



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**ANÁLISIS DEL ORIGEN DEL DEPÓSITO DE MESÓN ALTO EN EL RÍO
YESO, CHILE CENTRAL (33°40'S): CARTOGRAFÍA Y MODELACIÓN
ANALÓGICA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEOLOGA

CAROLINA CONSTANZA ALBORNOZ GONZÁLEZ

PROFESOR GUÍA:
LUISA PINTO LINCOÑIR

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA
KATJA DECKART

SANTIAGO DE CHILE
2015

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE: Geóloga
POR: Carolina Albornoz González
FECHA: 13/01/2015
PROFESOR GUÍA: Luisa Pinto Lincoñir**

**ANÁLISIS DEL ORIGEN DEL DEPÓSITO DE MESÓN ALTO EN EL RÍO YESO,
CHILE CENTRAL (33°40'S): CARTOGRAFÍA Y MODELACIÓN ANALÓGICA**

En el presente trabajo se busca entender la dinámica y origen de formación del depósito Mesón Alto a través de una cartografía en terreno del depósito y sus alrededores y un posterior análisis basado en modelos análogos.

La singularidad del depósito es que se ubica en la confluencia de valles glaciales, y frente a un escarpe, del cerro Mesón Alto, que son indicadores de distintos orígenes y el gran volumen del depósito. Distintos autores han señalado el depósito como morrena, depósito de remoción en masa o depósito mixto, donde esta última opción es la que se considera como hipótesis de este trabajo.

Se confeccionaron dos mapas a partir de la cartografía de terreno, uno de ellos señala la litología de los clastos presentes en el depósito, lo que comprueba la existencia de 4 bandas litológicas donde de NW a SE se observan: 1) banda granítica, 2) banda andesítica, 3) banda granítica y 4) banda andesítica. Además la forma del depósito y su disposición con respecto al cerro Mesón Alto indican que el depósito fue generado por una avalancha de rocas proveniente de este cerro.

En el depósito estudiado, se aprecian zonas que en superficie podrían no corresponder a la remoción en masa. En terreno 3 de esas zonas se observaron con mala selección, muchos finos y se ubican en el borde del depósito hacia la Laguna Negra y el embalse El Yeso, por lo que se presume son morrenas, o algún otro depósito de tipo flujo, pero siempre anterior al depósito de avalancha de rocas.

De los modelos análogos se concluyó que el valle anterior a la remoción principal era un valle angosto, cuyas laderas eran de ángulos de pendiente menor a 30° y se interpretó que con solo una avalancha no se podrían haber generado 4 bandas de material seleccionado; se obtienen 2 bandas en caso de un detenimiento abrupto del material por un obstáculo como una morrena, o una alta pendiente de la ladera opuesta; y 3 bandas en caso de que el material que desliza no se detenga abruptamente, como con valles más anchos. Por lo tanto surgen nuevas hipótesis de que el origen del depósito pudo haber sido: a) una avalancha que genera 3 bandas y una morrena preexistente que conformaría la banda preexistente; sin embargo no se encontró en terreno evidencia de una morrena de esa magnitud en superficie. b) presencia de morrenas menores que no alcanzan a conformar una banda de material y dos o más avalanchas que debido a las morrenas ocultan parte del material en la caída, donde cada deslizamiento genera dos bandas. Queda propuesto realizar nuevos modelos que consideren deslizamientos sucesivos y el depósito que generarían.

A la familia González Silva.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo quisiera darle las gracias a mi profesora guía Luisa Pinto, por saber escuchar y entender diversas situaciones, por estar atenta a mis avances y estar siempre presta a corregir y responder dudas. Gracias por todo su apoyo y comprensión.

A mi familia, que sin su cariño y respaldo esto no hubiera sido posible, a mis abuelos Teresa y Raúl, mis tíos María Teresa, Cristian, María Eliana y por su puesto a mi madre, Ximena, quien compartió conmigo el día a día de mi paso por la universidad, con las alegrías y llantos que conllevó, y que nunca dejó de darme su asistencia.

A mi amiga y compañera Leslie, que me acompañó a terreno pese a dolencias físicas, que estuvo conmigo en la realización de los modelos, textos y figuras, que opinó, criticó y aportó en las discusiones y comprensión del depósito y por darme siempre ánimos de seguir.

A mis amigos Gaby, Claudia, Chih-Yu, Seba y Matías que estuvieron pendientes de mis progresos para celebrar los avances y alegrarme en los retrocesos, a Manu y Hugo que sin sus aportes técnicos no hubiera podido terminar los mapas. Al club de Kung Fu en pleno por brindarme un lugar para desahogar mis frustraciones y compartir sudor y alegrías, especialmente a Rocío, Jaime y Alvarito.

Un agradecimiento especial a mis colegas del liceo Ignacio Domeyko, sobre todo a Juan Carlos y Victor Hugo por hacerme la carga más liviana y considerarme una de ellos. A mis ex alumnos Sergio y Luis por siempre hacerme reír y liberar tensiones.

Finalmente a la empresa Aguas Andinas quién permitió y facilitó la entrada a sus dependencias, donde se encuentra ubicado el depósito en estudio, siendo que no es un lugar de tránsito permitido para personas externas a la empresa.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción.....	1
1.1. Formulación del problema.....	1
1.2. Ubicación y vías de acceso.....	2
1.3. Hipótesis de trabajo.....	4
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. Objetivo general.....	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
1.5. Metodología.....	5
1.5.1. Descripción del dispositivo de modelación analógica a utilizar.....	5
1.5.2. Descripción de las variaciones de las características del dispositivo realizadas durante el estudio.....	7
1.5.3. Trabajo de gabinete previo al trabajo de terreno.....	10
1.5.4. Trabajo de terreno.....	10
1.5.5. Trabajo de gabinete posterior al trabajo de terreno.....	10
2. Marco Teórico.....	12
2.1. Características de remociones en masa.....	12
2.1.1. Clasificación de las remociones en masa.....	12
2.2. Avalanchas de rocas.....	16
2.3. Parámetros característicos de una avalancha de rocas.....	16
2.3.1. Geometría del depósito.....	17
2.4. Características de depósitos morrénicos.....	20
2.5. Modelación Analógica.....	20
2.5.1. Leyes de similitud.....	21
2.5.2. Modelación de remociones en masa.....	22
2.5.3. Modelación analógica de deslizamientos de tierra o avalanchas de rocas en sus entornos.....	23
2.5.4. Modelación analógica de avalanchas de rocas como flujos.....	23
3. Contexto geológico.....	25
3.1. Marco geológico.....	25
3.2. Marco geomorfológico.....	27
3.2.1. Posible morfología de deslizamiento de roca.....	29
3.2.2. Posible morfología de morrena.....	29
3.2.3. Posible morfología de origen mixto.....	30

4. Resultados.....	31
4.1. Cartografía.....	31
4.1.1. Mapa de litologías.....	41
4.1.2. Mapa de porcentajes de matriz.....	42
4.2. Modelos análogos.....	43
4.2.1. Reproductibilidad de datos.....	43
4.2.2. Análisis numéricos de los modelos.....	45
4.2.3. Observaciones dinámicas del deslizamiento.....	57
5. Discusión.....	70
5.1. Discusión relativa a la cartografía realizada en terreno.....	70
5.2. Discusión relativa al análisis numérico de los parámetros y a la observación de la dinámica de generación de depósitos de deslizamiento a través de modelos análogos.....	73
6. Conclusión.....	76
7. Bibliografía.....	78
8. Anexos.....	82
8.1. Anexo A: Resumen de datos obtenidos al determinar reproductibilidad de modelos utilizando el dispositivo de Rhodes (2013).....	82
8.2. Anexo B: Datos de parámetros a comparar, que se obtienen del Anexo A. Con estos datos se probó la reproductibilidad de los experimentos.....	84
8.3. Anexo C: Datos obtenidos de modelos realizados en este trabajo. Cada grupo de modelos está caracterizado por cambiar solo un parámetro.....	85
8.4. Anexo D: Valores de parámetros calculados a partir del Anexo C.....	87
8.5. Anexo E: CD con las grabaciones obtenidas de los modelos análogos.....	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Nueva versión de la clasificación de Varnes (1978) para remociones en masa.....	12
---	----

INDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1: El depósito en estudio.....	..3
Figura 2: Vías de acceso.....	..4
Figura 3: Dispositivo a utilizar para realización de modelos análogos.....	..6
Figura 4: Tamaño de grano de la arena de sílice utilizada en los modelos.....	..6
Figura 5: Dispositivo utilizado por Rhodes (2013).....	..7
Figura 6: Esquema de distribución de arena en la caja del dispositivo.....	..9
Figura 7: Esquema de caídas de rocas.....	13
Figura 8: Esquema de volcamiento.....	13
Figura 9: Esquema deslizamiento rotacional.....	14
Figura 10: Esquema de deslizamiento traslacional.....	14
Figura 11: Esquema de expansiones laterales.....	14
Figura 12: Esquema de flujo de barro o tierra.....	15
Figura 13: Esquema de flujo (avalancha) de rocas/detritos.....	15
Figura 14: Ancho “An”, y largo “La” del depósito generado en el dispositivo.....	17
Figura 15: Esquema de los parámetros a medir durante el desarrollo de los modelos.....	18
Figura 16: Esquema de los parámetros de deslizamiento.....	19
Figura 17: Mapa geológico regional.....	25
Figura 18: Mapa geológico del área estudiada.....	26
Figura 19: Vista al ENE del depósito.....	27
Figura 20: Vista al WSW del depósito.....	28
Figura 21: Fotos del depósito ubicado en la confluencia de distintos valles.....	28
Figura 22: Mapa de la zona que clasifica el depósito como remoción en masa principalmente.....	30
Figura 23: Fotos de terreno donde se aprecian zonas de colores y presencia de montículos.....	31
Figura 24: Clastos pertenecientes a la Formación Abanico, principalmente andesitas y brechas/conglomerados.....	32
Figura 25: Clastos graníticos encontrados en el depósito.....	33
Figura 26: Deslizamientos al interior del depósito en la zona del estero Manzanito..	34
Figura 27: Estrías de 2 a 3 cm de profundidad en la roca, con 3-4 cm de ancho, y del largo del clasto.....	35
Figura 28: Estrías de menor envergadura encontradas en el depósito.....	35
Figura 29: Fracturamiento producto de la gelifracción.....	36
Figura 30: Forma tabular del intrusivo.....	36
Figura 31: Vista al SW del escarpe del Cerro Mesón Alto.....	37
Figura 32: Ubicación de las zonas con presencia mayoritaria de matriz.....	38
Figura 33: Vista desde primer lugar donde se encuentra material con contenido de un 100% de matriz.....	38
Figura 34: Tercer lugar donde se observa material con alto contenido de matriz.....	39
Figura 35: Segundo lugar donde se observa gran cantidad de matriz.....	39
Figura 36: Puntos de control tomados en terreno.....	40

Figura 37: Mapa de litología de los clastos.....	41
Figura 38: Mapa de porcentaje de matriz.....	42
Figura 39: Relación An/La y ángulo del lado opuesto al deslizamiento.....	43
Figura 40: Relación entre espesor y ángulo del lado opuesto al deslizamiento.....	44
Figura 41: Relación entre coeficiente de fricción equivalente y ángulo del lado opuesto al deslizamiento.....	44
Figura 42: Relación entre la distancia excesiva de desplazamiento y ángulo del lado opuesto al deslizamiento	44
Figura 43: Relación entre ángulo de la ladera opuesta al deslizamiento y la razón An/La.....	46
Figura 44: Relación entre ángulo de ladera opuesta al deslizamiento y espesor aparente =e.....	47
Figura 45: Relación entre ángulo de ladera opuesta al deslizamiento y coeficiente de fricción equivalente.....	48
Figura 46: Relación entre ángulo de la ladera opuesta al deslizamiento y distancia excesiva de desplazamiento.....	48
Figura 47: Relación entre el ancho del valle glacial y la razón An/La.....	49
Figura 48: Relación entre ancho del valle glacial y espesor aparente = e.....	50
Figura 49: Relación entre el ancho del valle glacial y coeficiente de fricción equivalente.....	50
Figura 50: Relación entre el ancho del valle glacial y distancia excesiva de desplazamiento.....	51
Figura 51: Relación entre la ubicación del obstáculo y la razón An/La.....	52
Figura 52: Relación entre la ubicación del obstáculo y espesor aparente = e.....	53
Figura 53: Relación entre la ubicación del obstáculo y coeficiente de fricción equivalente.....	53
Figura 54: Relación entre la ubicación del obstáculo y la distancia excesiva de desplazamiento.....	54
Figura 55: Relación entre la las dimensiones del obstáculo y la razón An/La, donde An= ancho, La= largo del depósito visto en planta.....	55
Figura 56: Relación entre las dimensiones del obstáculo y espesor aparente = e....	56
Figura 57: Relación entre las dimensiones del obstáculo y coeficiente de fricción equivalente =H/D.....	56
Figura 58: Relación entre las dimensiones del obstáculo y la distancia excesiva de desplazamiento = $D_e = D - H/\tan(35)$	57
Figura 59: Matriz de imágenes de variación del ángulo de la ladera opuesta al deslizamiento en un valle con vista superior.....	58
Figura 60: Matriz de imágenes de variación del ángulo de la ladera opuesta al deslizamiento en un valle con vista lateral.....	59
Figura 61: Matriz de imágenes de variación del ancho de un valle glacial con vista superior.....	60
Figura 62: Matriz de imágenes de variación del ancho de un valle glacial con vista lateral.....	61
Figura 63: Matriz de imágenes de variación de ubicaciones de un obstáculo, vista superior.....	63
Figura 64: Matriz de imágenes de variación de ubicaciones de un obstáculo, vista lateral.....	64
Figura 65: Matriz de imágenes de variación del alto del obstáculo, vista superior....	66

Figura 66: Matriz de imágenes de variación del alto del obstáculo, vista lateral.....	67
Figura 67: Matriz de imágenes de variación del ancho del obstáculo, vista superior.....	68
Figura 68: Matriz de imágenes de variación del ancho del obstáculo, vista lateral....	69

1. INTRODUCCIÓN

1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Los grandes depósitos de material no consolidado, presentes en los valles andinos de la zona central de Chile, tienen distintos orígenes como por ejemplo mega deslizamientos y depósitos glaciares (Abele, 1984). Estos procesos no son excluyentes, pudiendo existir un origen mixto en la generación de los depósitos.

En la zona del embalse El Yeso, el problema de determinar el origen de depósitos no históricos ha sido abordado por diversos autores y ha sido atribuido a distintas causas. En un principio, para Marangunic y Thiele (1971), el depósito en su totalidad correspondía a una morrena terminal donde dicha morrena habría sido depositada por glaciares que corrían de norte a sur por los valles de los esteros La Paloma y Echaurren, y habría dado origen a la Laguna Negra. Posteriormente, Abele (1984) postula que muchas de las consideradas morrenas en los Andes centrales corresponden a derrumbes de montañas prehistóricas, incluyendo la zona de estudio. Las evidencias para esta hipótesis se encuentran en el grosor extremadamente grande de los depósitos en comparación con los depósitos morrénicos de valles vecinos, el tamaño de los bloques individuales, la descompactación sin la pérdida de coherencia, la ausencia de redondeamiento del material, además de la composición petrográfica. Recientemente, Deckart et al. (2014) postularon que la mayor parte del volumen corresponde a bloques de roca que provienen del sector del cerro Mesón Alto, concluyendo que el depósito tiene un origen compuesto de avalancha de roca superpuesto a un depósito glacial. Sin embargo, el estudio de la zona hasta el momento se ha realizado en base a la cartografía del lugar, petrografía, observación de imágenes y datación geoquímica existiendo aun incógnitas sobre el proceso que lo formó. Una herramienta que no ha sido utilizada es la modelación, tal como la modelación análoga, que permita comprender de mejor manera cómo influyen las distintas variables presentes en la formación de un depósito como el presente en el Mesón Alto.

La modelación análoga es un método que trata de estudiar y acercarse de manera simplificada un fenómeno observable en la naturaleza a un laboratorio, reduciendo las escalas espacial y temporal y permitiendo analizar procesos geológicos complejos a través de la intervención de distintas variables o parámetros en el problema estudiado (Hubbert, 1937). Sin embargo, no es su objetivo un caso de estudio en particular, si no que entender una problemática general motivada por una problemática específica, tal que los resultados puedan ser aplicados en muchos casos. Además, debe cumplir con ciertos parámetros como la similitud geométrica, cinemática y mecánica (Hubbert, 1937) para darles validez. Es importante resaltar que las diferentes similitudes no son siempre verificables en laboratorio para los

procesos de superficie (Graveleau, 2008) dado que hay distintos órdenes de magnitud de los objetos y procesos. Desde el punto de vista de la dinámica en modelación morfológica, no hay ecuaciones que describan la dinámica de la evolución de los paisajes desde las cuales se podrían extraer cifras sin dimensiones, en oposición a la modelación de procesos tectónicos (Graveleau, 2008). Sin embargo, ha habido experimentos con modelos análogos que responden a deslizamientos de material como en Katz y Aharonov (2006), Bonnet (2011), y Manzella y Labiouze (2008), por lo que es posible realizar este tipo de acercamiento a problemáticas como deslizamientos en los Andes Centrales.

Por lo dicho anteriormente, se propone realizar un estudio a través de la modelación analógica que permita comprender más detalladamente la dinámica de formación del depósito de Mesón Alto. Por lo tanto, en este trabajo se pretende analizar a través de modelos análogos las características geométricas de deslizamientos superficiales (Hsü, 1975) de rocas y su interacción con distintos tipos de valle respecto a su pendiente y forma; y también considerando la influencia de la forma de las morrenas, que pueden alterar el movimiento del deslizamiento y su disposición final. Además, proponemos la realización de un levantamiento de terreno para entender como es el depósito tanto litológicamente como estructural y morfológicamente en su estado final.

Para esto se trabajará en dos áreas principalmente: a) modelos análogos, donde se utilizará un modelo a escala (Davies y McSaveney, 1999) donde se utilizará un dispositivo que simula un valle fluvial o glacial sobre el cual se deposita un volumen de arena que representará el deslizamiento de roca (Rhodes, 2013). Además, al valle se le agregará un volumen, alterando su geometría, para simular una morrena y entender la interacción volumétrica y espacial del depósito con la presencia de este obstáculo. Para poder trabajar estas variables distintas se fijarán todos los parámetros excepto uno, con el cual se realizarán varios experimentos para entender cómo afecta el resultado final de manera independiente a las demás variables. b) Cartografía de superficie, para determinar las características del depósito como litología, morfología y tamaño. Para ello se realizaran análisis de imágenes previas y creación de mapa litológico posterior al terreno para definir de mejor manera la zona de estudio y las características que presenta.

De esta manera se espera entender de mejor manera cómo interactúan variables y orígenes distintos para grandes depósitos de montaña.

1.2. UBICACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

La zona de estudio, correspondiente al depósito de Mesón Alto, se ubica en la Cordillera de los Andes de Chile central, entre los 33°39' y 33°42'36" de latitud S y

entre los 70°08' y 70°05' de longitud W (figura 1). Corresponde al depósito ubicado aguas abajo del embalse El Yeso, por el río Yeso, donde se encuentra con la Laguna Negra, en la zona del cajón del Maipo. El depósito comprende ca. 16 km² de superficie con un volumen estimado entre 4,3 km³ (Abele, 1984) y 4,5 km³ (Marangunic y Thiele, 1971). El área de estudio está ubicada en una propiedad de la empresa Aguas Andinas.

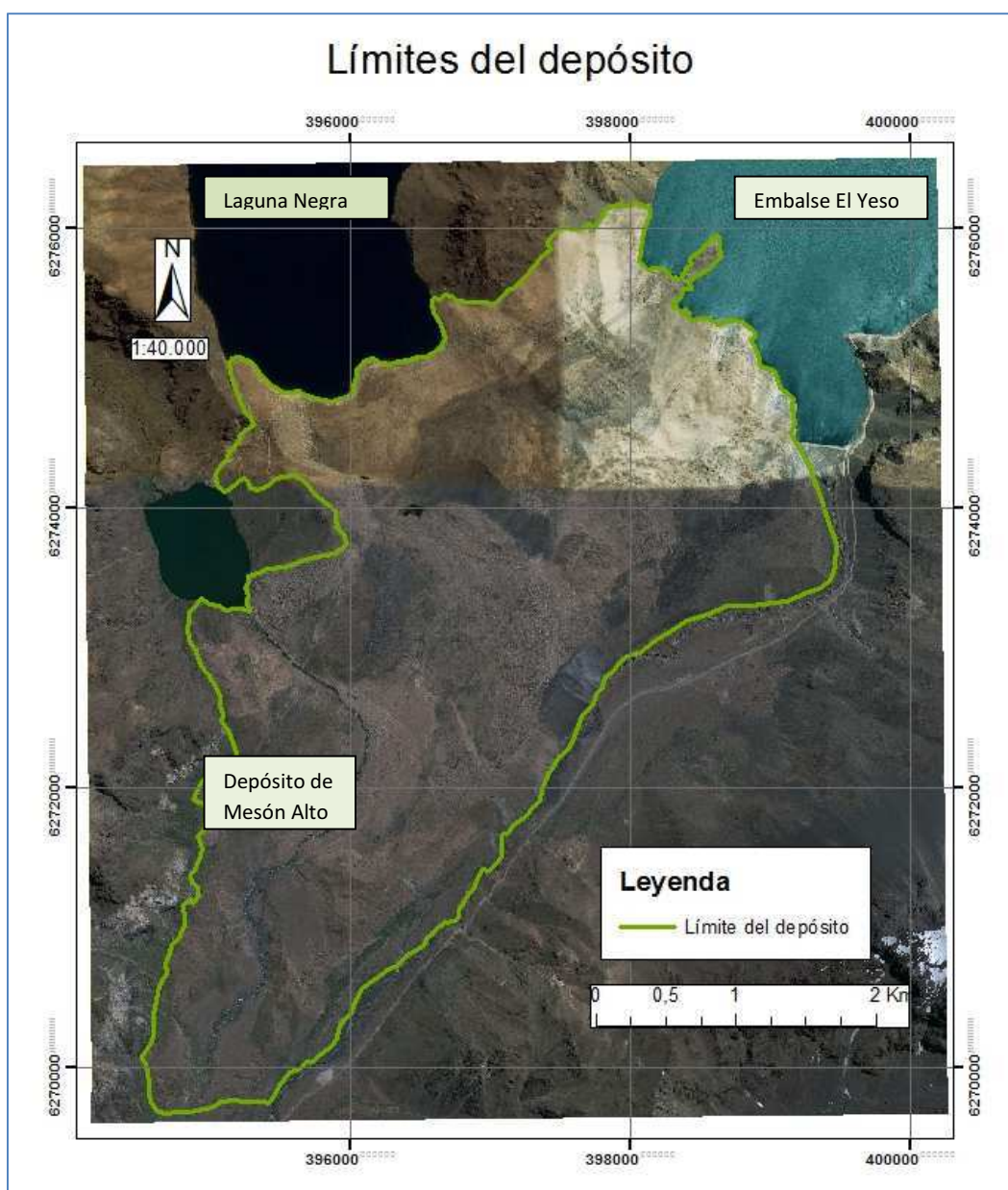


Figura 1: El depósito en estudio marcado con borde verde a orillas del Embalse el Yeso (depósito de agua de color claro) y la Laguna Negra (depósito de agua de color oscuro), en la zona del Cajón de Maipo, Chile central (Fuente: Google Earth).

La vía de acceso corresponde al camino pavimentado G-25 que parte de Puente Alto en el Gran Santiago y que se debe seguir hasta San Gabriel donde se debe tomar la vía de tierra G-455 hasta el embalse el Yeso como muestra la figura 2, dicho camino pasa por fuera de la propiedad de Aguas Andinas, por lo que para llegar al depósito se debe tomar un camino privado de la empresa que parte pasado San Gabriel por la ruta G-455. El depósito está ubicado a unos 70 km desde el inicio de la ruta G-25 en Puente Alto (Carta caminera MOP, 2013).



Figura 2: Vías de acceso (Carta caminera MOP, 2013). El cuadro negro muestra el sitio del depósito.

1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO

El depósito de Mesón Alto está compuesto: a) por depósitos morrénicos en un bajo porcentaje volumétrico, ubicados en superficie en la parte del depósito más cercana a la Laguna Negra y el borde del actual del Embalse el Yeso, y b) principalmente por una mega remoción en masa posterior que se vio afectada en su disposición y geometría por la presencia de las morrenas ya existentes.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Entender el origen y la dinámica de formación del depósito de Mesón Alto.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar litología y características de clastos y matriz presentes en el depósito de Mesón Alto.

- Realizar un mapa de litologías de clastos del depósito.
- Realizar un mapa de porcentaje de matriz del depósito.
- Reconocer la distribución espacial y direcciones de movimiento del deslizamiento para comprender la dinámica que generó el depósito.
- Realización de pruebas de modelos análogos para generar depósitos de deslizamientos en valles fluviales y glaciales.
- Realización de 5 series de modelos en función de los parámetros escogidos del caso de Mesón Alto para conocer geometrías resultantes, con variación en forma del valle y presencia de un obstáculo y distintas geometrías del mismo.
- Determinar características de formación del depósito y su origen en función de los resultados de los experimentos de modelos análogos.

1.5. METODOLOGÍA

1.5.1. Descripción del dispositivo de modelación analógica a utilizar

El dispositivo a utilizar consiste en dos tableros de 60 x 120 cm² ensamblados para formar un valle donde se pueden cambiar los ángulos de ambas pendientes entre 10° y 50° (Figura 3). El valle tiene una inclinación de 3° en la dirección de su eje, que corresponde a la pendiente media del valle del Yeso. En una ladera está colocada una caja de 25x35x5 cm³ que contiene el material que representará el deslizamiento, la cual al abrirla dejará caer arena de sílice gruesa con clastos sub angulosos (figura 4).

La escala del dispositivo es de 1:10.000, por lo que 1 cm representado en dispositivo corresponde a 100 m de la realidad. La realización de cada prueba considera la grabación del desarrollo de dicha prueba desde dos ángulos distintos: 1) desde una vista en planta al centro del valle, y 2) lateral en la cabecera del valle. Además, se tomarán fotografías del resultado final desde la cabecera del valle, y desde una vista en planta.



Figura 3: Dispositivo a utilizar para realización de modelos análogos. Laboratorio de modelos análogos, departamento de geología de la Universidad de Chile.



Figura 4: Tamaño de grano de la arena de sílice utilizada en los modelos.

1.5.2. Descripción de las variaciones de las características del dispositivo realizadas durante el estudio

La realización de pruebas con modelos análogos será para probar la reproductibilidad de los datos, repitiendo los modelos desarrollados por Rhodes (2013).

En estos primeros experimentos solo se usará arena blanca, y no se grabarán los resultados, aunque si se fotografiará el resultado final de cada modelo con vista lateral y planta. Esto debido a que no se usarán estos resultados como datos dentro de este trabajo y servirán solo como verificación de la posibilidad de que los modelos fueran reproducibles. Por lo mismo se utilizará el dispositivo de la misma manera que Rhodes (2013), teniendo las caras limpias de las paredes del valle, como se muestra en la figura 5. Para todos estos modelos se utilizó un ángulo de la ladera de caída de 35° y una inclinación del eje del valle de 3° puesto que el valle del río Yeso tiene esa inclinación. Además, cada modelo se repitió 3 veces para asegurar que los resultados no fueran azarosos cada vez.

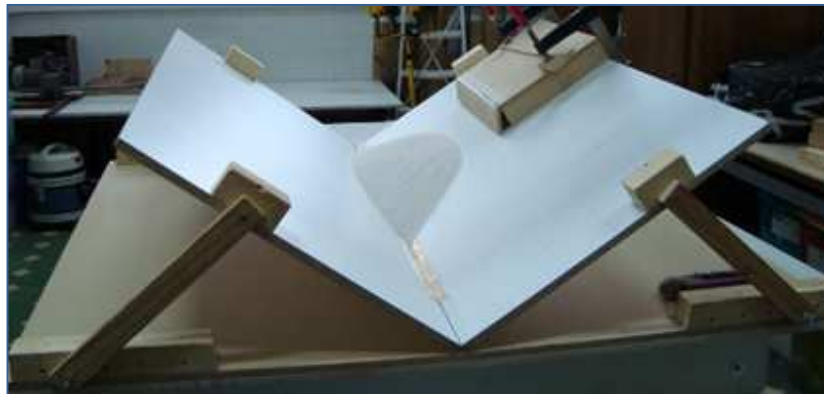


Figura 5: Dispositivo utilizado por Rhodes (2013).

Se realizan algunos tests rápidos antes de comenzar los modelos:

- Se observa que al utilizar la cinta adhesiva *masking tape*, y papel de lija de distintas gradaciones, el deslizamiento de la arena es mucho menor a la cara limpia de la madera, pues la arena no llega al fondo del valle si se le deja caer sobre una ladera, solo queda en la misma ladera del deslizamiento. Por ello se decide que se utilizará cinta adhesiva transparente cuando se requieran fijar tablas que simulen un fondo de valle glacial al dispositivo base.

- Al colocar una tabla en el fondo del valle, simulando un valle glacial, si la ladera opuesta al deslizamiento tiene una pendiente mayor a 20°, el depósito generado queda en parte dentro de la caja de madera que contiene la arena, por lo que se aprecia una distorsión de los datos experimentales. Por ello solo se utilizará un valle en U, con un ángulo de 20° en la cara opuesta al deslizamiento.

Posteriormente para los modelos desarrollados en este trabajo se aplicarán algunas modificaciones del dispositivo utilizado con anterioridad (figura 5), como se observa en la figura 3:

- Se colocará un papel celeste sobre la ladera opuesta a la caída de material para obtener un mejor contraste con la arena blanca.
- Sobre la pared opuesta al deslizamiento se forrará en cinta adhesiva dado que la parte más baja del valle ya la tenía para evitar el roce con la bisagra que genera el valle, pero el efecto de borde no se podía identificar bien, por lo que se decidió forrar toda la ladera del frente.
- Se le colocaran ganchos, a la cajita de arena, para que el soltar la arena sea más simple y estandarizado.
- Se mejorará la sujeción de la parte más baja del valle a la base del dispositivo, pues se apreció que en momentos, el peso de la arena en la caja, previo a que se soltara, movía el dispositivo cambiando ligeramente los ángulos de las laderas.

Además, se mantuvo el volumen de material correspondiente a $25 \times 35 \times 5 \text{ cm}^3 = 4.375 \text{ cm}^3$ que a escala del modelo representa a $4,375 \text{ km}^3$ lo que se acerca al volumen del depósito de $4,5 \text{ km}^3$ determinado por Marangunic y Thiele (1971). Se colocará la arena formando tres bandas (figura 6) que representarán a la Fm. Abanico (arena negra) con la presencia de un intrusivo de forma tabular al medio (arena blanca), donde las bandas tendrán un tamaño de $35 \times 5 \text{ cm}^2$ de área con una profundidad de 5 cm de arena negra, 15 cm de arena blanca y luego 5 cm de arena negra, lo que representa un volumen de arena negra igual a 875 cm^3 ($5 \times 35 \times 5 \text{ cm}^3$), luego un volumen 2, de arena blanca de 2.625 cm^3 ($5 \times 35 \times 15 \text{ cm}^3$), y finalmente un volumen 3, de arena negra nuevamente, igual al inicial de 875 cm^3 ($5 \times 35 \times 5 \text{ cm}^3$); esto para simular la litología del cerro Mesón Alto que como se apreció en terreno (descripción en capítulo de resultados).

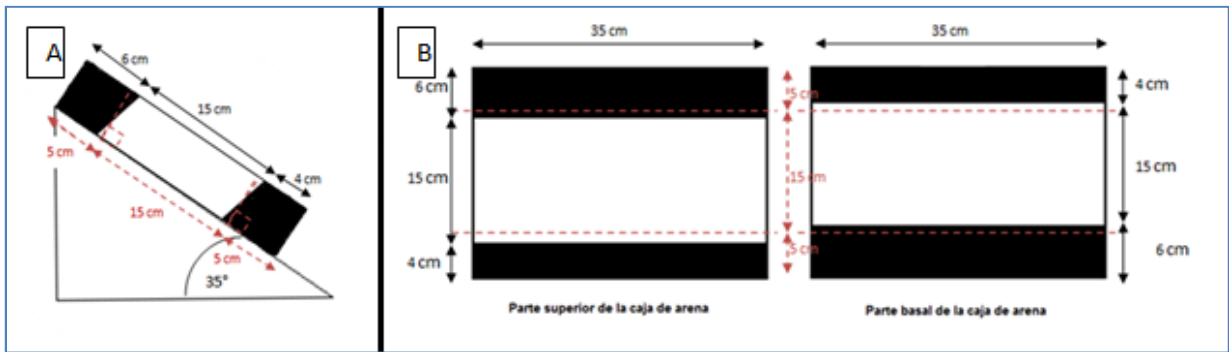


Figura 6: Esquema de distribución de arena en la caja del dispositivo. A) Vista en corte transversal: El lado inclinado del triángulo representa la ladera del dispositivo con un ángulo de 35° . El color negro al interior de la caja representa la arena negra y el color blanco representa a la arena blanca. El cambio de un color a otro se hizo con un ligero ángulo de inclinación (no perpendicular a la base de la caja como muestra la línea punteada en rojo). B) Vista en planta considerando una ubicación horizontal de la caja: El color negro al interior de la caja representa la arena negra y el color blanco representa a la arena blanca. Se hace una distinción entre la base de la caja y la parte superior ya que al tener una inclinación el material se genera una diferencia en la potencia de cada franja en la base y superficie.

Por otra parte, se mantuvo que el ángulo de la ladera de la caída de material era de 35° porque con una pendiente menor no se conseguía que el material deslizará sobre la madera lisa. Dado que con el dispositivo solo pueden usarse ángulos de 10° , 20° , 30° , 35° y 40° se verificó que al bajar el ángulo de 35° a 30° la arena apenas deslizaba y no alcanzaba a llegar al valle antes de detenerse sobre la ladera.

Los parámetros a variar dentro del desarrollo de los modelos serán los siguientes:

- El ángulo de las laderas, ya que de ello depende la distancia máxima a la cual llegará el material.
- El ancho del valle glacial, dado un mismo volumen de material, distintos anchos generarán distintos espesores y geometrías de depósitos resultantes.
- La ubicación de un obstáculo, que represente una morrena, la que cambiaría la dinámica del deslizamiento, generando distintas geometrías para el depósito.
- El alto de un obstáculo en una misma ubicación, para que asemeje al caso de estudio y se obtenga un depósito de características similares al caso de Mesón Alto.
- El espesor de un obstáculo en una misma ubicación, para que asemeje al caso de estudio y se obtenga un depósito de características similares al caso de Mesón Alto.

1.5.3. Trabajo de gabinete previo al trabajo de terreno

Este trabajo consiste en recolección bibliográfica y en la preparación de material para ser utilizado durante la salida a terreno, que se detalla a continuación:

- Revisión de material bibliográfico referente a modelos análogos, para entender conceptos generales y consideraciones a tener en cuenta.
- Revisión bibliográfica de la zona de la Laguna Negra, para la realización de un marco geológico local y lectura de interpretaciones dadas sobre el depósito ahí ubicado.
- Revisión de morfología a través del software Google Earth, con realización de mapa geomorfológico preliminar y reconocimiento de la extensión real del depósito.
- Realización de pruebas con modelos análogos en dispositivo creado por Rhodes (2013) para verificar la reproductibilidad de los experimentos y definir las constantes de los parámetros a utilizar en los experimentos finales.

1.5.4. Trabajo de terreno

- El trabajo de terreno se realiza en dos campañas de 5 y 1 días respectivamente. La primera llevada a cabo entre el 17 y 21 de Enero de 2014; y la segunda correspondiente al día 12 de Mayo de 2014.
- El trabajo de campo consiste en recorrer la zona del depósito de Mesón Alto realizando una estimación del porcentaje de matriz/clastos en distintos puntos del depósito, además de un mapeo litológico de los clastos presentes.
- Identificación de indicadores de movimiento dentro del depósito que puedan indicar la dirección de generación del mismo.

1.5.5. Trabajo de gabinete posterior al trabajo de terreno

- Realizar una cartografía de detalle del área de estudio de acuerdo a la litología de los clastos observados y la relación porcentual de clastos - matriz, determinando dominios presentes en el depósito según tipo de roca, y porcentaje de matriz.

- Realización de pruebas con el dispositivo donde:
 - Se cambiará el ángulo de la ladera opuesta al deslizamiento entre 10°, 20°, 30°, 35° y 40°. De entre ellas se escogerá la que mejor represente el deslizamiento para seguir trabajando con ese valor.
 - Se cambiará el ancho de un valle glacial entre 6,5, 11,5 y 16,5 cm manteniendo los demás parámetros constantes. Se seleccionará el que mejor represente el depósito en estudio para aplicarlo en las pruebas siguientes.
 - Se utilizará un obstáculo, que represente una posible morrena, que tenga la misma orientación que el eje del valle que se ubicará justo en la parte más baja de la ladera del deslizamiento, al centro del valle y bajo la ladera opuesta con el mismo largo que el dispositivo simulando una morrena de largo infinito para evitar errores de borde y con un ancho de 2 cm y alto de 1 cm.
 - Se utilizará un obstáculo, que represente una posible morrena, de 1, 2 y 4 cm de alto manteniendo el tamaño del largo como infinito y ancho de 2 cm, que se ubicará en una de las zonas utilizadas en el punto anterior.
 - se utilizará un obstáculo, que represente una posible morrena, de 1, 2 y 4 cm de ancho manteniendo el tamaño del largo infinito y alto de 1 cm, que se ubicará en una de las zonas determinada anteriormente.
- Utilizando los valores escogidos en cada set de experimentos se concluirá las características de formación del depósito: ancho del valle, ángulo de laderas, presencia de obstáculos con determinada ubicación y dimensiones. Con lo anterior se determinará el origen de formación del depósito.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. CARACTERÍSTICAS DE REMOCIONES EN MASA

Una remoción en masa o *landslide*, es un movimiento descendente de un cierto volumen de material constituido por roca, suelo o ambos, por efectos de la gravedad (Cruden, 1991).

2.1.1. Clasificación de las remociones en masa

Las remociones en masa (RM) son muy diversas en origen y características y depende del autor la clasificación que se les aplica. En la Tabla 1 se muestra un resumen que hace Hungr et al. (2014) sobre las distintas RM existentes. Por lo mismo el año 2007 se crea un Proyecto Multinacional Andino (PMA) para aunar conceptos y terminología de los países participantes.

Tabla 1: Nueva versión de la clasificación de Varnes (1978) para remociones en masa, propuesta por Hungr et al. 2014 (modificado de Hungr et al., 2014)

Tipo de Movimiento	Roca	Suelo
Caída (fall)	1. Caída de Roca/Hielo	2. Caída de cantos/detritos/limo
Volcamiento (topple)	3.Volcamiento de bloque de roca 4.Volcamiento flexural de Roca	5. Volcamiento de grava/arena/limo
Deslizamiento (slide)	6.Deslizamiento rotacional de Roca 7.Deslizamiento Plano de Roca 8.Deslizamiento en cuña de Roca 9.Deslizamiento compuesto de Roca 10.Deslizamiento irregular de Roca	11. Deslizamiento rotacional de limo/arcillas 12. Deslizamiento plano de limo/arcillas 13. Deslizamiento de grava/arena/detritos 14. Deslizamiento compuesto de limo/arcillas
Propagación lateral (spread)	15. Propagación lateral de ladera de Roca	16. Propagación lateral por licuefacción de arena/limo 17. Propagación lateral por arcillas sensitivas
Flujo (flow)	18. Avalancha de roca/Hielo	19. Flujo seco de arena/limo/detritos 20. Flujo de deslizamiento de arena/limo/detritos 21. Flujo de deslizamiento de arcillas sensitivas. 22. Flujo de detritos 23. Flujo de barro 24. Desborde de detritos 25. Avalancha de detritos 26. Flujo de tierra 27. Flujo de turba
Deformación de ladera (slope deformation)	28. Deformación de Ladera e montaña 29. Deformación de Ladera de Roca	30. Deformación de ladera de suelo 31. Reptación de suelo 32. soliflucción

Para caracterizar una RM se debe conocer el tipo de movimiento que la origina y el material que se moviliza (Cruden y Varnes, 1996):

- **Tipos de Movimiento:**

De la Tabla 1 se desprende que hay 6 tipos de movimientos posibles de RM:

- **Caída (Fall):** Uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera empinada, donde el movimiento puede ser en caída libre, rebotes o rodamiento (Varnes, 1978).

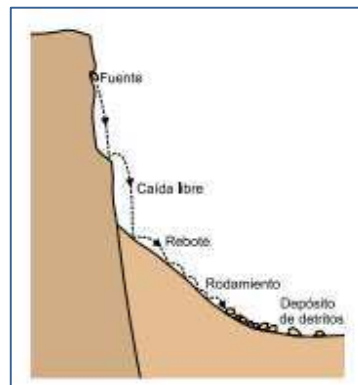


Figura 7: Esquema de caídas de rocas (Fuente: Movimientos en Masa en la Región Andina).

- **Volcamiento (Topple):** Movimiento en el cual hay una rotación hacia delante de uno o varios bloques de roca/suelo. Donde este movimiento ocurre por acción de la gravedad, empuje de unidades adyacentes o por la presión de fluidos en grietas (Varnes, 1978).

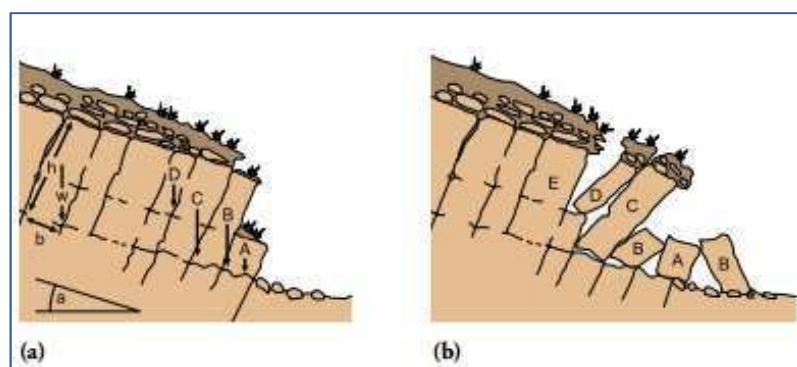


Figura 8: Esquema de volcamiento (De Freitas y Waters 1973).

- **Deslizamiento (Slide):** Movimiento ladera debajo de una masa de suelo o roca cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una

superficie de falla (PMA, 2007). Para Varnes (1978) pueden ser clasificados según la forma de la superficie de falla por la cual desliza en material o según si la falla es traslacional o rotacional.

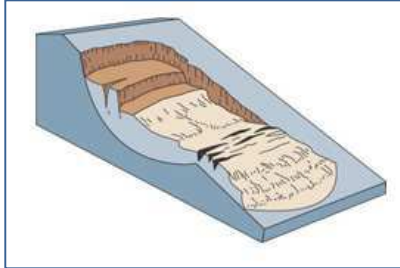


Figura 9: Esquema deslizamiento rotacional (Cruden y Varnes, 1996).

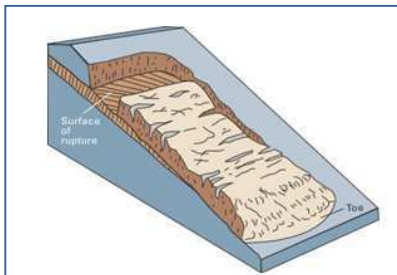


Figura 10: Esquema de deslizamiento traslacional (Cruden y Varnes, 1996).

- o **Propagación Lateral (*Spread*):** Ocurre cuando el movimiento es predominantemente por deformación interna del material, es decir, expansión (PMA, 2007).

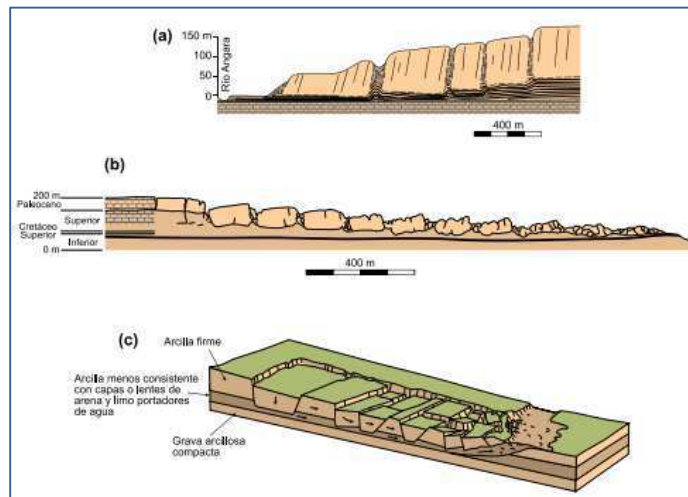


Figura 11: Esquema de expansiones laterales (Según Varnes 1978, tomado de PMA 2007).

- **Flujos (Flow):** Tipo de remoción en masa que al desplazarse tiene un comportamiento semejante al de un fluido, pudiendo ser saturado o en seco. Muchas veces se originan a partir de otro tipo de movimientos como deslizamientos o caídas (Varnes, 1978).

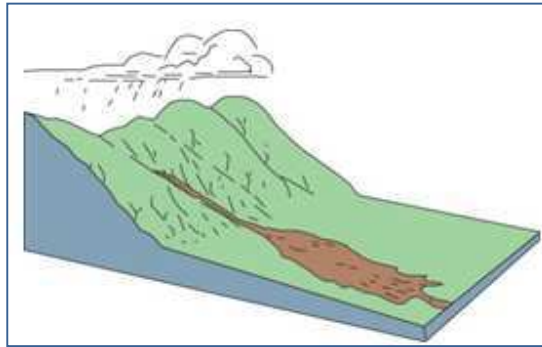


Figura 12: Esquema de flujo de barro o tierra (Cruden y Varnes, 1996).

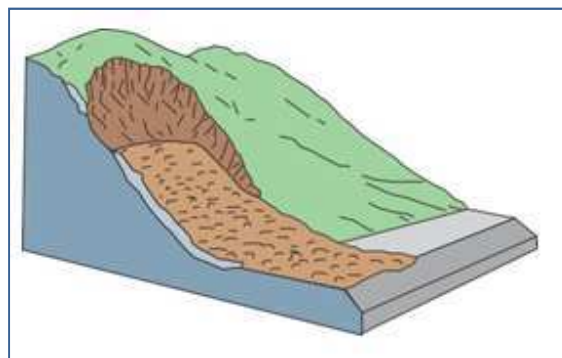


Figura 13: Esquema de flujo (avalancha) de rocas/detritos (Cruden y Varnes, 1996).

- **Deformación de ladera (Slope deformation):** Incluye la deformación lenta de ladera de montaña, deformación de ladera de roca, deformación de ladera de suelo, reptación y solifluxión (Hungry et al., 2014).
- **Tipo de Material:**
Básicamente hay tres grupos de materiales (Varnes, 1978) que se pueden dividir en más categorías como lo hace Hungry et al. (2014) en la Tabla 1:
 - **Roca (Rock):** Roca firme e intacta que estaba in situ antes de la RM.
 - **Detritos (Debris):** predominan los granos gruesos, de 20%-80% de partículas mayores a 2 mm.

- **Suelo (*Earth*):** predominan los granos finos, más del 80% de las partículas son menores a 2 mm.

De acuerdo a Abele (1984) la RM que dio origen al depósito de Mesón Alto corresponde a un deslizamiento, pero argumenta que ocurre una autolubricación debido a la gran diferencia de altura de la superficie de deslizamiento y potencia del paquete rocoso, lo que hace pensar en un flujo de rocas, es decir una avalancha. Además, como señala el autor el movimiento de los bloques continuó encauzado por el valle del río Yeso, lo que corresponde a una característica de avalancha de rocas. Es decir, que se tiene un deslizamiento inicial seguido por una avalancha de rocas por lo que el depósito, que es el resultado final del movimiento, tiene las características de la avalancha.

Se considera que los grandes derrumbes de montaña se producen, entre otras causas, por formación de grietas de descompresión paralelas a las laderas de los valles como consecuencia de la erosión fluvial y glacial de los valles (Abele, 1984). La generación de grandes remociones en masa se produciría entonces con posterioridad a la eliminación del apoyo efectuado por los glaciares en las laderas, aumentando la inestabilidad de éstas (Burbank, 2002).

2.2. AVALANCHAS DE ROCAS

Una avalancha de rocas es una RM extremadamente rápida, masiva y con movimiento como de flujo de roca fragmentada originada de un deslizamiento o caída de roca donde las rocas grandes se desintegran rápidamente (Hungry et al., 2014). Heim (1932) acuñó el término "*sturzstrom*" para describir este tipo de deslizamientos con comportamiento de flujo.

Un *sturzstrom* está caracterizado por velocidades que exceden los 100 km/h, y un volumen mayor a 10^6 m³ (Hsü, 1975). Se utilizan como sinónimos los términos "*rock-fall avalanche*" o "*rock avalanche*" para referirse a un *sturzstrom* (Cruden y Varnes, 1996). Mientras que el término "avalancha de rocas" fue acuñado por el Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (2007). Teniendo todas estas definiciones ligeras diferencias como si se trata de un gran bloque de roca (PMA, 2007) o detritos de roca (Hsü, 1975).

2.3. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UNA AVALANCHA DE ROCAS

Se pueden caracterizar por algunos parámetros cuantitativos que permiten describir y comparar diferentes eventos.

2.3.1. Geometría del depósito

El depósito de una avalancha se puede definir por el **área** que ocupa y su **espesor** aunque es complejo determinar dichos parámetros. Además, el **volumen** puede ser estimado multiplicando la superficie con el espesor medio (Rhodes, 2013). En todos los casos se utilizará el ángulo $\alpha = \text{alpha}$ medido desde la horizontal hacia arriba.

- **Ancho (An) y Largo (La) del depósito del depósito:** ambas medidas se consideran según la dirección del valle y con vista en planta, donde el ancho sería en la dirección del ancho del valle y la medida de largo sería en la dirección del valle. El ancho del depósito corresponde al valor **An**, y el largo corresponde a **La**. Luego se obtiene la relación **An/La**, que sería un indicador de excentricidad del depósito si se considerara que solo tiene dos dimensiones (dejando de lado su espesor). De esta manera al tener un valor de An/La igual a 1 se tendría un depósito circular y al ser $An/La < 1$ se tiene un depósito elíptico.

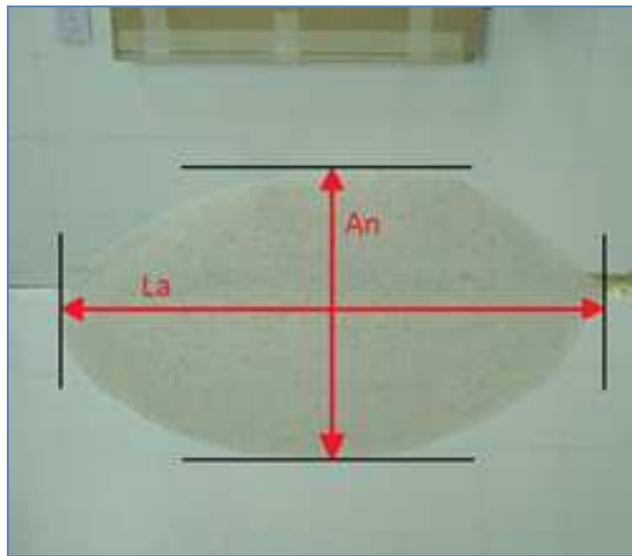


Figura 14: Ancho "An", y largo "La" del depósito generado en el dispositivo.

- **Espesor aparente:** Corresponde al alto máximo del depósito visto desde el corte lateral, se señala como "e" tal como muestra la figura 15.

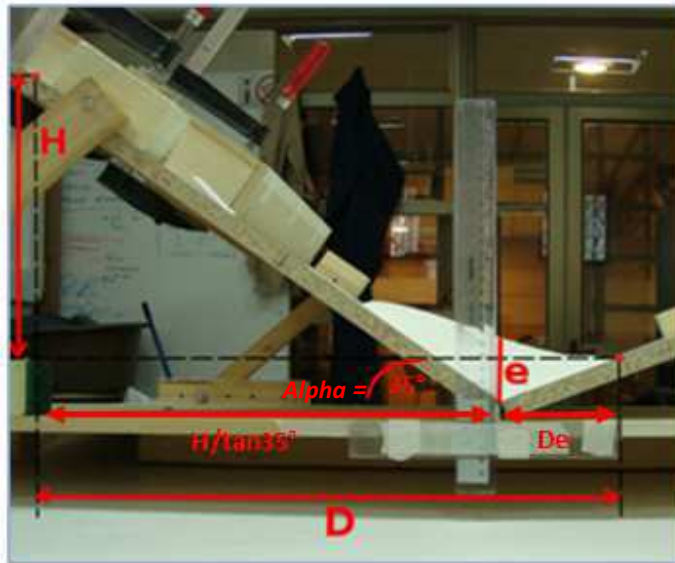


Figura 15: Esquema de los parámetros a medir durante el desarrollo de los modelos. e= espesor aparente, D=distancia horizontal, H=distancia vertical.

- **Desplazamiento:** El desplazamiento total puede describirse como la distancia entre el centro de gravedad de la masa de roca antes de la avalancha y el centro de masa del depósito final, donde la **distancia vertical hasta el centro de masa del nicho es H'** y la **distancia horizontal al centro de masa del depósito es D'**. Pero es de gran dificultad precisar el lugar de dichos centros de masas (Heim, 1932). Los parámetros utilizados en reemplazo de los centros de masas, son **las distancias verticales (H) y horizontales (D)** entre el punto más alto de la cicatriz de la avalancha y el punto más alejado del depósito generado (ver figuras 15 y 16).

Para que no exista distorsión de estas medidas en caso de que el punto más alejado del depósito no sea el punto más bajo, se utiliza también el valor de "D" como la distancia perpendicular más alejada del nicho, aunque no corresponda al punto más bajo (Nicoletti y Sorriso-Valvo, 1991) como se muestra en la figura 15.

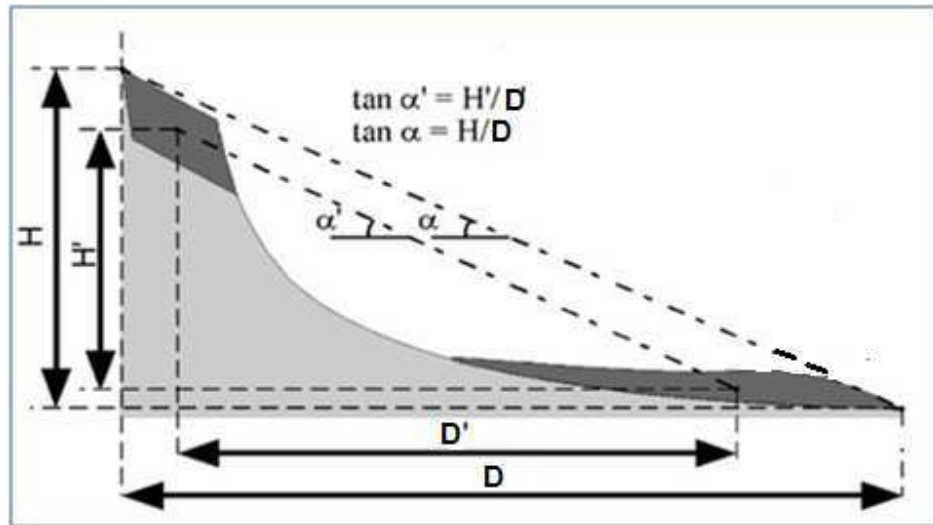


Figura 16: Esquema de los parámetros de deslizamiento (Modificado de Pollet, 2004).

- **Coefficiente de fricción (H'/D'):** De acuerdo a la Ley de Coulomb, este coeficiente es el cociente de las distancias verticales (H') y horizontales (D') entre los centros de masa (ver figura 16). Donde α' es el ángulo de fricción de la superficie de deslizamiento. Además μ' corresponde a la movilidad del material, donde en avalanchas pequeñas es aproximadamente igual a 0,6.

$$\frac{H'}{D'} = \tan \alpha'$$

Pero como se explicó anteriormente es difícil obtener las medidas de H' y D' por lo que se trabaja con el **coeficiente de fricción equivalente (H/D)** (Heim, 1932):

$$\frac{H}{D} = \tan \alpha$$

En este caso H/D también representa la movilidad del material, pero para Pollet (2004) se observa empíricamente que la movilidad aumenta con el volumen de la avalancha, obteniéndose valores entre 0,1 y 0,5. Pero como se usó H/D en vez de H'/D' el coeficiente representa más el esparcimiento de la avalancha que su movilidad.

- **Distancia excesiva de desplazamiento (D_e):** Para Hsü (1975) al tener valores anormalmente bajos del coeficiente de fricción equivalente, se propone utilizar la distancia excesiva de desplazamiento que representa la comparación del desplazamiento de una masa de arena cuya pendiente es de 32° (ángulo de reposo), si la pendiente utilizada es de un ángulo distinto debe usarse ese ángulo en la ecuación, por ejemplo en este trabajo se

trabaja con una ladera de 35° por lo que en la ecuación se considera ese valor (figura 15).

$$D_e = D - \frac{H}{\tan 35^\circ}$$

2.4. CARACTERÍSTICAS DE DEPÓSITOS MORRÉNICOS

Las morrenas presentes en la zona cordillerana de la región Metropolitana, donde se sitúa este trabajo, tienen espesores que varían entre 5 y 80 m (Chiu, 1991) y “disponen como agregados de clastos redondeados a sub redondeados polimícticos, con tamaños que oscilan entre 2 cm y 5 m, con promedio entre 20 y 50 cm. La matriz varía entre un 20% y 60% del total del depósito y está compuesta principalmente por arena, limo y abundante arcilla. Los depósitos no presentan estratificación, con una disposición de clastos caótica, algunos de ellos con estrías, cicatrices y señales de despuntamiento por roce” (Ormeño, 2007).

Además existen distintos tipos de morrenas, cada una con distintos tipos de características de materiales y disposición con respecto al valle. El material de las morrenas de fondo está más triturado que el de las morrenas laterales y posee más limo, en cambio las morrenas de superficie están formadas principalmente por materiales gruesos, bloques y gravas sin matriz o con matriz discontinua (Derruau, 1991). Independientemente del tamaño de los clastos presentes, estos se presentan poco desgastados, ya que no son rodados debido a que el glaciar solo rompe las puntas de los clastos y desgasta los ángulos así formados (Rice, 1982).

Las morrenas terminales pueden variar en altura desde menos de 1 m hasta más de 100 m de acuerdo a Rice (1982), pero no hay un catastro de estos tamaños en la zona de estudio.

2.5. MODELACIÓN ANALÓGICA

La modelación analógica es un método que trata de estudiar y acercar de manera simplificada un fenómeno observable en la naturaleza a un laboratorio, reduciendo las escalas espacial y temporal y permitiendo analizar procesos geológicos complejos a través de la intervención de distintas variables o parámetros en el problema estudiado (Hubbert, 1937).

Para que un modelo análogo entregue interpretaciones ajustadas a la realidad sobre un fenómeno natural, el modelo debe estar a escala. Es decir, que debe respetar leyes de similitud con la naturaleza (Hubbert, 1937). Por eso se calculan coeficientes de similitud, que son los cocientes de escala entre los parámetros geométricos,

físicos y mecánicos del modelo y los del caso natural estudiado, aunque se debe considerar que los procesos geológicos son muy complejos por lo que se dificulta hacer un modelo analógico perfecto.

2.5.1. Leyes de similitud

- **Similitud geométrica:**

El coeficiente de similitud geométrica R_L es el cociente entre las dimensiones del modelo y las del objeto estudiado:

$$R_L = L_{mod}/L_{nat}$$

Este coeficiente debe ser constante, lo que implica una **conservación de los ángulos** de la naturaleza al modelo (pendientes topográficos, de fallas, estratos, laderas, etc.).

- **Similitud cinemática:**

El cociente R_T entre el tiempo del modelo y el tiempo de la naturaleza debe ser constante. Así que se pueden calcular los cocientes de velocidad R_V y de aceleración R_a de las maneras siguientes:

$$R_V = \frac{V_{mod}}{V_{nat}} = \frac{R_L}{R_T} = \frac{L_{mod} * T_{nat}}{L_{nat} * T_{mod}}$$

$$R_a = \frac{a_{mod}}{a_{nat}} = \frac{R_L}{R_T^2} = \frac{L_{mod} * T_{nat}^2}{L_{nat} * T_{mod}^2}$$

En el caso de un campo de gravedad idéntico entre el modelo y la naturaleza, el cociente de aceleración R_a vale 1, así que:

$$R_L = R_T^2$$

- **Similitud mecánica:**

El cociente entre las diferentes fuerzas que se aplican en el sistema (fuerzas de gravedad, de inercia, de viscosidad, etc.) debe estar constante entre el modelo y la naturaleza. Simplificando la ecuación fundamental de la dinámica en los medios continuos, y en el caso de un campo de gravedad idéntico entre el

modelo y la naturaleza, se puede obtener la relación siguiente entre el cociente de las tensiones R_σ , el cociente de las densidades R_ρ y el cociente de las longitudes R_L (Graveleau, 2008):

$$R_\sigma = R_\rho * R_L$$

Además, en el caso de las reologías frágiles, se aplica la ley de Mohr-Coulomb entre la tensión de corte τ , el ángulo de fricción interna del material ϕ , la tensión tangencial σ_n y la cohesión del material C_0 :

$$\tau = \tan\phi * \sigma_n + C_0$$

ϕ es un ángulo sin dimensiones, así que debe estar conservado entre la naturaleza y el modelo ($R_\phi = 1$) y los cocientes modelo/naturaleza de las varias tensiones deben ser idénticos, así que se puede escribir:

$$R_{\sigma_n} = R_\tau = R_{C_0} = R_\rho * R_L$$

- **Teorema Pi de Buckingham:**

Otra manera, en principio equivalente, de calcular los parámetros de un modelo a la escala es la utilización del teorema de Pi (Jorand, 2007):

“Si n parámetros definen un fenómeno que tiene m ($<n$) parámetros (unidades) con dimensiones independientes, existen $n-m$ criterios de similitud (parámetros sin dimensión). Estos parámetros sin dimensión deben ser iguales en el modelo y la naturaleza.”

La dificultad de este método es de definir los buenos parámetros, pero en principio, el teorema Pi conduce a los mismos resultados que las leyes de similitud. Por ejemplo, la aplicación del teorema Pi al comportamiento non-elástico conduce a la ley de Mohr - Coulomb citada precedente.

La puesta a la escala de un modelo permite elegir las buenas dimensiones del dispositivo y los buenos materiales para sacar interpretaciones justas sobre el fenómeno estudiado.

2.5.2. Modelación de remociones en masa

Los peligros naturales como las remociones en masa y más específicamente las avalanchas de rocas se caracterizan por ser inesperadas y muy rápidas por

lo que su observación directa desde la naturaleza es muy difícil (Rhodes, 2013).

A continuación se hace una breve reseña sobre los tipos de modelos análogos que se han realizado para estudiar avalanchas de rocas o deslizamientos de suelos.

2.5.3. Modelación analógica de deslizamientos de tierra o avalanchas de rocas en sus entornos

Se han realizado estudios sobre el colapso y las avalanchas de rocas en laderas de estratovolcanes en su mayor parte dirigidos por equipos del Laboratorio *Magmas y Volcanos*, Universidad *Blaise Pascal* (Clermont – Ferrand, Francia) por diversos autores como Vidal y Merle (1999), Merle et al. (2001), Paguican et al. (2012), Andrade y Van Wyk de Vries (2010). Dentro de estos trabajos aparecen 3 tipos de modelos según el origen de avalanchas: 1) por reactivación de fallas, 2) extensión volcánica, 3) presencia de una capa de roca que presenta menor resistencia al corte. Pero en todos estos casos la problemática estudiada era el origen de las avalanchas y no el análisis de la avalancha en sí, por lo que las escalas usadas corresponden a la escala del volcán y no a las avalanchas de rocas (Rhodes, 2013).

Otros autores como Mourgues y Cobbold (2006) y Lacoste et al. (2011), tratan la problemática de la influencia de la incisión fluvial y la sobrepresión de fluidos sobre la inestabilidad de la ladera. Estos modelos están a escala de las leyes de similitud pero no a escala temporal. Y como se trabaja a escala de inestabilidad de ladera se buscan respuestas a escalas mayores que el tamaño de un deslizamiento provocado.

Katz y Aharonov (2006) estudian la influencia de la sismicidad sobre la activación de deslizamientos y el tipo de fracturamiento. Este modelo está puesto a la escala de la aceleración sísmica, pero no al nivel del deslizamiento (geometría, velocidad, reología).

Más recientemente Bonnet (2011), estudió la evolución de un deslizamiento traslacional a la escala de la ladera. El dispositivo utilizado está puesto a la escala al nivel reológico con el método de las leyes de similitud, pero no está a la escala al nivel geométrico.

2.5.4. Modelación analógica de avalanchas de rocas como flujos

Uno de los primeros estudios sobre las avalanchas de rocas fue el trabajo de Hsü (1975). Fue él quien realizó el primer modelo analógico tratando de analizar estos fenómenos. Las escalas geométricas y temporal fueron calculadas con las leyes de similitud relativo al *sturzsstrom* del “*Elm*” (localidad

montañosa de Suiza) que ocurrió en 1881. El material utilizado es una suspensión de bentonita, un material tixotrópico (que puede cambiar de sólido a fluido) cuya viscosidad depende de la velocidad. Hsü logró realizar una suspensión con una consistencia particular para que el depósito respete la escala geométrica del modelo, e hizo algunas observaciones parecidas a unas del caso del *Elm*. De todas maneras Hsü (1975) reconoció una diferencia de comportamiento por cuanto la bentonita estaba controlada por un comportamiento de fluido, en cambio una avalancha es controlada por un comportamiento de flujo granular.

Posteriormente otros autores recogieron los resultados de Hsü, generando dispositivos similares pero utilizando material granular seco sin cohesión como arena o grava. De esta manera Hungr y Morgenstern (1984) realizaron un estudio sobre la influencia de la presión sobre la velocidad de los flujos. Greve y Hutter (1993) analizaron el comportamiento de flujo de los materiales granulares en una caída curva con un enfoque matemático, tratan de encontrar ecuaciones que describieran el comportamiento del material.

Davies y McSaveney (1999, 2002) y Manzella y Labiouse (2008) estudiaron la influencia de los parámetros de la caída (altura, dinámica) y del material (tipo, volumen) sobre el coeficiente de fricción equivalente y la geometría del depósito. Sus resultados muestran que la geometría del depósito depende del tipo de material utilizado, la dinámica de la caída (uno o varios eventos sucesivos) y el volumen del material (que influye más que la altura de la caída. Sin embargo, señalaron que no hicieron bastantes experimentos para generalizar sus resultados.

Según Davies y McSaveney (1999), un análisis dimensional con el método del teorema Pi mostró que conservando las características (densidad) del material y del medio ambiente, respetando la escala geométrica (tamaño y forma de los granos, rugosidad de la superficie), y conservando el coeficiente de resistencia aerodinámica de los granos en el aire, una avalancha granular de pequeña escala podría representar a una avalancha de rocas real manteniendo la dinámica. Pero mientras que es fácil realizar la primera condición con arena o grava, los dos otros resultan problemáticas por efectos de escala. En efecto, respetar la escala geométrica en un modelo a escala reducida induce elegir un material muy fino con fuerzas intra-granulares que no corresponden a las fuerzas a gran escala. También, respetar la tercera condición necesitaría poner el modelo en presión atmosférica reducida, lo que es bastante complicado (Rhodes, 2013).

Por lo dicho anteriormente el modelo a utilizar corresponde a uno tal que respete la similitud geométrica, aunque no lo haga con las similitudes mecánica y cinemática.

3. CONTEXTO GEOLÓGICO

3.1. MARCO GEOLÓGICO

El depósito de Mesón Alto, es un depósito sedimentario localizado inmediatamente aguas abajo del Embalse El Yeso (Deckart et al., 2014) y se ubica en la Cordillera Principal en los Andes Centrales, zona centro de Chile, al W de las estructuras N-S de la faja plegada y corrida del Aconcagua (Giambiagi et al., 2003), ver figuras 17 y 18.

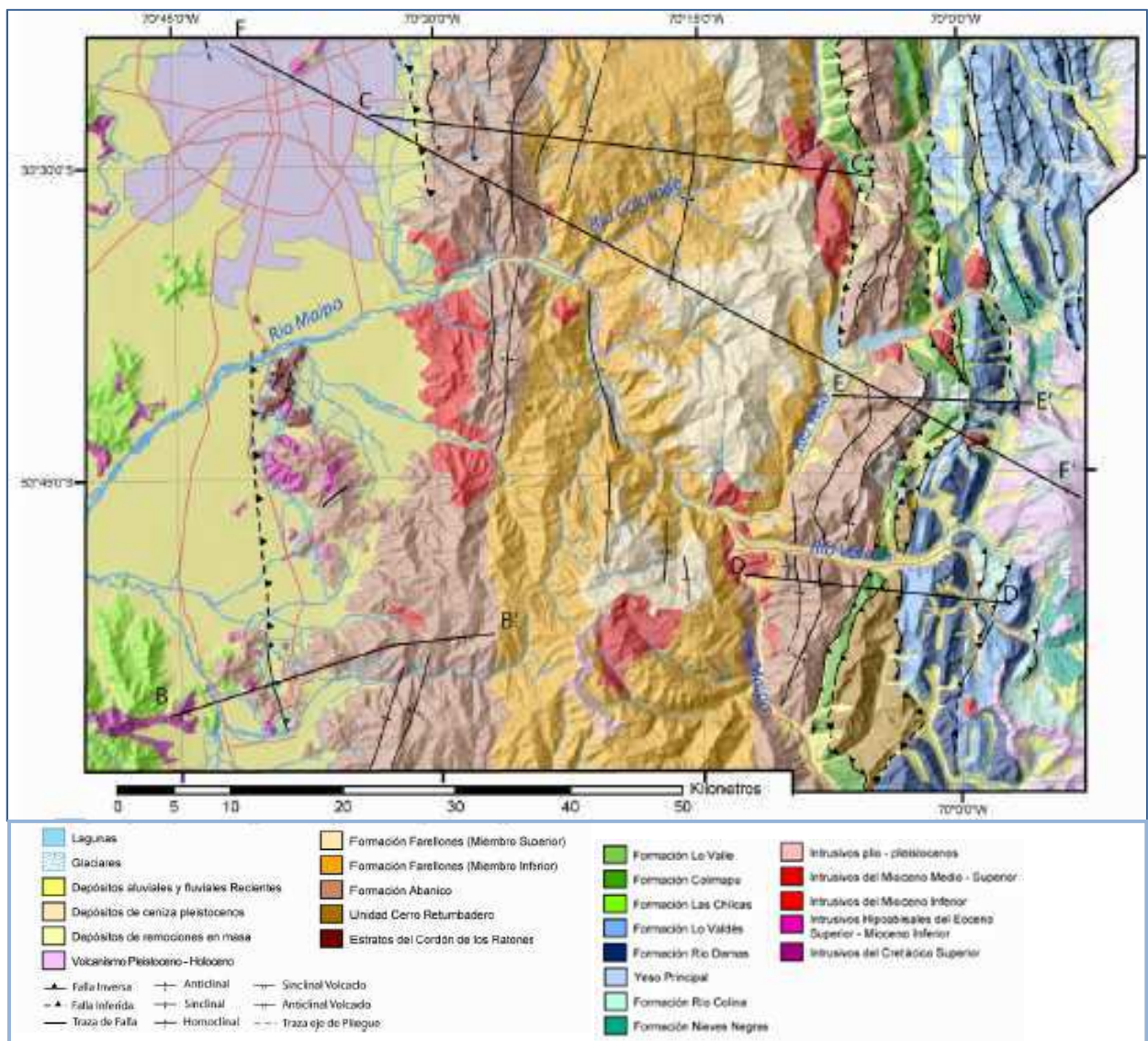


Figura 17: Mapa geológico entre los 33°30' - 34°00' S (Modificado de Fock, 2005). Escala 1:500.000. El recuadro negro indica la zona del depósito de Mesón Alto.

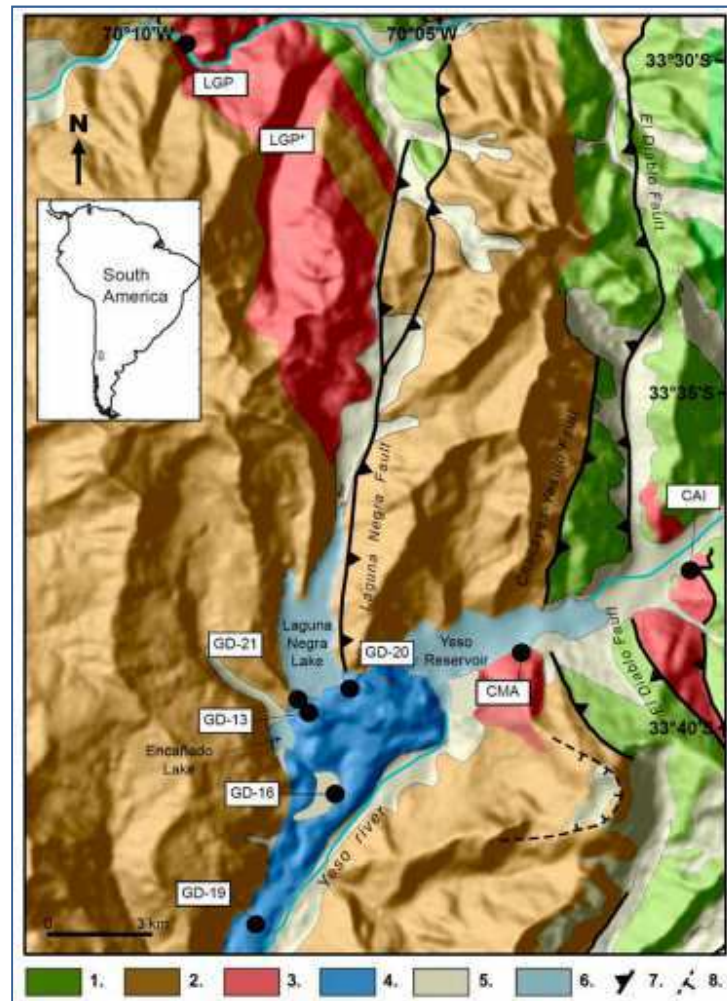


Figura 18: Mapa geológico del área estudiada. Simbología: 1. Rocas Mesozoicas; 2. Rocas Oligo-Mioceno (Formaciones Abanico y Farellones); 3. Rocas plutónicas; 4. Depósito en estudio de Mesón Alto; 5. Depósitos aluviales; 6. Cuerpos de agua; 7. Fallas; 8. Escarpe de Deslizamiento; CMA=Cerro Mesón Alto, LGP=Plutón La Gloria, LGP*=Plutón La Gloria (Cornejo and Mahood, 1997), CAI=Intrusión del Cerro Aparejo (Imagen: Deckart et al., 2014).

De acuerdo a la carta geológica del año 1980, en la hoja de Santiago, la litología de la zona de estudio corresponde a la Fm. Abanico, es decir una secuencia de rocas volcánicas, principalmente andesíticas y riolíticas, con intercalaciones de rocas sedimentarias continentales (figuras 17 y 18). Con presencia de depósitos lagunares como en el costado W de la Laguna Negra. Además, con presencia de un intrusivos como el Plutón La Gloria ubicado al Norte del depósito siguiendo el valle de la Laguna Negra y de un Plutón de menor tamaño intruyendo al cerro Mesón Alto.

La amplia distribución espacial, el espesor, y la presencia de intercalaciones sedimentarias en la Fm. Abanico indican que fue depositada en una cuenca bajo un régimen extensional, seguido posteriormente por un proceso de inversión tectónica (Charrier et al., 2002).

3.2. MARCO GEOMORFOLÓGICO

Los elementos geomorfológicos del depósito varían de acuerdo al autor. Marangunic y Thiele (1971) describieron el depósito como morrena argumentando la observación en terreno de clastos redondeados y bloques estriados. Además, de la forma lobulada de la Laguna Negra en el margen norte del depósito.

Por otra parte Abele (1984), observó una falta de elementos redondeados, la presencia de bancos rocosos que conservan su ordenamiento interno, un volumen de material mucho mayor a las morrenas presentes en valles vecinos y la ausencia de morrenas laterales aguas arriba.

El depósito tiene un volumen de $4,5 \text{ km}^3$, 400 m de espesor máximo, 250 m de espesor medio y 2,5 km de ancho máximo según Marangunic y Thiele (1971). Por otra parte Abele (1984) le asignó un largo de 15 km y una superficie de 22 km^2 .

Al realizar un trabajo con software Google Earth, se observa que el depósito se ubica aguas abajo del Embalse El Yeso, y ha sido erosionado en su parte SE por el río Yeso. Y en la parte W del depósito está limitado por el Estero Lo Encañado, que surge de la Laguna Lo Encañado en el borde del depósito. También se observa que el cerro Mesón Alto, tiene un escarpe semi circular, supuesto origen del material del depósito de Mesón Alto en el valle del río Yeso. Sobre la cicatriz existen conos de deyección de caídas de rocas posteriores a la cicatriz, como se observa en la figura 19.

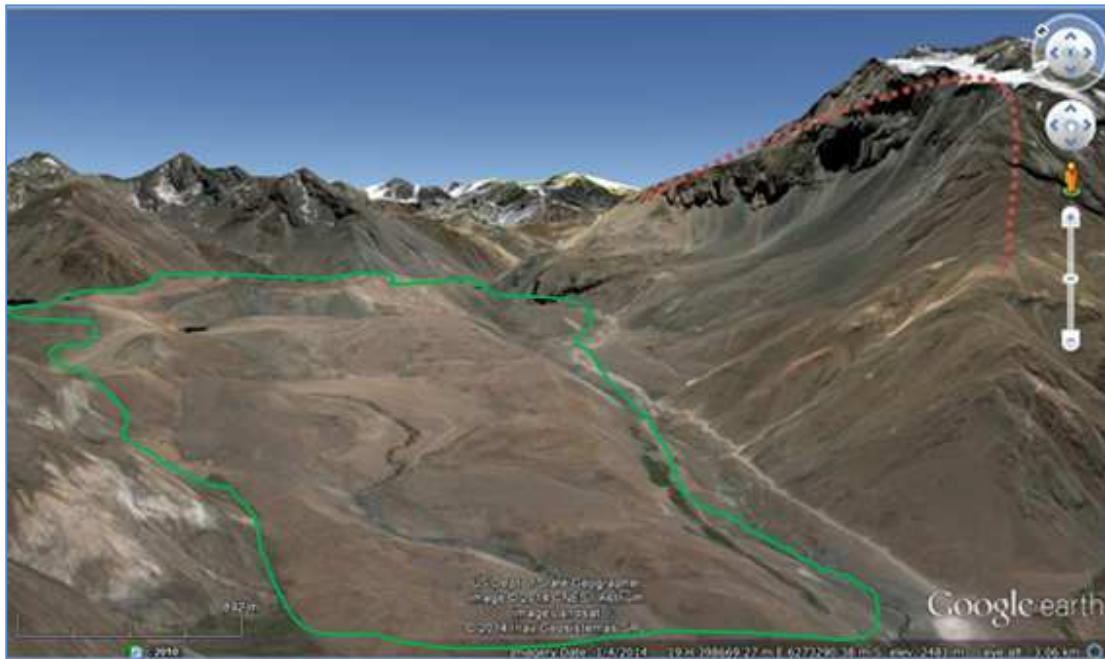


Figura 19: Vista al ENE donde se aprecia el Cerro Mesón Alto con un escarpe (línea punteada en rojo) que da hacia el depósito en estudio (línea color verde). (Foto: Google Earth).

Al observar el depósito en sí, se aprecian bandas de colores distintos, principalmente en el borde del depósito que da al Embalse (figura 20).



Figura 20: Vista al WSW del depósito (marcado en color verde) donde se observan “bandas” de colores (separadas por líneas en rojo) (Foto: Google Earth).

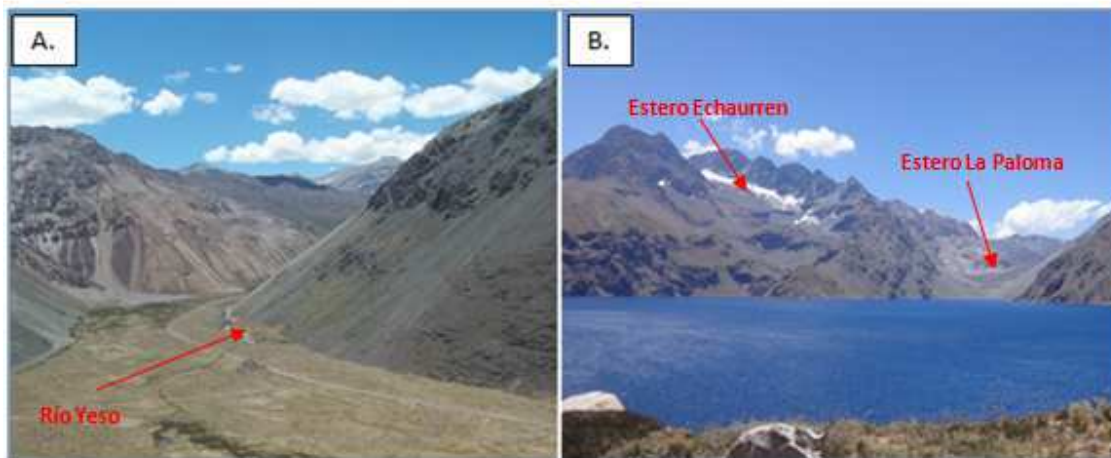


Figura 21: Fotos del depósito ubicado en la confluencia de distintos valles glaciales: A) Valle del río Yeso aguas arriba del embalse El Yeso con vista ENE; B) Valles que llegan a la Laguna Negra, vista al N: a la derecha Estero La Paloma y a la izquierda estero Echaurren, el que aún conserva un glaciar en la parte alta del cerro.

Al observar las medidas del depósito desde del software Google Earth se obtiene que el largo máximo aproximado es de 6,5 km y un ancho máximo de 3,3 km en la zona que da al borde de la Laguna Negra.

3.2.1. Posible morfología de deslizamiento de roca

Abele (1984), señala que las morrenas terminales y marginales nítidas son muy escasas en los sectores bajos y medios de los valles andinos de la zona central chilena. No por su ausencia sino por las malas condiciones de conservación. Y señala como ejemplo el caso de Mesón Alto que siendo una RM sepultó los sectores terminales de las lenguas de los glaciares en retroceso del río Yeso y la Laguna Negra. Además señala que el depósito no puede ser un depósito morrénico por la presencia de bandas de litologías, por el tamaño de los bloques, comparándolo con valles cercanos y la no continuación aguas arriba de este tipo de depósitos entre otros. Además, considera el depósito como un resultado de un desprendimiento unitario de un bloque desde el cerro Mesón Alto, el cual deslizó y fue frenado por la ladera contraria del sector Norte. Deteniéndose de manera disgregada y bloqueando el paso del río Yeso. Luego continuó su movimiento por la pendiente del valle.

Ormeño (2007), señala que el depósito de Mesón Alto corresponde a una Remoción en Masa (RM) típica de Alta Cordillera, siendo una de las más grandes remociones en masa del sector del Cajón del Maipo (Figura 22). Además señala que este tipo de depósitos son posteriores a los eventos glaciales pues se preservan sobre valles glaciados.

3.2.2. Posible morfología de morrena

El depósito de Mesón Alto ha sido considerado como depósito de los glaciares que corrían de norte a sur por los actuales valles de los esteros La Paloma y Echaurren, formando la Laguna Negra, y por el estero Lo Encañado (Marangunic y Thiele, 1971).

Los depósitos de morrenas se ubican en los sectores altos de la cordillera, preferentemente en laderas de cerros y fondo de valles por sobre los 2000 m de altura. Debido a que se preservan en el fondo de los valles y se disponen en contacto directo sobre el substrato rocoso, se infiere que están relacionados con el avance de glaciares de valle durante el Último Máximo Glacial (Ormeño, 2007).

Como se muestra en la figura 21, los valles que rodean al depósito se observan claramente como valles de tipo glacial.

3.2.3. Posible morfología de Origen Mixto

El primer autor en reconocer un origen mixto es Ormeño (2007), que indica que la zona del depósito corresponde mayoritariamente a un deslizamiento de roca y en menor medida a un depósito glacial. Aunque en su caso reconoce como depósito de Mesón Alto solamente como una fracción del depósito total correspondiente a la remoción y considera el depósito glacial de manera aparte.

Posteriormente en Moreiras y Sepúlveda (2012) y en Deckart et al. (2014) se reafirma esa idea asignándole un origen mixto al depósito donde intervendría morrenas glaciales preexistentes a una remoción en masa post glacial de gran volumen. Esto basándose en que la edad del depósito es de 4.500 a 4.700 años (Antinao y Gosse, 2009).

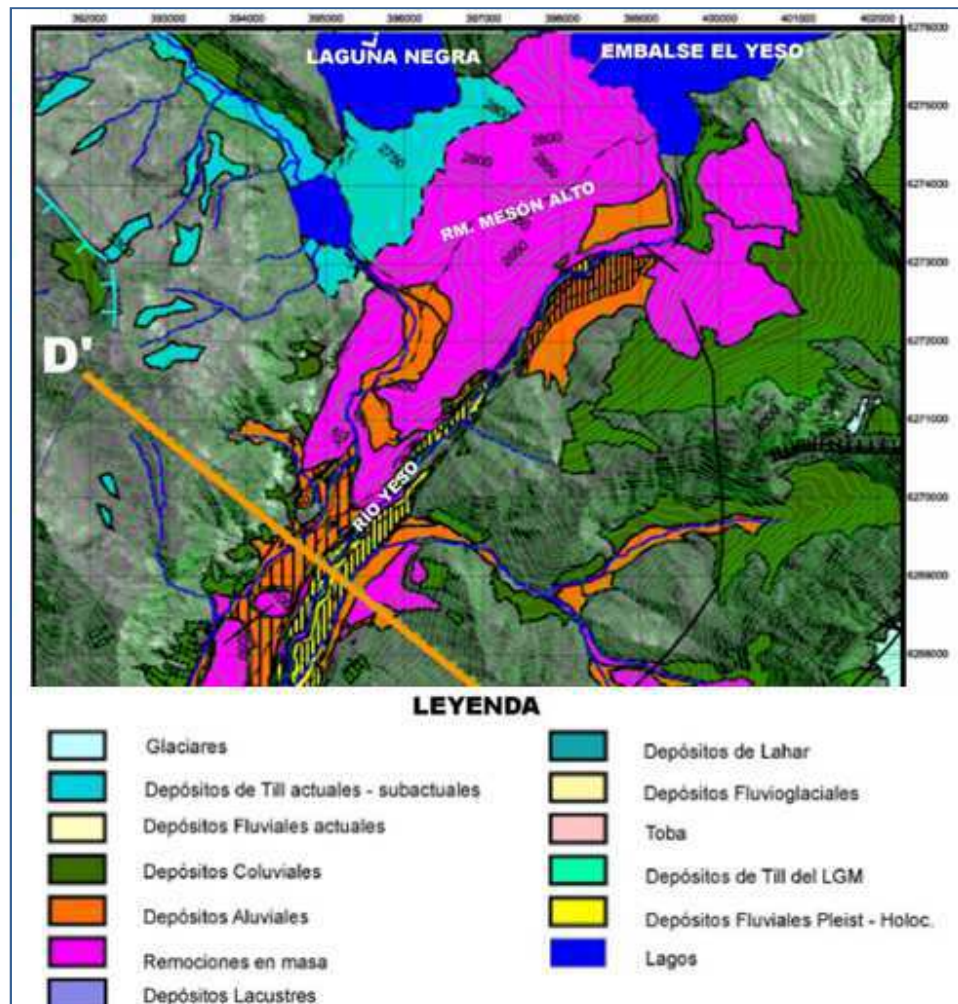


Figura 22: Mapa de la zona de estudio en que se clasifica el depósito de Mesón Alto mayormente como Remoción en Masa (rosado) y menormente como morrena (en celeste) (Obtenido de Ormeño, 2007).

4. RESULTADOS

4.1. CARTOGRAFÍA

Al observar el depósito in situ, se aprecia que está conformado por muchos pequeños montículos, con una topografía muy variante en todas direcciones, pero los altos topográficos máximos se sitúan en el borde del Embalse El Yeso, y la zona más baja, aguas abajo por el valle. Lo que se aprecia en la figura 23.

Por otra parte, como se observa en la figura 23, se divisan zonas claramente diferenciadas por color, unas más claras que varían en tonos amarillos y blancos, y otras más oscuras, que se aprecian de color gris a negro.



Figura 23: Fotos de terreno donde se aprecian zonas de colores (divididas por líneas negras) y presencia de montículos.

Existe en el depósito una diversidad de tamaño de clastos desde gránulos de 2 cm, hasta bloques de 25 – 30 m. La matriz varía de arena gruesa hasta arcillas. La proporción de clastos y matriz es variable, habiendo zonas con casi un 100% de cobertura de clastos y otras con ausencia de los mismos. Todo esto apreciable solo en superficie del depósito ya que por su magnitud no era posible realizar calicatas suficientemente profundas para observar su estructura interna.

Dentro del depósito se reconocieron dos litologías base que se utilizaron para cartografiar la zona: 1) clastos de la Formación Abanico, principalmente lavas andesíticas y también algunos clastos de conglomerados continentales (ver figura 24). 2) clastos de granitoides (ver figura 25). No se realizó una clasificación detallada de las litologías de cada grupo, ya que lo que interesaba era diferenciar las zonas de colores, que efectivamente correspondían a los 2 grupos de litologías ya señalados. Según Deckart et al. (2014), los granitoides tienen distintas litologías de

acuerdo al lugar del depósito donde se ubicaban: a) Granodiorita de textura poikilítica (muestra GD-13, figura 18). b) Monzogranito con xenolitos de grano fino compuestos de Biotita, Plagioclasas alteradas a Sericita y Anfíbolos (muestra GD-16, figura 18). c) Granodiorita con textura perítica en Feldespatos (muestra GD-19, figura 18). d) Cuarzodiorita con textura perítica en feldespatos (muestra GD-20, figura 18). e) Cuarzomonzodiorita con xenolitos de grano fino compuestos de Biotita, Plagioclasas alteradas a Sericita y Anfíbolos (muestra GD-21, figura 18).



Figura 24: Clastos pertenecientes a la Formación Abanico, principalmente andesitas y brechas/conglomerados continentales que se observaron de color oscuro en el depósito: A. y B. Andesitas. C. Brecha. D. Estratificación de fangolitas areniscas de grano fino.

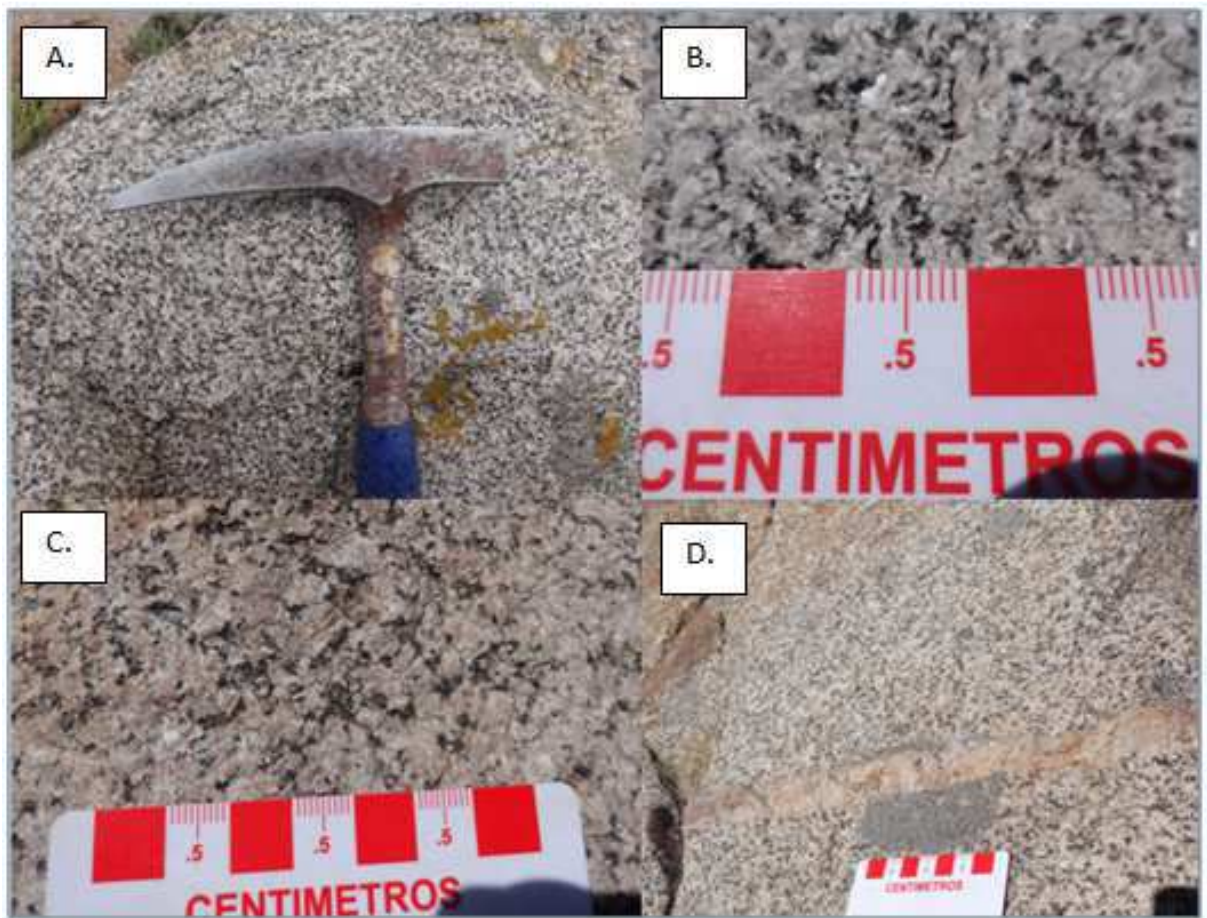


Figura 25: Clastos graníticos encontrados en el depósito. Corresponden a la litología de color claro observada a distancia: A. Granitoide con mayor presencia de máficos. B. Granitoide con menor presencia de máficos. C. Granitoide con menor presencia de máficos y mayor grado de meteorización. D. Granitoide con xenolito de grano fino, cortado por una intrusión.

Además, se observa retrabajo del depósito por distintas causas. Casi todo el borde del depósito que da al río Yeso, presenta deslizamientos, al igual que la zona que rodea al estero Manzanito. Por otra parte, agua abajo del estero Lo Encañado se aprecia una zona de depósitos aluviales, que generaron zonas de pequeños lagos que se reconocen por su forma y por el material muy fino que los compone rodeando un bajo topográfico.



Figura 26: Deslizamientos al interior del depósito en la zona del estero Manzanito (borde del deslizamiento en rojo, la flecha indica dirección de movimiento).

Por todo el depósito se observaron clastos con presencia de estrías, aunque éstas eran muy superficiales, denotando poco movimiento durante su generación como clastos y depositación. Incluso algunos clastos tenían estrías por varias caras siendo en general muy angulosos. Por otra parte en el costado del Embalse El Yeso se observaron estrías más profundas de 2 a 3 cm de profundidad y que iban a lo largo del clasto. También se encontraron rocas con fracturas por causa del congelamiento.

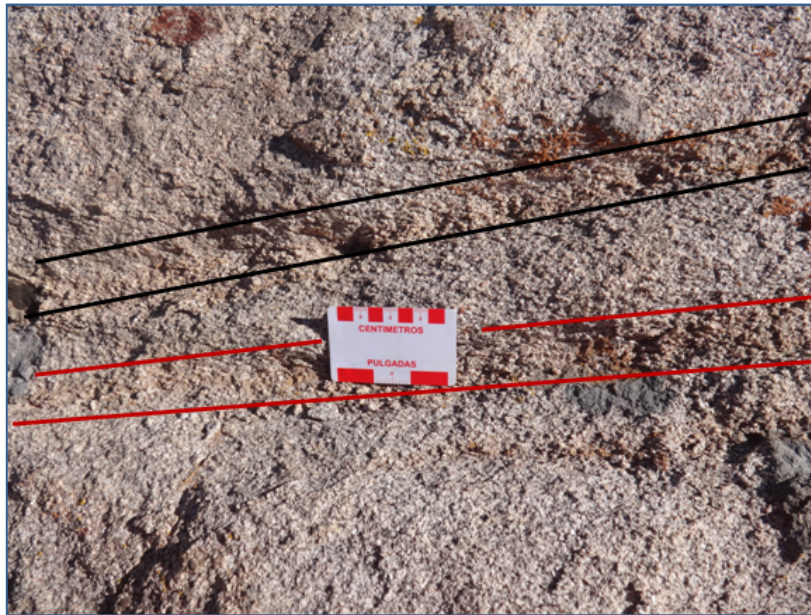


Figura 27: Estrías de 2 a 3 cm de profundidad en la roca, con 3-4 cm de ancho, y del largo del clasto. Encontradas en el borde del depósito hacia el lado del Embalse El Yeso.



Figura 28: Estrías de menor envergadura encontradas en el depósito, correspondientes a espejos de falla.



Figura 29: Fracturamiento producto de la 41gelifracción.

Al observar en dirección del cerro Mesón Alto desde el depósito se puede reconocer la forma que tiene el intrusivo presente en la roja de caja aunque el intrusivo no se observa claramente. Dentro del cerro Mesón Alto en la parte más al NE del escarpe, el plutón tiene una forma que podría determinarse tabular (figura 30), pero al observar hacia el W siguiendo la línea del escarpe no es clara su geometría, solo se distinguen pequeñas zonas sin coluvios que las cubran en las que se observan tanto la Fm. Abanico como el intrusivo (figura 31), pero su distribución hace pensar en que el intrusivo se extiende adelgazando su potencia, como una ramificación de forma irregular.



Figura 30: Forma tabular del intrusivo (líneas en rojo delimitan el intrusivo) en la ladera W del Cerro Mesón Alto.

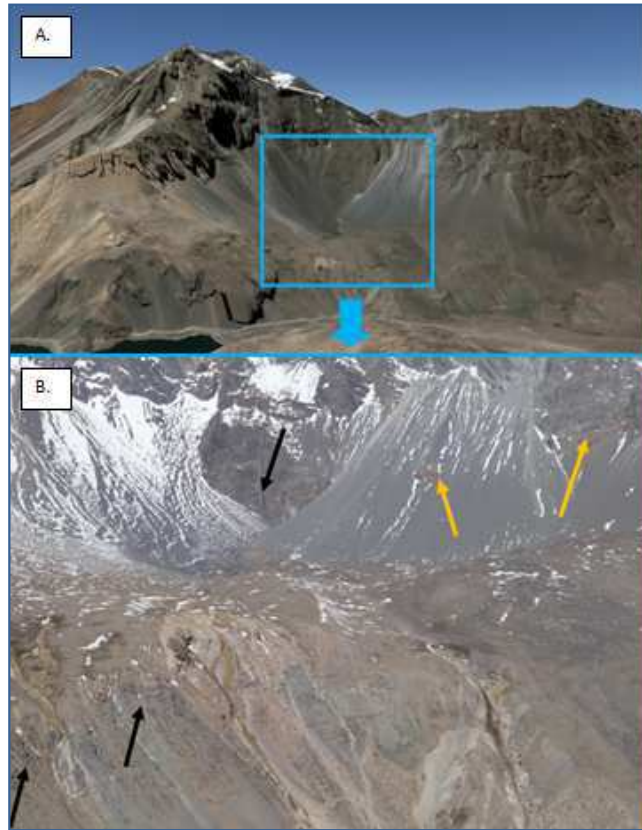


Figura 31: A. Vista al SW del Escarpe del Cerro Mesón Alto. B. Acercamiento, se observa el escarpe cubierto por coluvios que no permiten observar la litología subyacente. Se observan indicios de lo que podrían ser afloramientos de la Fm. Abanico (flechas en negro) y del intrusivo (flechas en naranja).

En tres zonas del depósito (figura 32) se encontró material donde la matriz era mayoritaria, con un porcentaje mayor al 50% del material de superficie. La primera de ellas ubicada junto a un afloramiento de roca con la Formación Abanico entre la Laguna Negra y el Embalse El Yeso en el borde norte del depósito, el material era en un 100% matriz, sin clastos, de un color amarillo y de tamaño fango. En la segunda y tercera zonas ubicadas ambas a orillas del embalse El Yeso, donde en el segundo lugar más al sur de esta zona se observaron clastos en la matriz pero que no superaban el 30% del total del depósito, donde los clastos eran en un 95% de material intrusivo. Además, el material fino correspondía a arena y arcillas. En la parte más al norte, correspondiente al tercer lugar, la matriz variaba entre 60% y 80% de arena y arcillas, con clastos sub angulosos a sub redondeados de composición diamíctica de granitoides y andesitas. Estas tres zonas se muestran en las figuras 33, 34 y 35 a continuación.



Figura 32: Ubicación de las zonas con presencia mayoritaria de matriz mostradas en las figuras 32, 33 y 34.



Figura 33: Vista desde primer lugar donde se encuentra material con contenido de un 100% de matriz.



Figura 34: Tercer lugar donde se observa material con alto contenido de matriz. Se aprecia que este material esta bajo el depósito y por acción antrópica (movimiento de áridos) ha quedado al descubierto.



Figura 35: Segundo lugar donde se observa gran cantidad de matriz. Los clastos varían de solo intrusivos a andesíticos.

Con las observaciones hechas en terreno y los 61 puntos de control tomados, que se observan en la figura 36, se realizaron dos mapas: el primero es un resumen de las litologías presentes en los clastos del depósito (figura 37), y el segundo con los porcentajes de matriz presentes en las distintas zonas, independiente de la litología que presentaban (figura 38).



Figura 36: Puntos de control tomados en terreno. La línea verde corresponde al límite del depósito (Imagen: Google Earth).

4.1.1. Mapa de litologías.

Mapa litología de clastos, escala 1:35.000

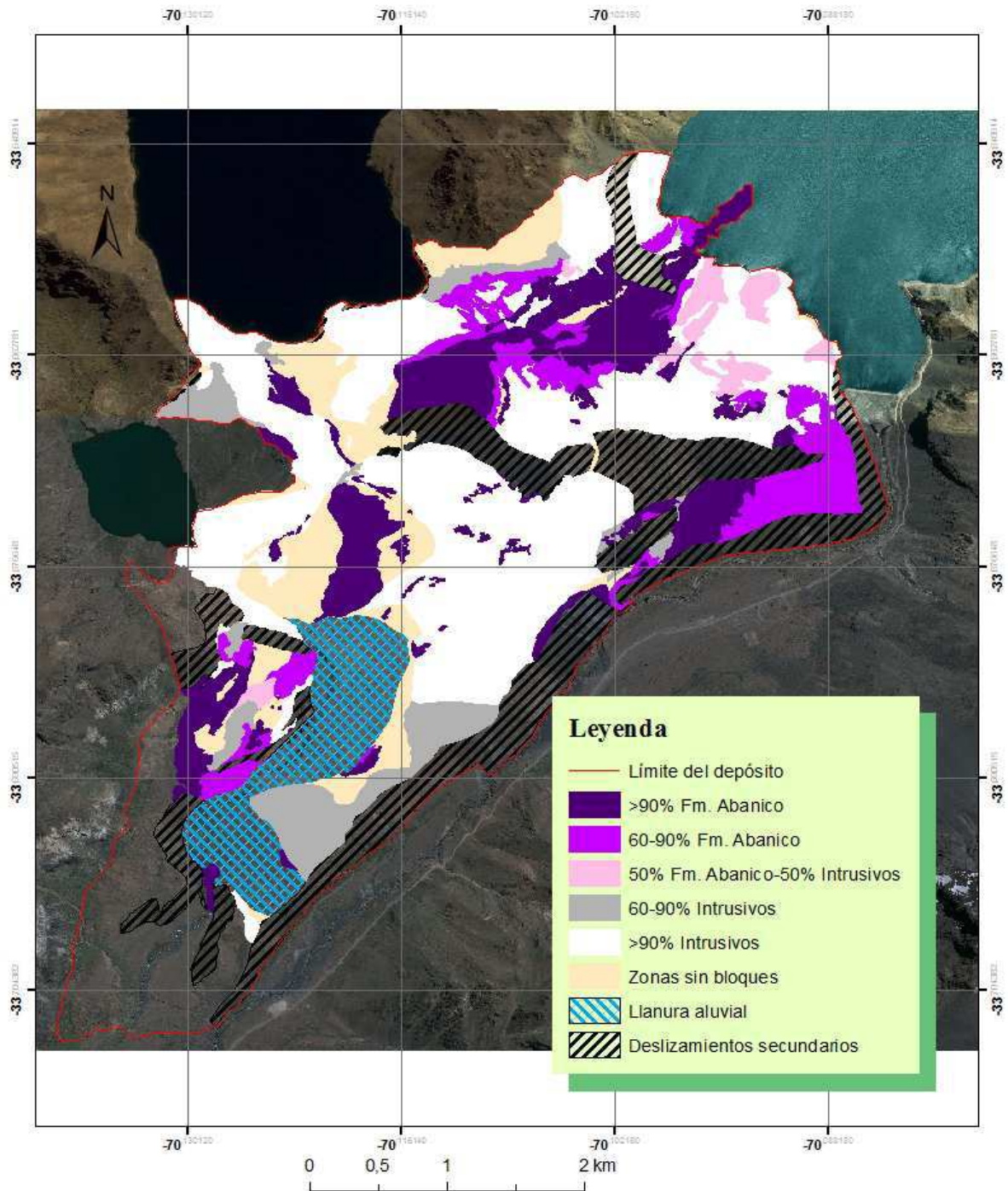


Figura 37: Mapa de litología de los clastos presentes en el depósito.

4.1.2. Mapa de porcentaje de matriz.

Mapa porcentaje de Matriz, escala 1:35.000

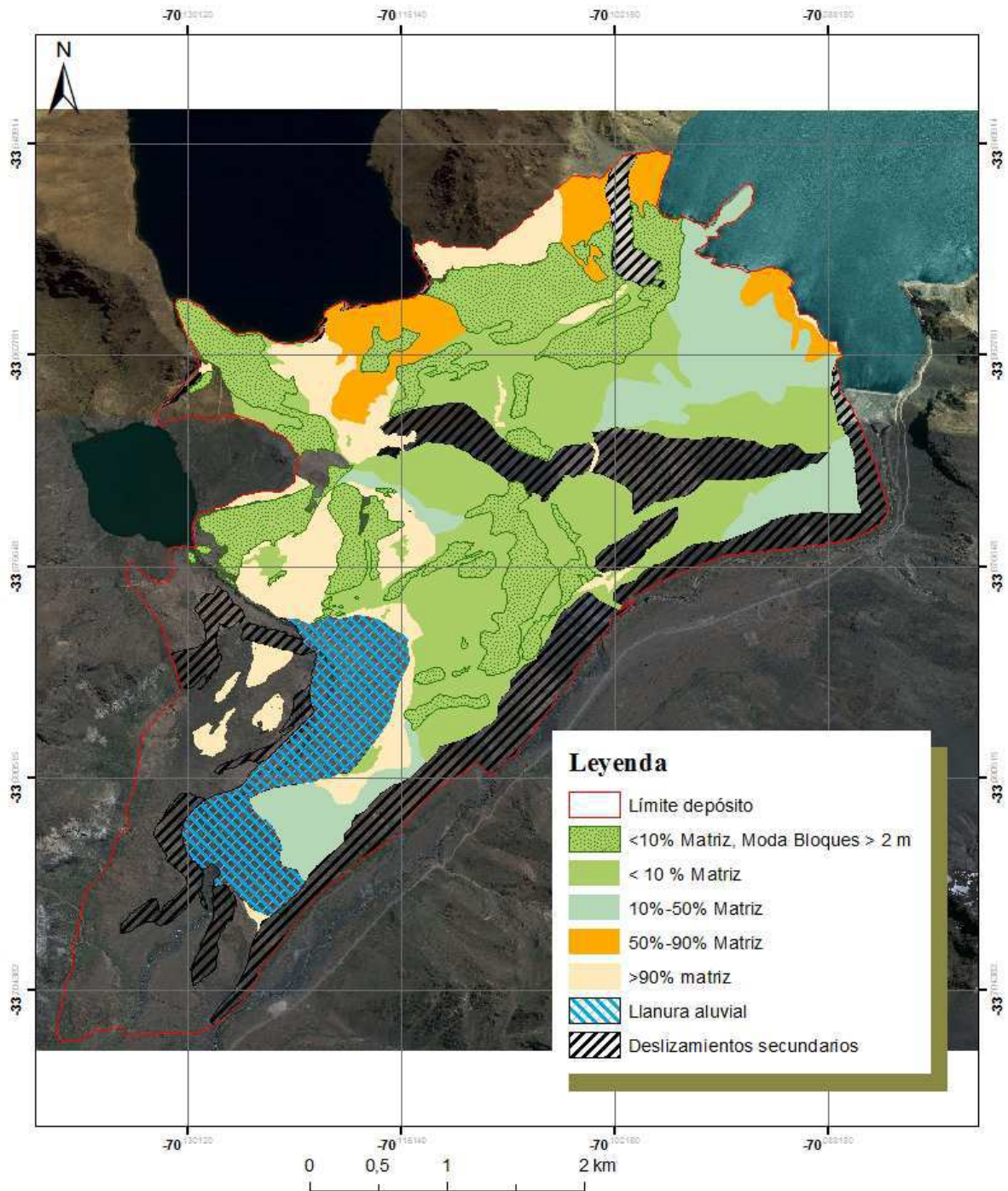


Figura 38: Mapa de porcentaje de matriz presente en el depósito. Se consideró matriz al sedimento con tamaño menor a 1 cm.

4.2. MODELOS ANÁLOGOS

4.2.1. Reproductibilidad de datos

Para la realización de los modelos análogos primero se probó la reproductibilidad de los datos. Para ello se repitieron los modelos creados por Rhodes (2013) con el mismo dispositivo, cuyos resultados se presentan en los anexos A y B, correspondiendo a los modelos: **Variación del ángulo de la ladera opuesta al deslizamiento entre 10°, 20°, 30°, 35° y 40°, y valle glacial con un ángulo de 35° con un ancho de 11,5 cm.**

De los datos de la tabla del anexo A, se obtiene la tabla del anexo B, que contiene los parámetros a utilizar para comprender la variación de la geometría del depósito generado, es decir el cociente **An/La** que determina el parecido de la vista en planta del depósito a un círculo ($An/La = 1$) o a una elipse cada vez más achatada (a medida que el valor se acerca a 0), el espesor equivalente **e**, el coeficiente de fricción equivalente **H/D** y la distancia excesiva de desplazamiento **De**. Con estos parámetros se obtuvo una comparación de modelos con los hechos por Rhodes (2013) que se muestran a continuación en las figuras 39, 40, 41 y 42.

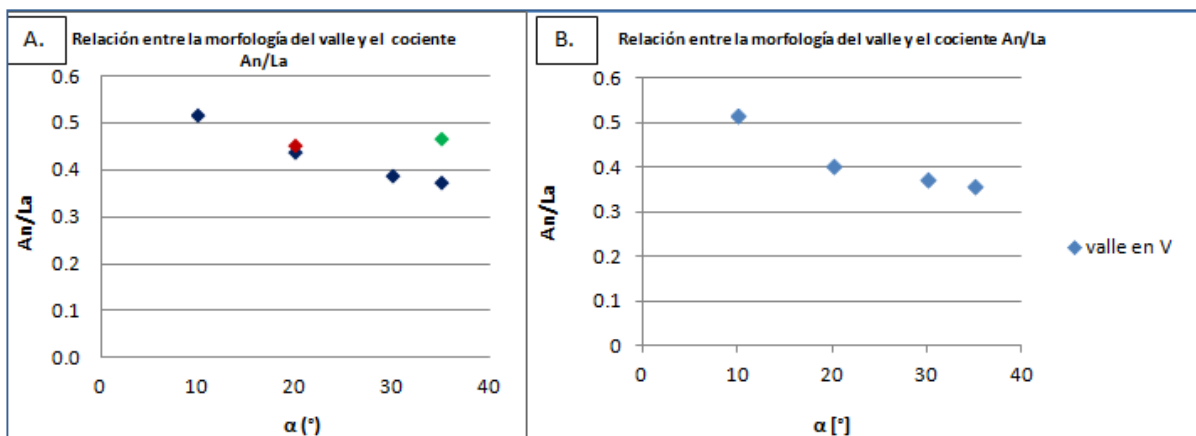


Figura 39: Relación An/La , donde An : ancho, La = largo, α = ángulo ladera opuesta al deslizamiento. A. Resultados obtenidos por Rhodes (2013). Puntos azules corresponden a valle en V, punto verde es valle en U 10 cm, punto rojo es valle en U 10 cm con obstáculo de $1 \times 1 \times 20 \text{ cm}^3$ representando una morrena. B. Resultados de este trabajo, solo se reprodujeron los casos con valle en forma de "v".

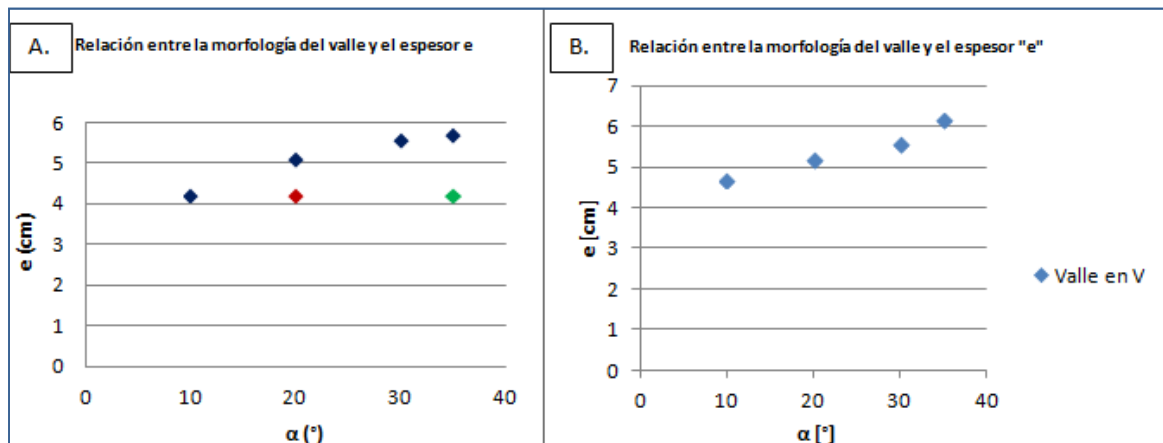


Figura 40: Relación espesor =e y α = ángulo ladera opuesta al deslizamiento. A. Resultados Rhodes (2013), puntos azules corresponden a valle en V, punto verde es valle en U 10 cm, punto rojo es valle en U 10 cm con obstáculo de $1 \times 1 \times 20 \text{ cm}^3$ representando una morrena. B. Resultados de este trabajo, solo se reprodujeron los casos con valle en forma de "v".

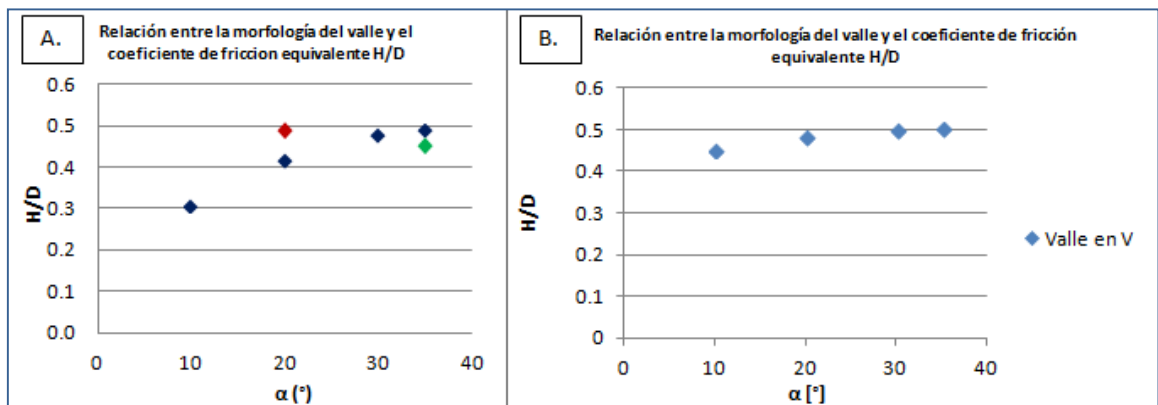


Figura 41: Relación entre coeficiente de fricción equivalente= H/D y α = ángulo ladera opuesta al deslizamiento. A. Resultados Rhodes (2013), puntos azules corresponden a valle en V, punto verde es valle en U 10 cm, punto rojo es valle en U 10 cm con obstáculo de $1 \times 1 \times 20 \text{ cm}^3$ representando una morrena. B. Resultados de este trabajo, solo se reprodujeron los casos con valle en forma de "v".

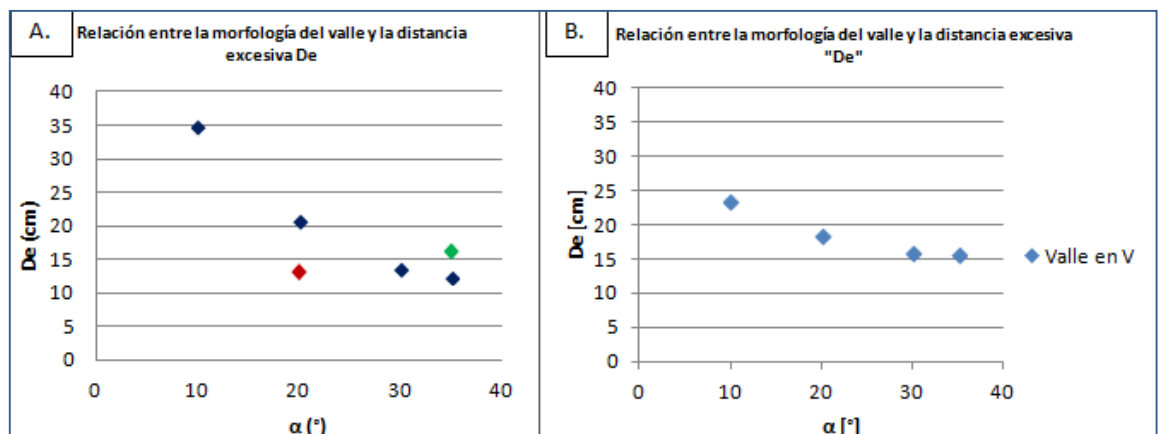


Figura 42: Relación entre la distancia excesiva de desplazamiento= $De = D - H/\tan(35)$ y α = ángulo ladera opuesta al deslizamiento. A. Resultados Rhodes (2013), puntos azules corresponden a valle en V, punto verde es valle en U 10 cm, punto rojo es valle en U 10 cm con obstáculo de $1 \times 1 \times 20 \text{ cm}^3$ representando una morrena. B. Resultados de este trabajo, solo se reprodujeron los casos con valle en forma de "v".

De los datos presentados en las figuras 39 - 42, se puede apreciar que si bien los resultados no son exactamente los mismos numéricamente hablando, si se pueden apreciar claramente las mismas tendencias. Se aprecia que: 1) a mayor ángulo de ladera opuesta al deslizamiento, la forma de elipse del depósito tiene una excentricidad menor. 2) el espesor del depósito aumenta, a medida que aumenta el ángulo de la ladera opuesta al deslizamiento. 3) El coeficiente de fricción equivalente aumenta al aumentar el ángulo de la ladera opuesta al deslizamiento. 4) La distancia excesiva de desplazamiento disminuye al aumentar el ángulo de la ladera opuesta al deslizamiento. Todo esto tanto para los modelos, hechos por Rhodes (2013) (figuras 39A, 40A, 41A y 42A) y los modelos de este trabajo (figuras 39B, 40B, 41B y 42B). Por ello se asume la reproductibilidad de resultados y se llevarán a cabo los modelos detallados previamente en la metodología.

4.2.2. Análisis numéricos de los modelos

Los modelos desarrollados para este trabajo corresponden a los modelos: a) Variación del ángulo de la ladera opuesta al deslizamiento en un valle fluvial, b) Variación del ancho de un valle glacial, c) Diferentes ubicaciones de un obstáculo, d) Variación del Alto del obstáculo, e) Variación del Ancho del obstáculo, que aparecen detallados en la tabla 3 y 4 de los anexos. Estos modelos solo se realizaron una vez cada uno, dado que ya se probó la reproductibilidad de los datos en los modelos de **Variación del ángulo α de la ladera opuesta al deslizamiento entre 10°, 20°, 30°, 35° y 40°, y valle glacial con un ángulo de 35° con un ancho de 11,5 cm.**

A continuación se explica cada uno de ellos y se muestran los resultados obtenidos en gráficos.

- **Relación entre morfología del valle y depósito generado**

- **Variación del ángulo α de la ladera opuesta al deslizamiento en un valle fluvial:** Se tiene un valle en V, donde se varía el ángulo de la ladera opuesta a la caída del material entre **10°, 20°, 30°, 35° y 40°**. En las figuras 43, 44, 45 y 46 se analiza el comportamiento de los distintos parámetros en estudio de acuerdo a la variación del ángulo de la ladera.

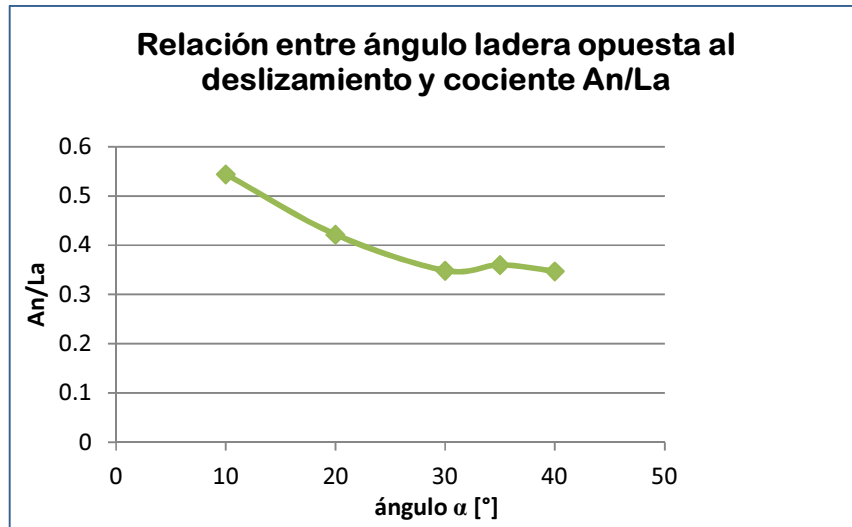


Figura 43: Relación entre ángulo del lado opuesto al deslizamiento y la razón An/La, donde An= ancho, La= largo del depósito visto en planta.

La relación entre el parámetro “An/La” (figura 43), que representa la excentricidad de una elipse, suponiendo que el depósito fuera una cuando se lo observa en planta, mientras mayor sea el ángulo de la ladera opuesta al deslizamiento el valor disminuye, es decir, la forma del depósito es de menor excentricidad es decir que tiende a ser más larga (La) pero menos ancha (An).

Esto se aprecia muy bien para ángulos menores a 30° donde la tendencia es muy clara. Luego a los 35° donde se tiene un valle en V con la misma inclinación en ambas laderas se apreció que el valor fue ligeramente más alto, para finalmente al tener una ladera con 40° de pendiente opuesta al deslizamiento el valor del parámetro “An/La” volvió a disminuir. Dado esto el valor obtenido en los 35° en ambas laderas, pudo ser una anomalía, o que cuando se tiene un ángulo tan alto, hay otros factores que influyen la forma del depósito pues una pendiente tan inclinada no permite que el material remonte la ladera como hace con ángulos menores. De todas maneras la tendencia general es que a mayor ángulo menor valor de “An/La”, observándose una relación no lineal, sino más bien exponencial, donde a mayores ángulos, la diferencia no es tan importante como con ángulos menores.

La relación entre el ángulo de la ladera opuesta al deslizamiento con respecto al espesor aparente del depósito generado “e” (figura 44), es que a mayor ángulo mayor será el espesor con una función de tipo

exponencial, donde a menores ángulos la diferencia del espesor es mucho mayor a los casos con ángulos mayores a 30°.

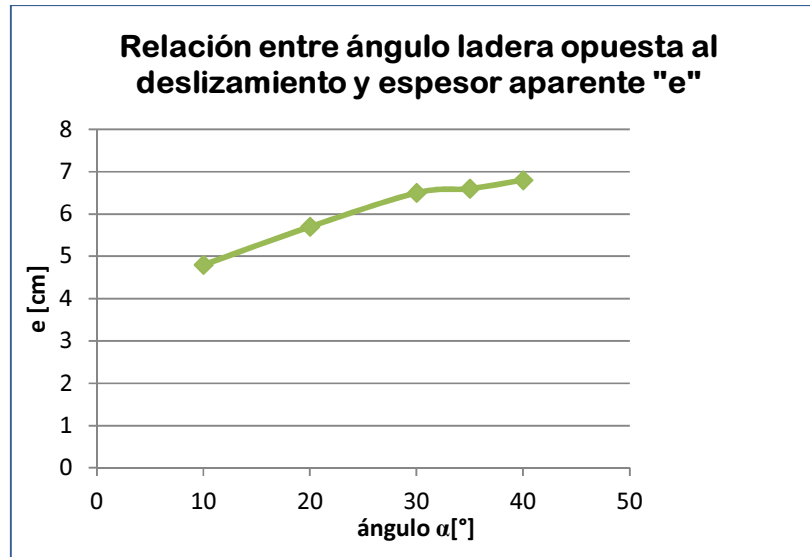


Figura 44: Relación entre ángulo de ladera opuesta al deslizamiento y espesor aparente =e.

Con los dos puntos anteriores (de las figuras 43 y 44), se puede apreciar que a mayor ángulo de la ladera se presenta un depósito con mayor excentricidad pero de mayor espesor. Donde además al tener un ángulo muy grande (mayor a 30°) la diferencia empieza a ser menos perceptible, aunque siguiendo la tendencia. Esto es bastante simple de entender puesto que al ser la misma cantidad de material que desliza, si ocupa un menor espacio superficial debe tener un mayor espesor para mantener igual el volumen final total.

La relación entre el ángulo de la ladera opuesta al deslizamiento y el coeficiente de fricción equivalente "H/D" (figura 45) presenta dos tendencias distintas: entre 10° - 30°, a mayor ángulo, mayor es el coeficiente de fricción equivalente. Esto quiere decir, que la movilidad de deslizamiento es mayor en la vertical a mayores ángulos, siendo cada vez menor la movilidad en la horizontal. Esto tiene sentido con los resultados discutidos anteriormente con respecto a la forma del depósito, pues al tener una ladera cada vez más inclinada el depósito se mueve menos ladera arriba siendo más importante su desplazamiento en la vertical que en la horizontal, pues la pendiente va disminuyendo el avance sobre la ladera opuesta al deslizamiento.

Para los casos con ángulos mayores a 30° se aprecia que a mayor ángulo el coeficiente de fricción disminuye, siendo cada vez más importante la movilidad en la horizontal que en la vertical. Esto podría deberse a las anomalías ya observadas en los casos de los parámetros "An/La" y "e", donde las tendencias se mantenían pero para ángulos mayores a 30° las diferencias se hacían menos importantes.

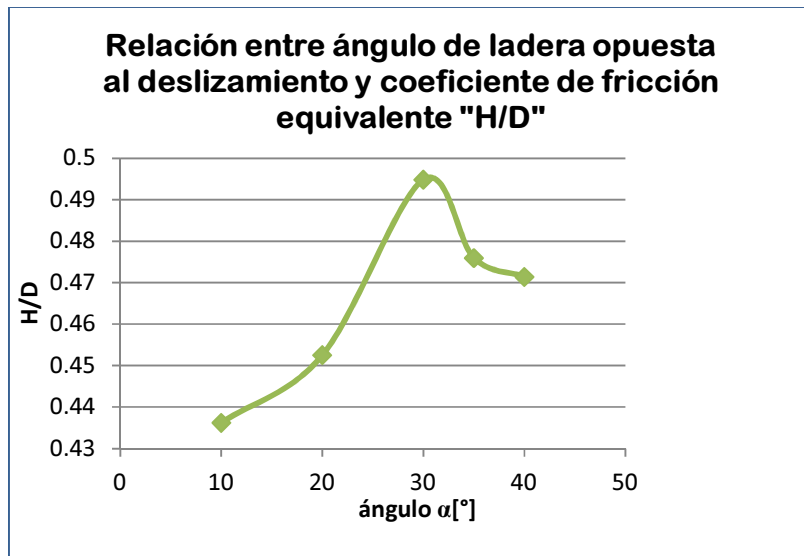


Figura 45: Relación entre ángulo de ladera opuesta al deslizamiento y coeficiente de fricción equivalente =H/D. Donde H= distancia vertical desde el nicho al punto más alejado del depósito. D= distancia horizontal desde el nicho al punto más alejado del depósito.

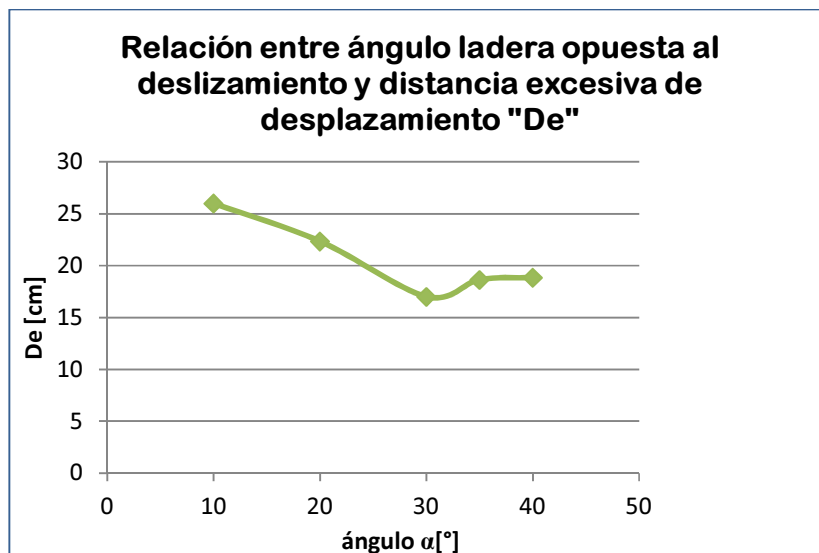


Figura 46: Relación entre ángulo de la ladera opuesta al deslizamiento y distancia excesiva de desplazamiento = $De = D - H/\tan(35)$.

La relación entre el ángulo de la ladera opuesta al deslizamiento y la distancia excesiva “De” (figura 46), presenta también dos tendencias: entre 10°-30° a mayor ángulo, se observa un menor desplazamiento, en cambio entre 30° y 40° a mayor ángulo se tiene un mayor desplazamiento. Esto se correlaciona con los resultados obtenidos del parámetro “H/D” donde si la mayor movilidad se presenta en la vertical, es claro que la distancia máxima con respecto al lugar de origen medido en la horizontal será menor, en cambio si la componente más importante es la movilidad horizontal se tiene un mayor desplazamiento “De”. Nuevamente la diferencia de las tendencias se muestra en los 30° sin una explicación clara de por qué se da esta diferencia en tendencias.

- **Variación del ancho de un valle glacial:** Valle en U, de medidas **6,5, 11,5 y 16,5 cm** forrado con cinta adhesiva transparente. La ladera opuesta al deslizamiento tiene un ángulo de 20°. En las figuras 47, 48, 49 y 50 se muestran las tendencias de relaciones entre parámetros para este modelo.

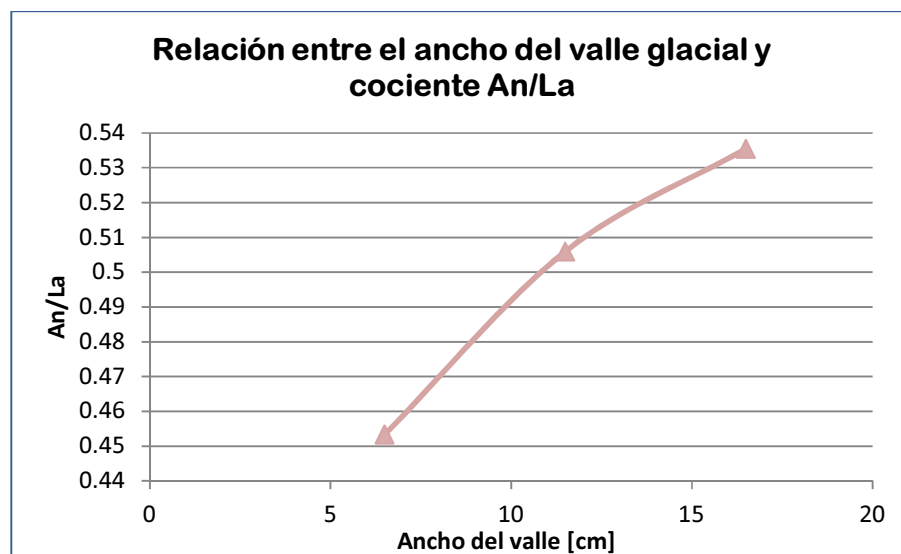


Figura 47: Relación entre el ancho del valle glacial y la razón An/La, donde An= ancho, La= largo del depósito visto en planta.

La relación entre el ancho del valle y el parámetro “An/La” (figura 47) es que a mayor ancho del valle, mayor es el cociente, es decir se tiene mientras más ancho es el valle, la geometría del depósito vista en planta es una elipse cada vez con mayor excentricidad, pareciéndose más a un círculo. Esta relación es casi lineal.

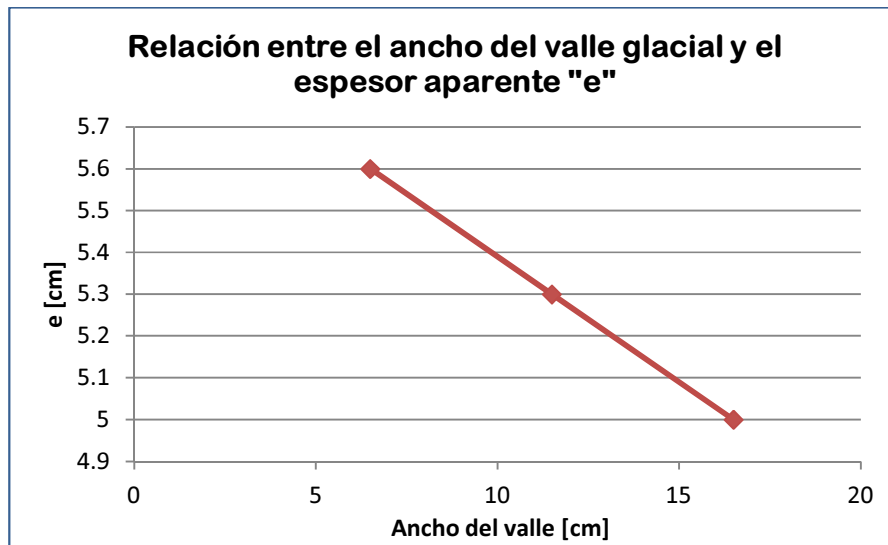


Figura 48: Relación entre ancho del valle glacial y espesor aparente =e.

La relación entre el ancho del valle y el espesor aparente “e” (figura 48) es que a mayor ancho del valle, menor es el espesor, siendo una relación lineal para las variables utilizadas. Si se compara este resultado con la variación del parámetro A_n/L_a es razonable puesto que si el depósito ocupa una mayor extensión de área, tiene que tener un menor espesor, tratándose de un mismo volumen de material que desliza.

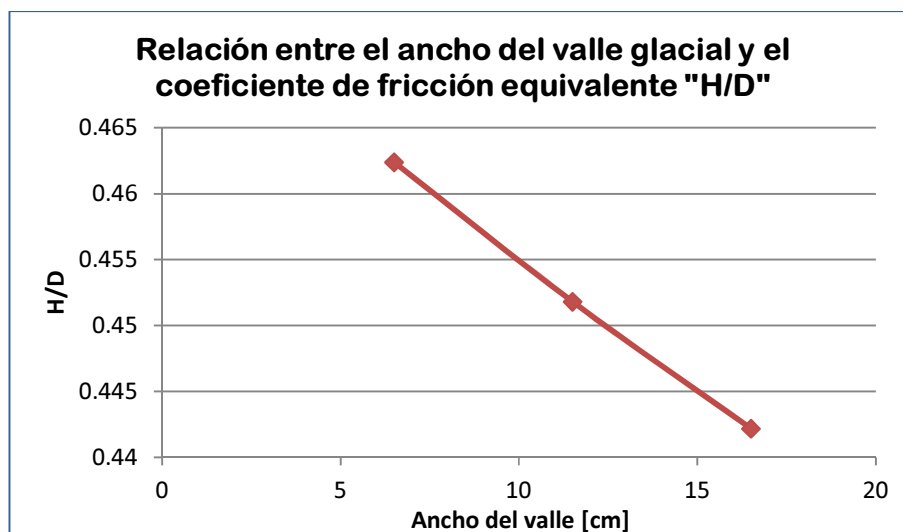


Figura 49: Relación entre el ancho del valle glacial y coeficiente de fricción equivalente =H/D. Donde H= distancia vertical desde el nicho al punto más alejado del depósito. D= distancia horizontal desde el nicho al punto más alejado del depósito.

La relación entre el ancho del valle y el coeficiente de fricción equivalente “H/D” (figura 49) muestra que a mayor ancho del valle, menor es el valor de este parámetro, esto quiere decir que mientras más ancho sea el valle

menor será la movilidad vertical del depósito y mayor la movilidad horizontal. Esta tendencia se observa casi de manera lineal para las variables utilizadas.

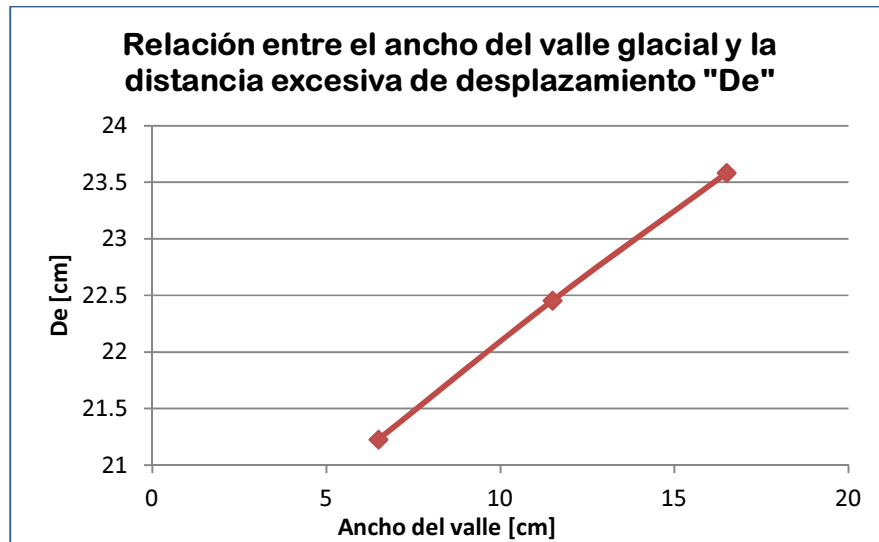


Figura 50: Relación entre el ancho del valle glacial y distancia excesiva de desplazamiento = $De = D - H/\tan(35)$.

Al analizar la relación entre el ancho del valle y la distancia excesiva de desplazamiento "De" (figura 50) se observa que a mayor ancho del valle, mayor será la distancia "De" alcanzada, esto quiere decir que el punto más alejado en la horizontal, con respecto al punto de inicio es cada vez mayor. Este resultado se relacione con el punto anterior, pues si el avance horizontal es cada vez más importante que el avance vertical es lógico pensar que el desplazamiento excesivo vaya creciendo junto con el ancho del valle. Esta tendencia se aprecia de manera casi lineal.

- **Relación entre un obstáculo, que representa una morrena, y sus dimensiones con la geometría del depósito**
 - **Diferentes ubicaciones de un obstáculo:** Valle en U de ancho 6,5 cm forrado en cinta adhesiva transparente. Ladera opuesta al deslizamiento de ángulo 20°, se ubica un obstáculo consistente en una madera de dimensiones 1x2x120 cm³ (alto, ancho y largo respectivamente) justo **al lado de la ladera del deslizamiento, al centro del valle, y bajo la ladera opuesta del deslizamiento**. Para que no haya distorsión de los datos se fija el obstáculo al fondo del valle, de esta manera se tiene una geometría clara, pero se pierde la escala mecánica del modelo por que el comportamiento de una barra fija no es similar al de una morrena que es material no consolidado. Se plantea la necesidad de generar un

modelo con material disgregado como obstáculo. En las figuras 51, 52, 53 y 54 se muestran las tendencias de relaciones entre parámetros para este modelo.

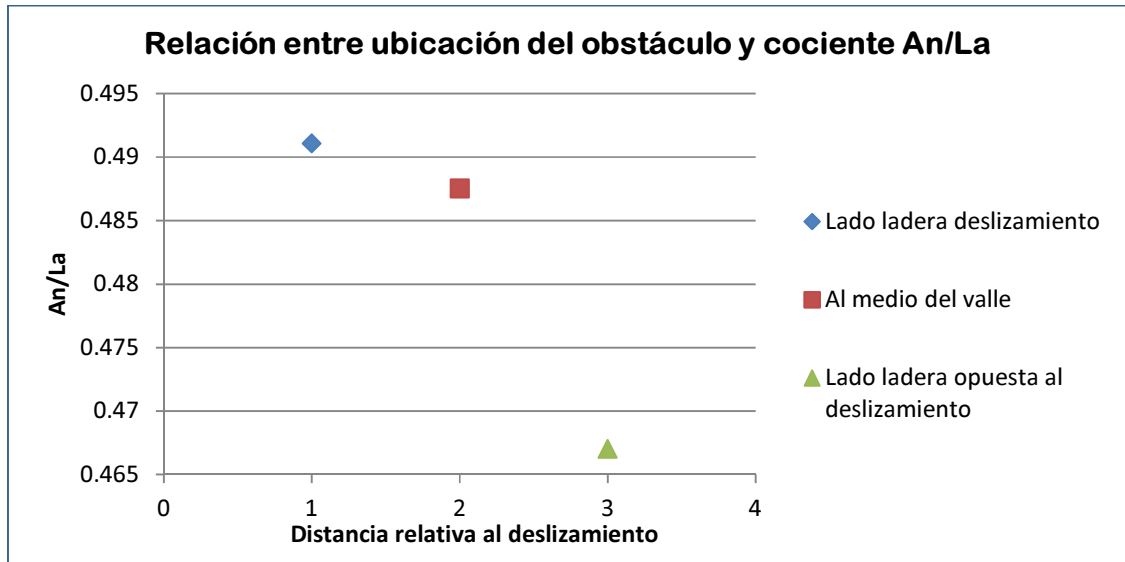


Figura 51: Relación entre la ubicación del obstáculo y la razón An/La, donde An= ancho, La= largo del depósito visto en planta. En el eje x: 1= al lado de la ladera del deslizamiento, 2= al medio del valle, 3= al lado de la ladera opuesta al deslizamiento.

A medida que se aleja el obstáculo de la ladera del deslizamiento el parámetro An/La disminuye (figura 51). Es decir a medida que el obstáculo se ubica más lejos se tendrá una figura de elipse con menor excentricidad, si se observa el depósito generado en planta.

La relación entre la ubicación del obstáculo y el espesor “e” no se aprecia bien (figura 52), dado que solo son 3 valores medidos y no hay una tendencia clara entre ellos. Al alejarse un poco de la ladera del deslizamiento en primer lugar el espesor obtenido aumenta, lo que tiene sentido con el punto anterior ya que disminuye el área del depósito por lo que debe aumentar el espesor. Pero al alejar el obstáculo aún más el valor del espesor disminuye sin motivo aparente. Cabe destacar que la medida del volumen del depósito no varía, pero al considerar el obstáculo en distintas ubicaciones de espesor ya que el espesor máximo en un primer caso está justo al lado del obstáculo, luego está más y más alejado cada vez, se distorsiona el espesor máximo por la presencia del obstáculo en sí y sus ubicaciones diferentes, pudiendo ser este el motivo de la falta de una tendencia clara, todo depende de cuánto afecta a la medida del espesor la ubicación del obstáculo.

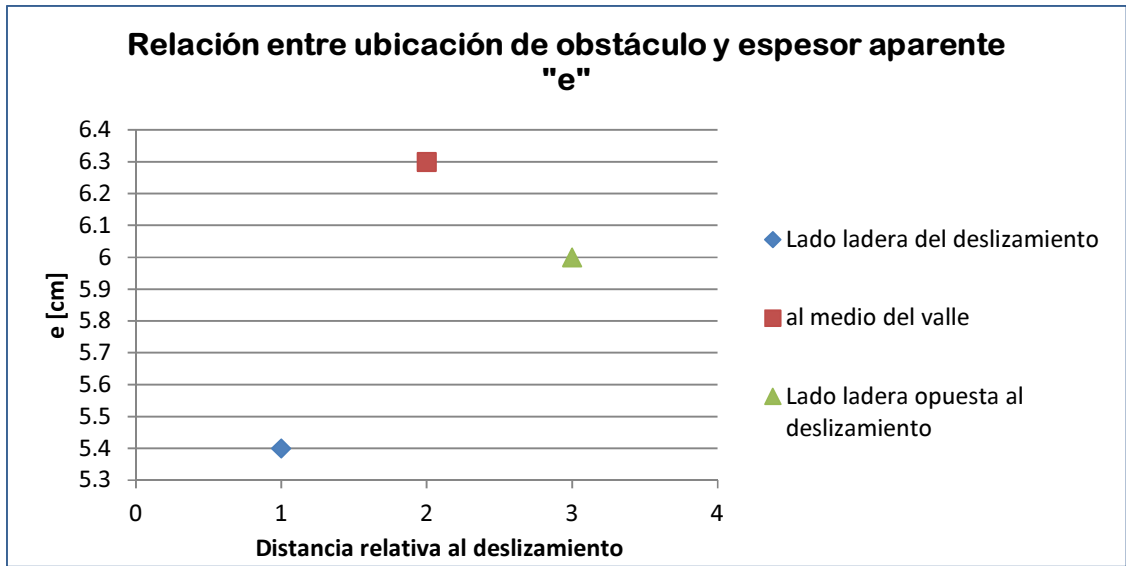


Figura 52: Relación entre la ubicación del obstáculo y espesor aparente =e. En el eje x: 1= al lado de la ladera del deslizamiento, 2= al medio del valle, 3= al lado de la ladera opuesta al deslizamiento.

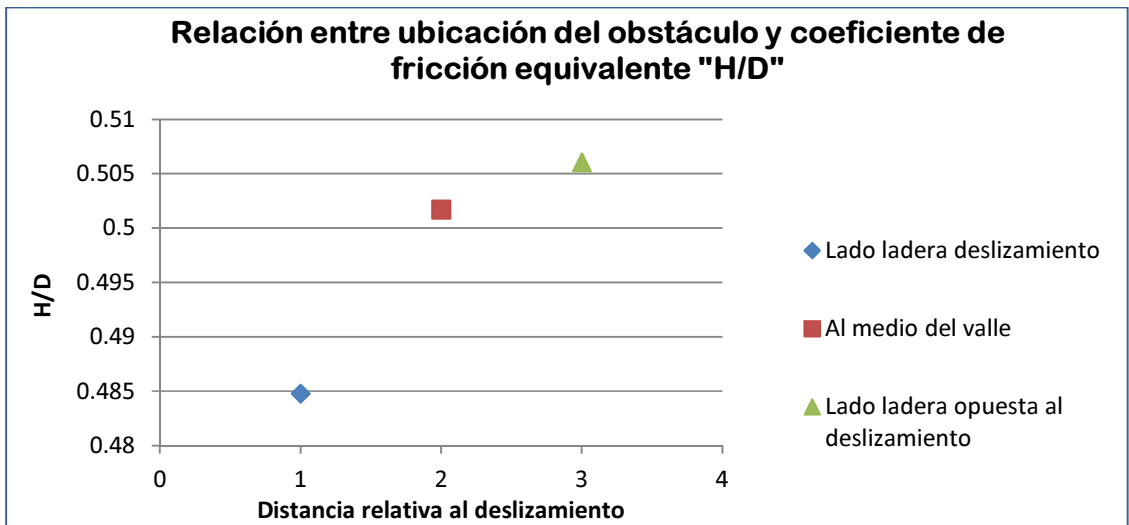


Figura 53: Relación entre la ubicación del obstáculo y coeficiente de fricción equivalente =H/D. Donde H= distancia vertical desde el nicho al punto más alejado del depósito. D= distancia horizontal desde el nicho al punto más alejado del depósito. En el eje x: 1= al lado de la ladera del deslizamiento, 2= al medio del valle, 3= al lado de la ladera opuesta al deslizamiento.

A medida que se aleja el obstáculo de la ladera del deslizamiento, el coeficiente de fricción equivalente "H/D" (figura 53) aumenta de manera no lineal, esto quiere decir que mientras más se aleja el obstáculo de la ladera mayor es la movilidad en la vertical que en la horizontal.

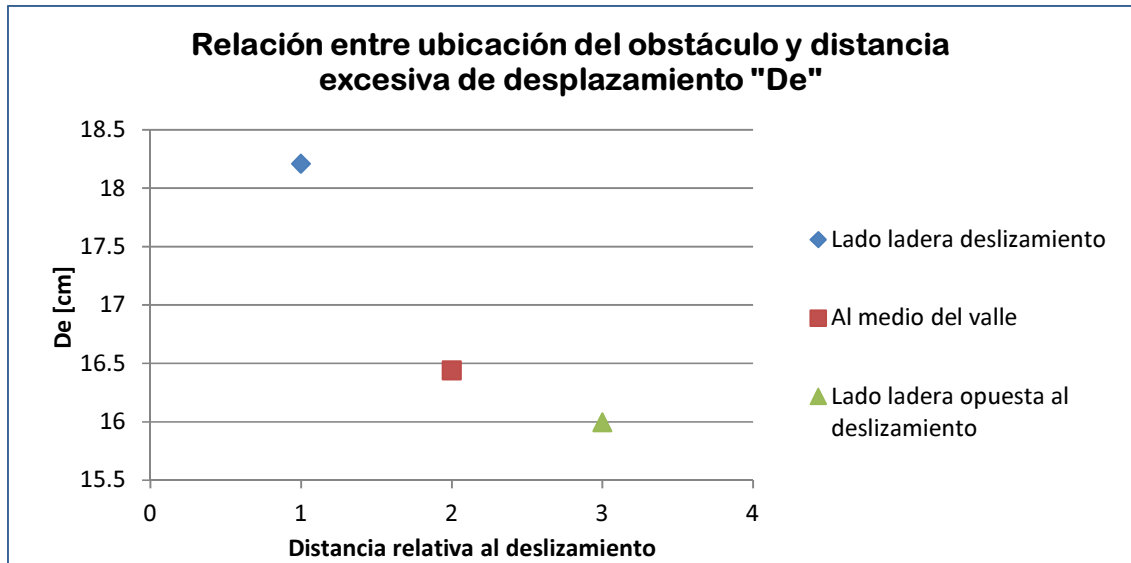


Figura 54: Relación entre la ubicación del obstáculo y la distancia excesiva de desplazamiento = $De = D - H/\tan(35)$. En el eje x: 1= al lado de la ladera del deslizamiento, 2= al medio del valle, 3= al lado de la ladera opuesta al deslizamiento.

Se tiene que a mayor lejanía de la ladera del deslizamiento la distancia excesiva “De” disminuye de una manera no lineal (figura 54), pero que coincide de manera perfecta con los valores de “H/D” ya analizados, donde a mayor movilidad en la vertical se tiene que menor será el desplazamiento excesivo “De”.

- **Variación del Ancho del obstáculo:** Valle en U de ancho 6,5 cm forrado en cinta adhesiva transparente. Ladera opuesta al deslizamiento de ángulo 20°, se tiene un obstáculo de largo 120 cm, alto de 1 cm, y ancho variable entre **1, 2 y 4 cm**. En las figuras 55, 56, 57 y 58 se muestran las tendencias de relaciones entre parámetros para este modelo.
- **Variación del Alto del obstáculo:** Valle en U de ancho 6,5 cm forrado en cinta adhesiva transparente. Ladera opuesta al deslizamiento de ángulo 20°, se tiene un obstáculo de largo 120 cm, ancho 2 cm, y alto variable entre **1, 2 y 4 cm**. En las figuras 55, 56, 57 y 58 se muestran las tendencias de relaciones entre parámetros para este modelo.

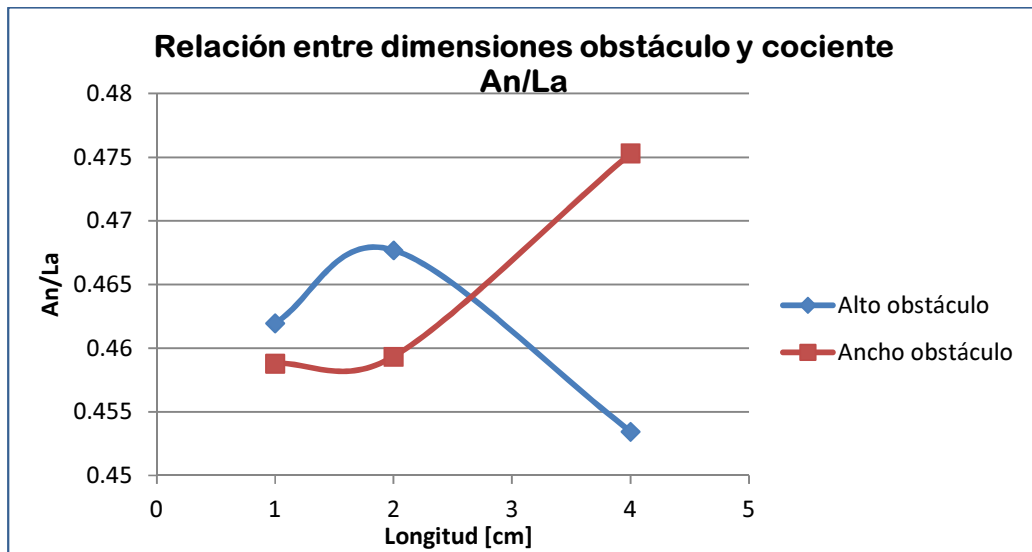


Figura 55: Relación entre la las dimensiones del obstáculo y la razón An/La, donde An= ancho, La= largo del depósito visto en planta.

La relación entre la altura del obstáculo y el parámetro “An/La” no es clara (figura 55), pues al crecer el obstáculo en un principio, este parámetro aumenta también, pero luego al crecer aún más el alto, comienza a disminuir la relación “An/La”. Probablemente esto se deba a que el alto del obstáculo impide que la dinámica que normalmente se observa se lleve a cabo, dando como resultado un depósito de una forma que se aleja del supuesto de la elipse, visto el depósito en planta.

A mayor ancho del obstáculo se tiene un mayor valor de “An/La” (figura 55), aunque en un principio la variación no es mucha, y luego al aumentar el ancho del obstáculo el parámetro medido aumenta mucho más.

A mayor altura del obstáculo se tiene un mayor espesor aparente “e” (figura 56), aunque la relación es una curva de apariencia logarítmica. Se presume que esto se debe a la influencia en la geometría del depósito de distintos volúmenes de material del obstáculo y al cambiarle la altura que tiene e impedir el libre movimiento del material.

A mayor ancho del obstáculo se tiene un mayor espesor aparente “e” (figura 56), aunque la relación es una se vuelve constante entre 2 y 4 cm de ancho, obteniéndose el mismo valor de espesor en ambos casos. Se presume que esto se debe a la influencia en la geometría del depósito de distintos volúmenes de material al considerar el volumen del obstáculo en el volumen final del depósito generado.

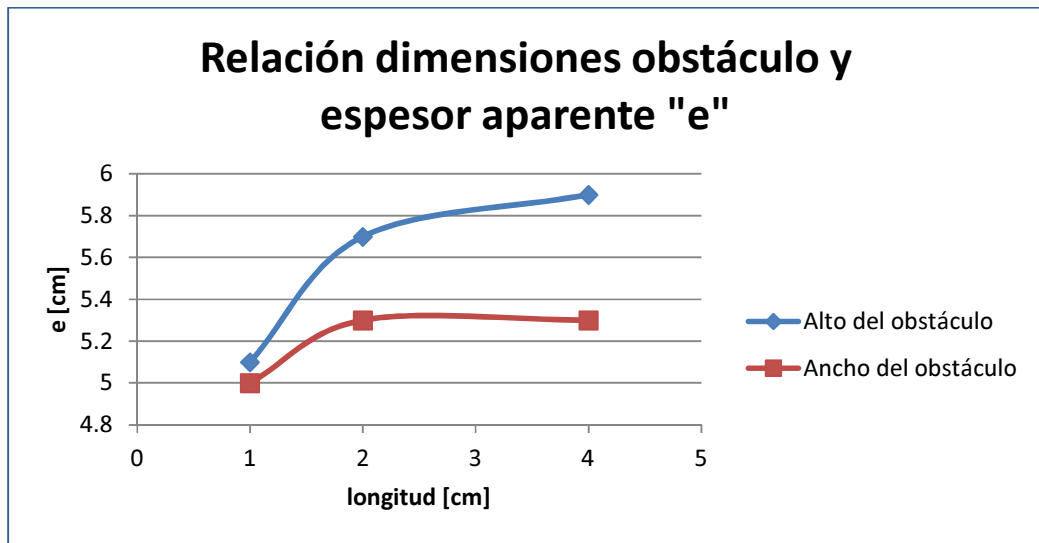


Figura 56: Relación entre las dimensiones del obstáculo y espesor aparente =e.

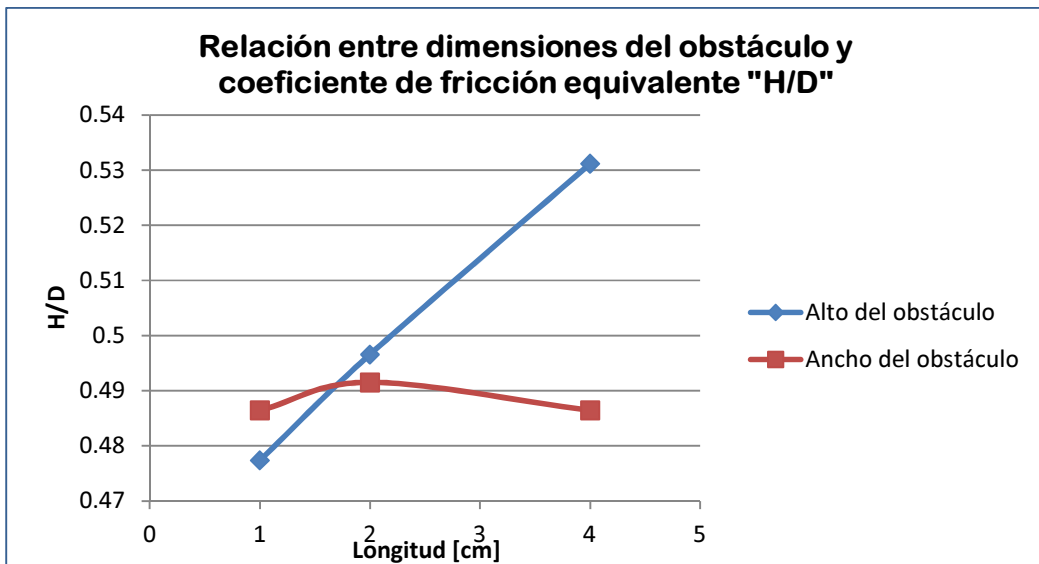


Figura 57: Relación entre las dimensiones del obstáculo y coeficiente de fricción equivalente =H/D. Donde H= distancia vertical desde el nicho al punto más alejado del depósito. D= distancia horizontal desde el nicho al punto más alejado del depósito.

A medida que el obstáculo es más alto (figura 57), mayor es el coeficiente de fricción "H/D" que tiene, observándose una relación lineal. Es decir que mientras más alto sea el obstáculo mayor será la movilidad en la vertical que en la horizontal, lo que tiene sentido pues el obstáculo no permite el libre movimiento en la horizontal.

La relación entre el ancho del obstáculo y el parámetro “H/D” es casi constante (figura 57), aunque presenta una pequeña concavidad, en el valor intermedio.

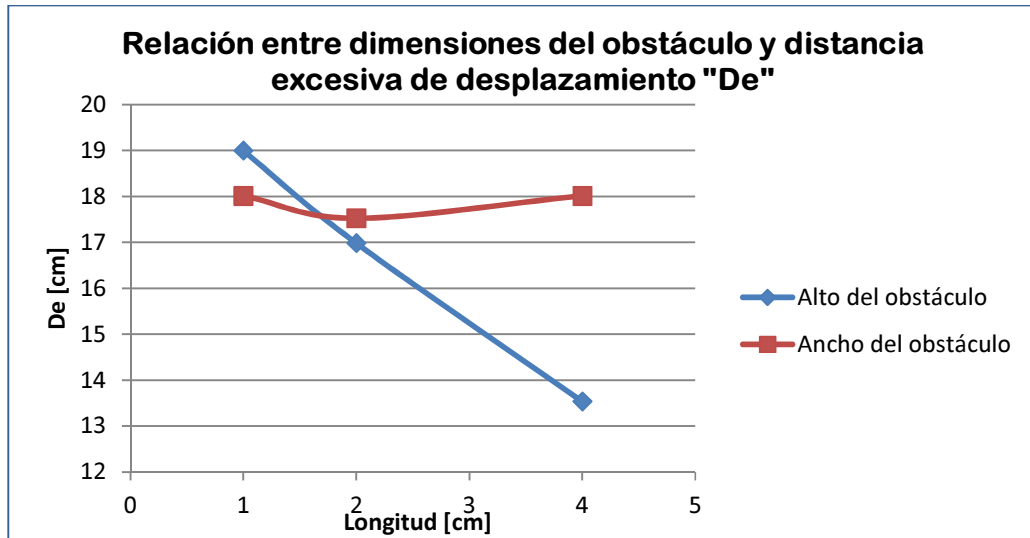


Figura 58: Relación entre las dimensiones del obstáculo y la distancia excesiva de desplazamiento = $De = D - H/\tan(35)$.

Cuando el valor de la altura del obstáculo aumenta, se tiene que el desplazamiento “De” disminuye de manera lineal (figura 58), lo que se correlaciona perfectamente con los resultados obtenidos en la relación de la altura y el coeficiente de fricción. Es decir que a mayor coeficiente de fricción, menor será la distancia excesiva de desplazamiento.

La relación entre el ancho del obstáculo es casi constante, con una pequeña convexidad (figura 58). Esto se relaciona con los valores obtenidos en el punto anterior, por lo que a mayor “H/D” es un menor “De” para el punto que genera la concavidad/convexidad, de estos parámetros.

4.2.3. Observaciones dinámicas del deslizamiento

Los modelos descritos a continuación corresponden a los mismos modelos ya analizados numéricamente en el punto 4.2.2. En cada caso se muestra una matriz de imágenes obtenidas a partir de las grabaciones con vista superior y lateral de cada modelo. Donde las filas A, B y C corresponden a la variable que se cambia en cada caso, y las columnas 1, 2 y 3 corresponden a tiempos

porcentuales con respecto al tiempo total de cada grabación que aparece indicado en la descripción de cada imagen.

- **Variación del ángulo de la ladera opuesta al deslizamiento en un valle fluvial.**

La variación corresponde a un cambio de ángulo entre 30°, 35° y 40°.

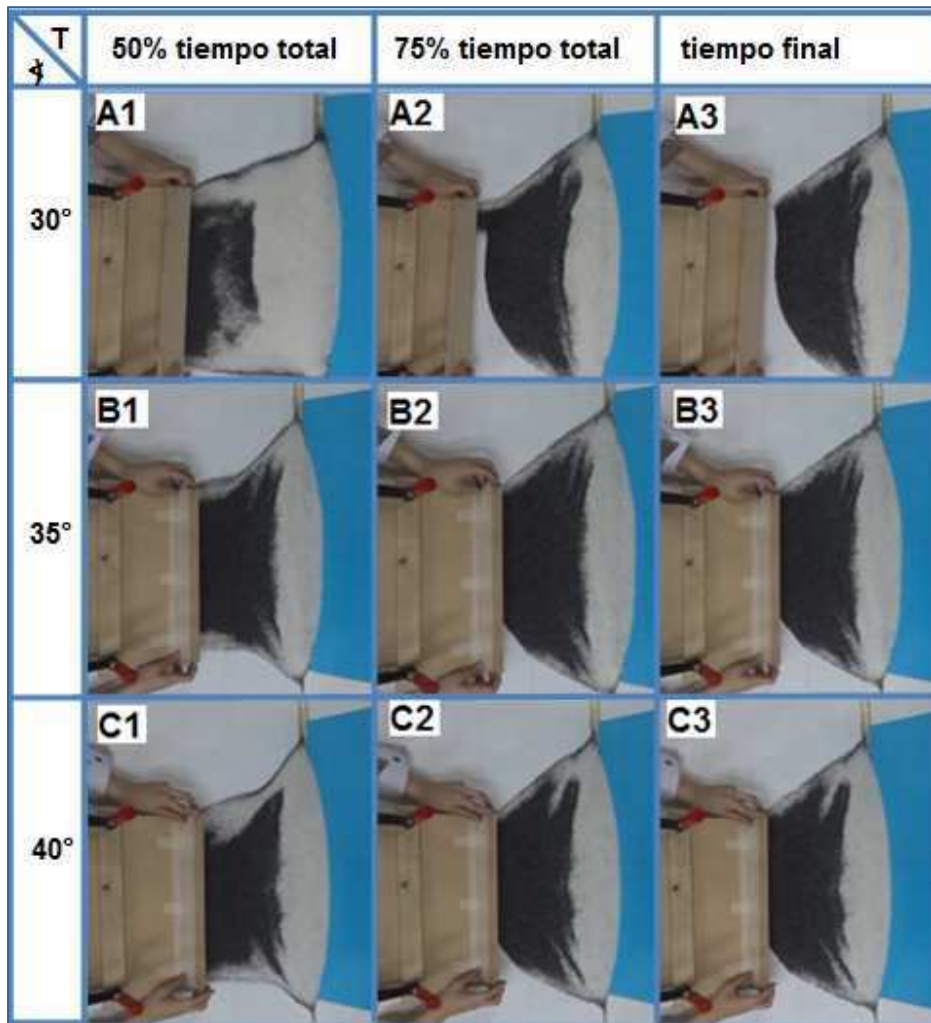


Figura 59: Matriz de imágenes de variación del ángulo de la ladera opuesta al deslizamiento en un valle con vista superior. T= porcentaje del tiempo de grabación. Ángulo= α de la ladera opuesta al deslizamiento medido desde la horizontal hacia arriba.

Se observa (figura 59) que la geometría final es similar en cuanto a la excentricidad del depósito generado. Pero mientras mayor es el ángulo de la ladera opuesta, se forma mayor distorsión y pérdida de coherencia de la segunda banda de color negro. En todos los casos no se observa en superficie la primera banda de color negro. En las imágenes A1, B1 y C1 se

aprecia que la 2ª banda negra flota sobre la banda blanca, y que casi no tiene contacto directo con la ladera.

Se observa que mientras mayor es el ángulo de la ladera opuesta al deslizamiento se forma mayor distorsión o pérdida de coherencia de la segunda banda de color negro. Esto probablemente ocurre por una reptación de la capa blanca que al “arrugarse” genera cambios en la capa que va sobre ella, es decir la capa negra.

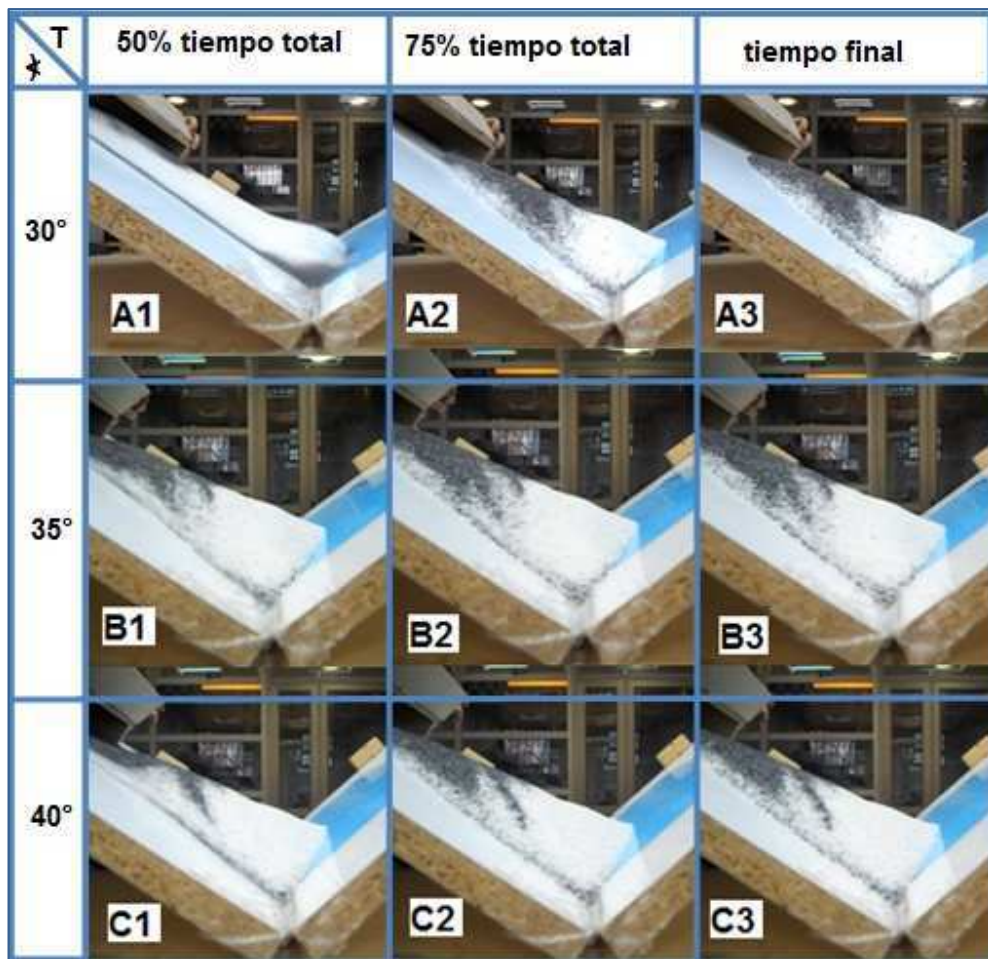


Figura 60: Matriz de imágenes de variación del ángulo de la ladera opuesta al deslizamiento en un valle con vista lateral. T= porcentaje del tiempo de grabación. Ángulo= α de la ladera opuesta al deslizamiento medido desde la horizontal hacia arriba.

De la figura 60 se puede observar que la primera banda negra en caer cubre la ladera del deslizamiento y sobre ella se ubican las siguientes capas, por lo que es la base del depósito casi en la totalidad de su extensión. Esto se aprecia mucho mejor en la imagen A1 donde la capa blanca desliza sobre

la capa negra. Al observar la 3ª columna de las imágenes A3, B3 y C3 se aprecia que a medida que el ángulo de la ladera opuesta al deslizamiento crece, va desapareciendo una especie de terraza con menor pendiente que se genera en el perfil del deslizamiento, donde en la fila A es muy notoria, y en las filas B y C es casi imperceptible.

Se aprecia que se oculta la primera capa de material de color negro cuando el ángulo es muy elevado, ya que frena la remoción y la segunda capa de color blanco desliza sobre ella y la sobrepasa.

- **Variación del ancho de un valle glacial.**

Valle en U, de medidas **6,5, 11,5 y 16,5 cm** forrado con cinta adhesiva transparente. La ladera opuesta al deslizamiento tiene un ángulo de 20°. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 61 y 62.

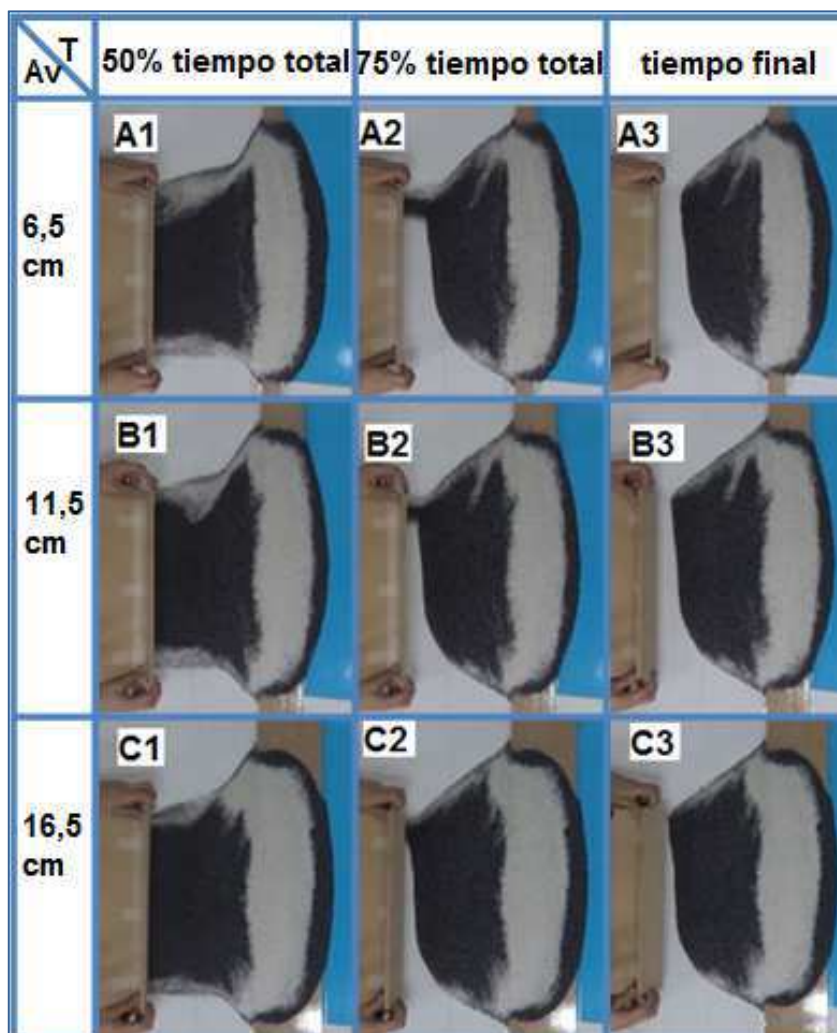


Figura 61: Matriz de imágenes de variación del ancho de un valle glacial con vista superior. T= porcentaje del tiempo de grabación. Av= Ancho del valle.

De la figura 61 se aprecia que el depósito muestra las tres capas de material que desliza manteniendo una coherencia similar en todos los casos. No se aprecian grandes diferencias en el depósito generado.

Se aprecia que al tener la ladera opuesta con un ángulo de 20° menor a los casos vistos en el punto anterior, no se pierde la banda basal de color negro y tampoco se generan las “arrugas” en la capa blanca o capa intermedia, ya que la remoción no tiene un choque tan abrupto lo que se acentúa por la presencia del valle glacial.

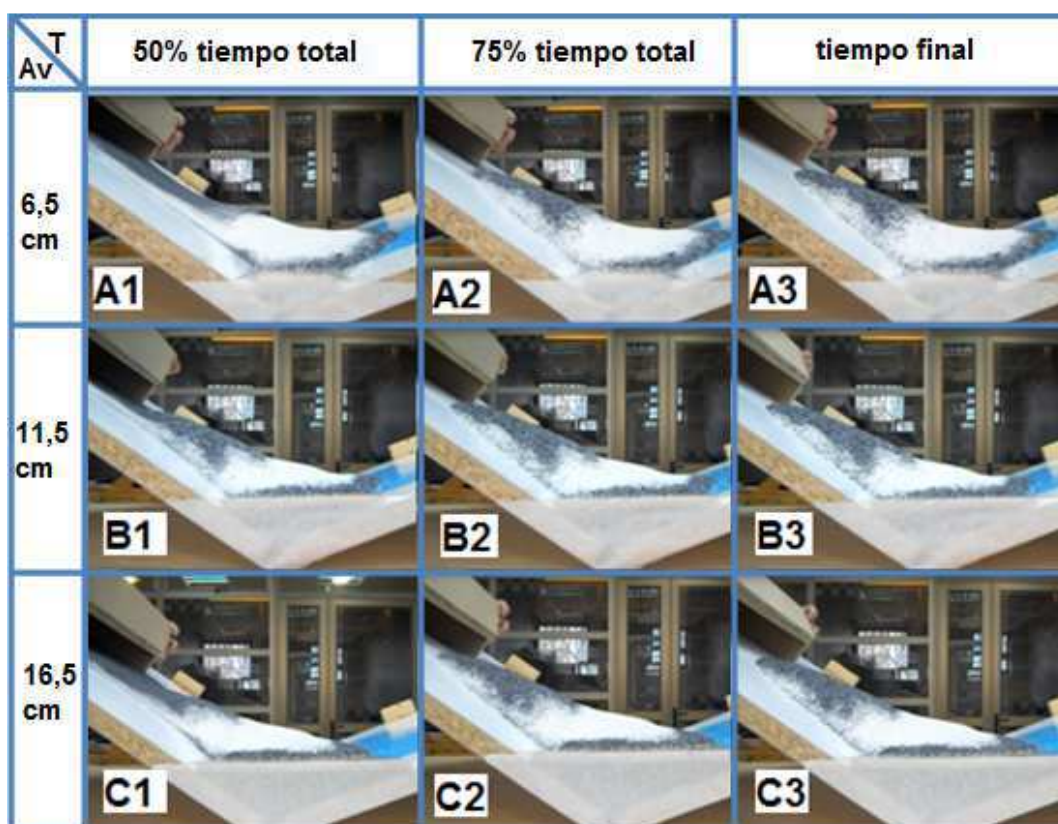


Figura 62: Matriz de imágenes de variación del ancho de un valle glacial con vista lateral. T= porcentaje del tiempo de grabación. Av= Ancho del valle.

De la figura 62 se puede observar que de acuerdo a la columna 1, para las imágenes A1, B1 y C1, la banda blanca desliza sobre la primera banda negra al menos en parte. El depósito tiene 3 bandas bien marcadas en los tres casos. Por otra parte en el caso A3, con el valle de menor ancho no se observa una terraza o planicie en el perfil del deslizamiento, sino que la planicie se genera a nivel del relleno del valle, en cambio en los casos B3 y C3 se observa la planicie, y que a mayor es el ancho del valle, el ángulo de la planicie es menor, es decir es más horizontal.

Se aprecia que a mayor ancho del valle, se genera una planicie más horizontal en la ladera del depósito resultante. Esto puede deberse por el movimiento más laminar que turbulento del depósito en donde al tener una superficie horizontal extensa el movimiento sigue una superficie plana por mayor distancia generando así una terraza de mayor tamaño.

- **Diferentes ubicaciones de un obstáculo**

Valle en U de ancho 6,5 cm forrado en cinta adhesiva transparente. La ladera opuesta al deslizamiento tiene un ángulo de 20°. Se ubica un obstáculo consistente en una madera de dimensiones 1x2x120 cm³ (alto, ancho y largo respectivamente) justo **al lado de la ladera del deslizamiento, al centro del valle, y bajo la ladera opuesta del deslizamiento.**

Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 63 y 64 a continuación.

De la figura 63, con vista en planta se puede observar que mientras más lejos se ubique el obstáculo de la ladera del deslizamiento se genera un menor alcance lateral o distancia H que alcanza el depósito generado, aunque la diferencia es uno par de centímetros en la realidad representaría unos 200 m. Además, se aprecia que a mayor lejanía del obstáculo con respecto a ladera del deslizamiento, no se distingue la capa basal del depósito al interior de la banda blanca como se ve en C3, mientras que si el obstáculo se ubica más cerca del deslizamiento si se aprecian unos ligeros manchones negros dentro de la banda blanca del depósito final (casos A3 y B3).

Por otra parte en toda la columna 3 (imágenes A3, B3 y C3) se aprecia que la capa negra que primero desliza, está bajo gran parte del depósito, pues se ve un “halo” negro que lo rodea en parte, excepto al lado derecho (del lector) de la ubicación del obstáculo.

Se observa que la banda blanca desliza sobre la primera banda negra desapareciendo en gran medida. Mientras menos camino recorre el deslizamiento antes de que choque contra el obstáculo, se detiene de manera más abrupta la arena negra y no avanza, en cambio al estar más alejado el obstáculo la arena alcanza a pasar por el plano antes de la morrena y es capaz de remontar en parte dicho obstáculo.

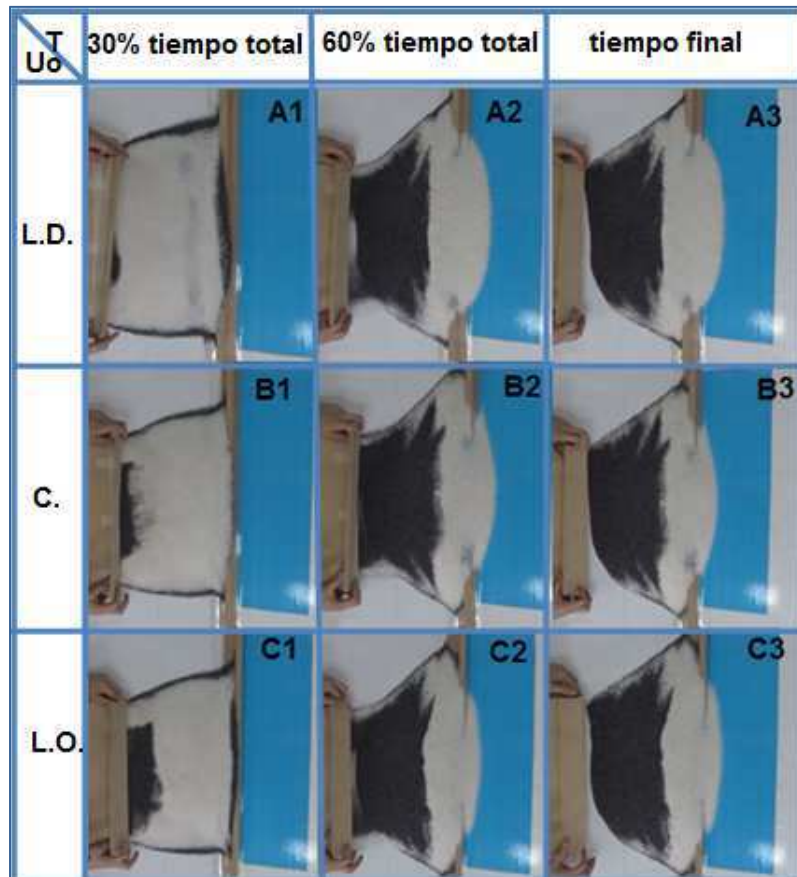


Figura 63: Matriz de imágenes de variación de ubicaciones de un obstáculo, vista superior. T= porcentaje del tiempo de grabación. Uo= ubicación del obstáculo. L.D.=ladera del deslizamiento. C= centro del valle. L.O.=ladera opuesta al deslizamiento.

De acuerdo a lo observado en la figura 64 se observa que las imágenes de la columna 3 (A3, B3 y C3) que cambia la convexidad del perfil del depósito. Donde en A3 se aprecia claramente una pequeña planicie con otra pendiente menor al promedio de la ladera que es convexa, en B3, se observa con mayor dificultad y en C3 donde casi no es perceptible por la concavidad del perfil.

En los tres casos en la 1ª columna de las imágenes A1, B1 y C1 se aprecia que la primera banda de arena negra desliza y por sobre ella desliza la banda de arena blanca. Además en los tres casos se aprecia que la banda negra no fue detenida completamente por el obstáculo, aunque no se aprecia al otro lado de éste. De acuerdo a la columna 2 de las imágenes A2, B2 y C2, se ve que la arena negra de la primera banda fue detenida por el obstáculo.

La principal diferencia observada entre las figuras A, B y C, es la extensión superficial de la segunda banda de arena negra, que para A, es menor que en B y C.

En este caso se observa que la presencia de una terraza en la ladera del depósito generado. Esta terraza se aprecia de manera más clara mientras el obstáculo esté más cerca del deslizamiento. Esto puede ser ya que el movimiento baja por la ladera y enseguida sigue el plano de la superficie del obstáculo, en cambio al remontar un obstáculo después de alcanzar el plano se genera una interferencia en la dirección del movimiento por lo que se pierde esta planicie.

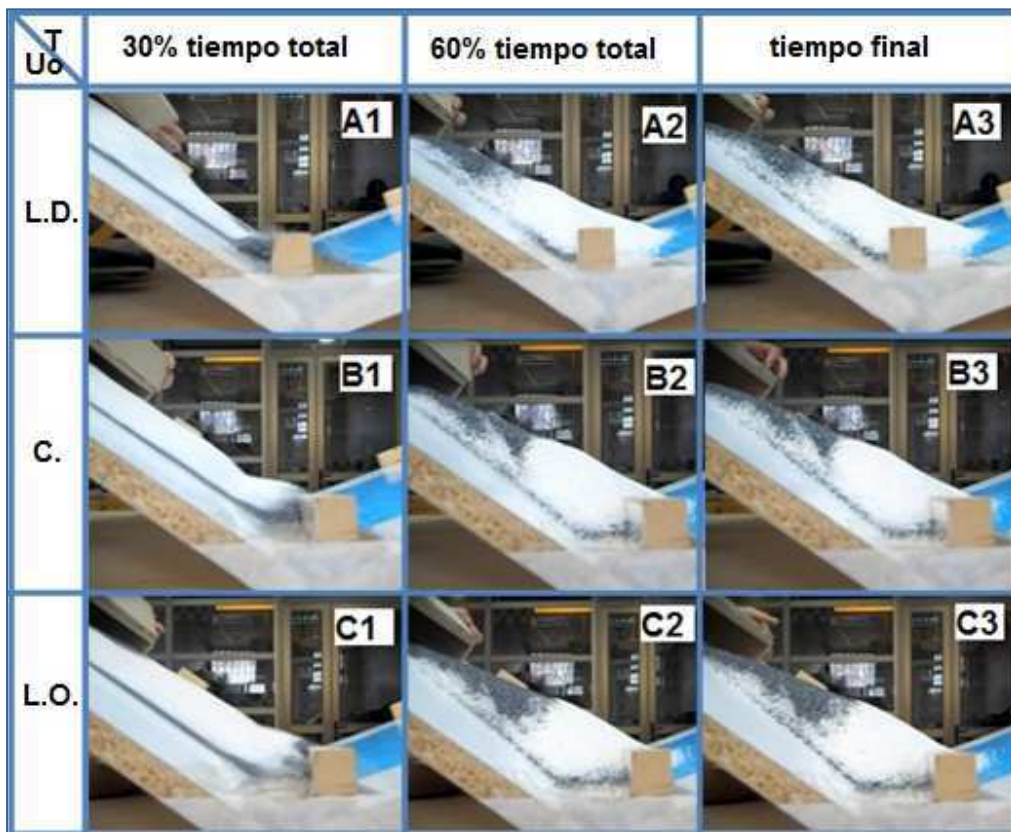


Figura 64: Matriz de imágenes de variación de ubicaciones de un obstáculo, vista lateral. T= porcentaje del tiempo de grabación. Uo= ubicación del obstáculo. L.D.=ladera del deslizamiento. C= centro del valle. L.O.=ladera opuesta al deslizamiento.

- El obstáculo trabajado correspondió a un material rígido. Si se quisiera comparar con una morrena, se necesitaría un material con una reología distinta. Para ello se realizaron unas pruebas con arena, no consolidada y arena consolidada, donde se utilizó en vez de la

madera una cantidad de 300 cm³ de arena de sílice gruesa, y en el caso consolidado se le agregó a dicha arena un volumen de 25 cm³ de agua, tratando de generar un obstáculo de 80 cm de largo y 4 cm de ancho aproximadamente. De estas pruebas se observó que el caso consolidado se comporta igualmente a la barra rígida de madera, generando una leve curvatura, con un desplazamiento máximo de 0.5 cm en la dirección del ancho del valle. En el caso no consolidado el obstáculo se curvó pero no subió por la ladera opuesta. En este caso se observó además, que la parte central del deslizamiento que tiene mayor velocidad movió más el obstáculo, trasladándolo en la horizontal unos centímetros pero quedando en el mismo lugar en los bordes del obstáculo. De todas maneras esto es casi imperceptible en la superficie del depósito generado. Estos tests no se realizaron sistemáticamente ya que solo se quería saber cómo respondería el modelo ante un obstáculo no rígido.

- **Variación del Alto del obstáculo**

Valle en U de ancho 6,5 cm forrado en cinta adhesiva transparente. La ladera opuesta al deslizamiento tiene un ángulo de 20°. Se tiene un obstáculo de largo 120 cm, ancho 2 cm, y alto variable entre **1, 2 y 4 cm**. En las figuras 65 y 66 se muestran las observaciones obtenidas de las grabaciones de los modelos.

En la figura 65 se observa que la parte central del deslizamiento es la que alcanza una mayor distancia horizontal, y en algunos casos como B3 y C3 solo la parte central logra traspasar el obstáculo.

En todos los casos se aprecia que la primera banda negra de material queda bajo las otras bandas que deslizan sobre ella, ya que se ve un halo que rodea en algunas partes los distintos depósitos generados.

En el caso del obstáculo de mayor altura (C), en la columna 3 se ve que la segunda banda de material negro se curva en los bordes del deslizamiento hacia adelante.

También se aprecia que a mayor altura del obstáculo mayor es la posibilidad de observar en el depósito final parte del obstáculo sin cubrir.

Se aprecia que el avance de la remoción en la parte central es mucho mayor que en los costados, pues alcanza una velocidad mayor durante el trayecto.

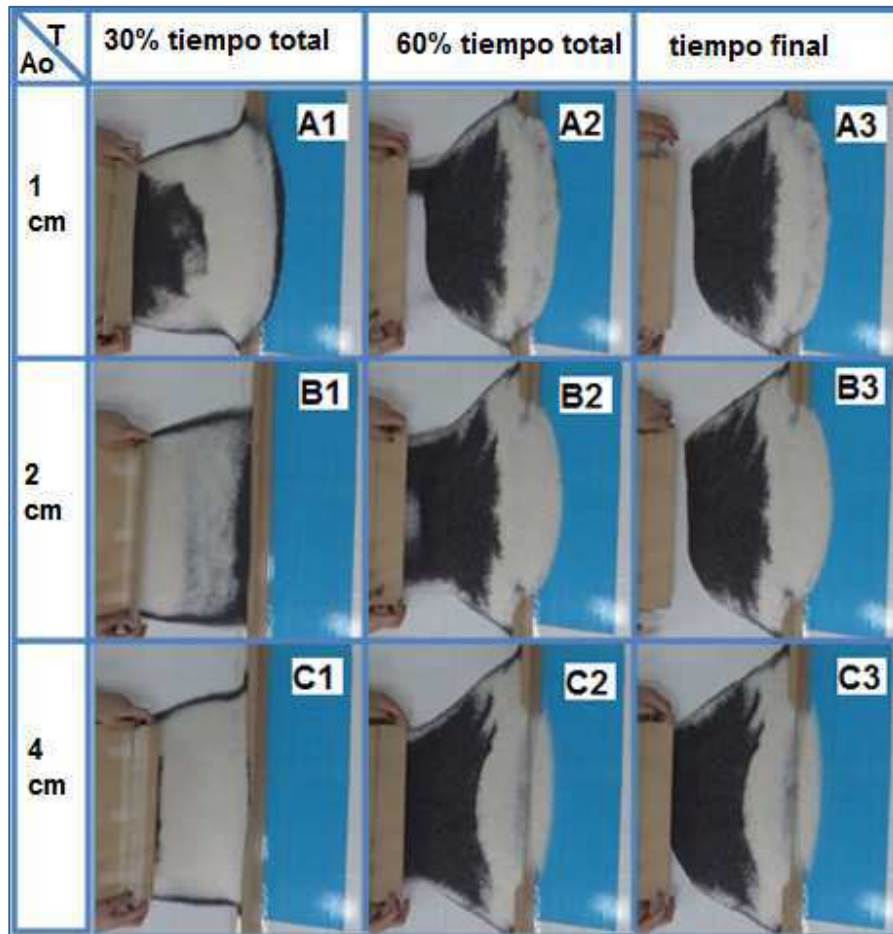


Figura 65: Matriz de imágenes de variación del alto del obstáculo, vista superior. T=porcentaje de tiempo de la grabación. Ao= alto obstáculo medido en centímetros.

De acuerdo a la figura 66 se aprecia que en los casos A y B la primera capa de material negro traspasa el obstáculo (de acuerdo a la columna 1) pero en el caso C queda retenida.

La diferencia más notable es que en el caso A se tiene una terraza de gran extensión y baja pendiente dentro de la ladera del perfil. Luego en el caso B se aprecia una pequeña terraza mucho menor que la anterior, y en el caso C no se observa. En el mismo sentido se pasa de un perfil convexo a uno cóncavo al aumentar la altura del obstáculo.

Se aprecia que el obstáculo retiene la primera banda de color negro al menos en parte.

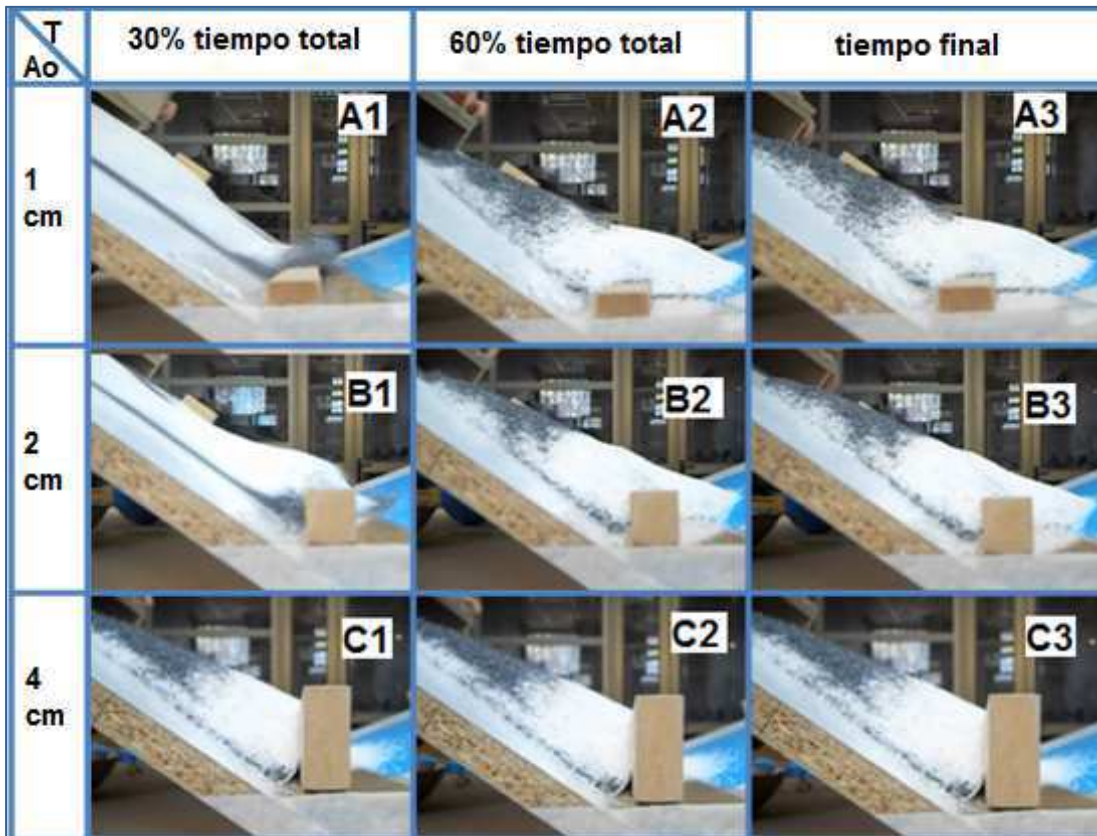


Figura 66: Matriz de imágenes de variación del alto del obstáculo, vista lateral. T=porcentaje de tiempo de la grabación. Ao= alto obstáculo medido en centímetros.

- **Variación del Ancho del obstáculo.**

Valle en U de ancho 6,5 cm forrado en cinta adhesiva transparente. La ladera opuesta al deslizamiento tiene un ángulo de 20°. Se tiene un obstáculo de largo 120 cm, alto de 1 cm, y ancho variable entre **1, 2 y 4 cm**.

De la figura 67 se puede observar que la primera banda negra desliza y sobre ella desliza la banda blanca (A1, B1, C1). En el caso del obstáculo de menor ancho (fila A) no se aprecia la primera banda negra al interior de la franja blanca generada, aunque si se observa asomando por los bordes de la banda blanca del depósito generado. En los casos B y C si se observa la primera franja negra al interior del depósito de la franja blanca. En general, no se aprecian mayores diferencias entre los modelos mostrados en las filas A, B y C.

No se observan diferencias con los demás videos grabados.

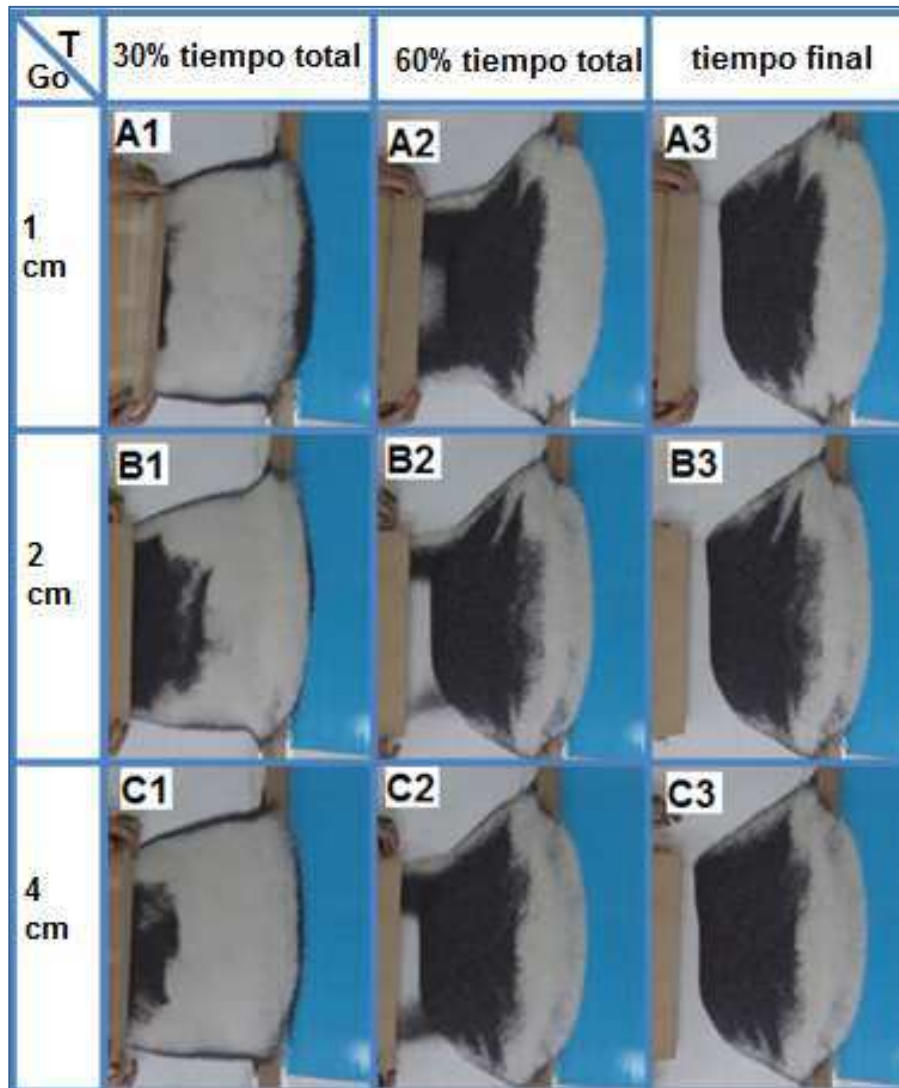


Figura 67: Matriz de imágenes de variación del ancho del obstáculo, vista superior. T=porcentaje de tiempo de la grabación. Go= ancho obstáculo medido en centímetros.

De la figura 68 se aprecia que en todos los casos la primera banda negra sobrepasa al obstáculo (A1, B1 y C1). De la columna 3 de las imágenes A3, B3 y C3 se observa que la planicie o terraza generada en el perfil del depósito se hace mayor al aumentar el ancho del obstáculo y que su pendiente es menor también de acuerdo al aumento del ancho del obstáculo.



Figura 68: Matriz de imágenes de variación del ancho del obstáculo, vista lateral. T=porcentaje de tiempo de la grabación. Go= ancho obstáculo medido en centímetros.

Se observa que todas las bandas de la remoción sobrepasan al obstáculo. Además se observa que se genera una terraza más amplia a mayor ancho que presenta el obstáculo. Esto se debe al movimiento que tiene el material de la remoción que es horizontal a la superficie sobre la que se mueve, aparentemente laminar, donde al tener un espacio más amplio que sigue una sola dirección la remoción no presenta tanta “interferencia” en su movimiento y se puede apreciar esta terraza de mejor manera.

5. DISCUSIÓN

5.1. DISCUSIÓN RELATIVA A LA CARTOGRAFÍA REALIZADA EN TERRENO

Discusiones surgidas del recorrido del depósito en terreno, medición de tamaño y litología de clastos, estimación del porcentaje de matriz y observaciones del entorno del depósito:

- Con respecto al cerro Mesón Alto y el escarpe que presenta de cara al río Yeso: Se aprecia un escarpe semicircular donde se observa una pérdida de material que debe haber correspondido a una remoción en masa.
- La litología del cerro Mesón Alto corresponde a la Formación Abanico, con presencia de un intrusivo. No se distingue claramente la forma del intrusivo presente; siendo tabular en la zona más al E del escarpe, pero queda bajo el material de remociones menores por lo que no se aprecia su continuidad. En la parte baja de la cicatriz se aprecia roca de color oscuro que se relaciona a la Fm. Abanico, por lo que se asume que el material del deslizamiento que provino de esa cicatriz debe haber tenido material de la Fm. Abanico, luego intrusivo y más arriba la Fm. Abanico nuevamente. Por lo que serían tres capas de material de forma indefinida, pero no se recorrió la cicatriz in situ. Se recomienda para futuros trabajos realizar una cartografía de las litologías presentes en dicha cicatriz.
- Las litologías encontradas en la superficie del depósito son de dos tipos: 1) De la Fm. Abanico con lavas andesíticas y algunos conglomerados y brechas sedimentarias. 2) intrusivo granítico que presenta mayor o menor alteración. Estas litologías coinciden con las del Cerro Mesón Alto, al igual que con todos los cerros circundantes al depósito pues todo el lugar está al interior de la Fm. Abanico.
- Al norte de la Laguna Negra por el mismo valle en que esta se ubica, está emplazado el Plutón La Gloria por lo que los clastos de intrusivo presentes en el depósito podrían haberse originado en dicho Plutón y no necesariamente en el Cerro Mesón Alto. Estudios geoquímicos (Deckart et al, 2014) señalan diferencias químicas entre un intrusivo y otro y además señalan que los clastos del depósito corresponden tanto al cerro Mesón Alto como al Plutón La Gloria aunque predominan aquellos más parecidos al intrusivo del cerro Mesón Alto. Esta diferencia química no se aprecia a simple vista, por lo que pueden existir

dos lugares de proveniencia, que para los modelos análogos realizados en este estudio no se consideran.

- El depósito está ubicado en la confluencia de dos valles glaciales, el correspondiente al río Yeso, y el valle generado por los valles de los esteros La Paloma y Echaurren que dan origen a la Laguna Negra. Además se aprecian glaciares actuales en la parte más alta del valle del Estero La Paloma y sobre el Cerro Mesón Alto; por lo que la presencia de morrenas es posible, aunque en ninguna otra parte del valle del río Yeso se aprecian morrenas con las dimensiones del depósito completo en estudio.
- El depósito presenta bandas muy bien marcadas de material con distintas litologías. Si se agrupan las zonas de mezcla de material se aprecian 4 bandas principales cortadas por zonas con deslizamientos al interior del depósito. Estas bandas se ubican de manera longitudinal al depósito y corresponden de más cercana a la Laguna Negra y hacia el Cerro Mesón Alto: 1) franja intrusiva, 2) franja andesítica, 3) franja intrusiva y 4) franja andesítica. Esta configuración no sería posible de obtener si todo el depósito correspondiera a una morrena, pues en dicho caso el material debería estar mezclado, siendo una composición diamíctica con clastos de la Fm. Abanico y del Plutón La Gloria.
- El depósito tiene una superficie irregular con hummocks. Aun así, presenta valles transversales al depósito y que cortan a las bandas litológicas presentes. Estos valles no corresponden a flujos de agua por las características observadas.
- El tamaño de los bloques varía en un amplio rango, siendo un depósito de mala selección, aunque con zonas con mejor selección en su interior. De manera general se apreció que el tamaño de los clastos mayores disminuyó aguas abajo a lo largo del depósito, sin deberse a un retrabajo aparente del depósito.
- Se encontraron tres zonas con material muy fino presente en los bordes del depósito, que presentan un alto porcentaje de matriz con respecto a todo el depósito. Además la matriz corresponde a finos y no a arena como en la mayor parte del depósito. No se sabe el porcentaje específico de arcillas dentro de los finos, pues no se realizaron experimentos para determinar el contenido de arcillas. Estas zonas por su diferencia apreciable con respecto al resto del depósito que podrían ser morrenas, o depósitos de remociones anteriores al depósito principal. Se recomienda realizar estudios granulométricos en estas zonas para aportar pruebas concretas a que corresponden a morrenas.

- La presencia de zonas de predominancia de matriz, con más de un 50% de ella, hacen pensar en un origen distinto a un deslizamiento pues si bien en la generación de la remoción es posible obtener material muy fino, es extraño que estas zonas específicas contengan ese porcentaje de finos. Además estas zonas presentan una mala selección y clastos de tipo andesíticos e intrusivos. Esto hace pensar en morrenas, lo que podría dilucidarse con un estudio del porcentaje de arcillas en la matriz.
- Por todo el depósito se encontraron clastos con presencia de estrías pequeñas, similares a espejos de fallas, los que podrían haberse originado tanto por un deslizamiento de roca como por el avance de un glaciar. Aunque la presencia de algunos clastos angulosos con estrías en distintas caras hace pensar en deslizamiento donde las estrías son por el roce de la roca al fracturarse y caer una distancia relativamente menor, pues sus cantos permanecen angulosos. En general los clastos presentan gran angulosidad exceptuando algunos clastos intrusivos que están más redondeados en la zona del borde de la Laguna Negra lo que podría deberse a un arrastre glacial y en la zona alta del depósito pero siempre asociadas a una mayor meteorización de la roca. Se observó una sola estría de mayor tamaño, que hace suponer un origen glacial, que se ubicaba en la zona circundante al Embalse el Yeso. Cabe destacar que no se realizó un trabajo exhaustivo de revisión de todos los clastos mayores del depósito por su gran extensión espacial, por lo que puede haber otros lugares con presencia de grandes estrías pero no se observaron durante el desarrollo de este trabajo.
- El depósito completo no puede ser una gran morrena como lo planteado por Marangunic y Thiele (1971) pues el volumen del depósito es mucho mayor al volumen de depósitos glaciales de este tipo en los valles de la zona. Además, la presencia de bandas litológicas es inexplicable de acuerdo a esta teoría. Por otra parte si el depósito completo fuera una morrena se esperaría encontrar una mala selección, y si bien, el depósito tiene mala selección por zonas la selección es muy buena, siendo incompatible con la explicación de una morrena. Y tampoco se observan muchos clastos con estrías glaciales que sustenten la teoría de que los grandes bloques del depósito hubiesen sido transportados por un glaciar.
- También se puede concluir de terreno que el depósito presenta características de remoción en masa, más específicamente un deslizamiento de rocas, que prosiguió como una avalancha. Esto debido a que se aprecia la cicatriz en el cerro Mesón Alto, las litologías faltantes corresponden a la Fm. Abanico y un intrusivo, y la ubicación del depósito con respecto al escarpe del cerro hacen pensar en una caída de material que relleno el valle y que al caer el material se fue fracturando hasta obtener clastos de tamaño cercano a 1 cm, y una matriz principalmente tamaño arena gruesa a muy gruesa. Si el depósito tuviera una

buena selección, el origen hubiera sido un deslizamiento, pero el hecho de que presente material mucho más fino mezclado con los clastos sugiere una avalancha de rocas que por su característica de flujo pudo avanzar más que un simple deslizamiento aguas abajo por el valle del río Yeso, lo que explicaría el porque el tamaño promedio de los clastos disminuye dentro del depósito mientras se aleja aguas abajo del embalse.

- De lo observado en terreno se concluyó que la o las posible/s morrena/s se ubica/n a lo largo del depósito en su cara más NW como morrena lateral, o bajo el depósito con un espesor y áreas desconocidos que no permite que se observe en superficie como morrena de fondo o al lado del Embalse El Yeso como morrena terminal o de retroceso.

5.2. DISCUSIÓN RELATIVA AL ANÁLISIS NUMÉRICO DE LOS PARÁMETROS Y A LA OBSERVACIÓN DE LA DINÁMICA DE GENERACIÓN DE DEPÓSITOS DE DESLIZAMIENTO A TRAVÉS DE MODELOS ANÁLOGOS.

- En general se observa una relación inversa entre los parámetros “An/La” y “e”, y por otra parte entre los parámetros “H/D” y “De”, para las distintas variables consideradas, esto es un indicador que los modelos fueron exitosos. Los parámetros “An/La” y “e” se relacionan con la geometría del depósito que debe considerar siempre un volumen final igual por lo que al disminuir el área del depósito, es decir tener una excentricidad menor al disminuir “An/La” se espera que el espesor del depósito aumente pues el volumen es constante. Por otra parte los parámetros “H/D” y “De” representan la movilidad del deslizamiento por lo que la relación entre ellos sea inversa es lo esperable, ya que un mayor desplazamiento horizontal “D”, con respecto al desplazamiento vertical H, debe presentar un mayor desplazamiento que un modelo con un mayor desplazamiento vertical.
- Ninguna de las configuraciones tratadas obtuvo como resultado un depósito con presencia de montículos como los observados en terreno, ni de valles transversales.
- Cuando por algún motivo se tiene que la arena de la primera capa se detiene abruptamente, ya sea por un valle en V de ángulo muy alto en la ladera opuesta al deslizamiento o por la presencia de un obstáculo, independientemente de sus dimensiones o ubicación, desaparece de la superficie del depósito final dicha banda de color negro. Obteniéndose un depósito de dos bandas, donde la más

lejana al escarpe de origen es de color banco y la más cercana es la segunda banda de color negro.

- Por ello para mantener presentes las 3 capas de material en el depósito se requiere un ángulo bajo para la ladera opuesta al deslizamiento de manera que la fricción le permita a la arena remontar la ladera y observarse en el depósito final generado.
- Si se trabaja con un obstáculo se obtiene un depósito final con solo dos bandas claramente apreciables, por lo que para generar las 4 bandas vistas en terreno, se requiere algo distinto que no se modeló en este trabajo, como una remoción y luego una reactivación del escarpe y que caigan nuevamente bandas de material.
- La excentricidad del depósito, si se ve en planta, depende principalmente del ángulo de la ladera de frente al deslizamiento. El depósito en estudio tiene un largo aproximado de 6,5 km y un ancho máximo de 3,3 km, obteniéndose una relación de “An/La” de 0,5, lo que hace pensar que el depósito se generó sobre el valle cuya ladera opuesta al deslizamiento tenía una pendiente baja, entre 10° y 20° de acuerdo a los resultados mostrados en la figura 39. Si se considera que a mayor ángulo se oculta de la superficie la primera capa de material de color negro, entonces un bajo ángulo debiera reflejar las tres capas de material en superficie. Además un mayor ángulo refleja una pérdida de coherencia en la segunda banda de color negro generando bordes menos regulares en ella. En el depósito al tener un ángulo bajo los límites de las bandas debieran ser más o menos claros, lo que coincide con las observaciones de terreno.
- Por otra parte a mayor ángulo de la ladera se tiene un mayor espesor del depósito de acuerdo a los modelos realizados, por lo que la variación general de altura del depósito de E a W, puede deberse a que la ladera opuesta al deslizamiento tenía una variación en su inclinación, siendo más empinada hacia el Embalse El Yeso y con ángulo menor hacia la parte baja del valle. Esto se aprecia en el mapa de la zona, donde la parte más al NE del depósito choca con el macizo rocoso, en cambio la parte media llega al valle de la Laguna negra que siendo un valle afluente tiene un ángulo cercano a 0° es decir menor que el ángulo de 20° estimado en el punto anterior para la ladera más NE, esto quiere decir, que de acuerdo al modelo trabajado el ángulo de la ladera N del valle, antes del depósito disminuía su ángulo de E a W. Aunque, dentro de toda la extensión del depósito, el ángulo de la ladera opuesta al cerro Mesón Alto debió ser bajo.

- Al hablar de distancia excesiva “De” y coeficiente de fricción equivalente “H/D” se vieron dos tendencias diferentes con un punto de inflexión en los 30°. Con respecto a la zona de estudio en que se determinó que la ladera del valle previo al depósito debió tener un ángulo bajo, la tendencia correspondiente sería que: a mayor ángulo de la ladera, mayor será el coeficiente de fricción y menor el desplazamiento excesivo. De esto se puede concluir que en la zona NE del depósito con un ángulo mayor, la distancia horizontal alcanzada es menor que en el caso de la zona más central que tiene un mayor desplazamiento horizontal, lo que se aprecia a simple vista al observar la forma del depósito donde la distancia horizontal máxima se alcanzó en el valle de la Laguna Negra que corresponde a un bajo ángulo como ya se determinó.
- En el caso del depósito se tiene un valle que lo contiene de ancho menor a 3,3 km, que es el ancho máximo “An” del depósito, no se sabe exactamente el ancho anterior al depósito por su presencia, pero al observar el ancho del valle mediante el Software de Google Earth aguas arriba del Embalse El Yeso se mide un valle en promedio de 700 metros, lo que en el modelo equivaldría a 7 cm, donde se consideró 6,5 cm como un valle angosto, por lo tanto estamos hablando efectivamente de un valle angosto. De los modelos se concluye que un valle angosto tiene un mayor espesor en general que un valle más ancho, esto explica la gran magnitud del espesor del depósito aunque no se sabe su espesor máximo, solo se tiene datos gravimétricos de Marangunic y Thiele (1971), del espesor del material no consolidado que tiene un espesor máximo de 400 m, pero no se sabe que parte de ellos corresponde o no efectivamente al depósito o a una cubierta sedimentaria anterior al avance de los glaciares en la zona.
- La geometría del depósito no presenta una gran meseta o planicie regular, como muestran los modelos que debería apreciarse, aunque fuera de manera poco prominente. Quizás los hummocks vistos en terreno sean la manifestación de las terrazas observadas en laboratorio que por problemas de similitud no se logre una semejanza mayor desde el modelo a la realidad.
- De las dimensiones del obstáculo o morrena se concluye que a mayor altura del obstáculo tiende a desaparecer una banda de material, la primera, y a mayor ancho del obstáculo se genera una especie de planicie. En el caso en estudio no se observa una planicie más pronunciada, como se explicó en el punto anterior, por lo que se cree que las morrenas no debieron exceder los 100 m de espesor, de acuerdo al caso de 1 cm de alto del modelo, para poder generar tres bandas de material. Por otra parte no se conoce el ancho de las mismas pues con un espesor bajo pueden estar o no bajo todo el depósito sin ser observables en superficie.

6. CONCLUSIÓN

Este trabajo tiene como objetivo principal ayudar a dilucidar el origen y mecanismo de formación del depósito de Mesón Alto y entender la dinámica que lo generó.

Del trabajo realizado en terreno se puede concluir que se tiene un depósito de remoción en masa, que se inició como un deslizamiento de roca y que continuó su movimiento como una avalancha de rocas. Donde el valle sobre el cual se depositó tenía ya con anterioridad un material distinto depositado, posiblemente una o varias morrenas, las que fueron cubiertas en parte por la remoción. De esta manera se desconoce que volumen del depósito total corresponde al generado por la remoción y cual corresponde a la o las posibles morrenas. Aunque el que las posibles morrenas afloran solo en lugares específicos hace pensar que las morrenas no son de muy grandes proporciones, pues si no serían visibles en más zonas al interior del depósito.

De tres zonas distintas en el borde de la Laguna Negra y del Embalse El Yeso se apreció que tienen una mayor cantidad de matriz, superando el 50% en la relación matriz-clastos, con respecto al resto del depósito por lo que podría considerarse una morrena que podría cubrir todo el fondo del valle, una parte de este, o ser distintas morrenas menores sectorizadas y como no aflora en más zonas no se puede responder esta interrogante. Además, ese material se reconoce distinto al resto del depósito en cuanto a porcentaje de matriz pero la litología de los clastos es la misma, pudiendo ser un depósito distinto al de una morrena, como un depósito de flujo anterior a la remoción mayor que genera el depósito como se lo observa actualmente. Falta analizar el porcentaje de arcillas de estos depósitos para saber si clasifica o no como una morrena. De este trabajo solo se desprende que es un material con un origen distinto al resto del depósito.

Si se considera que la posible morrena no es muy alta por lo que no “obstaculiza” demasiado el camino de la remoción generada en el cerro Mesón Alto, las tres bandas de material presentes en el cerro Mesón Alto que son transportadas en la remoción se deben observar en la superficie del depósito final. Donde la morrena sería la banda faltante en la zona más cercana a la Laguna Negra.

Otra posibilidad es que la morrena tenga un cambio de pendiente creciendo hacia el NW y por eso retiene a la remoción, ya que con un cambio de pendiente paulatino deberían de acuerdo a los modelos realizados apreciarse las tres bandas de material.

También podría ser que la posible morrena corresponda a zonas muy menores dentro del depósito y que no sean partes de las bandas que afloran en superficie o quizás tengan un volumen considerable pero al no aparecer en superficie más que en los puntos observados igualmente no sean parte de estas bandas. De ser así se requiere otro mecanismo de formación de 4 bandas de material ya que con los modelos solo se

obtuvieron 2 y 3 bandas. Por lo que se hace necesario o bien dos remociones sucesivas con la presencia de un obstáculo como una morrena que debido a sus dimensiones reduzca de a 2 bandas durante cada remoción generando 4 capas finalmente y siendo cubierta la morrena por el depósito; o la presencia de un depósito anterior en el valle distinto a una morrena con pendiente baja y una posterior remoción que mantenga las tres bandas en el depósito final; dos remociones que choquen con una pendiente opuesta al movimiento muy alta que los frene, etc. En los casos que se plantea una segunda remoción a partir de la misma cicatriz del cerro Mesón Alto, se requiere que la segunda remoción no cubra por completo a las bandas generadas por la primera remoción, o una remoción que no presente un obstáculo muy pronunciado que mantenga las tres bandas de material en la geometría del depósito pero que cubra a una capa de material preexistente distinto a las zonas de posibles morrenas, que corresponda a la banda litológica más alejada del deslizamiento de litología intrusiva.

Queda la posibilidad de múltiples explicaciones con distintas variantes las que habría que dilucidar realizando nuevos modelos que si las consideren, como es el caso de la geometría de un depósito generado a partir de remociones sucesivas, con y sin la presencia del obstáculo.

Por lo tanto el depósito no corresponde solo a una remoción en masa, sino que es, un depósito mixto, donde aún falta aclarar si además de la remoción en masa de tipo deslizamiento que terminó como avalancha de rocas, que pudo ser una o varias remociones, hubo presencia de morrenas, ya identificadas en la superficie del depósito como posibles morrenas, si realmente son morrenas de acuerdo a pruebas granulométricas, y si no hay otro depósito distinto a la remoción en masa principal y a las posibles morrenas que este bajo el depósito pero que haya jugando un papel importante en la configuración actual.

Se sugiere, para futuros trabajos en la zona, otorgarle un “peso porcentual” a las distintas variables utilizadas en los modelos y que inciden en la geometría del depósito final, partiendo de distintos escenarios y con ello obtener un modelo de la posible geomorfología previa al deslizamiento. Para esto también se debe mejorar la estimación del espesor del depósito, entender la geometría del intrusivo al interior del cerro de Mesón Alto y hacer un análisis granulométrico para concluir si las posibles morrenas que asoman en la superficie del depósito lo son o no.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Abele, G., 1984. Derrumbes de montaña y morrenas en los Andes chilenos. *Revista de Geografía Norte Grande*, 11, 17-30p.
- Andrade, D., y Van Wyk de Vries, B., 2010. *Structural analysis of the early stages of catastrophic stratovolcano flank-collapse using analogue models. Bull Volcanol*, 72, 771-789p.
- Antinao, J.L. y Gosse, J., 2009. *Large rockslides in the Southern Central Andes of Chile (32-34.5°S): Tectonic control and significance for Quaternary landscape evolution. Geomorphology* 104 (3-4): 117-133p.
- Bonnet, M., 2011. *Modélisation analogique d'un glissement gravitaire. 12. Laboratoire Géosciences Montpellier, Université Montpellier 2.*
- Burbank, D.W., 2002. *Rates of erosion and their implications for exhumation. Mineral. Mag.* 66, 25–52p.
- Carta caminera MOP, 2013 [en línea] < <http://www.mapas.mop.cl/cc2013/3-red-caminera-chile-valparaiso-metropolitana.jpg> > [consultas: diciembre 2013, marzo 2014, agosto 2014].
- Carta Geológica de Chile, Hoja Santiago. Thiele, R. 1:250.000, Región Metropolitana. Carta Geológica de Chile, 39. Instituto de Investigaciones Geológicas. 1980.
- Chiu, C., 1991. *Aplication of Entropy concept in Open-Channel Flow Stud. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 117(5), 615-628p.
- Charrier, R.; Baeza, O.; Elgueta, S.; Flynn, J.J.; Gans, P.; Kay, S.M.; Muñoz, N.; Wyss, A.R.; Zurita, E., 2002. *Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33°-36° S.L.). Journal of South American Earth Sciences* 15: 117-139p.
- Cornejo, P., y Mahood, G., 1997. *Seeing past effects of re-equilibration to reconstruct magmatic gradients in plutons: La Gloria Pluton, central Chilean Andes. Contribution to Mineral Petrology*, Vol. 127, 159 – 175p.
- Cruden, D.M., 1991. *A simple definition of a landslide. Bulletin International Association for Engineering Geology*, vol. 43, 27–29p.
- Cruden, D. M., y Varnes, D. J., 1996. *Landslide types and processes. Landslides: investigation and mitigation, (A. K. Turner, & R. L. Schuster, Edits.) Washington DC: Transportation Research Board, National Research Council. Special Report 247, 36-75p.*
- Davies, R. T., y McSaveney, M. J., 1999. *Runout of dry granular avalanches. Can. Geotech. J.*, 36, 313-320p.
- Davies, T. R., y McSaveney, M. J., 2002. *Dynamic simulation of the motion of fragmenting rock avalanches. Can. Geotech. J.*, 39, 789-798p.

- Deckart, K., Pinochet, K., Sepulveda, S. A., Pinto, L., & Moreiras, S. M., 2014. *New insights on the origin of the Meson Alto deposit, Yeso Valley, central Chile: A composite deposit of glacial and landslide processes.*
- Derruau, M., 1991. *Geomorfología*, Barcelona, Ediciones Ariel S. A., 159-161p.
- Freitas, M. H., y Waters, R., 1973. *Some field examples of toppling failure. Geotechnique*, 23, 495-514p.
- Fock, A., 2005. *Cronología y tectónica de la exhumación en el neógeno de los Andes de Chile Central entre los 33° y los 34° S*, tesis (magíster en ciencias mención geología, título de geólogo). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2005. 81, 101p.
- Giambiagi, L., Ramos, V., Godoy, E., Alvarez, P., Orts, S., 2003. *Cenozoic Deformation and tectonic style of the Andes, between 33° and 34° south latitude. TECTONICS*, VOL. 22, NO. 4, 1041.
- Graveleau, 2008. *Interactions Tectonique, Erosion, Sedimentation dans les avant-pays de chaînes: Modélisation analogique et étude des piémonts de l'est du Tian Shan (Asie Centrale).*
- Greve, R., y Hutter, K., 1993. *Motion of a Granular Avalanche in a Convex and Concave Curved Chute: Experiments and Theoretical Predictions. Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 342.
- Heim, A., 1932. *Landslides and human lives (Bergsturz and Menschenleben). In: Skermer, N. (ed) Bi-Tech Publishers, Vancouver, BC*, 196p.
- Hsü, K. J., 1975. *Catastrophics Debris Streams (Sturzströme) Generated by Rockfalls. Geological Society of America Bulletin*, 86, 129-140p.
- Hubbert, M., 1937. *Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. Geological Society of America Bulletin*, 48, 1459-1520p.
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L., 2014. *The Varnes classification of landslide types, an update. Springer-Verlag, Berlin.*
- Hungr, O., y Morgenstern, N. R., 1984. *Experiments on the flow behaviour of granular materials at high velocity in an open channel. Géotechnique*, 34(3), 405-413p.
- Jorand, C., 2007. *Modélisation expérimentale de la fracturation d'un milieu sédimentaire*, tesis (doctorado en ciencias de la Tierra y el Universo). *Ecole doctorale Sciences Fondamentales et Appliquées, Université Nice Sophia Antipolis*, Francia. 169p.
- Katz, O., y Aharonov, E., 2006. *Landslides in vibrating sand box: What controls types of slope failure and frequency magnitude relations? Earth and Planetary Science Letters*, 247, 280-294p.

- Lacoste, A., Vendeville, B. C., & Loncke, L., 2011. *Influence of combined incision and fluid overpressure on slope stability: Experimental modelling and natural applications. Journal of Structural Geology*, 33, 731-742p.
- Manzella, I., y Labiouse, V., 2008. *Qualitative Analysis of Rock Avalanches Propagation by Means of Physical Modelling of Non-Constrained Gravel Flows. Rock Mechanics and Rock Engineering*, 41, 1, 133-151p.
- Marangunic, C., y Thiele, R., 1971. Procedencia y detreminaciones gravimetricas de espesor de la morrena de la Laguna Negra, provincia de Santiago. Publication 38. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Fisicas y Matematicas, Departamento de Geologia.
- Merle, O., Vidal, N., Van Wyk de Vries, B., 2001. *Esperiments on vertical basement fault reactivation below volcanoes. Journal og Geophysical Research*, 106(B2), 2153-2162p.
- Moreiras, S.M., y Sepúlveda, S.A., 2012. Nuevos estudios en los grandes movimientos en masa en la alta cordillera de la cuenca del río Maipo, Chile Central. In Congreso Geológico Chileno, No. 11. Actas: 4 p. Antofagasta.
- Mourgues, R., y Cobbold, P. R., 2006. *Sandbox experiments on gravitational spreading and gliding in the presence of fluid overpressures. Journal of Structural Geology*, 28, 887-901p.
- Nicoletti, P. G., y Sorriso-Valvo, M., 1991. *Geomorphic controls of the shape and movility of rock avalanches: Geological Society of America Bulletin*, v. 103, 1365-1373p.
- Ormeño, A. 2007. Geomorfología dinámica del río Maipo en la zona cordillerana de Chile central e implicancias neotectónicas. tesis (Magíster en ciencias mención geología). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 147p.
- Paguican, E. M., Van Wyk de Vries, B., Lagmay, A. M., 2012. *Hummocks: how they form and how they evolve in rockslide-debris avalanches. Landslides*.
- Pollet, N., 2004. *Mouvements gravitaires rapides de grandes masses rocheuses: Apports des observations de terrain à la compréhension des processus de propagation et dépôt. 235. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*.
- Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, 2007. Movimientos en Masa en la Region Andina: Una guia para la evaluacion de amenazas. Publicacion Geologia Multinacional(4), 432. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Rhodes, J., 2013. Modelación Analógica de avalanchas de rocas, caso del Mesón Alto – Chile Central, trabajo de práctica. Departamento de Geología, Facultad de ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Rice, R. J., 1982. Fundamentos de Geomorfología, Madrid, Paraninfo, 263-273p.

- Varnes, D. J., 1978. *Slope movement types and processes*. In: Schuster R. L. & Krizek R. J. Ed., *Landslides, analysis and control*. Transportation Research Board Sp. Rep. No. 176, Nat. Acad. of Sciences, 11–33p.
- Vidal, N., y Merle, O., 1999. *Reactivation of basement faults beneath volcanoes: a new model of flank collapse*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 99, 9-26p.

8. ANEXOS

8.1. ANEXO A

Resumen de datos obtenidos al determinar reproductibilidad de modelos utilizando el dispositivo de Rhodes (2013). Todos los modelos corresponden a un ángulo de caída de 35°, un valle con 3° de inclinación del eje. An = ancho del depósito visto en planta medido de manera transversal al valle. La = largo del depósito visto en planta medido de manera longitudinal al valle. e = espesor aparente del depósito medido de manera vertical justo al pie de la ladera de caída de material. H = distancia vertical alcanzada por el punto de mayor desplazamiento horizontal. D = distancia horizontal alcanzada por punto de mayor desplazamiento horizontal.

Modelo A (valle en V, con ángulo ladera opuesta de 10°)					
N° exp.	An [cm]	La [cm]	e [cm]	H [cm]	D [cm]
1	33	65	4,5	30	66,7
2	36	63	4,6	29,9	63,7
3	35	66,2	4,8	29,6	67
4	31	67,4	4,9	29,7	66,9
5	34,5	67	4,7	29,9	65,7
Promedio	33,9	65,72	4,7	29,82	66
Modelo B (valle en V, con ángulo ladera opuesta de 20°)					
N° exp.	An [cm]	La [cm]	e [cm]	H [cm]	D [cm]
6	28,6	70,5	5,1	28,7	59,2
7	28,6	70	5,1	28,5	60,1
8	28,6	70,2	5,4	28,6	59,9
9	29	71,6	5,1	28,9	58,8
10	28,1	70,1	5,3	28,8	59,1
Promedio	28,58	70,48	5,2	28,7	59,42
Modelo C (valle en V, con ángulo ladera opuesta de 30°)					
N° exp.	An [cm]	La [cm]	e [cm]	H [cm]	D [cm]
11	26,5	72,6	5,6	28,1	56,4
12	27	71	5,4	28,6	55,7
13	27,4	73,4	5,5	28	56,7
14	27,5	72,8	5,7	28,2	56,2
15	27	72,4	5,8	28	56,7
Promedio	27,08	72,44	5,6	28,18	56,34
Modelo D (valle en V, con ángulo ladera opuesta de 35°)					
N° exp.	An [cm]	La [cm]	e [cm]	H [cm]	D [cm]
16	27	75,9	6	27,6	55,6
17	26,9	74,2	6,5	28,1	55,3
18	26,4	74,5	6	27,9	55,3
19	27	75,6	6,2	27,9	55,2
20	27,1	75,6	6,1	27,7	55,8
Promedio	26,88	75,16	6,16	27,84	55,44

Modelo E (valle en U de 11,5 cm, con ángulo ladera opuesta de 35°)					
N° exp.	An [cm]	La [cm]	e [cm]	H [cm]	D [cm]
21	31,7	70,2	4,5	27,8	55,5
22	31,7	70,9	5,1	27,3	56
23	31,5	71,3	4,6	26,9	56,7
24	31	71,2	4,5	27	56,9
25	31,2	70,3	4,6	27,5	55,6
Promedio	31,42	70,78	4,66	27,3	56,14

8.2. ANEXO B

Datos de parámetros a comparar, que se obtienen del Anexo 1. Con estos datos se probó la reproductibilidad de los experimentos. An/La = medida de excentricidad del depósito visto en planta, donde un valor de $An/La=1$ corresponde a una circunferencia y valores menores a 1 a elipses. H/D = coeficiente de fricción equivalente y corresponde al cociente de el desplazamiento vertical H del punto con mayor desplazamiento horizontal, dividido por su desplazamiento horizontal D . De = distancia excesiva de desplazamiento que corresponde a la distancia horizontal alcanzada por el punto de mayor desplazamiento horizontal del depósito medida desde el pie de la ladera de caída del material.

N°	An/La	H/D	De
1	0,50	0,44	23,85
2	0,57	0,46	20,99
3	0,52	0,44	24,72
4	0,45	0,44	24,48
5	0,51	0,45	22,99
Promedio (1-5)	0,51	0,45	23,41
6	0,40	0,48	18,21
7	0,40	0,47	19,39
8	0,40	0,47	19,05
9	0,40	0,49	17,52
10	0,40	0,48	17,96
Promedio (6-10)	0,40	0,48	18,43
11	0,36	0,49	16,26
12	0,38	0,51	14,85
12	0,37	0,49	16,71
14	0,37	0,50	15,92
15	0,37	0,49	16,71
Promedio (11-15)	0,37	0,50	16,09
16	0,35	0,49	16,18
17	0,36	0,50	15,16
18	0,35	0,50	15,45
19	0,35	0,50	15,35
20	0,35	0,49	16,24
Promedio (16-20)	0,35	0,50	15,68
21	0,45	0,50	15,79
22	0,44	0,48	17,01
13	0,44	0,47	18,28
24	0,43	0,47	18,34
25	0,44	0,49	16,32
Promedio (21-25)	0,44	0,48	17,15

8.3. ANEXO C

Datos obtenidos de modelos realizados en este trabajo. Cada grupo de modelos está caracterizado por cambiar solo un parámetro. An = ancho del depósito visto en planta medido de manera transversal al valle. La= largo del depósito visto en planta medido de manera longitudinal al valle. e= espesor aparente del depósito medido de manera vertical justo al pie de la ladera de caída de material. H= distancia vertical alcanzada por el punto de mayor desplazamiento horizontal. D= distancia horizontal alcanzada por punto de mayor desplazamiento horizontal.

Grupo Modelos F: Variación Angulo Valle, Valle en V, inclinación 3°, ángulo caída 35°, sin obstáculos.						
N° exp	ángulo[°]	An [cm]	La [cm]	e [cm]	H [cm]	D [cm]
26	10	35,8	65,8	4,8	30,1	69
27	20	30,7	72,8	5,7	28,6	63,2
28	30	26,5	76	6,5	28,7	58
29	35	27	75	6,6	27,7	58,2
30	40	26,6	76,6	6,8	27,2	57,7
Grupo Modelos G: Variación Ancho valle glacial (cinta adhesiva <i>masking tape</i>), inclinación 3°, ángulo 35°, sin obstáculos.						
N° exp	Ancho	An [cm]	La [cm]	e [cm]	H [cm]	D [cm]
31	6,5	35,3	69,3	5,8	28	56,2
32	11,5	41,9	66,5	4,9	26,5	56,3
33	16,5	51,2	64	4,6	26,5	58,4
Grupo Modelos H: Variación Ancho valle glacial, inclinación 3°, ángulo 35°, sin obstáculos.						
N° exp	Ancho	An [cm]	La [cm]	e [cm]	H [cm]	D [cm]
34	6,5	35,5	69,4	5,9	26,9	57,7
35	11,5	43,3	66,9	4,9	25,9	59
36	16,5	46,8	65,6	4,8	25,2	59,8
Grupo Modelos I: Variación Ancho valle glacial, inclinación 3°, ángulo 30°, sin obstáculos.						
N° exp	Ancho	An [cm]	La [cm]	e [cm]	H [cm]	D [cm]
37	6,5	33,8	68,6	5	26,7	63,8
38	11,5	35,2	66,5	4,9	26,1	60,4
39	16,5	37,5	66,2	4,8	27	60,6
Grupo Modelos J: Variación Ancho valle glacial, inclinación 3°, ángulo 20°, sin obstáculos.						
N° exp	Ancho	An [cm]	La [cm]	e [cm]	H [cm]	D [cm]
43	6,5	31,1	68,6	5,6	28,9	62,5
44	11,5	34,2	67,6	5,3	28,6	63,3
45	16,5	35,5	66,3	5,0	28,3	64
Grupo Modelos K: Ubicación obstáculo, Valle en U de 6.5 cm, inclinación 3°,						

ángulo 20°						
N° exp	Ubicación	An [cm]	La [cm]	e [cm]	H [cm]	D [cm]
46	Ladera deslizamiento	35,8	72,9	5,4	28,7	59,2
47	Al medio	35,2	72,2	6,3	29,1	58
48	Lado opuesto	33,3	71,3	6	29,2	57,7
Grupo Modelos L: Alto morrena (2cm ancho), Valle en U de 6.5 cm, inclinación 3°, ángulo 20°, obstáculo Lado deslizamiento.						
N° exp	Alto [cm]	An [cm]	La [cm]	e [cm]	H [cm]	D [cm]
49	1	32,8	71	5,1	28,5	59,7
50	2	33,3	71,2	5,7	29	58,4
51	4	34,1	75,2	5,9	29,8	56,1
Grupo Modelos M: Ancho morrena (1cm alto), Valle en U de 6.5 cm, inclinación 3°, ángulo 20°, obstáculo Lado deslizamiento.						
N° exp	Ancho [cm]	An [cm]	La [cm]	e [cm]	H [cm]	D [cm]
52	1	32,3	70,4	5	28,7	59
53	2	32,2	70,1	5,3	28,9	58,8
54	4	33,7	70,9	5,3	28,7	59

8.4. ANEXO D

Valores de parámetros calculados a partir del Anexo 3, con los cuales se realizaron los gráficos de interpretación de los modelos. En característica se señala si el modelo es un valle en V o U, además de la medida del valle en U. Si aparece “M.T” quiere decir que el valle se forró en cinta *masking tape*, un 2.0 indica la repetición tal cual de un modelo. Obst.des = obstáculo ubicado en ladera del deslizamiento. Obst.medio = obstáculo ubicado al medio del valle. Obst.opu = obstáculo ubicado bajo la ladera del frente al deslizamiento. H1= 1 cm de alto, H2= 2 cm de alto, H4= 4 cm de alto. A1= 1 cm de ancho, A2= 2 cm de ancho, A4= 4 cm de ancho.

N°	e [cm]	An/La	H/D	De [cm]	ángulo [°]	característica
26	4,8	0,54	0,43	26,01	10	valle V
27	5,7	0,42	0,45	22,35	20	valle V
28	6,5	0,34	0,49	17,01	30	valle V
29	6,6	0,36	0,47	18,64	35	valle V
30	6,8	0,34	0,47	18,85	40	valle V
31	5,8	0,50	0,20	16,21	35	U6.5 M.T
32	4,9	0,63	0,18	18,45	35	U11.5 M.T
33	4,6	0,80	0,17	20,55	35	U16.5 M.T
34	5,9	0,51	0,21	19,28	35	U6.5
35	4,9	0,64	0,18	22,01	35	U11.5
36	4,8	0,71	0,19	23,81	35	U16.5
37	5	0,49	0,18	25,66	30	U6.5
38	4,9	0,52	0,18	23,12	30	U11.5
39	4,8	0,56	0,17	22,04	30	U16.5
40	5	0,52	0,18	25,09	20	U6.5
41	5,3	0,53	0,19	22,88	20	U11.5
42	5	0,57	0,18	22,98	20	U16.5
43	5,6	0,45	0,46	21,22	20	U6.5 2.0
44	5,3	0,50	0,45	22,45	20	U11.5 2.0
45	5	0,53	0,44	23,58	20	U16.5 2.0
46	5,4	0,49	0,48	18,21	20	U6.5 obst.des
47	6,3	0,48	0,50	16,44	20	U6.5 obst.medio
48	6	0,46	0,50	15,99	20	U6.5 obst.opu
49	5,1	0,46	0,47	18,99	20	U6.5 obst.des H1
50	5,7	0,46	0,49	16,98	20	U6.5 obst.des H2
51	5,9	0,45	0,53	13,54	20	U6.5 obst.des H4
52	5	0,45	0,48	18,01	20	U6.5 obst.des A1
53	5,3	0,45	0,49	17,52	20	U6.5 obst.des A2
54	5,3	0,47	0,48	18,01	20	U6.5 obst.des A4

8.5. ANEXO E

CD con las grabaciones obtenidas de los modelos análogos.