



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROPUESTA PARA EL CIERRE DEL  
DEPÓSITO DE JALES 1-2-3 DEL COMPLEJO  
MINERO-METALÚRGICO LA CARIDAD, CON  
BASE EN LA NORMATIVIDAD AMBIENTAL  
MEXICANA

TESIS

Que para obtener el título de  
Ingeniero de Minas y Metalurgista

PRESENTA

Bernardo Moreno Onofre

DIRECTOR DE TESIS

M.I. José Enrique Santos Jallath



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*I will not be a man satisfied until I am a man exhausted*

Corey Taylor of Slipknot/Stone Sour

*Todo esto se lo dedico a mi madre, por darme la vida, enseñarme desde pequeño que se puede luchar contra todo lo que diga el mundo, el apoyarme y creer en mí en todo momento, que con su amor, paciencia y consejos me han forjado la persona que soy ahora. Y con ese ejemplo que me has dado, seguiré alcanzando mis metas y sueños. Te amo mamá.*

*A todos mis amigos que son mis hermanos que he encontrado a través de este camino llamada vida, quienes también me han apoyado a seguir adelante.*

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, y Facultad de Ingeniería, por darme los conocimientos y desarrollarme en la carrera de Ing. de Minas y Metalurgia.

A la unidad minera La Caridad y Grupo México, por otorgarme la oportunidad de realizar este trabajo.

Al equipo del departamento de Ecología en especial al Ing. Hiram Jacob y el Lic. Álvaro Miranda y al equipo del laboratorio de ensayos.

A todos mis maestros quienes me han dejado muchísimas enseñanzas dentro y fuera de las aulas, en especial a mi director de tesis, el Ing. Santos quien me apoyo mucho durante esta etapa final.

# ÍNDICE

---

LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABLAS.....	IX
RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 Jales.....	7
2.2 Depósitos de jales.....	10
2.3 Planes de cierre.....	16
2.4 Regulaciones ambientales a nivel mundial.....	19
2.5 Normatividad ambiental en México.....	23
3. CONDICIONES ACTUALES DEL DEPÓSITO.....	26
3.1 Generalidades.....	26
3.2 Zonas cubiertas.....	27
3.3 Especies utilizadas en la reforestación.....	29
3.4 Condiciones del talud.....	32
3.5 Diagnóstico del estado del depósito.....	33
4. CARACTERÍSTICAS DE LA VEGETACIÓN.....	35
4.1 Muestreo de suelo y jal.....	35
4.2 Muestreo de especies vegetales.....	36
4.3 Resultados.....	39
4.3.1 Jal y Suelo.....	39
4.3.2 Plantas.....	40
5. ACCIONES NECESARIAS PARA EL CIERRE.....	43
5.1 Recubrimiento del vaso.....	43
5.2 Reforestación.....	45
5.3 Manejo de escurrimientos pluviales.....	47
5.4 Reforzamiento del talud.....	60

5.5	Planeación de actividades para el cierre .....	65
5.5.1	Reforzamiento de talud .....	65
5.5.2	Recubrimiento del vaso .....	65
5.5.3	Construcción de canales de desvío.....	66
5.5.4	Reforestación.....	66
6.	ESTIMACIÓN DE COSTOS .....	68
6.1	Reforzamiento de talud.....	69
6.2	Recubrimiento del vaso.....	69
6.3	Construcción de canal .....	70
6.4	Reforestación .....	71
6.5	Inversión total.....	71
7.	CONCLUSIONES .....	72
	Bibliografía .....	74
	Mesografía.....	77
ANEXOS	.....	78
ANEXO 1	.....	79
	Procedimiento para muestro y análisis de muestras.....	79
ANEXO 2	.....	85
	Cálculos de tiempos y costos en planificación de actividades.....	85

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de mineral y generación del jal (Grupo México).....	7
Figura 2. Conducción de jales hacia depósito (Tailings.Info, 2016).....	8
Figura 3. Relación de permeabilidad en jales (Karlheinz Spitz, 2009).....	10
Figura 4. Estructura de un depósito de jales (McMillan, 2011).....	11
Figura 5. Método Aguas Arriba (Karlheinz Spitz, 2009).....	12
Figura 6. Método Aguas Abajo (Karlheinz Spitz, 2009).....	12
Figura 7. Método Aguas Arriba (Karlheinz Spitz, 2009).....	12
Figura 8. Jales espesados, proyecto Esperanza, Chile (SRK Consulting, 2010).....	13
Figura 9. Jales en pasta (Tailings.Info, 2016).....	14
Figura 10. Depósito de jales secos La Coipa, Chile (Tailings.Info, 2016).....	14
Figura 11. Jales como relleno en tajos (Tailings.Info, 2016).....	15
Figura 12. Jal como relleno de minas subterráneas (Tailings.Info, 2016).....	15
Figura 13. Jales depositados en mar profundo (Karlheinz Spitz, 2009).....	16
Figura 14. Planificación de un plan de cierre de minas (ICMM, 2009).....	17
Figura 15. Riesgos y contingencias durante la vida de una mina (ICMM, 2009).....	18
Figura 16. Rehabilitación de mina Gold Cross, Nueva Zelanda (Roberto Oyarzun, 2011).....	22
Figura 17. Depósito "Los Quillayes", Chile. (Consejo Minero, 2013).....	22
Figura 18. Mina de San José o "Tablachaca", Perú (MCF, Minería con Futuro, 2016).....	23
Figura 19. Cierre de mina Cuale, Jalisco (Alvarado, 2015).....	23
Figura 20. Vías de acceso hacia el depósito de jales 1-2-3.....	26
Figura 21. Área de vaso en depósito de jales 1-2-3.....	27
Figura 22. Áreas dentro del vaso sin cubrir.....	28
Figura 23. Bancos de préstamo ubicados cerca del depósito de jales.....	28
Figura 24. Ubicación de zonas en reforestación.....	30
Figura 25. Sitio asignado para reubicación de especies.....	31
Figura 26. Vegetación que ha crecido de manera natural, sobre la superficie cubierta.....	32
Figura 27. Bermas actuales en la cortina contenedora.....	33
Figura 28. Ubicación de puntos muestreados en la presa de jales.....	36
Figura 29. Mezquite que se encuentra debajo del jal.....	37
Figura 30. Especie creciendo directamente en jales.....	37
Figura 31. Ubicación de muestras vegetales.....	38
Figura 32. Condiciones actuales del depósito de jales.....	43
Figura 33. Representación de características dentro del depósito.....	44
Figura 34. Modelo 3D de presa de jales.....	44



Figura 35. Especies con menor índice de acumulación en metales pesados. ....	45
Figura 36. Palo Loco, especie útil para reforestación. ....	45
Figura 37. Modelo de reforestación sobre el depósito. ....	47
Figura 38. Mapa de vectores de los escurrimientos, zona cercana al depósito. ....	49
Figura 39. Representación en 3D y vectores del depósito. ....	50
Figura 40. Cuenca cercana al depósito de jales. ....	51
Figura 41. Delimitación del depósito de jales. ....	52
Figura 42. Valores de "K", en función de tipo y uso de suelo (CONAGUA, 2015). ....	54
Figura 43. Ecuación para el cálculo de área transversal de un canal abierto trapezoidal. ....	55
Figura 44. Posición de canales de desvío. ....	55
Figura 45. Valores de "n" para fórmulas de Manning (SAGARPA, 2012). ....	57
Figura 46. Dimensiones de canales de desvío. ....	58
Figura 47. Modelado de canales. ....	59
Figura 48. Modelado de depósito con canales de desvío. ....	59
Figura 49. Área transversal de construcción de canal 1. ....	60
Figura 50. Secciones hechas sobre la cortina. ....	62
Figura 51. Reconfiguración en cortina. ....	63
Figura 52. Nueva configuración en cortina de la Presa 1-2-3. ....	64
Figura 53. Diagrama de Gantt de actividades para el cierre del depósito. ....	67
Figura 54. Limpieza antes de toma de muestra. ....	79
Figura 55. Identificación de zonas muestreadas. ....	80
Figura 56. Secado de muestras. ....	80
Figura 57. Muestras colocadas en parrilla. ....	81
Figura 58. Aforo de muestras a 100 ml. ....	82
Figura 59. Equipo y lectura de muestras de jal y sustrato. ....	82
Figura 60. Muestras de raíz. ....	83
Figura 61. Muestras antes y después de pulverizar. ....	84
Figura 62. Ataque de muestras vegetales. ....	84

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de jal. (SRK Consulting, 2010).....	9
Tabla 2. Límites Máximos Permisibles NOM-052 (SEMARNAT, 2005).....	24
Tabla 3. Áreas en reforestación. ....	29
Tabla 4. Especies reubicadas. ....	30
Tabla 5. Especies de crecimiento natural.....	31
Tabla 6. Ubicación de puntos muestreados en el depósito.....	35
Tabla 7. Muestras vegetales. ....	38
Tabla 8. Resultados de análisis de jal.....	39
Tabla 9. Resultados de análisis de suelo.....	40
Tabla 10. Resultados en hoja.....	40
Tabla 11. Resultados en tallo. ....	41
Tabla 12. Resultados en raíz. ....	41
Tabla 13. Concentraciones totales.....	42
Tabla 14. Características dentro del depósito de jales. ....	43
Tabla 15. Datos de cuenca y depósito. ....	52
Tabla 16. Datos de precipitación.....	52
Tabla 17 Canales de desvío.....	57
Tabla 18. Costos horarios (CMIC) ....	68
Tabla 19. Costo de reforzamiento de talud.....	69
Tabla 20. Costo de recubrimiento en vaso. ....	69
Tabla 23. Materiales para construcción de canal.....	70
Tabla 24. Cantidades de material por canal. ....	70
Tabla 21. Costo de construcción de canales de desvío.....	70
Tabla 22. Costos de reforestación.....	71

# RESUMEN

---

El caso de estudio, es el depósito viejo de almacenamiento de jales, que tiene por nombre Depósito 1-2-3, del complejo minero-metalúrgico La Caridad. Éste se encuentra ubicado a 22 kilómetros del poblado de Nacozari de García, Sonora.

La NOM-141-SEMARNAT-2003, *Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales*. Que fue publicada en el Diario Oficial de la Federación y entrando en vigor, el 17 de septiembre del año 2003, es la que trata aspectos relacionados con la construcción y operación de depósitos de jales; además de referirse a los lineamientos establecidos en el apartado de 5.7 que se refieren a criterios de postoperación que son la base para el desarrollo de este trabajo.

Inicialmente se llevó a cabo una caracterización de suelo y jal para conocer las condiciones actuales del depósito. Posteriormente se analizaron plantas que crecen de manera natural sobre el vaso con el fin de conocer aquellas especies que acumulan metales en su estructura, y así identificar las más adecuadas para un programa de reforestación con especies de la región.

Como una medida de reforzamiento en el talud, se propuso una configuración de la cortina colocando tres bermas de seguridad con una altura de 7.5 m, inclinación de 10° y 5 m de ancho para el paso de vehículos.

El vaso del depósito se ha cubierto parcialmente con suelo extraído de bancos de préstamo cercanos; aún resta el 22.5 % del total de la superficie por cubrir; además es necesario configurar la pendiente en el vaso para el control del escurrimiento de agua pluvial hacia los extremos del depósito y evitar así la erosión; como medida se propuso una pendiente de -5% a partir del centro del depósito hacia los extremos.

En la periferia del depósito se propuso la construcción de dos canales para el desvío de agua pluvial que escurre de la parte alta de la cuenca hacia el depósito; ambos canales fueron diseñados con la información de precipitación pluvial en el lugar, la superficie de la cuenca donde se ubica el depósito y estimando un factor de escurrimiento de acuerdo con las características del terreno.

Se realizó una programación de actividades, con base en la cantidad de material a mover, tiempos en ciclos de movimiento de material y disponibilidad de equipo. Además; se estimó

un costo aproximado para cada actividad considerando el personal, equipo necesario y material para la construcción de los canales, así como semillas para la reforestación.

Las medidas propuestas en este trabajo, cumplen con lo establecido en la NOM-141, para la postoperación de este depósito en particular. Con esta propuesta se logra disminuir el impacto ambiental que podría causar el depósito a futuro, integrar el depósito al entorno y evitar la erosión del jal y la posible afectación de los alrededores.

# 1. INTRODUCCIÓN

---

En la minería, como cualquier industria, después del proceso de beneficio, hay una generación de residuos, los cuales son almacenados a las cercanías del complejo minero en depósitos que son diseñados y construidos durante la etapa de desarrollo de las obras de explotación minera. A estos depósitos comúnmente se les llama "presas de jales".

Para el almacenamiento de los jales debe haber control, teniendo en cuenta las características que posee, como es la cantidad para almacenar, impactos y riesgos asociados. Si no existe un control adecuado, puede ser un riesgo para el ambiente. En operaciones pasadas han llegado a desbordarse estos depósitos causando desastres al ambiente (Karlheinz Spitz, 2009).

Por ello se han desarrollado acciones para reintegrar al entorno el depósito que fue utilizado para el almacenamiento de residuos mineros, con el objetivo de evitar la dispersión de partículas y la contaminación de especies vegetales que son útiles para pastoreo, suelo, cuerpos de agua e incluso comunidades cercanas.

Existen métodos para la construcción y operación de estos depósitos, como son: aguas arriba, aguas abajo y línea central, a estos métodos se les conoce como métodos convencionales. Por otro lado, existen otros como los de jales espesados, jales en pasta y jales usados como material de relleno; éstos son el resultado de la búsqueda de nuevos métodos de almacenamiento que sean más seguros y convenientes para la empresa, comunidad y el ambiente.

México ha desarrollado una serie de Normas Oficiales Mexicanas para regular el manejo de los residuos mineros; a su vez, estas normas incluyen los lineamientos para hacer un cierre adecuado de los depósitos.

El manejo de los residuos mineros en México está regulado por leyes y normas. La *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos* (LGPGIR) en el artículo 17, señala que los residuos de la industria minero-metalúrgica son de competencia federal y podrán disponerse en el sitio de su generación conforme a las normas oficiales mexicanas aplicables (LGPGIR, 2015). En el *Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos* (RLGPGIR) en el artículo 34, título tercero; refiere que la disposición del residuo minero estará regulado por las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes, que serán emitidas.

La Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), expidió la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, *Que establece el procedimiento para caracterizar los*

*jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales* (SEMARNAT, 2004). Esta norma aprobada el 17 de septiembre del 2003 y publicada el 13 de septiembre del 2004 en el Diario Oficial de la Federación. Esta norma se promulga por el impacto que pueden generar los jales en el ambiente y el riesgo que pueden representar para la población.

La NOM 141 establece rangos o contenidos que sirven como base para clasificar los jales como peligrosos, de acuerdo a la movilidad de sus constituyentes tóxicos (sean metales y/o metaloides que contienen) y por el potencial de generar acidez. Para los límites permisibles de estos constituyentes tóxicos están señalados en la NOM-052.

En cada país se tienen lineamientos para proteger el ambiente a partir de la dispersión de residuos mineros. En estos lineamientos se estipulan las medidas necesarias para el cierre adecuado de los depósitos de jales. En países como Estados Unidos, Canadá, Alemania, Chile, Perú y Australia, tienen guías acerca de cómo realizar un cierre correcto de estos depósitos, estas guías pueden servir para los países que aún no cuentan con regulaciones ambientales.

El caso de estudio, es el depósito viejo de almacenamiento de jales, que tiene por nombre Depósito 1-2-3, del complejo minero-metalúrgico La Caridad. Éste se encuentra ubicado a 22 kilómetros del poblado de Nacozari de García, Sonora. En medio de una cordillera que se eleva a más de 1200 m.s.n.m. El distrito minero de Nacozari de García se encuentra localizado al noreste, exactamente a 256 km de la ciudad de Hermosillo.

El acceso al depósito, se realiza por vía terrestre, partiendo del poblado de Nacozari de García, por 19 km de camino pavimentado, atravesando el complejo metalúrgico inicia un camino de terracería por el que son otros 8 km hasta llegar al lugar.

La problemática de este depósito, es que presenta un cierre parcial, esto debido a una cantidad excesiva de agua, dentro del vaso de almacenamiento, por tal caso, en algunas zonas del vaso del depósito hay recubrimiento de suelo, mientras que en otras no, dando cabida a espacios aún abiertos y dejando el jal expuesto a la intemperie, aunque estas áreas gran parte del año están cubiertas por agua, de manera que no hay dispersión de jal, por la acción del viento.

El depósito se encuentra dentro de una subcuenca, de tal manera que el agua pluvial desemboca hacia el interior del vaso de la presa, lo que ocasiona un estancamiento de agua y la erosión hídrica del jal.

Con respecto a la configuración actual de la cortina, se tiene un ángulo de inclinación adecuado que es de 13°, únicamente que con el paso de los años se han perdido las bermas que se tenían originalmente. Además de que no se encuentra adecuadamente reforestada.

Se realizaron actividades de reforestación parcial sobre el vaso del depósito, con las especies que fueron rescatadas de los bancos de préstamo utilizados para la obtención del material de recubrimiento. En la misma superficie se encuentran plantas creciendo de manera natural que son especies de la región y se cree fueron semillas que se encontraban en el material cuando sirvió de cubierta.

El objetivo de este trabajo es proponer las actividades y obras necesarias para concluir el cierre de este depósito conforme a los criterios de postoperación establecidos en la norma oficial mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT, 2004), así como también tomando en cuenta algunos estatutos estipulados en guías internacionales de cierre de depósitos de jales. Un ejemplo internacional es la Unión Europea (UE), que preparó una guía donde estipula el compromiso con el medio ambiente y el restablecimiento de las condiciones del ecosistema (*Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities*) (Garcia, 2008). En el gobierno australiano, requiere que, en todo nuevo proyecto de apertura o reapertura, esté integrado ya un plan de cierre y mitigación ambiental (MRNA, 2016)

Como parte del trabajo, se hizo la caracterización del depósito realizando un muestreo del suelo, jales y plantas. Las muestras se analizaron para determinar la concentración de elementos contenidos y observar si son conducidos al suelo y a las plantas. Esta información será útil para la planeación de un plan de reforestación sobre el vaso.

De igual manera, se hizo una configuración adecuada sobre la superficie del vaso para el manejo de agua pluvial, la cual consiste en dar una pendiente de -5%, a partir del centro hacia los extremos; la pendiente facilitara el flujo de agua hacia los extremos. Los espacios abiertos, se cubrirán con suelo de un banco de préstamo, con un espesor de 40 cm para que la capa sea uniforme y permitiendo el crecimiento adecuado de las raíces de las especies.

Para el manejo de agua pluvial proveniente de la cuenca, se diseñó un sistema de desvío por medio de dos canales de concreto ubicados en los extremos del depósito.

En el caso del talud se sugiere que el ángulo se suavice a 10° como ángulo final, a pesar de que cuenta con un ángulo adecuado. Para el caso de las bermas, se diseñó una nueva configuración que permita el acceso a vehículos.

Se hizo una calendarización de las actividades propuestas mediante un diagrama de Gantt, tomando como base el número de equipos a utilizar y el tiempo estimado de los ciclos de trabajo. La información de los tiempos fue básica para el cálculo de costos por el uso de equipo y contratación de personal para llevar a cabo dichas actividades

Con esta propuesta se busca reducir el impacto ambiental que puede ocasionar en el futuro el depósito de jales, además de lograr una relación más sólida entre empresa-comunidad, ya que

la gente de las comunidades cercanas podrá participar en los trabajos de reforestación, así como en actividades de monitoreo posterior al cierre.



## 2. MARCO TEÓRICO

---

### 2.1 Jales

El mineral extraído de mina es conducido a un proceso de trituración, en el cual es reducido de tamaño para iniciar la etapa de beneficio. El proceso de beneficio varía de acuerdo con las propiedades químicas y físicas en las que se encuentre el mineral y de los elementos asociados a éste (Michael P. Davies, 2002).

En un proceso de molienda el objetivo es reducir aún más el tamaño del mineral, hasta ser un material fino. En este proceso se usa agua para facilitar la reducción del material y obtener una pulpa (mineral y agua).

La pulpa descargada de los molinos, es conducida al proceso de flotación. En éste ocurre la separación entre los *minerales de mena* de los *minerales de ganga*. En las celdas de flotación, la pulpa es homogeneizada por medio de difusores y se utilizan reactivos químicos como colectores, depresores, espumantes para flotar los minerales de mena mediante la inyección de aire.

Los minerales que no tienen un valor económico, constituyen el residuo (llamados colas) que se envía a tanques espesadores para recuperar una parte del agua usada en durante el proceso. Posteriormente, las colas se descargan en depósitos de almacenamiento denominados depósitos de jales (Figura 1).

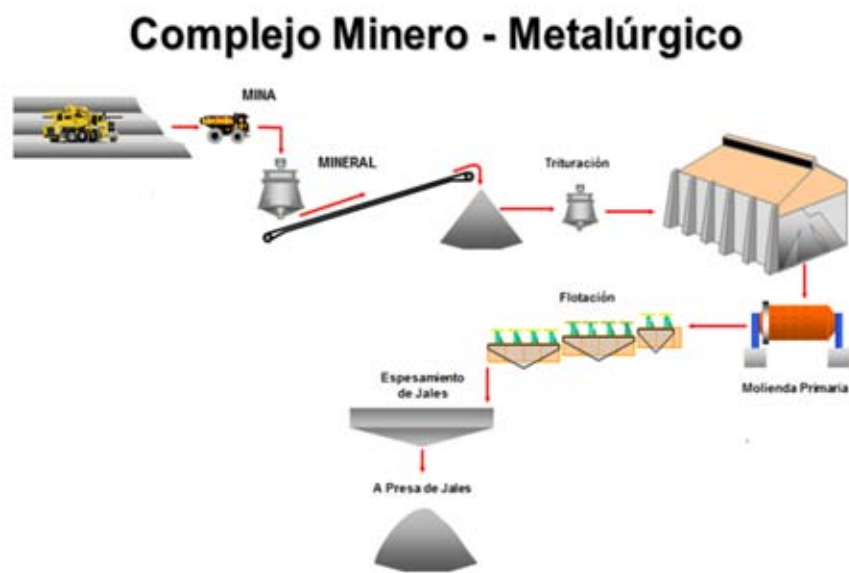


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de mineral y generación del jal (Grupo México)

El nombre denominado jal proviene del náhuatl "*Xall*" que significa arena; también se le puede encontrar con el nombre de relaves (en Sudamérica) o tailings en inglés.

El jal como lo menciona Morandé (2007) se trata de una "suspensión fina de sólidos en líquido". El desplazamiento de esta pulpa, dependerá de la relación que se tenga en agua/sólido y del tamaño de la partícula. Éste oscila de la siguiente manera; en las arenas, el tamaño de partícula es mayor a 0.074 mm; mientras que, para lamas, el tamaño es menor a 0.074 mm; para ambos casos, tiene que ser en más del 50% del material sólido. La cantidad de agua contenida tiende a ser entre el 55 al 70 % para lamas y arenas (Martinez, 2014).

El jal puede ser conducido a través de tuberías o canales abiertos, donde finalmente serán descargados hacia el interior del depósito. En algunos casos se hace uso de ciclones para la separación de tamaños de partícula; el material fino se deposita dentro del vaso para generar un asentamiento de las partículas, mientras que, los elementos más gruesos se descargan en el mismo punto donde se encuentran los ciclones, formando un montículo para dar resistencia a lo que será la cortina contenedora del residuo. En otros casos se hace uso de espigas (tubería) para la descarga de jal, donde todo es depositado dentro del vaso de almacenamiento (Tailings Management, 2007) (Figura 2).



Figura 2. Conducción de jales hacia depósito (Tailings.Info, 2016)

La composición química del jal, depende de las características del yacimiento mineral y de la roca encajonante, siendo que el jal pueda contener metales y metaloides; mientras que otros, pueden llegar a ser generadores de drenaje ácido (DA), en este caso, dependerá de la cantidad de Pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y otros sulfuros de hierro contenidos.

El jal de manera general, se trata de un residuo proveniente de una explotación minera y su composición química y mineralógica varía con base en el tipo de mineral o material extraído.

Una clasificación de jales por sus características físicas la propone *SRK Consulting* de la siguiente manera: jal de roca suave, jal de roca dura, jales finos y jales gruesos (Tabla 1).

Tabla 1. Tipos de jal. (SRK Consulting, 2010)

Categoría	Material	Descripción
Jales suaves	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cenizas de carbón</li> <li>• Potasa</li> </ul>	Contiene arena y fracciones de limo
Jales de roca dura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plomo / Zinc</li> <li>• Cobre / Níquel</li> <li>• Oro / Platino</li> <li>• Minerales de Hierro</li> </ul>	Puede contener tanto fracciones de arena como de limo. Lodos de baja plasticidad.
Jales finos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lodo de Bauxita</li> <li>• Lodo de Alquitrán</li> <li>• Lodo de Kimberlita</li> <li>• Lodos de Arenas Minerales</li> </ul>	Fracción de arena pequeña. Características de sedimentación y consolidación dominadas por partículas de tamaño limo / arcilla.
Jales gruesos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Jal de arenas de alquitrán</li> <li>• Uranio</li> </ul>	Contienen principalmente arena de fácil almacenamiento.

Los jales poseen propiedades físicas las cuales son útiles para comprender su comportamiento y realizar una caracterización geotécnica. Las principales propiedades son: la distribución del tamaño de partícula, densidad de pulpa, densidad en seco, permeabilidad, coeficiente de consolidación, resistencia a esfuerzos y límite de encogimiento (Límite de Atterberg) (SRK Consulting, 2010).

La distribución del tamaño de partícula, indica la fracción que contiene de arena, limo y arcilla, determinando la sedimentación que tendrá el jal.

Con la densidad de pulpa, se puede conocer la concentración de sólidos y la cantidad de agua contenida en la pulpa; con ello se tiene un control en el comportamiento de flujo en el jal una vez depositado.

La densidad en seco, depende de tres factores importantes como son: la gravedad específica, el tipo de jal y el contenido de arcillas; esta característica logra determinar la relación de vacío que se tiene entre partículas.

La permeabilidad, varía en función del tamaño de partícula, plasticidad, método de almacenamiento y la profundidad del depósito (Figura 3).

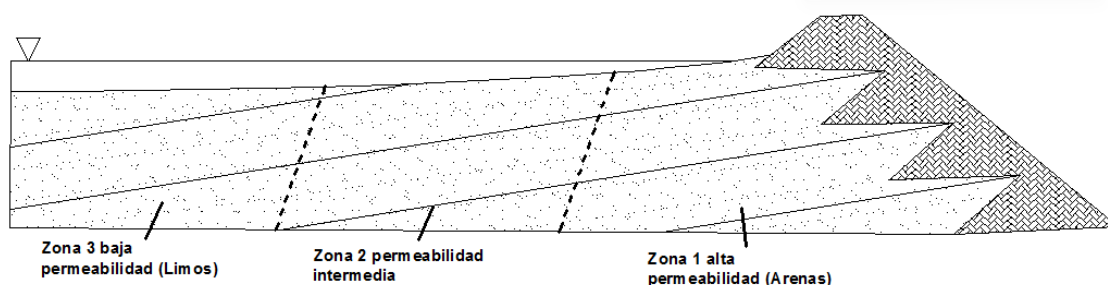


Figura 3. Relación de permeabilidad en jales (Karlheinz Spitz, 2009).

El coeficiente de consolidación, depende de la velocidad de asentamiento del material, el ciclo de almacenamiento y secado del jal, asociado a las condiciones del drenaje. Respecto a la resistencia a esfuerzos, los jales altamente drenados poseen una alta resistencia a esfuerzos cortantes.

El límite de encogimiento, va de la mano con la cantidad de agua que contenga el jal, ya que, a mayor pérdida de ésta, los jales tienden a perder volumen, de tal manera que, una vez que se alcance el límite de encogimiento, las partículas resistirán una disminución adicional de volumen.

## 2.2 Depósitos de jales

Los depósitos son construidos con el fin de almacenar residuos mineros, éstos son previamente diseñados, tomando como base la información relacionada a la cantidad de mineral que procesará la planta de beneficio, las características de la roca encajonante, la topografía del lugar, la distancia a la que se encontrará el depósito respecto a la planta de beneficio, la existencia y profundidad de mantos acuíferos, las características del entorno y comunidades cercanas (SERNAGEOMIN, SONAMI, BGR, 2003).

Estas construcciones poseen elementos que son esenciales para lograr un adecuado almacenamiento de residuos por lo que son comunes en los métodos convencionales. El objetivo que tienen, es hacer que el depósito sea estable, de esta manera evitando riesgos y fallas durante la operación y postoperación (SEMARNAT, 2004)(Figura 4).

**Bordo inicial:** Es la estructura inicial para la cortina contenedora. Usualmente es de material rocoso.

**Canales de desvío:** Canal que tiene la capacidad para que las aguas de la creciente máxima, escurran sin derramarse.

Cortina: Estructura que delimita el depósito además soporta el empuje del jal y del agua contenidos dentro del vaso.

Corona: Parte más alta de cortina contenedora.

Sistema decantador: Estructura construida antes del almacenamiento del jal, con el fin de extraer el agua almacenada en el vaso.

Espejo de agua: Superficie de agua, que se encuentra clarificada de sólidos.

Playa: Se trata del espacio que existe entre la corona y el espejo de agua.

Vaso: Volumen disponible dentro de la presa para el almacenamiento de sólidos, porción de agua para el transporte de éstos, así como para el manejo de aguas pluviales que caen dentro del depósito de jales.

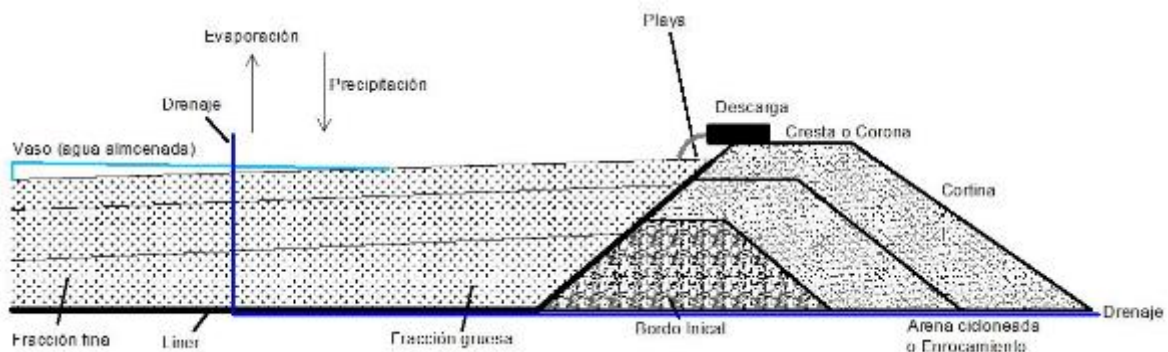


Figura 4. Estructura de un depósito de jales (McMillan, 2011).

Existen diversos métodos para el almacenamiento de jales, los más comunes son los convencionales, como es el método de aguas arriba, método de aguas abajo y por último el de línea central. Que pueden almacenar jales en forma de pulpa y dentro del depósito ocurre la separación del agua por decantación (Technical Report: Design and Evaluation of Tailing Dams, 1994).

Otros métodos son almacenamiento de jales espesados, jales secos, jales en pasta y como rellenos de minas. La necesidad de hacer más estable y seguro el almacenamiento de jales, ha dado lugar al desarrollo de estos nuevos métodos o la combinación de los ya existentes.

A continuación, se explicarán los métodos convencionales utilizados para el almacenamiento del jal y la construcción de depósitos de residuos mineros.

Aguas arriba. Consiste en la construcción de un bordo inicial hecho con material de préstamo (roca), sobre el cual se inicia la descarga del residuo con el uso de hidrociclones. El material grueso es descargado por el ápex, mientras que el material fino es descargado hacia el

depósito, por el vortex. Cuando se alcance la altura del primer bordo, la descarga se coloca de manera que se va a crear otro dique con el mismo jal, en dirección hacia el vaso (Figura 5).

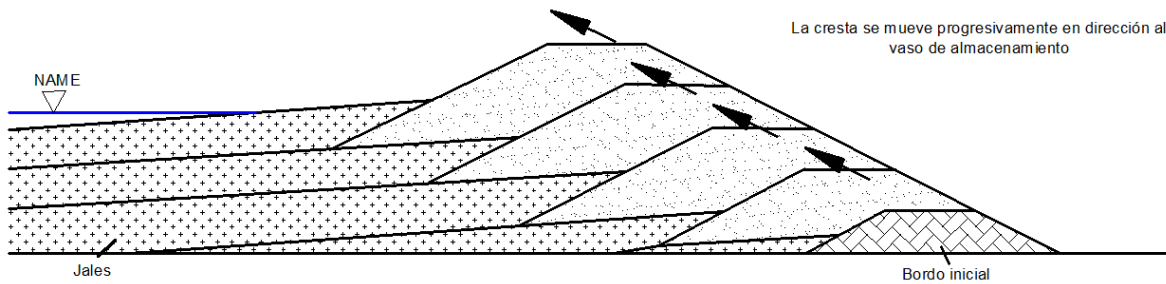


Figura 5. Método Aguas Arriba (Karlheinz Spitz, 2009).

Aguas abajo. La construcción es de manera similar al método de aguas arriba, ya que se inicia con un primer bordo de material de préstamo, pero con la diferencia que la construcción de los siguientes bordos es en dirección contraria al vaso de almacenamiento (Figura 6).

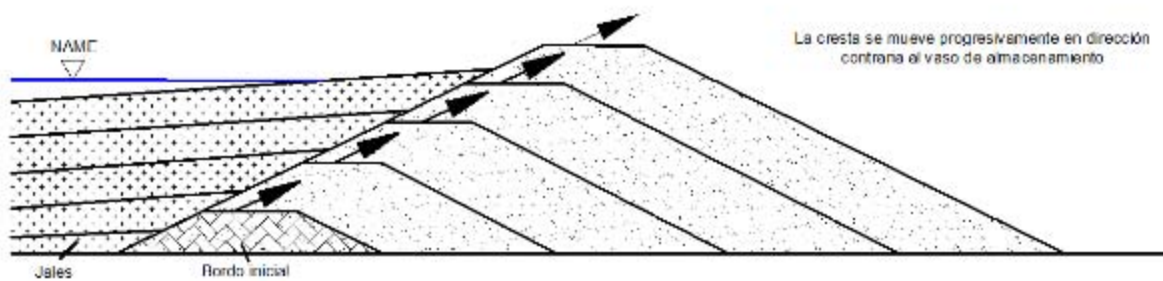


Figura 6. Método Aguas Abajo (Karlheinz Spitz, 2009).

Línea central. Al igual que los anteriores, se tiene un bordo inicial sobre el cual se depositan las arenas del hidrociclón, y los finos van al vaso del depósito. La construcción de la cortina se hace en dirección vertical (Figura 7).

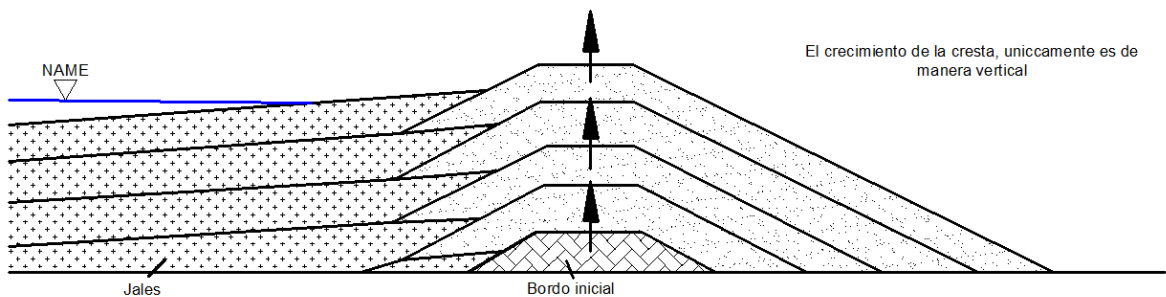


Figura 7. Método Aguas Arriba (Karlheinz Spitz, 2009).

El agua almacenada dentro del vaso, debe estar libre de la fase sólida para una fácil recuperación por el sistema decantador. El agua es conducida hacia piletas de asentamiento para retirar los sólidos remanentes y posteriormente es bombeada de regreso al proceso de beneficio.



Existen otros métodos para el almacenamiento del jal, éstos son usados en ciertos casos, basándose en las características del residuo, las condiciones del terreno y en la necesidad de recuperar una mayor cantidad de agua. Los métodos alternativos para almacenamiento de jal, se clasifican de la siguiente manera:

- Jales espesados.
- Jales en pasta.
- Jales filtrados o secos.
- Jales como relleno en tajos.
- Jales como relleno en mimas subterráneas.

Jales espesados. El costo inicial de deshidratación en este tipo de jales es alto, por lo tanto, es necesario retirar una cantidad de agua considerable del orden del 40% (Karlheinz Spitz, 2009). La descarga se hace en un punto central formando un cono, el jal se distribuye a los alrededores y las playas alcanzan una inclinación de  $1.1^{\circ}$  a  $3.4^{\circ}$ . Todo esto se basa en la mayor viscosidad que puede alcanzar el residuo y con el ángulo de reposo del mismo (Morandé, 2007). Se considera que este método, podría sustituir a los métodos convencionales por las ventajas que tiene, tales como una mayor recuperación de agua, reducción significativa a problemas ambientales (filtración, derrame de agua de proceso) y no es necesario la construcción de un bordo inicial (Figura 8).



Figura 8. Jales espesados, proyecto Esperanza, Chile (SRK Consulting, 2010).

Jales en pasta. Este tipo de residuo, se deshidrata hasta un 60% de todo el material la consistencia es similar a la de pasta dental, por lo que no tiene una velocidad de flujo crítica. Para su desplazamiento se utilizan bombas de desplazamiento positivo (utilizadas en la industria petrolera). Una de las ventajas características de la pasta, es que ocupa un menor espacio de almacenamiento sin las complicaciones de segregación o sedimentación como presentan los métodos convencionales. A medida que se almacene el jal, tiende a secarse

formando grietas y la nueva capa de material llena esas grietas dándole una mayor estabilidad (Figura 9).



Figura 9. Jales en pasta (Tailings.Info, 2016).

Jales filtrados o secos. Los jales secos son filtrados hasta alcanzar un orden de 20% o menos de humedad, para ello se utiliza equipo similar al de filtrado de concentrados, por esta razón son transportados por medio de bandas o camiones hacia su almacenamiento. Las ventajas que tiene este método son, la disminución de riesgos por la ruptura de cortinas de almacenamiento, la reducción de filtraciones; es conveniente en lugares con frío extremo para evitar el que se congelen las tuberías. Las desventajas significativas son el alto costo de la tecnología de filtración, así como un máximo control de aguas pluviales (Figura 10).



Figura 10. Depósito de jales secos La Coipa, Chile (Tailings.Info, 2016).

Algunos casos comúnmente practicados en gran parte de Australia; es el uso de los jales como relleno en tajos, en minas subterráneas y la descarga de anales en ríos, lagos y mares.



Jales como relleno en tajos. Es comúnmente usada, cuando la explotación a cielo abierto es de manera seccionada. En algún momento dado algunas áreas quedan fuera de operación, dando lugar que sea relleno con jales. La principal ventaja es, que no es necesario la construcción de una estructura de almacenaje y ocupar otro ejido para este fin; la desventaja de esta técnica es, si existen obras subterráneas cercanas, puede ocasionar una subsidencia ya que los jales tienden al aumento de peso (Figura 11).



Figura 11. Jales como relleno en tajos (Tailings.Info, 2016).

Jales como relleno en minas subterráneas. Se hace mención ya que en México y en otros países, se utilizan los jales como relleno en minas subterráneas para el sistema de minado de "Corte y Relleno". Para llevar a cabo el relleno hidráulico, el jal debe mezclarse con algún cementante. Esta técnica de almacenamiento tiene ciertas ventajas, no existe un impacto ambiental y visual en la superficie. Sin embargo, dentro de la mina, se localizan más cerca de los acuíferos además de que el control de los jales es menor en comparación a los métodos anteriores. Las desventajas principales, es el alto costo que se tiene para llevar a cabo este método, el uso de cementante y el uso de bombas de desplazamiento positivo, en casos donde el jal tiene alta densidad al igual que los jales en pasta. La alta humedad y una temperatura adecuada pueden ser potenciales a la generación de DAM (Figura 12).



Figura 12. Jal como relleno de minas subterráneas (Tailings.Info, 2016).

Jales descargados en ríos, lagos y mares. La técnica se utiliza cuando las condiciones del terreno son inestables, se tiene una alta actividad sísmica y una alta precipitación. La utilizan minas que se encuentran cerca de costas marítimas o de algún desemboque de agua. Una de las mayores preocupaciones es impacto ambiental que tendrá el jal sobre el agua, ya que éste último, debe encontrarse libre de elementos que sean solubles para evitar una contaminación mayor. En algunos casos, el impacto es menor en comparación con los métodos convencionales e inclusive con un menor costo. El sitio asignado para almacenar los jales, únicamente debe cumplir con una característica la cual es tener una profundidad de más de 100 m, donde ya no hay turbulencia alguna y por supuesto no interviene en la reproducción y fotosíntesis de las plantas marinas (Figura 13).

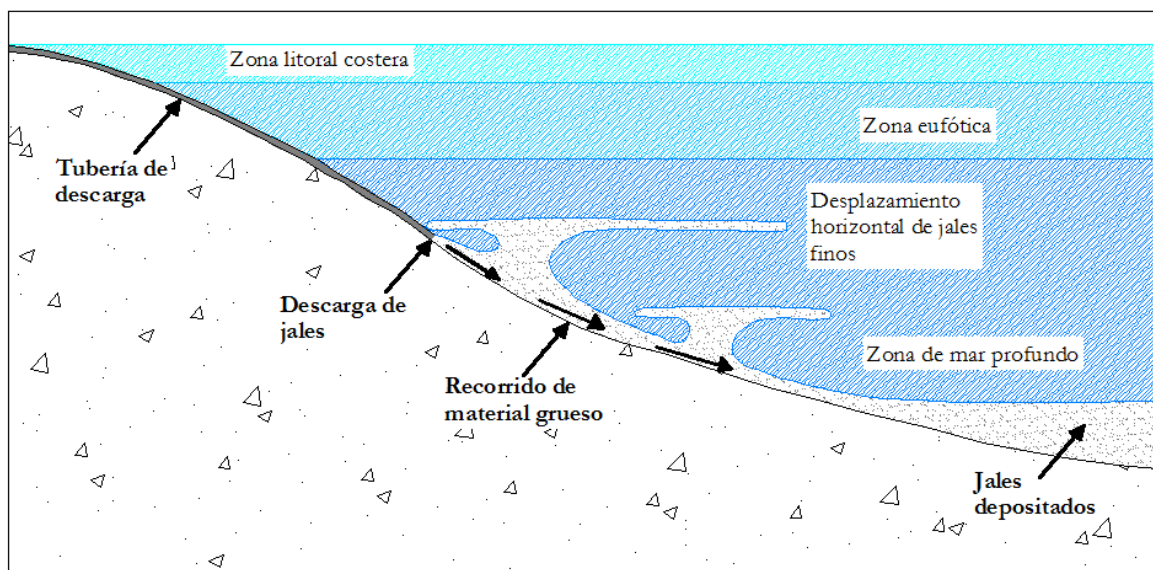


Figura 13. Jales depositados en mar profundo (Karlheinz Spitz, 2009).

Este método es aceptado en gran parte de Australia, sin embargo, en otros países aún no porque se le considera muy peligroso para los cuerpos de agua donde son depositados.

### 2.3 Planes de cierre

Durante la planificación de la apertura de un proyecto minero, debe desarrollarse del mismo modo un plan de cierre de operaciones. El objetivo principal de este plan es recuperar las áreas de operación e integrarlas a las condiciones ambientales, promoviendo la ocurrencia de procesos biológicos, es decir, que las condiciones del lugar sean aceptables para la recuperación de los ciclos biológicos que existen en todo el entorno (SEMARNAT, 2014).

De este modo, el plan puede desarrollarse para las operaciones completas y/o parciales. Con esto se refiere que puede ser desde obras para minado subterráneo, un tajo (en el caso que exista más de un banco de explotación), terreros, o presas de jales.

A este plan se le conoce como plan de cierre, el cual se encuentra en constante modificación conforme al desarrollo de todas las actividades llevadas a cabo en una operación minera, con un periodo de tres años, además se debe actualizar el fondo de remediación de acuerdo a nuevos cuerpos mineralizados encontrados, por lo tanto se tendrán nuevos depósitos a cerrar en cuyo caso siempre intervienen diversos factores que hacen necesario un cambio en la operación y dirección de una mina (Figura 14).

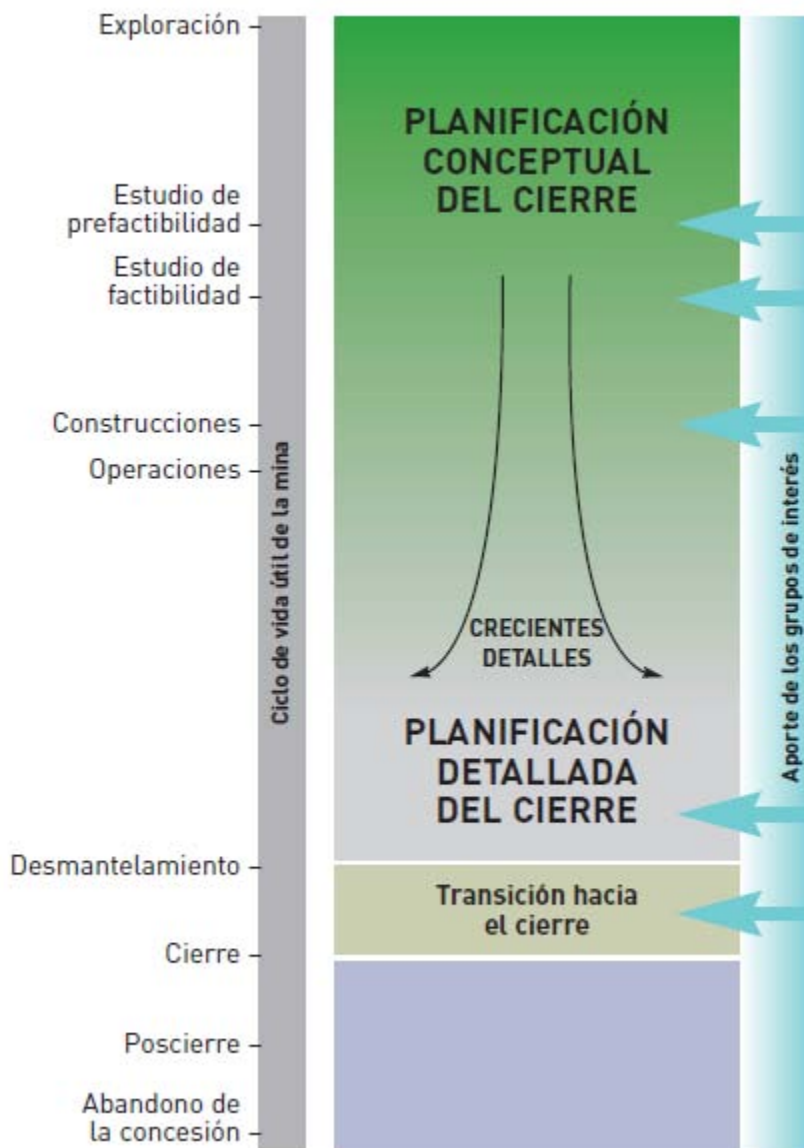


Figura 14. Planificación de un plan de cierre de minas (ICMM, 2009)

La planificación del cierre de una operación minera, tiene dos etapas, la primera que es de manera conceptualizada, del que se puede dar a conocer los resultados y los objetivos; mientras que la etapa detallada del plan, se tienen las metas más importantes, metodologías para alcanzar estas metas y procesos de seguimiento y validación (ICMM, 2009). El desarrollo de los objetivos debe realizarse cuanto antes, para una disminución progresiva de riesgos y contingencias, dando lugar a una buena práctica de un planteamiento en el cierre desde la etapa de exploración (Figura 15).

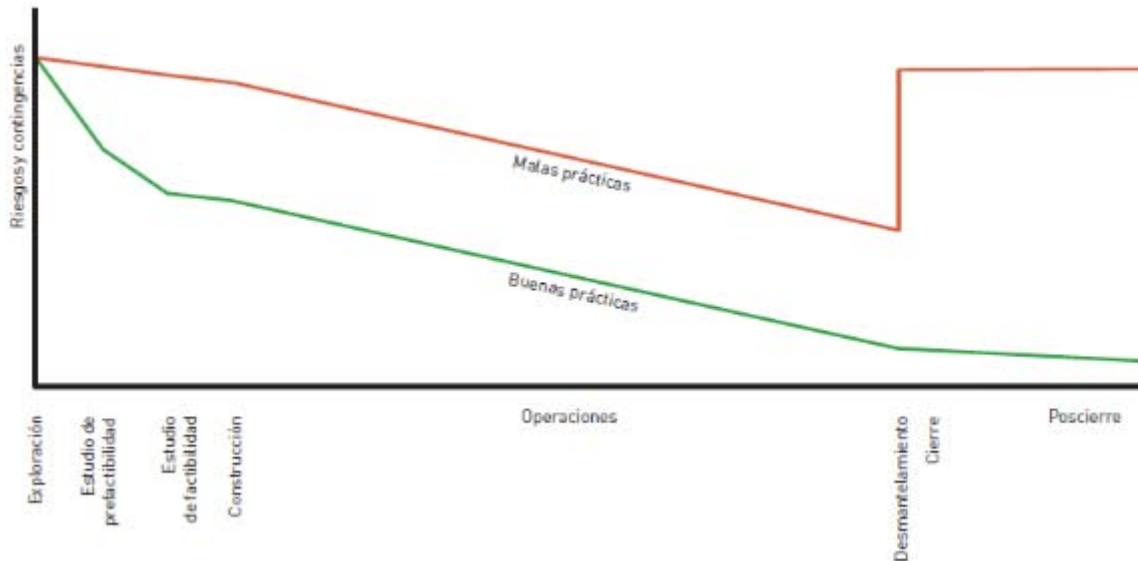


Figura 15. Riesgos y contingencias durante la vida de una mina (ICMM, 2009).

Durante la primera etapa de planeación del cierre es necesario tener un proceso estructurado que evalúe los riesgos con el fin de minimizar consecuencias negativas a futuro, maximizar los beneficios y minimizar las probabilidades de que los objetivos no se cumplan (ICMM, 2009).

En la segunda etapa, la información necesaria, se recopila en los primeros años de operación de la mina, por lo que, desde el punto de vista logístico, la existencia de un plan de cierre totalmente detallado con un cronograma de actividades, se logra teniendo tres o cinco años antes.

Las operaciones de mina se realizan de manera simultánea con algunas actividades de cierre, tales como la rehabilitación de suelos, estabilización de taludes y remediación de suelos afectados, lo cual no significa que estas actividades comiencen cuando ha concluido la vida útil de la mina (ICMM, 2009).

Usualmente en las unidades mineras se tiene más de un depósito de jales, cuando alguno de los depósitos llega a su etapa final se proyecta la apertura de uno nuevo, lo que da lugar a que

se realicen actividades de cierre durante la vida de la mina para disminuir los riesgos y costos de cierre totales.

Hay factores que están estrechamente ligados al diseño de un plan de cierre, dependiendo de las condiciones del lugar y el uso que tendrá el suelo después de los trabajos mineros, siempre se buscará reestablecer un equilibrio climático e hidrológico (REDLIEDS, 2002).

Otro de los objetivos de un plan de cierre, es la prevención, minimización, y/o control de riesgos, efectos negativos que se generen o continúen presentándose con posterioridad al cese de las operaciones o instalación minera, sobre la salud de la comunidad y/o sobre el medio ambiente (SERNAGEOMIN, 2002).

Los objetivos que alcanza un plan de cierre los describe (Muñoz, 2008) de la siguiente manera:

- Asegurar la estabilización física y química en donde se encuentre ubicado el almacenamiento de residuos (en el caso de cierre de presas de jales)
- Involucrar a las comunidades cercanas en los procesos de cierre, manteniendo una buena relación empresa-municipio.
- Tomar participación con las dependencias oficiales para procesos de cierre.
- Mitigar los posibles riesgos durante y después del cierre.
- Evitar la generación de drenaje ácido usando materiales para controlarlo.
- Reintegrar el sitio como ayuda al hábitat de la fauna silvestre o que sea útil para campos de pastoreo o recreación.
- La reintegración de áreas que fueron de uso industrial al entorno original.
- Reducir la existencia de algún riesgo financiero a futuro.

De igual manera para cualquier cierre de algunas instalaciones se debe controlar el impacto ambiental, de acuerdo a lo estipulado en México. El cierre lo debe llevar a cabo la misma empresa minera quien está a cargo de esos sitios, con base en lo que ha planeado y desarrollado la empresa minera en su plan de cierre.

## 2.4 Regulaciones ambientales a nivel mundial

En cada región del mundo hay actividad minera, sin embargo, hay países que actualmente no cuentan con una guía detallada acerca de mitigar los impactos ambientales (García, 2008).

En países como Canadá, Estados Unidos, Australia y en la Unión Europea, han desarrollado estatutos y guías para mitigar los impactos ambientales asociados a la minería (Steve Roberts, 2000). Estas regulaciones, a pesar de tener un objetivo en común, que es el de reintegrar las condiciones naturales del lugar, son diferentes entre sí. Estos documentos se basan en las

condiciones del lugar, como es la geología, hidrología y ecosistemas cercanos, además, consideran los distintos puntos de vista de cada gobierno y los diferentes criterios sociales (Robins, 2004).

En cualquier caso, estas guías y regulaciones son útiles para realizar un cierre correcto de operaciones. Las empresas mineras, también pueden optar por utilizar la guía de cierre de minas, de fuentes internacionales, como lo son *The World Bank* e *International Finance Corporation* (García, 2008).

En Estados Unidos, existió el *Bureau of Mines* (USBM), después del cierre de esta oficina las funciones fueron distribuidas entre *US Geological Survey* y el *Department of Energy* (Muñoz, 2008). La USBM colaboraba estrechamente con la *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), además de tener leyes federales en cada estado y localidad, existen regulaciones relacionadas al cierre de minas, esto es más dado en los estados con mayor actividad minera; un claro ejemplo es Arizona donde se encuentran dos agencias que supervisan y regulan los planes de cierre. *Arizona Department of Environmental Quality* (ADEQ) y *State Mine Inspector's Office* (SMIO). La ADEQ se responsabiliza de la supervisión de impactos ambientales, mientras la SMIO es responsable de la seguridad del área en donde se localizan el o los depósitos de jales, así como mantos acuíferos cercanos.

El gobierno canadiense cuenta con agencias encargadas de las actividades mineras, una de estas agencias es *Natural Resources Canada*, que se encarga de las concesiones y de cómo la minería aporta a la economía del país. Otra agencia encargada de materia ambiental referida a minería es *Environment and Climate Change Canada*, quien es responsable de la *Canadian Environmental Assessment Act* y administra el *Metal Mining Effluent Regulations* (MMER) que es quien supervisa el cierre de minas. En Canadá existe una iniciativa que se encarga de mitigar los impactos relacionados a minas abandonadas, el gobierno es quien se encarga de cerrar correctamente todas las instalaciones mineras. Esta iniciativa se llama *National Orphaned Abandoned Mines Initiative* (NOAMI, 2017).

La Unión Europea (UE), preparó una guía donde estipula el compromiso con el medio ambiente y el restablecimiento de las condiciones del ecosistema (*Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities*). Uno de los objetivos principales del documento es proporcionar una guía para la reapertura de alguna mina o volver a desarrollar el sitio para otros usos económicos una vez cerrados los sitios en donde se encontraba actividad minera.

Los aspectos de cierre de instalaciones mineras en Europa están estrechamente vinculados con las condiciones del permiso de obras para la mina, que inicialmente se solicitan a la UE. El cierre de las instalaciones y la eliminación de residuos están cubiertos por la Directiva de Residuos Mineros de la UE, que incluye en los requisitos, un plan de cierre de las instalaciones de residuos

para fijar la asignación de un bono financiero que cubra los costos estimados de cierre y rehabilitación (Commission, 2009).

En el gobierno australiano, requiere que todo nuevo proyecto de apertura o reapertura, esté integrado ya en un plan de cierre y mitigación ambiental (MRNA, 2016). Estos planes se revisan cada 3 años para verificar que se estén llevando a cabo los lineamientos establecidos y a su vez que estén actualizados, con base en las condiciones de operación de la mina (Mining Law, 2011). Estos lineamientos han sido establecidos conjuntamente con el *Department of Mines and Petroleum* (DMP) y la *Environmental Protection Authority* (EPA) (García, 2008).

En lo que concierne a Latinoamérica, países como Argentina, Bolivia, Colombia, Ecuador, Brasil, Chile y Perú, cuentan con un marco legal referido al cierre de minas (Steve Roberts, 2000). En Chile, como ejemplo existe la Ley N° 20.551 que *Regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras*. Una modificación a esta ley es la Ley 20.819 que *Regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras e Introduce Otras Modificaciones Legales*. Esta ley menciona que todas aquellas compañías deben presentar un plan detallado de cierre sobre el Estudio de Impacto Ambiental.

Por otro lado, Perú ha detallado una legislación con el nombre de "Ley N° 28090, Reglamento para el cierre de minas" la cual incluye una serie de artículos que hacen referencia a aquellos sectores involucrados como son el gobierno, comunidad y ambiente. Así mismo esta ley en Perú requiere que el plan de cierre contenga los métodos de recuperación, métodos de control y costos del cierre. La guía para que se realice correctamente, lo realizó el Ministerio de Energía y minas del Perú en el año de 2005. (Ministerio de Energía y Minas, 2005)

La práctica acerca del cierre de minas y depósitos de jales se ha hecho común en el mundo; a continuación, algunos ejemplos.

En Nueva Zelanda el área minera de Golden Cross en la Figura 16 se observa que A) es el paisaje original con el bosque del parque forestal de Coromandel; B) la mina en operación y con acumulación de aguas; C) los trabajos de rehabilitación que comienzan en 1999 y finalmente D) los trabajos de rehabilitación casi concluidos en el año 2001.



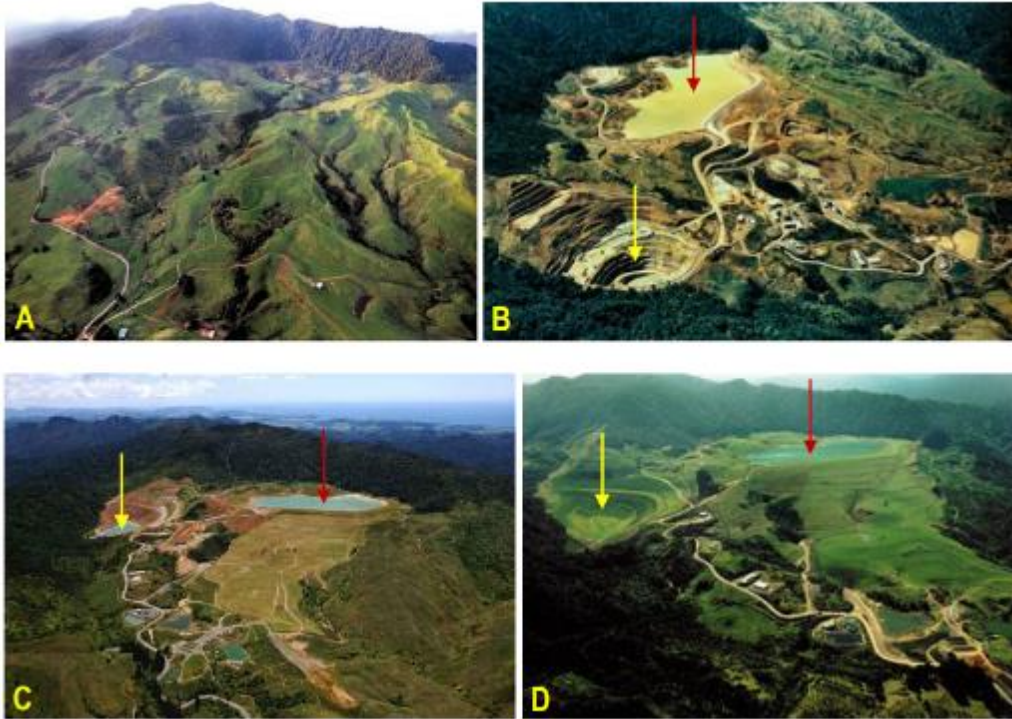


Figura 16. Rehabilitación de mina Gold Cross, Nueva Zelanda (Roberto Oyarzun, 2011).

En la comunidad de Cuncuemén del Valle Alto del Choapa, Chile. La minera Los Pelambres, hizo uso del sistema de fitoestabilización, para cerrar el depósito de “Los Quillayes” y así regresar al entorno el área ocupada por los jales, esto lo logró con la integración de seis comunidades aledañas al lugar, que participaron en la reforestación, en el año de 2008 iniciaron estas actividades (Figura 17).



Figura 17. Deposito "Los Quillayes", Chile. (Consejo Minero, 2013)



En Perú se realizó un cierre del tajo de San José o "Tablachaca", donde se "suavizaron" los taludes y se reforestó sobre la superficie del terrero cerca (Figura 18).



Figura 18. Mina de San José o "Tablachaca", Perú (MCF, Minería con Futuro, 2016).

Un caso en México es el cierre de la mina Cuale, Jalisco, mina que pertenecía a Grupo Peñoles. En la imagen del lado izquierdo, se encuentra la mina aun activa, mientras que la imagen del lado derecho presenta la zona totalmente restaurada en el año 2012 (Alvarado, 2015) Figura 19.



Figura 19. Cierre de mina Cuale, Jalisco (Alvarado, 2015)

## 2.5 Normatividad ambiental en México

La *Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente* (LGEEPA) en el artículo 28 menciona que es necesario solicitar ante la SEMARNAT una autorización en materia de impacto ambiental, para actividades de exploración, explotación y beneficio de minerales. El reglamento de esta ley en materia de Impacto Ambiental, específicamente señala que esto es aplicable a los depósitos de residuos mineros, como es el caso de los jales (LGEEPA, 2016).

El manejo de los residuos mineros en México, está regulado por leyes y normas. Para la industria minera, se deben observar las disposiciones que conciernen a la disposición de

residuos mineros, como lo establece la *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos* (LGPGIR) en el artículo 17, refiriéndose a jales, escorias y residuos provenientes de procesos de lixiviación (LGPGIR, 2015). En el *Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de la Residuos* (RLGPGIR) en el artículo 34, título tercero; refiere que, la disposición del residuo minero estará regulada por las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes, que sean emitidas por la federación. En el caso de los residuos mineros que no tienen una NOM específica, el responsable de la generación debe presentar un Plan de Manejo (PM) ante la SEMARNAT con los criterios establecidos en la NOM-157-SEMARNAT-2009, *“Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros”* (SEMARNAT, 2009).

Esta misma norma establece los criterios para determinar la peligrosidad de los residuos: a) la movilidad de los constituyentes tóxicos y b) el potencial de generación de acidez. La prueba para determinar la movilidad de los constituyentes tóxicos indica que los extractos obtenidos se deben de comparar con los límites permisibles establecidos en la NOM-052-SEMARNAT-2005. *“Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos”* teniendo un código de peligrosidad de residuos (CPR) Tabla 2 (SEMARNAT, 2005).

Tabla 2. Límites Máximos Permisibles NOM-052 (SEMARNAT, 2005)

Contaminante	LMP (mg/L)
Arsénico	5.0
Bario	100.0
Cadmio	1.0
Cromo	5.0
Mercurio	0.2
Plata	5.0
Plomo	5.0
Selenio	1.0

En lo que concierne de manera específica a los jales mineros, la NOM-141-SEMARNAT-2003, *“establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales”*. Esta norma es la base de este trabajo, ya que se consideraron los estándares establecidos para el cierre y postoperación de los depósitos de jales.

De acuerdo con la norma anterior, inicialmente se debe hacer una caracterización del jal para determinar su peligrosidad con base en la movilidad de sus constituyentes y en el potencial para la generación de ácido. Posteriormente se indican los lineamientos para la caracterización del sitio, que consiste, en estudios de aspectos climatológicos como la precipitación media

anual y mensual, velocidad y dirección de los vientos; edafología del sitio como es la textura del suelo, los niveles de conductividad eléctrica y pH; estudio geotécnico para medir y determinar alguna o algunas fallas existentes en la geología del sitio en que se piensa establecer el depósito; y finalmente estudios hidrológicos con el apoyo de cartas del mismo sitio para determinar el riesgo que representan los jales para los cuerpos de agua superficiales o subterráneos.

El apartado 5.6 de la NOM-141, se refiere a la construcción y operación de un depósito de jales. Éste debe evitar una filtración hacia las aguas subterráneas y afectar su calidad. En cualquier falla, como grietas o que presente una cierta debilidad en los materiales localizada en la cortina, éste debe ser reparado inmediatamente, para evitar alguna ruptura. En el caso de que los jales sean conducidos por medio de gravedad o conductos abiertos, no debe existir algún derrame o filtraciones.

El apartado 5.7, establece los criterios de cierre y postoperación. Entre estos se menciona que, una vez que se llegue a la etapa final de un depósito de jales, se deben implementar medidas que aseguren que:

- No se emitan partículas de jal hacia la atmosfera, ya que, al pasar del tiempo, estos pierden humedad y son más propensos a la erosión. Por esta razón es necesario cubrir los jales, con material o con agua.
- No se formen escurrimientos, afectando a cuerpos de agua, evitando que el depósito presente cualquier tipo de ruptura o falla, ocasionando un gran impacto ecológico. Para ello es necesario suavizar la inclinación de la cortina contenedora, como asegurando las bermas.
- No falle la presa de jales, para lo cual es conveniente suavizar la pendiente de la cortina a fin de ganar estabilidad.
- En el caso de que los jales sean potencialmente generadores de drenaje ácido, se deben cubrir con material que contrarreste este efecto, como material calcáreo que actúa como base ante la acidificación. En caso de usar agua, se debe cuidar de no solubilizar elementos tóxicos.
- El material que será usado para cubrir estos jales debe permitir la fijación de especies vegetales. Estas especies deben ser de la región y que de igual manera no se genere la acidificación del suelo cubierto.

### 3. CONDICIONES ACTUALES DEL DEPÓSITO

---

#### 3.1 Generalidades

El distrito minero de Nacozari de García se encuentra localizado al noreste del estado de Sonora a 256 km de la ciudad de Hermosillo, capital del mismo estado. El complejo minero-metalúrgico “La Caridad” se localiza aproximadamente a 22 km al suroeste, en medio de una cordillera que se eleva a más de 1200 m.s.n.m. El depósito de jales 1-2-3 se encuentra en el municipio de Villa Hidalgo, con las coordenadas:

Latitud 30ª 29' N

Longitud 109ª 35' O

Altitud 500 – 2200 msnm

El acceso a este lugar se realiza por vía terrestre partiendo del poblado de Nacozari de García, se conduce por 19 km en un camino pavimentado cerca de 19 km y atravesando el complejo metalúrgico, inicia un camino de terracería por el que se recorren otros 8 km hasta llegar al depósito fuera de operación (Figura 20).

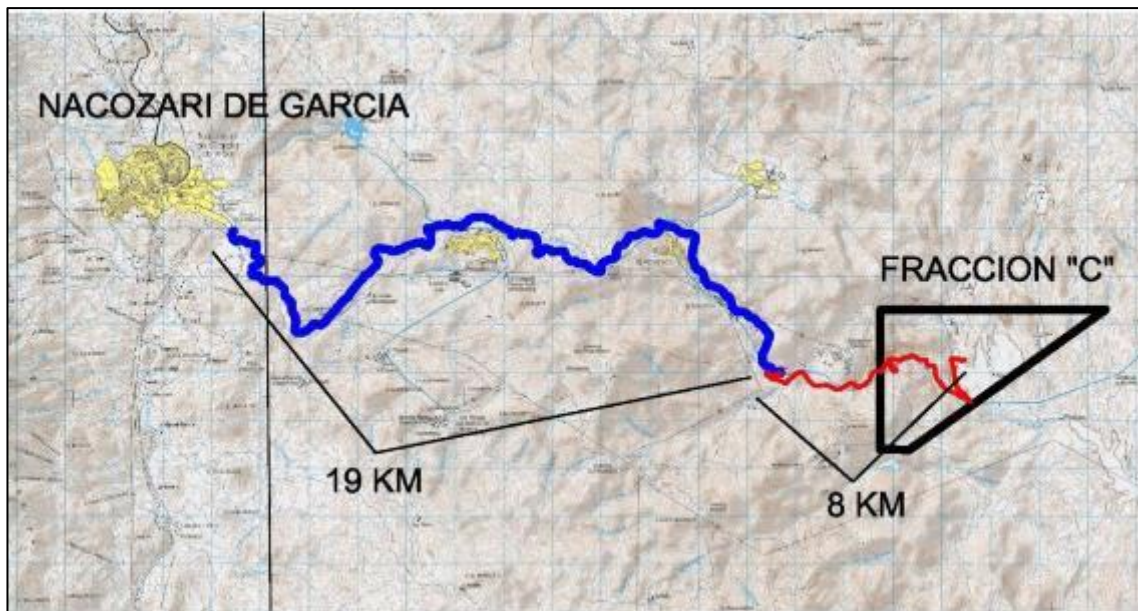


Figura 20. Vías de acceso hacia el depósito de jales 1-2-3.



Este depósito de jales inició operaciones en el año de 1979 y concluyendo su ciclo el 2 de junio de 1982.

Para la construcción de este depósito, se preparó el sitio de manera no muy distinta a las prácticas de hoy en día. Inicialmente se despojó de la capa de suelo y se colocó una capa de arcilla; después se colocó la tubería de 36" para la conducción del jal y se depositaba con el uso de ciclones con vortex de 12". El depósito se diseñó con el método aguas abajo. Durante su operación la planta concentradora tuvo tres ampliaciones en producción, de esta manera el depósito también operó por etapas y por ello se nombró "Depósito 1-2-3"

Actualmente los jales han tomado una coloración amarillenta por un proceso de oxidación natural, en comparación con los actuales que son de color gris; la característica más sobresaliente es que se encuentran totalmente secos con una alta compactación, de tal forma que soportan equipo pesado para realizar trabajos sin el riesgo de un hundimiento.

### 3.2 Zonas cubiertas

Este depósito cuenta con 1'218,357 m<sup>2</sup> de área en el vaso de almacenamiento, siendo 121.84 hectáreas (esta área se logró calcular con el uso del software AutoCAD ya que no se contaba con el dato en la operación) (Figura 21).

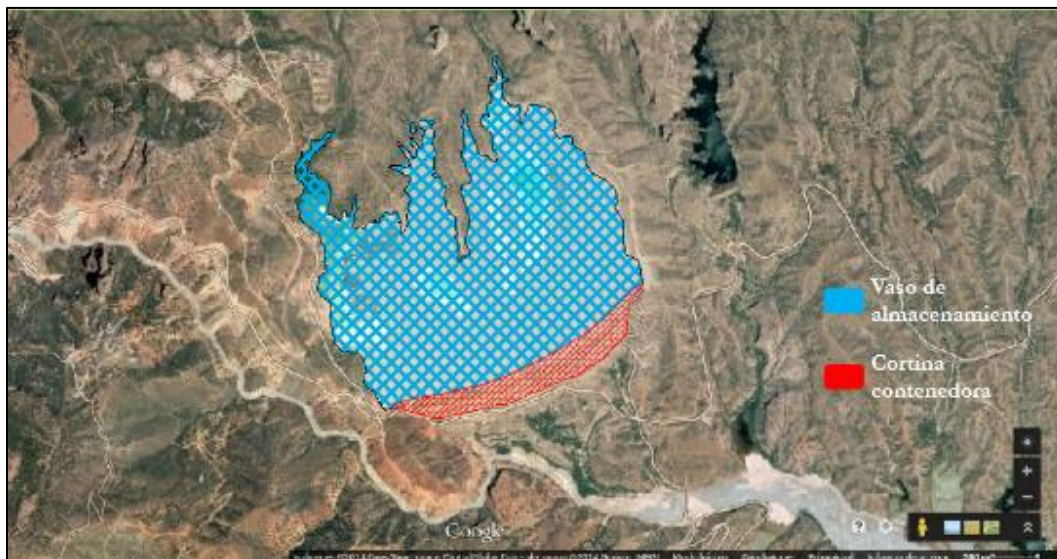


Figura 21. Área de vaso en depósito de jales 1-2-3.

Gran parte de la superficie del depósito se recubrió con suelo para evitar la dispersión de partículas hacia la atmosfera. Durante el tiempo que se realizó el recubrimiento existían grandes cantidades de agua acumulada en el vaso, por esta razón se cubrió parcialmente ya que así se cumplía con el objetivo de evitar la dispersión del jal. Actualmente las acumulaciones

de agua siguen existiendo, pero en menor cantidad, ya que poco a poco se han ido secando (Figura 22).

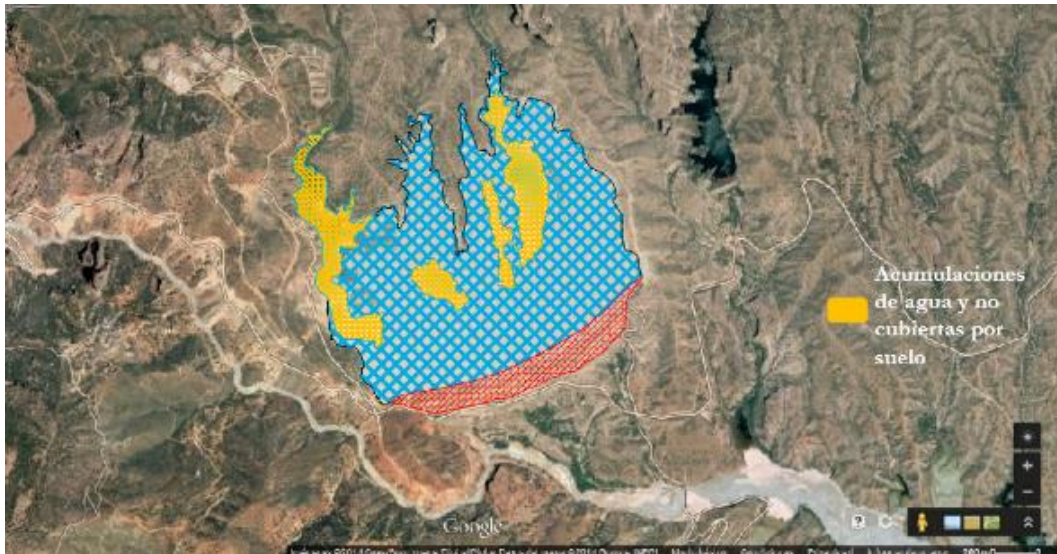


Figura 22. Áreas dentro del vaso sin cubrir.

Los trabajos de recubrimiento iniciaron en abril del 2011 y se utilizó material de bancos de préstamo, que se encuentran al final del vaso de almacenamiento, esto por la disponibilidad de material (Figura 23). Para ello, como lo señala la LGEEPA, se realizó una manifestación de impacto ambiental con cambio de uso de suelo modalidad particular y se presentó ante SEMARNAT.

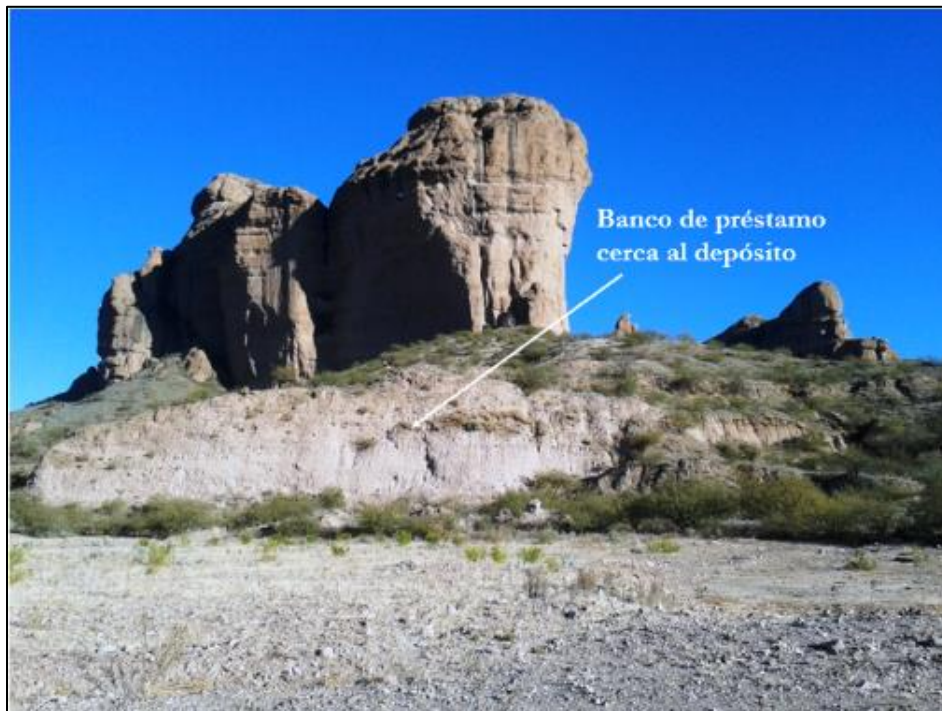


Figura 23. Bancos de préstamo ubicados cerca del depósito de jales.

La capa de suelo que recubre los jales no es uniforme, hay zonas en el vaso donde el espesor es muy delegado y se puede observar a simple vista el jal en la misma superficie, mientras que en otras el espesor llega cerca de 1.5m.

Por la irregularidad de la capa de suelo, se destinaron áreas para realizar los trabajos de reubicación de especies vegetales, los cuales iniciaron en 2013, con especies rescatadas de los bancos de préstamo. El espesor del suelo también afecta el desarrollo de las especies que crecen de manera natural. La erosión de los jales descubiertos, evita que las plantas tomen los nutrientes necesarios para su crecimiento.

### 3.3 Especies utilizadas en la reforestación

Dentro del vaso de almacenamiento se encuentran espacios destinados para las actividades de reforestación, cada uno tiene nombre asignado: "La Vaca", "La Gallina", "La Niña", "El Paredón" y "La llanta"; estas dos últimas están ubicadas a las orillas, aun así, se mencionan por el trabajo realizado por el departamento de ecología. En la Tabla 3 se hace mención de la superficie de cada una.

Tabla 3. Áreas en reforestación.

Zona	Área [m <sup>2</sup> ]*	Coordenadas geográficas	
La Vaca	10,074	N 30° 20' 31.8"	W 109° 30' 43.3"
La Gallina	1,225	N 30° 20' 23.3"	W 109° 30' 29.5"
El Paredón	7,488	N 30° 20' 36.0"	W 109° 30' 34.1"
La Llanta	1,863	N 30° 20' 32.2"	W 109° 30' 26.2"
La Niña	1,340	N 30° 20' 13.12"	W 109° 30' 55.8"
TOTAL	21,990		

\*Datos proporcionados por el depto. de Ecología 2014

Los sitios asignados se han construido de forma gradual, conforme se fueron recubriendo los jales; es decir, a partir de los bancos de préstamo y en dirección a la cortina contenedora; por esta razón es que se encuentran ubicados en la parte superior del depósito (Figura 24).



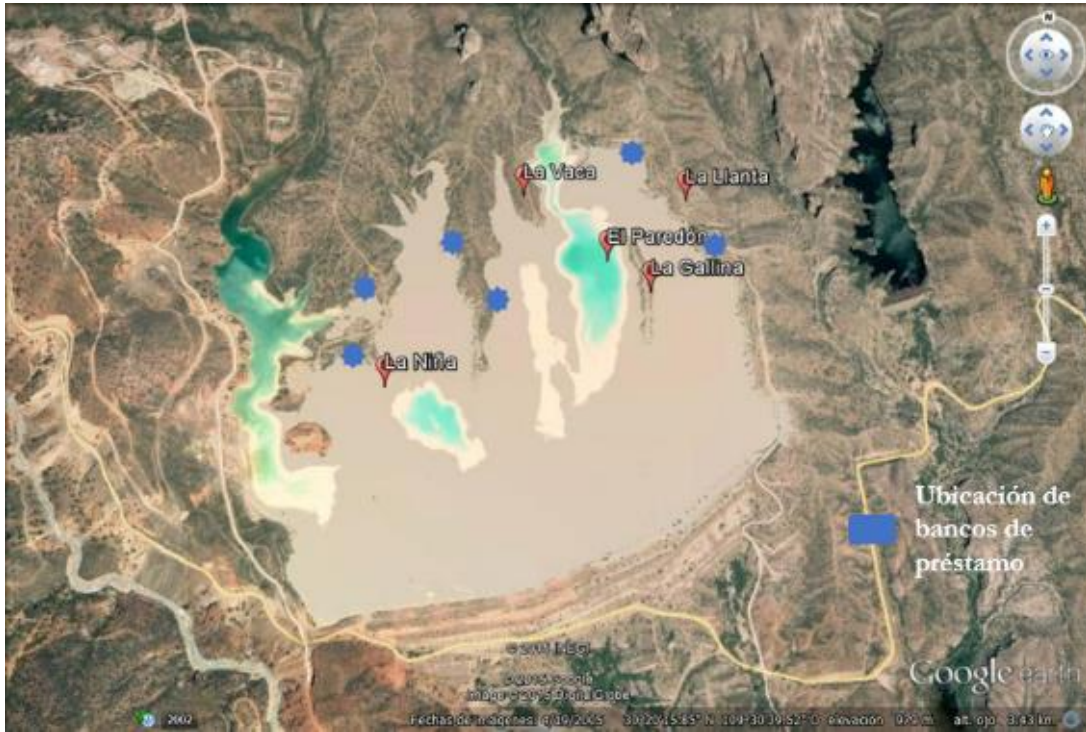


Figura 24. Ubicación de zonas en reforestación.

De las especies reubicadas, gran parte son cactáceas y han estado al cuidado de un vivero localizado en las cercanías a la unidad minera. La identificación taxonómica de estas especies fue realizada por el departamento de ecología y se proporcionaron para este trabajo (Tabla 4) (Figura 25).

Tabla 4. Especies reubicadas.

Nombre Común	Nombre Científico
Cabeza de viejo	<i>Mammillaria sp.</i>
Lechuguilla	<i>Agave lechuguilla</i>
Magüey	<i>Agave schottii</i>
Mezquite	<i>Prosopis velutina</i>
Mezquite	<i>Prosopis glandulosa</i>
Nopal	<i>Opuntia sp.</i>
Ocotillo hembra	<i>Fouquieria splendens</i>
Ocotillo macho	<i>Fouquieria macdougalii</i>
Palmillas	<i>Nolina microcarpa</i>
Pithayas	<i>Stenocereus thurberi</i>
Salicieso	<i>Lycium sp.</i>
Savila	<i>Aloe barbadensis</i>
Sibiri	<i>Opuntia arbuscula</i>
Sotol	<i>Dasyllirion wheeleri</i>
Tasajo	<i>Opuntia tesajo</i>
Viejito	<i>Mammillaria microcarpa</i>





Figura 25. Sitio asignado para reubicación de especies.

Sobre la superficie ya recubierta, se logró observar que hay vegetación creciendo de forma natural dando cabida a una actividad natural llamada *sucesión ecológica*. Con base en esto se realizó la clasificación de algunas de las especies encontradas. Estas mismas especies tienen un mayor tiempo en contacto con los jales. (Tabla 5) (Figura 26).

Tabla 5. Especies de crecimiento natural.

Nombre Común	Nombre Científico
Palo loco	<i>Nicotiana glauca</i> (Solanaceae)
Romerillo	<i>Baccharis sarothroides</i>
Rama blanca	<i>Encelia farinosa</i>
Chicura	<i>Ambrosia ambrosioides</i>
Vinorama	<i>Acacia constricta</i>
Mala mujer	<i>Wigandia urens</i>
Tamarindillo	<i>Sesbania herbacea</i> (Fabaceae)
Uña de gato o gatuna	<i>Acacia greggii</i>
Tarachique	<i>Dodonea viscosa</i>
Tasajo	<i>Opuntia tesajo</i>
Tepehuaje	<i>Lysiloma acapulcensis</i>



Figura 26. Vegetación que ha crecido de manera natural, sobre la superficie cubierta.

### 3.4 Condiciones del talud

Actualmente el talud tiene una inclinación de  $13^\circ$ , por lo que se considera una buena inclinación con la que garantiza la estabilidad estática y dinámica como lo señala la NOM-141 en el apartado 5.7.6. Aun así, para confirmar esto, es conveniente realizar un análisis de esfuerzos.

En el caso de las bermas, algunas aún existen, pero en algunos puntos el espacio para el paso de vehículos ya no es adecuado (Figura 27).



Figura 27. Bermas actuales en la cortina contenedora.

### 3.5 Diagnóstico del estado del depósito

El objetivo de la revisión de las condiciones actuales del depósito, fue tener los elementos para hacer una propuesta de un plan de cierre adecuado, partiendo de la información de las condiciones actuales, y tomando como base el cierre de otros depósitos y los lineamientos establecidos en la NOM-141-SEMARNAT-2003.

Recapitulando la información, el estado actual del Depósito 1-2-3 es el siguiente:

- Cubierta

Área total de la superficie del depósito → 1.218 Km<sup>2</sup> → 121.84 Ha

Área cubierta actualmente → 0.956 Km<sup>2</sup> → 95.60 Ha

Área expuesta → 0.263 km<sup>2</sup> → 26.28 Ha

Esto significa que falta por cubrir el 22.5 % del total de la superficie del depósito, con una configuración adecuada para el manejo de escurrimientos.

- Reforestación

Reforestación total actual (hasta el año 2014) → 0.0219 km<sup>2</sup> → 2.20 Ha

Área sin reforestar → 1.145 Km<sup>2</sup> → 114.48 Ha

Significa que falta por reforestar el 98 % de toda la superficie del depósito.

Para la identificación del tipo de suelo necesario y cuáles son las especies ideales para el cumplimiento de estos dos objetivos, se realizó un muestreo del suelo que ha servido para recubrimiento, también se hizo muestreo de los jales. Con respecto a las especies se muestrearon, especies que han crecido de manera natural sobre la superficie.

- Manejo de agua pluvial

En el depósito el manejo de agua pluvial es escaso, permitiendo que los escurrimientos lleguen al interior del depósito dando como resultado una erosión hídrica

En este trabajo se realizó el diseño de este sistema de canales, con base en la información obtenida acerca de la precipitación en los últimos 28 años, que estarán ubicados en los extremos del depósito.

- Reconfiguración de taludes

El ángulo de la cortina contenedora es de 13°. Aun así, es recomendable dar un ángulo menor para una mayor seguridad; de igual manera una reconfiguración en las bermas. Para ello se realizó un diseño para suavizar la pendiente de la cortina a 10° y la construcción de nuevas bermas que permita el paso de vehículos.

El material que se tiene en los bancos de préstamo es suficiente para realizar una configuración adecuada de talud y configuración sobre el vaso. La cantidad estimada por la misma empresa, con un resultado de 600,000 m<sup>3</sup>.

## 4. CARACTERÍSTICAS DE LA VEGETACIÓN

---

Inicialmente se realizó una caracterización del jal y del suelo, para determinar las condiciones en las que se desarrollan las plantas; posteriormente se continuó con un muestreo de algunas especies que crecen de manera natural, con el fin de hacer un análisis y determinar, qué especies de plantas son ideales para realizar la reforestación.

### 4.1 Muestreo de suelo y jal

La Vaca y La Gallina, son sitios destinados para la reubicación de especies. Estas fueron la base para asignar puntos de muestreo y determinar las condiciones del suelo que es utilizado en dicha actividad.

Otra de las zonas muestreadas es donde se observa el jal descubierto, a estos puntos se les asignó un nombre como referencia para una mayor facilidad de ubicación. Se designó con los nombres de Silla, Represo 2, Almacén, Cortina y Paredón 2; este último se encuentra cerca del área reforestada por eso se tomó el nombre (Tabla 6).

Tabla 6. Ubicación de puntos muestreados en el depósito.

Clave	Lugar	Coordenadas geográficas	
JV1	Paredón	N 30° 20'34.6"	W 109° 30'36.6"
JV2	Represo 2	N 30° 20'28.1"	W 109° 30' 32.8"
JV3	La Gallina	N 30° 20'24.0"	W 109° 30'23.7"
TV3	La Gallina	N 30° 20'24.0"	W 109° 30'23.7"
JV4	Almacén	N 30° 20'20.4"	W 109° 31'06.4"
JV5	Cortina	N 30°19'56.5"	W 109° 30'42.2"
JV6	La Vaca	N 30° 20' 27.0"	W 109° 30'45.2"
TV6	La Vaca	N 30° 20' 27.0"	W 109° 30'45.2"
TV7	Silla	N 30° 20'30.9"	W 109° 30'33.6
JV7	Silla	N 30° 20'30.9"	W 109° 30'33.6
TV8	La Gallina	N 30° 20'22.4"	W 109° 30'29.0
TV9	La Gallina	N 30° 20' 22.2"	W 109° 30' 28.9"
JV10	Cortina	N 30° 19'56.4"	W 109° 30'42.5"

JV → muestras de jal.

TV →muestras de suelo.

Los puntos muestreados se ubicaron espacialmente (Figura 28) en el vaso de la presa y se determinó la estrategia para el muestreo de especies vegetales.





Figura 28. Ubicación de puntos muestreados en la presa de jales.

Los procedimientos de muestreo y análisis de suelo y jal, se describen de manera detallada en el ANEXO 1

## 4.2 Muestreo de especies vegetales

Las muestras de vegetación que se tomaron, son las que han crecido de manera natural sobre la superficie del depósito. La razón de escoger estas especies, fue que han estado en contacto con el jal por un periodo largo de tiempo.

El muestro de las especies fue en los mismos puntos en los que se tomaron muestras de jal y de suelo. Para realizar un análisis completo de las especies vegetales éstas deben tener todos los elementos necesarios, es decir; flor, hoja, tallo y raíz. En algunos casos especiales, como es el mezquite (en puntos JV1, JV4 y JV6), la raíz se encontraba cubierto por los jales, por esta razón se optó por únicamente tomar rama, hojas y flor (Figura 29).



Figura 29. Mezquite que se encuentra debajo del jal.

Una especie despertó curiosidad, ya que se encontraba creciendo sobre el mismo residuo esto es en el punto JV5 que está ubicado en la cortina (Figura 30).



Figura 30. Especie creciendo directamente en jales.



Al igual que las muestras de jal y suelo, las muestras se ubicaron en una imagen satelital (Figura 31). En algunas especies ya se tenía la clasificación taxonómica, esto lo llevó a cabo el mismo departamento de ecología de la unidad minera; en el caso de "Palo Loco" y "Tamarindillo" se solicitó el apoyo de la Asociación para las Plantas Nativas de Sonora, A.C., para la identificación de nombre común y nombre científico (Tabla 7).

Tabla 7. Muestras vegetales.

Clave	Lugar	Nombre común	Nombre científico	Coordenadas geográficas	
PJV1	Paredón	Mezquite	<i>Prosopis velutina</i>	N 30° 20'34.6"	W 109° 30'36.6"
PJV4	Almacén	Mezquite	<i>Prosopis velutina</i>	N 30° 20'21.9"	W 109° 31'07.1"
PJV4	La Vaca	Mezquite	<i>Prosopis velutina</i>	N 30° 20' 27.0"	W 109° 30'45.2"
PJV2	Represo 2	Romerillo	<i>Baccharis sarothroides</i>	N 30° 20'28.1"	W 109° 30' 32.8"
PJV7	Silla	Romerillo	<i>Baccharis sarothroides</i>	N 30° 20'30.9"	W 109° 30'33.6"
PJV3	La Gallina	Chicura	<i>Ambrosia ambrosioides</i>	N 30° 20'24.0"	W 109° 30'23.7"
PJV4	Almacén	Chicura (seco)	<i>Ambrosia ambrosioides</i>	N 30° 20'21.9"	W 109° 31'07.1"
PJV4	Almacén	Palo Loco	<i>Nicotiana glauca (Solanaceae)</i>	N 30° 20'21.9"	W 109° 31'07.1"
PJV5	Cortina	Tamarindillo	<i>Sesbania herbacea (Fabaceae)</i>	N 30° 19'56.4"	W 109° 30'42.5"
PJV6	La Vaca	Tepehuaje	<i>Lysiloma acapulcencis</i>	N 30° 20' 27.0"	W 109° 30'45.2"
PJV7	Silla	Rama Blanca	<i>Encelia farinosa</i>	N 30° 20'30.9"	W 109° 30'33.6"

PJV → muestras de especies vegetales.



Figura 31. Ubicación de muestras vegetales.



Los procedimientos de muestreo y análisis de las plantas, se describen de manera detallada en el ANEXO 1

## 4.3 Resultados

### 4.3.1 Jal y Suelo

En las muestras de jal y suelo se obtuvieron distintas concentraciones de los elementos que están presentes en la mineralogía del yacimiento y que son potencialmente tóxicos para el medio ambiente; como es el caso de arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo y zinc (Tabla 8/Tabla 9).

Tabla 8. Resultados de análisis de jal

Clave	As [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Zn [mg/kg]
JV1	<LD	10	27	257	13	22
JV2	<LD	20	29	317	19	31
JV3	<LD	20	37	128	22	24
JV4	<LD	20	42	717	43	44
JV5	<LD	30	33	786	19	55
JV6	<LD	20	49	235	18	38
JV7	1	<LD	31	99	15	12
JV10	12	10	73	155	34	43
<b>Mínimo</b>			27	99	13	12
<b>Máximo</b>	12	30	73	786	43	55
<b>Mediana</b>		20	35	246	19	34.5

\*<LD → Por debajo del Límite de Detección

Tabla 9. Resultados de análisis de suelo.

Clave	As [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Zn [mg/kg]
TV3	6	20	23	121	66	141
TV6	13	40	17	310	41	81
TV7	20	<LD	28	119	78	155
TV8	34	10	36	378	86	190
TV9	32	10	36	227	106	209
<b>Mínimo</b>	6		17	119	41	81
<b>Máximo</b>	34	40	36	378	106	209
<b>Mediana</b>	20	10	28	227	78	155

\*<LD → Por debajo del Límite de Detección

### 4.3.2 Plantas

El caso de las plantas, el análisis se hizo de forma separada por hojas, tallo y raíz. Los resultados presentados, se agruparon por especie y de igual manera se muestran en las Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12 siguientes:

Tabla 10. Resultados en hoja.

Clave	As [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Zn [mg/kg]
[Mezquite]	<LD	<LD	35	160	<LD	189
[Romerillo]	<LD	<LD	6	139	<LD	136.5
[Chicura]	<LD	<LD	31	181	<LD	138
[Palo loco]	<LD	<LD	590	590	<LD	310
[Tepehuaje]	<LD	<LD	44	78	<LD	96
[Rama blanca]	<LD	<LD	15	125	<LD	87
[Tamarindillo]	<LD	<LD	240	240	<LD	180
<b>Mínimo</b>			6	78		87
<b>Máximo</b>			590	590		310
<b>Promedio</b>			137.24	216.14		162.36
<b>Mediana</b>			35	160		138

\*<LD → Por debajo del Límite de Detección

Tabla 11. Resultados en tallo.

Clave	As [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Zn [mg/kg]
[Mezquite]	<LD	<LD	10	70	<LD	60
[Romerillo]	<LD	<LD	20	60	<LD	45
[Chicura]	<LD	5	20	210	<LD	130
[Palo Loco]	10	10	230	100	20	130
[Tepehuaje]	<LD	<LD	20	30	<LD	30
[Rama Blanca]	<LD	<LD	10	30	<LD	50
[Tamarindillo]	10	10	190	150	10	80
<b>Mínimo</b>			10	30		30
<b>Máximo</b>	10	10	230	210	20	130
<b>Promedio</b>	2.86	3.57	71.43	92.86	4.29	75.00
<b>Mediana</b>			20	70		60

\*<LD → Por debajo del Límite de Detección

Tabla 12. Resultados en raíz.

Clave	As [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Zn [mg/kg]
[Mezquite]	<LD	<LD	10	40	<LD	20
[Romerillo]	<LD	<LD	15	50	<LD	35
[Chicura]	<LD	5	35	485	5	225
[Palo Loco]	10	10	190	500	20	160
[Rama Blanca]	<LD	<LD	10	20	<LD	30
[Tamarindillo]	10	10	300	150	10	50
<b>Mínimo</b>			10	20		20
<b>Maximo</b>	10	10	300	500	20	225
<b>Promedio</b>	3.33	4.17	93.33	207.50	5.83	86.67
<b>Mediana</b>		2.5	25	100	2.5	42.5

\*<LD → Por debajo del Límite de Detección

Con los resultados anteriores, se logró tener la concentración total de cada muestra y se pudo concluir qué especies son las más convenientes para realizar una reforestación.

Tabla 13. Concentraciones totales.

Clave	Especie	As [mg/Kg]	Cd [mg/Kg]	Cr [mg/Kg]	Cu [mg/Kg]	Pb [mg/Kg]	Zn [mg/Kg]
PJV1	[Mezquite]	<LD	<LD	45	285	<LD	227
PJV2	[Romerillo]	<LD	<LD	41	249	<LD	216.5
PJV3	[Chicura]	<LD	10	70.5	785.5	5	424
PJV4	[Palo Loco]	20	20	1010	1190	40	600
PJV5	[Tamarindillo]	20	20	730	540	20	310
PJV6	[Tepehuele]	<LD	<LD	64	108	<LD	126
PJV7	[Rama Blanca]	<LD	<LD	35	175	<LD	167
<b>Mínimo</b>				35	108		126
<b>Máximo</b>		20	20	1010	1190	40	600
<b>Promedio</b>		5.71	7.14	285.07	476.07	9.29	295.79
<b>Mediana</b>				64	285		227

\*<LD → Por debajo del Límite de Detección

Con la información obtenida se observa que las especies como Palo Loco y Tamarindillo, son quienes acumulan las mayores concentraciones en toda su estructura; la *Sesbania herbacea* (Fabaceae) [Tamarindillo] no es recomendable para llevar a cabo una reforestación, ya que hay riesgo que el pastoreo local coma esta especie, sin embargo, *Nicotiana glauca* (Solanaceae) [Palo Loco], es toxica y no existe tal riesgo.

En lo que concierne a las especies como Tepehuaje y Rama Blanca, son las especies que acumulan las menores concentraciones y son recomendables para realizar la reforestación. Otra ventaja que tienen estas especies, es que no se trata de plantas anuales, es decir, que no germinan, florecen y sucumben año con año, como el caso del Tamarindillo.

La Rama Blanca, es un arbusto que se desarrolla en cualquier tipo de suelo con pH's ácidos o alcalinos. El Tepehuaje, es un árbol que puede llegar a medir de 8 a 12 metros, principalmente se usa esta especie, para tratamientos medicinales asociados al estómago.

## 5. ACCIONES NECESARIAS PARA EL CIERRE

---

### 5.1 Recubrimiento del vaso

El recubrimiento que tiene el depósito actualmente no es completo, existen espacios descubiertos por la acumulación de agua (Figura 32).



Figura 32. Condiciones actuales del depósito de jales.

Todo el vaso de almacenamiento cuenta con un área de 121.84 hectáreas, de las cuales, 26.28 hectáreas están cubiertas por agua; solo 95.60 hectáreas cuentan con una capa de suelo (Tabla 14 y Figura 33).

Tabla 14. Características dentro del depósito de jales.

Sitio	Área que ocupada (ha)
Áreas descubiertas	26.28
Área cubierta	90.40
Suelo natural	5.16
Área total	121.84

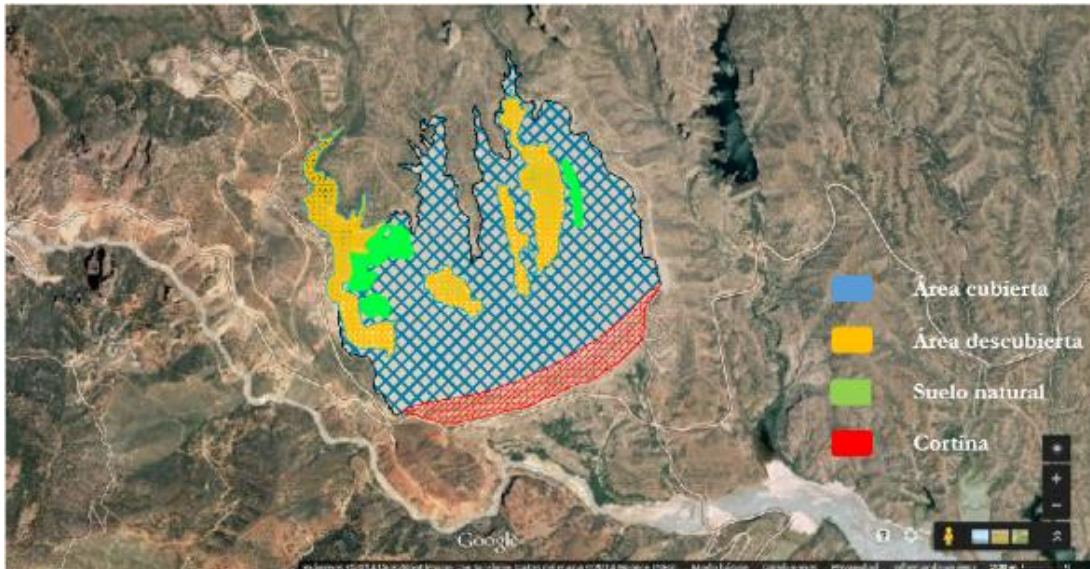


Figura 33. Representación de características dentro del depósito.

A la cubierta de suelo se deberá dar una pendiente para canalizar el agua pluvial, la cual será a partir del centro hacia los extremos, con una pendiente de -5% para que exista un escurrimiento de agua. Con ello se realizarán surcos sobre la misma capa de suelo para evitar erosión y un movimiento del suelo (Figura 34).

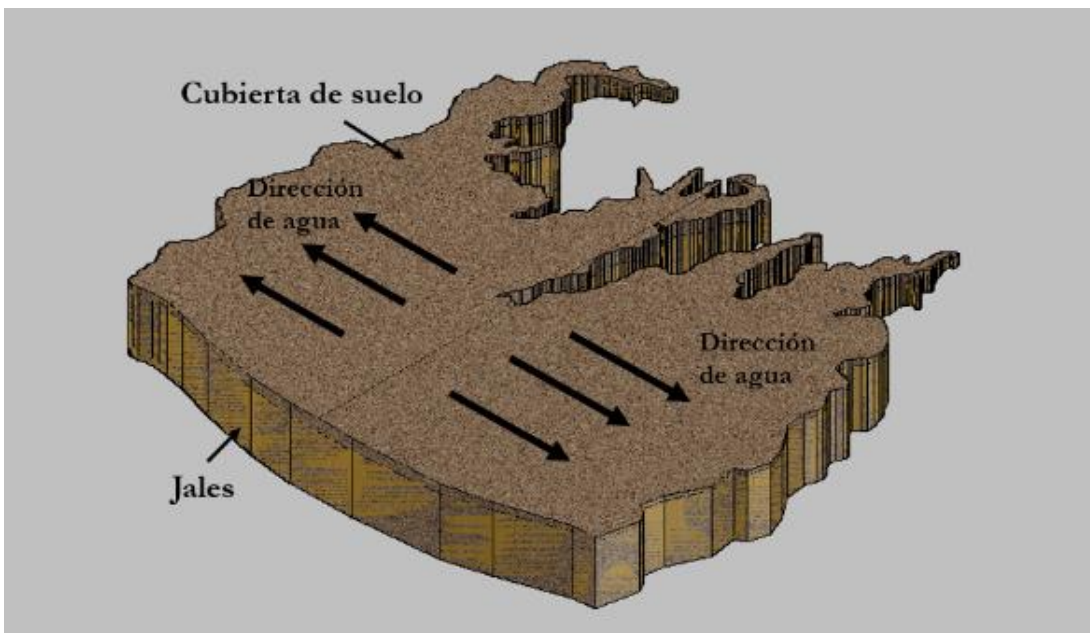


Figura 34. Modelo 3D de presa de jales.

Para realizar el recubrimiento de las áreas faltantes, considerando un espesor de 40 cm, se requiere 106,000 m<sup>3</sup> de material. Éste se obtendrá de los mismos bancos de préstamo que se han utilizado hasta ahora, además de que se tiene facilidad en el acceso y transporte.

El material se depositará en las zonas descubiertas con una capa de 40 cm de espesor para homogeneizar con el resto del depósito; posteriormente se trabajará con un tractor en todo el vaso para dar la pendiente propuesta de -5%.

## 5.2 Reforestación

Las especies adecuadas para realizar la reforestación son el Tepehuage (A) y Rama Blanca (B) (Figura 35).



\*A) Autor: Jerzy Rzedowski Rotter, CONABIO. B) Autor: Javier Hinojosa, CONABIO.

Figura 35. Especies con menor índice de acumulación en metales pesados.

Otra de las especies que puede ser útil es el Palo Loco (C). Ésta especie es tóxica y por esa razón no llegan a ingerirla la fauna de la región ni mucho menos los animales de pastoreo local.



\*C) Autor: Oswaldo Téllez Valdés, CONABIO

Figura 36. Palo Loco, especie útil para reforestación.



De acuerdo con el apartado 5.7.5 de los criterios de postoperación de la NOM-141, las especies que se usen para la cubrir la superficie del depósito, deben ser de la región, por tanto, estas especies son ideales para la reforestación.

La reforestación debe llevarse a cabo una vez terminadas las labores de recubrimiento total de la superficie de los jales. De tal manera que las especies que se encontrarán involucradas serán semillas de Tepehuaje y Rama Blanca, junto con las especies que fueron rescatadas de los bancos de prestamo. Debe considerarse que la raíz de estas especies no debe superar el espesor de la capa de suelo, por la erosión que pueda existir por parte de arrastre del material y tener contacto directo con el jal (Figura 37).

El método para la siembra de plantas en la unidad minera es el siguiente:

1. Se hace un hueco de 40 a 50 cm de diámetro y con una profundidad de 20 cm sin llegar a descubrir el residuo.
2. Se coloca la especie vegetal para posteriormente colocar nuevamente la tierra.
3. Se verifica que la planta está fija, ya que puede desplantarse por la erosión y/o los animales del lugar la pueden comer.
4. Por último, se riega la planta constantemente, sobre todo cuando la plantación sea en época de más calor.
5. La siguiente planta se coloca a una distancia de aproximadamente 50 a 60 cm, para dejar que la raíz tenga espacio de crecimiento, y se realiza el mismo procedimiento.

Como criterio general se recomienda que al momento de hacer la siembra se forme una reticula de 1 m x 1 m, para poder cuantificar con facilidad el número de especies y llevar un control de la reforestación.

El objetivo final de la reforestación es minimizar la erosión del suelo y contribuir a la estabilización física y química de los jales.

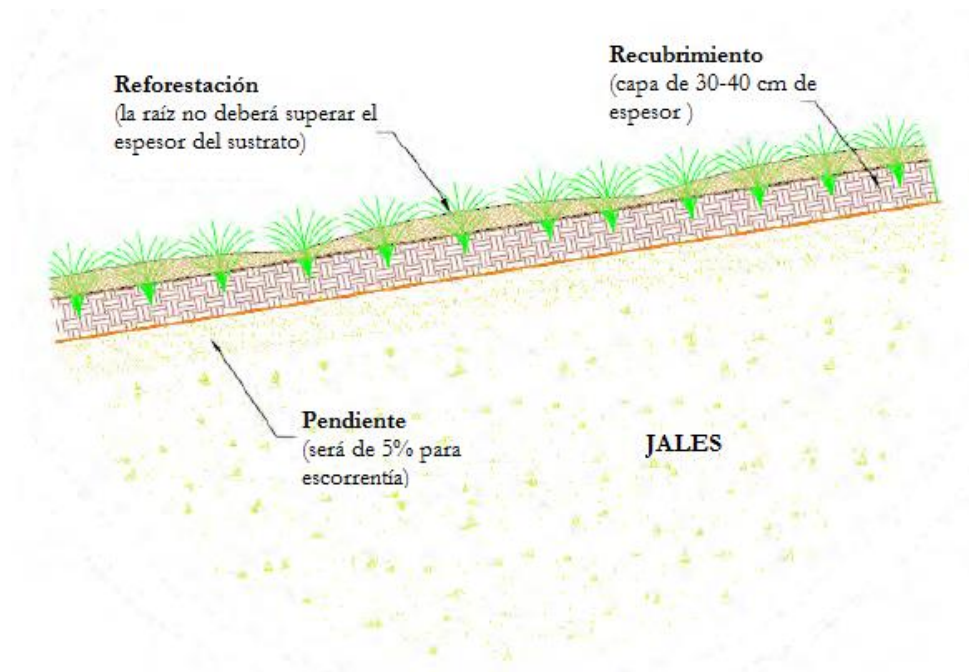


Figura 37. Modelo de reforestación sobre el depósito.

### 5.3 Manejo de escurrimientos pluviales

El depósito de jales se encuentra en la región hidrológica Sonora Sur (RH-9), en la cuenca del Río Yaqui y subcuenca Río Bavispe Bajo. Esto sirve de referencia para saber los datos de precipitación pluvial que existe en este lugar.

El conocimiento de los datos de precipitación servirá para el diseño de un canal abierto que permita controlar el flujo de agua pluvial que escurre a partir de la subcuenca, con el objeto de que no llegue directamente al depósito y evitar un futuro estancamiento de agua y un posible rompimiento del depósito.

El control de agua es una característica importante en el cierre de un depósito de jales, de esta manera se minimiza el riesgo de la existencia de erosión hídrica del suelo ya colocado y de los mismos jales.

Para obtener esta información, se utilizó una carta digital del portal del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), con clave H12B75 "El Abanico" y que está delimitada con las siguientes coordenadas geográficas. Dentro de estas mismas coordenadas se localiza la presa de jales en cuestión.

Latitud    Longitud

N 30° 30' 00"    W 109° 40' 00"

N 30° 15' 00" W 109° 40' 00"

N 30° 15' 00" W 109° 20' 00"

N 30° 30' 00" W 109° 20' 00"

La carta contiene además un plano de vectores, que es una base de datos con diversos puntos cada uno de ellos con tres coordenadas espaciales. Se utilizó el software SURFER para modelar la topografía en 3D y con ello definir los patrones de escurrimiento en la zona.

En el mapa de vectores (Figura 38) se puede observar el patrón de los escurrimientos que rodean a la presa y esto permite definir el área de descarga hacia el depósito, cuando hay una precipitación pluvial extraordinaria.

Se realizó el cálculo del área de esta cuenca para determinar la cantidad de agua que puede caer, tomando como base la precipitación máxima en 24 horas con un periodo de retorno de 28 años, el cual es de 90 [mm]. Este dato se obtuvo del portal de internet del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE, 2016), donde hay una recopilación de bases de datos del mismo Servicio Meteorológico Nacional (SMN). El dato corresponde a la fecha del 24 de septiembre de 1970 del municipio de Villa Hidalgo, Sonora.

En la Figura 39 se acota para tener una mayor referencia de los escurrimientos cercanos al depósito.

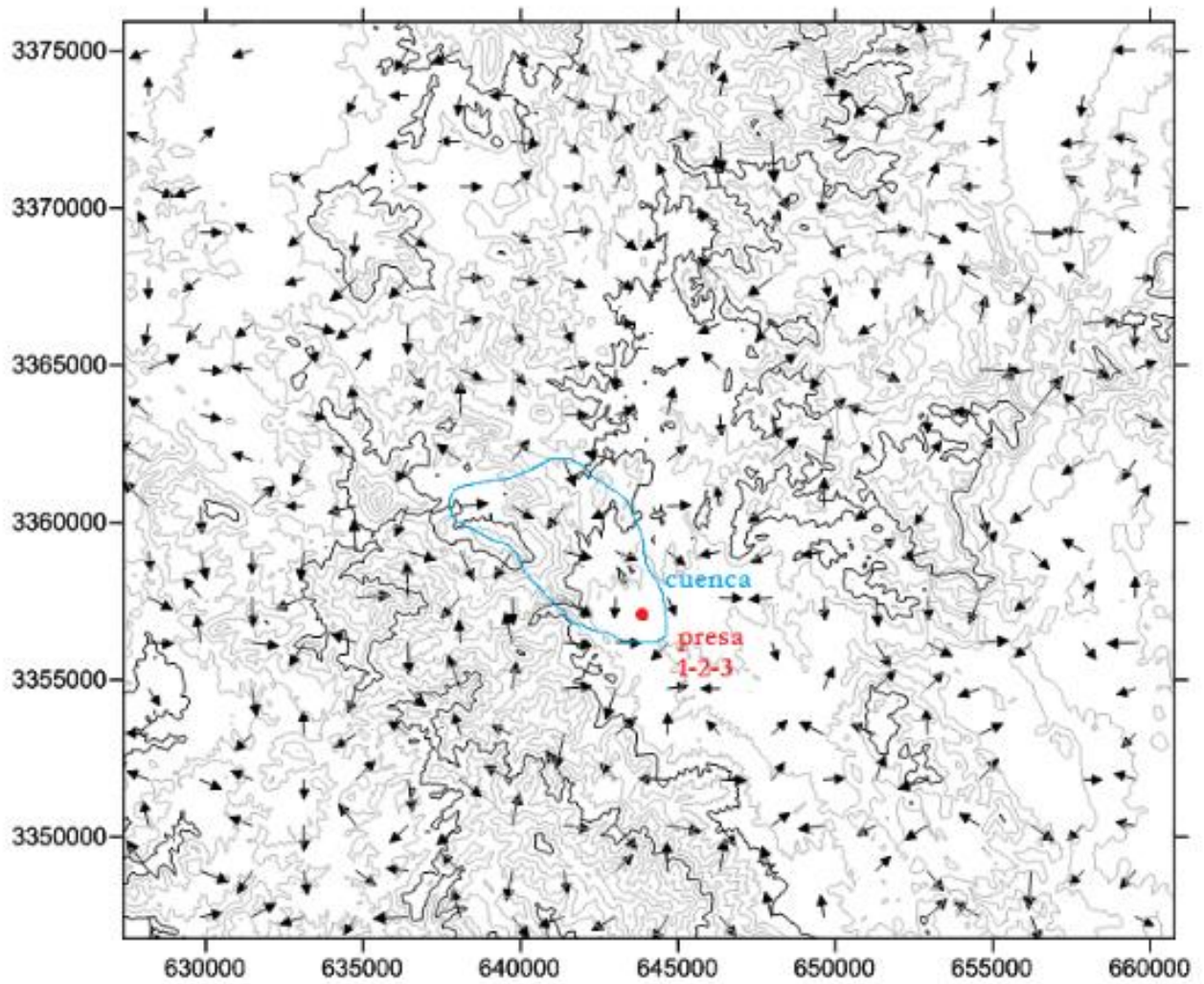


Figura 38. Mapa de vectores de los escurrimientos, zona cercana al depósito.

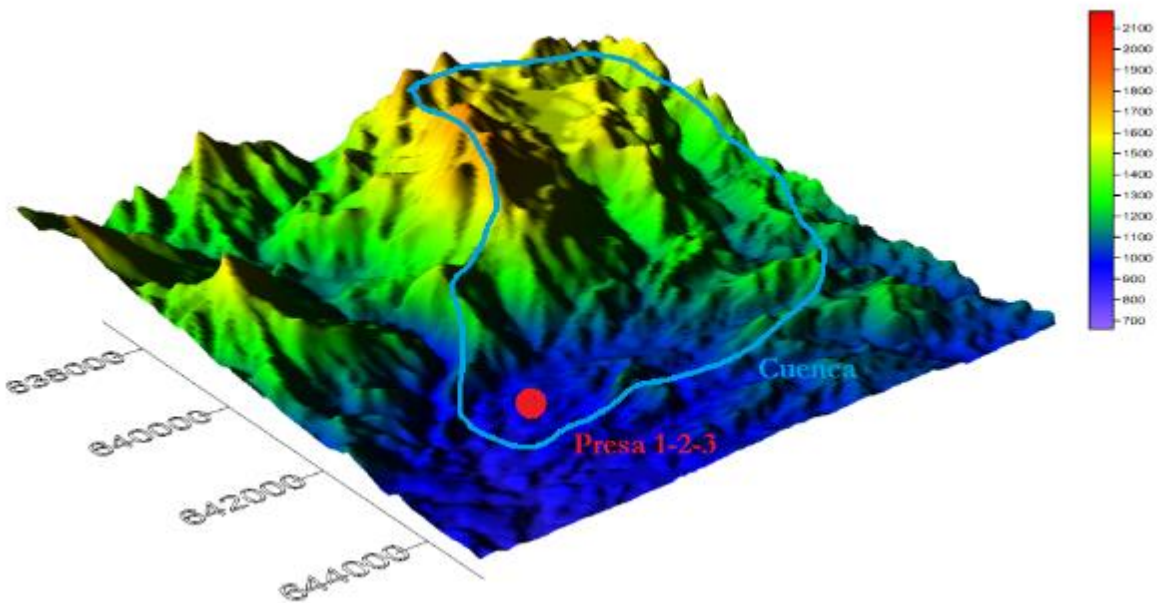
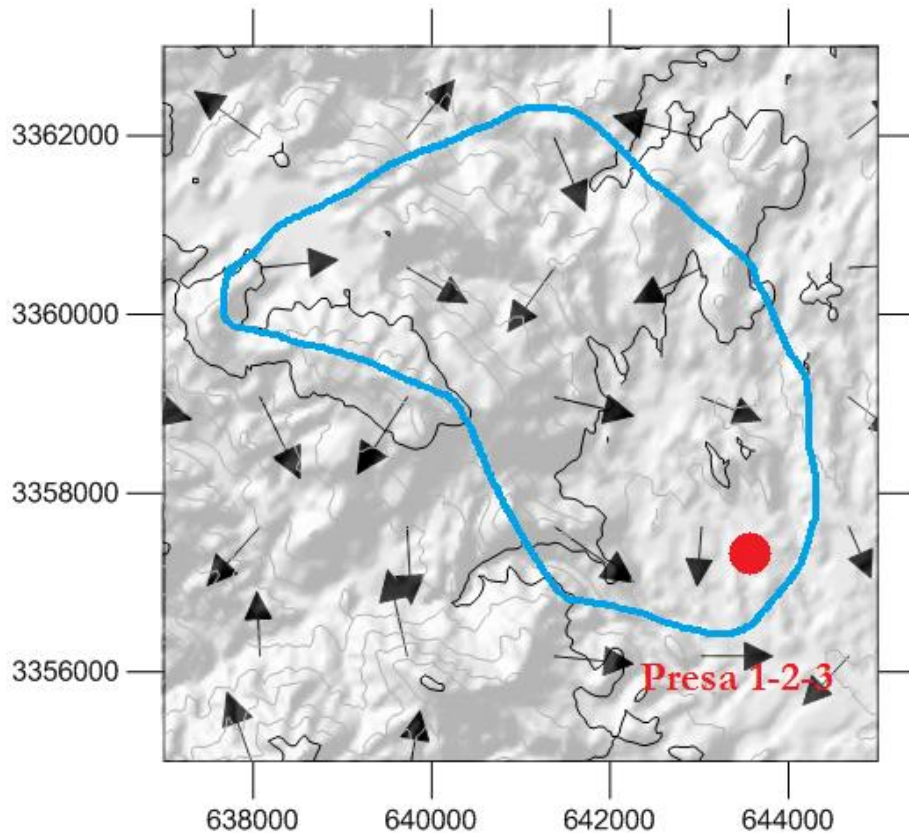


Figura 39. Representación en 3D y vectores del depósito.



Para realizar el cálculo de la cuenca se utilizaron imágenes satelitales a través de Google Maps trazando un polígono en el mismo mapa, donde se muestra el perímetro y el área de influencia. En este caso en particular el área que se logró medir es de 13.45 km<sup>2</sup> (Figura 40).

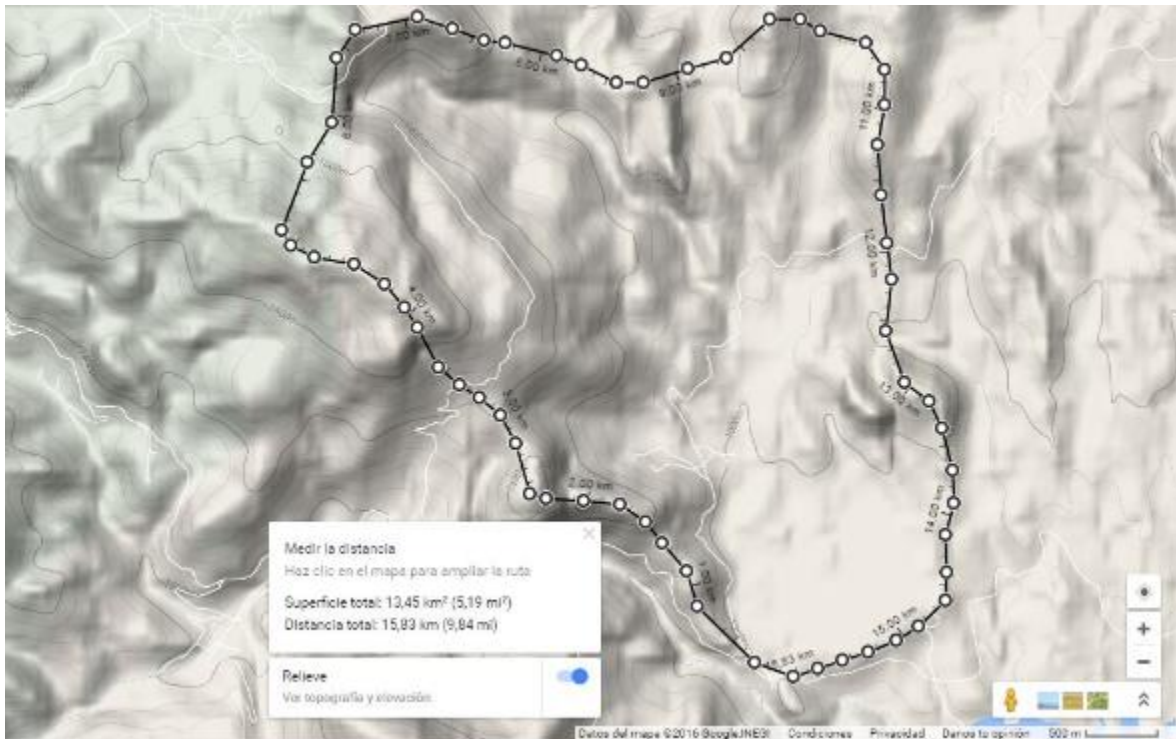


Figura 40. Cuenca cercana al depósito de jales.

De igual manera se midió el depósito de jales para corroborar el dato obtenido con anterioridad en AutoCad. En Google Maps se midió un total de 1.22 Km<sup>2</sup>, mientras que en AutoCad el área es de 1.218 km<sup>2</sup> (Figura 41).



Figura 41. Delimitación del depósito de jales.

Teniendo como base los datos anteriores se determinó un área total de la subcuenca y con los datos de precipitación se calculó el volumen de agua que se puede captar. Después se calculó el índice de escurrimiento para saber la cantidad de agua que puede llegar al depósito en un evento extraordinario de precipitación (Tabla 15).

Tabla 15. Datos de cuenca y depósito.

	[km <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[ha]
Área de cuenca [Ac]	13.45	13,450,000	1345
Área de depósito [Ad]	1.218	1,218,000	121.8
[Ac] – [Ad]	12.23	12,232,000	1223.2

Otros datos necesarios para el cálculo y diseño del canal de desvío, es la precipitación máxima mensual y las horas efectivas de lluvia. Respectivamente el valor de la precipitación máxima mensual se obtuvo del portal del SMN. Las horas efectivas de lluvia es un valor estimado ya que la precipitación extraordinaria generalmente ocurre en lapsos de pocas horas (Tabla 16).

Tabla 16. Datos de precipitación.

Precipitación	
Precipitación máxima anual [mm/m <sup>2</sup> ]	434.4
Precipitación máxima en 24 hrs [mm/m <sup>2</sup> /24 horas]	90
Horas efectivas de lluvia	5
Precipitación máxima en 1 hr [mm/m <sup>2</sup> /1 hr]	18



Para calcular el índice de escurrimiento en la subcuenca, se utilizó como referencia la NOM-011-CONAGUA-2015 *“Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”* (CONAGUA, 2015). En el apéndice normativo “A”, apartado A.1.2, se muestra el cálculo con métodos indirectos, para determinar el volumen medio anual de escurrimiento natural. Ésta misma describe cómo realizar un cálculo con un método indirecto, como se indica en la siguiente fórmula.

$$V = P * A * Ce$$

Dónde:

V: Volumen de escurrimiento natural de la cuenca.

P: Precipitación máxima de la cuenca en 24 hrs.

A: Área de la cuenca.

Ce: Coeficiente de escurrimiento.

$$Ce = \frac{K(Pa - 250)}{2000} + \frac{K - 0.15}{1.5}$$

Dónde:

Ce: Coeficiente de escurrimiento.

K: Valor de tipo y uso de suelo.

Pa: Precipitación máxima mensual

Para obtener el coeficiente de escurrimiento (Ce), en la misma NOM-011, en el apartado A.1.2.1.2, se encuentra una tabla referente al tipo y uso de suelo. Para este caso en particular, el tipo y uso de suelo es casi impermeable y con pastizal del 50-75% - Regular, respectivamente; teniendo un valor de “K” de 0.30 (Figura 42).

TIPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS		
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos		
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo mas compactados que los correspondientes a los suelos A; terrenos migajosos		
C	Suelos casi permeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas		
USO DEL SUELO	TIPO DE SUELO		
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0.26	0.28	0.30
Cultivos:			
En hilera	0.24	0.27	0.30
Legumbres o rotación de praderas	0.24	0.27	0.30
Granos pequeños	0.24	0.27	0.30
Pastizales:			
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75% poco	0.14	0.20	0.28
Del 50 al 75% regular	0.20	0.24	0.30
Menos del 50% excesivo	0.24	0.28	0.30
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24
Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26
Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28
Cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.30
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Caminos	0.27	0.30	0.33
Praderas permanentes	0.18	0.24	0.30

Figura 42. Valores de "K", en función de tipo y uso de suelo (CONAGUA, 2015).

Por lo tanto

$$C_e = \frac{0.3 \left( 434.4 \frac{mm}{m^2} - 250 \right)}{2000} + \frac{0.3 - 0.15}{1.5} = 0.12766$$

El valor que se obtuvo para  $C_e$  es de 0.127, el cual representa que el 12.7% de la precipitación se infiltrará, evaporará y retendrá en la vegetación del lugar y el 87.3 % escurrirá hacia el depósito, por tanto, es el porcentaje de agua que se tendrá que desviar. Sustituyendo valores en la ecuación para el cálculo del volumen, se tiene:

$$V = [0.09 [m] * 12,232,000 [m^2] * 0.12766] = 140,538.34 [m^3]$$

$$V = 140,538.34 [m^3] * 1000 \left[ \frac{L}{m^3} \right] = 140,538,341 [L]$$

Se obtiene un resultado de 140,538,341 L de agua que escurren por la cuenca y llegan al depósito. Realizando la conversión correspondiente se tiene un total de 140,538.34 [m<sup>3</sup>] de agua y aplicando un factor de seguridad del 25%, se tiene un total de 175,673 [m<sup>3</sup>]. Este volumen de agua es la que se tendrá que contener en un caso de precipitación extraordinaria y en este dato se basará el diseño de los canales de desvío en los extremos del depósito de jales.

La forma trapezoidal es la más implementada y adecuada para la construcción del canal. Se proponen las medidas de la base menor y la altura que pueda alcanzar el agua. Para ello se calcula el área de sección transversal de la siguiente forma (UCLM, 2012), en la Figura 43.

$$S = \frac{L + l}{2} h = \frac{2l + 2 \cdot h \cdot \cot \alpha}{2} h$$

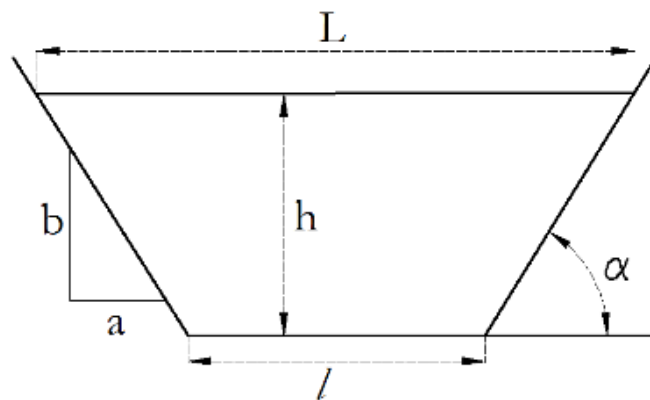


Figura 43. Ecuación para el cálculo de área transversal de un canal abierto trapezoidal.

Calculada el área transversal del canal, el siguiente paso es el cálculo del volumen que debe tener el canal. De acuerdo con la dirección de los flujos que se tienen en la descarga de la cuenca, se propone la construcción de dos canales, uno en el extremo izquierdo y otro en el extremo derecho (Figura 44).



Figura 44. Posición de canales de desvío.

El canal izquierdo será nombrado C1 y el canal derecho C2. El C1 tiene una longitud total de 1642 m, mientras que el C2 cuenta con 1777 m. Con estos datos se realizó una serie de iteraciones con propuestas en las dimensiones de la base menor y la altura, con lo que se obtuvo el cálculo del área transversal aproximada a la deseada.

Un factor importante para el diseño de canales abiertos es la cantidad de agua que será descargada. Es necesario saber el flujo del agua y la velocidad con la cual va a fluir. Utilizando las fórmulas de Manning para el cálculo de velocidad y caudales en canales abiertos que son las siguientes (SAGARPA, 2012):

$$V_c = \frac{1}{n} r^{\frac{2}{3}} s^{\frac{1}{2}} \quad y \quad Q = \frac{1}{n} A_c r^{\frac{2}{3}} s^{\frac{1}{2}}$$

Dónde:

V<sub>c</sub>: Velocidad media del agua en el canal, [m/s].

Q: Caudal del canal, [m<sup>3</sup>/s].

A<sub>c</sub>: Área del canal, [m<sup>2</sup>].

n: Coeficiente de rugosidad de Manning, adimensional.

r: Radio hidráulico, [m<sup>2</sup>].

s: Pendiente del canal (gradiente hidráulico), adimensional.

Inicialmente se midió la pendiente con la que se cuenta en el terreno. Esto se calculó con referencia a la distancia que hay en el punto inicial del canal y el punto final, donde se realizara la descarga de agua, que es de 1710 [m] y la diferencia de alturas que tienen estos dos puntos (Segura, 1993).

$$s = \frac{\textit{Diferencia de alturas}}{\textit{Distancia total}}$$

La pendiente es:

$$s = \frac{30 \text{ m}}{1710 \text{ m}} = 0.0175$$

El radio hidráulico (r) se obtiene de la fracción del área transversal sobre el perímetro mojado. El área transversal se calculó anteriormente, solo falta el cálculo del perímetro mojado (P<sub>m</sub>).

$$P_m = \left( \frac{\textit{Altura del canal [m]}}{\cos(\alpha)} \right) (2) + (\textit{base menor [m]})$$

$$r = \frac{A_c}{Pm}$$

El perímetro mojado del C1 es de 4.5 m

El perímetro mojado del C2 es de 6.04 m

El coeficiente de rugosidad, está en función del material de recubrimiento del canal, en este caso el material es concreto a condiciones normales; el valor se tomó de una de las tablas de (Diseño Hidráulico de un Canal de Llamada , 2012)(Figura 45).

Material	Mínimo	Normal	Máximo
Roca (con salientes y sinuosas)	0.035	0.04	0.05
Tepetate (liso y uniforme)	0.025	0.035	0.04
Tierra (alineado y uniforme)	0.017	0.02	0.025
Tierra (construido con draga)	0.025	0.028	0.033
Mampostería seca	0.025	0.03	0.033
Mampostería con cemento	0.017	0.02	0.025
Concreto	0.013	0.017	0.02
Asbesto cemento	0.09	0.01	0.011
Polietileno o PVC	0.007	0.008	0.009
Fierro fundido	0.011	0.014	0.016

Figura 45 Valores de "n" para fórmulas de Manning (SAGARPA, 2012).

Obteniendo todas las variables consideradas por Manning, se realizaron los cálculos correspondientes para obtener la velocidad y el gasto másico, de igual manera se tomaron como base las iteraciones anteriores para determinar las medidas aproximadas de ambos canales.

Los canales serán de diferentes dimensiones debido a que en el extremo izquierdo del depósito hay un mayor flujo de agua, dando como resultado que el C1 debe tener mayor capacidad; mientras que, en el otro extremo, es menor el volumen de agua que se tiene que desviar.

El C1 aproximadamente captará el 70% del agua mientras que el C2 el otro 30%; es decir, se tendrá que desviar 122,971 m<sup>3</sup> y 52,702 m<sup>3</sup> respectivamente.

Las características de ambos canales se describen en la Tabla 17.

Tabla 17 Canales de desvío.

Característica	C1	C2
Base menor [m]	1.8	1.4
Talud [m]	2.8	2

Talud húmedo [m]	2.1	1.6
Superficie libre [m]	5.7	4.1
Espejo de agua [m]	4.8	3.6
Altura [m]	1.5	1.4
Borde libre [m]	0.5	0.3
Distancia total [m]	1642	1777
Área transversal [m <sup>2</sup> ]	7.3	4
Flujo a conducir [m <sup>3</sup> ]	122,971	54,810
Q [m <sup>3</sup> /h]	121,403	52,522

Las dimensiones de ambos canales se muestran en la Figura 46, con respecto a un borde libre sobre el nivel de agua, esto es por un factor de seguridad que se establece en la construcción y diseño de canales abiertos.

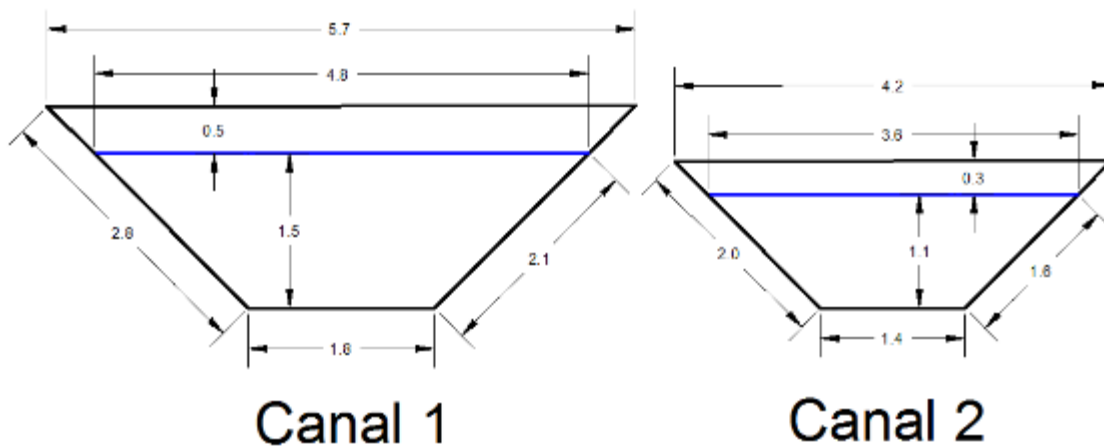


Figura 46 Dimensiones de canales de desvío.



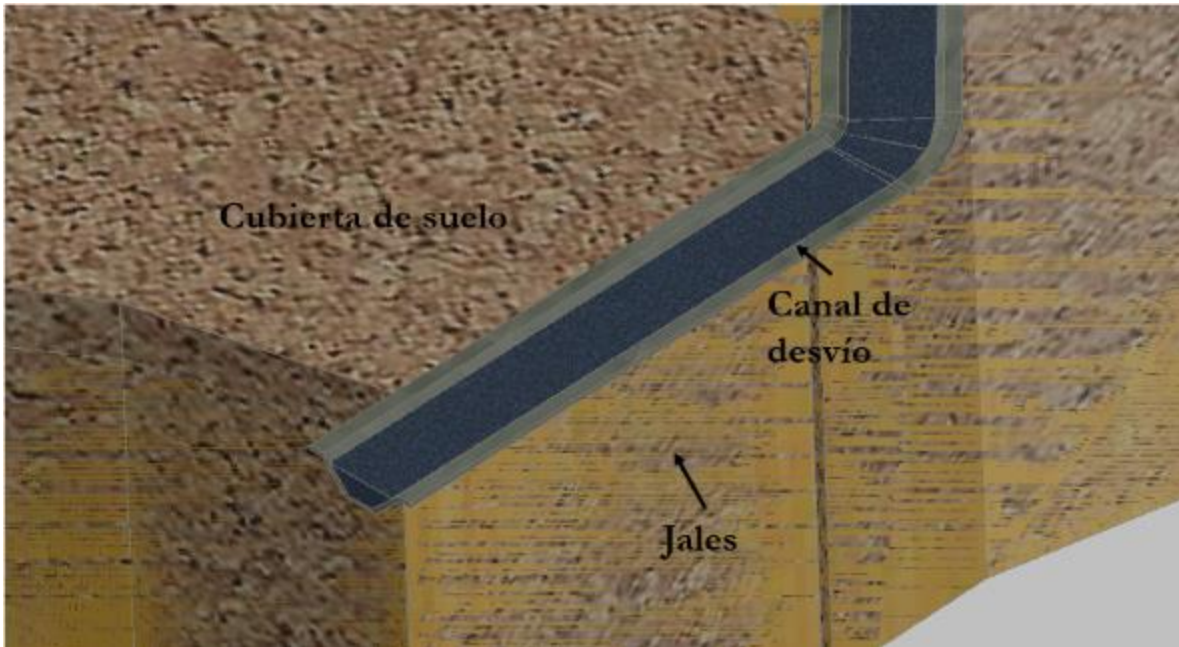


Figura 47 Modelado de canales.

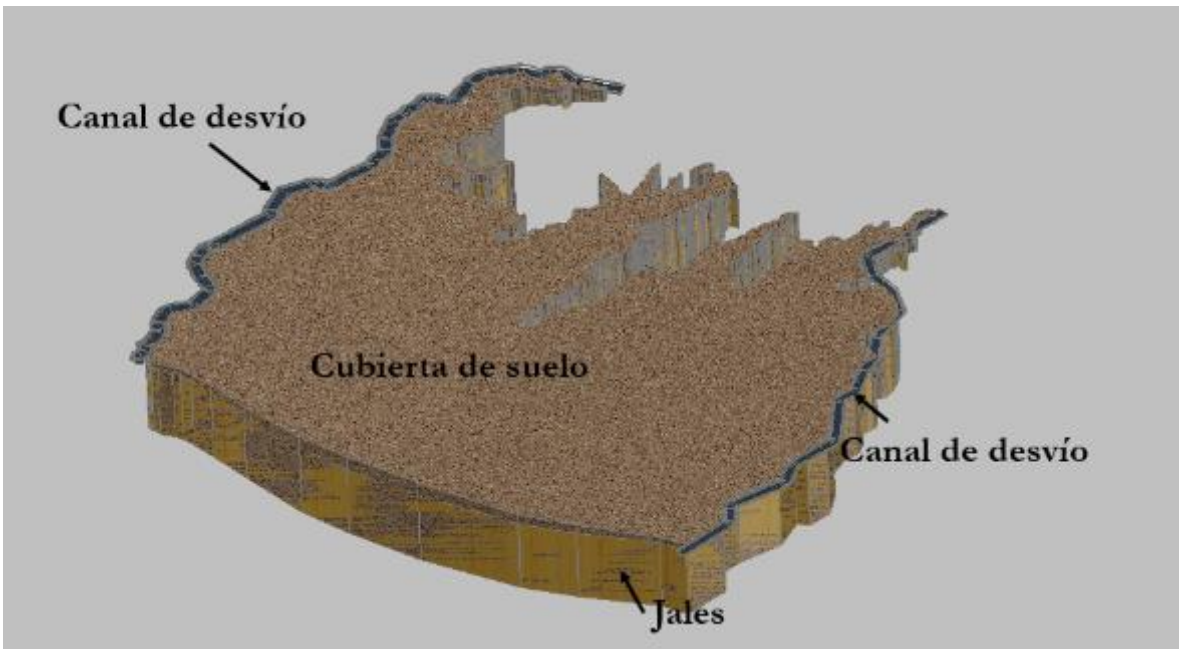


Figura 48. Modelado de depósito con canales de desvío.

Para la construcción de los canales se tendrá que remover material. Específicamente para el caso del C1, se realizó un diseño particular ya que en este extremo del depósito hay un talud y a unos metros está un camino de terracería (en la Figura 49 se marca con rojo). Esta parte del talud se tendrá que remover para dar una configuración correcta, con una berma de seguridad y acequia.

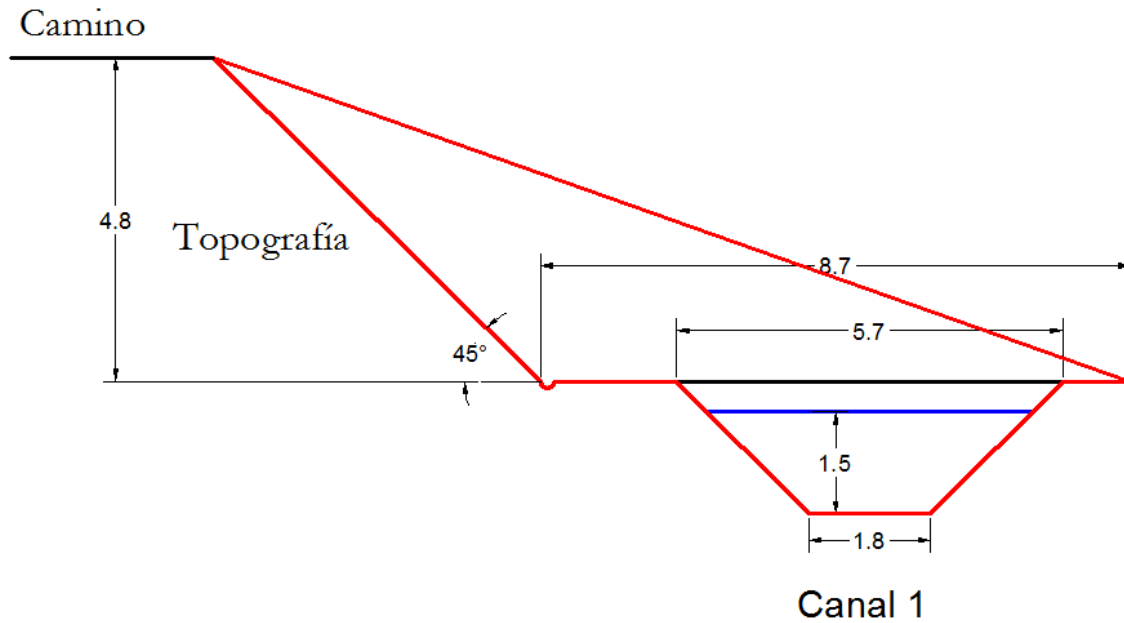


Figura 49. Área transversal de construcción de canal 1.

El área medida en la sección transversal es de  $28.1 \text{ m}^2$  y como la longitud es de  $1500 \text{ m}$ , el volumen a remover al costado del C1 es aproximadamente de  $42,150 \text{ m}^3$  de material, el resto será únicamente del canal que es  $1037 \text{ m}^3$ , teniendo un total de  $43,187 \text{ m}^3$  de material a remover.

El caso del C2 no es necesaria la remoción adicional del terreno. El área del canal es de  $4 \text{ m}^2$  y la longitud es de  $1777 \text{ m}$ , el volumen total es de  $7108 \text{ m}^3$  aproximadamente.

Siendo un total de cerca de  $51,000 \text{ m}^3$  de material a remover para la construcción de ambos canales.

#### 5.4 Reforzamiento del talud

Otra de las actividades importantes a realizar es el reforzamiento del talud. Para ello se realizan secciones de la cortina, a fin de obtener la configuración actual y determinar la cantidad de material necesaria para realizar una reconfiguración (Figura 50).

La configuración actual que se tiene muestra que hay bermas ya con una forma irregular, algunas ya son más angostas y el ángulo de inclinación también es irregular debido al paso del tiempo. El ángulo que se tiene actualmente en la cortina en promedio es de  $13^\circ$  y éste la hace una cortina segura.

Lo que se propone en esta reconfiguración es construir 3 bermas con 5 metros de ancho, para permitir el desplazamiento de vehículos a lo largo de la cortina. Cada una de estas bermas

contará con acequias para la conducción de agua; así como una nueva configuración a la corona con una anchura de 10 metros para el paso de vehículos en dos sentidos. Cada uno de los taludes entre bermas tendrá  $10^\circ$  de inclinación para evitar la erosión por el escurrimiento del agua pluvial, el ángulo final total de la cortina será de  $10^\circ$  (Figura 51).

En la Figura 50 se observa el trazo del talud final propuesto marcado en color azul; se puede apreciar que hace falta material en la base de la cortina para lograr la inclinación deseada por lo que será necesario utilizar material de préstamo. Se realizó una estimación del volumen de material necesario, tomando como base las secciones indicadas.

El volumen calculado fue de  $450,000 \text{ m}^3$  de material necesario para una reconfiguración completa de la cortina que tiene el depósito de jales. Con esta configuración nueva se presenta en la Figura 52



Figura 50. Secciones hechas sobre la cortina.

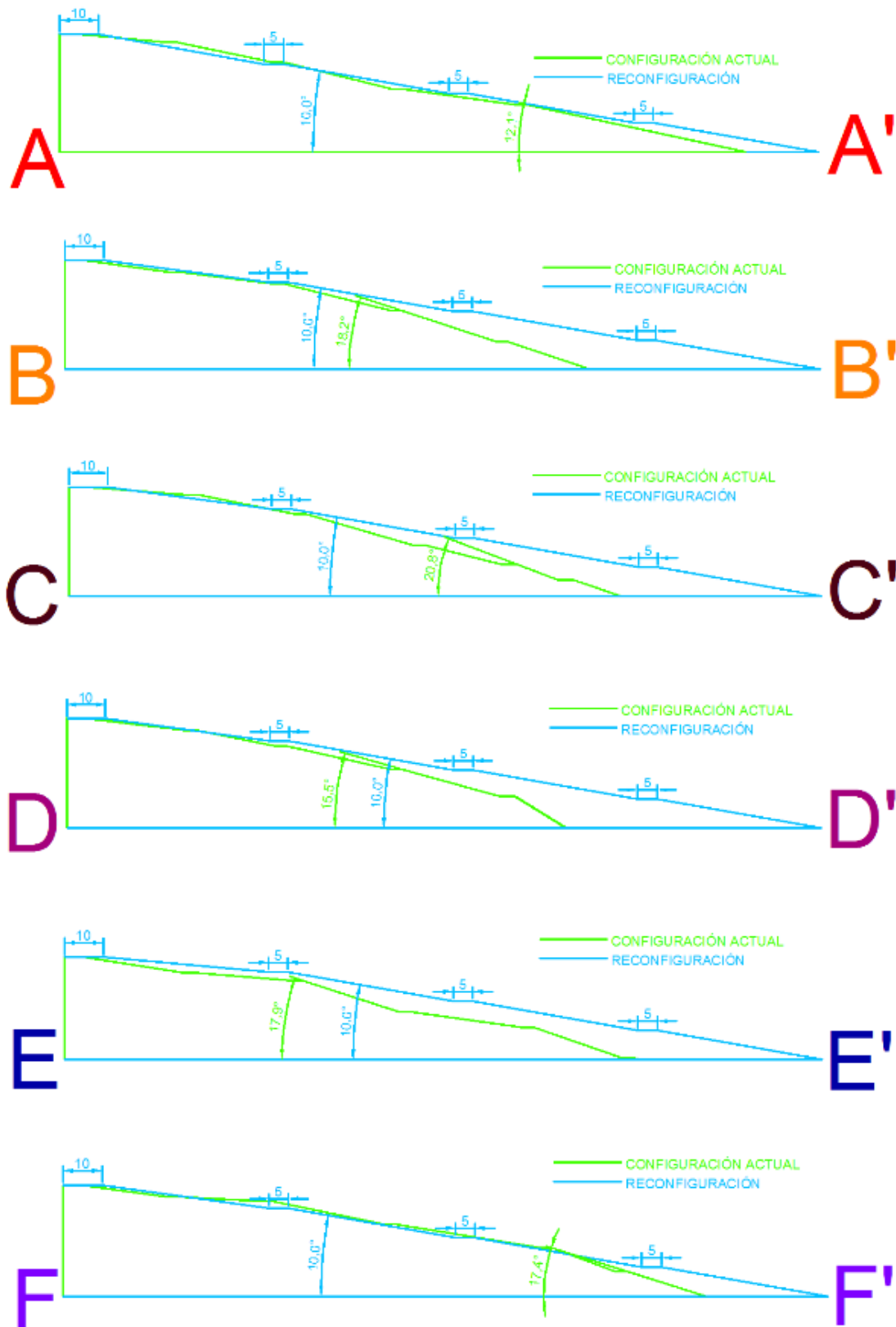


Figura 51. Reconfiguración en cortina.





Figura 52. Nueva configuración en cortina de la Presa 1-2-3.



## 5.5 Planeación de actividades para el cierre

La planeación de este proyecto abarca cuatro actividades principales, de las cuales a continuación se describe de manera breve el tiempo estimado, así como el equipo y personal necesarios para llevar a cabo las actividades.

Los cálculos realizados para determinar el tiempo de esta operación y los requerimientos de equipo se muestran en el Anexo 2.

### 5.5.1 Reforzamiento de talud

El reforzamiento del talud, se refiere a realizar un movimiento y manejo de material, a su vez se hará la reconfiguración de taludes y bermas.

La cantidad de material que se necesita para reconfigurar la cortina de almacenamiento, es de 450,000 m<sup>3</sup>, éste será extraído de los bancos de préstamo indicados en el inciso 3.1, así como el suelo natural que se observa en el vaso contenedor, por este motivo es necesario contar con:

- 2 excavadoras hidráulicas Caterpillar 375 de capacidad de cucharón de 1.46 a 5.75 yd<sup>3</sup>
- 4 camiones de volteo Mercedes Benz LK-1417/34 con capacidad de 7m<sup>3</sup> y 170 hp
- 2 tractores de Orugas Caterpillar D9T equipados con hoja recta y sin escarificador

Con ello la duración de esta actividad es de 27 semanas, cerca de 7 meses.

### 5.5.2 Recubrimiento del vaso

El recubrimiento se hará de igual manera, desde los bancos de préstamo que se han utilizado para cubrir. La cantidad de material que se necesita es de 106,000 m<sup>3</sup>. Es necesario el uso de:

- 1 excavadora hidráulica Caterpillar 375 de capacidad de cucharón de 1.46 a 5.75 yd<sup>3</sup>
- 2 camiones de volteo Mercedes Benz LK-1417/34 con capacidad de 7m<sup>3</sup> y 170 hp
- 1 tractor de Orugas Caterpillar D9T equipados con hoja recta y sin escarificador

Esta actividad tendrá una duración de 4.5 meses, para el manejo de material y configuración, para el control de agua, dentro del depósito.

### 5.5.3 Construcción de canales de desvío

La construcción comenzará con la apertura de la zanja para el C1, después finalizado esto se colocará la estructura metálica que dará la resistencia, por último, se realizará el colado del canal. Después, de la misma manera se construirá el C2. Para ello, se necesita:

- 1 excavadora hidráulica Caterpillar 375 de capacidad de cucharón de 1.46 a 5.75 yd<sup>3</sup>
- 2 camiones de volteo Mercedes Benz LK-1417/34 con capacidad de 7m<sup>3</sup> y 170 hp
- 1 camión revolvedor de 7 m<sup>3</sup>
- 4 ayudantes

Para la construcción de los canales, se estima un tiempo de 6.5 meses, es claro que el equipo no se usará durante todo el tiempo.

### 5.5.4 Reforestación

En la reforestación, se colocarán las especies que han sido rescatadas de los bancos de préstamo, así como se sembrarán semillas de las especies que son útiles para esta actividad. El equipo necesario para ello es:

- 2 camiones de volteo Mercedes Benz LK-1417/34 con capacidad de 7m<sup>3</sup> y 170 hp
- 4 ayudantes

El tiempo estimado es de 2.5 meses y esta es la última actividad que se llevará a cabo. Cada una de las actividades mencionadas, se observa en el siguiente diagrama de Gantt Figura 53.

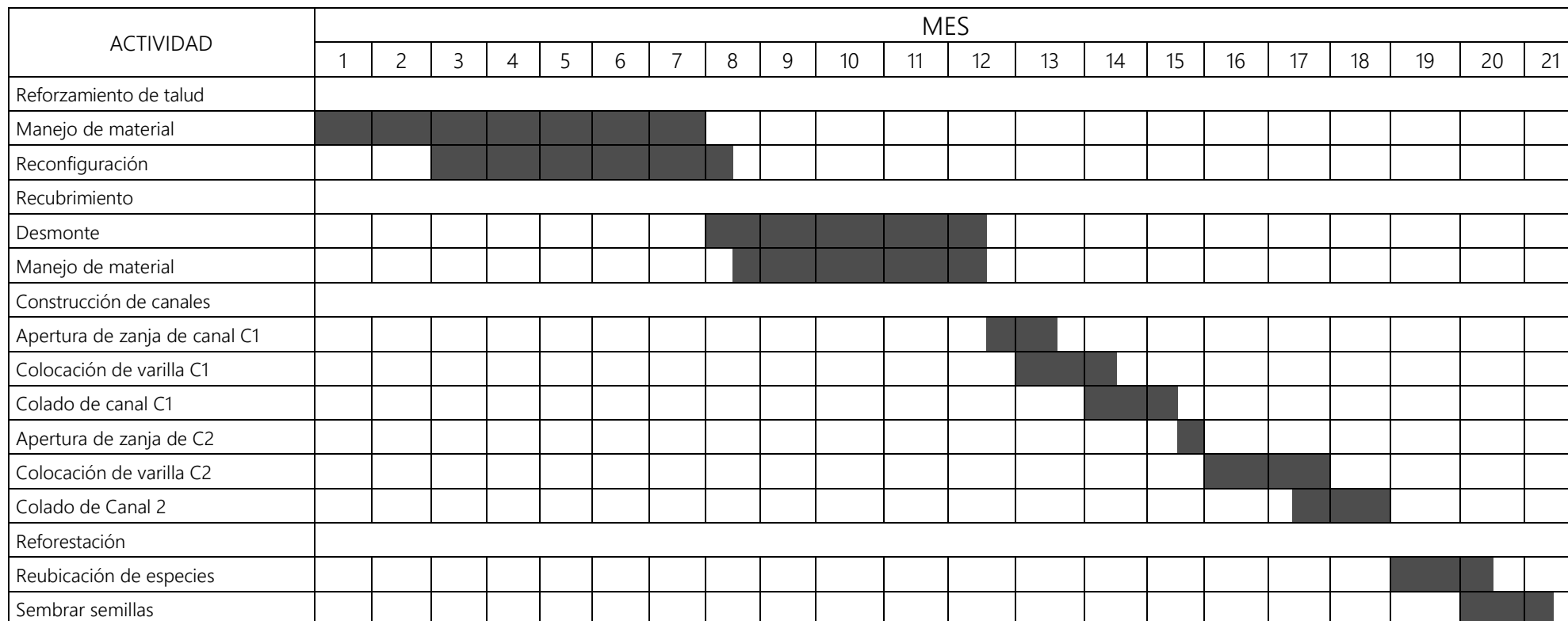


Figura 53. Diagrama de Gantt de actividades para el cierre del depósito.

## 6. ESTIMACIÓN DE COSTOS

---

Con base en el detalle de las actividades por realizar, se hizo una estimación de costos a partir de los siguientes rubros.

- Uso de equipo y personal, para la colocación de material sobre la superficie de los jales, construcción de canales de desvío y reconfiguración de talud.
- Reforestación de especies vegetales.
- Material de construcción para canales de desvío.

Los costos del equipo y del personal se hizo con el Catálogo de costos directos 2014 de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC, 2014). El siguiente equipo es propuesto para el desarrollo de este proyecto (Tabla 18).

- Excavadora hidráulica Caterpillar 375 de capacidad de cucharón de 1.46 a 5.75 yd<sup>3</sup>
- Camión de volteo Mercedes Benz LK-1417/34 7m<sup>3</sup> de 170 hp
- Tractor de Orugas Caterpillar D9T equipados con hoja recta y sin escarificador
- Camión revolvedor de 7 m<sup>3</sup>
- Ayudantes

El costo por hora de estos equipos se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18. Costos horarios (CMIC)

Equipo y personal	Costo horario*
Excavadora	\$ 3,085.66
Camión de volteo	\$ 445.36
Tractor	\$ 2,239.10
Revolvedora	\$ 769.74
Ayudantes	\$ 295.38

\*Precios consultados en manual de (CMIC) 2014

En los equipos de industria pesada, se incluyen el costo por operador, el cual es considerado como "operador de 1ª para equipos superiores", de igual manera lo indica la CMIC. Con respecto a los camiones de volteo y revolvedora, se utilizó el concepto de "chofer de 1ª".

Se tomó como referencia una jornada laboral de 8 horas, con 6 horas efectivas de trabajo. El tiempo de duración de cada actividad se hizo considerando estos tiempos. Con los tiempos totales se determinaron los costos de equipos y finalmente se hizo la estimación de los materiales a utilizar. Los cálculos de estos tiempos y costos se encuentran en el ANEXO 2.

## 6.1 Reforzamiento de talud

En esta actividad, se consideró la cantidad de material a mover para llevar a cabo una configuración adecuada a la cortina. Como se ha mencionado, el material se extraerá de los mismos bancos de préstamo que han servido para cubrir el vaso. La distancia que tendrán que recorrer los camiones, es un promedio, éste es variable por la ubicación de los bancos hacia la cortina. De tal manera se estima el uso de este equipo para cumplir con el tiempo estimado en la Tabla 19.

Tabla 19. Costo de reforzamiento de talud.

Equipo	Cantidad	N° de turnos	Horas	Costo de equipo
Excavadoras	1	168	1080	\$3,332,513.00
Camiones de volteo	8	168	1080	\$3,847,910.00
Tractor de orugas	1	132	792	\$1,773,288.00
TOTAL				\$8,953,711.00

## 6.2 Recubrimiento del vaso

De manera similar para la reconfiguración del talud, se consideró la cantidad de material necesario para la configuración diseñada. El recorrido del equipo de acarreo, es igual variable, por lo que la distancia estimada es un promedio y se estima el siguiente equipo en la Tabla 20.

Tabla 20. Costo de recubrimiento en vaso.

Equipo	Cantidad	N° de turnos	Horas	Costo de equipo
Excavadoras	1	128	768	\$2,369,787.00
Camiones de volteo	2	128	768	\$684,073.00
Tractor de orugas	1	114	684	\$1,531,544.00
TOTAL				\$4,585,404.00

### 6.3 Construcción de canal

En la construcción del canal, se tiene que retirar material, la colocación del envarillado para ambos canales y el colado. De esta manera se consideran ayudantes y un camión revolvedor.

En esta estimación de igual manera se considera el material para la construcción de ambos canales. Que es el siguiente:

- Malla electro soldada
- Cemento
- Arena
- Grava

Tabla 21. Materiales para construcción de canal.

Material	Costo*
Cemento (50 kg)	\$ 110.00
Arena (1500 kg)	\$ 400.00
Grava (1700 kg)	\$ 400.00
Malla electro soldada (rollo de 2.5 x 40 m)	\$ 2800.00

\*Precios consultados en la casa materialista Góngora 2016, México

El costo por metro lineal en los materiales (cemento, arena y grava) para cada uno de los canales diferirá, esto por las diferentes dimensiones que tienen; para el C1 el costo por metro lineal es de \$ 757, mientras que para el C2 el costo es de \$553. Para ello se tiene la Tabla 22, donde se describe la cantidad de material necesario para la construcción de dichos canales.

Tabla 22. Cantidades de material por canal.

Material	Canal 1	Canal 2
Cemento (kg)	388,151	306,533
Arena (kg)	776,301	613,065
Grava (kg)	776,301	613,065
Malla electro soldada (rollo de 2.5 x 40 m)	122	96
Costo	\$1,585,204	\$1,250,906

Tabla 23. Costo de construcción de canales de desvío.

Equipo	Cantidad	N° de turnos	Horas	Costo de equipo
Excavadoras	1	28	168	\$518,390.00
Camiones de volteo	2	28	168	\$149,640.00
Camión revolvedor	1	66	396	\$304,816.00
Ayudantes	4	136	816	\$935,763.00
TOTAL				\$1,908,609.00



## 6.4 Reforestación

El costo para la reforestación, en lo que se refiere a reubicación de especies vegetales, mantenimiento de instalaciones (viveros), semillas de las especies potencialmente acumuladores de metales se estima de \$250,000.

Tabla 24. Costos de reforestación.

Equipo	Cantidad	N° de turnos	Horas	Costo de equipo
Camiones de volteo	2	36	216	\$192,395.00
Ayudantes	4	36	216	\$255,208.00
TOTAL				\$447,603.00

## 6.5 Inversión total

De manera resumida se tiene lo siguiente:

- Costo horario por equipo y personal → \$ 22,533,830
- Costo total por construcción de canales → \$ 2,836,110
- Costo por reforestación y reubicación → \$ 250,000

Teniendo un total de \$18,981,437.00 del costo neto, se prevé un gasto adicional (administrativo y otros) de un 15 % obteniendo cerca de \$ 22,000,000 que es necesario para el desarrollo de este proyecto. El cálculo es aproximado, utilizando precios en moneda nacional, esto dependerá de la región y del contratista.

## 7. CONCLUSIONES

---

En México se puede lograr un mejor desempeño minero ligado a su vez con el cuidado del medio ambiente, aplicando la normatividad que hay en México y con las buenas prácticas de ingeniería que se dan en todo el mundo. Siendo el caso que se encuentren depósitos abandonados, además de los lineamientos normativos, se pueden tomar como referencia algunas guías que se han desarrollado por instituciones y empresas en distintos lugares.

Esta propuesta para el cierre del depósito de jales 1-2-3 es complemento de lo que se ha iniciado hace algunos años, por parte de la unidad minera y que ha sido dirigido por el departamento de ecología. Inicialmente se consideró la reforestación y evitar la dispersión del residuo a la atmosfera, la propuesta considera los lineamientos que se tienen en México en la NOM-141-Semarnat-2003 y también en guías internacionales, de esta manera, se cumple con lo establecido en materia de cierre de depósitos de jales, evitando su dispersión, manejo de aguas pluviales y estabilización de cortina contenedora.

La empresa minera tendrá como beneficio, el reconocimiento de ser una minera preocupada por el medio ambiente, de procurar restablecer las zonas de trabajo una vez concluidas y no esperar el momento de realizar un cierre total. Otro logro, es el disminuir el impacto ambiental y visual que se tiene, en esta zona se encuentra la ruta principal hacia lo que es el municipio de Villa Hidalgo. Un beneficio más, es que se evitará la erosión y emisiones de partículas de jal hacia la atmosfera que contamine a los alrededores.

El inicio de las actividades es con el reforzamiento del talud, a pesar que cuente con un ángulo final de 13°, si es conveniente realizar esta actividad para una reintegración adecuada al entorno, de la misma manera para la construcción de las bermas para un monitoreo constante.

El resultado de la reforestación no se tendrá en un principio, sino pasado unos años ya que las especies reubicadas se adapten y realicen la función, el proyecto abarca hasta el momento en que se tiene un área significativa ya reforestada con estas especies, en este tiempo se llevará a cabo un monitoreo del avance de la reforestación y el proceso de sucesión ecológica la cual se lleva a cabo de forma natural y conforme el saneamiento del suelo recubierto.

La configuración del recubrimiento se tendrá que monitorear en los primeros años de haber reforestado, conforme el tiempo, las raíces de las especies evitaran un desplazamiento de suelo, evitando una saturación de tierra en los canales de desvío.

Con esta propuesta se concluye que se pueden realizar actividades que estén apegados a los lineamientos que dictan las Normas Oficiales Mexicanas con un costo razonable. De manera

que no es una inversión donde se registrará un retorno de capital, pero se llevarán a cabo actividades que son benéficas para el entorno ecológico y social.

El tiempo de las actividades están calculadas a una distancia promedio, de tal forma que el tiempo que se establece en este trabajo puede variar, básicamente en la cantidad de personal, número de equipos y tiempos que sean asignados a las actividades propuestas.

Algunos de los problemas asociados para que no se realice algunas de estas propuestas, son:

- Desinterés por parte de la empresa.
- Una falta de presupuesto para realizar la inversión estimada.
- Falta de asesoramiento técnico para realizar las actividades propuestas.

Como recomendación, el realizar un estudio de la reproducción de las plantas endémicas, para poder reproducirlas en un vivero y utilizarlas en otras áreas que se requieran en cuestión de reintegración del entorno para el cierre de instalaciones.

# REFERENCIAS

---

## Bibliografía

- Alvarado, L. C. (2015). Peñoles y la sustentabilidad en el cierre de minas. *Conferencia Facultad de Ingeniería, UNAM*. México: Gerencia de Servicio a Minas Grupo Peñoles.
- Australia, E. D. (2011). *Mining Law*. Australia: The Environmental Defender's Office WA (Inc).
- Australian Government: Department of Industry, I. a. (2007). *Tailings Management*. Australia.
- Cámara de Diputados H. Congreso de la Unión. (2015). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, (LGPGIR)*. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. México: Diario Oficial de la Federación. Obtenido de [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263\\_220515.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_220515.pdf)
- CICESE. (Julio de 2016). Obtenido de Base de Datos Climatológica Nacional (SISTEMA CLICOM): <http://clicom-mex.cicese.mx/>
- CMIC, C. M. (2014). *Maquinaria Catalogo de costos directos 2014*. México: CMIC.
- Commission, E. (January de 2009). Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities. Obtenido de [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/mmr\\_adopted\\_0109.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/mmr_adopted_0109.pdf)
- CONAGUA. (2015). *NOM-011-CONAGUA-2000, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales*. México: Comisión Nacional del Agua.
- Consejo Minero. (2013). *Cierre Participativo del Tranque de Relaves Los Quillayes*. Obtenido de <http://www.consejominero.cl/cierre-participativo-del-tranque-de-relaves-los-quillayes-de-minera-los-pelambres/>
- García, D. H. (2008). Overview Of International Mine Closure Guidelines. Tucson, AZ, (U.S.), Arizona, United States of America: SRK Consulting, (U.S.). Obtenido de <http://www.infomine.com/library/publications/docs/Garcia2008.pdf>
- ICMM, I. C. (2 de Apr de 2009). Planificación del Cierre Integrado de Minas: Equipo de Herramientas. Obtenido de <http://hub.icmm.com/document/526>

- Karlheinz Spitz, J. T. (2009). *Mining and the Environment From Ore to Metal*. London, UK: Taylor and Francis Group.
- (2016). *Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. México. Obtenido de [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148\\_130516.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148_130516.pdf)
- Martinez, M. S. (2014). Gestión de relaves mineros. *Diploma en minería: Gestion ambiental en minería*. Montevideo, Uruguay.
- MCF, Minería con Futuro. (Julio de 2016). *Cierre de minas, una nueva vida*. Obtenido de <http://mineriaconfuturo.com.pe/noticias/cierre-de-minas-un-nuevo-futuro>
- McMillan, G. (2011). Proactive Monitoring at Tailings Dams. Obtenido de <http://www.environmentalearthsciences.com.au/wp-content/uploads/2012/11/Tonkin-Tailings-Proactive-Monitoring-GMcMillan-July-2011.pdf>
- Michael P. Davies, P. C. (2002). *Design of Tailings Dams and Impoundments*. Obtenido de <http://www.infomine.com/library/publications/docs/Davies2002b.pdf>
- Ministerio de Energia y Minas. (15 de agosto de 2005). Ley N° 28090 - Reglamento para el Cierre de Minas. Lima, Perú. Obtenido de [http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dgaam/legislacion/proy\\_regla\\_cierre\\_minas.pdf](http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dgaam/legislacion/proy_regla_cierre_minas.pdf)
- Morandé, N. A. (2007). *Guía Técnica de Operación Control de Depósitos de Relaves*. Santiago.
- MRNA. (2016). *Leading Practice Sustainable Development Program for the Mining Industry*. Australia: Australian Government.
- Muñoz, J. O. (2008). Planes de Cierre Mineros – Curso Resumido. Santiago, Chile. Obtenido de <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15564/Cierres%20mineros%20-%20Jorge%20Oyarz%C3%BAn.pdf>
- NOAMI, N. O. (Mayo de 2017). *National Orphaned Abandoned Mines Initiative*. Obtenido de <http://www.abandoned-mines.org/en/>
- REDLIEDS, R. L. (2002). Guía Ambiental Para el Cierre y Abandono de Minas. Perú. Obtenido de <http://biblioteca.unmsm.edu.pe/redlieds/Recursos/archivos/MineriaDesarrolloSostenible/Cierreminas/cierreabandono.pdf>
- Roberto Oyarzun, P. H. (2011). *Minería Ambiental: Una introduccion a los impactos y a su remediación*. Ediciones GEMM.

- Robins, M. (2004). *Closure Of Tailings Facilities: Current Practice Review & Guidelines For Success*. Johannesburg.
- SAGARPA, S. d. (2012). *Diseño Hidráulico de un Canal de Llamada*. México.
- Segura, J. (1993). *Trazo y Revestimiento de canales*. Lima, Perú: Tecnología Intermedia ITDG - Programa de Hidroenergía.
- SEMARNAT. (2004). *NOM-141-SEMARNAT-2003. Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales*. México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SEMARNAT. (2005). *NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos*. México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SEMARNAT. (2009). *NOM-157-SEMARNAT-2009, Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros*. México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SEMARNAT. (2014). *Guía para conocer los principales trámites y permisos ambientales en las diferentes etapas del proceso minero*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Obtenido de <http://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/fomento/documentos/2014/guia-minas.pdf>
- SERNAGEOMIN, S. N. (Noviembre de 2002). *Guía Metodológica para el Cierre de Faenas Mineras*. Santiago, Chile. Obtenido de <http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/cierrefaena/DocumentosRelacionados/Guia-Methodologica-Cierre-Faenas-Mineras-CM.pdf>
- SERNAGEOMIN, SONAMI, BGR. (2003). *Construcción y operación de tranques de relaves. Guía de Buenas Prácticas Ambientales para la Pequeña Minería*. Chile: Andros Ltda.
- SRK Consulting. (Apr - May de 2010). *Tailings - What is it?* Obtenido de <http://www.infomine.com/library/publications/docs/SRKTailings2010a.pdf>
- SRK Consulting. (Apr - May de 2010). *Tailings Material Properties*. Obtenido de <http://www.infomine.com/library/publications/docs/SRKTailings2010e.pdf>
- SRK Consulting. (Apr - May de 2010). *Under Drainage And Filter Design*. Obtenido de <http://www.infomine.com/library/publications/docs/SRKTailings2010c.pdf>

Steve Roberts, M. V. (Octubre de 2000). Aspectos Generales del Cierre y Recuperación de Minas en las Americas (Resumen Ejecutivo). Vancouver: University of British Columbia. Obtenido de <https://hdl-bnc.idrc.ca/dspace/bitstream/10625/29045/1/117613.pdf>

*Tailings.Info.* (Junio de 2016). Obtenido de What Are Tailings? - Their nature and production: <http://www.tailings.info/basics/tailings.htm>

*Tailings.Info.* (Junio de 2016). Obtenido de High Density Thickened Tailings (HDTT) Storage: <http://www.tailings.info/disposal/thickened.htm>

*Tailings.Info.* (junio de 2016). Obtenido de Surface Paste Tailings Disposal: <http://www.tailings.info/disposal/paste.htm>

*Tailings.Info.* (Junio de 2016). Obtenido de Dry Stacking of Tailings (Filtered Tailings): <http://www.tailings.info/disposal/drystack.htm>

*Tailings.Info.* (Junio de 2016). Obtenido de In-pit tailings storage: <http://www.tailings.info/storage/inpit.htm>

U.S. Environmental Protection Agency. (1994). *Technical Report: Design and Evaluation of Tailing Dams*. Washington, DC.

UCLM, E. U. (2012). Formulas para el calculo de canales. España.

## Mesografía

[http://www.edowa.org.au/files/factsheets/me\\_mining.pdf](http://www.edowa.org.au/files/factsheets/me_mining.pdf)

<http://www.mesaquillayes.cl/2011/08/integer-pharetra-risus-vitae-hendrerit-molestie/>

<http://web.pelambres.cl/medio-ambiente-residuos.html>

<http://www.biobiochile.cl/2014/10/14/presentan-resultados-de-cierre-del-tranque-de-relaves-de-mlp-reforestado-con-especies-nativas.shtml>

[ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO\\_training/FAO\\_training/general/x6708s/x6708s08.htm](ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_training/FAO_training/general/x6708s/x6708s08.htm)

<http://casagongora.com/index.html>



ANEXOS

## ANEXO 1

### Procedimiento para muestreo y análisis de muestras

La cantidad de muestra debe ser un 1kg, para realizar una homogeneización adecuada, por lo que el procedimiento de la toma de muestras se realizó de la siguiente manera.

- a) Primeramente, se identificó en donde se realizaría cada muestreo y tomando de referencia que fuesen cercanos a donde se realizan las actividades de reforestación.
- b) Una vez seleccionado el sitio se tomó la geoposición para tener la referencia y posteriormente identificar los puntos en una imagen satelital.
- c) Se comenzó a limpiar la superficie del punto en donde se coleccionaría la muestra, para quitar objetos ajenos a la muestra como hojas, ramas, grava, etc. (Figura 54)
- d) Ya preparado el sitio, con la ayuda de una pala de mano, se comenzó a extraer suelo vegetal y jal, en donde se tuvo profundidades de 20 a 30 cm para tomar una muestra representativa de jal, retirando lo más posible de tierra para evitar que la muestra no estuviese mezclada
- e) Las muestras se colocaron en bolsas de plástico ya que cada una de estas se encontraba con cierta humedad.
- f) Cada bolsa se marcó con una clave para su posterior identificación y evitar confusiones.
- g) Se tomaron fotografías como registro de actividades del muestreo realizado.
- h) Las muestras se transportaron al laboratorio para su preparación y análisis.



Figura 54. Limpieza antes de toma de muestra.



Figura 55. Identificación de zonas muestreadas.

### *Preparación y análisis de muestras de suelo y jal*

#### Preparación

Las muestras de suelo y jal presentaban condiciones desfavorables para ser analizadas, como el exceso de humedad y una granulometría muy grande. El método utilizado para la preparación de estas muestras, fue el mismo que se usa para las muestras provenientes de mina el cual se describe de la siguiente manera:

- Se colocó la muestra en charolas para el secado marcando cada una de ellas con la clave asignada para su reconocimiento; inicialmente se colocaron al sol de 2 a 3 horas, posteriormente se hace el uso de un secador que alcanza una temperatura de  $160^{\circ}\text{C}$  esto para retirar la humedad existente y dejando la muestra completamente seca. Este proceso de secado tuvo una duración de 16 horas aproximadamente (Figura 56).



Figura 56. Secado de muestras.

- Secas las muestras, se requiere que estén a cierta granulometría, para ello se hizo uso de un mortero de madera y haciendo pasar la muestra a través de un tamiz de #10 para deshacer los grumos.
- Posteriormente se homogeneizó y se cuarteó para la toma de una muestra de aproximadamente 50 g, una vez empaquetado se etiquetó con los datos necesarios para su identificación como es clave, fecha y el nombre de "cabeza".
- La muestra es colocada en sobres y se hizo pasar por el pulverizador.
- El proceso de pulverizado ya terminado, la muestra nuevamente se homogeneizó, se cuarteó y se tomó una cantidad de material para análisis.

### *Análisis*

Para este trabajo se realizó la lectura de las concentraciones de los elementos como Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Plomo (Pb) y Zinc (Zn) que se han solicitado. De manera breve se mencionará el procedimiento en cada uno de ellos.

Para la lectura de concentraciones. Se pesó 0.5 g de muestra y se colocó en un vaso de precipitado. Se añade 10 ml de Nítrico perclórico 1:1 durante esto se colocó la muestra en una parrilla (Figura 57); retirando la muestra, se agregó 10 ml de ácido clorhídrico al 50% esto es para la recuperación de la muestra, se agregó agua destilada una vez que se ha recuperado la muestra, por último se afora a 100ml y se presentó a ensayos (Figura 58).



Figura 57. Muestras colocadas en parrilla.



Figura 58. Aforo de muestras a 100 ml.

Teniendo cada una de las muestras ya preparadas y colocadas en tubos de ensaye, se llevó a cabo el análisis de absorción atómica en donde previamente el equipo se tuvo que calibrar para una lectura confiable de cada uno de los elementos (Figura 59).



Figura 59. Equipo y lectura de muestras de jal y sustrato.



## *Muestreo de plantas*

El procedimiento fue similar al muestreo de suelo y jal, ya que se usó una pala de mano para extraer completamente y sin dañar la raíz de la planta. Dicho procedimiento se describe de la siguiente manera:

- a) Se observó y determinó que vegetación se encontraba en dichos puntos y que podrían ser útiles para el análisis.
- b) Posteriormente se delimitó que partes de la especie se podrían obtener, en algunos casos solo se obtuvo un tallo y hojas, para esto se hizo uso de un hacha por el grosor de la rama de estas especies.
- c) En los otros casos se tuvo que desplantar cada especie de raíz con cuidado para no trozarla. (Figura 60)
- d) En las especies que no contaban con una muestra cercana de sustrato y jal igualmente se obtuvo una muestra lo que es en el caso de JV7.
- e) A cada una de estas muestras que se encontraba en las cercanías igualmente se geoposicionó para ubicarlas en una imagen satelital.
- f) En cada una de las especies tomadas se le asignó una clave para evitar su confusión ya que en unos casos se trata de la misma.
- g) Las muestras fueron puestas en bolsas para su traslado a laboratorio y puestas a la sombra para evitar que se secaran.



Figura 60. Muestras de raíz.

## *Preparación y análisis de plantas*

Para el análisis de las especies vegetales se realizó de manera similar a las muestras de jal y suelo.

1. Primeramente, se lavaron para quitar cualquier contaminante en la superficie de las plantas, ya que el análisis será de lo que contengan cada una de las especies. Posteriormente se colocaron en el secador industrial.
2. Estas muestras vegetales también se pulverizaron para que se les pudiese hacer un análisis correcto del contenido metálico (Figura 61).
3. Cada muestra al igual que el jal y suelo, se sometió a las pruebas de adsorción atómica para la identificación de contenido metálico de cada planta, con la diferencia que se tenía que separar, hoja, tallo y raíz (Figura 62).



Figura 61. Muestras antes y después de pulverizar.



Figura 62. Ataque de muestras vegetales.



## ANEXO 2

### Cálculos de tiempos y costos en planificación de actividades

#### *Reforzamiento del talud*

- Distancia promedio: 850 m
- Velocidad promedio: 20km/h
- Tiempo de recorrido: 2.55 min
- Cargado y descarga: 2.25 min
- Volumen de camión: 7m<sup>3</sup>
- Turno efectivo: 6 horas = 360 min

$$\frac{\text{Viajes}}{\text{Turno}} = \frac{360[\text{min}]}{7.35 [\text{min}]} = 48.97 \approx 49 \text{ viajes /turno}$$

- 49 viajes por camión

$$\frac{\text{Volumen}}{\text{Turno}} = 7[\text{m}^3] * 49 \left[ \frac{\text{viajes}}{\text{turno}} \right] = 343 \frac{[\text{m}^3]}{\text{turno}}$$

- 343 m<sup>3</sup> de material por turno por camión

$$\text{Volumen por flotilla} = 343[\text{m}^3] * 4 = 1342[\text{m}^3]$$

- Para cubrir el acarreo de 450,000 m<sup>3</sup>, es necesario calcular el número de turnos

$$\frac{450,000[\text{m}^3]}{1342[\text{m}^3]} = 335.3 \approx 335 \text{ turnos}$$

$$\text{Semanas} = 335 \text{ turnos} / 6 \text{ dias} = 55.8 \approx 56 \text{ semanas}$$

- Para ello se requiere contratar 2 flotillas de una excavadora y cuatro camiones, el tiempo para realizar este trabajo es de 28 semanas

El equipo necesario para llevar acabo la reconfiguración de la cortina y de bermas, es:

- 1 excavadora
- 8 camiones de volteo
- 1 tractor

Conforme a las 28 semanas establecidas, se tiene 168 turnos y operando 1080 horas efectivas en los equipos. Se procede a calcular el costo horario del equipo usado para esta actividad. En el caso de los tractores, se comenzarán a usar después del manejo de material.

$$\text{Costo excavadora} = \$3085.66 * 1080 [\text{horas}] * 1[\text{excavadoras}] = \$3,332,513.00$$

$$\text{Costo camiones} = \$445.36 * 1080 [\text{horas}] * 8[\text{camiones}] = \$3,847,910.00$$

$$*\text{Costo tractor} = \$2239.10 * 792 [\text{horas}] * 1[\text{tractores}] = \$1,773,288.00$$

Para el manejo de material, reconfiguración y estabilidad de talud el costo total es de \$8,953,711.00

### *Recubrimiento del vaso*

- Distancia promedio: 650 m
- Velocidad promedio: 20km/h
- Tiempo de recorrido: 1.95 min
- Cargado y descarga: 2.25 min
- Volumen de camión: 7m<sup>3</sup>
- Turno efectivo: 6 horas = 360 min

$$\frac{\text{Viajes}}{\text{Turno}} = \frac{360[\text{min}]}{6.15 [\text{min}]} = 58.53 \approx 59 \text{ viajes /turno}$$

- 59 viajes por camión

$$\frac{\text{Volumen}}{\text{Turno}} = 7[\text{m}^3] * 59 \left[ \frac{\text{viajes}}{\text{turno}} \right] = 413 \frac{[\text{m}^3]}{\text{turno}}$$

- 413 m<sup>3</sup> de material por turno por camión

$$\text{Volumen por flotilla} = 343[\text{m}^3] * 2 = 826[\text{m}^3]$$

- Para cubrir el acarreo de 106,000 m<sup>3</sup>, es necesario calcular el número de turnos

$$\frac{106,000[\text{m}^3]}{826[\text{m}^3]} = 128.3 \approx 128 \text{ turnos}$$

$$\text{Semanas} = 128 \text{ turnos} / 6 \text{ dias} = 21.3 \approx 21 \text{ semanas}$$

- Para ello se requiere contratar una flotilla de una excavadora y dos camiones, el tiempo para realizar este trabajo es de 21 semanas

El equipo necesario para llevar a cabo la reconfiguración de la superficie del vaso, es necesario:

- 1 excavadora
- 2 camiones de volteo
- 1 tractor

Conforme a las 21 semanas establecidas, se tiene 128 turnos y operando 768 horas efectivas en los equipos. Se procede a calcular el costo horario del equipo usado para esta actividad. En el caso de los tractores, se comenzarán a usar después del manejo de material.

$$\text{Costo excavadora} = \$3085.66 * 768 [\text{horas}] * 1[\text{excavadoras}] = \$2,369,787.00$$

$$\text{Costo camiones} = \$445.36 * 768 [\text{horas}] * 2[\text{camiones}] = \$684,073.00$$

$$*\text{Costo tractor} = \$2239.10 * 684 [\text{horas}] * 1[\text{tractores}] = \$1,531,544.00$$

Para el manejo de material, reconfiguración y estabilidad de talud el costo total es de \$4,585,404.<sup>00</sup>

### *Construcción de canales*

- Distancia promedio C1: 821 m
- Distancia promedio C2: 889 m
- Velocidad promedio: 20km/h
- Tiempo de recorrido C1: 2.46 min
- Tiempo de recorrido C2: 2.67 min
- Cargado y descarga: 2.25 min
- Volumen de camión: 7m<sup>3</sup>
- Turno efectivo: 6 horas = 360 min

#### CANAL 1

$$\frac{\text{Viajes}}{\text{Turno}} = \frac{360[\text{min}]}{7.17 [\text{min}]} = 50.20 \approx 50 \text{ viajes /turno}$$

- 50 viajes por camión

$$\frac{\text{Volumen}}{\text{Turno}} = 7[m^3] * 50 \left[ \frac{\text{viajes}}{\text{turno}} \right] = 350 \frac{[m^3]}{\text{turno}}$$

- 350 m<sup>3</sup> de material por turno por camión

$$\text{Volumen por flotilla} = 350[m^3] * 2 = 700[m^3]$$

- Para cubrir el acarreo de 12,020 m<sup>3</sup>, es necesario calcular el número de turnos

$$\frac{12,020[m^3]}{700[m^3]} = 17.17 \approx 17 \text{ turnos}$$

$$\text{Semanas} = 17 \text{ turnos} / 6 \text{ dias} = 2.8 \approx 3 \text{ semanas}$$

- Para ello se requiere contratar una flotilla de una excavadora y dos camiones, el tiempo para realizar este trabajo es de 3 semanas

El equipo necesario para llevar a cabo la construcción de la zanja, colocación de la estructura y colado del canal, es necesario:

- 1 excavadora
- 2 camiones de volteo
- 1 camión revolvedor
- 4 ayudantes

Conforme a las 3 semanas establecidas, se tiene 17 turnos y operando 102 horas efectivas en los equipos. Se procede a calcular el costo horario del equipo usado para esta actividad.

$$\text{Costo excavadora} = \$3085.66 * 102 [\text{horas}] * 1[\text{excavadoras}] = \$314,737.00$$

$$\text{Costo camiones} = \$445.36 * 102 [\text{horas}] * 2[\text{camiones}] = \$90,853.00$$

El demás equipo y personal, se comenzará a utilizar en cuanto haya un avance en la construcción de la zanja.

$$\text{Costo revolvedora} = \$769.74 * 180 [\text{horas}] * 1[\text{revolvedora}] = \$138,553.00$$

$$\text{Costo ayudantes} = \$295.38 * 360 [\text{horas}] * 4[\text{ayudantes}] = \$425,347.00$$

Para el manejo de material y construcción del Canal 1, el costo total es de \$969,490.00

## CANAL 2

$$\frac{\text{Viajes}}{\text{Turno}} = \frac{360[\text{min}]}{7.59 [\text{min}]} = 47.43 \approx 47 \text{ viajes /turno}$$

- 47 viajes por camión

$$\frac{\text{Volumen}}{\text{Turno}} = 7[\text{m}^3] * 47 \left[ \frac{\text{viajes}}{\text{turno}} \right] = 329 \frac{[\text{m}^3]}{\text{turno}}$$

- 329 m<sup>3</sup> de material por turno por camión

$$\text{Volumen por flotilla} = 329[\text{m}^3] * 2 = 658[\text{m}^3]$$

- Para cubrir el acarreo de 12,020 m<sup>3</sup>, es necesario calcular el número de turnos

$$\frac{7126[\text{m}^3]}{658[\text{m}^3]} = 10.82 \approx 11 \text{ turnos}$$

$$\text{Semanas} = 11 \text{ turnos} / 6 \text{ dias} = 1.83 \approx 2 \text{ semanas}$$

- Para ello se requiere contratar una flotilla de una excavadora y dos camiones, el tiempo para realizar este trabajo es de 2 semanas

El equipo necesario para llevar a cabo la construcción de la zanja, colocación de la estructura y colado del canal, es necesario:

- 1 excavadora
- 2 camiones de volteo
- 1 camión revolvedor
- 4 ayudantes

Conforme a las 2 semanas establecidas, se tiene 11 turnos y operando 66 horas efectivas en los equipos. Se precede a calcular el costo horario del equipo usado para esta actividad.

$$\text{Costo excavadora} = \$3085.66 * 66 [\text{horas}] * 1[\text{excavadoras}] = \$203,653.00$$

$$\text{Costo camiones} = \$445.36 * 66 [\text{horas}] * 2[\text{camiones}] = \$58,787.00$$

El demás equipo y personal, se comenzará a utilizar en cuanto haya un avance en la construcción de la zanja. 7 semanas

$$\text{Costo revolvedora} = \$769.74 * 216 [\text{horas}] * 1[\text{revolvedora}] = \$166,263.00$$

$$\text{Costo ayudantes} = \$295.38 * 432 [\text{horas}] * 4[\text{ayudantes}] = \$510,416.00$$

Para el manejo de material y construcción del Canal 1, el costo total es de \$939,119.<sup>00</sup>

### *Reforestación*

El equipo necesario para llevar a cabo la actividad de reforestación, es necesario:

- 2 camiones de volteo
- 4 ayudantes

Conforme al tiempo estimado es de 6 semanas, con lo que se tiene 36 turnos y operando 216 horas efectivas en los equipos. Se procede a calcular el costo horario del equipo usado para esta actividad.

$$\text{Costo camiones} = \$445.36 * 216 [\text{horas}] * 2[\text{camiones}] = \$192,395.<sup>00</sup>$$

$$\text{Costo ayudantes} = \$295.38 * 216 [\text{horas}] * 4[\text{ayudantes}] = \$255,208.<sup>00</sup>$$

Para el manejo de material y construcción del Canal 1, el costo total es de \$447,603.<sup>00</sup>