartografía Área cubierta por la Ignimbrita Curacautín, hace cerca de 13 mil años (Naranjo y Moreno, 1991) con la superposición de la modelación para los diferentes volúmenes catastróficos con un factor H/L=0,15. Se puede observar la concordancia de las ignimbritas.

Volumen (m ³)	Caudales Máximos Q _p (m ³ /s)		Área Transversal (m ²)	Velocidad (m/s)	
	Para flujos ricos en arcillas	Para flujos granulares		Suelos arcillosos	Suelos granulares
1x10 ⁶	1.033	646	50	21	13
5 x10 ⁶	3.684	2.267	146	25	16
10x10 ⁶	6.370	3893	232	27	17
50x10 ⁶	22.717	13.663	679	33	20

Tabla 1 Determinación de Q_p aplicando la fórmula de Mizuyama (1992), utilizando los volúmenes aplicados en la modelación numérica. Área Transversal formula modificada del programa LAHARZ según Castruccio 2008 para el volcán Villarrica, se obtiene una velocidad empírica teórica en el instante en que el lahar comienza a inundar.

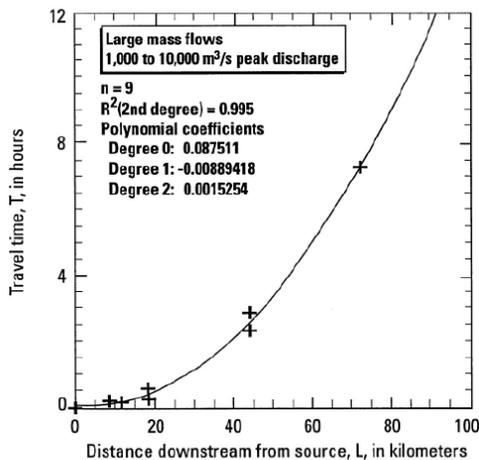


Figura 21. Utilizando los caudales entre 1.000 a 10.000 m³/s, referidos a la tabla 1, como lahares más probables, para determinar el tiempo de viaje, en la curva de regresión de Pierson, 1998.

OBRA	Monto (\$) Pesos Chilenos
Puente Triful-Triful (longitud 98, 94 m.)	1.700.000.000
Puente Huallerope (longitud aprox. 65 m.)	950.000.000
Puente García (longitud aprox. 55 m.)	850.000.000
Puente Medina (longitud aprox. 100 m.)	2.596.907.343
Camino Melipeucolcalma (4 km)	263.241.152
Proyecto de Agua Potable	62.398.000
Total	6.422.546.495

Tabla 2. Valorización de Pérdidas en Infraestructura Vial. (Datos obtenidos en terreno con el Departamento de Emergencia de la Municipalidad de Melipeuco, 2013)

Discusión de los resultados en relación a los objetivos planteados.

Los resultados obtenidos de la modelación con LAHARZ utilizando el DEM ASTER muestran zonas de inundación demasiadas estrechas, limitadas a las inmediaciones de los cauces. Esto se debería a que los sensores satelitales captan la cubierta vegetal como la superficie terrestre, generando un terreno mucho más irregular. Este problema ha sido ya analizado por Stevens et al (2002) y Hubbard et al. (2006) y en el volcán Villarrica por Castruccio (2008) en el volcán Llaima podría ocurrir lo mismo debido a los bosques existentes en dirección a los centros poblados.

De los objetivos planteados la determinación de la velocidad no es definitiva, dado que para su cálculo se utilizan la fórmula del programa LAHARZ modificada para el volcán Villarrica por Castruccio (2008), para mayor seguridad de la obtención de este dato se debe hacer un trabajo de campo para obtener las áreas transversales de los volúmenes de los lahares en terreno para el cálculo final de la velocidad de los flujos laháricos y aplicar Pierson (1998).

No se lograron obtener datos duros en cuanto a costos de las obras de ingeniería SABO, por lo que no se pudo hacer un cálculo real sobre la inversión en costos versus beneficio en obra.

Para la planificación de las obras futuras es necesario crear un plano regulador con las zonas de peligro, zonas de menor riesgo, zonas de depositación de los volúmenes laháricos lo que involucra tiempo, recursos y la participación de la Municipalidad de la Comuna de Melipeuco.

Es necesario el rescate de la ciencia mapuche de la zona, para incorporarlo al conocimiento occidental, fundamentalmente porque la experiencia de éstos contextos socioculturales con la mayoría de los proyectos de desarrollo que los impactan (económicos, transportes y comunicación, construcción, etc.), demuestra que las prácticas culturales, económicas y sociales que dichas poblaciones establecen con los territorios y ecosistemas, al no ser consideradas terminan afectando de manera negativa tanto su calidad de vida como sus espacios y prácticas culturales. (Esto debe incorporarse en el desarrollo).

Conclusiones y Sugerencias de Mitigación Estructural

Los resultados obtenidos de la modelación con LAHARZ utilizando el DEM ASTER, coinciden con cartografías existentes de lahares y mapas de riesgo. Melipeuco y Cherquenco son los centros poblados más susceptibles a los peligros por lahares derivados del volcán Llaima.

Para el diseño de las obras se deben usar los valores de caudales más desfavorables en este caso los de los flujos ricos en arcilla, se pueden construir en las zonas demarcadas en las simulaciones obtenidas por el programa LAHARZ aplicando la cadena de obras que sugiere la ingeniería SABO, presas de restrinjan la ocurrencia del flujo, presas de contención en la parte alta de los flancos del volcán Llaima, en el descenso del flujo obras de reducción del volumen de lahares, y más cerca del pueblo obras que puedan direccionar el flujo, también es muy necesario mantener la vegetación nativa e introducida existente para que puedan trabajar como elementos de dispersión de flujo, destinar zonas de depositación de los abanicos laháricos. La región de la Araucanía es la región más pobre de Chile, además de ser la zona más activa volcánicamente, lo que hace que la población sea más vulnerable ante un evento eruptivo. Medidas urgentes y económicas de ejecutar tales como:

- 1.- Limpieza, mantenimiento y canalización de cauce del río
- 2.- Zonificar áreas de menor riesgo para la aprobación de permisos de edificación que dependen del Director de Obras de la Municipalidad de Melipeuco. Una iniciativa de este tipo sería un aporte para una planificación futura, de forma tal de fomentar el crecimiento y desarrollo del poblado y de la comuna de manera más segura.
- 3.- Preparar al personal municipal y población en general a través de la educación para enfrentar y complementar planes de mitigación. Actualización de los planes de emergencias.



4.- La valoración en obra vial perdida solo en inundaciones de riberas ascendería a 6.422.546.495 pesos Chilenos unos 9.506.333 euros. Un enrocado como las características del Río Blanco en Chaitén tuvo un costo de 700.000.000 invertir en defensa es favorable, comparable al valor de perdida, tomando en consideración que no está incluido el costo de viviendas, siembras, servicios públicos, etc.

5.- La modelación con el programa LAHARZ utilizando el DEM ASTER, puede exagerar las zonas de inundación. Si nos apoyamos en los datos obtenidos en terreno por Quinteros, 1991 (figura 4), podemos ver que el poblado no se ve afectado directamente, los lahares pasados han rellenado la cuenca y suavizado el terreno, por lo que una nueva inundación por acción volcánica pasaría por sobre estos depósitos, lo que implica necesariamente defender las ribera norte del río Allipén para mitigar y salvaguardar el poblado de Melipeuco, es necesario trabajos en la ribera sur aguas abajo para defender de las inundaciones a comunidades mapuche aledañas al río.

7.- crear proyectos de Defensa de la Ribera en los inicios del Río Allipén Según la modelación y trabajos anteriores muestran que todos los lahares entran al curso del río, lo que implica una potencial e inminente inundación.

8.- Obra Nueva del Puente Huallupe para disminuir los terraplenes, se debe construir en el futuro puentes de mayor longitud apoyándose de fotos satelitales para que los terraplenes que intervienen en las obras de puente no actúen como diques contenedores de los volúmenes de detritos que ayudarían a la inundación. Y puentes de mayor altura para que la estructura no embanque el sedimento. 9.- Obras de despeje de Faja y Canalización de cauce de Río Allipén sobre todo en zonas de puentes que sirven para la evacuación de la población que lleva directamente al refugio construido en el 2009. Obras de Mantenimiento una vez construidas las obras es necesaria la mantención para su buen funcionamiento en el tiempo.

9.- También estudiar y evaluar las intervenciones como proyectos hidroeléctricos instalados en el río Triful-Triful, obras que influyen en la capacidad volumétrica del río.

Lo esencial para la reducción eficaz del peligro de desastre y el daño, es la implementación de las medidas tanto estructurales como las no estructurales, juntas y en combinaciones apropiadas que respondan a las condiciones de descargas de los sedimentos de cada volcán en particular y de las características sociales de su entorno (costo).

No hay que olvidar y debe tomarse en consideración el legado del pueblo originario mapuche de la zona que ha sabido y sabe convivir con el entorno natural respetando los espacios que les

corresponden a los Ngen o Pillán espíritus del volcán, rescatar la historia oral de las autoridades mapuche (lonko, machi, ancianos) que viven en la Comuna de Melipeuco para Integrar los diferentes conocimientos en la mitigación, dado que la observación es la base de toda la ciencia rescatar este conocimiento milenario para saber dónde construir y así disminuir al máximo la variable de exposición a la ocurrencia de un fenómeno natural.

Los tiempos de evacuación más desfavorables serían menores a 15 minutos, por lo que es necesario un monitoreo constante de la actividad sísmica del volcán, trabajo que actualmente desarrolla en OVDAS Observatorio de Volcanes de los Andes del Sur.

Este estudio no es definitivo, requiere de mejores modelos de evaluación digital y conocimiento más detallado del volcán y sus productos, además de la indagación e incorporación de los saberes mapuche.

Agradecimientos

A Directores: Álvaro Amigo, Carolina Silva; Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN Ministerio de Minería- Gobierno de Chile); Codirector: Joan Martí, (CSIC Consejo superior de Investigaciones Científicas- Ministerio de Economía y competitividad – Gobierno de España) A Manuel Schilling (SERNAGEOMIN); A Taka Mizuyama SABO, Universidad Kyoto, Japón; A Martín Valenzuela (D.R.O.H. Xª; Dirección de Obras Hidráulicas, Región de los Lagos) y al Comité de Emergencia de la Municipalidad de Melipeuco.

Iris Hernandez morales por revisiones y opiniones.

Necul Painemal por su claridad y conocimiento filosófico mapuche.

Dedicado a Pedro Valdivia H. (1946 – 2013).



Referencias Bibliográfica

Lopez-Escobar, L.; Parada, M.A.; Hickey-Vargas, R.L; Frey, F.; Kempton, P.D.; Moreno, H, 1995. Calbuco volcano and basaltic magmas in the SVZ of the Andes. Contributions to Mineralogy and Petrology, Vol. 119, p. 345-361.

Moreno, H.; Naranjo, J.A.2005. Geología del Volcán Llaima, Región de la Araucanía. Servicio Nacional de Geología y Minería SERNAGEOMIN, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, escala 1:50.000. ISSN 0717-7283.

Moreno, H.; Naranjo, J.A.2003. Mapa de peligros del volcán Llaima, Región de la Araucanía. Gobierno de Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental, escala 1:75.000.

CASEN, 2011 Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional www.observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/layout/doc/casen/pobreza_casen_2011.pdf (consultado el 11/05/2013)

CENSO, 2002 www.ineraucania.cl (consultado el 11/05/2013)

Pierson, T.C. and Scott, K.M. 1999, superficial hydrologic hazards and volcanoes: Debris avalanches, lahars and floods: Processes, interpretation of deposits, and techniques of hazard assessment and mitigation. U.S. Geological Survey Open-File Report. 137 p.

Pierson, T.C. and Scott, K.M. 1985. Downstream dilution of a lahar: Transition from debris flow to hyperconcentrated stream flow. Water Resources Research, 21: 1.511-1.524.

Pierson, Smith & Lowe, 1991, Lahars: Volcano-Hydrologic events and deposition in the debris flow-Hyperconcentrated Flow continuum, Sedimentation in Volcanic Settings, SEPM Special Publication No. 45. Copyright © 1991, SEPM (Society for Sedimentary Geology), ISBN 0-918985-89-7.

Iverson, R.M., and Vallance, J.W. 2001. New views of granular mass flows: Geology, Vol. 29, pp. 115-118.

Murcia H.F, Hurtado B.O., Cortés G.P. Macías, J.L. and, Cepeda H. 2008.The ~2500 yr B.P. Chicoral non-cohesive debris flow from Cerro Machín Volcano, Colombia. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 171: 201-214.

Quinteros, C., 1991, Estudios de los lahares del volcán Llaima, IX región de la Araucanía. Tesis de Grado de Geología. Santiago, Chile, Universidad de Chile.

Martínez, A; Gómez, A; Hernández, T., 2006, Metodología para la Evaluación de Peligros por Lahares, Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. México.

Pierson, T.C., 1998, An empirical method for estimating travel times for wet volcanic mass flows, U.S Geological Survey, Cascades Volcano Observatory; Bull Volcanol. 60 :98-109

Pierson, T.C., 1995, Flow characteristics of large eruption-triggered debris flows at snow-clad volcanoes: constraints for debris-flow models. J Volcano Geotherm Res 66: 283-294.

Mizuyama, T; Kobashi, S; Ou, G; 1992, Prediction of debris flow peak discharge, In: Proc Interprevent Int Symp (bern) 4:99-108.

Castruccio A, 2008. Comparación y Modelación Numérica de los Lahares Calientes en el Volcán Calbuco (41,3ºS) y Lahares Fríos en el Volcán Villarrica (39,5º) Andes del Sur, Tesis de Magister, Santiago, Chile, Universidad de Chile.

Huggel, C., Schneider, D., Julio, P., Delgado, H., Käb, A., 2007. Evaluation of ASTER and SRTM DEM data for lahar modelling: a case study on lahars from Popocatepetl volcano, Mexico, Journal of volcanology and Geothermal Research.

Iverson, R., Schilling, S., Vallance, J., 1998. Objective delineation of lahar-hazard zones downstream from volcanoes: Geological Society of America. Bulletin, vol. 110, p. 972-984.

Schilling, S., Vallance, J., Matias, O., Howell, M., 2001. Lahar Hazards at Agua Volcano, Guatemala: U.S. Geological Survey Open-File Report 01-432.

Canuti P., Casagli N., Catani F., Falorni G., 2002. Modeling of the Guagua Pichincha Volcano (Ecuador) lahars. Physics and Chemistry of the Earth. 27 (36), p. 1587-1599.

Stevens, N., Manville, V., Heron, D., 2002. The sensitivity of a volcanic flow model to digital elevation model accuracy: experiments with digitised map contours and interferometric SAR at Ruapehu and Taranaki volcanoes, New Zealand, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 160, Issues 1-2, p. 99-124.

Hubbar, B., Sheridan, M., Carrasco, G., Díaz, R., Rodríguez, S., 2006. Comparative lahar hazard mapping at Citlaltepétl Volcano, Mexico using SRTM, ASTER and DTED-1 digital topographic data. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 160 (1-2), p.99-124.

Mizuyama, T.; 2008, Sediment hazards and SABO works in Japan International Journal of Erosion Control Engineering, Vol. 1.



Okubo, Ikeya, Ishikawa, Yamada; 1993. Development of New Methods for Countermeasures against Debris Flows in Japan. 74-85.

Valenzuela, M., 2011, Informe Situación Actual Río Blanco de Chaitén, Puerto Month, Chile Dirección de Obras Hidráulicas, Región de los Lagos.

Resoluciones Exenta 2011, D.R.O.H. Xª Nº 65 de fecha 18 de enero 2011 y D.R.H.O. Xª Nº 1257 de fecha 29 de noviembre 2011. Región de los Lagos, Dirección de Obras Hidráulicas, Ministerio de Obras Públicas, Republica de Chile.

Ñanculef, 2008. Informe Sociocultural de Sitio de Significación Cultural Sector Koipuko Chol-Chol, Región de La Araucanía, Unidad De Cultura y Educación, Corporación Nacional de Desarrollo Indígena, Republica de Chile.

Linker, S.; Neira,P.; Romero, I; 2011. Memorias del Llaima, Historias de comunidades mapuche de Melipeuco. Impreso en Talleres Designofpasten. Santiago- Chile. 160 p.

Bengoa, J. 2007. Historia de los antiguos mapuches del sur. Desde antes de la llegada de los españoles hasta las paces de Quilín. Editorial Catalonia. Santiago, Chile.

Moreno, H.; Naranjo, J.A.2004. Calbuco volcano historic block-and-ash and pyroclastic flows: increasing threatening on surrounding communities, Southern Andes 41,5ºS. Asamblea General IAV-CEI, Pucón, Chile (CD).

Lahsen, A., Moreno, H., Varela, J., Munizaga, F., López, L. 1985. Geología y riesgo volcánico del volcán Calbuco y centros eruptivos menores. Central Canutillar. Depto. de Geología- ENDESA. 215 p. SERNAGEOMIN, 2013, Servicio Nacional de Geología y Minería Gobierno de Chile. <http://www.sernageomin.cl/> (Consultado en 04/04/2013).

Moreno, H.; Naranjo, J. A.; López-Escobar, L. 1991. Volcán Llaima: Geología, Petrología y Riesgo Volcánico. Informe Final (inédito) Proyecto Fondecyt Nº 1048-1989-90, 98p.