



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD FÍSICA DE
DEPÓSITOS DE RELAVES ABANDONADOS EN LA ZONA CENTRO
NORTE DE CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

MARÍA BELÉN PULGAR MORALES

PROFESOR GUÍA:
CÉSAR PASTÉN PUCHI

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ROBERTO GESCHE SCHÜLER
GULLIBERT NOVOA GODOY

SANTIAGO DE CHILE

2020

**RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniera Civil con Mención
en Estructuras, Construcción y Geotecnia
POR: María Belén Pulgar Morales
FECHA: 22 de junio de 2020
PROFESOR GUÍA: César Pastén Puchi

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD FÍSICA DE DEPÓSITOS DE RELAVES ABANDONADOS EN LA ZONA CENTRO NORTE DE CHILE

En la actualidad, no existe en Chile una metodología específica para evaluar la estabilidad física de depósitos de relaves abandonados, por lo que desarrollarla es de suma importancia debido a la escasa información que se tiene sobre estos depósitos y el riesgo asociado a sus potenciales fallas. Este trabajo propone una metodología de evaluación de la estabilidad física de depósitos de relaves abandonados, basada en un método probabilístico de equilibrio límite de tipo estático y pseudo-estático, y una metodología de clasificación para priorizar la evaluación de estabilidad de estos depósitos. El trabajo establece como único mecanismo de falla la inestabilidad de taludes, para la cual se definen los parámetros críticos y la forma de evaluarlos. A partir de la observación de estos depósitos por medio de imágenes satelitales, se establece una clasificación en base a su integridad y cercanía a zonas de interés potencialmente afectadas en caso de falla. Por otro lado, la información recopilada por el Catastro del Servicio Nacional de Geología y Minería 2019 y el Levantamiento Catastral de 1989 – 1990, sumado a observaciones realizadas en terreno y de imágenes satelitales se sintetizan en fichas informativas de 86 depósitos abandonados. Del análisis de las fichas, se establece un listado de 50 depósitos abandonados cuyo análisis de estabilidad física debe ser prioritario debido a la cercanía de la zona de interés potencialmente afectada en caso de falla. La metodología de evaluación de estabilidad física de depósitos abandonados contempla 4 etapas: ejecución de ensayos de terreno, ensayos de laboratorio, levantamiento topográfico y análisis de estabilidad mediante método de equilibrio límite. Los ensayos de terreno permiten obtener la densidad superficial del relave que constituye los depósitos y los ensayos de laboratorio permiten obtener las humedades y parámetros de resistencia al corte de los materiales. El levantamiento topográfico de los depósitos estudiados se realiza por medio de fotografía aérea y rutas registradas a través de GPS, obteniéndose como resultado la altura e inclinación del talud de la sección transversal más crítica del depósito. La sección más crítica y los parámetros de los materiales son utilizados para generar un modelo de análisis de estabilidad de talud mediante GeoStudio. Dada la incertidumbre de los parámetros geotécnicos los depósitos y la posible existencia de una napa freática, se establece un análisis probabilístico tanto estático como pseudo-estático. Al aplicar la metodología de evaluación de estabilidad física a dos depósitos abandonados, se obtienen como resultado factores de seguridad medios cercanos a uno y probabilidades de falla superiores al 60% en el caso pseudo-estático.

A mi mamá, papá y hermano

Agradecimientos

A mi familia, mi mamá, mi papá y hermano, por todo el amor, entrega y paciencia. Gracias papás por luchar para que a mi hermano y a mí nunca nos falten las herramientas para lograr nuestros sueños, gracias por esforzarse tanto y más de lo que deberían. Mamá, gracias por tu amor incondicional, tus cuidados, y tus comiditas preparadas con tanto amor. Papá, gracias por inculcarme tu amor a las matemáticas y enseñarme cosas avanzadas cuando en el colegio estaba sumando 1+1, por tu ingenio, curiosidad y tus constantes ganas de aprender que me inspiran. A mi hermanito, el Janito, gracias por apoyarme y aconsejarme, y por ser el payaso que alegra mis días. A mis tatas e itas por estar presente en mi vida constantemente de una u otra forma, por transmitirme el amor al campo, las flores, los árboles, las abejitas y la música. A la tía Rosa y a la Roxana por su apoyo, amor y enseñanzas.

A Freddy por ser un compañero incondicional y por su apoyo constante, sobre todo en la última etapa de este proceso. Gracias por enseñarme a no encerrarme en el estrés, por alentarme cada vez que me cansaba y por celebrar conmigo cada logro.

A mis amigas de la vida Mari, Clau, Vale, Feña y Romi, por apoyarme durante los años de u y por intentar entenderme cuando hablaba de geotecnia y este trabajo.

A mi grupete femenino de la universidad: Cami, Pili, Pía, Cynthia, Tania, Dani y Cane, los amigos de plan común: Jose, Cynthia, Fran, Arita y Dani. Por los largos días estudio compartidos, por alegrar mis días, por esos viernes históricos, por los ataques de risas y por los momentos culturales en los almuerzos. Al pesado del Pepe por no aburrirse de molestarme y desconcentrarme, pero sobre todo por tenerme tanta paciencia estudiando. A Martín, por su apoyo, cariño y amistad. A los chiquillos: Pablo, Alonso y Edgar por los días de estudios e informes, porque sin ellos mis ramos estructurales hubiesen sido una tragedia.

A los amigos geopeces: Kathy, Susi, Alo, Meili, Pato/Jose, Miguel y Diego por sus consejos y ayuda, por tanta tontera que se les ocurría, por inventar las mejores historias y encargarse de que el mundo se las creyera. A mis chicas: Consu y Javi por compartir conocimientos, amistad y risas.

A mis profesores del colegio por alentarme siempre y por darme herramientas para desenvolverme en el mundo. Especialmente agradecer al profe Ernesto, por inculcarme el amor a las ciencias.

En particular agradecer a Meili, Alo y Karina por su disponibilidad e importante ayuda en este trabajo. A mi equipo de terreno: Pato, Miguel, Profe César y Tío Pato por pasar 4 días al sol respirando y absorbiendo relaves, con el fin de ayudarme en las mediciones. A Omar y Mario por su importante ayuda con los ensayos de laboratorio.

A los profesores de la comisión, Roberto Gesche por apoyarme y confiar en mí a lo largo de mi paso por los cursos de geotecnia, por compartir su conocimiento cada vez que lo necesité y por priorizar siempre la salud y lo humano. A Gullibert Novoa por responder a cada una de mis dudas y correos, y por estar siempre atento ante cualquier problema que pudiera surgir. A mi profesor guía César Pastén, por confiar en mí, por darme la oportunidad de realizar un trabajo que incluyese terreno y por estar siempre dispuesto a explicar cuántas veces fuera necesario.

Agradecer al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile (DIC) por su apoyo en el financiamiento de la campaña de terreno realizada. Y, por último, a los proyectos FONDECYT 11150388 y STINGS – EIT Raw Materials dirigidos por el profesor Sebastián Fingerhuth de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Tabla de Contenido

CAPÍTULO 1 : INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 ESTRUCTURA DE ESTE TRABAJO.....	3
CAPÍTULO 2 : REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 LEVANTAMIENTO CATASTRAL DE LOS TRANQUES DE RELAVES EN CHILE 1989 – 1990.....	4
2.2 CATASTRO DE DEPÓSITOS DE RELAVES DEL SERNAGEOMIN 2019.....	9
2.2.1 Clasificación de depósitos abandonados según ubicación.....	9
2.2.2 Clasificación de depósitos abandonados según método de construcción	9
2.2.3 Clasificación de depósitos abandonados según volumen autorizado	10
2.3 ESTABILIDAD FÍSICA	12
2.3.1 Principales mecanismos de falla de depósitos de relaves observados en Chile.....	12
2.3.2 Diagnóstico de la situación de tranques de relaves de la V Región	14
2.3.3 Guía metodológica para evaluación de la estabilidad física de instalaciones mineras remantes.....	18
2.4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN SOBRE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	24
2.4.1 Catastro SNGM.....	24
2.4.2 Levantamiento Catastral	25
2.4.3 Estabilidad Física.....	26
CAPÍTULO 3 : FICHAS INFORMATIVAS DE DEPÓSITOS ABANDONADOS.....	28
3.1 CLASIFICACIÓN SEGÚN IMPACTO DE FALLA.....	28
3.2 SELECCIÓN DE INFORMACIÓN PARA ELABORACIÓN DE FICHAS.....	35
3.2.1 Catastro SNGM 2019	35
3.2.2 Levantamiento Catastral 1989 – 1990.....	35
3.3 OBSERVACIONES ADICIONALES	36
3.3.1 Altura máxima	37
3.3.2 Distancia a zona de interés.....	37
3.3.3 Depósitos adyacentes.....	38
3.3.4 Falla parcial/total.....	38
3.3.5 Última laguna	39
3.3.6 Morfología.....	40
3.3.7 Material.....	40

3.3.8	Estado de Faena Minera.....	41
3.3.9	Presencia de vegetación.....	41
3.3.10	Presencia de grietas.....	42
3.3.11	Área y Volumen.....	42
3.4	FICHA EJEMPLO.....	42
3.5	ANÁLISIS DE INFORMACIÓN DE LAS FICHAS	44
CAPÍTULO 4 : METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD FÍSICA.....		50
4.1	METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD FÍSICA.....	50
4.2	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA	53
4.2.1	Selección de depósitos.....	53
4.2.2	Obtención de parámetros críticos.....	54
4.2.3	Levantamiento topográfico.....	66
4.2.4	Análisis de estabilidad de taludes	71
CAPÍTULO 5 : DISCUSIÓN.....		77
CAPÍTULO 6 : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		81
6.1	CONCLUSIONES.....	81
6.2	RECOMENDACIONES.....	83
BIBLIOGRAFÍA.....		84
ANEXOS.....		86
ANEXO A.	GLOSARIO LEVANTAMIENTO CATASTRAL.....	86
ANEXO B.	DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN DE LOS TRANQUES DE RELAVES DE LA V REGIÓN: FACTORES DE CAMPO	88
ANEXO C.	FICHAS INFORMATIVAS DE DEPÓSITOS DE RELAVES ABANDONADOS EN CHILE.....	90
ANEXO D.	METODOLOGÍA APLICADA EN TERRENO PARA DETERMINACIÓN DE PESO UNITARIO MEDIANTE CONO DE ARENA.....	186
ANEXO E.	CARACTERIZACIÓN DINÁMICA – PERFILES DE V_s	188
ANEXO F.	INFORMACIÓN DE GPS.....	192
ANEXO G.	GENERACIÓN DEL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO.....	195
ANEXO H.	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	207

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Datos administrativos generales del depósito Los Molles 1, modificado de Levantamiento Catastral 1989-1990.....	5
Tabla 2-2: Características de los relaves embalsados del depósito Los Molles 1, modificado de Levantamiento Catastral 1989-1990.....	6
Tabla 2-3: Características del muro del depósito Los Molles 1, modificado de Levantamiento Catastral 1989-1990.....	7
Tabla 2-4: Características de la cubeta del depósito Los Molles 1, modificado de Levantamiento Catastral 1989-1990.....	7
Tabla 2-5: Condición de estabilidad estática, modificado de Levantamiento Catastral 1989-1990.	8
Tabla 2-6: Condición de estabilidad sísmica, modificado de Levantamiento Catastral 1989-1990.	8
Tabla 2-7: Clasificación según estado de la instalación (SNGM, 2019).	9
Tabla 2-8: Clasificación de depósitos abandonados según ubicación (SNGM, 2019).	10
Tabla 2-9: Clasificación de depósitos abandonados según método de construcción (SNGM, 2019)	10
Tabla 2-10: Condiciones evaluadas en el Diagnóstico de la situación de tranques de relave de la V Región (Carvajal & Pacheco, 2004).	16
Tabla 2-11: Grupos de factores asociados a mecanismos de fallas en un depósito de relave. Guía Metodológica (2018).	19
Tabla 2-12: Grupos de factores a considerar por cada mecanismo de falla.	21
Tabla 2-13: Categorías de análisis para la evaluación de estabilidad física en depósitos de residuos masivos mineros.	22
Tabla 2-14: Selección de método para evaluar la estabilidad física en depósitos de relave en las etapas de evaluación de cierre y post cierre.....	22
Tabla 2-15: Características relevantes del depósito obtenidas del Levantamiento Catastral 1989-1990.	26
Tabla 3-1: Resultados Clasificación según impacto de falla.	34
Tabla 3-2: Atributos SNGM utilizados para fichas.	35
Tabla 3-3: Atributos Levantamiento Catastral utilizados para fichas.	36
Tabla 3-4: Observaciones reportadas en las fichas y sus objetivos.	37
Tabla 3-5: Observación de morfologías. Modificado de Monsalve (2020).	40
Tabla 3-6: Observación de material.....	40
Tabla 3-7: Análisis de morfologías.....	44
Tabla 3-8: Listado de los 50 depósitos abandonados prioritarios en base a los 86 analizados.	48

Tabla 4-1: Parámetros críticos asociados a depósitos abandonados y sus métodos de medición.	51
Tabla 4-2: Depósitos visitados en la Región de Coquimbo.	53
Tabla 4-3: Otros 11 depósitos visitados en la Región de Coquimbo de los cuales se obtienen observaciones generales.	53
Tabla 4-4: Resultados de peso unitario con cono de arena para 6 depósitos visitados.	55
Tabla 4-5: Resultados resistencia al corte – veleta para los 7 depósitos visitados.	56
Tabla 4-6: Parámetros de selección de ventanas.	58
Tabla 4-7: Rangos de parámetros para la inversión de perfiles de Vs en Geopsy.	58
Tabla 4-8: Resultado de perfiles de velocidad para los 7 depósitos visitados.	59
Tabla 4-9: Resultados de humedad para los 7 depósitos visitados.	60
Tabla 4-10: Comparación de alturas y pesos unitarios de confección y post consolidación.	63
Tabla 4-11: Resultados cohesión y ángulo de fricción – corte simple para Depósito A y B.	66
Tabla 4-12: Equipos utilizados para levantamiento topográfico.	67
Tabla 4-13: Descripción general de las etapas para la generación del levantamiento topográfico.	69
Tabla 4-14: Resultados área y volumen calculados en forma automática por 3DF Zephyr Aerial para los 7 depósitos visitados.	71
Tabla 4-15: Resultados secciones críticas para Depósito A y B.	71
Tabla 4-16: Casos de análisis de estabilidad de taludes.	72
Tabla 4-17: Parámetros probabilísticos utilizados para el análisis de los Depósitos A y B.	72
Tabla 4-18: Resultados del análisis de estabilidad del Depósito A.	74
Tabla 4-19: Resultados del análisis de estabilidad del Depósito B.	75

Índice de Figuras

Figura 2-1: Esquema adjunto de la planta Los Molles, Levantamiento Catastral 1989-1990.....	5
Figura 2-2: Fotografía del depósito Los Molles-1 obtenida del Levantamiento Catastral 1989-1990.	8
Figura 2-3: Histograma de volumen autorizado para depósitos abandonados (SNGM, 2019).	10
Figura 2-4: Vista en planta de depósitos abandonados en Chile comparados con el depósito inactivo Las Palmas (antes de fallar) y El estadio Nacional.	11
Figura 2-5: Metodología de recopilación, análisis y procesamiento los datos del Diagnóstico de la situación de tranques de relave de la V Región. Modificada de Carvajal y Pacheco (2004).	15
Figura 2-6: Resultados para condición de estabilidad física (Carvajal y Pacheco 2004).	17
Figura 2-7: Esquema con metodología general propuesta para la selección de métodos que permiten analizar la estabilidad física de depósitos de residuos masivos mineros. Modificado de Guía Metodológica (2018).	20
Figura 2-8: Casos de análisis sobre el Catastro del SNGM 2019.....	25
Figura 3-1: Esquema de clasificación de depósitos abandonados según impacto de falla.....	29
Figura 3-2: Depósito clasificado como Población. ID 1022: Depósito Desconocido, Región de Coquimbo.	31
Figura 3-3: Depósito clasificado como Agricultura/Cursos de Agua. ID 773: Depósito California 2A, Región de Coquimbo.	31
Figura 3-4: Depósito clasificado como Carretera. ID 1.059: Depósito Chingoles 1, Región de Coquimbo.	32
Figura 3-5: Depósito clasificado como Faena Minera. ID 277: Depósito Tranque 1-2, Región de Coquimbo.	32
Figura 3-6: Depósito clasificado como Impacto Descartable. ID 1.029: Depósito Embalse de Relave, Región de Antofagasta.....	33
Figura 3-7: Depósito clasificado como Falla Total. ID 88: Depósito El Algarrobo, Región de Coquimbo.	33
Figura 3-8: Depósito clasificado como Ruinas. ID 600: Depósito ENCON, Región de Valparaíso.	34
Figura 3-9: Depósito clasificado como Limitada Información. ID 86: Depósito Huana 1, Región de Coquimbo.	34
Figura 3-10: Observación de altura máxima. A la izquierda el depósito Victoria 2 (ID 83), a la derecha el depósito John Kennedy 1 (ID 255).....	37
Figura 3-11: Observación de distancia a zona de interés. A la izquierda el depósito Victoria 2 (ID 83), a la derecha Tranque de Relave 1-2 (ID 726).	38
Figura 3-12: Observación de depósitos adyacentes. Arriba el depósito Victoria 2 (ID 83), abajo el depósito Victoria 1 (ID 643).....	38

Figura 3-13: Observación de falla parcial/total. Depósito Hernández 2 (ID 1.047).....	39
Figura 3-14: Observación de última laguna. Depósito San Emilio (ID 333).	39
Figura 3-15: Observación de estado de faena minera, presencia de grietas y vegetación. Depósito Tamaya 2 (ID 87).....	41
Figura 3-16: Ejemplo de ficha informativa para depósitos abandonados.....	43
Figura 3-17: Análisis alturas máximas para 70 depósitos analizados.	45
Figura 3-18: Análisis distancia a zona de interés para 70 depósitos analizados.	45
Figura 3-19: Volúmenes estimados en este trabajo y volúmenes autorizados reportados por Sernageomin (2019) para 28 depósitos seleccionados.	46
Figura 3-20: Volúmenes estimados y alturas máximas de 28 depósitos seleccionados.	46
Figura 3-21: Distancias a zona de interés y alturas máximas de los casos analizados (70) y los clasificados como Impacto Descartable (27), incluyendo pendientes de terreno y tipo de zona de interés. Los depósitos nombrados corresponden a los visitados en terreno, algunos de los cuales se encuentran en la lista de prioritarios (Tabla 3-8).	47
Figura 4-1: Diagrama de metodología para evaluación de estabilidad física de depósitos abandonados.	52
Figura 4-2: Delirio 1 y Delirio 3 según el Catastro SNGM 2019.....	54
Figura 4-3: Identificación de Depósito A y Depósito B utilizados para el análisis completo. Los contornos de cada depósito de destacan en rojo.	54
Figura 4-4: Instrumentos utilizados para ensayos de terreno.	55
Figura 4-5: Procedimiento para el uso de veleta.	56
Figura 4-6: Ubicación e instalación de Trominos, Depósito A.	58
Figura 4-7: Parte del proceso de medición del contenido de humedad.....	60
Figura 4-8: Procedimiento de tamizado, Depósito A.	61
Figura 4-9: Preparación y montaje de probeta ensayo de corte simple, Depósito B.	62
Figura 4-10: Proceso de consolidación para las muestras ensayadas del Depósito A.....	63
Figura 4-11: Proceso de consolidación para la muestra ensayada del Depósito B.....	63
Figura 4-12: Gráfico esfuerzo de corte v/s deformación angular para el Depósito A.....	64
Figura 4-13: Deformación vertical v/s deformación angular para el Depósito A.	64
Figura 4-14: Esfuerzo de corte v/s Esfuerzo vertical, Depósito A.	64
Figura 4-15: Gráfico esfuerzo de corte v/s deformación angular para el Depósito B.	65
Figura 4-16: Deformación vertical v/s deformación angular para el Depósito B.....	65
Figura 4-17: Esfuerzo de corte v/s Esfuerzo vertical, Depósito B.	65
Figura 4-18: Disposición de anillos y estado de muestras al finalizar el ensayo para Depósito A y B.....	66

Figura 4-19: Inicio de operación del drone.....	68
Figura 4-20: Ejemplo de secuencia resumida de fotografías con drone, Depósito A.....	68
Figura 4-21 : Datos obtenidos por GPS, Depósito A.....	69
Figura 4-22: Modelos 3D generados para los 7 depósitos visitados.	70
Figura 4-23: Visualización de secciones críticas para Depósito A y B.....	71
Figura 4-24: Función de densidad de probabilidad del FS del Depósito A para el caso 3.	73
Figura 4-25 Función de distribución de probabilidad del FS del Depósito A para el caso 3.	74
Figura 4-26: Geometría, superficie y FS asociado a la falla crítica del Depósito A para el caso 6. Resultados obtenidos mediante Slope/W.....	76
Figura 4-27: Geometría, superficie y FS asociado a la falla crítica del Depósito B para el caso 6. Resultados obtenidos mediante Slope/W.....	76

Capítulo 1

Introducción

Chile es un país que basa su economía en la minería y es uno de los mayores productores de cobre a nivel mundial. La extracción de minerales trae consigo material residual conocido como relave, para el cual se estima una producción de 530 millones de toneladas anuales según los datos entregados por el SERNAGEOMIN (2018). Inclusive según Fundación Chile (2016) “Se estima que la producción de relaves podría casi duplicarse al año 2035: si hoy cada 36 horas se depositan en Chile relaves equivalentes a un cerro Santa Lucía, dentro de 20 años lo haremos sólo en 21 horas”.

Los relaves deben ser almacenados en depósitos de relaves que cuenten con las medidas establecidas por el Decreto Supremo N°248 (Ministerio de Minería, 2007). Según el catastro realizado por el SERNAGEOMIN (2019) en Chile se registran 742 depósitos de relaves, de los cuales 104 están activos, 463 inactivos, 2 en construcción y 173 abandonados. Si bien no existe una definición formal de depósito de relave abandonado, se consideran como tal aquellos depósitos que actualmente no cuentan con propietario o responsable identificado, y, por ende, tienen un escaso control y monitoreo.

Los depósitos de relaves en Chile no están ajenos a fallas, en el año 1965 producto del terremoto de La Ligua, se produce la falla del depósito El Cobre Viejo, en ese entonces activo, cuyo relave derramado sepultó una población completa en la que se estima que murieron más de 200 personas (Dobry, 1967). Un caso más reciente corresponde a la falla del depósito de relaves Las Palmas, que se encontraba en ese entonces inactivo, pero con nulo monitoreo. El terremoto del Maule de 2010 produjo su licuación junto a una falla de flujo que causó la muerte de 4 personas (Villavicencio et al., 2014).

Todas las fallas en Chile se han generado tras un movimiento sísmico, y dado el contexto sísmo-tectónico de Chile, resulta vital tener conocimiento de la estabilidad física estos depósitos.

Actualmente se han desarrollado distintas metodologías de evaluación de estabilidad física de depósitos de relaves entre las cuales se encuentra el *Diagnóstico de la situación actual de los tranques de relaves de la V región* (C. Carvajal & Pacheco, 2004) y la *Guía metodológica para la evaluación de la estabilidad física de instalaciones mineras remanentes* (SERNAGEOMIN, 2018b). Sin embargo, ninguna de estas metodologías permite la evaluación cuantitativa de la estabilidad física de depósitos abandonados. Por un lado, la metodología propuesta por el SNGM (2018) considera características, mediciones y

parámetros que no pueden ser evaluados para depósitos abandonados, o bien su registro involucra recursos económicos limitados. Por otro lado, la metodología propuesta por Carvajal & Pacheco (2004) si bien utiliza parámetros y características en general disponibles para depósitos abandonados, evalúa la condición del depósito en base a un análisis cuantitativo y cualitativo de cada parámetro por separado, sin realizar un análisis de estabilidad cuyo factor de seguridad permita evaluar su condición. Ambas metodologías mencionadas analizan la estabilidad física para distintos mecanismos de falla, y en el caso particular del trabajo de Carvajal & Pacheco (2004) se calcula además una condición global. Entre los mecanismos de falla evaluados se encuentra inestabilidad de talud, erosión interna y rebalse, los cuales aplican sin duda a depósitos activos e inactivos; sin embargo, la aplicabilidad de estos mecanismos a depósitos abandonados se debe discutir dada las características de estos depósitos, principalmente de su contenido de humedad en la zona de estudio.

En base a la información recopilada nace la idea de desarrollar una metodología que permita establecer la estabilidad física de los depósitos abandonados, revisar a qué mecanismos de falla se ven expuestos y cuáles son los parámetros críticos asociados. Con ello también se busca actualizar y completar la base de datos de estos depósitos, con el fin de caracterizarlos y clasificarlos.

1.1 Objetivo General

Este trabajo tiene como objetivo principal clasificar los depósitos de relaves abandonados ubicados en la zona centro norte de Chile de acuerdo a su tamaño y a las potenciales zonas afectadas producto de una falla, además de proponer una metodología que permita evaluar su estabilidad física.

1.2 Objetivos Específicos

Para llevar a cabo el objetivo general es necesario definir los siguientes objetivos específicos:

- Establecer el concepto de estabilidad física en depósitos de relaves abandonados, los mecanismos de falla y los parámetros críticos asociados.
- Sintetizar y discutir los resultados de investigaciones recientes sobre depósitos abandonados.
- Clasificar los depósitos abandonados según impacto de una posible falla catastrófica.
- Generar fichas informativas sobre los depósitos clasificados.
- Analizar la información recopilada en las fichas.
- Establecer un listado de depósitos abandonados prioritarios que requieren una evaluación más detallada de su estabilidad física.
- Proponer un método para evaluar la estabilidad física de depósitos abandonados.
- Aplicar la metodología a un grupo de depósitos de estudio.

1.3 Estructura de este Trabajo

Este trabajo de título se estructura en 6 capítulos que incluyen la Introducción. El Capítulo 2 es una revisión bibliográfica donde se definen las bases de datos que se utilizarán, además de revisar estudios de estabilidad física que definen los mecanismos de falla y los parámetros críticos asociados a los depósitos abandonados. El Capítulo 3 presenta la metodología de elaboración de fichas informativas de depósitos abandonados, las fuentes utilizadas, la clasificación en base a la zona de interés afectada y un ejemplo de ficha. El Capítulo 4 presenta la metodología de evaluación de estabilidad física propuesta, indicando los detalles y resultados de la campaña de terreno, los ensayos de laboratorio, el levantamiento topográfico y el análisis de estabilidad. En el Capítulo 5 se discuten los resultados del análisis de las fichas informativas y el análisis de estabilidad. Finalmente, el Capítulo 6 presenta las conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos.

Al final se incorpora una sección de Anexos donde se incluyen imágenes y tablas que respaldan y complementan la información expuesta en este trabajo.

Capítulo 2

Revisión Bibliográfica

2.1 Levantamiento Catastral de los Tranques de Relaves en Chile 1989 – 1990

Entre los años 1989 y 1990 el Servicio Nacional de Geología y Minería (SNGM) junto a la empresa Ingeniería y Geotecnia LTDA llevaron a cabo un catastro de los depósitos de relaves en Chile a la fecha. La información se encuentra en las oficinas de la unidad de minería del SNGM bajo el nombre Levantamiento Catastral de los Tranques de Relaves en Chile (desde ahora denominado Levantamiento Catastral). El documento se divide en 3 etapas:

- Etapa A: Regiones V y XIII.
- Etapa B: Regiones IV, VI y VII.
- Etapa C: Regiones II y III.

Cada etapa da a conocer una evaluación de la sismicidad y riesgo sísmico de las regiones en estudio, un análisis de estabilidad estática y sísmica de los depósitos catastrados y una evaluación de la situación de estos mismos en esos años. Todo ello en base a la información recopilada, la que se basa en los datos del proyecto previamente investigados y observación en terreno.

La información contenida para cada depósito catastrado se detalla a continuación. Las siglas utilizadas en este apartado se encuentran en el Anexo A.

- Información general

Se indica el dueño de la empresa, en caso de conocerse, y la ubicación de la planta.

- Número y disposición de los depósitos de relaves

Se informa cuáles son los tipos de depósitos presentes en la planta (botaderos, depósitos de relaves, embalses de aguas de solución) y la cantidad de cada uno de éstos.

Además, se adjunta un esquema que permite visualizar la forma de los depósitos y las zonas de contacto entre ellos, en caso de existir (un ejemplo en la Figura 2-1).

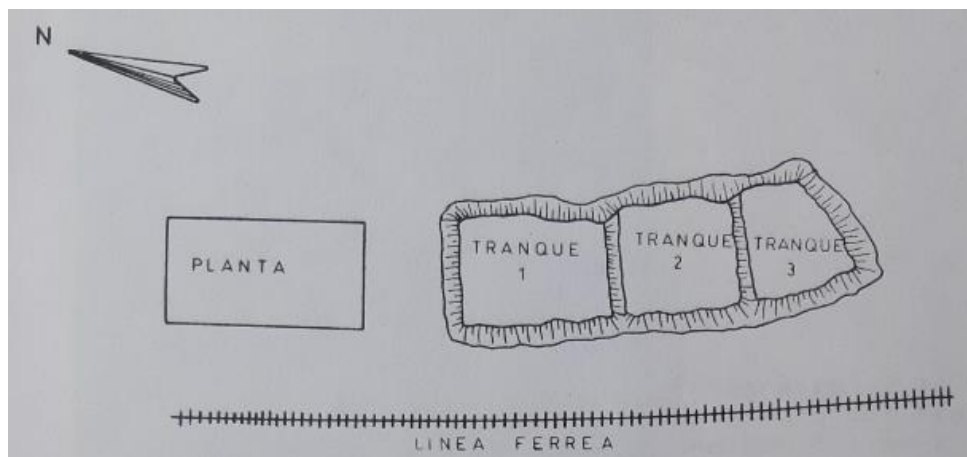


Figura 2-1: Esquema adjunto de la planta Los Molles, Levantamiento Catastral 1989-1990.

- Datos administrativos generales del depósito de relaves

Estos datos corresponden a todos aquellos que los enlazan a los documentos del proyecto, tales como dueño, representante, número de resolución y su fecha. Ejemplo de esto se observa en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Datos administrativos generales del depósito Los Molles 1, modificado de Levantamiento Catastral 1989-1990.

Información	Depósito Los Molles-1
Datos relativos al proyecto y construcción	
Firma proyectista	Soc. Minera Gama
Consultor (es)	M. Madrid
Firma constructora	Soc. Minera Gama
Fecha de inicio de la construcción	1985
Fecha de término de la construcción	TR-AO
Estado actual del tranque	TR-VO (TR-ALT)
Datos relativos al inicio de operaciones	
Resolución	552
Fecha	31.05.1985
Aprobada por	M. Cañas
Afecto al Artículo 44 del D.S N°86	SI
Fecha de inicio de operación	1985
Ampliaciones autorizadas	Ninguna
Modificaciones autorizadas	Ninguna
Responsable en faena	M. García

- Características de los relaves embalsados

En esta sección se da a conocer la composición, propiedades índices y parámetros geotécnicos de los relaves embalsados. La Tabla 2-2 indica en detalle la información contemplada y un ejemplo de ello.

Tabla 2-2: Características de los relaves embalsados del depósito Los Molles 1, modificado de Levantamiento Catastral 1989-1990.

Información	Depósito Los Molles-1
Composición	
Mineral principal	Cu
Mineral secundario	Au – Ag
Composición	Variable
Propiedades índices (VA-EST)	
Peso específico, G	2,8 – 3,3
Razón arenas:lamas	1:1,5
Curva(s) granulométrica(s)	NOINC
Porcentaje de arenas gruesas	0
Porcentaje de arenas medias	0-10
Porcentaje de arenas finas	20-45
Porcentaje de finos	55-80
Tamaños característicos	NOINF
Razón de vacíos, e₀	0,8-1,2
Propiedades de ingeniería (VA-EST)	
Permeabilidad, k [m/s]	10 ⁻⁸
Curvas de consolidación	NOINC
Índice de compresión, C_c	0,15-0,35
Coefficiente de consolidación, C_v [cm²/s]	10 ⁻³

- Características del depósito de relaves
 - Geología de la zona donde se ubican los depósitos de relaves

En este apartado se da a conocer información de la zona de emplazamiento de los depósitos, pendiente del terreno y suelos presentes.

- Características del muro

En primer lugar, se entrega información acerca del tipo de muro y el método constructivo del depósito analizado, además de indicar la presencia o no de un muro inicial (“starter dam”).

Cabe destacar que en algunos casos esta sección incorpora además comentarios acerca de deformaciones tales como fallas locales producidas por lluvias, o bien licuación generada tras un terremoto.

Además, se entregan datos acerca de la cantidad y forma de los muros que posee el depósito (denominados pretilas en la referencia) y se informa sobre la geometría de estos, donde destacan: largo y ancho de coronamiento, revancha y ángulo del talud. El detalle de los datos se observa en el ejemplo de la Tabla 2-3.

- Características de la cubeta

En esta sección se indica el tipo de tratamiento que se realiza al material y el método de depositación de los relaves, además de la vida útil de los depósitos. Por otro lado, se adjunta información referente al volumen de los depósitos, capacidad máxima, volumen depositado y capacidad disponible. El detalle de la información se observa en el ejemplo de la Tabla 2-4.

Tabla 2-3: Características del muro del depósito Los Molles 1, modificado de Levantamiento Catastral 1989-1990.

Información	Depósito Los Molles-1
Tipo de muro	MU-REC/CLM/INC
Método de construcción	MU-CLM
Número de pretilas	1
Forma de los pretilas	“O”
Fotografías	Figura 2-2
Sección transversal	NOINC
Geometría del muro	
Altura máxima [m]	2,5 (VA-E-O)
Revancha media [m]	0,3 (VA-E-O)
Ancho medio de coronamiento [m]	0,3 (VA-E-O)
Largo del coronamiento [m]	160 A-EST)
Ángulo del talud de aguas abajo (valor medio) [°]	45 (VA-E-O)
Prisma soportante	
Perímetro basal [m]	340 (VA-EST)
Área basal [m²]	800 (VA-EST)
Sistema de compactación	Ninguno
Estado de saturación	TA-SS (VA-E-O)
Grado de compactación (valor medio)	DR-BA/ME (VA-E-O)
Densidad relativa, DR (valor medio)	<50% (VA-E-O)

Tabla 2-4: Características de la cubeta del depósito Los Molles 1, modificado de Levantamiento Catastral 1989-1990.

Información	Depósito Los Molles-1
Morfología	En Esquema (Figura 2-1)
Vida útil	
Vida útil total [años]	4,7
Vida útil restante [años]	1,5
Capacidad máxima [m³]	9.800 (VA-EST)
Volumen depositado [m³]	6.700 (VA-EST)
Capacidad disponible [m³]	3.100
Superficie total [ha]	0,34 (VA-E-O)
Superficie de la poza de sedimentación [ha]	0 (TR-VO)
Flujo de relaves	
Flujo de relaves mínimo [ton/día]	22
Flujo de relaves máximo [ton/día]	30

- Condición de estabilidad estática

Según el factor de seguridad (FS) estático definido, ya sea por análisis o estimación (caso en el que no se puede tener acceso a la información del proyecto o bien no se pudieron realizar observaciones en terreno), se definen las condiciones indicadas en la Tabla 2-5.

Tabla 2-5: Condición de estabilidad estática, modificado de Levantamiento Catastral 1989-1990.

FS	Condición de estabilidad estática	Probabilidad de falla estática
>2,5	Excelente	Remota
[2,0 – 2,5]	Buena	Muy baja
[1,5 – 2,0]	Aceptable	Baja
[1,2 – 1,5]	Deficiente	Mediana
<1,2	Inaceptable	Alta

A continuación, se da a conocer un ejemplo de la descripción realizada para definir la condición de estabilidad estática de un depósito sin información:

“No hay antecedentes disponibles sobre análisis de la estabilidad estática de los muros de los tranques de relaves de la Planta Los Molles; sin embargo, dada su muy baja altura, éstos pueden suponerse bastante estables, probablemente con un factor de seguridad mayor que 1,5 y una muy baja probabilidad de falla.” (SERNAGEOMIN; INYGE, 1989)

- Condición de estabilidad sísmica

El caso sísmico se determina con las mismas consideraciones que el caso estático, pero sus rangos se definen según lo indicado en la Tabla 2-6. Además, se indica el coeficiente sísmico horizontal (K_h) utilizado en los análisis realizados, típicamente $K_h = 0,15$.

Tabla 2-6: Condición de estabilidad sísmica, modificado de Levantamiento Catastral 1989-1990.

FS	Condición de estabilidad sísmica	Probabilidad de falla sísmica
>2,0	Excelente	Remota
[1,6 – 2,0]	Buena	Muy baja
[1,3 – 1,6]	Aceptable	Baja
[1,1 – 1,3]	Deficiente	Mediana
<1,1	Inaceptable	Alta

- Filtraciones no controladas

En base a la información recopilada y las observaciones realizadas se establece si el depósito sufre filtraciones o no.

- Fotografía

En general, para cada planta se adjuntan fotografías tomadas en terreno durante la realización del levantamiento. Ejemplo de esto es la fotografía de la Figura 2-2.



Figura 2-2: Fotografía del depósito Los Molles-1 obtenida del Levantamiento Catastral 1989-1990.

2.2 Catastro de Depósitos de Relaves del Sernageomin 2019

El último catastro de los depósitos de relaves en Chile realizado por el SERNAGEOMIN (SNGM) corresponde al del año 2019, el cual se puede descargar desde la plataforma online del SERNAGEOMIN en formato xls y kmz, para utilizar en Excel y Google Earth, respectivamente.

Este catastro registra la siguiente información:

- ID: Número identificador del depósito.
- Nombre de empresa, faena y depósito.
- Ubicación del depósito: Región, provincia y comuna. Se adjuntan además las coordenadas UTM norte y este.
- Tipo de instalación: Embalse o tranque de relave. Para el último caso se tiene además las categorías de en pasta, filtrado y espesado.
- Recurso: Material procesado tales como oro, cobre y plata.
- Estado del depósito: Activo, inactivo, en construcción o abandonado.
- Método de construcción: Aguas arriba, aguas abajo, eje central o embalse.
- Volumen autorizado y actual.
- Tonelaje autorizado y actual.
- Fechas de resolución.

Acorde a esta información, en Chile existen 742 depósitos de relaves catastrados, de los cuales 173 corresponden a depósitos abandonados (ver Tabla 2-7).

Tabla 2-7: Clasificación según estado de la instalación (SNGM, 2019).

Estado de la instalación	Cantidad	Porcentaje
Activo	104	14,0%
Inactivo	463	62,4%
En Construcción	2	0,3%
Abandonado	173	23,3%

Si se pone el foco en los depósitos abandonados, se puede realizar un análisis según las categorías definidas por SNGM como se explica a continuación.

2.2.1 Clasificación de depósitos abandonados según ubicación

La disposición de los depósitos de relaves abandonados se centra en región de Coquimbo, acumulando el 61% de estos, seguido con un 13% por la región de Atacama. El detalle se observa en la Tabla 2-8.

2.2.2 Clasificación de depósitos abandonados según método de construcción

De la totalidad de depósitos abandonados, el 61% no presenta registro de su método de construcción. Un 28% corresponde a una construcción mediante el método de aguas arriba, siendo el más utilizado dentro de lo registrado (ver Tabla 2-9).

Tabla 2-8: Clasificación de depósitos abandonados según ubicación (SNGM, 2019).

Región	Cantidad	Porcentaje
Tarapacá	6	3,5%
Antofagasta	16	9,2%
Atacama	23	13,3%
Coquimbo	106	61,3%
Metropolitana	6	3,5%
Valparaíso	11	6,4%
Gral. Libertador Bernardo O'Higgins	1	0,6%
Aysén	4	2,3%

Tabla 2-9: Clasificación de depósitos abandonados según método de construcción (SNGM, 2019)

Método de construcción	Cantidad	Porcentaje
Aguas Abajo	2	1,2%
Aguas Arriba	49	28,3%
Eje Central	10	5,8%
Embalse	6	3,5%
Sin Información	106	61,3%

2.2.3 Clasificación de depósitos abandonados según volumen autorizado

Si bien el catastro incorpora volumen autorizado y actual, para el caso de depósitos abandonados no se cuenta con información actual, por lo que el análisis se centra solo en el volumen autorizado. Este se observa en el histograma de la Figura 2-3.

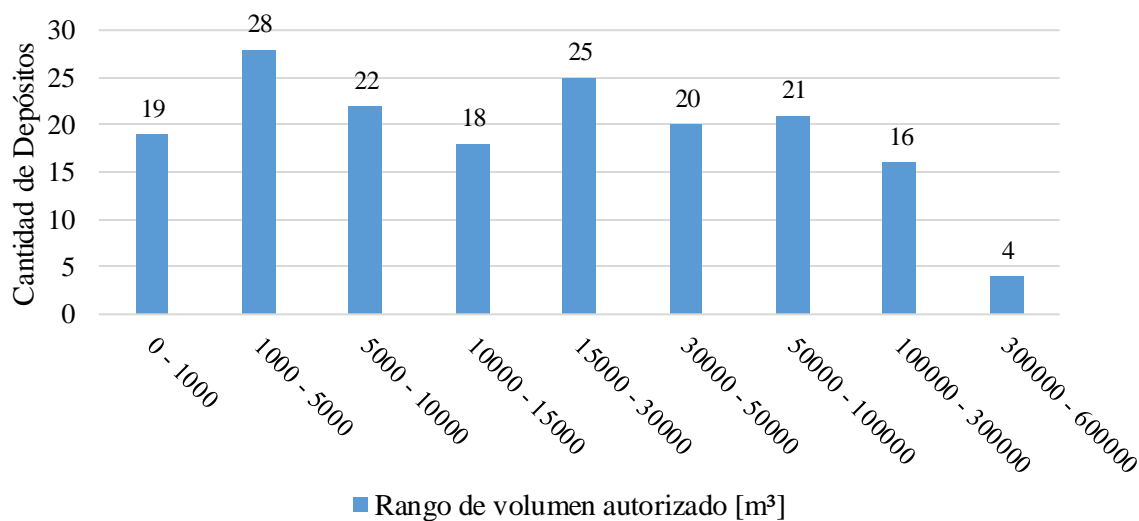


Figura 2-3: Histograma de volumen autorizado para depósitos abandonados (SNGM, 2019).

En la Figura 2-4, se pueden observar ejemplos de depósitos abandonados representativos y una comparación de estos con el Estadio Nacional y el depósito inactivo Las Palmas, previo a su falla registrada en el año 2010.

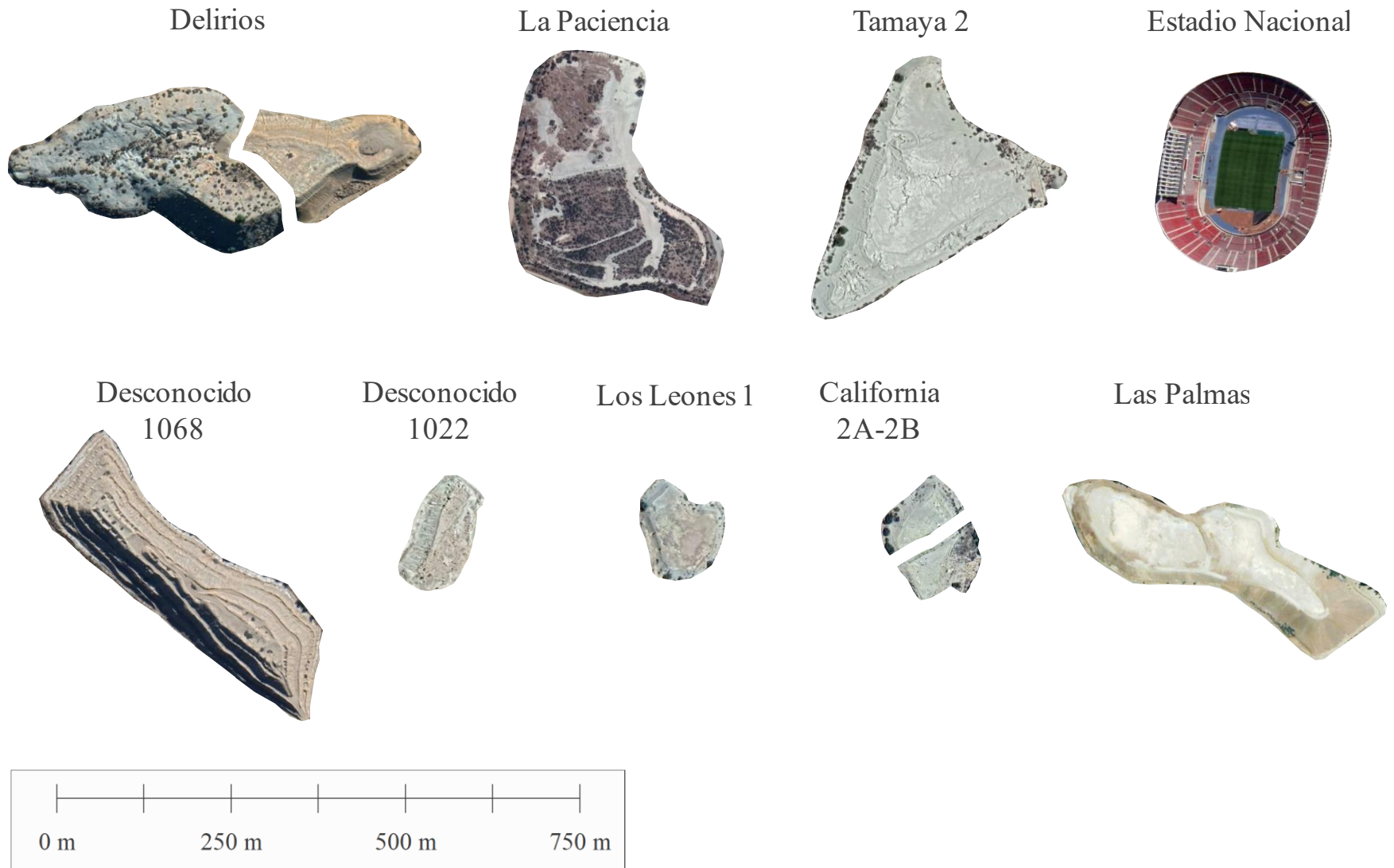


Figura 2-4: Vista en planta de depósitos abandonados en Chile comparados con el depósito inactivo Las Palmas (antes de fallar) y El estadio Nacional.

2.3 Estabilidad Física

Los estudios de evaluación de estabilidad física revisados y utilizados como guía en el presente trabajo se presentan a continuación.

2.3.1 Principales mecanismos de falla de depósitos de relaves observados en Chile

En el período comprendido entre el año 1901 a 2013 se han registrado 38 casos de inestabilidad física en depósitos de relaves en Chile, los que se han gatillado principalmente por la ocurrencia de un evento sísmico, y en casos aislados por rebalse y filtraciones (Villavicencio et al., 2014). El análisis de estos casos lleva a destacar las siguientes conclusiones:

- Aproximadamente el 50% de las fallas se generaron por licuación y falla de flujo, el 32% por inestabilidad de talud y deformaciones sísmicas y el 18% se debió a un rebalse con falla de flujo.
- Los casos de inestabilidad física ocurrieron principalmente en depósitos construidos con el método de aguas arriba, con alturas de muro inferior a los 40 [m] o capacidades menores a los 5×10^7 [m³]. El 53% de estos depósitos se encontraba en operación y el 47% estaba cerrado o en abandono.
- El 68% de las fallas estudiadas se asocian a los terremotos de 1965, 1981, 1985 y 2010. Los depósitos que fallaron por la acción de dichos terremotos, presentaban como característica común bajos niveles de compactación de sus muros, un método de construcción aguas arriba, alto grado de saturación y elevados ángulos de inclinación de talud de muros.
- Los casos reportados de rebalse están asociados a lluvias intensas, pérdida del ancho de coronamiento y erosión progresiva del dique.

Las fallas más catastróficas registradas corresponden a los casos de los depósitos de relaves Barahona, El Cobre Viejo y Las Palmas. La falla producida en el depósito Barahona de la mina El Teniente, en ese entonces en operación, se generó tras el terremoto de Talca el 1 de octubre de 1928, vertiendo 4 [Mm³] de toneladas de relaves y causando la muerte de 54 personas (Aguero, 1929). El depósito El Cobre Viejo, falló después de ocurrido el terremoto de La Ligua el 28 de marzo de 1965 (Dobry, 1965), liberando 1,9 [Mm³] de relaves que recorrieron una distancia de 12 [km] (Villavicencio et al., 2014), provocando la muerte de más de 200 personas. Se registra que este depósito presentaba una altura de 35 [m] antes de su falla (Villavicencio et al., 2014). Por último, el caso más reciente corresponde a la falla ocurrida en el depósito Las Palmas, que previo a su falla registraba una altura máxima de 15 [m] y se encontraba en estado abandonado, según Villavicencio et al. (2014) y cerrado según indica SERNAGEOMIN (2018b) en la Guía Metodológica de Estabilidad Física detallada más adelante. Producto del terremoto del Maule del 27 de febrero de 2010 este depósito falló vertiendo 4.500 [m³] de relaves que alcanzaron distancias aproximadas de 500 [m], causando la muerte de 4 personas en una vivienda que se encontraba aguas abajo del depósito. Las tres fallas descritas se atribuyen a una licuación y una falla de flujo (Villavicencio et al., 2014).

En base a la información recientemente descrita y el trabajo realizado de Carvajal (2018) se destacan cuatro mecanismos de falla: licuación sísmica, inestabilidad de taludes, deformaciones sísmicas, rebalse y erosión interna. La descripción de estos, sus principales eventos gatilladores y los parámetros críticos asociados se presentan a continuación.

Licuación sísmica:

Este fenómeno se genera cuando un sismo produce un aumento en la presión intersticial del suelo rápidamente, sin posibilidad de disipación. Esto conlleva a una disminución de los esfuerzos efectivos, anulándose en el peor de los casos, generando una reducción de la resistencia al corte y junto con ello grandes deformaciones. La ocurrencia de este mecanismo depende del nivel de compacidad, el grado de saturación y el contenido de finos del material que conforma el muro.

Inestabilidad de taludes:

La inestabilidad de taludes se puede producir por lluvias o filtraciones que aumentan las presiones de poros en el suelo, cargas superiores a las consideradas en el diseño, excavaciones al pie del muro que reduzcan el prisma resistente, colapso del sistema de drenaje, sismos que generen licuación de materiales, entre otros, afectando la estabilidad estructural y operacional del depósito.

Los parámetros críticos asociados a este mecanismo corresponden a la geometría del muro, presiones de poros y nivel freático del depósito y el muro, aceleraciones sísmicas y desplazamientos del muro, y fenómenos de subsidencia.

Deformaciones sísmicas:

Corresponde a la disminución de la revancha y/o el coronamiento producto de grietas o deformaciones causadas por un sismo.

Este mecanismo se asocia a las presiones de poros de los materiales, la compacidad del muro y la tendencia contractiva de los materiales, las aceleraciones sísmicas y a la duración del sismo.

Rebalse:

Este mecanismo de falla se genera cuando el material contenido en la cubeta del depósito ya sea agua o relave, sobrepasa el coronamiento del muro. Esto puede producir a su vez la erosión progresiva del muro, llevando a la falla total de éste.

Dentro de los eventos que gatillan este mecanismo se encuentran fallas en los canales perimetrales de captación, lluvias y deslizamientos hacia el interior del depósito. Algunos de los parámetros críticos asociados corresponden a la geometría del muro (altura y revancha), distancia entre el muro y la laguna, caudales de ingreso y salida, y presencia de grietas en el coronamiento.

Erosión interna:

La erosión interna ocurre cuando se genera un canal de flujo preferencial al interior del muro de contención, lo que puede traer consigo una falla local o masiva del muro.

Este mecanismo de falla se gatilla por incompatibilidad de la gradación de distintos materiales en contacto, el aumento del gradiente hidráulico en el depósito o el suelo de fundación, asentamientos diferenciales, variación del nivel freático o problemas en el sistema de drenaje. Parámetros críticos asociados corresponden a la presión de poros en el muro y el terreno de fundación, evidencia de humedad o filtraciones en el talud aguas abajo, granulometría del muro, colmatación de drenes, entre otros.

2.3.2 Diagnóstico de la situación de tranques de relaves de la V Región

Este estudio, realizado por Carvajal y Pacheco de la Universidad Católica de Valparaíso (Carvajal & Pacheco, 2004), tiene como objetivo principal desarrollar una metodología que permita evaluar el estado de los depósitos de la región de Valparaíso, tanto de la pequeña como de la mediana minería, considerando depósitos abandonados, inactivos y activos, y con ello establecer una categorización, considerando aspectos ambientales y de estabilidad física.

Para llevar a cabo el estudio, se realiza un catastro de 41 depósitos de la región de Valparaíso, que busca establecer su ubicación exacta, definir sus principales características y además caracterizar su entorno. De forma paralela, se trabaja en una metodología que permite recopilar, analizar y procesar los datos, y con ello evaluar las condiciones ambientales, la estabilidad física y la situación global de estos depósitos. De esta forma, se pueden identificar los depósitos que presentan una evaluación deficiente y que por tanto se deben intervenir con urgencia.

La metodología desarrollada se sintetiza en el diagrama de la Figura 2-5. En ella se destacan dos grandes divisiones: primero, un trabajo de estudio, organización y planificación que inicia en la recopilación de antecedentes y finaliza en la marcha blanca; luego, las etapas siguientes corresponden a la metodología de evaluación llevada a cabo en los depósitos analizados. En la segunda etapa se realiza un estudio de las condiciones de estabilidad en los depósitos de relaves, y paralelamente se establecen las condiciones ambientales que se ven afectadas por la presencia o colapso de éstos. En una tercera etapa se identifica qué elementos tanto del depósito de relaves como de su entorno tienen influencia en su estabilidad y en su efecto en el medio ambiente. El estudio realizado en estas 3 etapas tiene como resultado una ficha de catastro que permite recolectar y unificar los datos necesarios para generar un análisis de condiciones ambientales y de estabilidad para la totalidad de depósitos analizados. De forma paralela se establece una matriz de evaluación en formato Excel, la cual permite recopilar, analizar y procesar los datos de forma automática.

Luego, por medio de visitas a terreno a algunos depósitos se inicia la etapa de marcha blanca, la cual tiene como objetivo evaluar y ajustar los atributos establecidos en la ficha y la matriz generada en gabinete. Una vez finalizada la marcha blanca, se genera la ficha y matriz final utilizadas para la evaluación final de los depósitos.

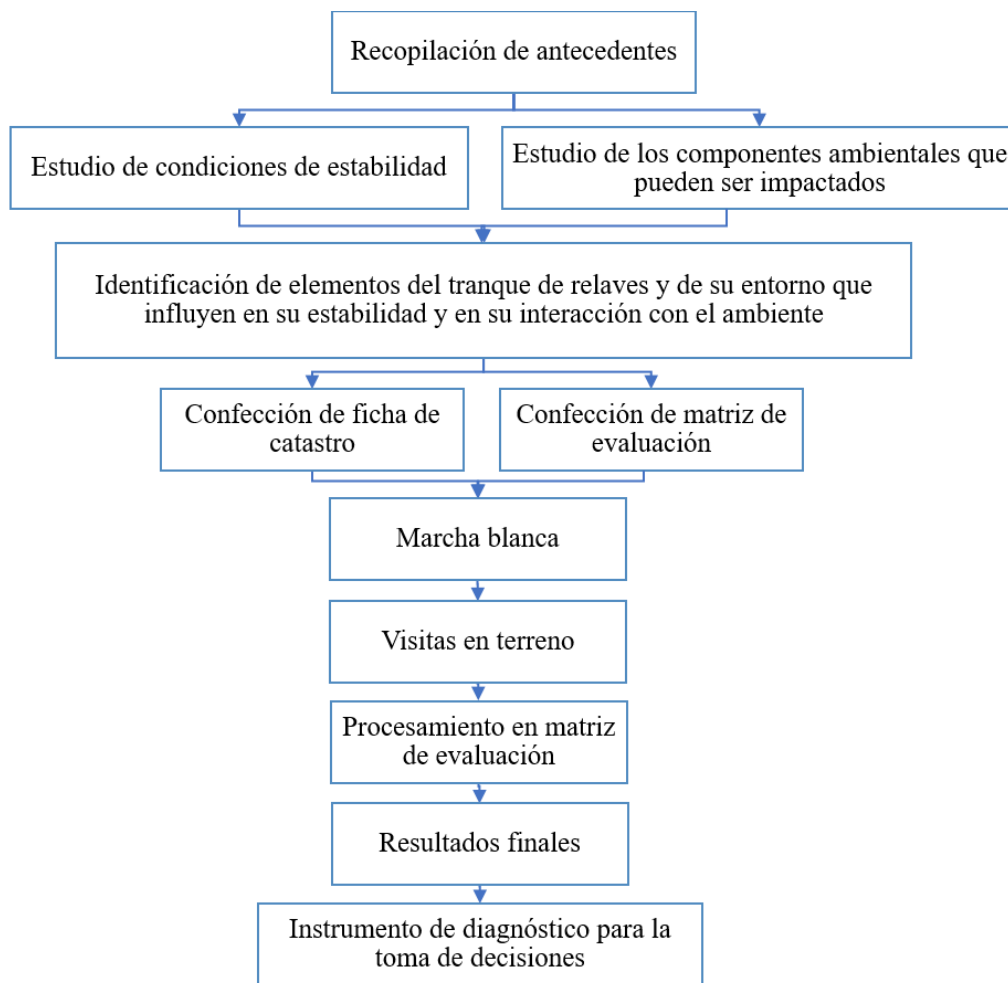


Figura 2-5: Metodología de recopilación, análisis y procesamiento los datos del Diagnóstico de la situación de tranques de relave de la V Región. Modificada de Carvajal y Pacheco (2004).

La ficha catastral organiza su información en 5 tópicos acorde a los factores que afectan su estabilidad y su interacción con el entorno. Estos corresponden a:

- Identificación y ubicación del tranque de relaves.
- Características del tranque de relaves.
- Parámetros geotécnicos y características del relave.
- Condiciones climáticas e hidrogeológicas.
- Características del entorno.
- Elementos de monitoreo, estabilización y rehabilitación.

Los factores de campo considerados son 67, y el listado detallado se incluye en el Anexo B.

El análisis de los datos se realiza a través de una matriz de dos entradas, en la cual las filas corresponden a los factores de campo y las columnas a las condiciones ambientales y de estabilidad del depósito. Las condiciones a evaluar se dividen en 2 categorías: Condiciones de estabilidad física y condiciones ambientales cuyas subdivisiones y descripciones se indican en la Tabla 2-10. Como se observa, en total se evalúan 9 condiciones.

Tabla 2-10: Condiciones evaluadas en el Diagnóstico de la situación de tranques de relave de la V Región (Carvajal & Pacheco, 2004).

Condiciones de Estabilidad Física	
Mecanismo	Definición
Estabilidad mecánica del talud	Se refiere a la estabilidad del talud en condiciones estáticas, el que depende de la geometría del muro y la resistencia al corte de sus materiales.
Erosión	Considera el efecto del agua en la erosión interna y externa de los depósitos de relaves, evaluando los sistemas de drenaje, precipitaciones y reboces. Por otro lado, se considera la erosión producida por el viento analizando la intensidad de éste y el estado de cementación en la superficie del depósito.
Fenómenos hidrológicos y rebalse	Por un lado, considera el efecto que tiene el aumento de los niveles freáticos en la resistencia al corte de los suelos que constituyen el muro de los depósitos de relaves. Y por otro lado, se evalúa la condición de rebalse en base a la geometría del muro, la distancia de la playa al muro, la cantidad de agua libre y el uso de filtros y drenes.
Condiciones Ambientales	
Elementos vulnerables	Definición
Agua	El material particulado proveniente de los depósitos de relaves puede generar alteraciones en la turbiedad, temperatura y grado de acidez de las aguas de las napas y cursos superficiales, limitando el consumo humano y generando alteraciones en el hábitat acuático.
Aire	El material particulado proveniente de los procesos de operación y transporte genera contaminación atmosférica, la que además genera daños en los cultivos, flora, fauna, cursos de agua y asentamientos humanos.
Flora silvestre y Actividad agrícola	El contacto con material particulado y aguas contaminadas produce alteraciones en el crecimiento y proceso de fotosíntesis de las plantas, lo que genera un deterioro de los frutos y especies teniendo efectos directos en la actividad agrícola y la vegetación silvestre.
Fauna silvestre y actividad ganadera	El contacto de la fauna con químicos y material mineral, ya sea por vías respiratorias o cutánea puede generar que las especies migren, y en el peor de los casos, se extingan. Así mismo, el emplazamiento de depósitos de relaves puede generar efectos en su hábitat que también lleven a su migración.
Paisaje	El emplazamiento de depósitos de relaves genera alteraciones en el paisaje que generan el deterioro del entorno y efectos en los ecosistemas.
Poblaciones humanas	Por un lado, la estabilidad de los depósitos de relaves tiene relación directa con la seguridad de las personas. Por otro lado, el material particulado y la contaminación de aguas producidas por éstos tienen efectos en la salud de las personas.

La matriz evalúa cada factor de campo, asigna una calificación y establece un factor de importancia fijo acorde a la condición a evaluar y su influencia en esta, calculando así un puntaje parcial. La suma de los valores parciales obtenidos por cada factor para cada una de las 9 condiciones define la evaluación para dicha condición, clasificando como Inaceptable, Deficiente, Aceptable, Buena o Muy Buena. Luego, se establece la evaluación general que agrupa los resultados en las dos categorías principales de condición: estabilidad física y ambiente, nuevamente a través de factores de importancia y las clasificaciones recién mencionadas. Finalmente, se llega a una evaluación global que considera los resultados de evaluación general, adaptando como resultado final la clasificación más deficiente entre estabilidad física y ambiente.

Esta metodología se aplicó a 41 depósitos de la región de Valparaíso, los cuales se ubican en base al Levantamiento Catastral de 1989 – 1990 e información recopilada a través de entrevistas a lugareños, autoridades y profesionales de la CONAMA y el SNGM. De estos depósitos, según el documento, 7 se registran como activos, 5 inactivos y 29 abandonados. Sin embargo, al verificar esta información con el catastro del SNGM 2019, la mayoría de los depósitos declarados como abandonados, según el catastro se encuentran inactivos, en particular solo 2 de ellos están abandonados. Por otro lado, solo algunos de los 41 depósitos se encuentran en el catastro. Según el análisis realizado, de estos 41 depósitos 32 de ellos presentan una evaluación Deficiente a Inaceptable para la condición general de estabilidad, y en particular 17 de éstos corresponden a la condición de estabilidad mecánica del talud. Estos resultados se exponen en la Figura 2-6.

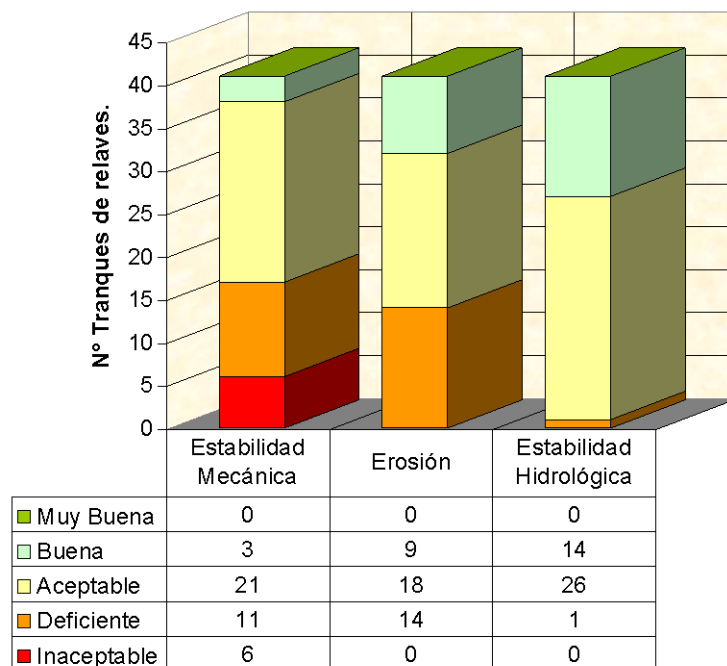


Figura 2-6: Resultados para condición de estabilidad física (Carvajal y Pacheco 2004).

2.3.3 Guía metodológica para evaluación de la estabilidad física de instalaciones mineras remanentes

Esta guía es una síntesis del estudio realizado por la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso denominado Proyecto INNOVA 15BP-45433 “Desarrollo de herramientas de evaluación y criterios técnicos para asegurar la estabilidad física de instalaciones remanentes”, en adelante denominada Guía Metodológica.

La Guía Metodológica tiene como objetivo principal proponer herramientas tecnológicas y criterios técnicos para evaluar y asegurar la estabilidad física de las instalaciones mineras en sus futuras etapas de cierre y post cierre, esto en base a la necesidad de fijar limitaciones y criterios por parte de la minería nacional y los organismos reguladores. Su uso se limita a instalaciones actualmente en operación o en vías de estarlo. Por lo tanto, “no aplica en instalaciones ya cerradas o abandonadas” (SERNAGEOMIN, 2018b).

La guía divide las instalaciones mineras remanentes en minas y depósitos de residuos masivos mineros. Los depósitos de relaves se encuentran dentro de la categoría de residuos masivos mineros y se pueden clasificar según su tipo de almacenamiento y nivel de humedad en: tranque de relave, embalse de relave, depósito de relave filtrado, depósito de relave espesado y depósito de relave en pasta. De estas 5 categorías, los tranques de relaves presentan mayor riesgo de inestabilidad física.

Los mecanismos de falla que establece la guía para los depósitos de relaves son los que se indican en la sección 2.3.1, sumándose los mecanismos de licuación estática e inestabilidad del suelo de fundación descritos a continuación:

- Licuación estática: Mecanismo de falla producido por la reducción de la resistencia al corte de un material granular suelto que se comporta en forma no drenada. La licuación estática puede ser causada por un aumento de deformación o esfuerzo de corte.
- Inestabilidad del suelo de fundación: Este mecanismo de falla se genera por una inadecuada capacidad de soporte o excesiva deformación del suelo de fundación.

En resumen, los mecanismos evaluados por la guía son:

- Licuación sísmica
- Inestabilidad de taludes
- Deformaciones sísmicas
- Rebalse
- Erosión interna
- Licuación estática
- Inestabilidad del suelo de fundación

Luego, se estudian los parámetros o características de los depósitos que se vinculan a estos mecanismos de falla, los cuales reciben el nombre de factores y se organizan en 8 grupos. El detalle y objetivo de evaluación de cada uno se indican en la Tabla 2-11.

Tabla 2-11: Grupos de factores asociados a mecanismos de fallas en un depósito de relave. Guía Metodológica (2018).

Grupo	Denominación	Factores	Objetivo de la Evaluación
1	Tipo de Depósito	– Tranque de arenas de relave (método de construcción)	Evaluar método constructivo y tipo de depósito de relaves
		– Embalses de relave	
		– Depósitos de relave filtrados	
		– Depósitos de relave en pasta	
2	Configuración geométrica aprobada en el plan de cierre	– Depósitos de relave espesados	Comprobar si cumplen con el proyecto de diseño
		– Altura de revancha	
		– Ancho de coronamiento	
3	Calidad del relave y niveles de compactación alcanzados en el depósito	– Pendiente global del talud	Comprobar si cumplen con el proyecto de diseño
		– Granulometría y plasticidad de la fracción fina	
4	Suelo de fundación	– Nivel de compactación	Comprobar si existen antecedentes topográficos, hidrológicos, geológicos, geotécnicos y/o geofísicos
		– Caracterización del suelo de fundación para el proyecto de diseño	
5	Antecedentes analizados de instrumentación y monitoreo	– Posición de niveles freáticos	Verificar si se cuenta o no con información y evaluar la frecuencia de medición
		– Funcionamiento sistema de drenaje	
		– Aceleraciones sísmicas	
		– Movimientos de muros y/o depósitos	
6	Comportamiento mecánico durante la fase operacional (historia de la instalación)	– Otros	Evidenciar la presencia de deformaciones y fallas, y su grado de severidad
		– Estabilidad física evaluada durante la fase operacional	
		– Incidentes con impacto a las operaciones	
		– Cierres temporales por incidentes	
7	Entorno regional para la condición de cierre	– Otros	Verificar si se cuenta con estudios respectivos
		– Sismicidad	
		– Crecidas	
8	Grado de implementación de medidas para asegurar la estabilidad física en la etapa de cierre	– Régimen de vientos	Comprobar la construcción de obras para el plan de cierre
		– Verificación de obras y acciones implementadas, según lo indicado en el plan de cierre aprobado	

La metodología propuesta por la Guía Metodológica para evaluar la estabilidad física de depósitos de relaves se muestra en el diagrama de la Figura 2-7. En esta es posible identificar 4 fases con sus input y objetivos. El detalle de estas se explica a continuación.

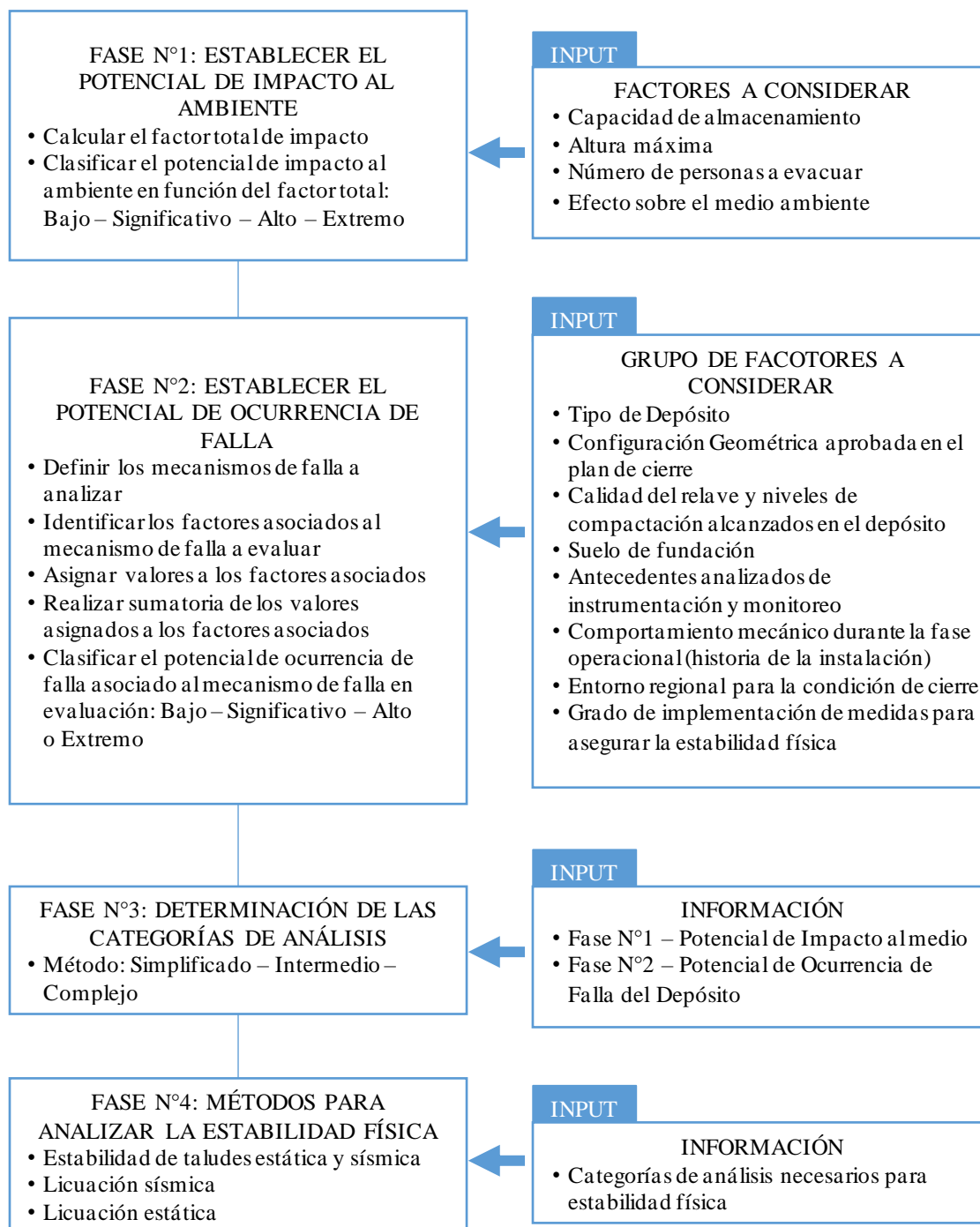


Figura 2-7: Esquema con metodología general propuesta para la selección de métodos que permiten analizar la estabilidad física de depósitos de residuos masivos mineros. Modificado de Guía Metodológica (2018).

Fase 1: Clasificación del potencial de impacto al ambiente al momento de realizar la evaluación de la condición de la estabilidad física

Para definir el potencial de impacto al ambiente generado por una falla de inestabilidad física se consideran los siguientes factores:

- Magnitud del depósito o botadero, el que para el caso de depósitos de relave se determina en función de su altura y capacidad volumétrica.
- Estimación de los posibles efectos generados al medio ambiente y a las personas.

Cada factor es evaluado de acuerdo al nivel de impacto en Extremo, Alto, Significativo o Bajo. Luego, los valores asociados a cada nivel de impacto de los factores son sumados, estableciendo el potencial de impacto al ambiente general del depósito.

Fase 2: Potencial de ocurrencia de falla al momento de realizar la evaluación de la condición de estabilidad física

El primer paso para determinar el potencial de ocurrencia de falla consiste en identificar los grupos de factores (Tabla 2-11) que tienen incidencia en la generación de un mecanismo de falla y valorizarlos según su condición. El grupo de factores asociado a cada mecanismo de falla se presenta en la Tabla 2-12. Por cada grupo de factores se tiene un puntaje correspondiente a la suma de los valores obtenidos por la evaluación de los factores individuales. Luego, se calcula el valor total para el mecanismo de falla estudiado como la suma de todos los grupos asociados a éste, el cual a través de rangos es asociado a un potencial de ocurrencia de falla Bajo, Significativo, Alto o Extremo.

Tabla 2-12: Grupos de factores a considerar por cada mecanismo de falla.

Mecanismo de falla	Grupo de factores a considerar
Licuación sísmica	1, 3, 5, 6, 7 y 8
Inestabilidad de talud	1, 2, 3, 4, 5, 7 y 8
Licuación estática	1, 3 y 5
Rebalse	2, 7 y 8
Erosión interna	1, 3 y 5

Fase 3: Categorías de métodos para la evaluación de estabilidad física de depósitos de residuos masivos mineros

Para determinar el método de evaluación de estabilidad física, se utilizan los resultados obtenidos en las Fases 1 y 2, es decir, el Potencial de impacto al medio ambiente y el Potencial de ocurrencia de falla, el cruce de estos parámetros determina un análisis Simplificado, Intermedio o Complejo (Tabla 2-13).

Tabla 2-13: Categorías de análisis para la evaluación de estabilidad física en depósitos de residuos masivos mineros.

Potencial de ocurrencia de fallas	Potencial de impacto al ambiente		
	I (Bajo)	II (Significativo)	(III) Alto o Extremo
A (Bajo)	Simplificado	Intermedio	Complejo
B (Significativo)	Intermedio	Complejo	Complejo
C (Alto o Extremo)	Complejo	Complejo	Complejo

Fase 4: Métodos recomendados para evaluar la estabilidad física de depósitos de residuos mineros para las etapas de evaluación de cierre y post cierre.

Acorde a la categoría del método de análisis determinado en la Fase 3, se propone para algunos mecanismos de falla los métodos de evaluación de estabilidad física. Los mecanismos considerados corresponden a estabilidad de taludes, licuación sísmica y licuación estática. Para los casos de rebalse y erosión interna no existen metodologías específicas para su evaluación; sin embargo, los resultados de la Fase 3 permiten visualizar su estado, permitiendo definir medidas o estudios específicos. Los métodos de evaluación de estabilidad física para los mecanismos indicados se muestran en la Tabla 2-14.

Tabla 2-14: Selección de método para evaluar la estabilidad física en depósitos de relave en las etapas de evaluación de cierre y post cierre.

	Estabilidad de taludes	Licuación sísmica	Licuación estática
Simplificado	- Métodos de equilibrio límite estático y pseudo-estático	- Métodos semi-empíricos basados en correlaciones con ensayos in-situ	- Métodos semi-empíricos basados en correlaciones con ensayos in-situ
Intermedio	- Métodos de equilibrio límite estático y pseudo-estático - Análisis de deformaciones por métodos simplificados	- Métodos semi-empíricos basados en correlaciones con ensayos in-situ y ensayos de laboratorio	- Métodos basados en correlaciones con ensayos in-situ y ensayos de laboratorio
Complejo	- Métodos de equilibrio límite estático y pseudo-estático - Análisis de deformaciones por métodos simplificados - Métodos numéricos	- Métodos semi-empíricos basados en correlaciones con ensayos in-situ y ensayos de laboratorio - Métodos numéricos	- Métodos basados en correlaciones con ensayos in-situ y ensayos de laboratorio - Métodos numéricos

Los detalles de algunos de estos métodos se indican a continuación:

Métodos de equilibrio límite:

Los métodos de equilibrio límite definen una superficie de falla en la cual se comparan las fuerzas resistentes del material del talud con las fuerzas solicitantes, obteniendo como resultado un factor de seguridad (FS). Bishop, Janbu, Spencer y Morgenstern-Price corresponden a los métodos de equilibrio límite más utilizados, siendo el último de estos el más completo al considerar equilibrios de fuerza y momento.

Para el caso sísmico se realiza un análisis pseudo-estático, que consiste en aplicar una fuerza estática horizontal y/o vertical proporcional a la masa del talud que desliza y a un coeficiente sísmico. Generalmente, el coeficiente sísmico horizontal (K_h) se puede relacionar con la aceleración máxima del sismo de diseño.

Para la aplicación de estos métodos se requiere necesariamente el ángulo de fricción interna, la cohesión y la densidad del material del muro, pudiendo también ser requerido la resistencia no drenada. Todos estos valores se pueden obtener a través de ensayos de terreno o laboratorio.

Licuación sísmicamente inducida:

Uno de los métodos más utilizados para evaluar el potencial de licuación sísmicamente inducida es el método simplificado semi-empírico desarrollado por Seed & Idriss (1971), que evalúa el potencial de licuación (PL) como la razón entre la razón de sollicitación cíclica producida por un sismo (CSR) y la razón de resistencia cíclica (CRR), según indica la Ecuación 2-1.

$$PL = \frac{CSR}{CRR} \quad (2-1)$$

La razón de resistencia cíclica (CRR) se obtiene en terreno a través de ensayos CPT o SPT, o bien a por medio de Triaxiales cíclicos. Por su parte, la razón de sollicitación cíclica (CSR) se obtiene de la Ecuación 2-2.

$$CSR = 0,65 \cdot \left(\frac{a_{m\acute{a}x}}{g} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) \cdot r_d \quad (2-2)$$

Donde:

$a_{m\acute{a}x}$ [m/s²]: Aceleración máxima

g [m/s²]: Aceleración de gravedad

σ_v [kPa]: Esfuerzo vertical total

σ'_v [kPa]: Esfuerzo vertical efectivo

r_d : Factor de reducción de esfuerzos

Métodos simplificados para el cálculo de deformaciones sísmicas:

Una de las metodologías más básicas para el cálculo de deformaciones sísmicas corresponde al método de Newmark (1965), que se centra en encontrar la aceleración crítica o de fluencia, correspondiente a la aceleración mínima necesaria para generar el deslizamiento en un talud con factor de seguridad estático conocido. Luego, calcula el desplazamiento teórico causado por un sismo a través del registro de aceleración del mismo, integrando dos veces los intervalos de tiempo en donde la aceleración del sismo supera la crítica.

Otro método utilizado es el método empírico de Swaisgood (2003), que estima los asentamientos remanentes producidos por un sismo en el coronamiento del muro como función de la altura del depósito, el espesor del suelo de fundación, la magnitud del sismo y la aceleración máxima horizontal del mismo (PGA). Otros métodos utilizados corresponden al de Bray & Travarasou (2007) y el método de Troncoso (2011).

Métodos numéricos:

Los métodos numéricos corresponden a programas computacionales que permiten representar y evaluar la respuesta mecánica del suelo ante ciertas condiciones. En primer lugar, se tienen los métodos de elementos finitos que consideran el medio como continuo. Estos métodos discretizan el medio a través de una malla de elementos que se unen por nodos. El método resuelve un sistema de ecuaciones de compatibilidad y equilibrio que considera el cálculo de fuerzas y desplazamientos en cada nodo. Sus resultados son un campo espacial de esfuerzos y deformaciones en el medio analizado.

Por otro lado, están los métodos de diferencias finitas los cuales también consideran un medio continuo, pero el proceso de cálculo se realiza en cada uno de los nodos donde se relacionan variables mecánicas del material con variables cinemáticas. Este método es más eficiente y apropiado para los casos que puedan presentar deformaciones o inestabilidades mayores y sollicitaciones dinámicas.

2.4 Análisis y Discusión sobre la Revisión Bibliográfica

2.4.1 Catastro SNGM

El catastro realizado por el SNGM en el año 2019 contempla la identificación de los depósitos de relaves en Chile, su ubicación geográfica y una descripción de las características generales tales como método de construcción, recursos minerales y volumen. Aspectos importantes que no son considerados son la situación de estabilidad de estos depósitos y los límites geométricos de los mismos.

A través de la observación de los depósitos abandonados por medio de imágenes satelitales de Google Earth se pudo identificar que existen depósitos que, si bien no han colapsado por completo, presentan una falla parcial, la cual es identificada con un ID distinto al depósito que albergaba este material previamente. Estos casos corresponden a los depósitos California y Delirio, ubicados en las comunas de Illapel y Punitaqui, respectivamente, en la Región de

Coquimbo. Estos casos se observan en la Figura 2-8. Para el caso de los depósitos Delirio, el ID 636 corresponde a una falla de lo que se identifica como ID 635, falla que se produce tras el terremoto de Punitaqui de 1997. Mientras que para los casos California, ID 772 corresponde a una falla del depósito ID 773 y el depósito identificado con ID 774 a una falla de ID 370.

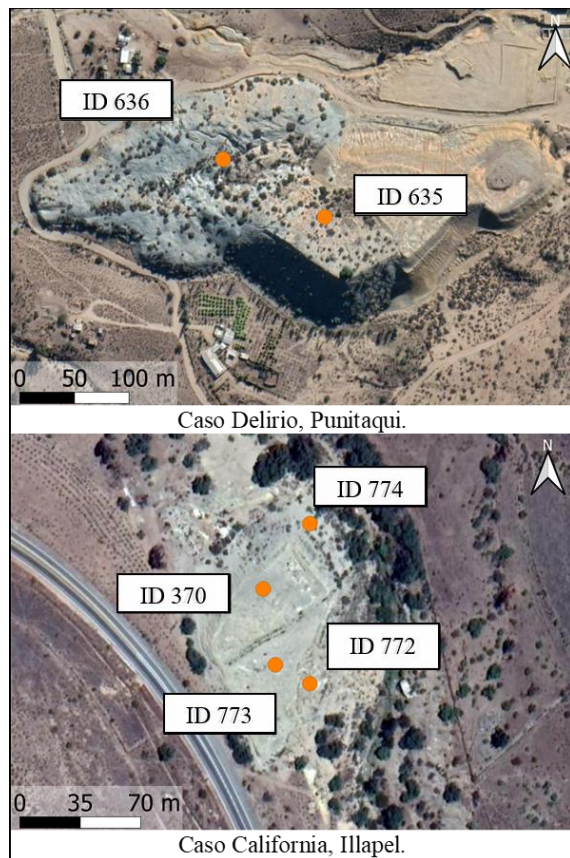


Figura 2-8: Casos de análisis sobre el Catastro del SNGM 2019.

2.4.2 Levantamiento Catastral

La recopilación de información se realiza cruzando los nombres de cada planta con los que se encuentran en el Catastro del SNGM 2019, luego se identifica el nombre de cada instalación en particular y se verifica su correspondencia con el número y fecha de resolución (Datos administrativos generales del depósito de relaves).

Del total de 173 depósitos abandonados se revisó información de 91 depósitos, la cual se encontró en distintos niveles de profundidad para cada caso. Una vez realizada la recopilación y digitalización de los datos, se observa que la información del Levantamiento Catastral resulta ser sumamente valiosa para este estudio, dado que complementa la información obtenida a través del Catastro del SNGM 2019. El valor se asocia a distintas características descritas de los depósitos, algunas de las cuales se indican en la Tabla 2-15.

Tabla 2-15: Características relevantes del depósito obtenidas del Levantamiento Catastral 1989-1990.

Características del depósito	Valor asociado
Número y disposición de los depósitos de relaves	<ul style="list-style-type: none"> • Esquemas: Permiten definir la morfología del depósito. • Minerales principales y secundarios: Son un indicador del grado de contaminación de sus relaves. • Porcentaje de finos: Son relevantes para el comportamiento del muro.
Geología de la zona donde se ubican los depósitos	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de suelo: El suelo de fundación es un dato necesario para el posterior análisis de estabilidad.
Características del muro	<ul style="list-style-type: none"> • Método de construcción: Detalle técnico que se puede incluir en la evaluación de la estabilidad. • Número de pretilas: Indica la cantidad de secciones críticas que se deben evaluar. • Geometría del muro: Altura y ángulo son valores necesarios para el análisis de estabilidad. • Prisma soportante: Área basal, sistema de compactación y estado de saturación. También pueden ser considerados en un análisis de estabilidad.
Características de la cubeta	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad máxima y volumen depositado: Permiten visualizar la condición en esos años y compararla con los datos del año 2019.
Fotografías	Permiten evidenciar la presencia de grietas y vegetación de algunos depósitos.

Es importante mencionar que la información de este catastro no representa necesariamente la condición actual de estos depósitos, ya que los datos corresponden a lo registrado e investigado entre los años 1989 y 1990. En algunos casos, la ubicación de estos depósitos presenta errores y sus nombres no coinciden con el actual registro del SNGM, ya que algunos de ellos han sido removidos o cubiertos por otros depósitos que actualmente operan u operaron en los años siguientes a la realización del Levantamiento Catastral. Ahora bien, este documento corresponde al único registro técnico existente para los depósitos abandonados.

2.4.3 Estabilidad Física

La totalidad de los mecanismos de falla revisados en la sección 2.3.1 se pueden generar en un depósito de relaves activo o inactivo. Sin embargo, para el caso de los depósitos abandonados en estudio, los mecanismos de licuación sísmica, rebalse y erosión interna tienen baja probabilidad de ocurrencia dado que, si bien estos depósitos pueden presentar humedad, e inclusive la concavidad de su cubeta podría permitir el almacenamiento de agua, la probabilidad de lluvias y de un alto grado de saturación es baja dada las condiciones climáticas de la zona centro norte de Chile. Esto reduce los posibles mecanismos de falla de un depósito abandonado en esta zona de estudio a la inestabilidad de talud.

Con respecto a las metodologías de análisis de estabilidad física, la Guía Metodológica indica explícitamente que no es aplicable para evaluar depósitos abandonados. Esto se debe a que muchos de los grupos y factores definidos para evaluar la estabilidad física (Tabla 2-11) no se pueden determinar para depósitos abandonados. Un ejemplo son aquellos factores que comparan la situación actual con el proyecto de diseño. También, los grupos de factores que involucran instrumentación y monitoreo son muy escasos en este tipo de depósitos. Si se optara por utilizar esta metodología a pesar de las indicaciones del SNGM, el primer paso sería asignar a los grupos de análisis recién descritos las categorías de Sin Información o No Cumple con el Proyecto de Diseño (porque no se puede comparar). Con esta decisión, independiente del método constructivo, la cantidad de antecedentes para la caracterización del suelo de fundación, y la ausencia de deformaciones y asentamientos, los resultados de la metodología arrojarían un alto potencial de ocurrencia de falla, recomendando así, un análisis complejo, sin necesidad de evaluar el potencial de impacto al ambiente. Considerando que no todos los depósitos abandonados se encuentran en estado crítico, se descarta esta metodología para el análisis de estabilidad de estos depósitos.

La metodología propuesta por Carvajal y Pacheco (2004) es aplicable para depósitos abandonados, aunque probablemente se deban realizar ajustes a los factores de importancia y a las calificaciones utilizadas. Sin embargo, no se considera para este trabajo ya que esta metodología estima una estabilidad cualitativa a partir de la valoración de características del depósito y su entorno, sin realizar un análisis de estabilidad con los métodos recomendados que se presentan en la sección anterior.

Capítulo 3

Fichas Informativas de Depósitos Abandonados

Las fichas informativas corresponden a una síntesis de la información recopilada sobre depósitos abandonados. Las fuentes utilizadas corresponden al Catastro del SNGM 2019 y el Levantamiento Catastral de 1989 – 1990. La información de estas fuentes se complementa con observaciones de imágenes satelitales a través de Google Earth y visitas a terreno en algunos casos.

La metodología completa para la elaboración de las fichas informativas de depósitos abandonados contempla las siguientes etapas:

1. Clasificación de depósitos abandonados según impacto de falla y reducción de la base de datos de depósitos a analizar.
2. Selección de información del Levantamiento Catastral 1989 – 1990 y del Catastro del SNGM 2019.
3. Levantamiento de observaciones a través de imágenes satelitales y complemento con observaciones en terreno.

Los detalles de cada punto se informan en las siguientes secciones.

3.1 Clasificación según impacto de falla

Con el fin de identificar las zonas afectadas en caso de una falla de depósitos abandonados y priorizar los depósitos a analizar, se realiza una clasificación en base a su impacto de falla.

Es importante mencionar que cada una de las observaciones y decisiones descritas para definir la clasificación se realiza por medio de imágenes satelitales obtenidas a través de Google Earth. El esquema utilizado para la clasificación según impacto de falla se muestra en la Figura 3-1.

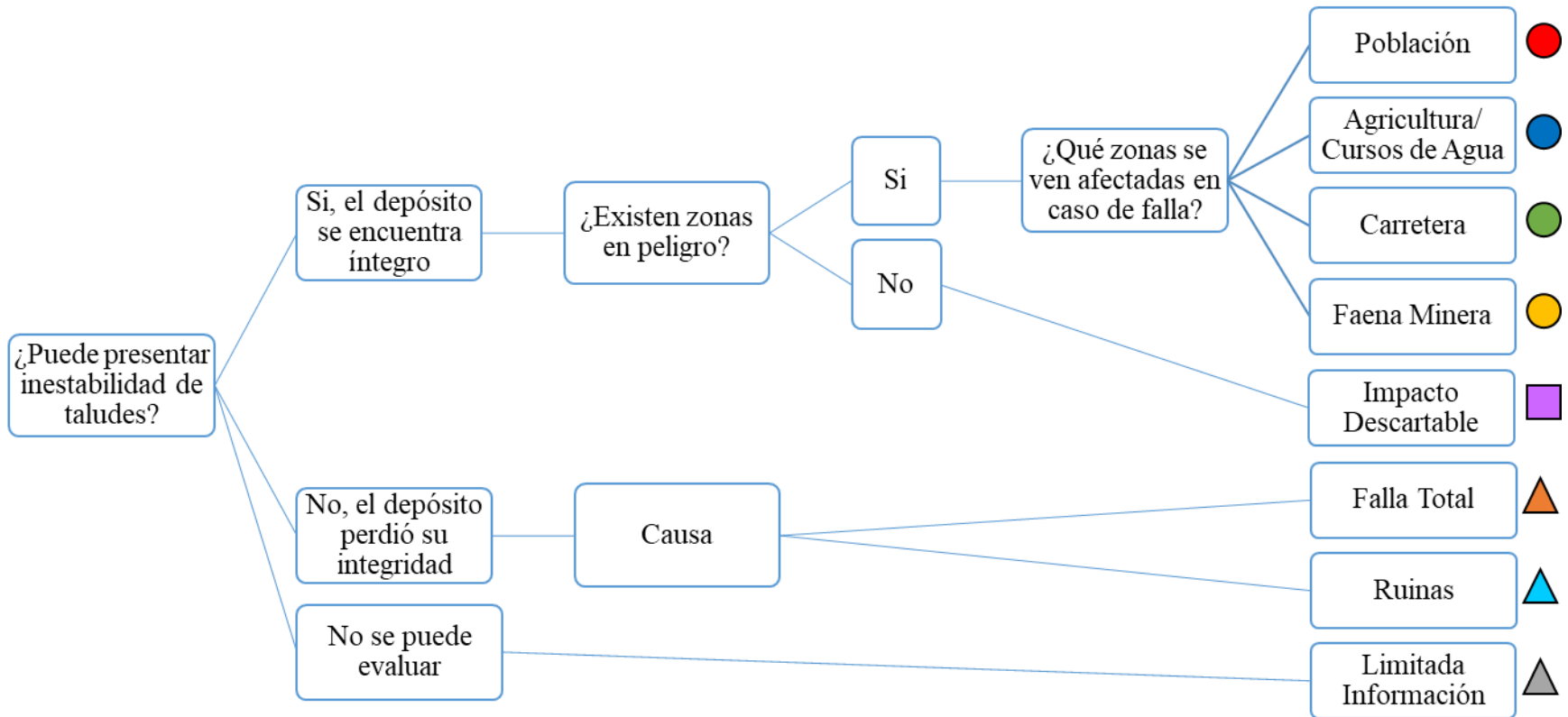


Figura 3-1: Esquema de clasificación de depósitos abandonados según impacto de falla.

El primer punto para iniciar la clasificación corresponde a identificar cuáles de los 173 depósitos abandonados pueden presentar una inestabilidad de talud. Para esto el factor primordial es la integridad del depósito, cuya definición depende de la presencia de contornos, alturas y taludes definidos. En base a estas características, se tienen 3 opciones: depósitos que se encuentran íntegros, y por tanto pueden presentar inestabilidad de talud, depósitos que perdieron su integridad y no generarán este mecanismo de falla, y, por último, depósitos que no se pueden evaluar por medio de imágenes satelitales. Este último caso se clasifica como “Limitada Información” (▲).

El siguiente paso de la clasificación para los depósitos que perdieron su integridad corresponde a identificar el motivo de su condición. Acorde a las observaciones realizadas, se contemplan 2 alternativas: el depósito ya presentó una falla, clasificando como “Falla Total” (▲), o bien, el depósito se encuentra en ruinas, clasificando como “Ruinas” (▲). La clasificación de “Falla Total” se basa en la observación y comparación de imágenes en el tiempo que permiten verificar un flujo del relave embalsado. Por otro lado, en el caso de “Ruinas” no se detectó flujo de relaves, pero los depósitos no presentan taludes ni contornos bien definidos.

La clasificación de los depósitos que aún se encuentran íntegros se efectúa con una inspección de sus alrededores con el fin de observar si existen zonas en peligro. Dependiendo de las zonas de interés que podrían ser afectadas en caso de falla, los depósitos se clasifican en: “Población” (●), “Agricultura/Cursos de Agua” (●), “Carretera” (●) o “Faena Minera” (●), considerando los siguientes criterios:

- Población: Categoría asignada cuando al menos una vivienda se encuentra en las cercanías de un depósito de relaves abandonado, y por tanto la vida de personas puede verse comprometida tras una falla.
- Carretera: Categoría asignada cuando un camino de conexión, por ejemplo, carreteras, autopistas y caminos rurales, a excepción de caminos pertenecientes a mineras, podría verse afectado tras la falla de un depósito de relaves abandonado.
- Faena minera: Categoría asignada cuando un depósito de relaves abandonado se encuentra en las cercanías de una faena minera activa, donde existe un flujo constante de personal, por lo que la falla del depósito involucra la vida de personas.
- Cursos de Agua: Categoría asignada cuando cursos de agua cercanos a un depósito de relaves abandonado podrían verse contaminados por la falla de éste. Se incluyen cursos de agua actualmente secos que podrían activarse ante lluvias o crecidas futuras.
- Agricultura: Categoría que considera depósitos abandonados en las cercanías de zonas de agricultura, por lo que una falla del depósito podría contaminar los cultivos.

Las últimas dos categorías se unifican dado que ambas se consideran como daño directo al medio ambiente.

En caso de que un depósito pudiese afectar más de una zona de interés, la clasificación se asigna priorizando la vida humana: Población > Faena Minera > Agricultura/Cursos de Agua > Carretera.

Si el depósito evaluado presenta una altura inferior a los 5 [m] y su distancia la zona de interés supera los 100 [m], se considera que no existen zonas en peligro por lo que se asigna la categoría de Impacto Descartable (■) (Figura 3-1). Los valores de altura y distancia no son

excluyentes, por lo que se suman a esta categoría depósitos con alturas y distancias que rondan en estos valores y cuya posible falla no afectaría a las zonas de interés.

A continuación, se ejemplifica cada una de las categorías mediante imágenes satelitales y Street View de Google Earth. Los casos de Limitada Información, Faena Minera y Falla Total solo cuentan con imagen satelital, lo que se debe a que Street View no se encuentra disponible en dichas zonas de estudio.

Población ●

La Figura 3-2 muestra un ejemplo de la clasificación de Población. Como se observa el depósito se encuentra a pocos metros de una zona poblada (destacada en amarillo).



Figura 3-2: Depósito clasificado como Población. ID 1022: Depósito Desconocido, Región de Coquimbo.

Agricultura/Cursos de Agua ●

El caso de Agricultura/Cursos de Agua se ejemplifica por medio de la Figura 3-3. La imagen satelital da cuenta de un curso natural de agua que se evidencia por la presencia de vegetación (zona destacada en amarillo).



Figura 3-3: Depósito clasificado como Agricultura/Cursos de Agua. ID 773: Depósito California 2A, Región de Coquimbo.

Carretera ●

La Figura 3-4 muestra un ejemplo de la clasificación para Carretera. A través de ella se observa la carretera contigua al depósito (destacado en amarillo).

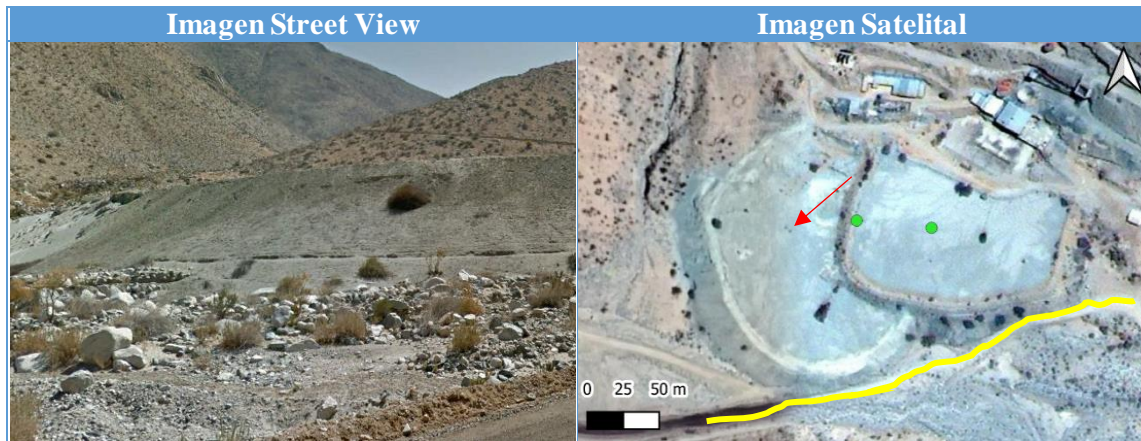


Figura 3-4: Depósito clasificado como Carretera. ID 1.059: Depósito Chingoles 1, Región de Coquimbo.

Faena Minera ●

La Figura 3-5 muestra un ejemplo del caso Faena Minera. En esta se destaca en amarillo la zona de interés cercana al depósito la cual corresponde a una faena minera.

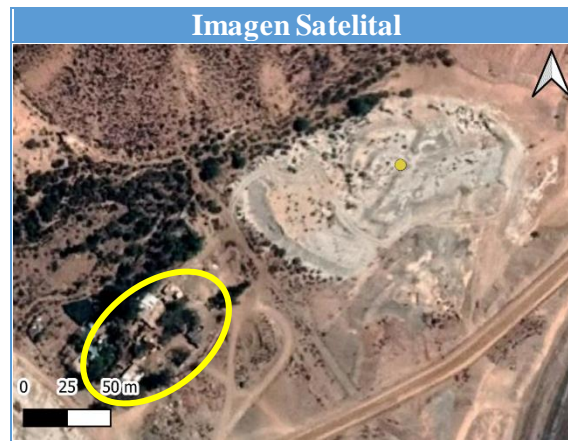


Figura 3-5: Depósito clasificado como Faena Minera. ID 277: Depósito Tranque 1-2, Región de Coquimbo.

Impacto Descartable ■

La Figura 3-6 muestra un ejemplo del caso Impacto Descartable. Por medio de esta imagen se observa que dada la altura y la distancia del depósito a la zona de interés (400 [m] aproximadamente), el riesgo de impacto en la autopista por una falla es despreciable.

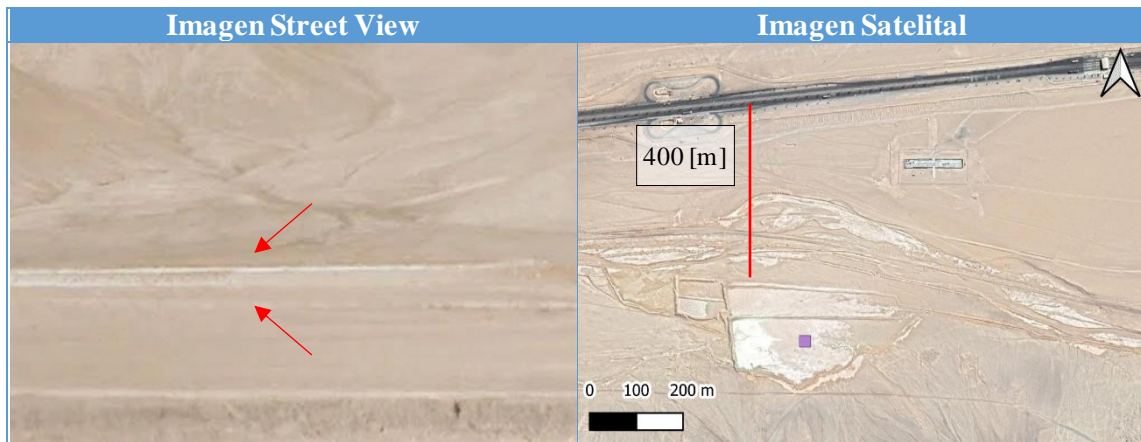


Figura 3-6: Depósito clasificado como Impacto Descartable. ID 1.029: Depósito Embalse de Relave, Región de Antofagasta.

Falla Total ▲

La Figura 3-7 ejemplifica la clasificación de Falla Total. Este depósito no cuenta con un muro de altura y talud definido. Además, se observa como el relave fluyó a través de la quebrada que lo alberga.

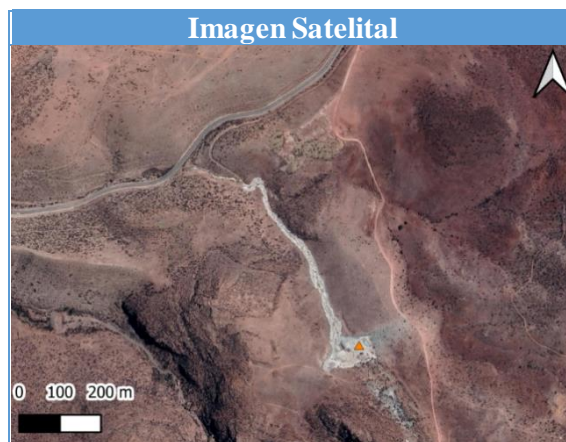


Figura 3-7: Depósito clasificado como Falla Total. ID 88: Depósito El Algarrobo, Región de Coquimbo.

Ruinas ▲

Un ejemplo de la clasificación de Ruinas se muestra en la Figura 3-8. En ella es posible ver claramente que el depósito perdió su integridad sin posibilidad de definir contornos, alturas y taludes.

Limitada Información ▲

Los casos de Limitada Información solo cuentan con una imagen satelital. Ejemplo de ello corresponde a la Figura 3-9 donde no se puede definir el nivel de integridad del depósito por tanto no se puede clasificar en las otras categorías.



Figura 3-8: Depósito clasificado como Ruinas. ID 600: Depósito ENCON, Región de Valparaíso.



Figura 3-9: Depósito clasificado como Limitada Información. ID 86: Depósito Huana 1, Región de Coquimbo.

En base a la metodología expuesta y su aplicación a los 173 depósitos abandonados registrados en el país, se tienen los resultados de la Tabla 3-1. Con el fin de acotar la base de datos se excluyeron de los siguientes análisis los depósitos clasificados como Impacto Descartable y Limitada Información, por tanto, sólo 86 depósitos son estudiados (destacados en la Tabla 3-1).

Tabla 3-1: Resultados Clasificación según impacto de falla.

Clasificación	Cantidad	Porcentaje
Población	20	12
Agricultura/ Cursos de Agua	32	18
Carretera	12	7
Faena minera	6	3
Falla Total	4	2
Ruinas	12	7
Impacto Descartable	27	16
Limitada Información	60	35
TOTAL	173	100

3.2 Selección de Información para Elaboración de Fichas

Las fuentes utilizadas para elaborar las fichas corresponden al Catastro del SNGM 2019 y el Levantamiento Catastral 1989 – 1990. De las 86 fichas elaboradas, 44 cuentan con información del Levantamiento Catastral. A continuación, se da detalla de la información seleccionada en cada caso.

3.2.1 Catastro SNGM 2019

La información proporcionada por el SNGM es utilizada prácticamente en su totalidad, las descripciones que quedan fuera corresponden a los números y fechas de resolución, y tipo de instalación. Este último se descarta ya que solo existe como opción tranque de relave o embalse, y los casos de embalses quedan registrados en el atributo de método constructivo. El listado completo de atributos utilizados en este caso se observa en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2: Atributos SNGM utilizados para fichas.

Atributos SNGM
ID SNGM
Nombre empresa
Faena
Región
Provincia
Comuna
Coordenadas UTM
Recurso
Método constructivo
Volumen autorizado [m ³]
Tonelaje autorizado [ton]

Cabe destacar que tanto para el volumen como el tonelaje el SNGM registra valores autorizados y actuales; sin embargo, para los 86 casos analizados no se cuenta con información actual, por tanto, se limita al uso de los valores autorizados para ambos casos.

3.2.2 Levantamiento Catastral 1989 – 1990

Para complementar la información del Levantamiento Catastral con los depósitos registrados por el SNGM, se solicitó la cooperación de este organismo con el fin de identificar correctamente los depósitos, dado que, como se mencionó en la sección 2.4.2, algunos de los depósitos registrados por el Levantamiento Catastral fueron removidos o se encuentran cubiertos por otros.

De toda la información recopilada por el Levantamiento Catastral, y detallada en la sección 2.1, los grupos de datos utilizados corresponden a antecedentes, características del muro, características del depósito y análisis. El detalle de los atributos considerados en cada caso se muestra en la Tabla 3-3.

La sección de antecedentes no se encuentra como tal en el Levantamiento Catastral, y corresponde más bien a la información destacada de los ítems de datos administrativos,

características de los relaves embalsados, características de los depósitos de relaves, filtraciones no controladas y consideraciones para la condición de estabilidad sísmica. El resto de secciones del Levantamiento Catastral que no son utilizadas en las fichas se descartan con el fin de priorizar información útil para el análisis de estabilidad y sintetizar la información a exponer.

Tabla 3-3: Atributos Levantamiento Catastral utilizados para fichas.

Sección	Atributo
Antecedentes	Recurso
	Estado
	Evidencia de deformaciones
	Filtraciones
	Pendiente terreno (valor medio) [%]
	Suelo de fundación
	Coefficiente sísmico horizontal
Características del muro	Tipo
	Otras características
	Método constructivo
	N° de pretilas
	Forma de los pretilas
Características del muro	Altura máx. [m]
	Revancha media [m]
	Ancho coronamiento/torta/muro perimetral [m]
	Largo coronamiento/torta/muro perimetral [m]
	Ángulo talud aguas abajo [°]
	Perímetro basal [m]
	Área basal [m ²]
	Sistema de compactación
	Estado de saturación
	Grado de compacidad (valor medio)
	DR (valor medio) [%]
Características del depósito	Capacidad máx. [m ³]
	Volumen depositado [m ³]
	Superficie total [ha]
	Superficie de la poza de sedimentación [ha]
Análisis	Estabilidad estática
	Estabilidad sísmica
	Evaluación de la situación global

3.3 Observaciones adicionales

Se reportan en las fichas observaciones adicionales realizadas por medio de imágenes satelitales de Google Earth, lo cual es complementado, en algunos casos particulares, con observaciones en terreno. Las observaciones reportadas se indican en la Tabla 3-4 con su

respectivo objetivo. A continuación, se da a conocer el detalle, fuentes y ejemplos utilizados para cada observación.

Tabla 3-4: Observaciones reportadas en las fichas y sus objetivos.

Observación	Objetivo
Altura máxima	Definir geometría para dimensionar eventuales consecuencias en caso de falla
Distancia a zona de interés	Estimar el alcance de los relaves en una eventual falla
Depósitos adyacentes	Caracterizar la zona de emplazamiento
Falla parcial/total	Registrar fechas de fallas y en lo posible relacionar causal (Ejemplo: sismo).
Última laguna	Registrar fechas y periodicidad, y vincular con contenido de humedad
Morfología	Clasificar depósitos en base a las características de sus muros
Material	Reconocer material en base a observaciones de terreno
Estado de faena minera	Definir si existe una faena cercana y el estado de esta: activa o abandonada.
Presencia de grietas	Observar el estado del depósito y vincular con zonas de escurrimiento de agua o fallas previas
Presencia de vegetación	Evidenciar humedad
Área y Volumen	Comparar volúmenes estimados con los reportados por el SNGM

3.3.1 Altura máxima

La altura máxima es la mayor altura registrada para el muro de un depósito. En general, este valor es obtenido por medio de la observación de imágenes satelitales o la herramienta de Street View de Google Earth, para lo cual se realizan estimaciones con objetos cercanos. En los casos visitados en terreno, se realizan estimaciones y cálculos exactos por medio de GPS. Ejemplos para cada caso se observan en la Figura 3-10.

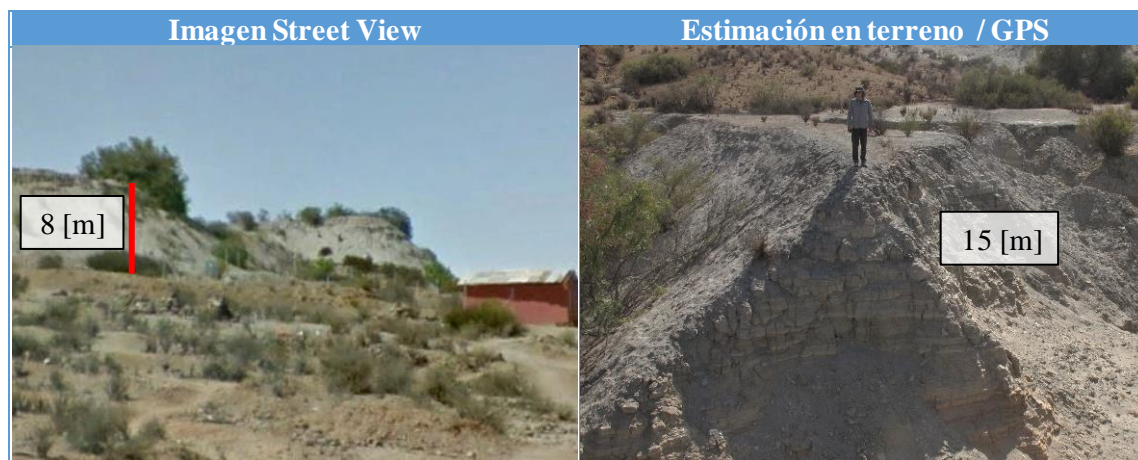


Figura 3-10: Observación de altura máxima. A la izquierda el depósito Victoria 2 (ID 83), a la derecha el depósito John Kennedy 1 (ID 255).

3.3.2 Distancia a zona de interés

En base a la clasificación de cada depósito, se mide su distancia a la zona de interés, es decir, a población, agricultura/cursos de agua, carreteras o faena minera que pudiera verse afectadas

en caso de una falla. Para su cálculo se utiliza la herramienta distancia de Google Earth y en algunos casos, para los cuales el valor es 0 (zona de interés contigua al depósito) se verifica a través de imágenes obtenidas en terreno o por Street View. La Figura 3-11 muestra en la izquierda el caso de medición con Google Earth y en la derecha otro caso cuya distancia a la población es considerada nula.

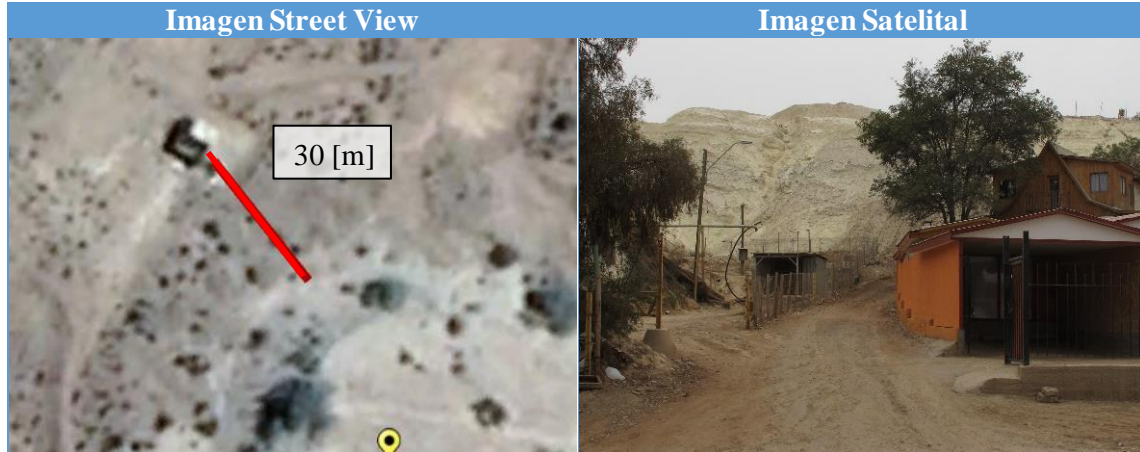


Figura 3-11: Observación de distancia a zona de interés. A la izquierda el depósito Victoria 2 (ID 83), a la derecha Tranque de Relave 1-2 (ID 726).

3.3.3 Depósitos adyacentes

Se define como depósito adyacente a aquel depósito que está en contacto directo, ya sea aguas abajo, aguas arriba o lateralmente, con otro depósito, quedando descartados depósitos que se encuentran cercanos, pero sin contacto. Esta observación se realiza por medio de imágenes satelitales. Un ejemplo se muestra en la Figura 3-12.

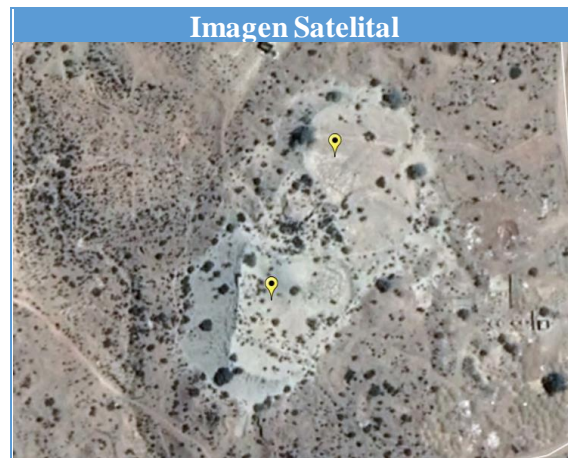


Figura 3-12: Observación de depósitos adyacentes. Arriba el depósito Victoria 2 (ID 83), abajo el depósito Victoria 1 (ID 643).

3.3.4 Falla parcial/total

Para el caso de fallas parciales o totales se realiza una observación en el tiempo de las imágenes satelitales de Google Earth, registrando fechas o periodos en los cuales se observó muro, o una falla total o parcial en el depósito. La Figura 3-13 corresponde a una de las fallas

observadas; a la izquierda se muestra el año 2004 donde el depósito contaba con muro y a la derecha una imagen del 2007 donde el muro ha fallado. En este caso no existe registro satelital entre los años mencionados, y dada la poca precisión, se registra que la falla ocurrió entre los años 2004 y 2007. De forma similar se aplica esta metodología para otros depósitos y fechas.

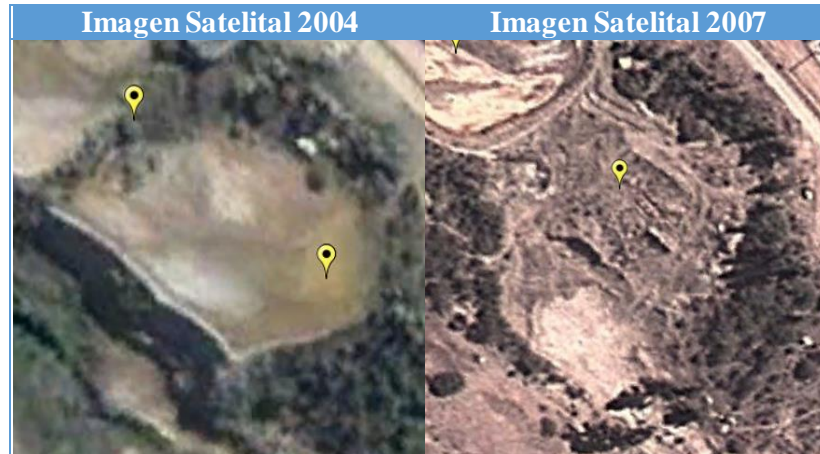


Figura 3-13: Observación de falla parcial/total. Depósito Hernández 2 (ID 1.047).

3.3.5 Última laguna

En este caso también se estudian las imágenes satelitales de Google Earth en el tiempo, pero se registra la fecha más reciente en la que el depósito presentó una o varias lagunas. De forma complementaria, se observa la periodicidad de estas lagunas. En caso que éstas se registren en períodos de lluvias, se le atribuye la causa como detalle. Ejemplo del registro se muestra en la Figura 3-14. La importancia de esta observación es su conexión con la humedad del depósito, ya que, si bien los depósitos podrían tener bajas humedades, las lluvias podrían cambiar esta condición.



Figura 3-14: Observación de última laguna. Depósito San Emilio (ID 333).

3.3.6 Morfología

La definición de morfología se basa en la observación de imágenes satelitales y la propuesta de Monsalve (2020) en base a las características de los muros (ver Tabla 3-5).



Tabla 3-5: Observación de morfologías. Modificado de Monsalve (2020).

Morfología	Descripción
Tipo 1	Tranque sin muro definido
Tipo 2	Tranque con muro definido de arena – zona posterior y/o lateral cerro natural
Tipo 3	Tranque con muro definido de arena – zona posterior y/o lateral cerro natural – colindante aguas abajo con otro depósito
Tipo 4	Tranque con muro definido de arena - Zona posterior y/o lateral otro depósito de relaves
Tipo 5	Tranque con muro definido de arena en todo el perímetro
Tipo 6	Tranque construido colindante a otro(s), sin poder diferenciar los límites de cada uno
Tipo 7	No se observa adecuadamente a través de la imagen satelital

3.3.7 Material

En terreno, se pudo observar que los relaves de color gris correspondían principalmente a arenas y limos de baja plasticidad, mientras que los relaves de color amarillo/café eran materiales más finos con una mayor plasticidad. Ejemplos de estos materiales se observan en la Tabla 3-6. En base a esto, se atribuye la categoría de arenas o finos acorde a los colores que se puedan identificar en la superficie de los depósitos a través de imágenes de satelitales de Google Earth (idealmente Street View) o de visitas a terreno.

Tabla 3-6: Observación de material.

Color – Material	Fotografía
Gris – Arena	
Amarillo/ Café – Fino	

3.3.8 Estado de Faena Minera

Esta categoría consiste en identificar si existe una faena cercana y su estado, identificándose 4 opciones:

- Faena minera activa: Cuando el depósito se encuentra dentro de una faena minera en la cual se observan instalaciones y el desarrollo de actividades.
- Posible faena minera abandonada: Cuando alrededor de los depósitos se observan instalaciones en ruinas que podrían corresponder a faenas mineras abandonadas.
- Faena minera abandonada: Cuando fotografías o visitas a terreno confirman que las instalaciones alrededor del depósito corresponden a una faena minera abandonada.
- Sin información: Cuando no se puede identificar una faena minera alrededor.

Ejemplo de la observación del estado de la faena minera se destaca a la izquierda de la Figura 3-15 en color amarillo.

3.3.9 Presencia de vegetación

Por medio de la observación de imágenes satelitales de Google Earth y los detalles obtenidos en terreno para algunos casos, se identifican las zonas en las que el depósito presenta vegetación, ya sea en el muro, el pie de muro y/o en la cubeta. En casos particulares, también se registra vegetación en la zona de conexión entre dos depósitos. La Figura 3-15 muestra un ejemplo de la presencia de vegetación al pie del muro del depósito Tamaya 2.

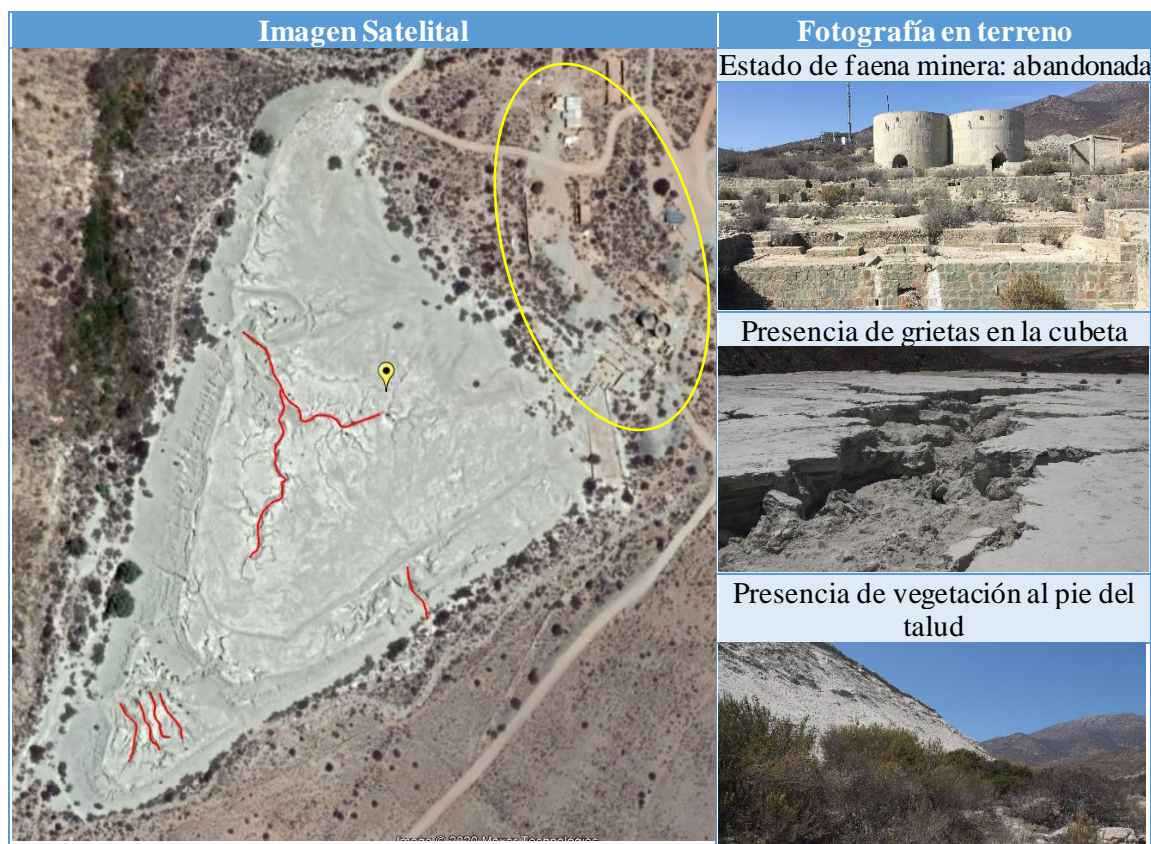


Figura 3-15: Observación de estado de faena minera, presencia de grietas y vegetación. Depósito Tamaya 2 (ID 87).

3.3.10 Presencia de grietas

A través de las imágenes satelitales de Google Earth y los detalles obtenidos en terreno para algunos casos, se identifica la presencia de grietas y su ubicación en el depósito. Ejemplo de la observación se destaca a la izquierda de la Figura 3-15 en color rojo.

3.3.11 Área y Volumen

Se seleccionaron aquellos depósitos a los cuales se pudo calcular una altura media con precisión, la que multiplicada por el área basal obtenida a través de Google Earth permite estimar un volumen. Se estimó el área y volumen de 28 depósitos, para comparar los volúmenes con los valores reportados por el catastro del SNGM 2019.

3.4 Ficha Ejemplo

La Figura 3-16 muestra un ejemplo completo de ficha informativa para depósitos abandonados. En primer lugar, se observa la simbología acorde a su clasificación por impacto, lo cual se acompaña por el nombre del depósito. Luego, se separa en 3 secciones según la fuente de información: SNGM, Levantamiento Catastral y Observaciones, según lo descrito anteriormente. Cabe destacar que existen casos en que el depósito actualmente considera lo que en 1989 – 1990 correspondía a 2 depósitos, y, por tanto, el Levantamiento Catastral cuenta con doble información. En estas situaciones se detalla la información de ambos depósitos en esos años, lo que queda registrado al final de cada ficha como una nota. En particular, en el ejemplo de la Figura 3-16 se declara que “A la fecha, Delirio 1 y Delirio 2 se unificaron, identificándose en su conjunto como Delirio 1”.

A la derecha de las fichas se observan 3 imágenes que permiten observar la magnitud de los depósitos, las características de sus muros y la posible presencia de depósitos adyacentes. Las imágenes corresponden a:

1. Imagen satelital de Google Earth con escala.
2. Imagen actual de Street View de Google Earth o fotografía en terreno (para los casos visitados).
3. Imagen del Levantamiento Catastral 1989 – 1990.

Es importante mencionar que no todos los depósitos cuentan con información en el Levantamiento Catastral, o con imágenes de Street View o terreno. En estos casos, esta información se omite manteniendo el formato estándar. Además, las fichas incluyen solo las observaciones que se pudieron realizar para cada depósito, por tanto, no necesariamente se registrarán 12. Por otro lado, las observaciones de alturas y distancia a zona de interés quedan descartadas a priori para las clasificaciones de Falla Total y Ruinas.

La nomenclatura utilizada por el Levantamiento Catastral se indica en el Anexo A. Las 86 fichas generadas se adjuntan en el Anexo C.

DELIRIO 1

SNGM 2019

ID SNGM	635	UTM Norte/UTM Este	6.581.623/285.797
Nombre empresa	Cía. Minera Tamaya	Recurso	Cobre-Oro
Faena	Planta Delirio	Método constructivo	Eje central
Región/Provincia	IV/Limarí	Volumen autorizado [m ³]	600.000
Comuna	Punitaqui	Tonelaje autorizado [ton]	900.000

LEVANTAMIENTO CATASTRAL 1989 – 1990

	Delirio 1 (*)	Delirio 2 (*)
Antecedentes		
Nombre del depósito	Delirio 1 (*)	Delirio 2 (*)
Recurso	Cobre(?)-Oro(?)	Cobre(?)-Oro(?)
Estado	Abandonado	Abandonado
Evidencia de deformaciones	S/I	S/I
Filtraciones	No sufre filtraciones no controladas	No sufre filtraciones no controladas
Pendiente terreno (valor medio) [%]	Terreno suave	Terreno suave
Suelo de fundación	Depósitos aluviales principalmente de gravas areno-arcillosas, base de rocas volcánicas y plutónicas	Depósitos aluviales principalmente de gravas areno-arcillosas, base de rocas volcánicas y plutónicas
Coefficiente sísmico horizontal	0,15	0,15
Características del muro		
Tipo	Muro de relaves cicloneados (?)	Muro de relaves cicloneados (?)
Otras características	-	-
Método constructivo	Eje central	Eje central
N° de pretilos	4	3
Forma de los pretilos	Rectangular	U
Altura máx.[m]	35	18
Revancha media [m]	0	0
Ancho coronamiento/torta/muro perimetral [m]	0 (Coronamiento)	0 (Coronamiento)
Largo coronamiento/torta/muro perimetral [m]	480 (Coronamiento)	150 (Coronamiento)
Ángulo talud aguas abajo [°]	30	30
Perímetro basal [m]	1.000	325
Área basal [m ²]	4.800	.1500
Sistema de compactación	Deposición por ciclones	Deposición por ciclones
Estado de saturación	Seco	Seco
Grado de compactación (valor medio)	Medio-alto	Medio-Alto
DR (valor medio) [%]	60	60
Caract. del depósito		
Capacidad máx. [m ³]	600.000 (?)	74.600 (?)
Volumen depositado [m ³]	600.000 (VA-E-O)	74.600 (VA-E-O)
Superficie total [ha]	1,72 (VA-E-O)	0,41 (VA-E-O)
Superficie de la poza de sedimentación [ha]	0	0,00
Análisis		
Estabilidad estática	Buena	Buena
Estabilidad sísmica	Buena	Buena
Evaluación de la situación global	Buena	Buena

OBSERVACIONES

- Altura: 27 [m] (Medida en terreno).
- Vegetación: Escasa.
- Distancia a población: 50 [m].
- Estado de faena minera: Faena minera activa.
- Depósitos adyacentes: ID 636 – Delirio 3: Muros erosionados.
- Área: 30.541 [m²]
- Grietas: Se observan grietas de tracción en la cubeta principal.
- Material: Fino (Definido en terreno).
- Morfología: Tipo 4.
- Volumen: 549.738 [m³]



BELÉN PULGAR 2020
LEVANTAMIENTO CATASTRAL

Figura 3-16: Ejemplo de ficha informativa para depósitos abandonados.

3.5 Análisis de Información de las Fichas

Con respecto a la información obtenida a través del Levantamiento Catastral entre los años 1989 y 1990 es destacable que, de los 86 depósitos analizados, 44 cuentan con información. Por otra parte, del conjunto de datos recogidos tanto desde el Catastro del SNGM como del Levantamiento Catastral se tiene que 30 depósitos presentan un método constructivo aguas arriba.

Al estudiar las morfologías de los depósitos, se obtiene que el 20,8% de los 86 depósitos analizados son de Tipo 2, siendo seguido por un 12,1% de depósitos de Tipo 4 (ver Tabla 3-7).

Tabla 3-7: Análisis de morfologías.

Morfología	Descripción	Cantidad	Porcentaje
Tipo 1	Tranque sin muro definido	17	9,8
Tipo 2	Tranque con muro definido de arena – zona posterior y/o lateral cerro natural	36	20,8
Tipo 3	Tranque con muro definido de arena – zona posterior y/o lateral cerro natural – colindante aguas abajo con otro depósito	1	0,6
Tipo 4	Tranque con muro definido de arena - Zona posterior y/o lateral otro depósito de relaves	21	12,1
Tipo 5	Tranque con muro definido de arena en todo el perímetro	11	6,4
Tipo 6	Tranque construido colindante a otro(s), sin poder diferenciar los límites de cada uno	0	0,0
Tipo 7	No se observa adecuadamente a través de la imagen satelital	NA	NA

NA: No aplica para este estudio

Por su parte, la clasificación por material a través del color del depósito arroja que, de los 86 depósitos analizados, 67 son arenosos y 19 corresponden a material fino.

Para el caso de la altura, los valores estimados y calculados en terreno superaron entre 2 a 3 veces los valores previamente estimados por medio de Google Earth. Esto llevó a un reprocesamiento de la información en base a la experiencia de terreno.

Los histogramas de altura máxima y distancia a zona de interés solo se calcularon para las categorías en que el depósito se encuentra íntegro, por tanto, se descarta la clasificación de Falla Total y Ruinas, reduciendo el análisis a 70 depósitos. Ambos histogramas se muestran en función de la zona afectada en la Figura 3-17 y Figura 3-18. Como es posible identificar, la mayoría de los depósitos (36) cuenta con alturas entre los 5 y 10 [m], siendo la minoría (3) los que presentan alturas entre los 20 y 30 [m]; sin embargo, 2 de estos últimos depósitos corresponden a la clasificación de Población.

En base a la Figura 3-18, 31 depósitos de los 70 analizados se encuentran contiguos a la zona de interés, estando la mayoría en la categoría de Agricultura/Cursos de Agua.

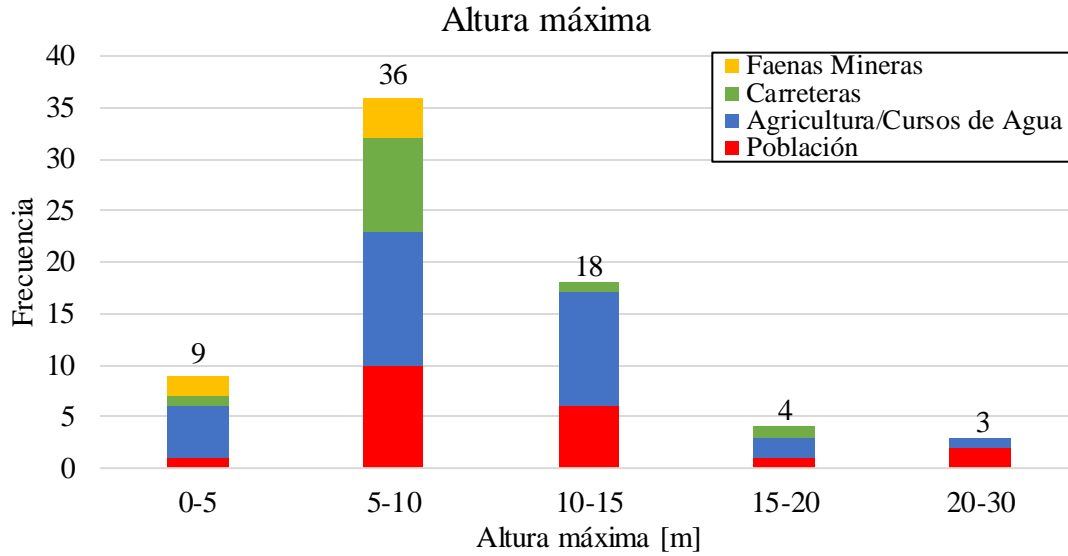


Figura 3-17: Análisis alturas máximas para 70 depósitos analizados.

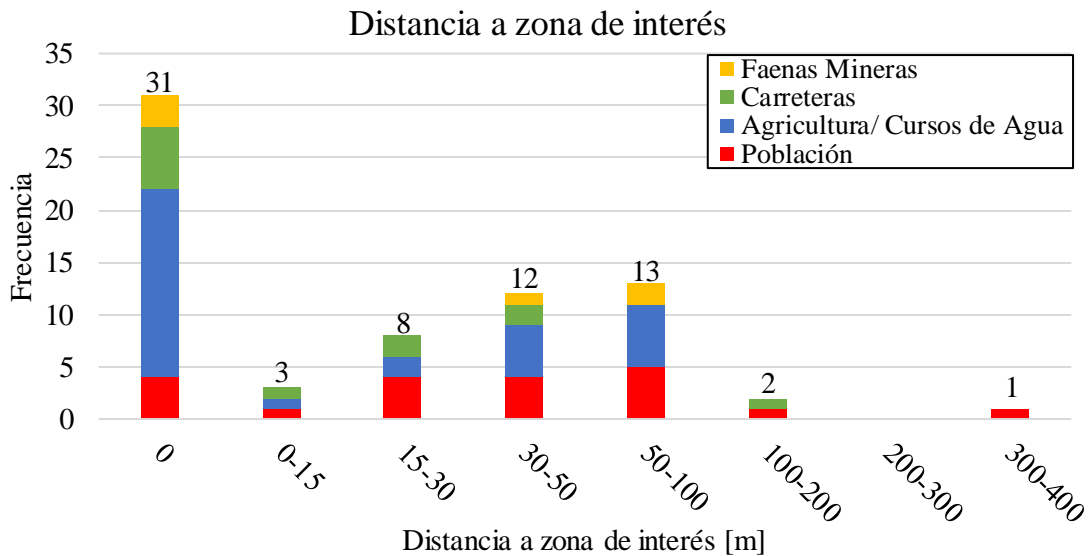


Figura 3-18: Análisis distancia a zona de interés para 70 depósitos analizados.

Por otro lado, la Figura 3-19 compara los volúmenes estimados de los depósitos con los valores definidos en el Catastro del SNGM 2019. Los casos que se muestran son solo 28 de los 86 depósitos totales, los que corresponden a aquellos en que existe certeza de la altura media de sus muros. La línea roja continua muestra la relación 1:1 entre ambos volúmenes, mientras que las líneas segmentadas indican la variación para un orden de magnitud. Por medio de este gráfico es posible dar cuenta que los volúmenes estimados en este trabajo son en promedio un 80% mayores a los valores registrados por el SNGM.

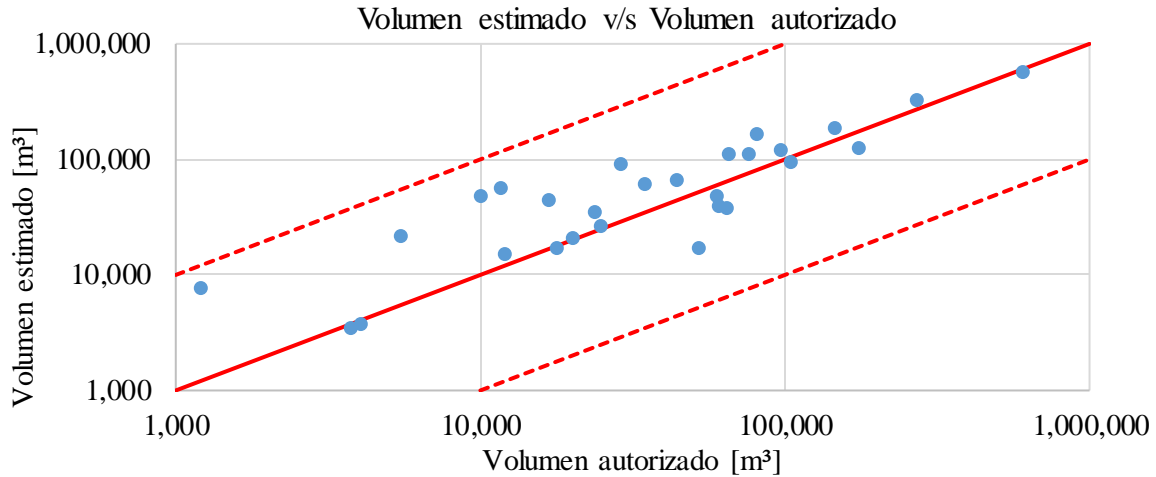


Figura 3-19: Volúmenes estimados en este trabajo y volúmenes autorizados reportados por Sernageomin (2019) para 28 depósitos seleccionados.

Para el mismo conjunto de depósitos (28), se muestran sus volúmenes estimados en función de la altura en la Figura 3-20. La figura indica que el volumen aumenta rápidamente con la altura, estabilizándose cerca de los 15 [m], aproximadamente, de acuerdo a la tendencia indicada por la línea roja segmentada. En base a esto, se establece que depósitos con alturas superiores a 15 [m] presentan volúmenes (en torno a 100.000 [m³]) capaces de afectar las zonas de interés analizadas en caso de una falla.

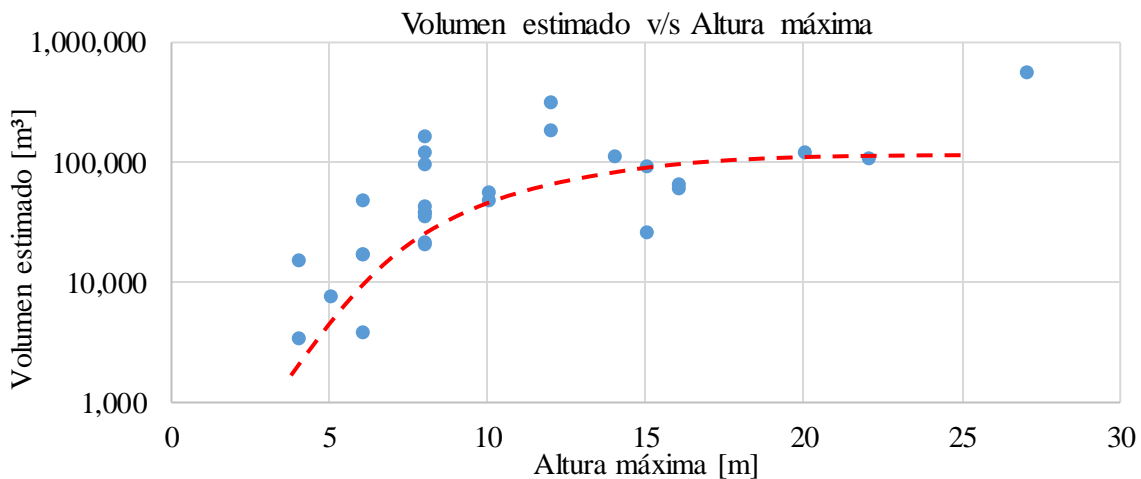


Figura 3-20: Volúmenes estimados y alturas máximas de 28 depósitos seleccionados.

A partir del análisis conjunto de alturas, clasificación según zona de interés y pendientes del terreno, se genera la Figura 3-21, la cual considera 70 depósitos (Población, Agricultura/Cursos de Agua, Carretera y Faena minera) además de los 27 casos correspondientes a la categoría de Impacto Descartable. Esta última categoría se suma con el fin de apoyar la clasificación realizada. Del conjunto de Impacto Descartable existen 2 depósitos cuya distancia a la zona de interés supera los 2 kilómetros por lo que no se grafican. La división entre los depósitos del grupo Impacto Descartable con los analizados, queda descrita por la relación distancia igual a 18 veces la altura, la cual se presenta en el gráfico a través de la curva segmentada de color negro.

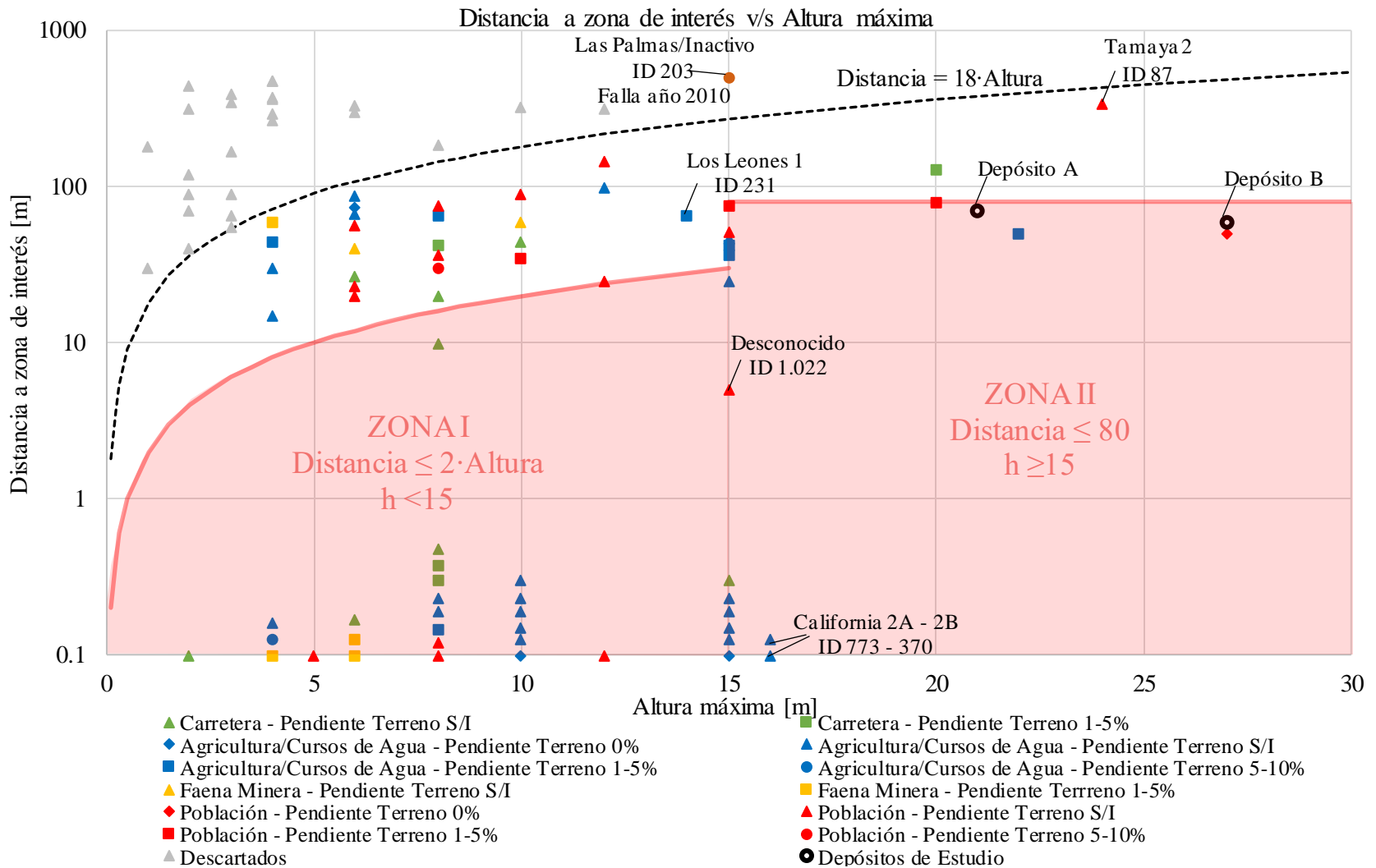


Figura 3-21: Distancias a zona de interés y alturas máximas de los casos analizados (70) y los clasificados como Impacto Descartable (27), incluyendo pendientes de terreno y tipo de zona de interés. Los depósitos nombrados corresponden a los visitados en terreno, algunos de los cuales se encuentran en la lista de prioritarios (Tabla 3-8).

El gráfico presenta la distancia a la zona de interés en escala logarítmica con el fin de apreciar correctamente los depósitos que se encuentran contiguos a la zona de interés (distancia igual a 0). Para estos casos se adoptan distancias a la zona de interés entre 0,1 y 1 [m] para observar la totalidad de los puntos.

A partir del análisis y observaciones realizadas, se establecen los depósitos prioritarios para los cuales se recomienda realizar un estudio de estabilidad completo. Para la selección se establecen 3 criterios según lo indicado en la Figura 3-21:

1. Depósitos ubicados en la zona I: Altura menor a 15 [m] y una distancia a la zona de interés menor a 2 veces la altura.
2. Depósitos ubicados en la zona II: Altura mayor a 15 [m] y distancia a la zona de interés inferior a 80 m.
3. Depósitos que se encuentran en las cercanías de la zona I o II, que su zona afectada contemple vidas: Población o Faena Minera y que las pendientes de sus terrenos sean distintas de 0 o no se tenga información al respecto (S/I).

Como resultado, se obtienen 50 depósitos prioritarios de los 86 analizados. El listado se presenta en la Tabla 3-8 con su respectivo criterio de selección.

Tabla 3-8: Listado de los 50 depósitos abandonados prioritarios en base a los 86 analizados.

Zona de interés cercana	ID	Depósito	Criterio de clasificación
Población	83	Victoria 2	3
Población	87	Tamaya 2	3 (*)
Población	171	La Paciencia	2
Población	244	Tranque de Relave	1
Población	251	Tranque de Relave	3
Población	265	Jeraldo 1-2-3	3
Población	268	Tranque De 1-2	1
Población	421	Unión	2
Población	456	Desconocido	1
Población	500	Tranque de Relave	3
Población	565	Lo Águila	3
Población	635	Delirio 1	2
Población	636	Delirio 3	3
Población	716	Indey 1	2
Población	726	Tranque De 1-2	1
Población	1022	Desconocido	2
Faena Minera	531	Omega 1	1
Faena Minera	585	Urquieta 2	3
Faena Minera	796	Omega 3	1
Faena Minera	797	Omega 2	1
Agricultura/ Cursos de Agua	85	Huana 2	1
Agricultura/ Cursos de Agua	96	Horizonte 2	2

Zona de interés cercana	ID	Depósito	Criterio de clasificación
Agricultura/ Cursos de Agua	97	Horizonte 1	2
Agricultura/ Cursos de Agua	99	Relaves 1	1
Agricultura/ Cursos de Agua	159	Relave	2
Agricultura/ Cursos de Agua	253	Tranque de Relave	1
Agricultura/ Cursos de Agua	255	John Kennedy 1	2
Agricultura/ Cursos de Agua	370	California 2B	2
Agricultura/ Cursos de Agua	392	El Arenal	1
Agricultura/ Cursos de Agua	578	Llamuco	1
Agricultura/ Cursos de Agua	581	El Durazno	2
Agricultura/ Cursos de Agua	632	Esperanza 1	2
Agricultura/ Cursos de Agua	640	La Quiroga 1	1
Agricultura/ Cursos de Agua	641	John Kennedy 2	2
Agricultura/ Cursos de Agua	773	California 2A	2
Agricultura/ Cursos de Agua	776	Tunquén 5 (Ex El Almendro 5)	1
Agricultura/ Cursos de Agua	782	Esperanza 0	1
Agricultura/ Cursos de Agua	1004	Tranque de Relave	2
Agricultura/ Cursos de Agua	1048	Desconocido	1
Agricultura/ Cursos de Agua	1104	Desconocido	2
Agricultura/ Cursos de Agua	1105	Desconocido	1
Agricultura/ Cursos de Agua	1116	Tranque de Relave 1	1
Agricultura/ Cursos de Agua	1117	Tranque de Relave 2	2
Carretera	530	Tranque de Relave	1
Carretera	950	Desconocido	2
Carretera	1018	Desconocido	1
Carretera	1059	Chingoles 1	1
Carretera	1111	Ramayana 1	1
Carretera	1113	Chingoles 2	1
Carretera	1125	Desconocido	1

(*) En visita a terreno, se constató la presencia de una escuela a 340 [m] aguas abajo del depósito Tamaya 2, con una pendiente de terreno aproximada de 5%.

Capítulo 4

Metodología de Evaluación de Estabilidad Física

En base a la información recopilada y detallada en los capítulos anteriores, el nivel de estabilidad de los depósitos abandonados es incierto, lo que justifica el desarrollo de una metodología que permita estimar su condición de estabilidad física, lo cual se desarrolla y aplica en el presente capítulo.

4.1 Metodología de evaluación de estabilidad física

Para definir la metodología de evaluación de estabilidad física, se considera la recopilación, análisis y discusión de la información descrita en las secciones 2.4 y 3.4, con énfasis en las metodologías de evaluación de estabilidad física desarrolladas en el país a la fecha. Como se indica en la sección 2.4.3, la aplicabilidad de la totalidad de los mecanismos de falla a los depósitos abandonados en la región centro norte de Chile se limita al mecanismo de falla por inestabilidad de talud dada las condiciones climáticas del territorio de estudio.

Basado en la revisión de los parámetros críticos considerados en la metodología de Carvajal y Pacheco (2004), la Guía Metodológica desarrollada por el SNGM y el trabajo realizado por Carvajal (2018), se definen los parámetros críticos para depósitos abandonados. Además, se evalúan los posibles métodos de medición de cada uno de estos parámetros, para lo que se priorizan métodos de medición simple, dado el número de depósitos que se encuentran abandonados (173), y porque éstos no cuentan con recursos económicos que permitan invertir en métodos más sofisticados. La Tabla 4-1 indica los parámetros críticos considerados para los depósitos abandonados, incluyendo su justificación y los métodos simples de medición, los que pueden realizarse en terreno (T), laboratorio (L) o gabinete (G).

La metodología de evaluación de estabilidad física de depósitos abandonados en la región centro norte de Chile se muestra en el diagrama de la Figura 4-1.

Tabla 4-1: Parámetros críticos asociados a depósitos abandonados y sus métodos de medición.

Parámetros críticos	Justificación	Método simple de medición
Método de construcción	Identificar casos de construcción con método aguas arriba	Inspección visual (T)
		Recopilación de antecedentes (G)
Morfología de depósito (Monsalve 2020)	Definir contornos del depósito e identificar otros depósitos adyacentes	Inspección visual (T)
		Imágenes satelitales (G)
Altura de muro	Definir geometría de sección crítica para análisis de estabilidad	Imágenes satelitales (G)
		Levantamiento 3D(*) (T+G)
Inclinación del talud aguas abajo		GPS manual (T)
		Levantamiento topográfico (T)
Volumen embalsado	Dimensionar tamaño del depósito	Catastro SNGM (G)
		Levantamiento Catastral 1989-1990 (G)
		Estimación en terreno (T)
Altura de revancha	Establecer posibilidad de almacenamiento de aguas externas por la diferencia de altura entre muro y cubeta	Huinchita de mano (T)
		Levantamiento topográfico (T)
Resistencia al corte del relave	Definir parámetros de resistencia al corte de los materiales para análisis de estabilidad	Veleta (T)
		Ensayos de resistencia al corte en laboratorio (L)
Concavidad de la cubeta	Establecer la posibilidad de que la cubeta almacene aguas externas.	Levantamiento topográfico (T)
Granulometría del muro y el relave embalsado (contenido de finos)	Identificar materiales presentes	Análisis granulométrico (L)
Plasticidad de la fracción fina		Límites de Atterberg (L)
Nivel de compactación (densidad)	Definir densidad del depósito para análisis de estabilidad	Cono de arena (T)
		Proctor (L)
Velocidad de onda de corte del muro, el relave embalsado y el suelo de fundación	Determinar parámetros dinámicos para realizar estudios de riesgo sísmico	Métodos de ondas superficiales (T)
Período predominante de vibración del depósito y el suelo de fundación		Método de las razones espectrales H/V (T)
Posición del nivel freático o humedad	Establecer el nivel freático del depósito para análisis de estabilidad	Tomografía de resistividad eléctrica (T)
Tipo de suelo de fundación	Definir parámetros de resistencia al corte del suelo de fundación para análisis de estabilidad	Carta Geológica (G)
		Levantamiento Catastral (G)
Evidencia de deformación de muros (deslizamientos y grietas) y suelo de fundación	Evidenciar problemas de estabilidad en el pasado y caracterizar la situación actual de los depósitos.	Imágenes satelitales (G)
		Inspección visual (T)
		Levantamiento Catastral 1989-1990 (G)

Nota: (*) Incluye levantamientos con imágenes capturadas por un drone.

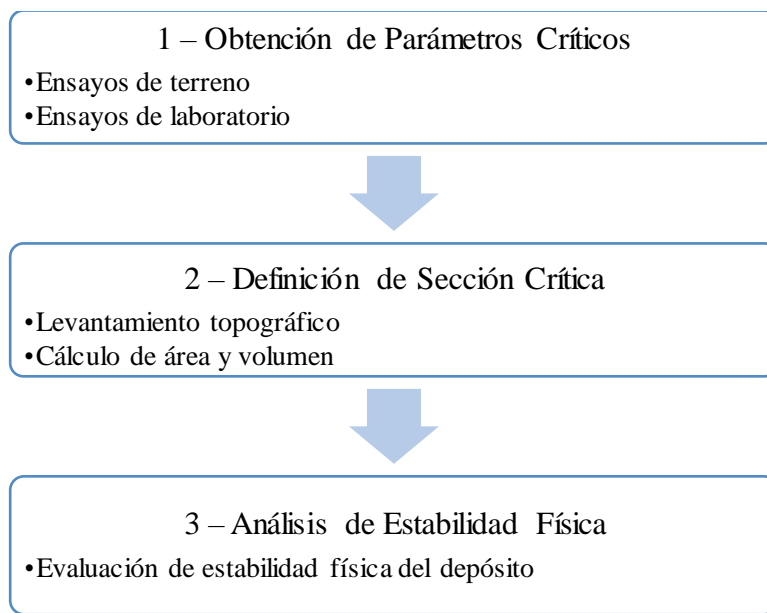


Figura 4-1: Diagrama de metodología para evaluación de estabilidad física de depósitos abandonados.

La Metodología se inicia con la obtención de los parámetros críticos (etapa 1 Figura 4-1), tanto en terreno como en laboratorio. En terreno se evalúan los niveles de compactación, la resistencia al corte, la posición del nivel freático y se realiza la caracterización dinámica a partir de los métodos de terreno recomendados en la Tabla 4-1. En laboratorio, se realizan los ensayos para determinación de humedad, contenido y caracterización del material fino y nuevamente ensayos de resistencia al corte con el fin de complementar los resultados obtenidos en terreno. Para determinar la resistencia al corte se recomiendan los ensayos de corte directo, triaxiales CIU y corte simple. Todos estos ensayos se realizan en muestras obtenidas en terreno y en base a los métodos indicados en la Tabla 4-1.

La siguiente etapa (etapa 2 en Figura 4-1) consiste en la realización del levantamiento topográfico que tiene como finalidad la obtención de la sección crítica del depósito y la determinación de su área basal y volumen embalsado. Para ello se debe determinar la altura y el ángulo de inclinación del muro cuya posible falla lleve consigo consecuencias mayores. Estos parámetros se pueden obtener directamente en terreno a través de GPS, mediante la captura y procesamiento de imágenes capturadas por un dron (denominado Levantamiento 3D en la Tabla 4-1), o por alguno de los otros métodos propuestos en la Tabla 4-1. Por su parte, el área y volumen se determinan mediante topografía, GPS o procesamiento del Levantamiento 3D. Los datos indicados por el Levantamiento Catastral 1989 – 1990 y el Catastro del SNGM para estos parámetros son utilizados solo como referencia.

Una vez definidas las secciones críticas y los parámetros resistentes del material, se procede a realizar el análisis de estabilidad (etapa 3 Figura 4-1) mediante métodos de equilibrio límite estáticos y pseudo-estáticos, de los cuales se obtendrá finalmente una evaluación de estabilidad física mediante un factor de seguridad (FS).

4.2 Aplicación de la metodología

En esta sección se presenta la aplicación de la metodología propuesta a un grupo de depósitos de la Región de Coquimbo.

4.2.1 Selección de depósitos

La aplicación de la metodología se lleva a cabo en un número acotado de depósitos abandonados. La selección de los depósitos analizados consideró:

- Depósitos cercanos que se puedan visitar en terreno durante 4 días.
- Depósitos prioritarios definidos en la Tabla 3-8.
- Depósitos con fácil acceso.
- Volumen del depósito.

A partir de estos criterios, se seleccionaron 7 depósitos ubicados en la Región de Coquimbo, que se muestran en la Tabla 4-2. Es importante mencionar que no todos ellos corresponden a depósitos prioritarios, dado que se debía considerar los otros factores mencionados. Se destaca también que durante el terreno fue posible visitar otros 11 depósitos (Tabla 4-3), de los cuales se obtuvieron dimensiones generales e imágenes en detalle.

Tabla 4-2: Depósitos visitados en la Región de Coquimbo.

ID SNGM	Nombre Instalación	Provincia	Comuna
87	Tamaya 2	Limarí	Ovalle
1.022	Desconocido	Elqui	Andacollo
231	Los Leones 1	Elqui	Andacollo
-	Depósito A	Limarí	Punitaqui
-	Depósito B	Limarí	Punitaqui
773	California 2A	Choapa	Illapel
370	California 2B	Choapa	Illapel

Tabla 4-3: Otros 11 depósitos visitados en la Región de Coquimbo de los cuales se obtienen observaciones generales.

ID SNGM	Nombre Instalación	Provincia	Comuna
243	Tranque de Relave	Elqui	Andacollo
253	Tranque de Relave	Elqui	Andacollo
726	Tranque de Relave 1-2	Elqui	Andacollo
255	John Kennedy 1	Elqui	Andacollo
641	John Kennedy 2	Elqui	Andacollo
1.004	Tranque de Relave	Elqui	Andacollo
1.068	Desconocido	Limarí	Punitaqui
1.073	Depósito 1	Limarí	Combarbalá
967	Depósito 2	Limarí	Combarbalá
1.074	Depósito 3	Limarí	Combarbalá
1.047	Hernández 2	Choapa	Illapel

Los depósitos que no presentan ID corresponden en su conjunto a los depósitos Delirio 1 y Delirio 3 (Figura 4-2); sin embargo, sus límites fueron redefinidos. Esto se debe a que las observaciones realizadas en terreno indican que Delirio 1 está conformado por dos depósitos de distintos materiales y que Delirio 3 es el material de una falla de una parte de lo que se define como Delirio 1. Por tal motivo, se procede a identificar los depósitos según sus materiales como Depósito A y Depósito B (Figura 4-3).



Figura 4-2: Delirio 1 y Delirio 3 según el Catastro SNGM 2019.

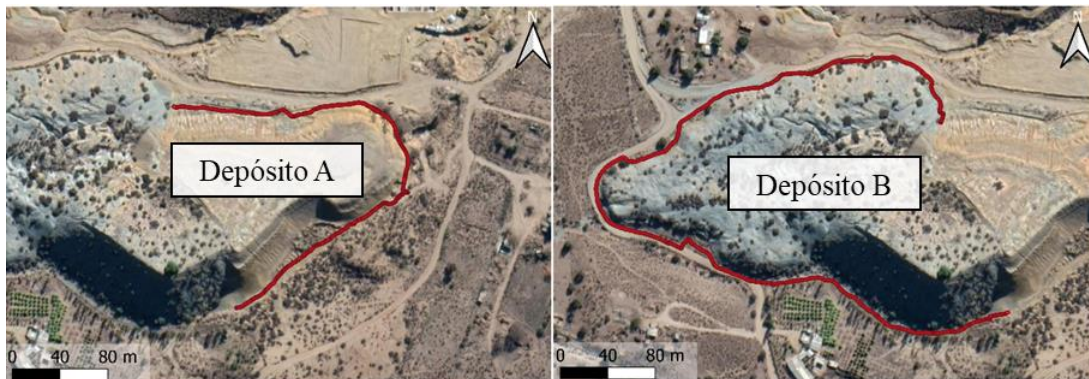


Figura 4-3: Identificación de Depósito A y Depósito B utilizados para el análisis completo. Los contornos de cada depósito de destacan en rojo.

4.2.2 Obtención de parámetros críticos

4.2.2.1 Ensayos en terreno

Los ensayos de terreno tienen como finalidad definir la densidad del depósito, la resistencia al corte y las propiedades dinámicas, como período predominante de vibración y perfil de velocidades de onda de corte. Para llevar a cabo estas mediciones se utilizan los métodos propuestos en la Tabla 4-1, haciendo uso de un cono de arena, una pesa digital, una veleta de corte y cuatro sismógrafos Tromino, los cuales se pueden observar en la Figura 4-4. La veleta de corte utilizada es el modelo GEO536 de la marca Geotechnics LTD., con un aspa de 19 [mm].



Figura 4-4: Instrumentos utilizados para ensayos de terreno.

Previo a comenzar con las mediciones, se realiza un recorrido para observar el depósito en su totalidad y con ello definir de forma preliminar:

- Puntos representativos para ensayo de densidad y determinación de resistencia al corte (cono de arena y veleta, respectivamente).
- Disposición de sensores Tromino tanto en la base del depósito como en la cubeta.

Posteriormente, se procede a realizar cada medición, siguiendo los procedimientos que se detallan a continuación.

Densidad in-situ – Cono de arena

En cada depósito evaluado, se identifican las zonas características, idealmente 2: una ubicada en la cubeta del depósito y otra en el muro, o bien dos que presentan diferencias en los relaves observados.

Para medir la densidad de las zonas seleccionadas se utiliza el cono de arena, según indica la norma ASTM-D1556-15 (2008). El detalle particular de la metodología llevada a cabo en terreno se detalla en el Anexo D.

Una vez aplicada la metodología en cada punto de un depósito, la información se procesa obteniendo como resultado el peso unitario [kN/m^3]. Los valores para cada depósito son indicados en la Tabla 4-4. Es importante indicar que para el depósito Tamaya 2 no se efectuaron pruebas de densidad.

Tabla 4-4: Resultados de peso unitario con cono de arena para 6 depósitos visitados.

Depósito	Cono 1 γ_t [kN/m^3]	Cono 2 γ_t [kN/m^3]	Adoptado γ_t [kN/m^3]
Desconocido (ID 1.022)	13,9	-	14
Los Leones 1 (ID 231)	12,0	15,4	14
Depósito A (Delirio)	17,0	16,9	17
Depósito B (Delirio)	14,5	13,4	14
California 2B (ID 773)	14,4	-	15
California 2A (ID 370)	17,4	-	17

Resistencia al corte – Veleta




En el mismo lugar donde se realiza el cono de arena, se efectuaron mediciones de resistencia al corte mediante la veleta. Para ello se inserta la veleta perpendicularmente a una de las paredes del agujero y una vez fija se procede a rotar uniformemente hasta la falla del material. Luego, se registra la máxima deflexión registrada por el dial lo que en conjunto con la calibración del equipo permite obtener la resistencia al corte. El procedimiento se indica en la Figura 4-5.







Figura 4-5: Procedimiento para el uso de veleta.

La Tabla 4-5 da a conocer los valores representativos de resistencia al corte determinados para cada depósito visitado.

Tabla 4-5: Resultados resistencia al corte – veleta para los 7 depósitos visitados.

Depósito	Material	Div. Veleta [-]	Resistencia al corte [kPa]
Tamaya 2 (ID 87)		34	53
Desconocido (ID 1.022)		45	70
Los Leones 1 (ID 231)		84	131

Depósito	Material	Div. Veleta [-]	Resistencia al corte [kPa]
Depósito A (Delirio)		117	183
Depósito B (Delirio)		90	141
California 2B (ID 773)		140	219
California 2A (ID 370)		44	69

Caracterización dinámica

La caracterización dinámica a través de los sensores Tromino tiene como fin definir un perfil de velocidades de onda corte y los periodos predominantes de vibración de los depósitos. Sin bien estos datos no se utilizan para el análisis, sirven como antecedente para futuros estudios de amenaza sísmica.

Los sensores Tromino se disponen en 2 configuraciones. Primero, se ubican 4 sensores sobre la cubeta (cuadrados rojos en Figura 4-6) y luego 2 de ellos quedan fijos y otros 2 se ubican al pie del depósito (cuadrados azules en Figura 4-6).

La instalación de los sensores Tromino se realizó en un agujero de 30 [cm], aproximadamente, para evitar la influencia del viento en los registros (ver Figura 4-6). Además, se tuvo el cuidado de que la distancia entre equipos no superara la altura estimada del depósito analizado, con el fin de resolver longitudes de las ondas más cortas que la altura del depósito.



Figura 4-6: Ubicación e instalación de Trominos, Depósito A.

Los períodos predominantes de vibración se calcularon con el software Geopsy (Wathelet 2005), considerando ventanas de 30 [s] y los parámetros indicados en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6: Parámetros de selección de ventanas.

Parámetro	Valor
STA	1 [s]
LTA	30 [s]
Min STA/LTA	0,1 – 0,2
Max STA/LTA	2,5

Los perfiles de velocidad de onda de corte se obtuvieron a partir de la inversión de curvas de dispersión construidas con el método de las correlaciones cruzadas (Saez, 2016). La inversión se realizó utilizando el software Geopsy, considerando una densidad uniforme de 2.000 [kN/m³], 2 capas y un semiespacio, cuyos espesores, velocidades de onda de corte V_s y compresional V_p se muestran en la Tabla 4-7.

Tabla 4-7: Rangos de parámetros para la inversión de perfiles de V_s en Geopsy.

Capa	Espesor [m]	V_s [m/s]	V_p [m/s]
1	1 – 10	20 – 500	50-7.500
2	1 – 100	50 – 700	
Semiespacio	-	150 – 3.500	

Los periodos predominantes de vibración (T_0) y las velocidades de onda de corte (V_s) resultantes se muestran en la Tabla 4-8. La altura reportada corresponde a la calculada en terreno mediante GPS. Las gráficas de los perfiles de velocidad de onda de corte para cada depósito se muestran en el Anexo E.

Los registros en el depósito ID 1.022 presentaron anomalías de amplitud lo que no permitió analizarlos.

Tabla 4-8: Resultado de perfiles de velocidad para los 7 depósitos visitados.

Depósito	Estrato	Potencia Estrato [m]	V_s [m/s]	f_0 [Hz]	T_0 [s]	Altura depósito [m]
Tamaya 2 (ID 87)	1	2	205	3,3	0,3	24
	2	14	236			
	3	Semiespacio	409			
Desconocido (ID 1.022)	-	-	-	-	-	-
Los Leones 1 (ID 231)	1	7	193	3,7	0,3	14
	2	1	408			
	3	Semiespacio	443			
Depósito A (Delirio)	1	1	235	2,9	0,3	27
	2	19	243			
	3	Semiespacio	2.582			
Depósito B (Delirio)	1	1	146	2,4	0,4	21
	2	9	222			
	3	Semiespacio	342			
California 2B (ID 773)	1	2	133	5,0	0,2	16
	2	6	173			
	3	Semiespacio	244			
California 2A (ID 370)	1	1	160	3,4	0,3	16
	2	12	175			
	3	Semiespacio	3.480			

4.2.2.2 Ensayos de laboratorio

Los ensayos de laboratorio se realizan con el objetivo de definir la humedad, cohesión (c) y ángulo de fricción interna (ϕ) de las muestras de relaves obtenidas en terreno. Esto se llevó cabo por medio de ensayos de contenido de humedad y de resistencia al corte en base a lo propuesto en la sección 4.1 y las metodologías de medición indicadas en la Tabla 4-1. El material utilizado para cada ensayo corresponde al material extraído en el ensayo del cono de arena, a excepción del depósito Tamaya 2 para el cual se trabaja con una muestra directa de terreno.

Contenido de humedad

El ensayo de humedad requiere el uso de una pesa de precisión de 0,01 [gr]. Para realizar la medición, se utilizaron 3 muestras de aproximadamente 150 [gr] del relave extraído en los depósitos visitados. Estas muestras fueron pesadas y llevadas al horno alrededor de 48 horas, después de lo cual se vuelven a pesar y se calcula el contenido de humedad. La Figura 4-7 muestra el material utilizado en el proceso de medición.



Figura 4-7: Parte del proceso de medición del contenido de humedad.

Los resultados obtenidos para cada muestra (M1, M2 y M3) de cada cono y depósito se muestran en la Tabla 4-9.

Tabla 4-9: Resultados de humedad para los 7 depósitos visitados.

Depósito	Cono 1 ω [%]			Cono 2 ω [%]		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3
Tamaya 2 (ID 87)	0,7	0,8	0,5	-	-	-
Desconocido (ID 1.022)	1,3	1,3	1,3	-	-	-
Los Leones 1 (ID 231)	5,1	5,1	5,1	12,9	13,3	11,9
Depósito A (Delirio)	16,7	17,2	15,0	22,6	24,8	26,4
Depósito B (Delirio)	1,0	1,0	0,9	7,2	5,3	7,8
California 2B (ID 773)	24,1	31,7	24,9	-	-	-
California 2A (ID 370)	17,0	13,8	18,7	-	-	-

Resistencia al corte – Corte simple

Para obtener los parámetros de resistencia al corte, tanto la cohesión como el ángulo de fricción interna, se proponen 3 ensayos según la metodología propuesta en la sección 4.1: triaxial CIU, corte directo y corte simple. Idealmente se debe realizar un ensayo Triaxial CIU

con el fin de obtener parámetros resistentes efectivos; sin embargo, por la capacidad de transporte, las muestras extraídas en terreno fueron acotadas. Esto obligó a la realización de ensayos que utilicen la cantidad mínima de material, por lo que el ensayo seleccionado corresponde al de corte simple en base a la norma ASTM D6528-17 (2017), para una probeta de 2 [cm] de altura y 7 [cm] de diámetro.

Para la ejecución, se utilizaron muestras remoldeadas a partir del material extraído en terreno. Dado que el ensayo de corte simple tiene limitante en el tamaño máximo de partículas, es necesario tamizar las muestras en estado natural por la malla #4 (4.75 [mm]) antes de construir la probeta. La humedad de los relaves en algunos casos genera grumos que son desintegrados a través de un mazo previo al tamizado. Una vez terminado el proceso, las muestras son guardadas en bolsas selladas. El procedimiento general se ejemplifica en la Figura 4-8, donde la primera imagen corresponde a la desintegración de los grumos, en la segunda se observa el proceso de tamizado y el material retenido en la malla, el cual corresponde a los grumos que no se pueden disolver dada la plasticidad del material en este caso ensayado, y por último la imagen final muestra el material tamizado con el cual se ensayará.

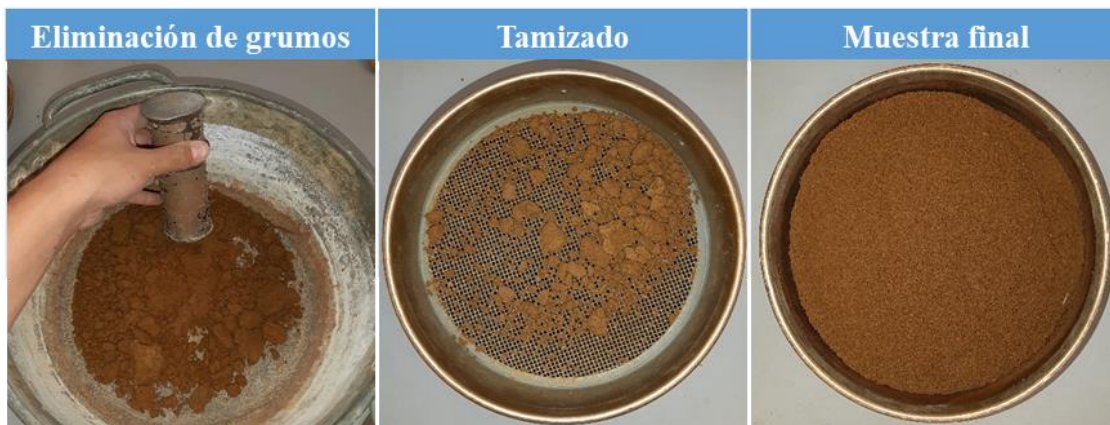


Figura 4-8: Procedimiento de tamizado, Depósito A.

Una vez realizado el proceso de tamizado, se vuelve a realizar un ensayo de humedad a la muestra final ya que durante el proceso de tamizado se pudieron generar cambios. En el caso que la humedad hubiese disminuido, se le agrega la cantidad de agua necesaria para llegar a la humedad con que se desea ensayar; posteriormente, se homogeniza la muestra evitando formar grumos.

La confección de la probeta considera, en primer lugar, fijar la membrana al disco poroso por medio de o-rings (Figura 4-9, A) y agregar los anillos concéntricos y la abrazadera que impedirá el desplazamiento radial durante la consolidación (Figura 4-9, B-C). Luego, se vierte el material a ensayar y se compacta en 3 capas hasta alcanzar la densidad de confección (Figura 4-9, D-E). Seguido de ello se instala el disco poroso vertical y se fija por medio de la membrana y los o-rings (Figura 4-9, F-G). Finalmente, la probeta es instalada en el equipo (Figura 4-9, H).

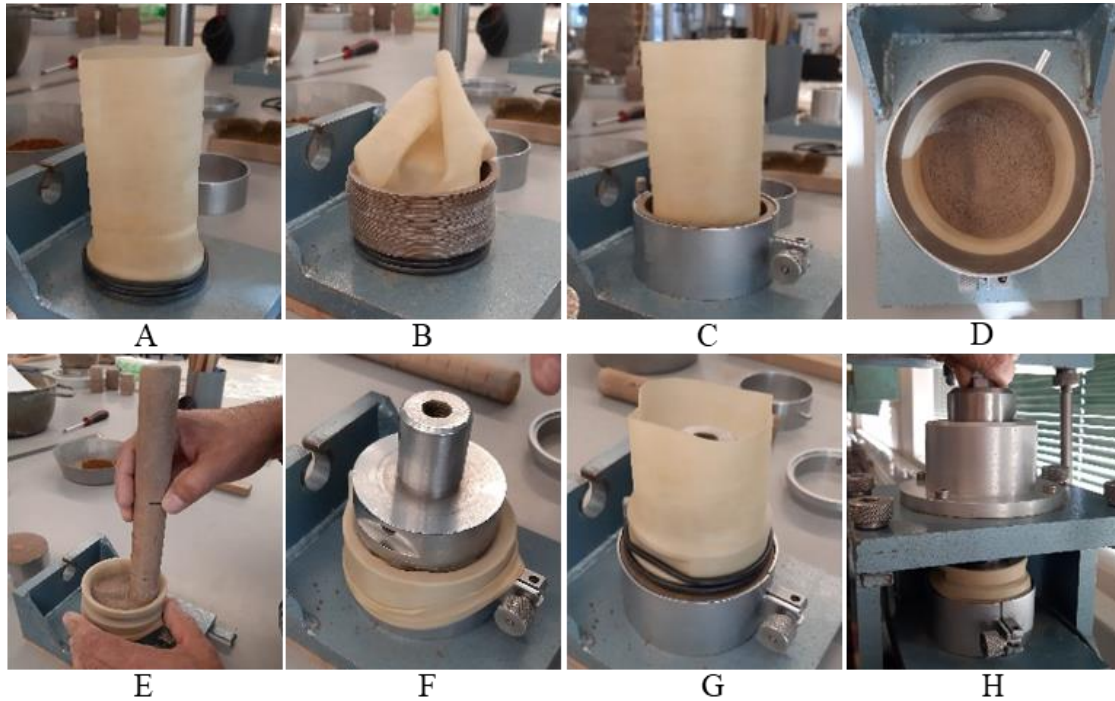


Figura 4-9: Preparación y montaje de probeta ensayo de corte simple, Depósito B.

Una vez montada la probeta en el equipo, se ajustan los diales y se comienza con el proceso de consolidación de la muestra. Esta etapa del ensayo se realiza con el fin de estabilizar la muestra dada la presencia de material plástico. Durante el ensayo se registra y grafica en el tiempo el desplazamiento vertical indicado por el dial. Se da fin al ensayo cuando la deformación se estabiliza.

Terminado el proceso de consolidación se da paso al ensayo de corte simple, para lo cual se quita la abrazadera y se comienza a aplicar el esfuerzo de corte. Se registran los valores de desplazamiento horizontal y vertical, y al mismo tiempo se van obteniendo los gráficos de esfuerzo y deformación de corte. Se finaliza el ensayo cuando el esfuerzo de corte se estabiliza.

Los ensayos de corte simple se realizaron exclusivamente para los Depósitos A y B (Delirio). Para el caso de Depósito A se realizaron 3 ensayos a esfuerzos verticales de 0,5, 1 y 2 [kgf/cm²] con una humedad del 16% y un peso específico de 17 [kN/m³]. Para el Depósito B, solo fue posible realizar un ensayo a un esfuerzo vertical de 0,5 [kgf/cm²] con la humedad natural de la muestra de 1% y un peso específico de 14 [kN/m³]. Las humedades y pesos unitarios utilizados para la confección de probetas en ambos depósitos corresponden a los valores representativos obtenidos de ensayos en terreno y laboratorio, cono de arena y contenido de humedad, respectivamente.

El proceso de consolidación para las muestras analizadas se muestra en la Figura 4-10 para el caso de Depósito A y en la Figura 4-11 para el Depósito B.

A partir de los resultados obtenidos se compara la altura (ΔH) y el peso unitario entre las probetas confeccionadas y las obtenidas post consolidación, valores que se muestra en la Tabla 4-10.

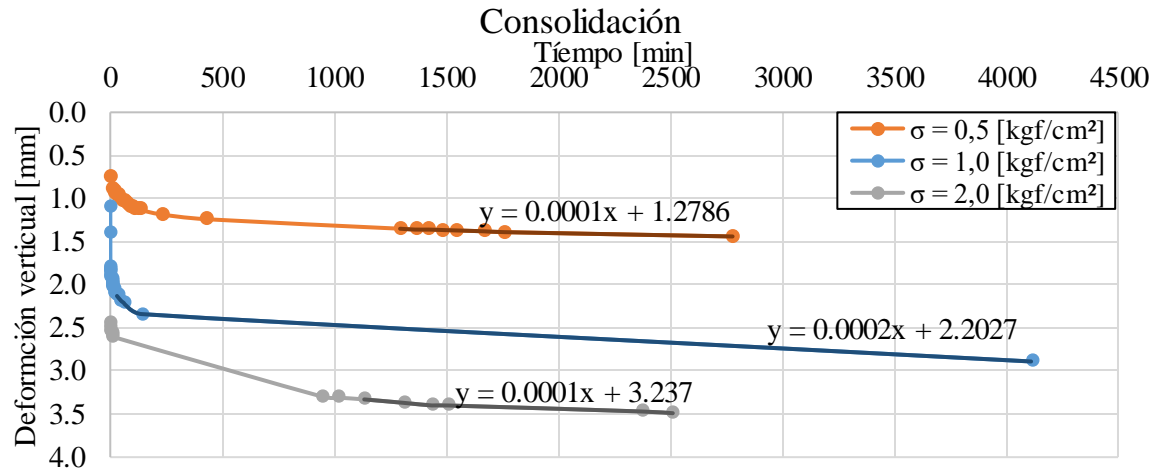


Figura 4-10: Proceso de consolidación para las muestras ensayadas del Depósito A.

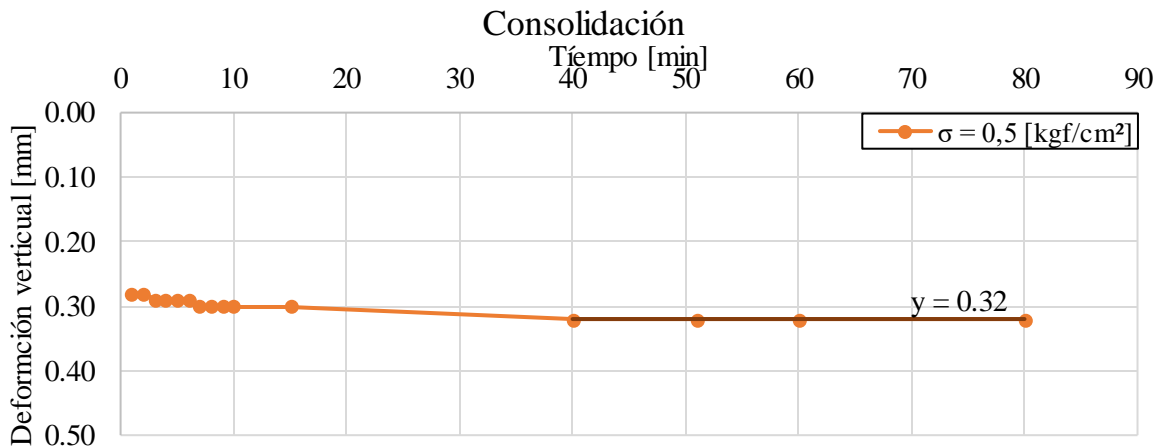


Figura 4-11: Proceso de consolidación para la muestra ensayada del Depósito B.

Tabla 4-10: Comparación de alturas y pesos unitarios de confección y post consolidación.

Depósito	σ [kgf/cm ²]	ΔH entre confección y post consolidación [mm]	Peso unitario de confección γ_t [kN/m ³]	Peso unitario post consolidación γ_t [kN/m ³]
Depósito A	0,5	1,44	17	17,5
	1	2,89	17	18,9
	2	3,49	17	19,6
Depósito B	0,5	0,32	14	14,2

A partir de los resultados indicados en la Tabla 4-10, en particular a los valores obtenidos para un esfuerzo vertical de 0,5 [kgf/cm²], se observa que el material del Depósito A es más denso, pero más compresible, dado que presenta menores diferencias de ΔH que lo obtenido para el Depósito B. Esto se atribuye a la presencia de material fino en el Depósito A.

Por su parte, las gráficas de esfuerzo y deformación asociadas al ensayo de corte simple se observan desde la Figura 4-12 a la Figura 4-14 para el Depósito A, y para el Depósito B desde la Figura 4-15 a la Figura 4-17. Dado que para este último caso solo se pudo realizar un ensayo, se asume una cohesión nula dado que el material es arenoso sin finos plásticos.

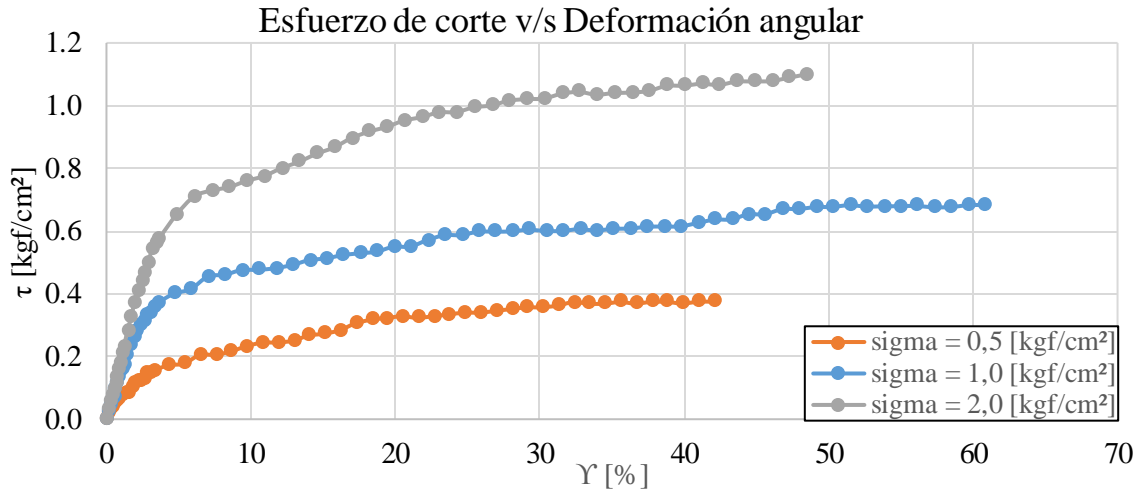


Figura 4-12: Gráfico esfuerzo de corte v/s deformación angular para el Depósito A.

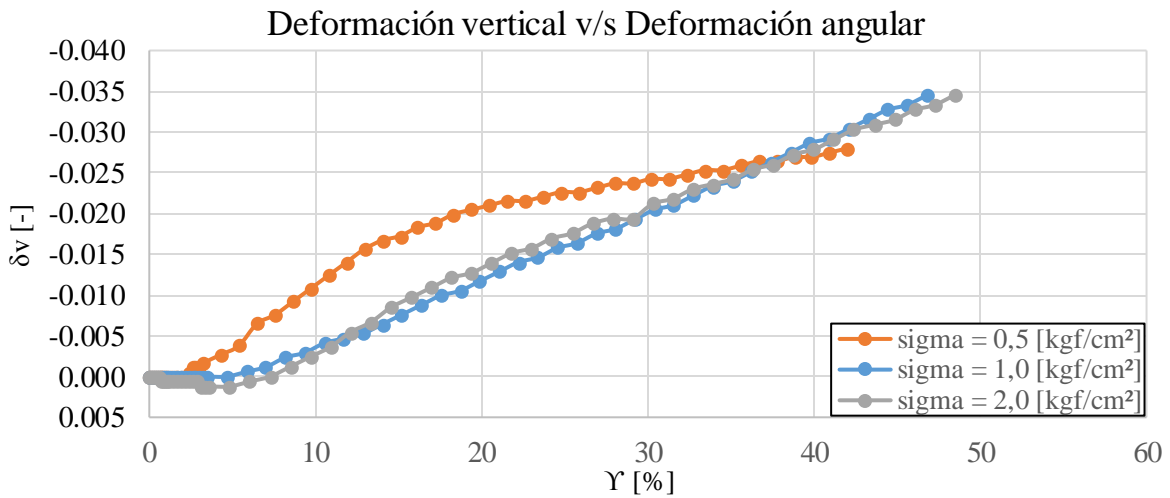


Figura 4-13: Deformación vertical v/s deformación angular para el Depósito A.

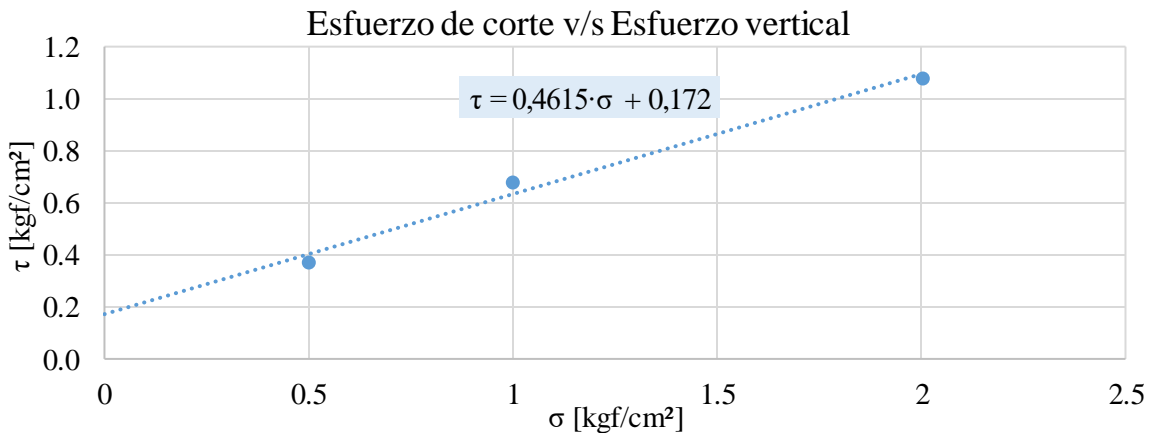


Figura 4-14: Esfuerzo de corte v/s Esfuerzo vertical, Depósito A.

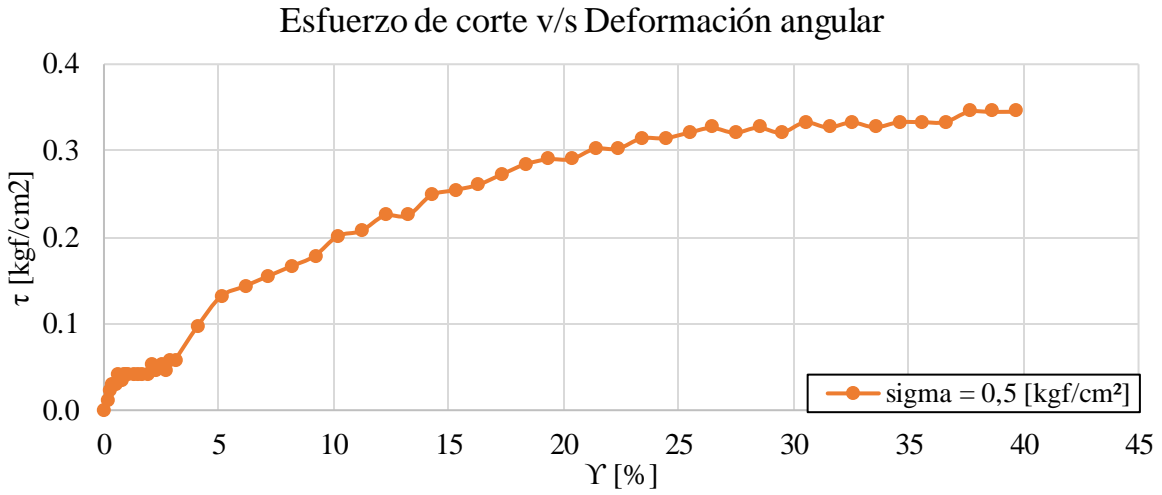


Figura 4-15: Gráfico esfuerzo de corte v/s deformación angular para el Depósito B.

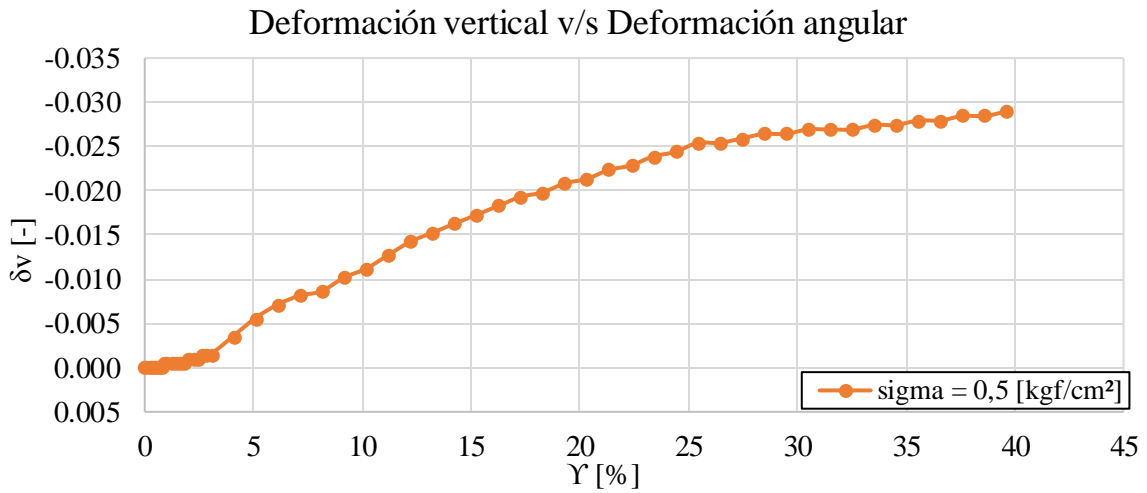


Figura 4-16: Deformación vertical v/s deformación angular para el Depósito B.

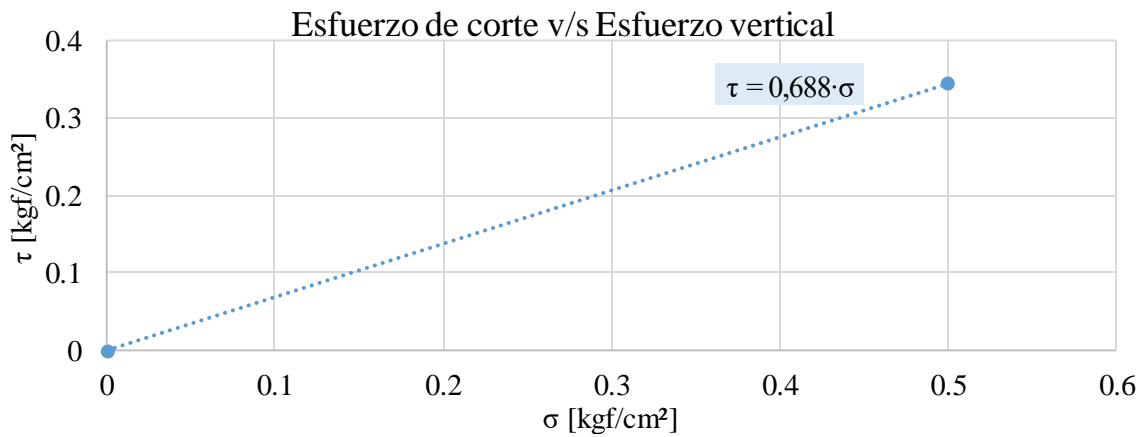


Figura 4-17: Esfuerzo de corte v/s Esfuerzo vertical, Depósito B.

La Figura 4-18 muestra la disposición de los anillos y el estado de las muestras al terminar el ensayo. Es importante indicar que la muestra del Depósito A para una carga de 2 [kgf/cm²] se fraccionó al verter la muestra, una vez finalizado el ensayo, en el receptáculo, por tanto, su fractura no se relaciona con el ensayo.

Los resultados de este ensayo arrojan la cohesión y el ángulo de fricción interna de los materiales ensayados. La Tabla 4-11 muestra los parámetros adoptados para cada depósito junto con la humedad y el peso unitario de confección de las muestras.

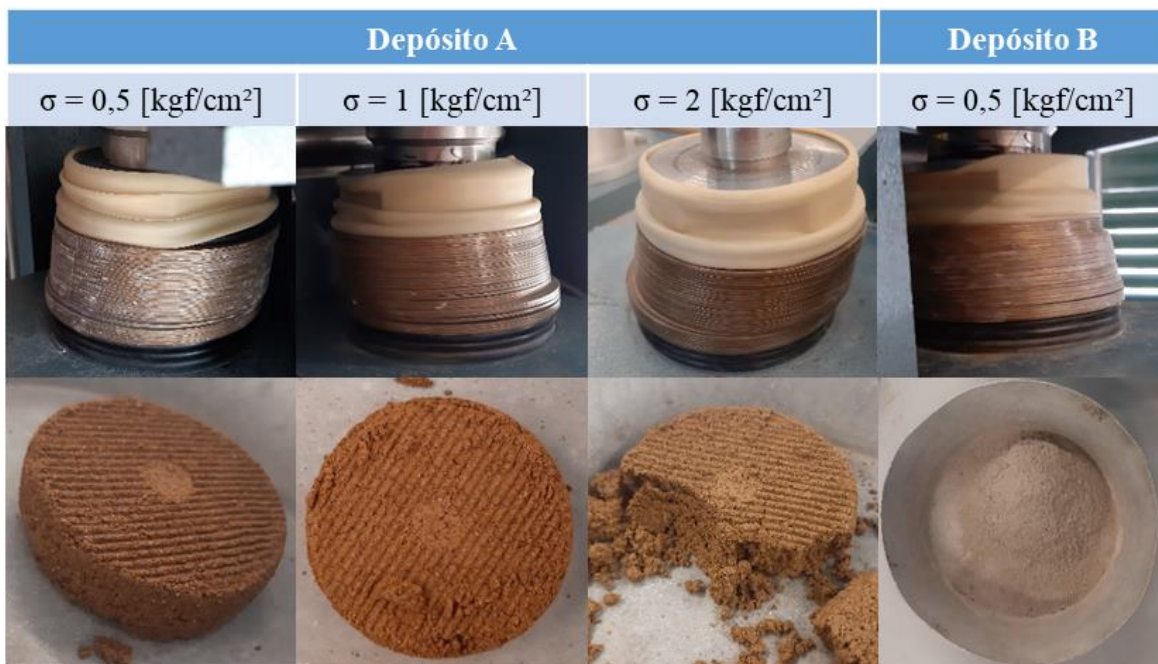


Figura 4-18: Disposición de anillos y estado de muestras al finalizar el ensayo para Depósito A y B.



Tabla 4-11: Resultados cohesión y ángulo de fricción – corte simple para Depósito A y B.

Depósito	Humedad [%]	Peso unitario de confección γ_t [kN/m ³]	Ángulo de fricción interna ϕ [°]	Cohesión c [kPa]
Depósito A	16	17	25	17
Depósito B	1	14	35	0

4.2.3 Levantamiento topográfico

El levantamiento topográfico tiene como finalidad determinar áreas, volúmenes y secciones críticas de los depósitos visitados. En este caso, de los métodos propuestos en la Tabla 4-1, se hace uso de un GPS y un Drone cuyas imágenes y procesamiento permiten la generación de un levantamiento en 3D. Los modelos y características generales de los equipos utilizados se indican en la Tabla 4-12.

Tabla 4-12: Equipos utilizados para levantamiento topográfico.

Drone	
	Modelo: DJI Phantom 3 PRO
	Características Generales: <ul style="list-style-type: none"> - Sistema de posicionamiento satelital GPS. - Control por medio de aplicación DJI GO. - Cámara con sensor de 12.4 megapíxeles. - Estabilización en 3 ejes.
GPS Manual	
	Modelo: Garmin GPSMAP 64sc
	Características Generales: <ul style="list-style-type: none"> - Cámara de 8 megapíxeles con georreferencias automáticas. - Receptor GPS de alta sensibilidad. - Brújula de tres ejes con altímetro barométrico. - Precisión entre 1 a 3 [m].

Antes de iniciar el levantamiento, se realiza una caminata para observar la zona óptima de vuelo para el Drone y definir los límites geométricos del depósito, contorno y alturas características. Esto último para identificar a priori zonas de difícil acceso.

El detalle de las metodologías llevadas a cabo con cada instrumento se detalla a continuación.

4.2.3.1 Fotografía aérea – Drone

La zona óptima para realizar el vuelo del drone corresponde a aquella que, fijado un pivote, un radio y una altura permita abarcar la totalidad del depósito. Sin embargo, existen depósitos cuyo radio representativo supera los alcances del drone. En estos casos, se realiza necesariamente otro vuelo en cuya área a fotografiar se incluye parte de la zona previamente registrada, esto con el motivo de poder traslapar la información entre ambos vuelos.

Una vez definida la zona se procede a preparar el vuelo del drone mediante la aplicación DJI GO para iPad. Se vuela el drone hasta el pivote definido alcanzando una altura que permita observar la totalidad del depósito (si el rango del drone lo permite, si no, realizar dos vuelos como se explica anteriormente). Posteriormente, se activa la función *Point of interest* definiendo el radio de vuelo y se comienza a sobrevolar el depósito en una trayectoria circular en torno al pivote. Mientras el drone realiza el vuelo, se van obteniendo fotografías de forma manual. Una fotografía al inicio de la operación del drone se muestra en la Figura 4-19.



Figura 4-19: Inicio de operación del dron.

Antes de comenzar el vuelo, se recomienda registrar mediante GPS el punto inicial del vuelo del dron, ya que la altura que registra en el resto de las imágenes es referencial al punto de despegue.

A modo de ejemplo la Figura 4-20 muestra una secuencia resumida de las fotografías obtenidas con el dron en el Depósito A.



Figura 4-20: Ejemplo de secuencia resumida de fotografías con dron, Depósito A.

4.2.3.2 GPS

Previo al uso del GPS se configura la frecuencia de la toma de datos, la cual puede definirse en base a un intervalo de tiempo o distancia. Para este estudio, se utiliza la frecuencia distancia con un intervalo de 0,5 [m], lo que se ajusta desde el menú *Configuraciones > Track Manager*.

Para llevar a cabo el registro, se camina portando el GPS por toda la ruta que se desea analizar. Por tal motivo, es importante identificar los límites del depósito y sus alturas características previamente, ya que como se mencionó algunas zonas pueden resultar de difícil acceso.

El registro de las rutas se realiza por zonas identificadas con letras: A – B – C. La ruta A se realiza sobre la superficie de mayor altura en el depósito que corresponde al coronamiento del muro. La ruta B a la segunda superficie con mayor altura y la ruta C a la de menor elevación, incluyendo la base del depósito. Así en el caso de depósitos con dos escalones, como es el caso de Delirio 1, las rutas serán A, B y C. En cambio, para depósitos que solo presentan una altura característica se tienen dos rutas: A y B. Todo esto con el fin de ordenar la información y tener claridad de las cotas respectivas a cada zona.

Para iniciar el registro, se selecciona desde el menú la opción *Track Manager* y una vez dispuesto en el punto definido se presiona *Inicio*. Con ello se da comienzo a la caminata que debe iniciar y finalizar en el mismo punto, siguiendo las rutas definidas.

Una vez terminada una zona se selecciona en el GPS la opción *Finalizar* lo que desplegará el menú para guardar, ingresando como nombre las letras ya descritas con un identificador para el depósito analizado.

Además, se hace uso del GPS para marcar puntos en los que se realizaron otras mediciones, como es el caso de la ubicación de Trominos y conos de arena, además de otros puntos de interés como calicatas, pozos, instrumentos y observación de grietas.

Los archivos registrados a través del GPS son guardados en formato GPX. Estos son importados al programa QGIS que permite visualizar los resultados. Ejemplo de ello se muestra en la Figura 4-21, a su izquierda las rutas y a la derecha los puntos de interés.

El resto de rutas y puntos de interés para los depósitos visitados se observa en el Anexo F.

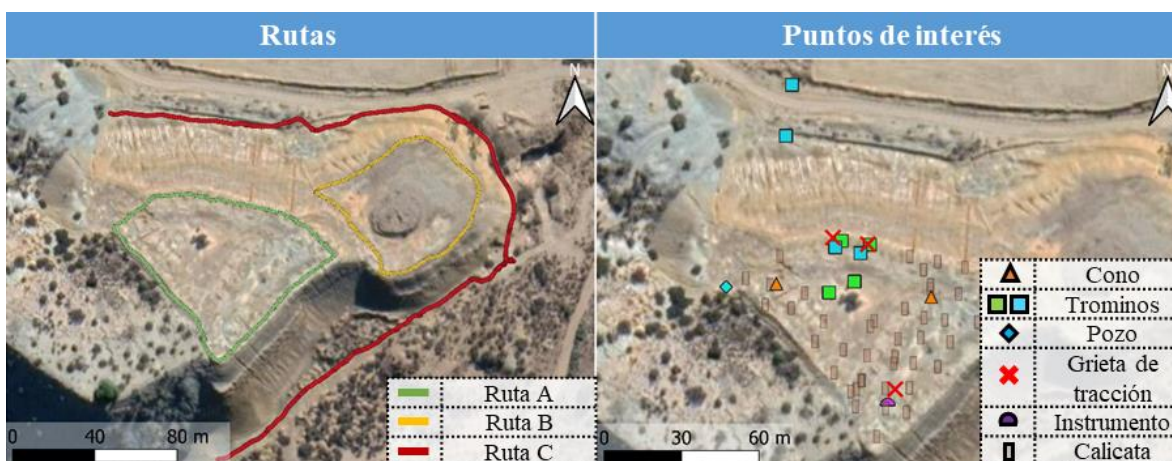


Figura 4-21: Datos obtenidos por GPS, Depósito A.

4.2.3.3 Generación del levantamiento topográfico

El procedimiento llevado a cabo para generar el levantamiento topográfico cuenta con 4 etapas que permiten definir secciones críticas y determinar área y volumen de los depósitos en estudio. De forma general, la Tabla 4-13 describe cada una de las etapas, para las cuales se hace uso de los softwares MATLAB, QGIS y 3DF Zephyr Aerial. Cada una de las etapas se desarrolla en detalla en el Anexo G.

Tabla 4-13: Descripción general de las etapas para la generación del levantamiento topográfico.

Etapa	Descripción general
Generación de modelo 3D	Las imágenes capturadas por el drone son cargadas en el programa 3DF Zephyr Aerial y se genera el modelo en 3D.
Georreferenciación del modelo	A partir de la información obtenida por el GPS y los puntos destacados en terreno, se generan puntos de control en el modelo 3D que permiten escalar, trasladar y rotar el modelo al sistema global utilizado.

Etapa	Descripción general
Área y volumen	Se acota la zona de estudio, dejando fuera todo lo que no pertenece al depósito. Luego, por medio de las herramientas del programa 3DF Zephyr Aerial, se calcula el área y volumen de del depósito en estudio.
Sección transversal crítica	Se acota la zona de estudio a las zonas con mayor altura estimada visualmente y se definen 4 posibles secciones críticas. Para ellas se calcula altura y pendiente, la más desfavorable es adoptada. Para este último caso se calcula además la pendiente del suelo de fundación.

Como resultado, se tienen los modelos en 3D para los 7 depósitos visitados, los cuales se muestran en la Figura 4-22. Las áreas y volúmenes obtenidos para cada caso se indican en la Tabla 4-14.

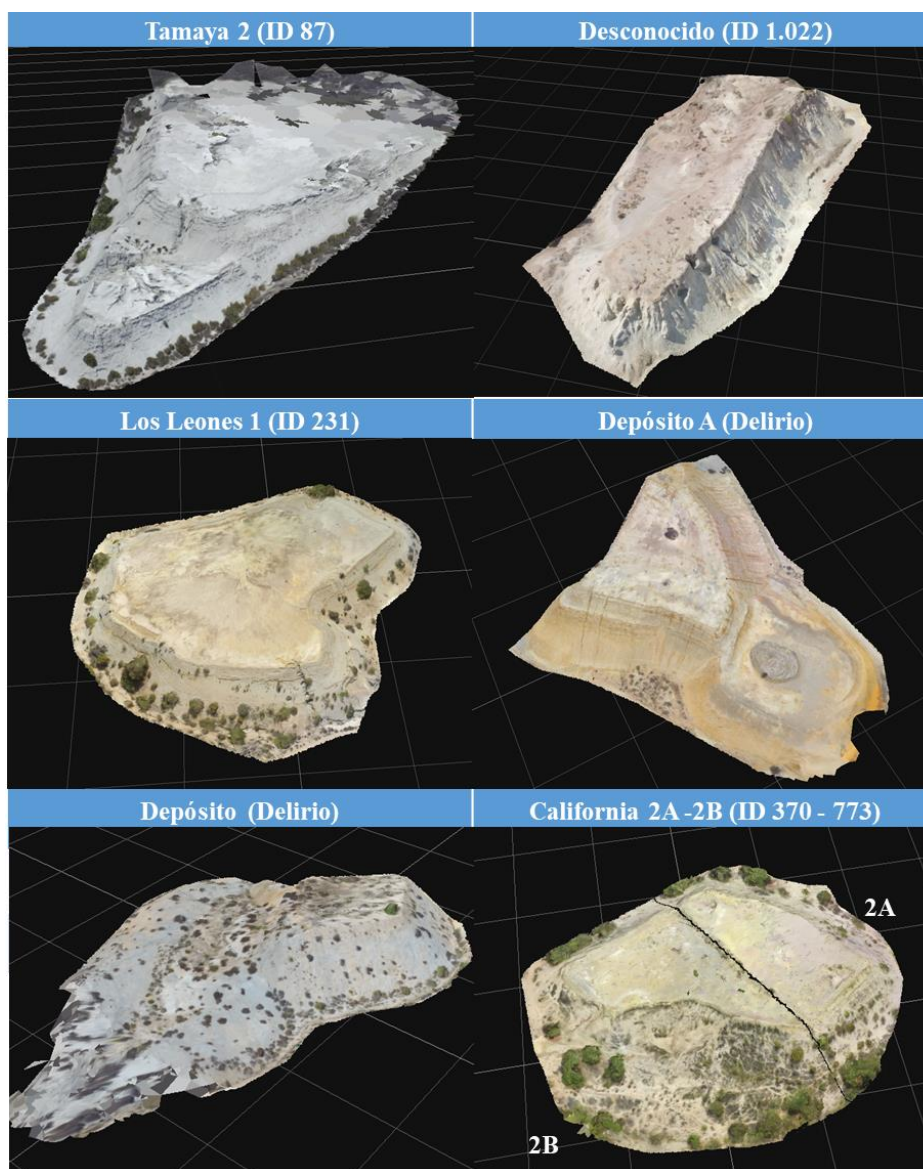


Figura 4-22: Modelos 3D generados para los 7 depósitos visitados.

Tabla 4-14: Resultados área y volumen calculados en forma automática por 3DF Zephyr Aerial para los 7 depósitos visitados.

Depósito	Área [m ²]	Volumen [m ³]
Tamaya 2 (ID 87)	56.843	441.209
Desconocido (ID 1.022)	11.774	77.865
Los Leones 1 (ID 231)	14.234	104.315
Depósito A (Delirio)	23.309	271.036
Depósito B (Delirio)	51.618	657.641
California 2B (ID 773)	7.272	55.977
California 2A (ID 370)	11.385	66.607

Para el caso de las secciones transversales críticas solo se analizan los Depósitos A y B, las cuales se destacan en la Figura 4-23, y cuyos resultados se resumen en la Tabla 4-15.

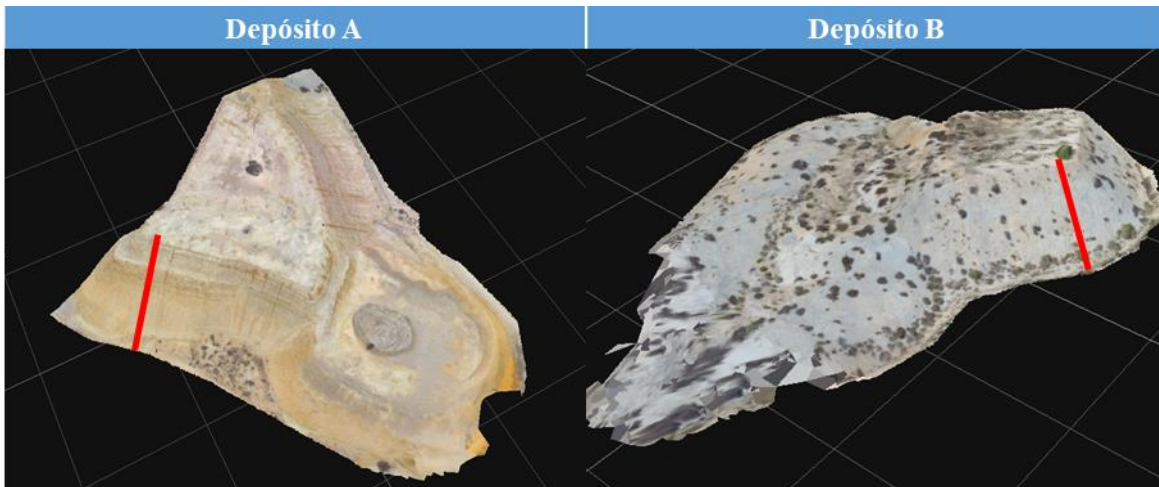


Figura 4-23: Visualización de secciones críticas para Depósito A y B.

Tabla 4-15: Resultados secciones críticas para Depósito A y B.

Depósito	Altura [m]	Pendiente talud [°]	Pendiente terreno [%]
Depósito A (Delirio)	21	36	-3
Depósito B (Delirio)	27	33	4

4.2.4 Análisis de estabilidad de taludes

El programa utilizado para el análisis de estabilidad de taludes corresponde a GeoStudio (GEO-SLOPE International, 2018), en el cual se define la sección crítica de los depósitos analizados en base a los datos geométricos obtenidos. Posteriormente, se define el material del relave considerando los parámetros determinados in-situ y en laboratorio, mientras que el material del suelo de fundación se define como roca impenetrable dado que los resultados de las razones espectrales H/V son característicos de suelos rígidos.

Para el estudio se utilizó el módulo SLOPE/W, considerando el método de Morgenstern-Price. La superficie de deslizamiento se define con entrada y salida de derecha a izquierda con 21 puntos de entrada y 16 de salida, considerando 4 incrementos de radio.

El análisis completo se realiza en condición estática y pseudo-estática. El factor de seguridad se determina a partir de un análisis probabilístico de tipo Monte Carlo para 2.000 casos, el

cual considera la variación del peso unitario, cohesión, ángulo de fricción interna y, en casos particulares, la variación del nivel de la cota piezométrica y el coeficiente sísmico horizontal (Kh). Todo lo anterior configura los 9 casos de análisis descritos en la Tabla 4-16.

Tabla 4-16: Casos de análisis de estabilidad de taludes.

Caso	Descripción
1	Sin agua, estático
2	Sin agua, pseudo-estático
3	Con agua, estático
4	Con agua, estático y variación del nivel freático
5	Con agua, pseudo-estático
6	Con agua, pseudo-estático y variación del nivel freático
7	Sin agua, pseudo-estático y variación del coeficiente sísmico horizontal
8	Con agua, pseudo-estático y variación del coeficiente sísmico horizontal
9	Con agua, pseudo-estático y variación del nivel freático y coeficiente sísmico horizontal

La Tabla 4-17 indica el detalle de los parámetros probabilísticos utilizados. Esta tabla incluye los valores medios, las desviaciones estándar, los coeficientes de variación y los rangos adoptados para cada parámetro, considerando distribuciones normales. Para establecer estos valores, el primer paso consiste en definir como valor medio los resultados obtenidos en terreno para cada parámetro. Luego, se fijan los rangos que se desean evaluar para cada uno de ellos, adoptando una desviación estándar consistente. Luego, el coeficiente de variación (c.v), definido como el cociente entre la desviación estándar y el valor medio, se verifica con los valores propuestos por Duncan (2000). Mientras mayor es el coeficiente de variación, mayor es la variabilidad del parámetro.

Tabla 4-17: Parámetros probabilísticos utilizados para el análisis de los Depósitos A y B.

Depósito	Parámetro	Valor medio	Desv. estándar	Coef. De variación	Rango adoptado
Depósito A	γ_t [kN/m ³]	17	0,6	4%	14 – 18
	c [kPa]	17	4,6	27%	0 – 40
	ϕ [°]	25	1	4%	20 – 28
Depósito B	γ_t [kN/m ³]	14	0,6	4%	12 – 16
	c [kPa]	0	4,8	-	0 – 25
	ϕ [°]	33	1	3%	25 – 38

Como es posible observar, la cohesión es el parámetro con mayor variabilidad, lo que se debe a que el relave en terreno presenta una estructura que puede aportar una cohesión que no se considera en los ensayos realizados en laboratorio, ya que las muestras fueron remoldeadas. A eso suma la incertidumbre en la humedad del depósito, la cual también podría tener efectos en la cohesión.

Para el caso de la variación de la línea piezométrica en ambos depósitos, se define un rango de +/- 5 [m] desde un valor medio de 5 [m] sobre el suelo de fundación, con una distribución normal. Esta variación se basa en la incertidumbre de este parámetro, ya que en terreno se pudo observar la presencia de agua en el pozo del depósito California 2. Por lo tanto, existe la posibilidad que los depósitos analizados también presenten un nivel freático.

Por su parte, el coeficiente sísmico (K_h) para los casos pseudo-estáticos 7, 8 y 9 en ambos depósitos se consideró con un valor medio de 0,15, una desviación estándar de 0,03 (c.v.= 20%) y un rango entre 0,1 y 0,2, con una distribución normal. Para los casos 2, 5 y 6, se adoptó el valor medio $K_h=0,15$ sin variabilidad. La variación de este parámetro se justifica porque no existe un sismo de diseño definido para depósitos abandonados, por lo que resulta importante analizar el efecto de éste en la estabilidad del talud.

Los resultados para los 9 casos analizados se resumen en la Tabla 4-18 para el Depósito A y en la Tabla 4-19 para el Depósito B. Los datos mostrados corresponden al factor de seguridad medio, el índice de confiabilidad, la probabilidad de falla y la desviación estándar para los factores de seguridad obtenidos.

El índice de confiabilidad (β) se define como se indica la Ecuación 4-1.

$$\beta = \frac{(E[FS] - 1)}{\sigma[FS]} \quad (4-1)$$

Donde $E[FS]$ corresponde a la esperanza del FS y $\sigma[FS]$ a su desviación estándar.

Para ejemplificar estos resultados, se utilizan los valores obtenidos en el Depósito A para el caso 3 a través de la función de densidad de probabilidad (Figura 4-24) y la función de distribución de probabilidad (Figura 4-25) para el factor de seguridad. Estas figuras muestran que a pesar de obtener un FS medio mayor a 1, la probabilidad de falla es distinta de cero (5% indicada con recta segmentada roja en Figura 4-25) dada la desviación estándar de la distribución. Las gráficas de las funciones de densidad y distribución del factor de seguridad para los casos restantes se adjuntan en el Anexo H.

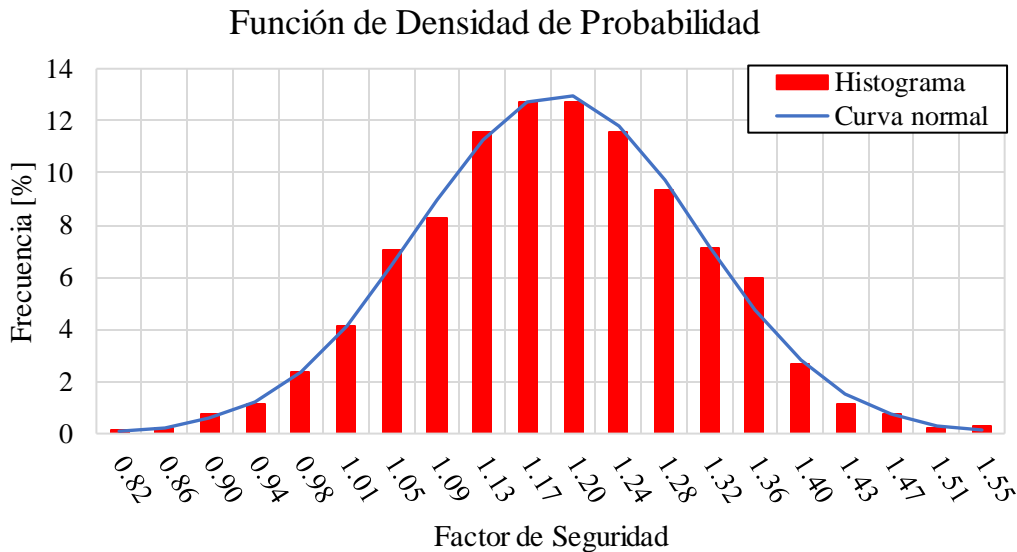


Figura 4-24: Función de densidad de probabilidad del FS del Depósito A para el caso 3.

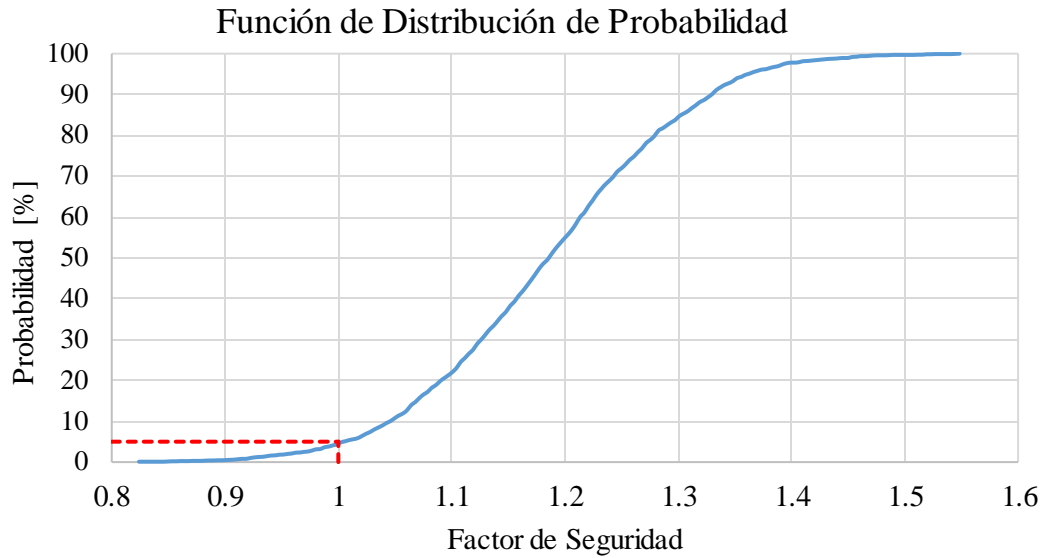


Figura 4-25 Función de distribución de probabilidad del FS del Depósito A para el caso 3.

Tabla 4-18: Resultados del análisis de estabilidad del Depósito A.

Caso	Descripción	FS medio	Índice de confiabilidad β (-)	Probabilidad de Falla (%)	Desv. estándar
1	Sin agua, estático	1,24	2,08	2,0	0,12
2	Sin agua, pseudo-estático	0,97	-0,33	63,5	0,09
3	Con agua, estático	1,19	1,63	5,0	0,12
4	Con agua, estático y variación del nivel freático	1,18	1,48	6,9	0,12
5	Con agua, pseudo-estático	0,92	-0,80	78,3	0,09
6	Con agua, pseudo-estático y variación del nivel freático	0,92	-0,80	78,7	0,10
7	Sin agua, pseudo-estático y variación del coeficiente sísmico horizontal	0,96	-0,36	63,6	0,10
8	Con agua, pseudo-estático y variación del coeficiente sísmico horizontal	0,92	-0,83	79,9	0,09
9	Con agua, pseudo-estático y variación del nivel freático y coeficiente sísmico horizontal	0,92	-0,83	79,5	0,10

Tabla 4-19: Resultados del análisis de estabilidad del Depósito B.

Caso	Descripción	FS medio	Índice de confiabilidad β (-)	Probabilidad de Falla (%)	Desv. estándar
1	Sin agua, estático	1,27	1,62	0,6	0,17
2	Sin agua, pseudo-estático	0,96	-0,32	67,9	0,13
3	Con agua, estático	1,27	1,62	0,6	0,17
4	Con agua, estático y variación del nivel freático	1,25	1,44	3,2	0,17
5	Con agua, pseudo-estático	0,96	-0,32	67,9	0,13
6	Con agua, pseudo-estático y variación del nivel freático	0,94	-0,43	71,0	0,14
7	Sin agua, pseudo-estático y variación del coeficiente sísmico horizontal	0,96	-0,29	66,6	0,14
8	Con agua, pseudo-estático y variación del coeficiente sísmico horizontal	0,96	-0,29	66,6	0,14
9	Con agua, pseudo-estático y variación del nivel freático y coeficiente sísmico horizontal	0,94	-0,40	70,0	0,14

A continuación, la Figura 4-26 y la Figura 4-27 muestran ejemplos de las secciones transversales de los Depósitos A y B, respectivamente (los parámetros geométricos de los perfiles se encuentran en la Tabla 4-15). La superficie de falla mostrada corresponde en ambos depósitos al caso 6, uno de los más desfavorables, y en particular se observa el FS crítico de ese caso. Como es posible distinguir, el FS crítico del Depósito A coincide con el FS medio del caso evaluado. Sin embargo, para el Depósito B el FS crítico es menor que el valor medio, esto se produce por truncar los rangos de los parámetros evaluados (Tabla 4-17), cuyo ajuste es mayor que el realizado para el Depósito A, lo que provoca que la curva de distribución de factores de seguridad no se ajuste a una distribución normal.

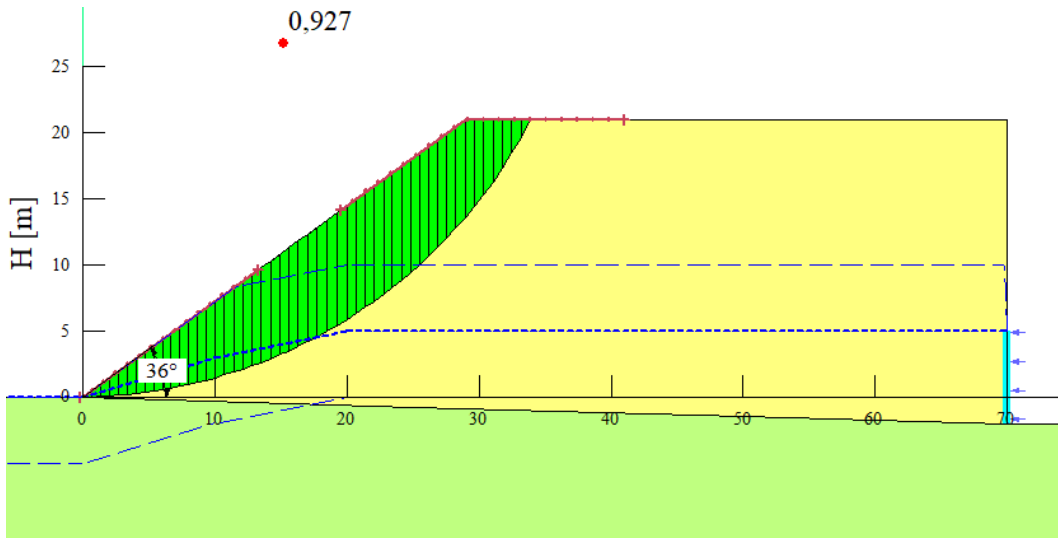


Figura 4-26: Geometría, superficie y FS asociado a la falla crítica del Depósito A para el caso 6. Resultados obtenidos mediante Slope/W.

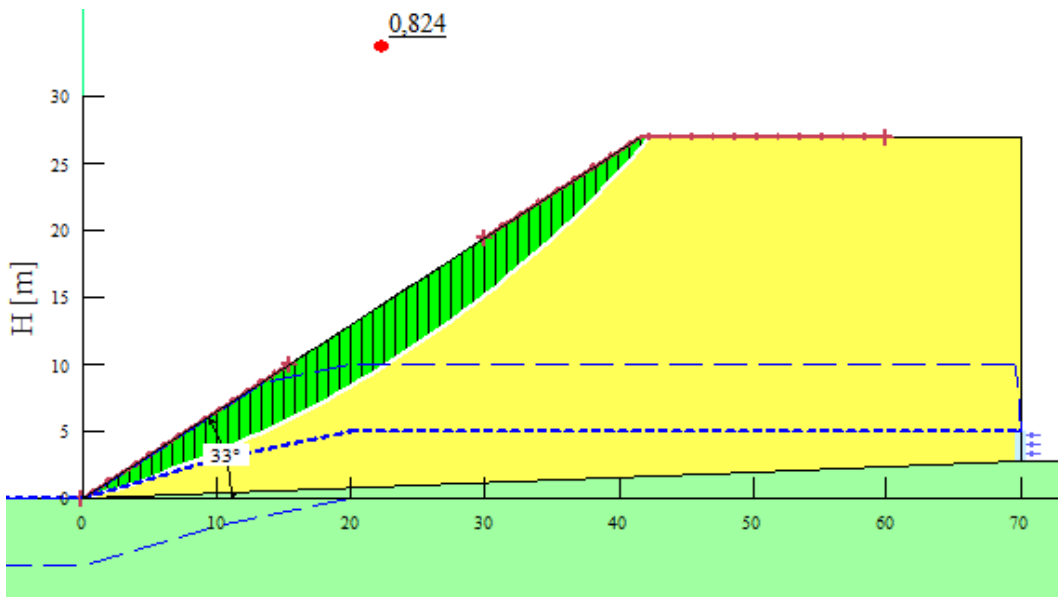


Figura 4-27: Geometría, superficie y FS asociado a la falla crítica del Depósito B para el caso 6. Resultados obtenidos mediante Slope/W.

Capítulo 5

Discusión

El Levantamiento Catastral es el único documento técnico existente de depósitos abandonados en el país, resultando ser un importante complemento para lo registrado por el catastro del SNGM, principalmente por integrar información de los recursos minerales y métodos constructivos de algunos depósitos. Ahora bien, este documento entrega información del estado de los depósitos hace 30 años por lo que la condición de estabilidad indicada puede no ser representativa de su condición actual.

El catastro del SNGM asigna números identificadores distintos para la zona intacta y la zona que ha fallado en algunos depósitos, lo que se observó en los depósitos California y Delirio. En particular, para el caso de Delirio, el depósito identificado como Delirio 3 (ID 636) corresponde a la falla de parte del depósito Delirio 1 (ID 635), lo que se concluye a partir de la semejanza entre sus materiales y las imágenes satelitales. Esta falla se produjo tras el terremoto de Punitaqui de 1997 y, según lo registrado en terreno, el depósito presentaba una altura cercana a los 25 [m] y la distancia recorrida por el relave alcanzó 100 [m], aproximadamente.

La clasificación de los depósitos abandonados de acuerdo a su impacto de falla se realiza mediante observaciones de imágenes satelitales de Google Earth, resultando en la categoría de Limitada Información todos aquellos depósitos cuya imagen no permitía evaluar su integridad. Dado que existen en el mercado imágenes satelitales con mayor resolución, se podría reevaluar esta categoría e integrar a las fichas los depósitos que así lo ameriten.

Las fichas informativas sintetizan datos obtenidos por el catastro del SNGM 2019, el Levantamiento Catastral 1989 – 1990 y observaciones de imágenes satelitales de Google Earth e imágenes de Street View, realizadas en gabinete, además de observaciones en terreno para algunos casos particulares. En base a lo que se discutió anteriormente, las observaciones realizadas por imágenes satelitales podrían ajustarse con imágenes de mayor resolución y con mayor data histórica, lo que permitiría precisar años de falla, el estado de las faenas mineras aledañas, el registro de la última laguna y agregar otras observaciones, tales como historial de depositación y operación. Otro complemento a la ficha sería registrar características geológicas del terreno de emplazamiento, ante posibles riesgos geológicos.

Si bien la relación del tipo de material, fino o arenoso, con el color se estableció a partir de la experiencia en terreno, su extensión al resto de los depósitos se realizó con la observación del material en superficie a través de imágenes satelitales o Street View. Este método puede

no ser preciso en algunos depósitos por la dependencia de la gama de colores de las cámaras utilizadas, y por la presencia de estratificaciones alternadas en profundidad. Por tal motivo, esta clasificación de tipo material se debe confirmar en terreno.

Los volúmenes de los depósitos abandonados registrados por el SNGM son, en general, menores a los estimados, lo que se atribuye a cálculos aproximados y a una desactualización de los datos, que no consideran que algunos depósitos pudieran seguir en operación después de declarado su cierre, como el caso del depósito ID 243 observado en terreno.

El análisis de los datos registrados en las fichas informativas permite generar un gráfico que contrasta la distancia a la zona de interés con la altura de los depósitos (Figura 3-21), a través del cual se establecen los depósitos prioritarios para un análisis de estabilidad en base al impacto que podría generar su falla. De los depósitos ubicados en las zonas prioritarias, se destaca el Depósito B, que se encuentra en la zona II y que ya experimentó una falla tras el terremoto de Punitaqui en 1997. La información disponible indica que la distancia alcanzada por el relave tras la falla fue aproximadamente 4 veces su altura, lo que es consistente con las zonas definidas para depósitos prioritarios. El gráfico de la Figura 3-21 considera sólo la altura, la distancia a la zona de interés y la pendiente del terreno, pero su objetivo podría ampliarse si se incluye el volumen de los depósitos.

Del estudio y análisis de los mecanismos de falla en base a las consideraciones de la Guía Metodológica, el diagnóstico de los relaves de la región de Valparaíso realizada por Carvajal y Pacheco (2004) y el trabajo desarrollado por Carvajal (2018), se define como único mecanismo de falla a analizar en la región centro norte de Chile la inestabilidad de talud, dado los bajos niveles de humedad en estos depósitos. Esto es lo que lleva a limitar la aplicación de esta metodología a la zona de estudio. En caso de extenderla al resto del país, se debe considerar los mecanismos de licuación, erosión interna y posible rebalse en cubetas cóncavas.

El análisis de los parámetros críticos asociados al mecanismo de falla de inestabilidad de talud, permite definir cuales tienen aplicabilidad en depósitos abandonados. Junto con ello, se establecen métodos de medición simples para cada uno de estos parámetros en base a la gran cantidad de depósitos abandonados analizar. El resumen de esta información se indica en la Tabla 4-1.

La experiencia en terreno permite diferenciar entre relaves arenosos y finos por medio de la plasticidad de los materiales. Además, se observa que en general los relaves arenosos son de color gris, mientras que los relaves finos presentan colores entre café y amarillo. Se destaca que los depósitos con material fino presentan mayor humedad que los arenosos. Se esperaba poder confirmar estas observaciones mediante la evaluación del contenido y caracterización de los materiales finos presentes en las muestras de terreno a través de los Límites de Atterberg, sin embargo, la contingencia mundial ante la pandemia del covid-19 impidió la realización de estos ensayos.

En la Tabla 4-1, se definen los parámetros críticos y los métodos de medición simple para evaluar la estabilidad de taludes en depósitos abandonados. Sin embargo, en su aplicación no fue posible obtener la posición del nivel freático por no disponer del equipo necesario. Con respecto a la densidad in-situ, esta corresponde a una densidad superficial, que puede estar afecta a ciclos de humectación y secado, y no representa la densidad de los depósitos en

profundidad, la cual puede variar por el aumento de esfuerzos en profundidad. El cambio de la densidad en profundidad se podría evaluar mediante ensayos edométricos. De los ensayos propuestos para la obtención de los parámetros de resistencia al corte, se utiliza el corte simple por la escasa cantidad de muestras extraídas de terreno, dado los límites de espacio para su transporte. Idealmente, se recomienda realizar ensayos triaxiales que permitan obtener parámetros resistentes efectivos, pero se debe tener en consideración la disponibilidad de estos ensayos en laboratorios cercanos a los depósitos evaluados, para cuidar la integridad de las muestras. Por tal motivo, se recomienda como segunda opción el uso de corte directo, especialmente por ser un ensayo que se encuentra disponible en la mayoría de los laboratorios, a diferencia del corte simple.

El ensayo de corte simple realizado podría haberse visto afectado por la presencia de material plástico y sus posibles aglomeraciones, lo que se infiere a través de la Figura 4-18 en la cual se observa que el desplazamiento de los anillos no es uniforme en presencia de este material (Depósito A).

La generación del levantamiento 3D tardó tres semanas, las cuales contemplan el aprendizaje relacionado a la operación del programa 3DF Zephyr Aerial (3Dflow, 2019) y los cálculos paralelos necesarios para el modelo. La etapa de georreferenciación del modelo retrasó el procesamiento ya que la vinculación de imágenes con puntos registrados por el GPS debía ser lo más exacta posible, lo que llevó a revisar cada una de las imágenes utilizadas por el dron y los puntos registrados en las rutas. Este proceso se puede agilizar con el uso de estacas en terreno con su respectivo registro en el GPS, ya que se podrían visualizar fácilmente en las fotografías aéreas. Se estima que, con una adecuada preparación, la obtención de un levantamiento 3D y la determinación de sus secciones críticas podría tardar seis horas por depósito. Otro punto sobre el programa 3DF Zephyr Aerial es que, si bien obtiene automáticamente el valor del volumen, no permite definir una superficie basal curva que ajuste el modelo, pues solo considera superficies planas. Por esta razón, los volúmenes calculados por este software podrían ser distintos a los reales.

Los análisis de estabilidad realizados contemplan la variación de sus parámetros característicos dado que los valores obtenidos en terreno son puntales en superficie y podrían variar espacialmente dada la estructura de los relaves, el efecto del confinamiento en profundidad y la presencia de una cota piezométrica. Los resultados para los Depósitos A y B se presentan en la Tabla 4-18 y Tabla 4-19, respectivamente.

Para el análisis de los casos estáticos (casos 1, 3 y 4), el Depósito A presenta una probabilidad de falla entre 2 y 6,9 %, con FS desde 1,18 a 1,24. Para el caso del Depósito B las probabilidades de falla obtenidas se encuentran entre 0,6 a 3,2%, con FS desde 1,25 a 1,26. Para ambos casos la probabilidad de falla aumenta al considerar el nivel freático, lo que a su vez genera la disminución del FS; sin embargo, esta variación es mínima, lo que confirma que el efecto del agua a las profundidades analizadas impacta en menor medida la estabilidad de los taludes.

Los casos de análisis pseudo-estáticos sin variación del coeficiente sísmico horizontal (casos 2, 5 y 6), indican para el Depósito A probabilidades de falla entre 63,5 y 78,7%, con FS entre 0,92 y 0,97. Para el Depósito B se observan probabilidades de falla entre 67,9 y 71%, con FS también menores a 1, con un rango entre 0,94 y 0,96. A partir de estos resultados y los

obtenidos para los casos estáticos es posible dar cuenta que el efecto del sismo es mayor a la influencia del nivel freático para los casos estudiados.

El análisis del efecto de la variación del coeficiente sísmico se realiza a través de la comparación entre las probabilidades de falla y los FS entre los pares de casos 2 y 7, 5 y 8, y por último entre los casos 6 y 9. Los resultados para los Depósitos A y B presentan prácticamente nulas variaciones en el FS. La probabilidad de falla del Depósito A al incluir la variación del coeficiente sísmico aumenta entre 0,1 y 1,6% con respecto a los casos con coeficiente constante. El depósito B, por su parte, presenta una disminución de la probabilidad de falla en rangos que van desde 0,97 a 1,3%. Este análisis indica que los modelos de estabilidad realizados presentan poca sensibilidad a la variación del coeficiente sísmico, lo que resulta ser cuestionable. Por tal motivo, se espera que próximos estudios puedan estudiar la sensibilidad de los análisis ante la variación de este parámetro.

Los factores de seguridad obtenidos respecto a la estabilidad de taludes se encuentran en el límite de la estabilidad e inclusive en algunos casos por debajo. Sin embargo, ante la incerteza del nivel de humedad en los depósitos abandonados no se puede saber con certeza si una falla puede ser de tipo catastrófica.

Los análisis de estabilidad de taludes realizados indican una condición de estabilidad límite para los Depósitos A y B (Delirios), contrario a lo registrado por el Levantamiento Catastral hace 30 años atrás, donde la condición para los depósitos Delirios se indicaba como Buena. Es por esto que la información del Levantamiento Catastral no se debe usar como referencia para los análisis de estabilidad.

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

Los mecanismos de falla establecidos para un depósito activo o inactivo no aplican directamente a depósitos abandonados de la zona centro norte de Chile, lo que se debe principalmente al menor contenido de humedad de estos relaves en comparación a los embalsados en un depósito activo y a la aridez del clima. Esto lleva a considerar en el análisis de estabilidad física únicamente al mecanismo de falla por inestabilidad de taludes. Para este mecanismo se definen sus parámetros críticos y métodos de medición simple.

A través de la observación de imágenes satelitales es posible clasificar los depósitos abandonados en base a su integridad y la zona de interés afectada en caso de una falla. Como resultado se obtienen 4 categorías para aquellos casos en que el depósito se encuentra íntegro y alguna zona de interés se ve afectada: Población (20 depósitos), Agricultura/Cursos de Agua (32 depósitos), Carretera (12 depósitos) y Faena Minera (6 depósitos). Las categorías también contemplan depósitos que perdieron su integridad, Falla Total (4) y Ruinas (12), depósitos de Impacto Descartable (27), porque su altura y lejanía de la posible zona afectada no representan un peligro ante una falla, y depósitos con Limitada Información (60) en el caso que no es posible evaluar la integridad del depósito mediante imágenes satelitales.

Esta clasificación facilita la evaluación de consecuencias de falla que se requiere para determinar riesgo (riesgo = consecuencias x probabilidad), lo que permite priorizar el estudio de la estabilidad física de depósitos abandonados.

La información recopilada del Levantamiento Catastral, sumado a las observaciones realizadas a través de imágenes satelitales y visitas a terreno permiten complementar el Catastro del SNGM para depósitos abandonados. Esta información es sintetizada en 86 fichas en las cuales se incluyen imágenes que permiten detectar singularidades de los depósitos. El análisis de esta información permite dar cuenta que los volúmenes presentados por el SNGM para el caso de depósitos abandonados podrían ser en promedio entre 3 a 4 veces menores a los valores estimados en este trabajo. A partir del análisis de la distancia a la zona de interés, la altura de los depósitos, la pendiente del terreno y las zonas potencialmente implicadas en una falla, se puede establecer que 50 depósitos de los 86 casos analizados debieran priorizarse para evaluar su estabilidad física (Figura 3-21) siguiendo la metodología desarrollada en este trabajo.

Las fotografías aéreas capturadas por un Drone y las rutas registradas por el GPS permiten obtener de manera rápida y simple un levantamiento topográfico georreferenciado, lo cual facilita la definición de secciones transversales críticas. Esto junto a ensayos de terreno y laboratorio permiten la generación de un modelo completo para analizar la estabilidad de taludes, a través de métodos de equilibrio límite.

En base a los análisis de estabilidad probabilísticos realizados a los dos depósitos en estudio (Depósitos A y B), que incluyen la variabilidad del peso unitario, la cohesión, el ángulo de fricción interna, el nivel freático y el coeficiente sísmico horizontal, se concluye que ambos depósitos presentan factores de seguridad cercanos a uno, es decir, se encuentran al límite de la estabilidad. Esto no indica necesariamente la ocurrencia de una falla catastrófica, ya que el nivel de deformación experimentado por el talud dependerá del contenido de humedad del depósito. Sin embargo, los bajos factores de seguridad indican que se requiere realizar estudios más detallados para confirmar el nivel de estabilidad física de estos depósitos.

A partir de ensayos de laboratorio y observaciones en terreno, se estima que los depósitos abandonados no se encuentran secos y pueden llegar a tener altos valores de humedad, sobre todo en casos con relaves finos en profundidad en depósitos de mayor altura. Esto lleva a considerar en los análisis de estabilidad de los depósitos en estudio, la posibilidad de que exista un alto grado de saturación por medio de variaciones del nivel freático. Los factores de seguridad obtenidos en estos casos, al compararlos con los casos sin nivel freático, resultan ser más bajos y las probabilidades de falla mayores. Por último, resultados de análisis probabilísticos pseudo-estáticos muestran factores de seguridad aún menores y altas probabilidades de falla. Estos resultados permiten dar cuenta que el efecto del sismo para los casos analizados es de mayor relevancia que la variación del nivel freático. Sin embargo, la incertidumbre en los niveles de humedad sugiere la realización de estudios detallados en terreno para determinar perfiles de humedad en estos depósitos.

Los resultados de estabilidad obtenidos para los depósitos en estudio permiten dar cuenta que efectivamente los Depósitos A y B, destacados como prioritarios (Figura 3-21) presentan una condición de estabilidad límite. Estableciendo así la importancia de considerar estudios de estabilidad para el resto de los depósitos prioritarios de la Tabla 3-8.

Por último, se destaca que, según las observaciones realizadas en terreno, los depósitos abandonados presentan características similares a los dos depósitos estudiados, lo que permite sugerir la extensión de esta metodología al resto de los depósitos abandonados.

6.2 Recomendaciones

En base las observaciones realizadas en terreno y el análisis del presente trabajo se recomienda:

- Visitar los depósitos abandonados si se desea investigarlos en profundidad dado que muchas de las hipótesis generadas en gabinete durante este estudio eran erróneas, tales como su nivel de humedad, sus alturas y sus volúmenes.
- En base al punto anterior, también se recomienda investigar, previo a la visita a terreno, el emplazamiento del depósito, ya que existe la posibilidad de que algunos depósitos se encuentren en terrenos privados que no permitan el libre tránsito. Para esta información se puede solicitar la cooperación del SNGM.
- Realizar un estudio acabado de la variación de humedad al interior de depósitos abandonados. Esto en base a la observación de agua en uno de los pozos de los depósitos visitados y la incertidumbre de este parámetro en los otros casos.
- Utilizar ensayos triaxiales para obtener parámetros de resistencia al corte efectivos en condiciones controladas de drenaje.
- Desarrollar una metodología de distancia peligrosa para depósitos abandonados, ya que las metodologías actuales consideran depósitos activos, cuyo contenido de humedad es mucho más alto que el de depósitos abandonados, por lo que se esperaría que el volumen vertido sea menor.
- Estudiar la sensibilidad del factor de seguridad ante la variabilidad del coeficiente sísmico horizontal en los análisis de estabilidad de talud.
- Llevar a cabo estudios de peligro sísmico y geológico asociados a los depósitos abandonados, utilizando la base de datos generada en este trabajo.

Bibliografía

- 3Dflow. (2019). *3DFlow 3DF Zephyr: User Manual - Version 4.5*. 109. <http://3dflow.net/zephyr-doc/3DF Zephyr Manual 4.500 English.pdf>
- Aguero, G. (1929). Formación de Depósitos de Relaves en la Mina de El Teniente. *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile*, 164–187.
- ASTM-D1556-15. (2008). Standard test method for density and unit weight of soil in place by sand-cone method. *ASTM International*, 1–8. <https://doi.org/10.1520/D1556>
- ASTM D6528-17. (2017). Standard test method for consolidated undrained direct simple shear testing of fine grain soils. *ASTM International*, D6528(17), 10. <https://doi.org/10.1520/D6528-17>
- Bray, J., & Travasarou, T. (2007). Simplified Procedure for Estimating Earthquake-Induced Deviatoric Slope Displacement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(4), 381–392.
- Carvajal, C., & Pacheco, A. (2004). *Diagnóstico de la Situación Actual de Tranques de Relaves de la V Región*. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Carvajal, M. (2018). Desarrollo de una Metodología para Análisis de Estabilidad Física de Depósito de Relaves. En *Universidad de Chile*. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/152946>
- Dobry, R; Alvarez, L. (1967). Seismic Failures of Chilean Tailings Dams. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93(6).
- Dobry, R. (1965). Efectos del sismo de Marzo de 1965 en los Tranques de Relaves de El Cobre. *Revista IDIEM*, 4(2), 4, pp. 85-107.
- Duncan, N. J. M. (2000). *Factors of Safety and Reliability*. 126(April), 307–316.
- Fundación Chile. (2016). Desde el Cobre a la Innovación. En *Roadmap Tecnológico 2015 - 2035*.
- GEO-SLOPE International, L. (2018). *Stability Modeling with GeoStudio*. <http://downloads.geo-slope.com/geostudioresources/books/10/0/SLOPE Modeling.pdf>
- Ministerio de Minería. (2007). *Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves*. 159–182. http://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/DS248_Reglamento_DepositosRelave.pdf
- Monsalve, K. (2020). *Estudio de la Aplicación de Metodologías para la Estimación de Distancia Peligrosa en Depósitos de Relaves no Operativos en Chile*.
- Newmark, N. M. (1965). Effects of earthquakes on dams and embankments. *Geotechnique*, 15(2), 139–160. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.2.139>
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*.
- SERNAGEOMIN; INYGE. (1989). *Levantamiento Catastral de los Tranques de Relaves en Chile: Etapa A, regiones V y XIII*.

- SERNAGEOMIN. (2018a). *Anuario de la Minería de Chile*.
https://doi.org/https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2019/06/Libro_Anuario_2018_.pdf
- SERNAGEOMIN. (2018b). *Guía Metodológica para Evaluación de la Estabilidad Física de Instalaciones Remanentes*. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
<https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2019/06/GUIA-METODOLOGICA.pdf>
- SERNAGEOMIN. (2019a). *Catastro de Depósitos de Relaves en Chile*.
- SERNAGEOMIN. (2019b). *Datos Públicos Depósito de Relaves*.
<https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>
- Swaisgood, J. R. (2003). Embankment dam deformations caused by earthquakes. *Proceedings of the 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering*, 40(014), 1–8.
- Troncoso, J. (2011). Permanent Seismic Settlements and Performance of Tailings Dams. *5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, 485–493.
- Villavicencio, G., Espinace, R., Palma, J., Fourie, A., & Valenzuela, P. (2014). Failures of Sand Tailings Dams in a Highly Seismic Country. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(4), 449–464. <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0142>

Anexos

Anexo A. Glosario Levantamiento Catastral

A continuación, se muestran las definiciones de las siglas utilizadas por el Levantamiento Catastral.

Tabla A - 1: Siglas utilizadas por el Levantamiento Catastral.

Sigla	Definición
ANICON	Aún no se inicia la construcción
CEMIN	Cía. Explotadora de Minas S.M.C.
CMDC	Cía. Minera Disputada de Las Condes S.A.
CO-CC	Construcción por capas de material compactado
CO-MEC	Compactación mecánica
CO-PLA	Compactación mediante placa vibratoria
CO-RVI	Compactación mediante rodillo vibratorio
DE-CIC	Deposición por ciclones
DE-CIC (2)	Deposición por ciclones, con 2 ciclos de cicloneado
DE-GRA	Deposición gravitacional (sin clasificación)
DE-MEC	Deposición mecánica (e.g. mediante camiones)
DR-AL	Compacidad alta
DR-BA	Compacidad baja
DR-MA	Compacidad media a alta
DR-ME	Compacidad media
EST	Estimación
MU-ABA	Muro construido por el método aguas abajo
MU-ARR	Muro construido por el método aguas arriba
MU-CLM	Muro construido por el método eje central
MU-CON	Muro convencional de material compactado
MU-INC	Muro incluye núcleo central, starter dam, compactado.
MU-RE	Muro de relaves
MU-REC	Muro de relaves cicloneados
MU-REDMCO	Muro de relaves depositados mecánicamente y compactados
MU-REG	Muro de relaves depositados gravitacionalmente, sin el empleo de ciclones
MU-SCO	Muro de suelo compactado
MU-SCO (PP)	Muro de suelo compactado revestido interiormente con polietileno
NO INF	No hay información disponible
NO INC	No se incluye (n)
PRO	De acuerdo al proyecto
TA-HU	Talud húmedo en superficie
TA-SS	Talud seco en superficie
TR-AB	Tranque se encuentra abandonado
TR-ALT	Se considera como tranque de alternativa para emergencias
TR-AO	Tranque se encuentra en operación

Sigla	Definición
TR-CON	Tranque se encuentra en construcción
TR-DO	Tranque dejó de operar
TR-PRELL	Tranque en proceso de relleno con material (no relaves)
TR-PRO	Tranque en proyecto
TR-NIO	Tranque aún no inicia su operación
TR-RELL	Tranque está siendo relleno con material (no con relaves)
TR-VO	Tranque actualmente inoperativo, pero se volverá a operar
VA-EST	Valor (es) estimado (s)
VA-E-O	Valor (es) estimado (s) conforme a los observado en terreno
VA-MEO	Valor medio observado en terreno
VA-MAR	Valor máximo recomendado
VA-MIR	Valor mínimo recomendado
VA-PRO	Valor de proyecto
VU-FIN	Término de la vida útil del tranque
VU-INI	Inicio de la vida útil del tranque

Anexo B. Diagnóstico de la situación de los tranques de relaves de la V región: Factores de campo

La Tabla B - 1 a conocer los factores de campo utilizados por Carvajal y Pacheco (2004). Se destacan los factores de campo utilizados para la clasificación de estabilidad mecánica del talud.

Tabla B - 1: Factores de campo, Carvajal y Pacheco (2004).

Factor de Campo
Situación operación actual
Tipo de muro
Método constructivo
Altura máxima
Revancha media
Ancho del coronamiento
Largo del coronamiento
Talud aguas abajo
Superficie de la cara libre del talud
Superficie total del depósito
% Superficie ocupada por poza sedimentación
Estado de saturación de superficie del talud
Filtraciones observadas
Proceso de concentración
Composición principal
DR de los relaves
Zona sísmica, según NCh 433
Implantación del depósito
Precipitaciones (Media anual)
Intensidad viento en talud
Estado de densificación de la superficie del talud
Tipo erosión sobre el talud
Nivel de erosión en talud
Intensidad viento en lamas
Cohesión o cementación en la superficie de la cubeta
Tipo erosión en lamas
Nivel de erosión en lamas
Cursos aguas superficiales
Distancia aproximada
Contaminación aguas superficiales en caso de colapso
Probabilidad de exposición a crecidas de ríos

Factor de Campo
Probabilidad exposición a acumulación de escorrentía
Actividad agrícola
Distancia aproximada
Daños zonas agrícolas en caso de colapso
Vegetación silvestre fuera del depósito de relaves
Distancia aproximada
Daños a vegetación silvestre en caso de colapso
Actividad ganadera
Distancia aproximada
Daños zonas ganaderas en caso de colapso
Presencia de fauna silvestre
Centros población humana
Distancia aproximada
Zonas Turísticas
Daños materiales en caso de colapso
Víctimas estimadas en caso de colapso
Alteración en el paisaje
Cubierta de enrocado talud
Cubierta de suelo en talud
Cubierta de asfalto en talud
Cubierta de geo sintéticos en talud
Cubierta vegetal densa en talud
Cubierta vegetal dispersa en talud
Reforestación en talud
% Total de superficie cubierta en talud, sin considerar cubierta vegetal dispersa
Cubierta de geo sintéticos en lamas
Cubierta vegetal densa en lamas
Cubierta vegetal dispersa en lamas
Reforestación en lamas
% Total superficie cubierta sobre las lamas, sin considerar cubierta vegetal dispersa
Gaviones o enrocados
Desvíos cursos de aguas
Vertederos
Sistemas de drenaje
Cierres perimetrales
Presencia de instalaciones

Anexo C. Fichas informativas de depósitos de relaves abandonados en Chile

A continuación, se presentan las 86 fichas informativas de depósitos abandonados en Chile.

Anexo D. Metodología aplicada en terreno para determinación de peso unitario mediante cono de arena

En esta sección se da detalle de la aplicación de la norma ASTM-D1556-15 (2008) en terreno. El procedimiento seguido es el siguiente:

1. Para comenzar, se realiza una pequeña excavación en la zona seleccionada con el fin de obtener la densidad a una profundidad no somera. En general, se utilizan profundidades aproximadas entre los 30 y 50 centímetros, con anchos y largos que permitan la ejecución del ensayo.
2. Posteriormente, se enraza la superficie con la misma placa del cono de arena. Una vez realizado se fija esta misma en la zona (Figura D - 1, A).
3. Se cava un cilindro con radio fijo dado por la placa y una profundidad de aproximadamente 13 centímetros, utilizando un mazo, un cincel, una poruña y una cuchara. Todo el material extraído se guarda en una bolsa plástica etiquetada y sellada y se registra su peso (Figura D - 1, B-E).
4. Se registra el peso de la arena normalizada, el peso del equipo completo del cono de arena y luego el peso de arena que queda exclusivamente en la zona del cono. Esto último solo se realiza una vez para la totalidad de los ensayos.
5. Luego, se vierte parte de la arena normalizada en el cono, registrando el peso del conjunto (Figura D - 1, F-G).
6. Se instala el cono sobre la placa, asegurando su ajuste perfecto. Una vez fijo, se abre la llave de paso de la arena normalizada (Figura D - 1, H-I).
7. Una vez que se detiene naturalmente el paso de arena normalizada desde el cono al agujero realizado, se cierra el paso y se procede a extraer el cono de forma lenta, cuidando de no esparramar el material que queda sobre la placa (Figura D - 1, J-L).
8. Se registra el nuevo peso del cono con el material restante.



Figura D - 1: Metodología en terreno cono de arena.

Anexo E. Caracterización Dinámica – Perfiles de V_s

En esta sección se dan a conocer las gráficas de los perfiles de velocidad de onda de corte para cada depósito.

A la izquierda de todos los gráficos se presentan los perfiles de velocidad de onda de corte que mejor ajustan para el depósito analizado, resaltando en negro el mejor entre ellos. A la derecha las curvas de dispersión asociados a cada perfil de velocidad.

E.1. Depósito Tamaya 2 (ID 87)

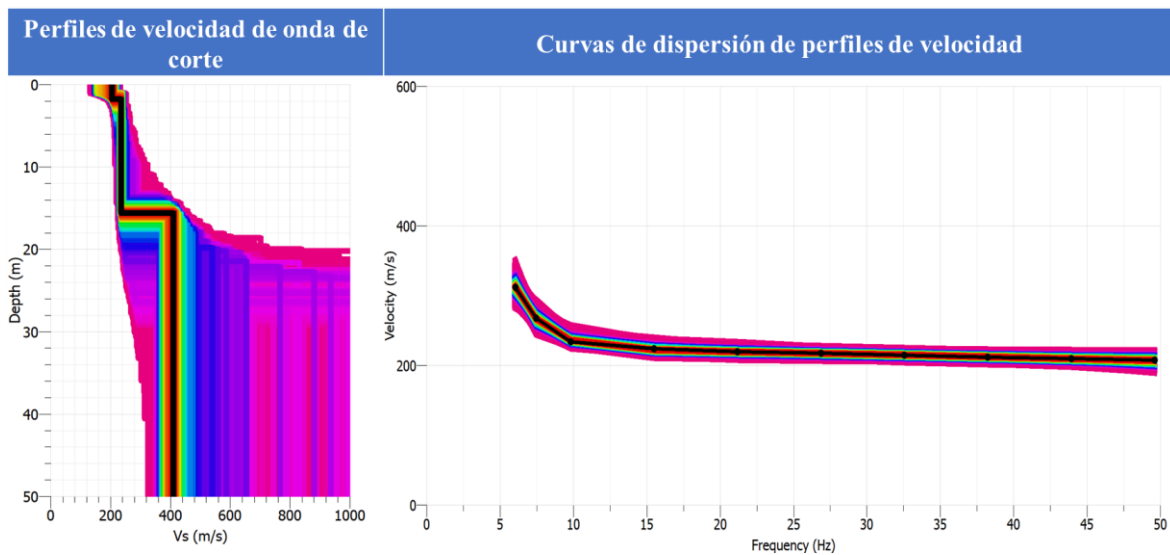


Figura E - 1: Perfiles de velocidad de onda de corte y sus curvas de dispersión para Tamaya 2 (ID 87).

E.2. Depósito Los Leones 1 (ID 231)

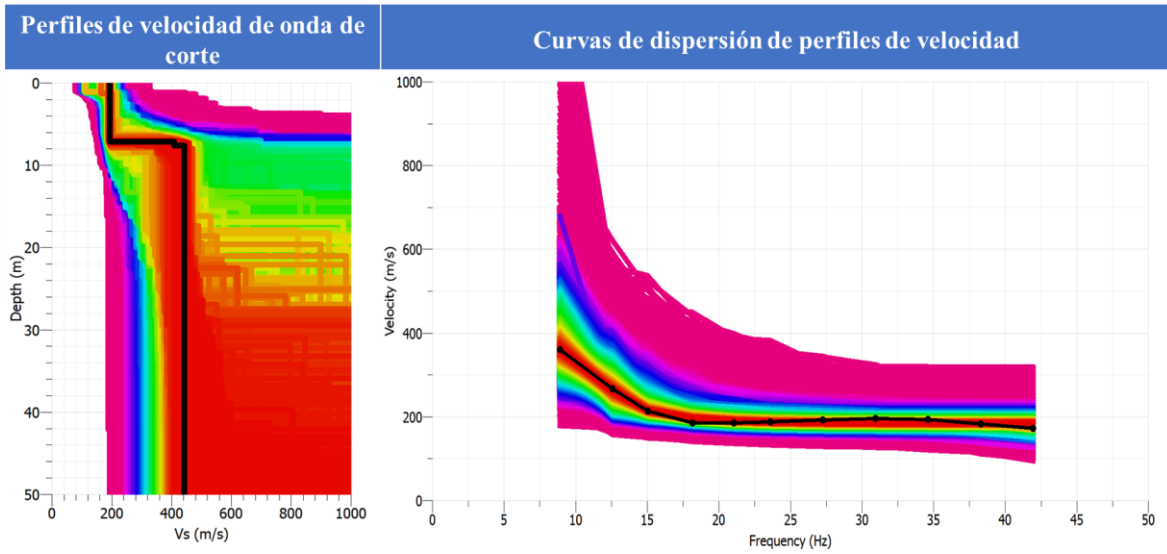


Figura E - 2: Perfiles de velocidad de onda de corte y sus curvas de dispersión para Los Leones 1 (ID 231).

E.3. Depósito A (Delirio)

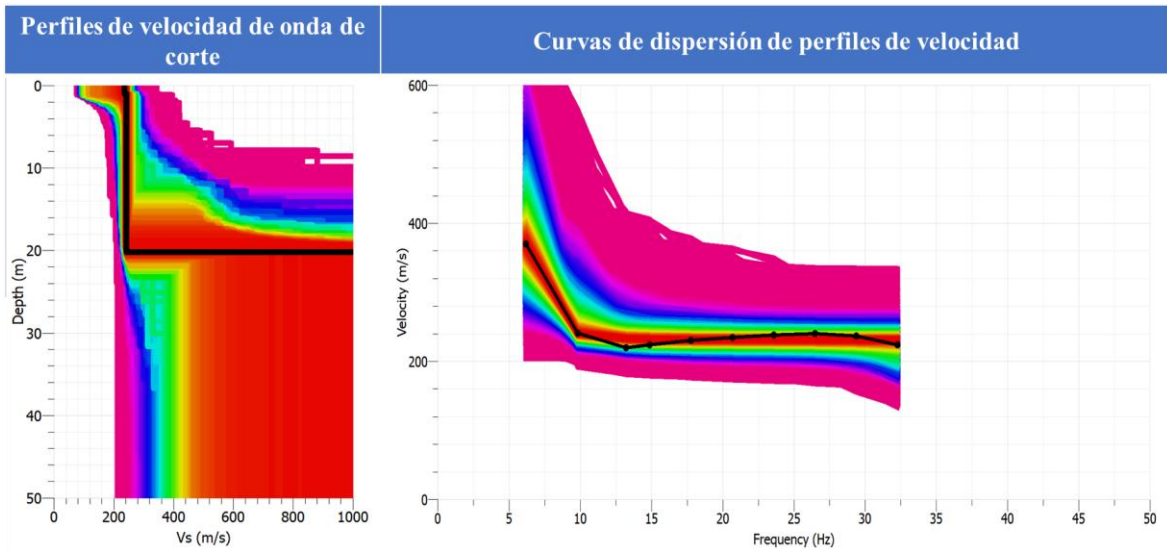


Figura E - 3: Perfiles de velocidad de onda de corte y sus curvas de dispersión para Depósito A (Delirio).

E.4. Depósito B (Delirio)

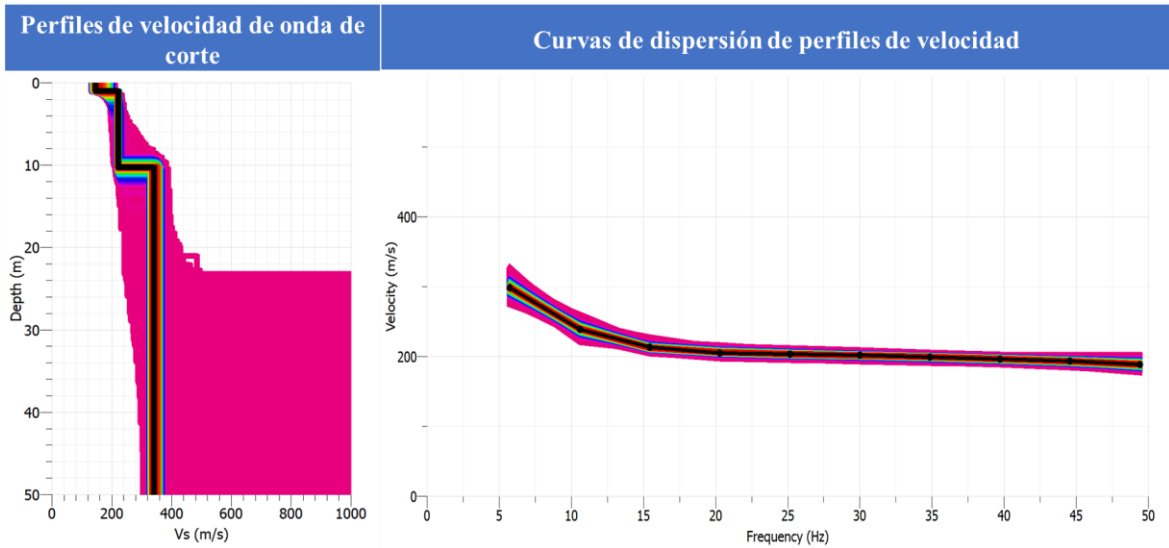


Figura E - 4: Perfiles de velocidad de onda de corte y sus curvas de dispersión para Depósito B (Delirio).

E.5. Depósito California 2B (ID 370)

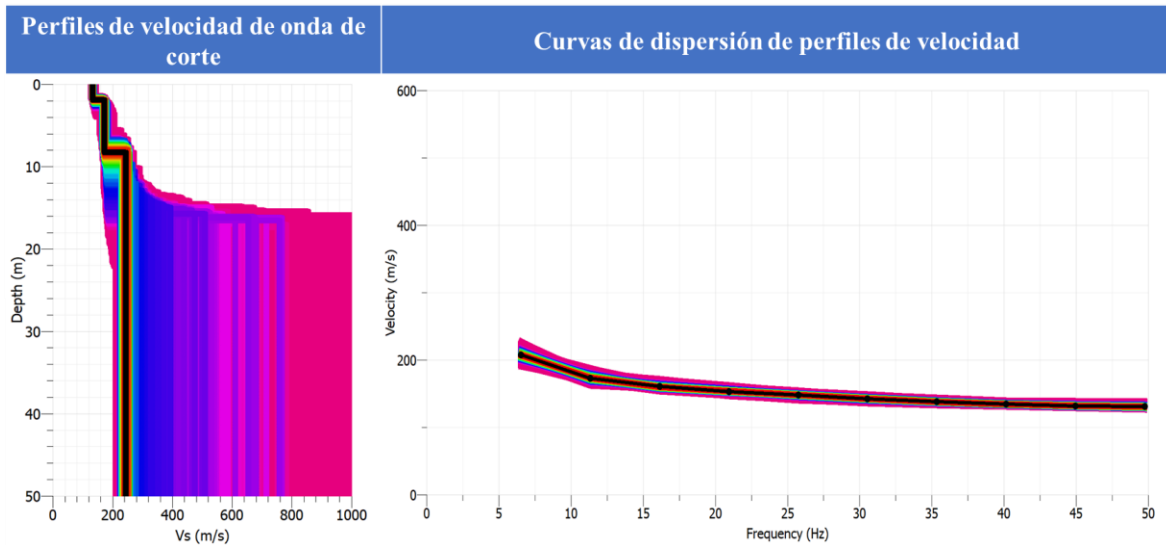


Figura E - 5: Perfiles de velocidad de onda de corte y sus curvas de dispersión para California 2B (ID 370).

E.6. Depósito California 2A (ID 773)

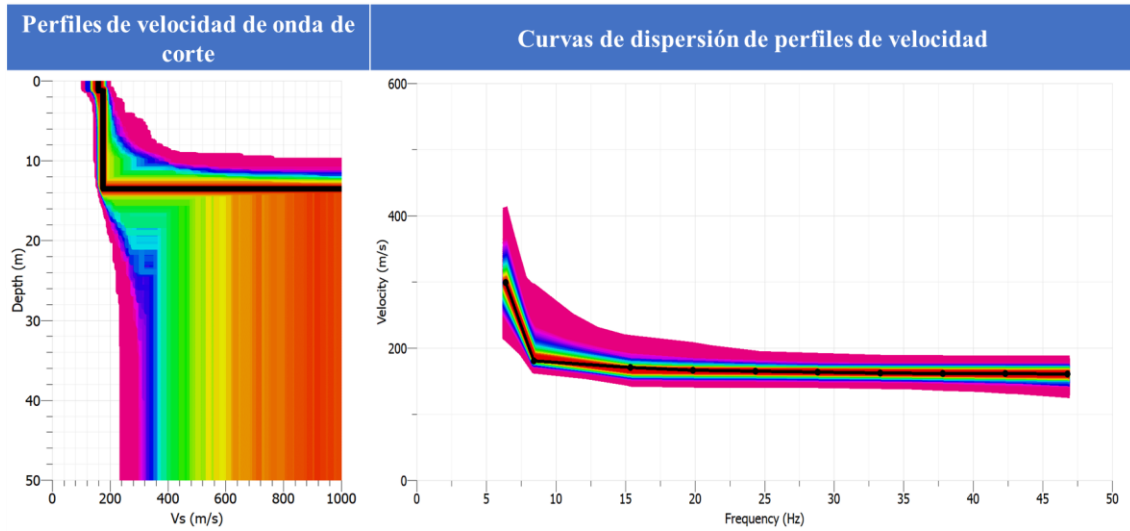


Figura E - 6: Perfiles de velocidad de onda de corte y sus curvas de dispersión para California 2A (ID 773).

Anexo F. Información de GPS

Las imágenes a continuación muestran a su izquierda las rutas definidas para cada depósito visitado y a su derecha los puntos de interés destacados.

F.1. Depósito Tamaya 2 (ID 87)



Figura F - 1: Rutas y puntos de interés registrados por el GPS para el depósito Tamaya 2 (ID 87).

F.2. Depósito Desconocido (ID 1.022)



Figura F - 2: Rutas y puntos de interés registrados por el GPS para el depósito Desconocido (ID 1.022).

F.3. Depósito Los Leones 1 (ID 231)



Figura F - 3: Rutas y puntos de interés registrados por el GPS para el depósito Los Leones 1 (ID 231).

F.4. Depósito A (Delirio)



Figura F - 4: Rutas y puntos de interés registrados por el GPS para el Depósito A (Delirio).

F.5. Depósito B (Delirio)



Figura F - 5: Rutas y puntos de interés registrados por el GPS para el Depósito2 (Delirio).

F.6. California 2B y 2A (ID 370 - 773)



Figura F - 6: Rutas y puntos de interés registrados por el GPS para los depósitos California 2A y 2B (ID 370 y 733).

Anexo G. Generación del Levantamiento Topográfico

En esta sección se da detalle de la metodología utilizada para generar el levantamiento topográfico. Esta se expresa como un manual con el fin de ser utilizada en otros estudios.

G.1. Generación de modelo 3D

El primer paso corresponde a seleccionar todas las imágenes del depósito analizado capturadas por el dron y arrastrarlas hasta ventana del software 3DF Zephyr Aerial. Una vez realizado se despliega la ventana de *Asistente del Proyecto*, en la cual se seleccionan los cuadrados marcados en amarillo de la Figura G - 1 y se hace clic en siguiente.

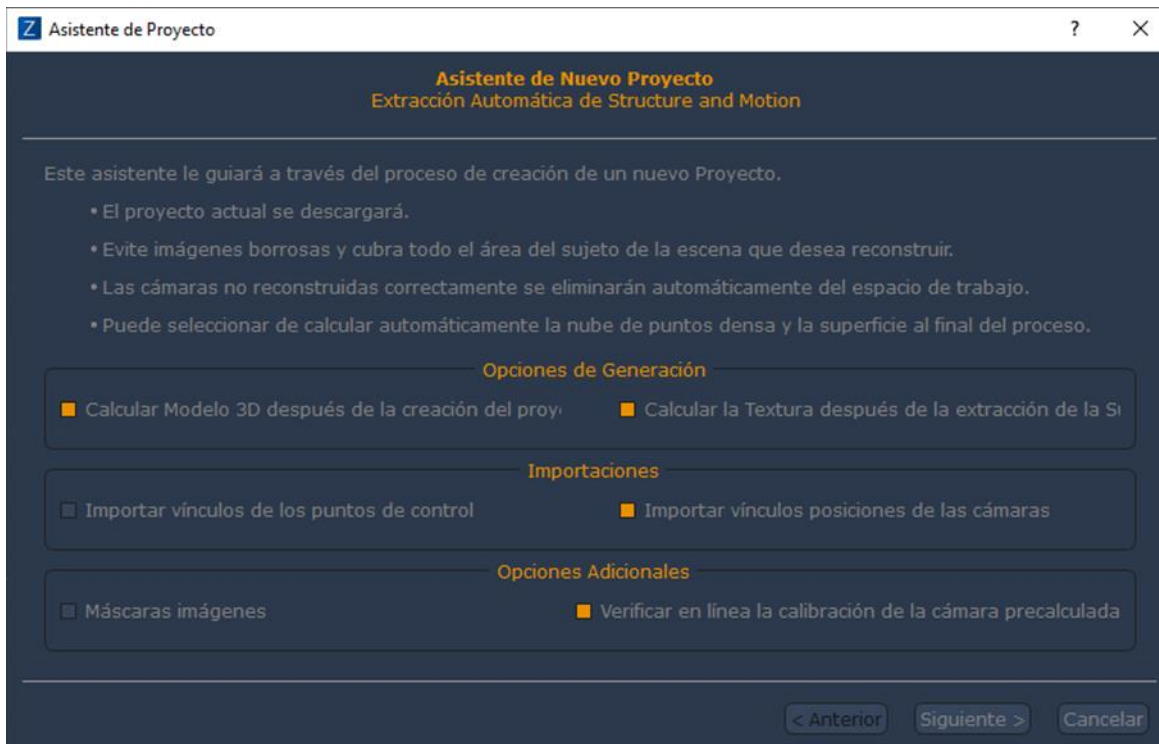


Figura G - 1: Asistente del Proyecto.

En la siguiente página de selección de fotos se verifican las imágenes exportadas y en caso de sumar otras se agregan a través del botón “+” o arrastrándolas (ver Figura G - 2) Dar clic en siguiente.

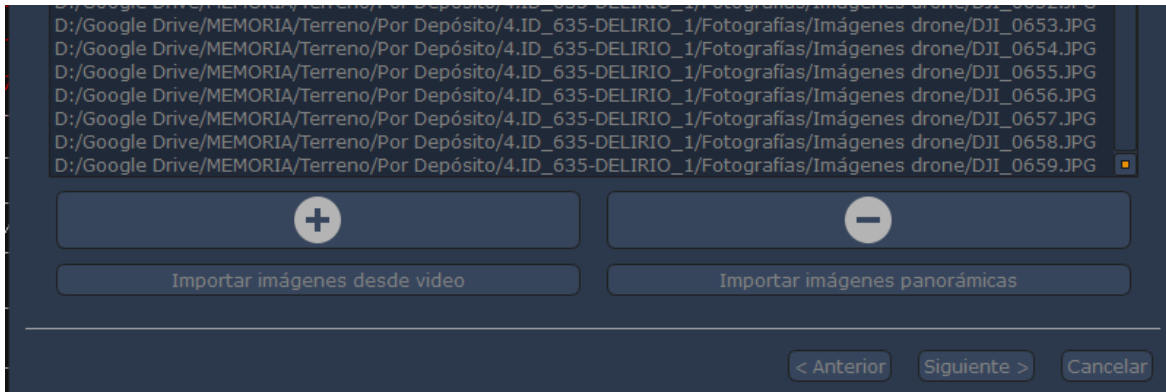


Figura G - 2: Selección y verificación de imágenes.

Se despliega la ventana de calibración de la cámara para lo cual se utiliza la opción automática y solo se hace clic en siguiente (ver Figura Figura G - 3).

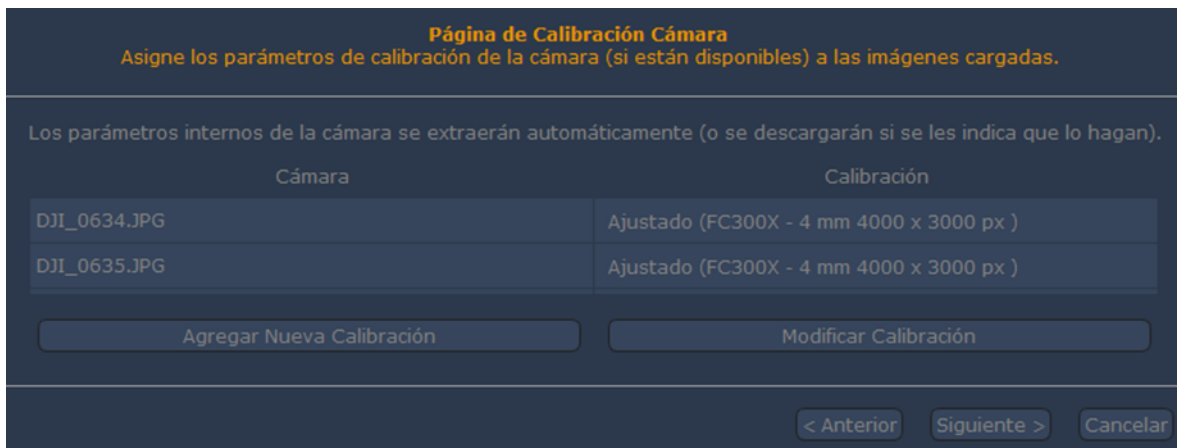


Figura G - 3: Calibración de cámara.

Posteriormente aparece la ventana de Restricciones con lo cual se trabaja más adelante a través de los puntos de control, por lo que solo se verifican los ajustes resaltados en el cuadro rojo de la Figura G - 4. Una vez realizado hacer clic en siguiente.



Figura G - 4: Importación de Restricciones.

Luego se despliegan las ventanas de Orientación de Cámaras, Creación Nube de Puntos Densa, Reconstrucción de Superficie y Texturizado. Para cada una de las cuales se selecciona la categoría General y el Presets por Default (ejemplo en Figura G - 5). Se utilizan las opciones automáticas ya que los ajustes avanzados solo tienen incidencia en el aspecto del modelo y no alteran los parámetros geométricos, objetivo de este trabajo. En cada caso hacer clic en siguiente.

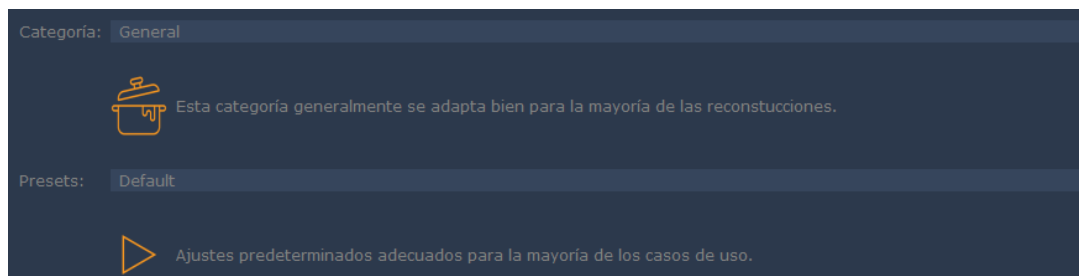


Figura G - 5: Ajustes por Default.

Finalmente se llega a la ventana de Iniciar Reconstrucción en la cual se observa la distribución de las imágenes en planta. Se hace clic en Ejecutar (ver Figura G - 6).



Figura G - 6: Inicio de Reconstrucción.

Una vez procesado el modelo, el programa indica las imágenes que fueron utilizadas y cuáles descartadas (Figura G - 7), el motivo de esto es que se encuentran fuera de la trayectoria general del vuelo del drone.

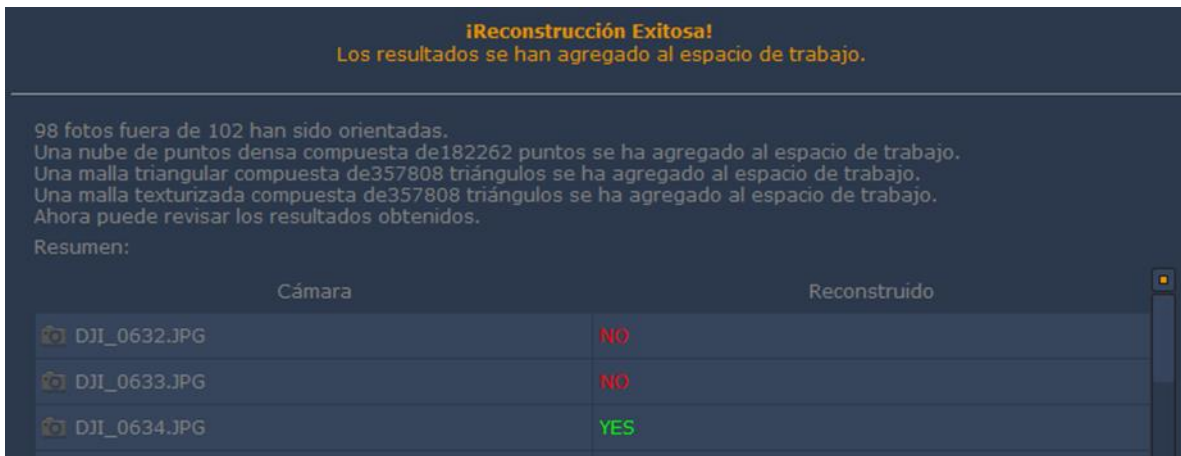


Figura G - 7: Fotografías utilizadas y descartadas en la reconstrucción.

Finalmente haciendo clic en Terminar se observa en la ventana principal el modelo 3D generado (ver Figura G - 8).

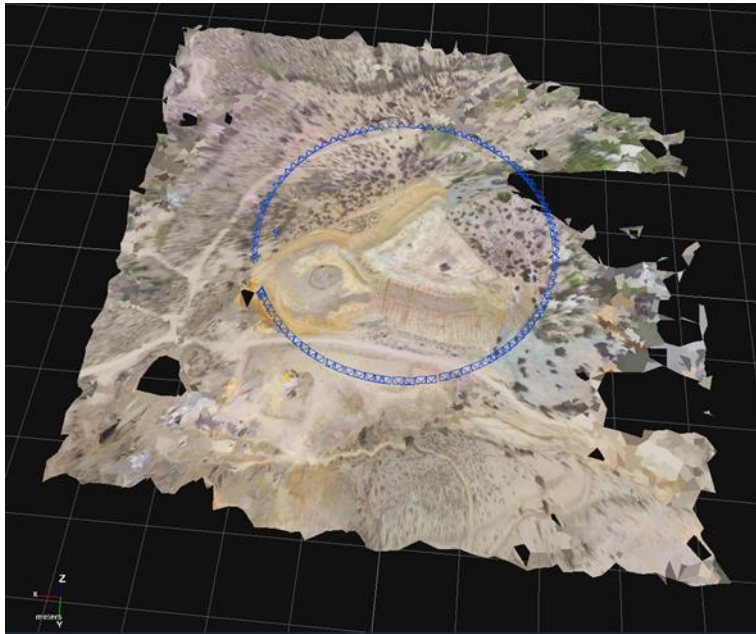


Figura G - 8: Ejemplo de modelo 3D generado.

G.2. Georreferenciación del modelo

Una vez obtenido el modelo 3D es necesario ajustar la coordenada z ya que esta se encuentra relativa al punto de inicio del vuelo del dron. Esto con el fin de georreferenciar completamente el modelo y en una etapa siguiente cargar las rutas obtenidas por el GPS, cruzar la información y con ello facilitar el posterior cálculo de pendientes y alturas.

Para generar el ajuste en la coordenada z el primer paso consiste en exportar, a través de QGIS, cada una de las rutas registradas a formato csv, guardando como información solo sus 3 coordenadas (x,y,z) en formato UTM para el uso 19S (Figura G - 9).

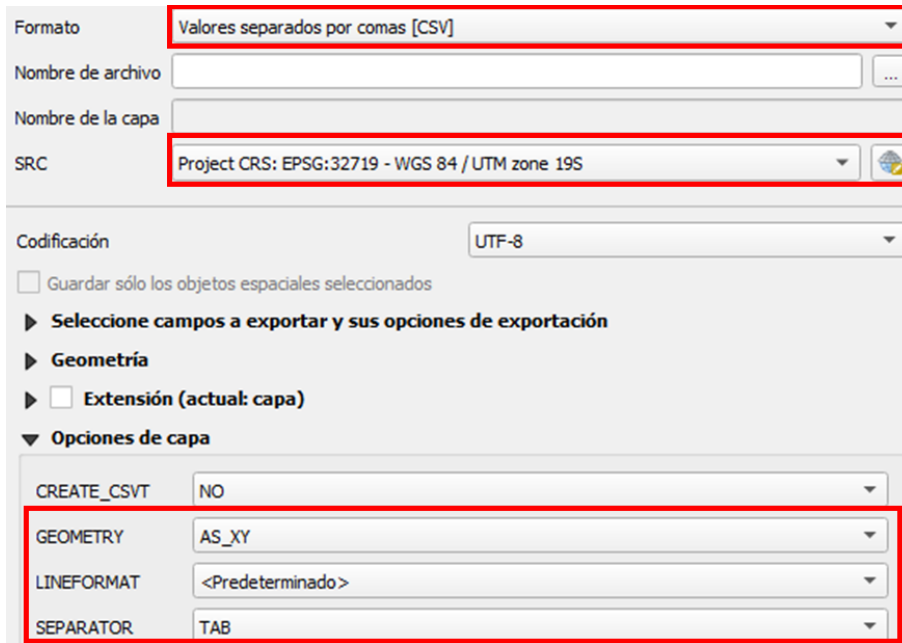


Figura G - 9: Exportar rutas a formato csv.

Posteriormente se deben identificar puntos del depósito que hayan sido registrados por el GPS lo que se convertirá en un punto de control. Para ello se observan las imágenes capturadas por el dron de forma individual y se selecciona de forma visual un punto, al mismo tiempo por medio de QGIS se verifica también de forma visual que este se encuentre registrado por el GPS. Posteriormente se identifican sus coordenadas por medio del archivo csv creado (ver Figura G - 10). Esto se puede realizar prolijamente instalando estacas en el lugar a analizar y registrando su posición exacta mediante el GPS.

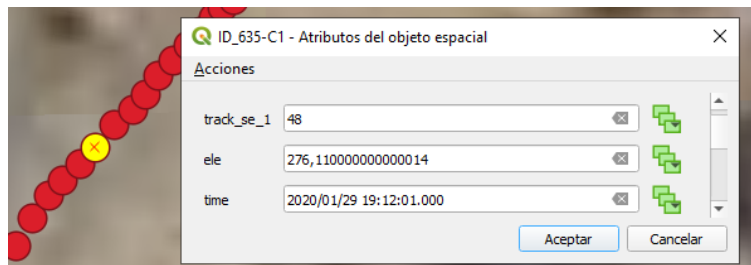


Figura G - 10: Identificación de punto en ruta por medio de QGIS.

Luego se procede a crear el punto de control (denominado GCP en el software 3DF Zephyr Aerial) para lo cual se selecciona el panel *GCP > Agregar punto de control > Elegir* (Figura G - 11). Se despliega una nueva ventana en la cual se selecciona visualmente el punto de control definido en el paso anterior en al menos 2 imágenes. Una vez marcada la primera de ellas el programa entrega una guía para la selección del punto en la próxima fotografía. Esta secuencia se observa en la Figura G - 12.



Figura G - 11: Creación de GCP por medio de imágenes.



Figura G - 12: Selección de imágenes para definir GCP.

Se debe repetir el proceso al menos 3 veces, es decir, se deben crear al menos 3 puntos de control ya que esto permitirá escalar, trasladar y rotar el modelo al sistema global seleccionado.

Luego de haber generado visualmente los 3 puntos de control en el modelo, se debe seleccionar del mismo panel *GCP* la opción *Alinear el modelo con vínculos 3D*. Se despliega una nueva ventana en la cual se observan los GCP seleccionados sin posición definida, por lo cual se selecciona para cada uno la casilla *Restricción* y *Control* lo que permite la edición de las coordenadas. En cada una de ellas se ingresan los valores extraídos del archivo csv respectivo. Finalmente se hace clic en *Ok* georreferenciando completamente el modelo 3D. La Figura G - 13 da ejemplo de este paso.

Agregue al menos 3 vínculos al fijar los puntos de control en posiciones 3D conocidas.
Los residuos de las transformaciones se calculan utilizando los puntos marcados como control.

Restricción	Controlar	Nombre	Posición			Error de reproyección			
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	GCP 1	East	285863.925767	North	6581598.154317	Alt	298.060000	0.101523
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	GCP 2	East	285905.188916	North	6581657.567308	Alt	299.000000	0.286537
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	GCP 3	East	285913.227932	North	6581572.631172	Alt	275.940000	1.318602

Figura G - 13: Alineación del modelo.

G.3. Cálculo de áreas y volúmenes

El primer paso para calcular el área y volumen del modelo 3D generado consiste en acotar este último a la zona específica del depósito. Para realizarlo se debe posicionarse en Malla del panel Proyecto, luego dirigirse al panel Edición > Selección > A Mano > Poligonal, con ello de forma manual se traza un contorno alrededor del depósito. Una vez realizado hacer clic en Copiar (ver Figura G - 14). Esto genera una nueva capa en el panel Malla, se recomienda cambiar el nombre de esta nueva capa para no confundir. La Figura G - 15 da un ejemplo de la malla original y la acotada.

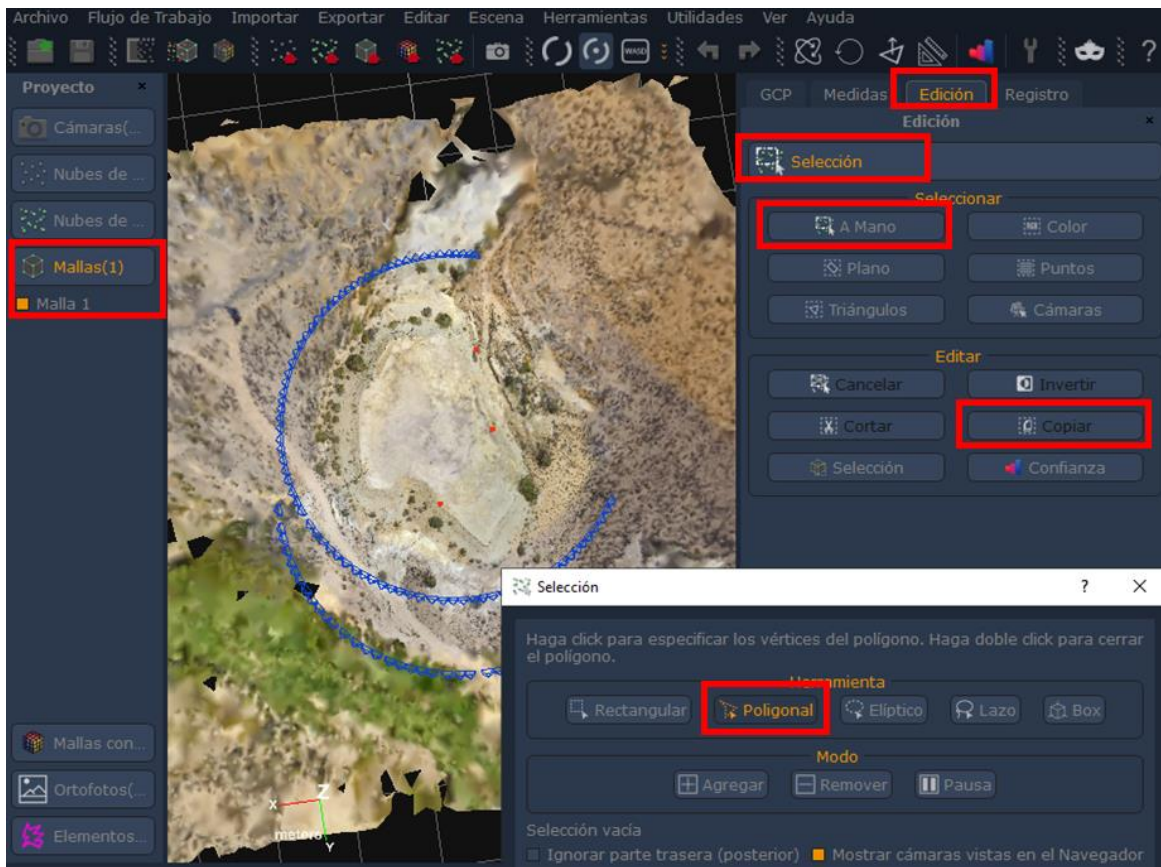


Figura G - 14: Paneles y opciones a seleccionar para acotar malla.

Finalmente, para obtener el volumen desde el panel *Medición* se debe hacer clic en *Volumen*, seleccionar la malla ya acotada y hacer clic en *Calcular*. De forma similar se procede para el cálculo de área: *Medición* > *Área* y selección de malla. Los resultados de ambos cálculos se observan en una pestaña emergente. El procedimiento se ejemplifica en la Figura G - 16.



Figura G - 15: Comparación entre malla original y acotada.

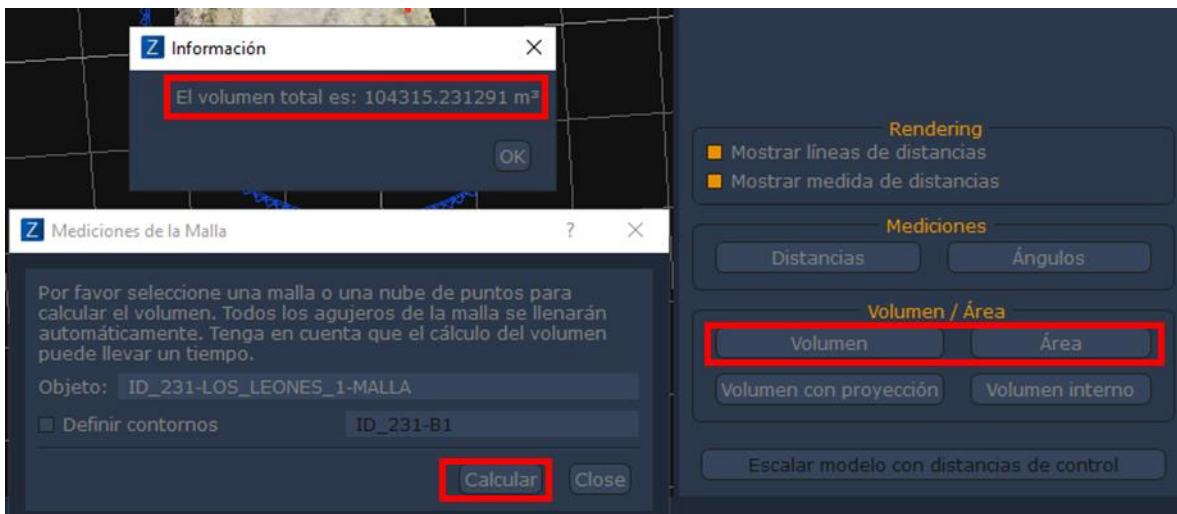


Figura G - 16: Cálculo de volumen y área.

G.4. Secciones críticas

G.4.1. Cálculo de alturas y pendientes

Al inicio, con el fin de guiar y verificar los cálculos realizados por medio del modelo 3D se procede a cargar en este las rutas obtenidas por medio del GPS. Estas deben ser importadas como puntos de control para lo cual el programa tiene la opción *GCP > Importar/Exportar > Importar 3D*. El archivo por ingresar debe estar en formato txt cuyas columnas presentan la estructura de la Tabla G - 1. Donde la primera columna corresponde al nombre que se le

desea asignar al conjunto de datos (por tal motivo cada punto debe llevar el mismo nombre), la segunda a la latitud, la tercera a la longitud y finalmente la elevación.

Tabla G - 1: Estructura de archivos txt a importar.

Punto1	100	200	2
Punto1	150	420	17

Para obtener este formato de manera automática para todos los depósitos, se hace uso de MATLAB el cual toma los archivos csv previamente creados (con coordenada x, y, z como única información) y agrega una columna al inicio con la letra respectiva a cada ruta (A-B-C). Los archivos son cargados a Zephyr Aerial y se observan como muestra la Figura G - 17.

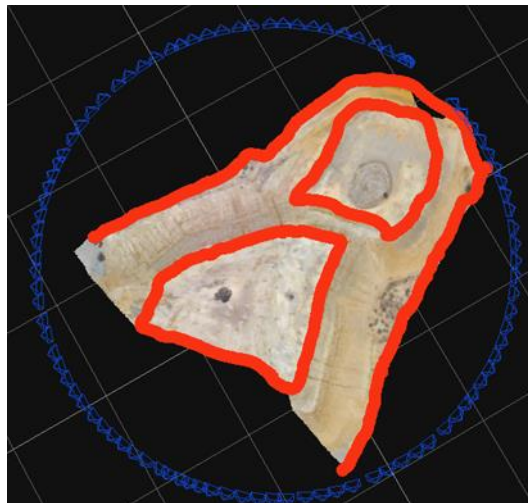


Figura G - 17: Importación de rutas como GCP.

Para el cálculo de altura se procede a seleccionar zonas que visualmente presentan mayor altura, se encuentran cercanas a la zona de interés (según clasificación) y poseen mayor pendiente, esto último en base a grietas observadas en los muros por escurrimiento de agua, ya que el agua siempre seguirá el camino con máxima pendiente. Esta selección también se apoya en las observaciones realizadas en terreno.

Luego se registran los GCP de las rutas que describen la recta, tanto superior como inferior, tal que permitan definir una recta con trayectoria similar a la grieta seleccionada como guía. Con la herramienta distancia se traza una línea entre estos 2 GCP con el fin de que la pendiente seleccionada quede registrada en el modelo y poder reconocerla más adelante (Figura G - 18). El registro de estos GCP permite identificarlos en sus respectivos archivos csv, definir cada una de sus coordenadas z y con ello determinar la altura del depósito analizado.

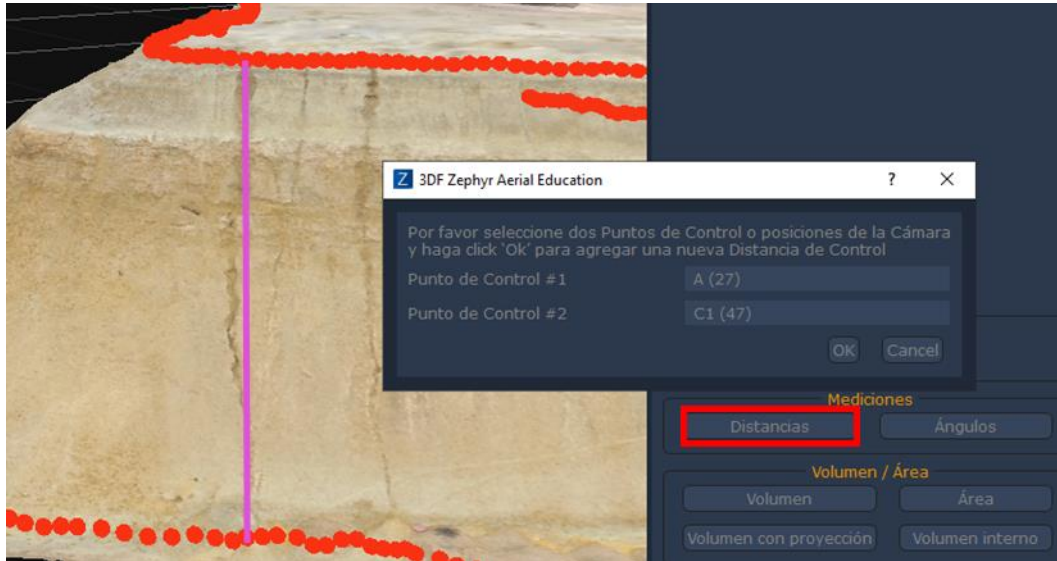


Figura G - 18: Trazado de recta guía.

Luego para el cálculo de pendiente, evitando cambiar la vista del modelo, se acota la recta a evaluar generando 2 nuevos GCP por medio de *GCP > Agregar punto de control > Elegir*, lo que permite seleccionar directamente en el modelo 3D el GCP a agregar. Estos nuevos puntos de control se deben situar sobre la línea trazada previamente. Todo esto con el fin de que la recta a evaluar no presente concavidad y la pendiente sea representativa.

Posteriormente, haciendo uso de *Herramientas de mediciones rápidas* se seleccionan los 2 últimos GCP creados, obteniendo la distancia entre ambos (D), su diferencia en la vertical (H) y el ángulo de inclinación entre éstos (I) (Figura G - 19), es este último dato el que entrega la pendiente de la sección evaluada.

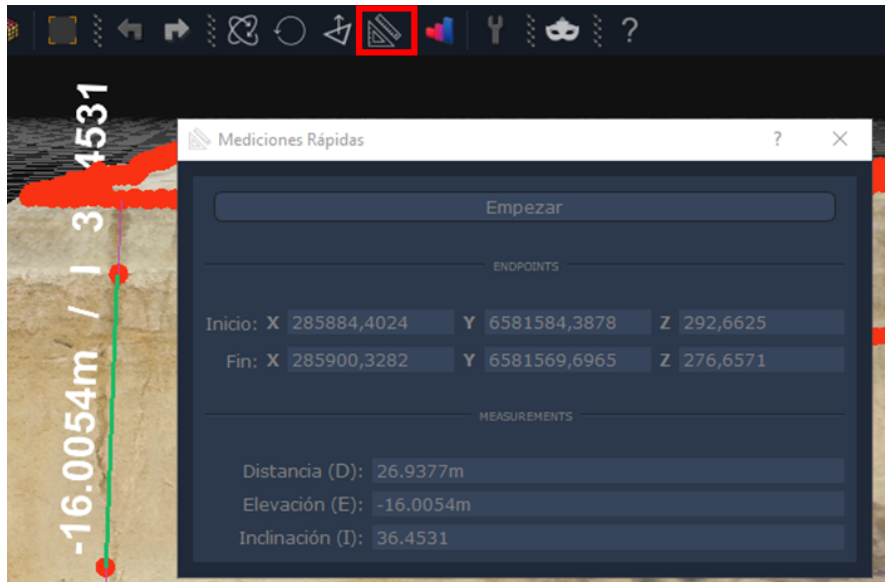


Figura G - 19: Obtención de pendiente, distancia y altura entre puntos.

El mismo procedimiento se realiza para al menos 4 secciones, se evalúan las más representativas y los valores máximos. De este análisis se fija finalmente la altura y pendiente del depósito, y junto con ello la sección crítica a evaluar.

G.4.2. Pendiente del terreno

La pendiente del terreno a identificar corresponde a aquella en la que se apoya la sección crítica a analizar. Para obtenerla se hace uso de MATLAB. La rutina consiste en cargar las coordenadas que definen el contorno del depósito en su base, es decir, la ruta con menor cota, y junto con ello las coordenadas de los 2 GCP que guían la pendiente de la sección crítica (los primero GCP seleccionados directamente de las rutas). El programa con estos dos puntos genera una recta con ángulo fijo que es prolongada a través del depósito, interceptando el contorno del depósito en el otro extremo. La Figura G - 20 esquematiza el problema, en verde los GCP que definen la sección crítica y en rojo el punto de intercepción con el contorno.

La rutina guarda la información del punto de intercepción encontrado: latitud, longitud y coordenada z, lo que permite junto a la información del punto inferior de la sección crítica obtener de forma estimativa la pendiente del terreno.

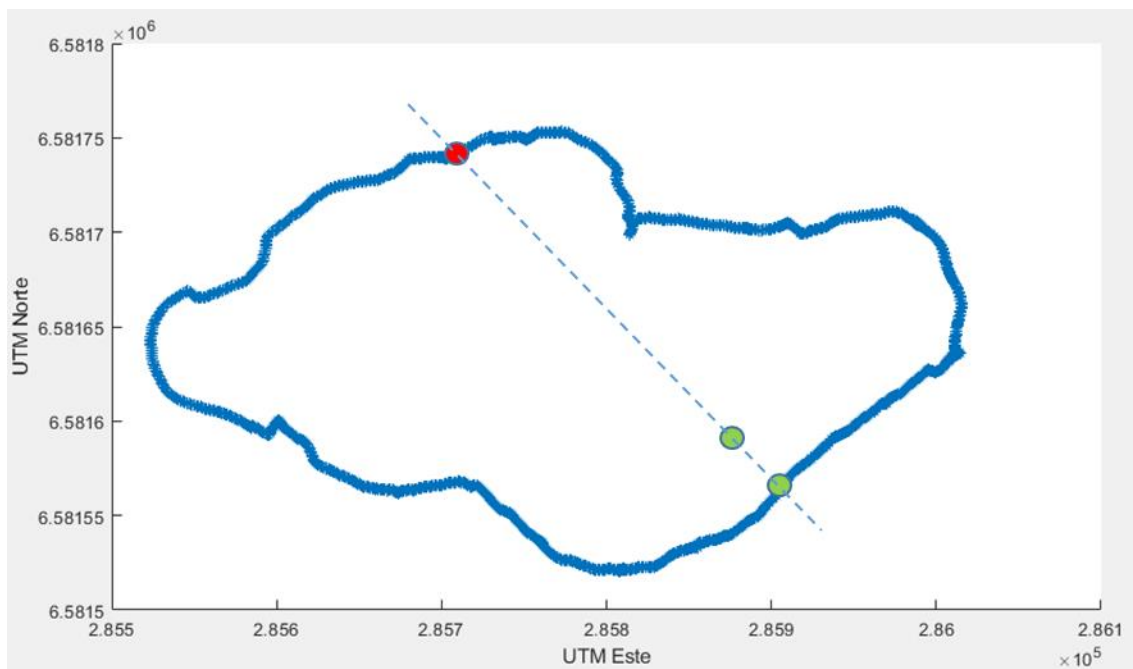


Figura G - 20: Ejemplo para obtención de pendiente del terreno.

Anexo H. Análisis de Estabilidad

Las figuras acá adjuntas dan a conocer las gráficas de la función de densidad y distribución para cada caso analizado.

H.1. Depósito A

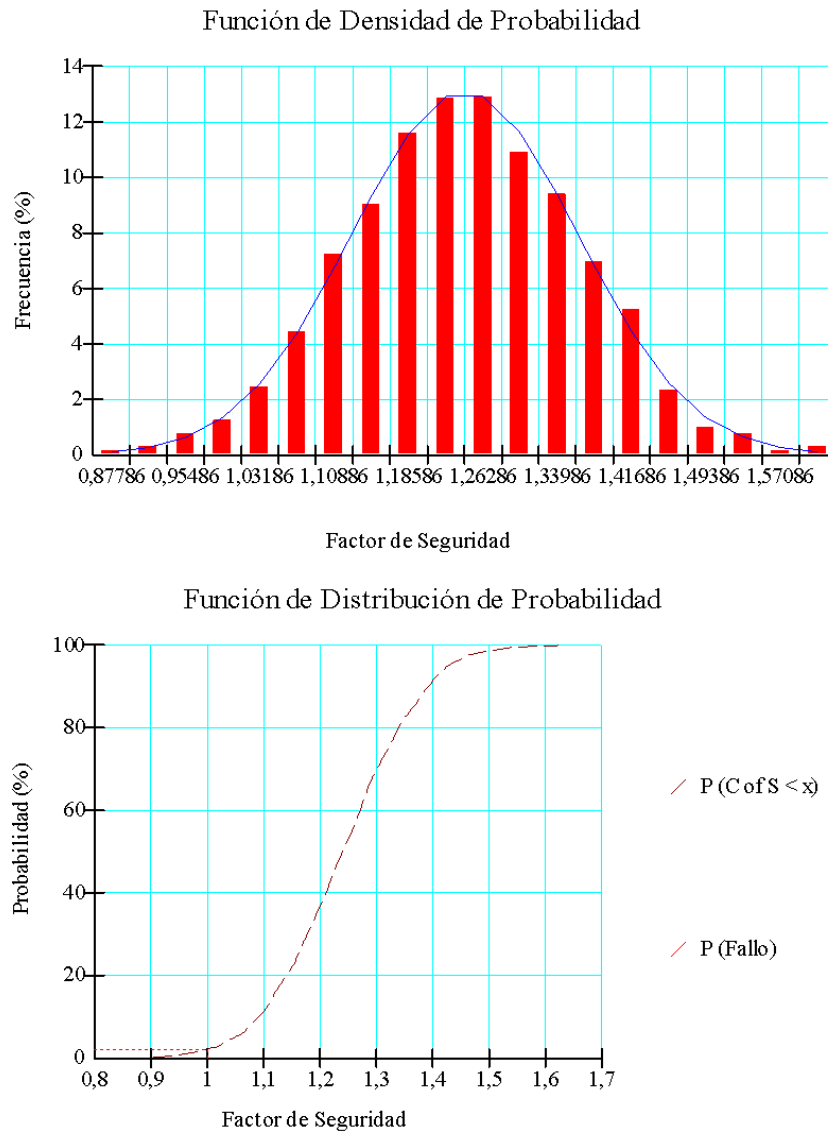


Figura H- 1: Función de densidad y probabilidad para el Depósito A, caso 1.

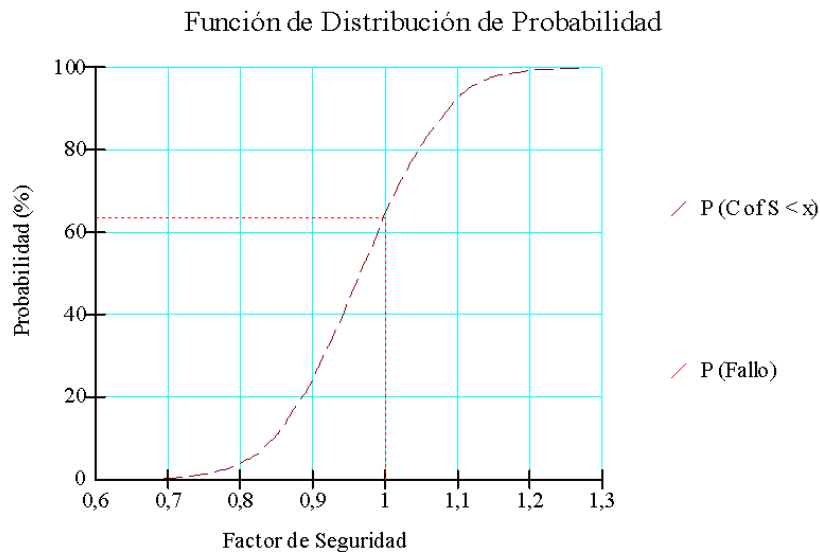
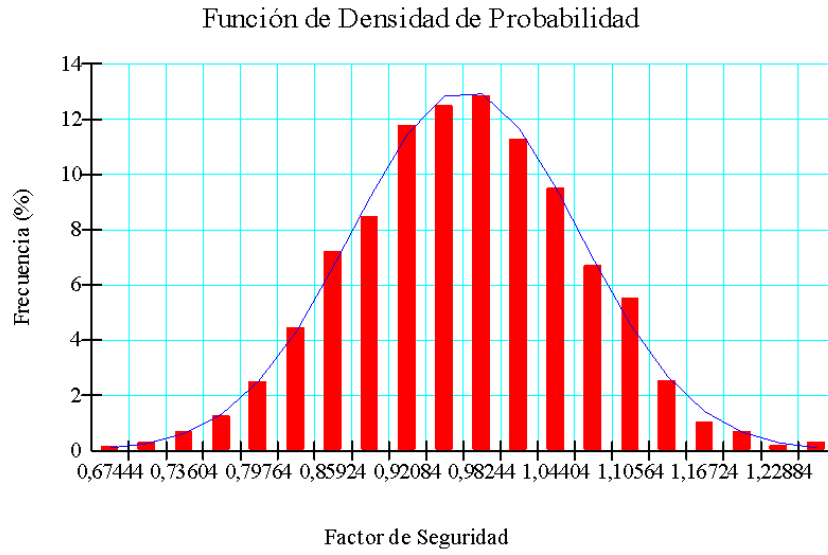


Figura H - 2: Función de densidad y probabilidad para el Depósito A, caso 2.

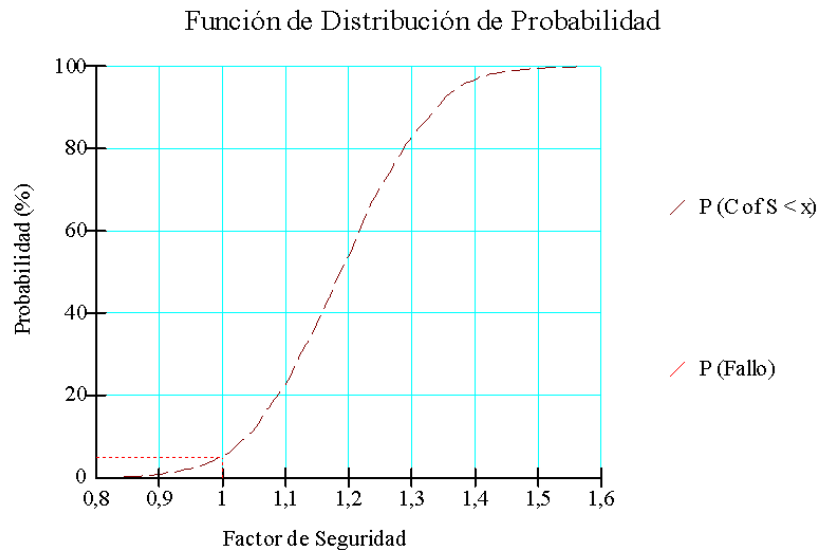


Figura H - 3: Función de densidad y probabilidad para el Depósito A, caso 3.

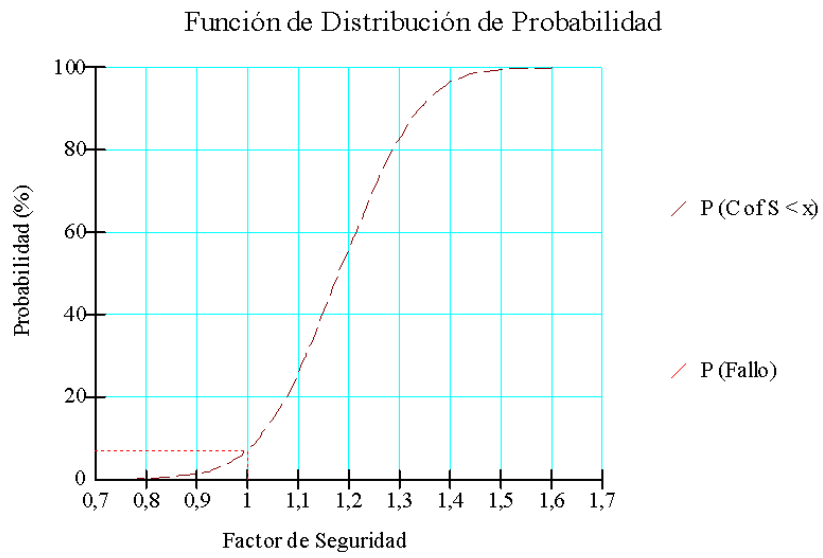
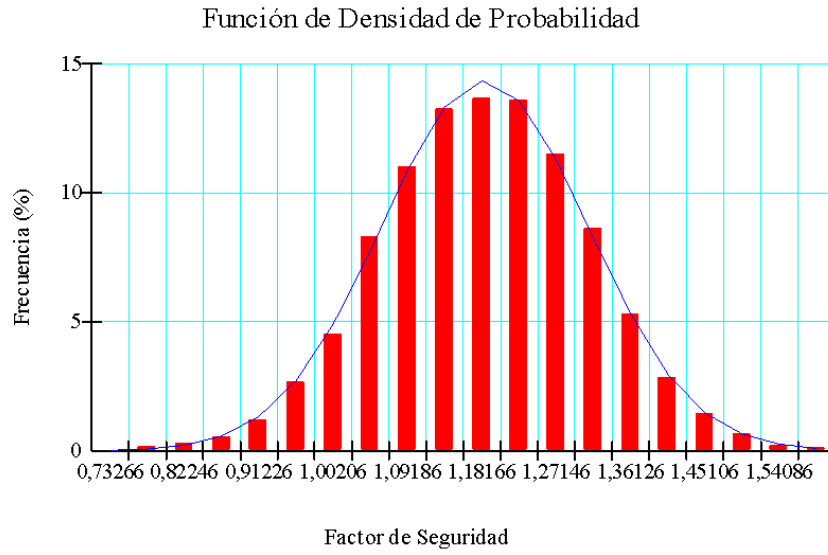


Figura H - 4: Función de densidad y probabilidad para el Depósito A, caso 4.

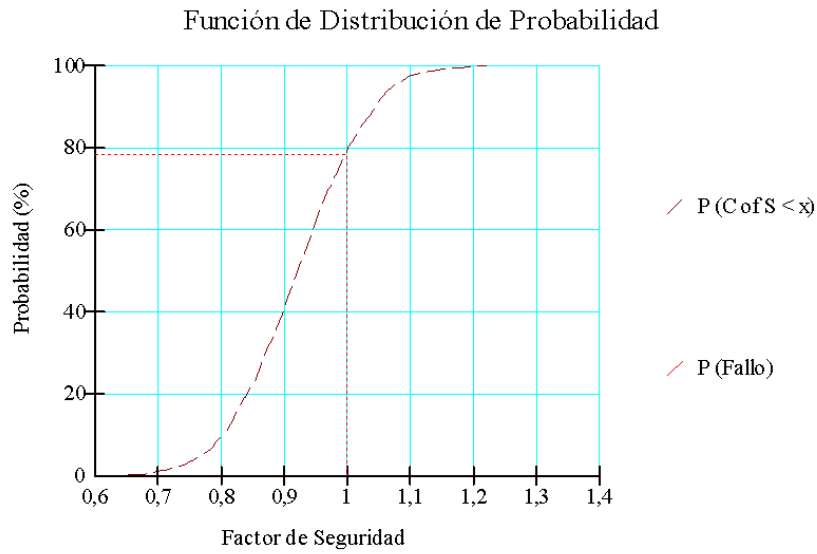
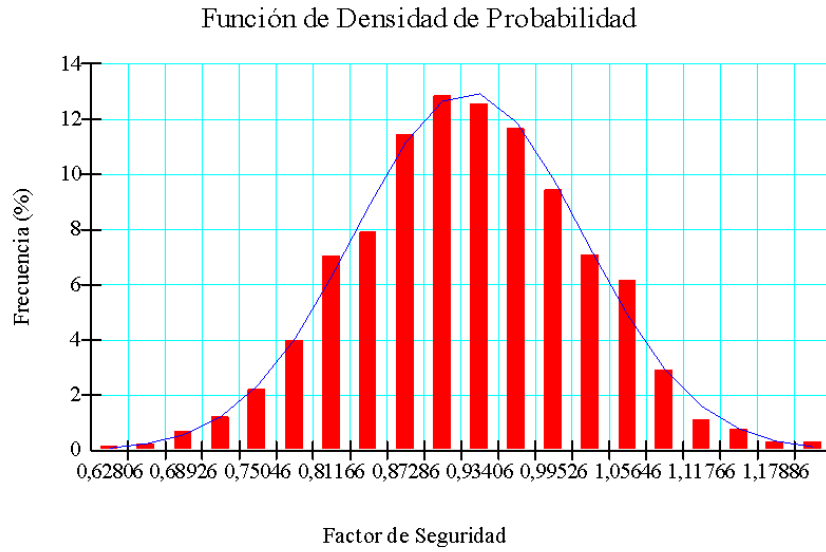


Figura H - 5: Función de densidad y probabilidad para el Depósito A, caso 5.

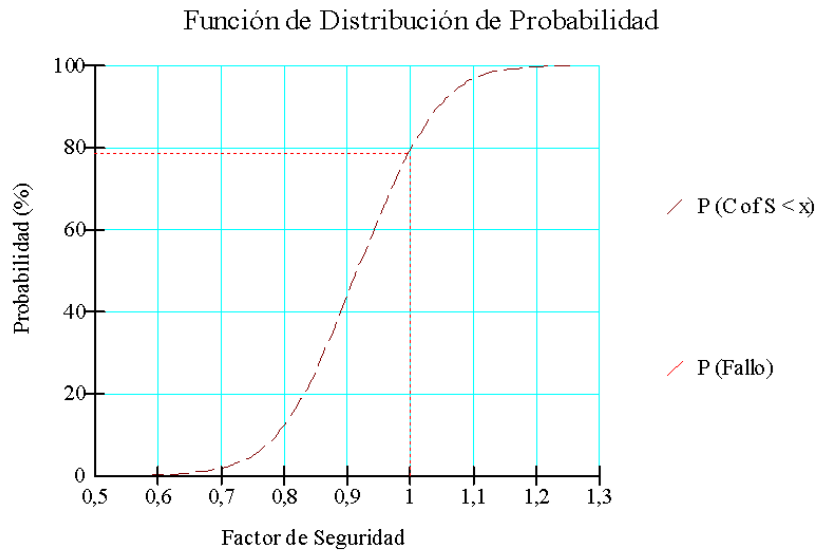
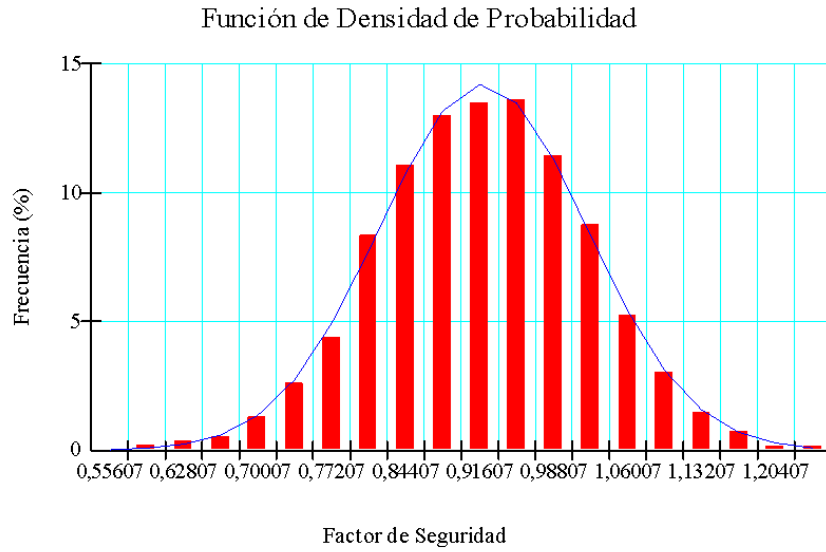


Figura H - 6: Función de densidad y probabilidad para el Depósito A, caso 6.

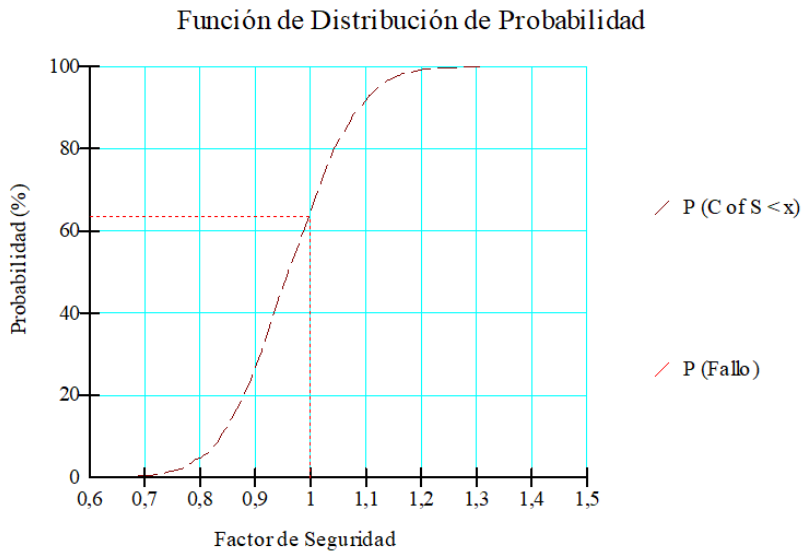
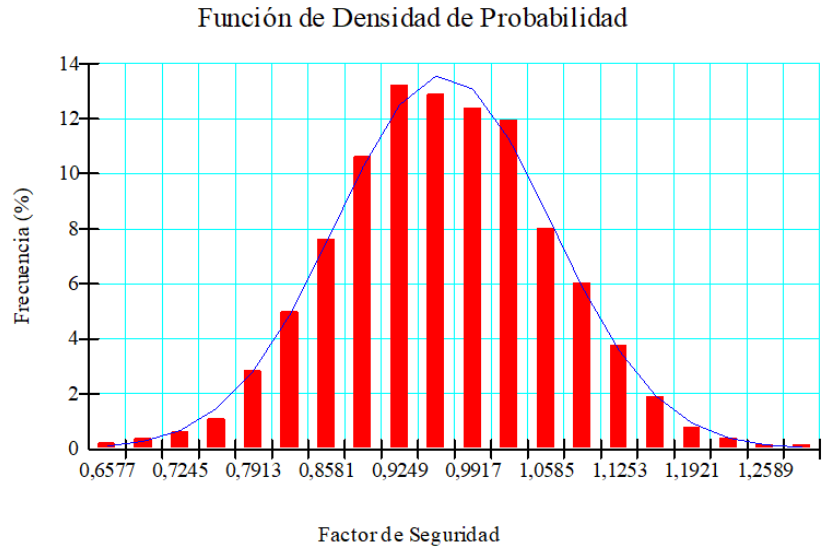


Figura H - 7: Función de densidad y probabilidad para el Depósito A, caso 7.

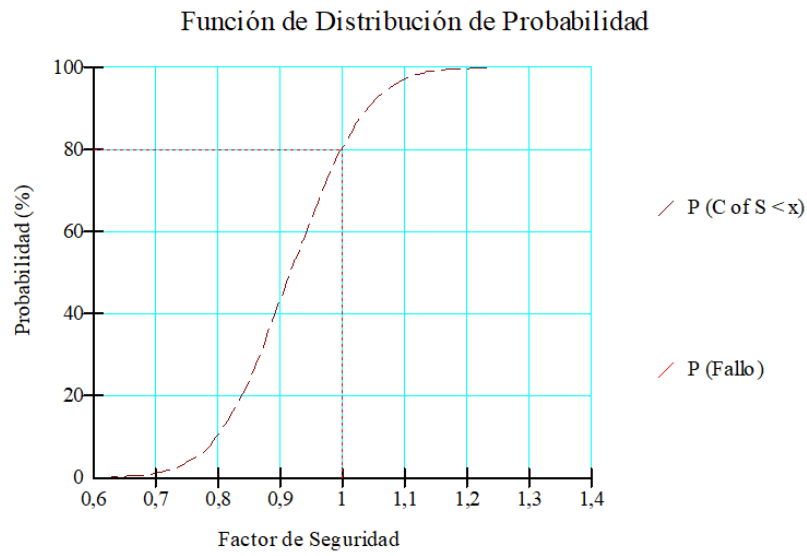
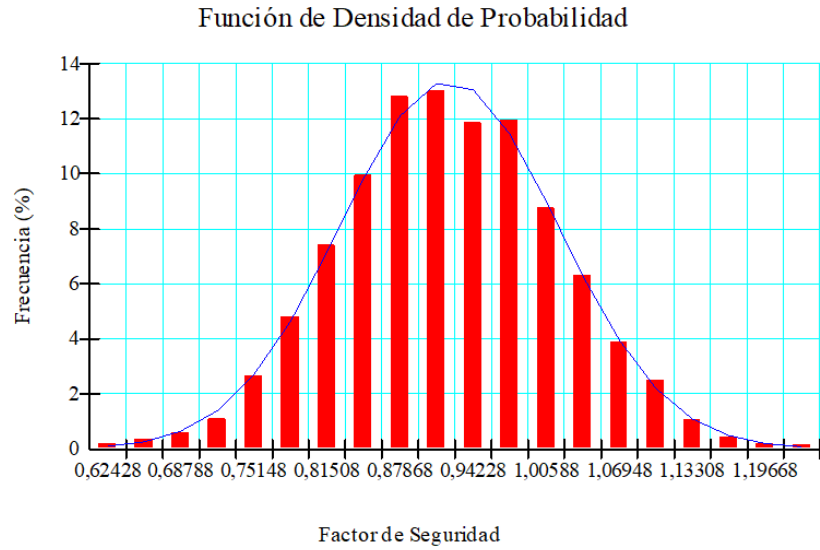


Figura H - 8: Función de densidad y probabilidad para el Depósito A, caso 8.

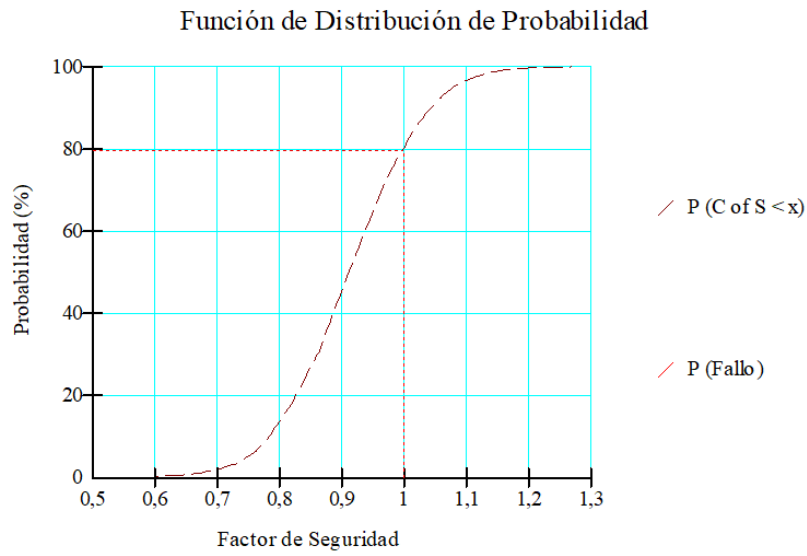
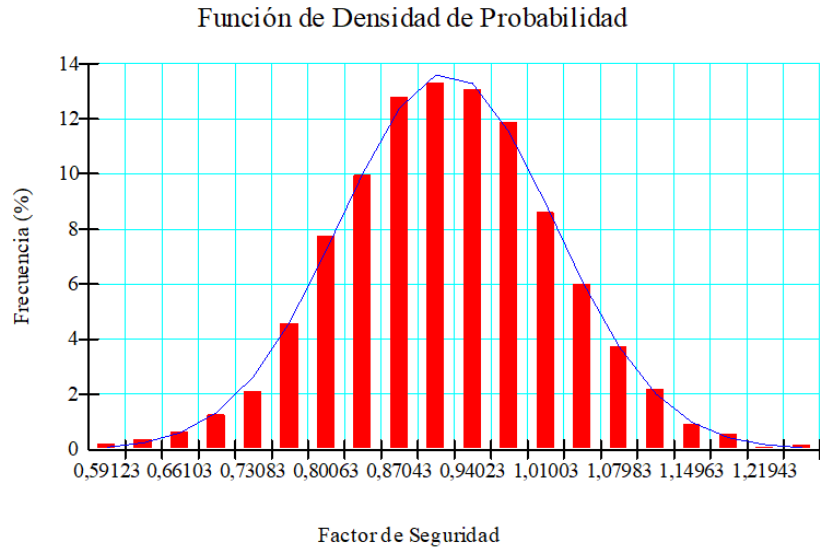


Figura H - 9: Función de densidad y probabilidad para el Depósito A, caso 9.

H.2. Depósito B

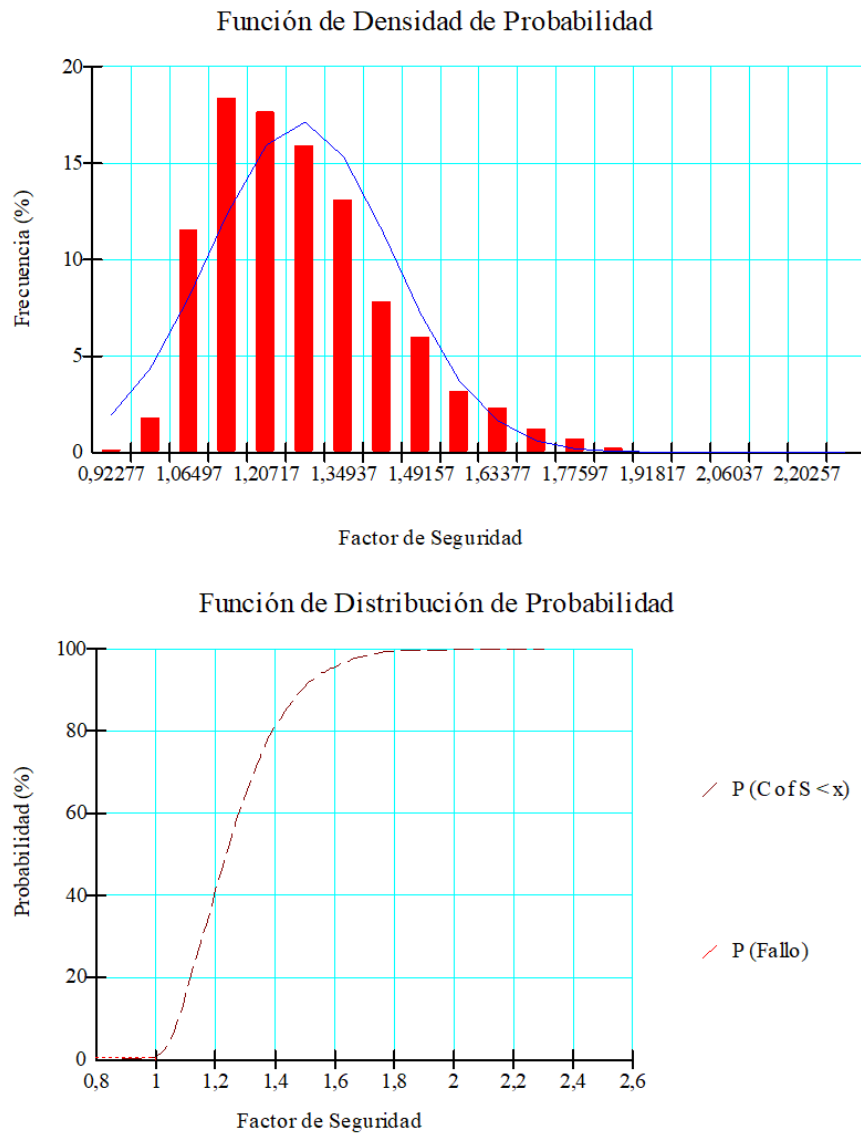


Figura H - 10: Función de densidad y probabilidad para el Depósito B, caso 1.

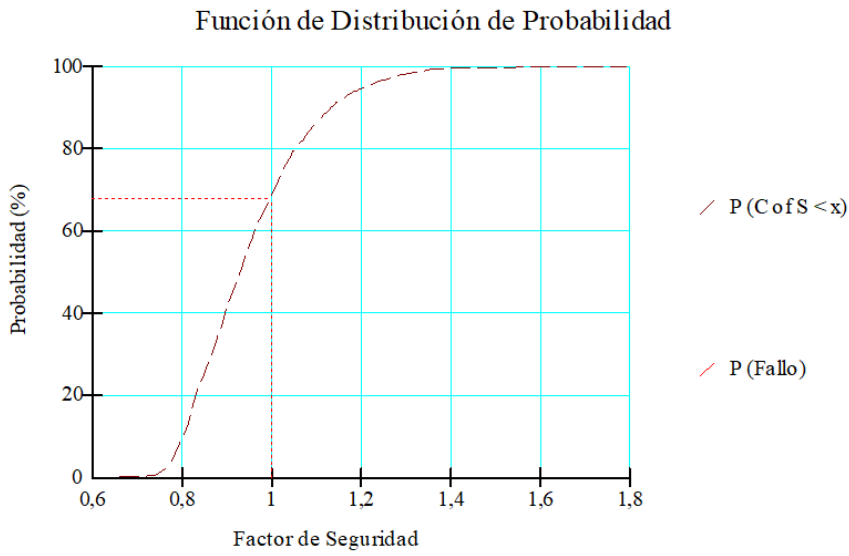
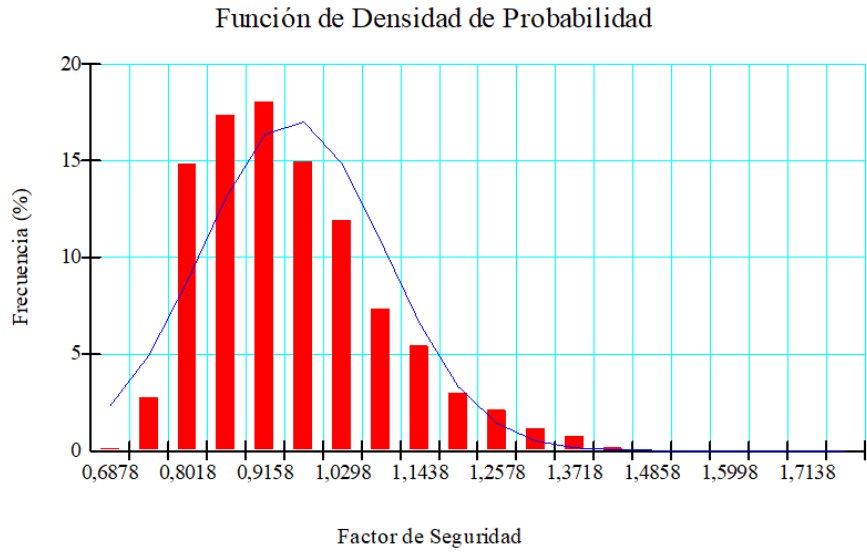


Figura H - 11: Función de densidad y probabilidad para el Depósito B, caso 2.

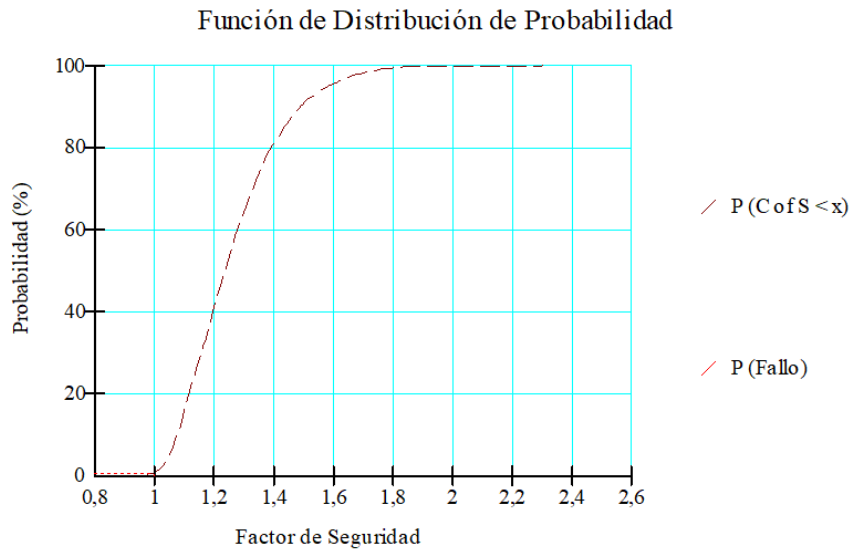
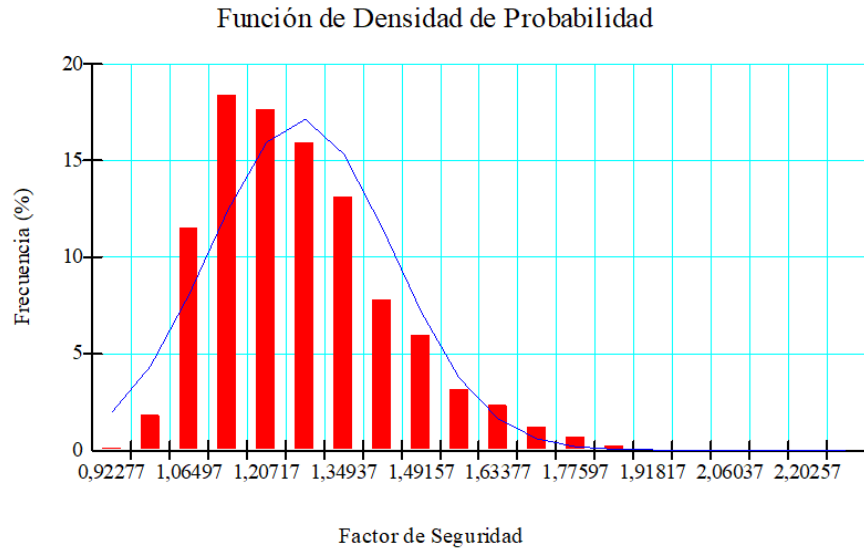


Figura H - 12: Función de densidad y probabilidad para el Depósito B, caso 3.

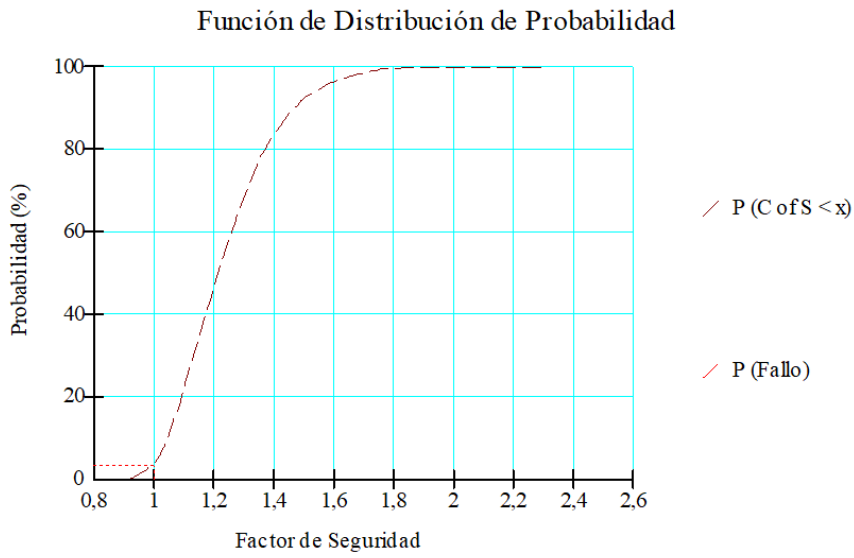
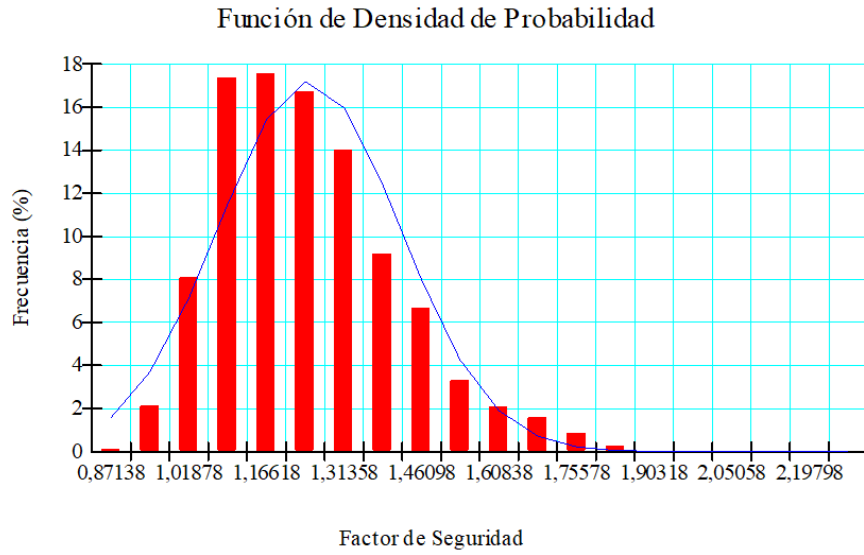


Figura H - 13: Función de densidad y probabilidad para el Depósito B, caso 4.

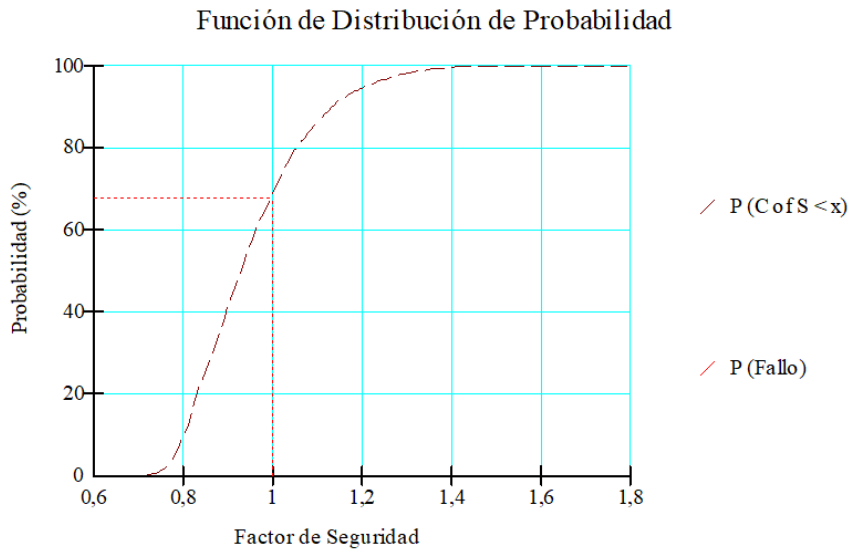
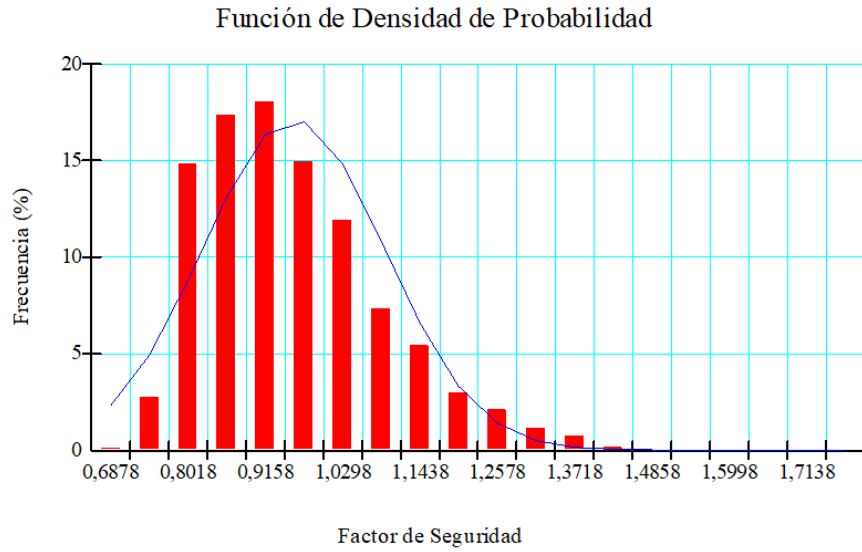


Figura H - 14: Función de densidad y probabilidad para el Depósito B, caso 5.

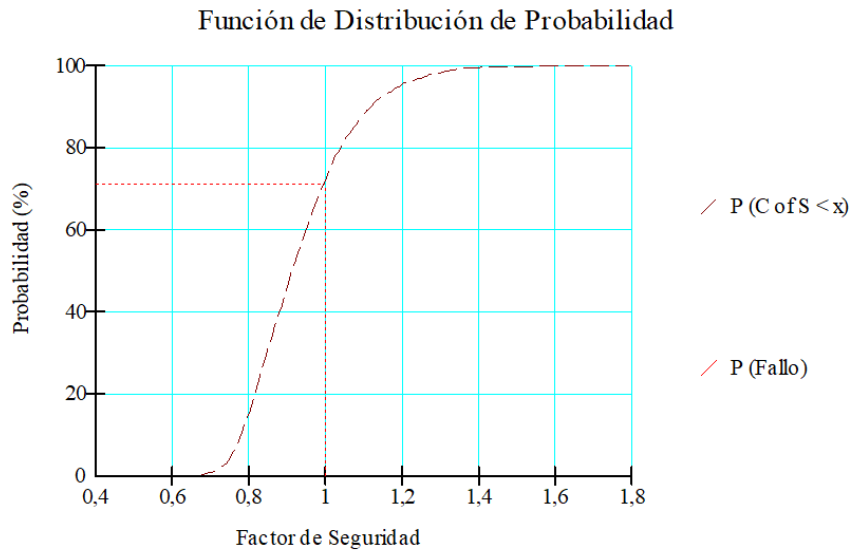
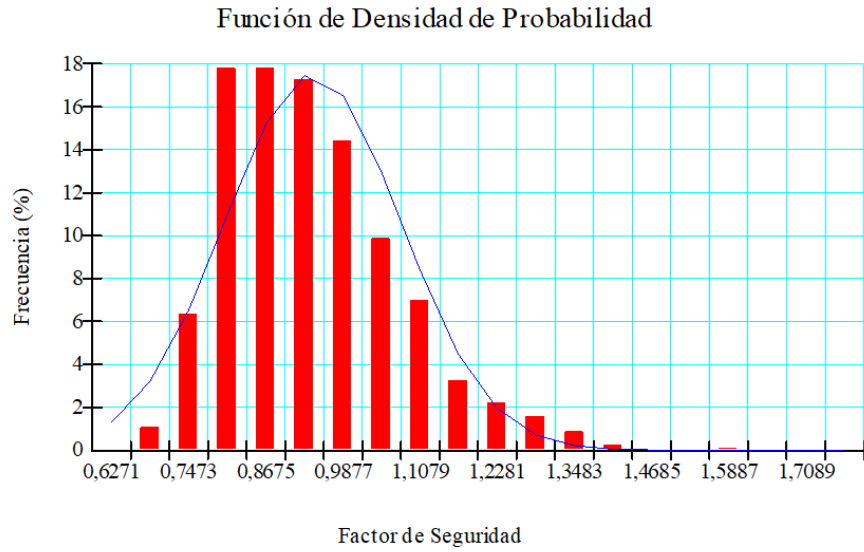


Figura H - 15: Función de densidad y probabilidad para el Depósito B, caso 6.

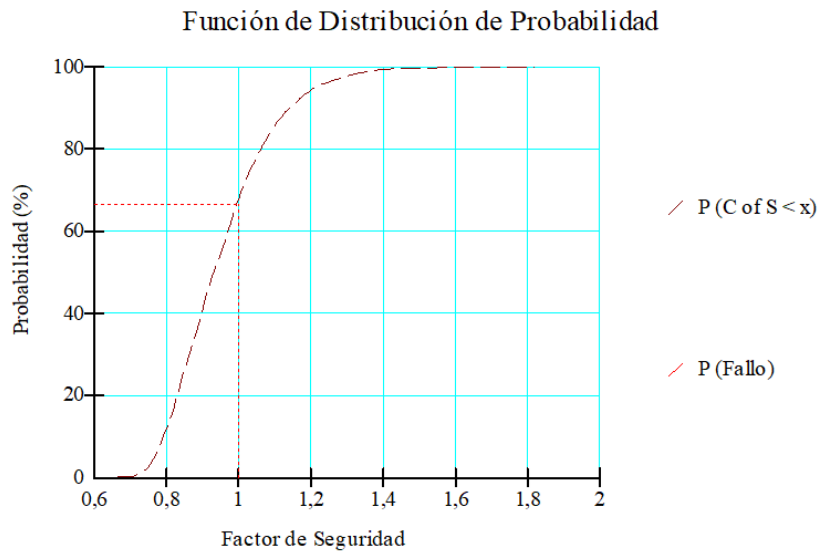
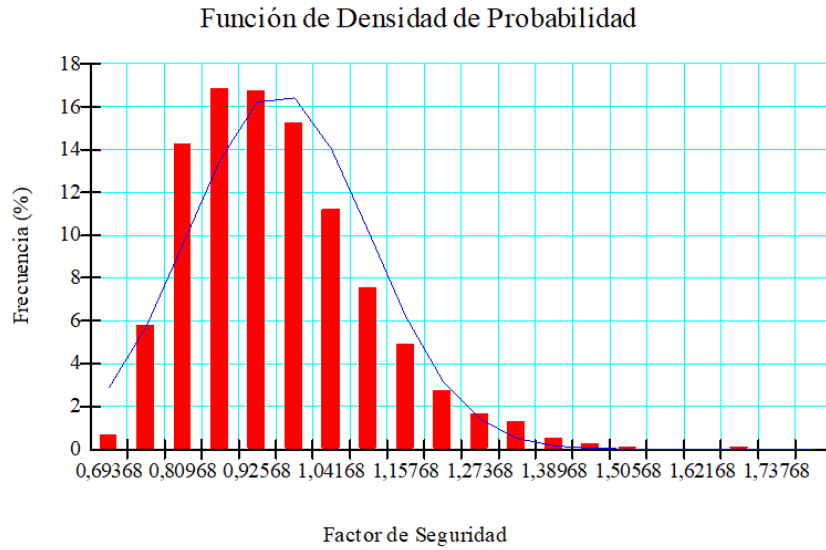


Figura H - 16: Función de densidad y probabilidad para el Depósito B, caso 7.

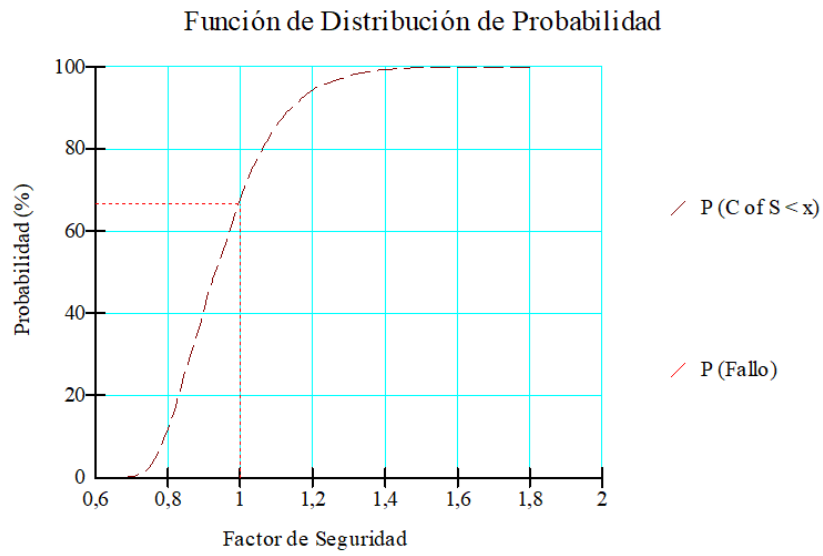
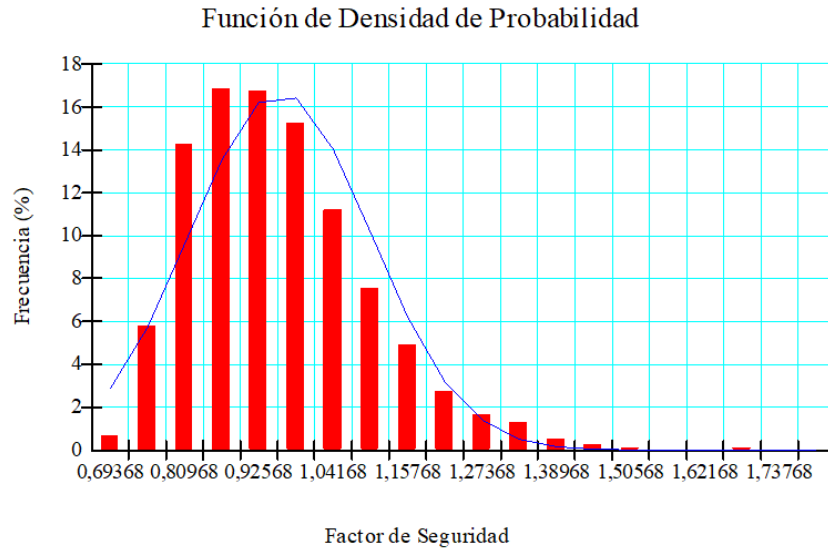


Figura H - 17: Función de densidad y probabilidad para el Depósito B, caso 8.

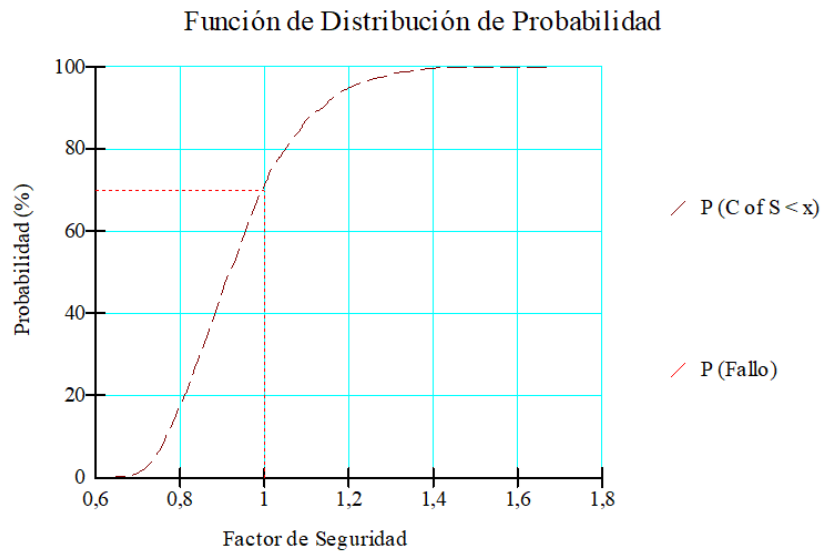
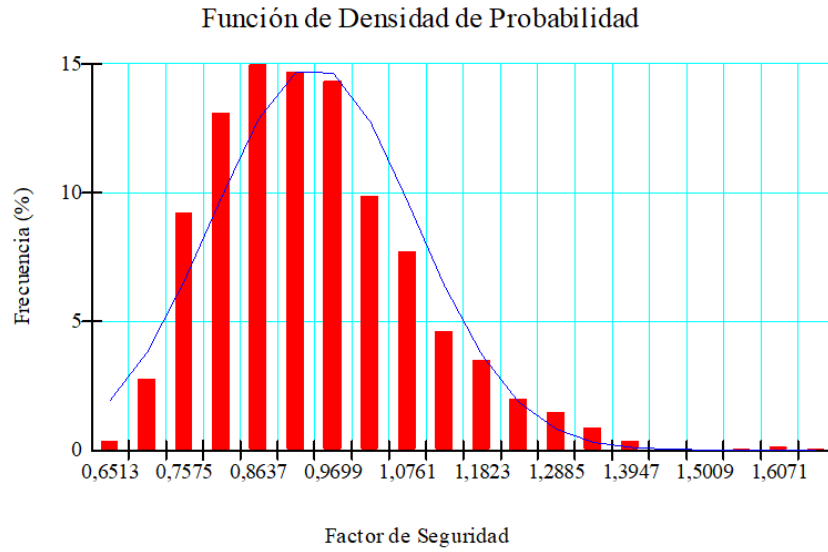


Figura H - 18: Función de densidad y probabilidad para el Depósito B, caso 9.