

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ELABORACIÓN DEL PLAN DE ESTABILIZACIÓN DE TALUDES EN
EL SECTOR EL YESO, DE LA CANTERA CURIGUA, UBICADA EN
SANARE, MUNICIPIO ANDRÉS ELOY BLANCO, ESTADO LARA**

**Trabajo Presentado Ante La
Ilustre Universidad Central de Venezuela
por el Br. Juan Carlos Sánchez Rojas
Para Optar al Título Ingeniero De Minas**

Caracas, 2024

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ELABORACIÓN DEL PLAN DE ESTABILIZACIÓN DE TALUDES EN
EL SECTOR EL YESO, DE LA CANTERA CURIGUA, UBICADA EN
SANARE, MUNICIPIO ANDRÉS ELOY BLANCO, ESTADO LARA**

TUTOR ACADEMICO: Ing. José Luis De Abreu

**Trabajo Presentado Ante la
Ilustre Universidad Central de Venezuela
por el Br. Juan Carlos Sánchez Rojas
Para Optar al Título Ingeniero De Minas**

Caracas, 2024



Universidad Central de Venezuela
Facultad de Ingeniería
Escuela de Geología, Minas y Geofísica
Departamento de Minas
Caracas



Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el bachiller **Juan Carlos Sánchez Rojas**, titular de la cédula de identidad V-27.167.023, titulado:

ELABORACIÓN DEL PLAN DE ESTABILIZACIÓN DE TALUDES EN EL SECTOR EL YESO, DE LA CANTERA CURIGUA, UBICADA EN SANARE, MUNICIPIO ANDRÉS ELOY BLANCO, ESTADO LARA

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al **Título de Ingeniero de Minas**, y lo declaran **APROBADO**, acordando una nota por unanimidad de veinte (20) puntos.

Prof. Feliciano de Santis
Jurado

Prof. Miguel Castillejo
Jurado

Prof. José Luis de Abreu
Tutor Académico

DEDICATORIA

Bueno señores y señoras... ya llegamos hasta aquí, 8 años en esto que increíble paciencia tengo. Cuando leí un pequeño ensayo de Gianfranco Perri sobre la minería y lo que podía hacer, ps... tomé la decisión de proponerme esto, sabiendo: realmente nada. Menos mal lo hice.

Por eso, padres, familiares, compañeros, enemigos, profesores, país, GRACIAS. Esto es para ustedes.

A esas personas que aún titubean sobre qué hacer con su vida, para seleccionen cualquier cosa que les interese, como diría Jordán Peterson *“busquen y tómense su veneno, vuélvanse serios con algo y vean que pasa”* y recuerden, como leí de una compañera una vez:

“La vida se trata de superar el beta, antes de que el beta te supere”

Anónimo

AGRADECIMIENTOS

Universidad Central de Venezuela, me abriste la puerta de tu casa sin tener regalo alguno. Me brindaste la oportunidad de convertir un interés en una pasión; logro que he escuchado muy poco ser alcanzado.

Gracias

Al Prof. José Luis de Abreu, menos mal de todos los cambios y aportes que me diste en las reuniones que tuvimos y los argumentos directos que fueron de la mayor utilidad.

Diosito, gracias por todo.

Mamá (Commander) y Papá (El Chamo), bueno, se logró.

Gracias por todo hasta ahora, me apoyaron de diversas maneras, trabajando duro para que yo pudiera terminar mi añorado Título de Ingeniero. En verdad lo agradezco. De aquí en adelante me toca esforzarme.

Profesora Mónica Pereira, gracias por abirme las puertas del laboratorio, prestarme herramientas y sus sugerencias. Aceleró la rapidez del proyecto y mejoró su calidad.

Profesores Carmelo Gil, Sergio Silva y Leonel Rodríguez, gracias por su apoyo en sus áreas respectivas y las asesorías que me brindaron.

A mis compañeros, Johnny Briceño, Alejandro González, José (El León) Eriza, Josmel Rincones (El Alquimista), Johanna Hernández, José Ríos. Su apoyo durante ensayos, discusiones, tramites, y demás, fueron invaluable.

Profesoras Katherine Silva y Alba Castillo, gracias por todos los llamados de atención, ayudas, prorrogas, fondos, eventos, y demás. Me hicieron formar parte del Departamento desde que llegue.

A la Escuela Geología, Minas y Geofísica, Departamento de Minas, personal del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales y el Cilindro de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los materiales, por el apoyo.

A mi familia

A mi... Claro está. Soporté bastante

RESUMEN

Sánchez Rojas Juan Carlos

ELABORACIÓN DEL PLAN DE ESTABILIZACIÓN DE TALUDES, EN LA EN EL SECTOR EL YESO, DE LA CANTERA CURIGUA, UBICADA EN SANARE, DEL MUNICIPIO ANDRÉS ELOY BLANCO, ESTADO LARA

Tutor Académico: Prof. José Luis de Abreu

Trabajo Especial de Grado. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.

Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

Departamento de Minas, 183 páginas

Palabras clave: Estabilidad de taludes, Cantera Curigua-Sanare-Lara (Estado), Minerales no metálicos, Suelo-Carcavamiento, Diseño hidrológico.

Se elaboró el plan de estabilización del sector El Yeso de la cantera Curigua. En **primera** instancia, se realizó un muestreo en campo y se procedió a ensayar las muestras recolectadas; de éstas se identificaron tres tipos de suelo: arcillas de alta plasticidad CH, arcillas CL-S de baja plasticidad y arenas bien gradadas con grava SW-G, cuyo tipo de falla asociada en las caras de los taludes es de tipo circular. El sector es afectado por dos cuencas, una al sur, que drena al suroeste; y otra al norte que drena al noroeste.

El factor de seguridad de los taludes es de 1,3, inicialmente estos iban a construirse con alturas iguales, 6 m, pero el sistema de drenaje requerido lo cambio a bancos de alturas desiguales; iniciarán desde la cota de la vía de acceso con una pendiente de 1,75 %; además se hará un rebaje del terreno, en la cota 1140 msnm, con pendiente de 3 %, los taludes en arena tendrán 31 ° de inclinación, y los de arcilla de 70 °. El agua de escorrentía correrá libremente sobre los bancos construidos con un peralte del 5 %, para evitar su desborde hacia las caras. Las aguas serán recolectadas en un canal transversal ubicado al final de cada banco; este tiene 2 m de ancho, deberá recubrirse con gaviones y será paralelo a los bancos (seguirá la pendiente) con un desfase de 70 cm por debajo de la cota de los mismo.

Como medida contra la erosión de las caras se ha concluido que deben usarse fajinas en arcillas; y, en arenas, fajinas y pasto vetiver

Contenido

DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS	vii
RESUMEN	ix
Contenido	xi
Índice Figuras	xv
Índice de Tablas	xviii
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACION	3
1.1. Planteamiento del Problema	3
1.2. Objetivos de la Investigación.....	4
1.2.1. Objetivo General	4
1.2.2. Objetivos Específicos	4
1.3. Justificación de la Investigación	4
1.4. Abreviaturas y símbolos	5
CAPITULO 2. GENERALIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	7
2.1. Ubicación	7
2.2. Clima	8
2.3. Precipitación.....	8
2.4. Tipo de suelo.....	8
2.5. Hidrogeología.....	9
2.6. Marco geológico.....	10
2.6.1. Geología Regional	10
2.6.2. Geología Local	11
CAPITULO 3. MARCO TEÓRICO	23
3.1. Antecedentes de la Investigación.....	23

3.2.	Bases Teóricas.....	24
3.2.1.	CLASIFICACIÓN DEL SUELO	24
3.2.2.	HIDROLOGÍA	28
3.2.3.	DISEÑO DE TALUDES	40
3.2.4.	ASPECTOS HIDRÁULICOS.....	45
CAPITULO IV. MARCO METODOLÓGICO		55
4.1.	Tipo de la investigación	55
4.2.	Diseño de la investigación	55
4.3.	Población y muestra	55
4.4.	Procedimiento Experimental.....	55
4.4.1.	Clasificación del suelo	56
4.5.2.	Caracterización Geomecánica.....	57
4.5.3.	Análisis del sistema hidrológico.....	57
4.5.4.	Diseño de Taludes, Obras Hidráulicas y selección de Medidas de monitoreo.....	58
CAPITULO V ANALISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....		61
5.1.	Clasificación de los suelos y arcillas de acuerdo al SUCS	61
5.1.1.	Investigación en el sitio.....	61
5.1.2.	Ensayos de laboratorio.....	62
5.2.	Caracterización geomecánica de arcillas y suelos	73
5.2.1.	Características generales del afloramiento.....	74
5.2.2.	Falla como grieta de tracción.....	79
5.2.3.	Condiciones para el análisis de estabilidad.....	79
5.3.	Sistema natural de drenaje en la cantera	79

5.3.1.	Cuencas	80
5.3.2.	Precipitación.....	81
5.3.3.	Lluvia de diseño	86
5.4.	Configuración de los taludes del frente de trabajo	87
5.4.1.	Criterio de estabilidad	88
5.4.2.	Alternativas de diseño.....	91
5.4.3.	Configuración tentativa del talud general	96
5.5.	Medidas de control de agua.....	97
5.5.1.	Selección del periodo de retorno.....	97
5.5.2.	Caudales de diseño	98
5.5.3.	Alternativas de diseño.....	103
5.6.	Acoplamiento del sistema de drenaje al diseño del frente	104
5.6.1	Cunetas.....	104
5.6.2	Canal en cuenca 2	105
5.6.4.	Conclusión de las alternativas.....	106
5.6.5.	Otro conjunto de alternativas	106
5.7.	Ángulos de talud	111
5.7.1.	Diseño de talud general	112
5.8.	Canal transversal recolector.....	114
5.9.	Erosión sobre las caras de los taludes.....	117
5.10.	Medidas de prevención y monitoreo	118
5.10.1.	Taludes	118
5.10.2.	Canales.....	119
CONCLUSIONES.....		121

Clasificación de suelo.....	121
Caracterización geomecánica	122
Análisis del sistema de drenaje	122
Diseño de los taludes	123
Medidas de control de agua	123
Medidas de prevención y monitoreo.....	124
RECOMENDACIONES.....	124
REFERENCIAS	125
ANEXO I: ENSAYOS DE LABORATORIO	131
Gravedad específica	131
Granulometría por hidrometría	132
Límites de Atterberg.....	133
Resultados de ensayo de corte directo para arcillas CL-S.....	135
Resultados ensayo de corte directo sobre arenas bien gradadas.....	137
ANEXO II: ESTUDIO HIDROLOGICO.....	139
Verificación de datos dudosos de precipitaciones a diferentes intervalos en la estación Sanare.	140
Datos de precipitación para elaboración de curvas IDF, estación Sanare, edo Lara	145
Curvas de regresión lineal para IDF.....	148
Extensión de curvas IDF	150
ANEXO III: DISEÑO HIDRAULICO	153
Gráficas método del esfuerzo tangencial permisible	153
Secciones de canales. Datos de entrada método del esfuerzo tangencial permisible ...	154
ANEXO IV MAPAS: ESTAN REFERENCIADOS A SIRGAS REGVEN N19	159

Índice de Figuras

Figura 1.	Ubicación de El Yeso estado Lara	7
Figura 2.	Localización de El Yeso sobre el mapa de Circulación Atmosférica y Tipos de Clima de Venezuela	8
Figura 3.	Tipo de suelo en el Sector	9
Figura 4.	Hidrogeología de la zona de estudio.....	10
Figura 5.	Columna esquematizada que muestra la secuencia sedimentaria que aflora en la estación M1	14
Figura 6.	Muestras litológicas del sector “El Yeso”	15
Figura 7.	Unidades Topográficas Definidas en la Cuenca de Yay.	16
Figura 8.	Mapa estructural de la cuenca de Yay en donde se indican distintas evidencias geomorfológicas presentes	18
Figura 9.	Corte topográfico transversal de la cuenca de Yay.....	19
Figura 10.	Mapa de ubicación de la Estación M14.....	20
Figura 11.	Estación M14: Falla medida en campo y su representación en la red de Schmidt, hemisferio inferior.....	21
Figura 12.	Disposición secuencial de las gargantas de agua, wg (en azul), los escarpes de falla (en verde) y los drenajes desviados (en naranja). Sector Curigua, zona sur de la cuenca de Yay	22
Figura 13.	Clasificación del suelo por tamaño de grano.....	24
Figura 14.	Deslizamiento plano vs deslizamiento circular	27
Figura 15.	Partes de un banco	41
Figura 16.	Fuerzas actuando sobre una superficie de rotura en un talud	42
Figura 17.	Análisis de estabilidad de taludes por el método de Bishop.	43
Figura 18.	Diagrama del factor f_0 utilizado en el método de Janbú	44

Figura 19.	Elementos geométricos de un canal.....	46
Figura 20.	Elementos geométricos de las secciones más comunes.....	47
Figura 21.	Esfuerzo crítico para material cohesivo.....	50
Figura 22.	Perfiles de Flujo.....	52
Figura 23.	Plan de trabajo general.....	56
Figura 24.	Esquema de trabajo para estudio de suelos.....	59
Figura 25.	Esquema de trabajo para análisis hidrológico.....	59
Figura 26.	Esquema de trabajo de diseño de taludes.....	60
Figura 27.	Esquema de trabajo de diseño hidráulico.....	60
Figura 28.	Distribución granulométrica gruesa SR.....	64
Figura 29.	Distribución granulométrica fina SR.....	65
Figura 30.	Sistema de Clasificación Unificada de Suelos para arena.....	66
Figura 31.	Distribución granulométrica fina de arcilla arenosa CL.....	67
Figura 32.	Distribución granulométrica gruesa arcilla arenosa CL-S.....	68
Figura 33.	Sistema de Clasificación Unificada de Suelos, grano fino.....	69
Figura 34.	Distribución granulométrica SB.....	70
Figura 35.	Límite líquido vs Índice de Plasticidad.....	70
Figura 36.	Diagrama de flujo para clasificación de grano fino del SUCS.....	71
Figura 37.	Grados de actividad eléctrica de la arcilla.....	73
Figura 38.	Acceso al frente de explotación Balgres.....	74
Figura 39.	Frente de explotación, vista panorámica Distribución litológica.....	74
Figura 40.	Zona Sur del Sector.....	76
Figura 41.	Zona Central.....	77
Figura 42.	Falla inversa en el sector. La brújula y los lentes apuntan hacia el norte...	78
Figura 43.	Zona Norte.....	78

Figura 44.	Cuencas hidrográficas en El Yeso	80
Figura 45.	Dato fuera de la serie de 15 minutos año 1974, estación Sanare.....	82
Figura 46.	Curva de Intensidad-Duración-Frecuencia $T_r= 25$ años.....	84
Figura 47.	Curvas IDF de Sanare, en minutos	85
Figura 49.	Precipitaciones máximas diarias Sanare	86
Figura 50.	Frente abandonado. (Google, 2024).....	88
Figura 51.	Mapa topográfico de “El Yeso”.....	97
Figura 52.	Hietograma de diseño de cuenca 2.....	99
Figura 53.	Hietograma de diseño 1 hora cuenca 1.	99
Figura 54.	Hidrograma de crecidas cuenca 2.....	101
Figura 55.	Hidrograma de crecidas optimizado cuenca 2	101
Figura 56.	Hidrograma de crecidas natural para cuenca 1.....	102
Figura 57.	Hidrograma de crecida cuenca 1 modificada	102
Figura 57.	Hidrograma de crecidas para cuenca 1 (conjuntas).....	103
Figura 59.	Representación de colocación de tubo entre bancos y vía.	105
Figura 60.	Cuenca 1 ampliada.	107
Figura 61.	Hidrograma de Crecidas Cuenca 1, actualizado.....	107
Figura 62.	Modelo de canal triangular.....	108
Figura 63.	Curva de diseño de taludes en banco, arcilla amarilla.....	112
Figura 64.	Curva de diseño de taludes en banco, arena.....	112
Figura 65.	Configuración de talud final.....	113
Figura 66.	Estabilidad del talud final.....	114
Figura 67.	Capas de hierba apoyadas en trinchos o fajinas.....	118

Índice de Tablas

Tabla 1.	Coordenadas del área cartográfica El Yeso	7
Tabla 2.	Datos hidrogeológicos del Sector del mapa a escala 1:2.500.000	10
Tabla 3.	Datos de la falla medida en la Estación M14.....	21
Tabla 4.	Estados y límites de consistencia de Atterberg	25
Tabla 5.	Valores de las variables de la distribución de Gumbel	33
Tabla 6.	Coeficiente K de distribución Log Pearson tipo III	34
Tabla 7.	Variable reducida de Gumbel a partir de diferentes periodos de retorno.	35
Tabla 8.	Valores y fórmulas para el valor crítico de la prueba de bondad Kolmogonov-Smirnov	36
Tabla 9.	Coordenadas de muestreo.	62
Tabla 10.	Propiedades mecánicas de deslizamiento y permeabilidad de los suelos.	72
Tabla 11.	Índice de activación de las arcillas	72
Tabla 12.	Valores típicos del índice de activación	72
Tabla 13.	Parámetros geomorfológicos de la cuenca 1.....	81
Tabla 14.	Parámetros geomorfológicos de la cuenca 2.....	81
Tabla 15.	Estaciones meteorológicas empleadas	82
Tabla 16.	Resultados de la prueba de bondad Kolmogonov-Smirnov.....	83
Tabla 17.	Parámetros de la ecuación analítica para la extensión de curvas IDF ...	84
Tabla 19.	Matriz de selección de factor de seguridad	91
Tabla 20.	Resultados de estudio de estabilidad en taludes de arcilla arenosa CL-S	92
Tabla 21.	Resultados de estudio de estabilidad en taludes de arena bien gradada con gravas SW- G	93

Tabla 22.	Comparativa de las configuraciones de taludes en arena.....	95
Tabla 23.	Comparativa de las configuraciones de taludes en arcilla.	96
Tabla 24.	Probabilidad de ocurrencia (J) en fracción.....	98
Tabla 25.	Alternativas posibles de canales.	104
Tabla 26.	Canales triangulares sobre arcilla amarilla	108
Tabla 27.	Canales triangulares sobre arena	109
Tabla 28.	Disposición de los bancos, pendiente 3%.....	110
Tabla 29.	Disposición de los bancos, pendiente variable.....	111
Tabla 30.	Volumen de corte y relleno para cada banco.	113
Tabla 31.	Secciones del canal transversal, cuenca 1 + anexo.....	115
Tabla 32.	Condiciones Hidráulicas del canal transversal.	115
Tabla 33.	Análisis longitudinal de canal sobre ladera, resultados.....	116
Tabla 34.	Alturas de salto hidráulico.	117

INTRODUCCIÓN

La estabilidad de taludes es susceptible a los cambios climáticos, pues, están en capacidad de disminuir la resistencia y en consecuencia aumentan la probabilidad de que fallen; pudiendo paralizar las operaciones y aumentar la dilución en el yacimiento. Por este motivo, siempre están bajo constante monitoreo.

Por su parte, la cantera Curigua ha desarrollado cárcavamiento profundo por la erosión del agua al escurrir sobre los taludes, durante este proceso se produce un material que cae sobre el yacimiento y contamina a la arcilla de interés.

Con esto en consideración, es menester desarrollar un plan de estabilización de los bancos del sector, el cual considere la restructuración del drenaje con el fin de evitar la contaminación del recurso.

Para ello, se plantea un estudio de dos (2) fases. En la primera, se realizará el reconocimiento de campo, los ensayos de clasificación del suelo para conocer su comportamiento mecánico e hidráulico, así como el análisis del sistema hidrológico. Luego en la segunda, se diseñarán los taludes, obras hidráulicas y se seleccionarán sus medidas de monitoreo.

Por lo anterior, el trabajo se divide en cinco (5) partes, ante todo se detalla el problema en cuestión y se plantea la ruta a seguir. En el segundo capítulo se describen detalladamente los elementos ambientales y geológicos icónicos de la zona de estudio, de manera que se contextualice el medio. Luego, en el tres, se presenta la teoría necesaria para el desarrollo del proyecto. En el capítulo 4, la metodología muestra una esquematización detallada y consecuente del desarrollo del proyecto. En el quinto, los resultados obtenidos de la investigación son discutidos; y, en el sexto, se describen las conclusiones y recomendaciones que deben seguirse para solventar la situación.

CAPITULO 1. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACION

1.1. Planteamiento del Problema

La minería tiene el objetivo de conseguir el mayor provecho de la mena/útil que extrae, provecho que se amplifica por la pureza del yacimiento, pues, ésta asegura la composición química necesaria para la producción de un bien. La arcilla de la cantera se destina a la fabricación de cerámica y otros tipos de objetos parecidos, que sólo pueden producirse bajo una composición química definida; la química se diluye cuando se mezcla con otros materiales, parecido a lo ocurrido en las mezclas de líquido, por ejemplo: el gusto salado de un líquido se disminuye agregándole agua. En la situación actual del frente de explotación, la composición química se ve comprometida porque se mezcla con los suelos estériles, lo cual reduce el contenido de los elementos en la arcilla.

En el sector El Yeso los taludes del frente contienen hendiduras sobre las caras inclinadas (cárcavas), dentro de éstas existe material arrastrado y desprendido en su base; además, no sólo existe carcavamiento, sino también, un cauce que al igual que las cárcavas dirigen material sobre las arcillas blancas, todos los suelos se mezclan y contaminan el recurso.

El sistema de drenaje produjo esta realidad, en primer lugar, la pendiente del terreno dirige toda el agua hacía los taludes, la cual causa una erosión constante del suelo. Lo anterior no sólo hace que se contamine el recurso, también debilita los taludes; por un suelo en un estado duro y compacto lo convierte en otro blando y disgregado.

Para resolver la situación es imperante reconfigurar todo el sistema de drenaje superficial, pues, es quien genera todo el problema de inestabilidad y contaminación, por lo tanto, se propone elaborar un plan de estabilización del sector donde se reconfigure todo el sistema de drenaje y se reperfilen los taludes con el fin de evitar la contaminación del recurso.

1.2. Objetivos de la Investigación

1.2.1. Objetivo General

- Elaborar el plan de estabilización de taludes operativos en el frente de trabajo del sector El Yeso que evite la contaminación del recurso.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Clasificar el suelo y las arcillas bajo el Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS) para el reconocimiento de sus propiedades mecánicas e hidráulicas.
- Caracterizar geomecánicamente las arcillas y suelos para la verificación de los posibles tipos de fallas.
- Analizar el sistema natural de drenaje superficial de la cantera para la estimación de los caudales de diseño.
- Diseñar las medidas de control de aguas para la estabilización de los taludes y evitar de formación de cárcavas.
- Reperfilear los taludes del frente de explotación para evitar la contaminación del recurso y asegurar el afloramiento de la capa de arcilla
- Establecer las medidas de prevención y monitoreo de las obras de agua y estabilidad de los taludes.

1.3. Justificación de la Investigación

Independientemente de la fase del proyecto, la estabilidad de taludes es un área monitoreada, porque siempre existe la probabilidad de que fallen, debido a factores incontrolables e impredecibles, de entre los cuales podemos citar, el clima que es el principal causante de la pérdida de las capacidades portantes.

Por supuesto, esto es necesario controlarlo de alguna manera, y por esto entra en juego la elaboración de este proyecto, porque les brindaría los medios necesarios para subsanar los movimientos de tierra, la formación de cárcavas y los hundimientos, y al mismo tiempo se controle su generación en el futuro.

1.4. Abreviaturas y símbolos

Udepts	son aquellos Inceptisoles que tienen un régimen de humedad udic o perudic. En las zonas donde el régimen del suelo es perudic muchos de los suelos se forman sobre viejos depósitos. Muchos de estos suelos tenían o tienen vegetación forestal, pero algunos soportan arbustos o plantas herbáceas.
mm	milímetro
°C	Grado centígrado
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación del Suelo
Yn	Altura normal de un canal
Yc	Altura crítica de un canal
Vc	Velocidad de flujo a la altura crítica
M	metro
Km	kilometro

CAPITULO 2. GENERALIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1. Ubicación

El sector El Yeso (en adelante Sector) de la cantera Curigua (en adelante Cantera) se localiza al noroeste del poblado Sanare, estado Lara ([figura 1](#)). Está delimitado por el polígono de coordenadas siguientes ver [tabla 1](#):

Tabla 1. Coordenadas del área cartográfica El Yeso

AREA CARTOGRAFICA EL YESO		
Punto	NORTE	ESTE
1	1080075	424459
2	1079756	424076
3	1079509	424131
4	1079726	424555

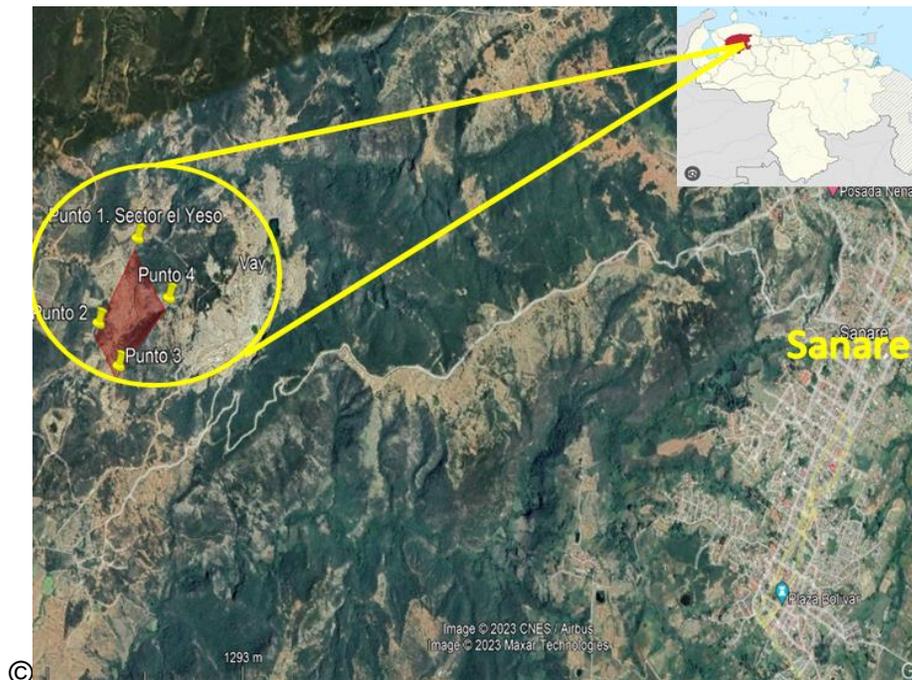


Figura 1. Ubicación de El Yeso estado Lara (Google, 2024)

2.2. Clima

De acuerdo al mapa de Circulación Atmosférica y Tipos de Clima, el clima corresponde al de las regiones por encima de mil metros (1000m), de la cordillera de la costa- Cordillera de la Costa Oriental; en el mes más frío la temperatura es menor a 18 °C y mayor a -3 °C, en el más cálido, mayor a los 10 °C ([figura 2](#)).

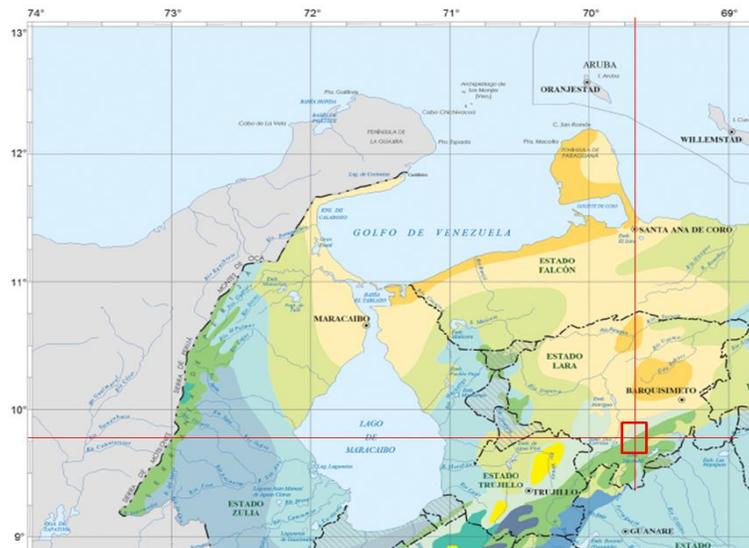


Figura 2. Localización de El Yeso sobre el mapa de Circulación Atmosférica y Tipos de Clima de Venezuela (Fundación Empresas Polar, 2005)

2.3. Precipitación

La data de precipitación es medida por una institución en cada nación. En Venezuela, el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, tiene esta responsabilidad; indicando para el estado Lara, durante el periodo 1986-2015 una precipitación anual de 842.3 mm; un máximo de 113,5 mm en el mes de octubre y el mínimo, en enero con 16,4 mm.

2.4. Tipo de suelo

Según el Instituto Cartográfico de Venezuela Simón Bolívar, el suelo se mantiene húmedo por más de nueve (9) meses al año ([figura 3](#)).

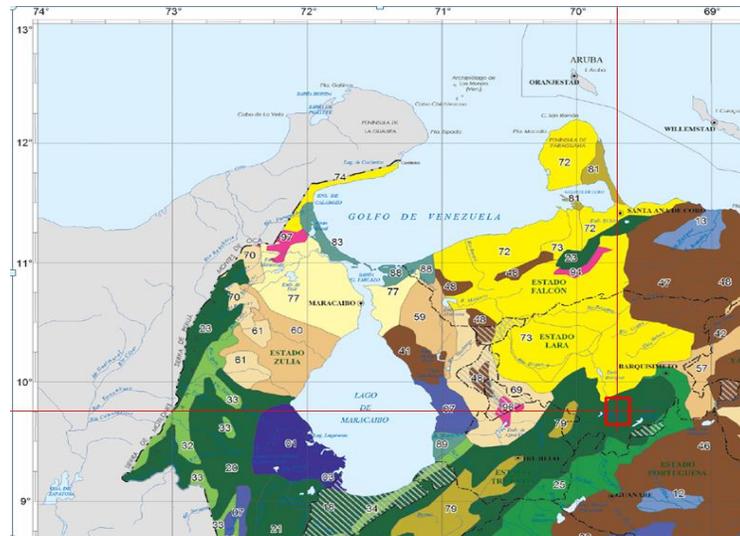


Figura 3. Tipo de suelo en el Sector. (Fundación Empresas Polar, 2005). El suelo detonado en verde oscuro corresponde al tipo de suelo [Udepts](#)

2.5. Hidrogeología

Está gobernada por dos materiales distintos, que pueden dilucidarse en la [figura 4](#). La de color verde con ladrillos corresponde a unas areniscas puras; y, otras con lutitas, y conglomerados, por otra parte, el de color azul claro corresponde: aluviones, arenas gravas y residual.

Está gobernada por dos litologías. El área del mapa cubierta por ladrillos de color verde corresponde a calizas y areniscas con lutitas y pizarras; mientras que, en la zona de color azul imperan aluviones y arenas. Existen mezclas de diversos materiales, para este punto, se desconocen, por lo cual la permeabilidad y la porosidad no serán exactamente como las tabuladas.

Tabla 2. Datos hidrogeológicos del Sector del mapa a escala 1:2.500.000

Material	Porosidad (%)	Porosidad eficaz (%)
Suelo	55	40
Arcilla	50	2
Arena	25	22
Grava	20	19
Caliza	20	18
Arenisca (semiconsolidada)	11	6

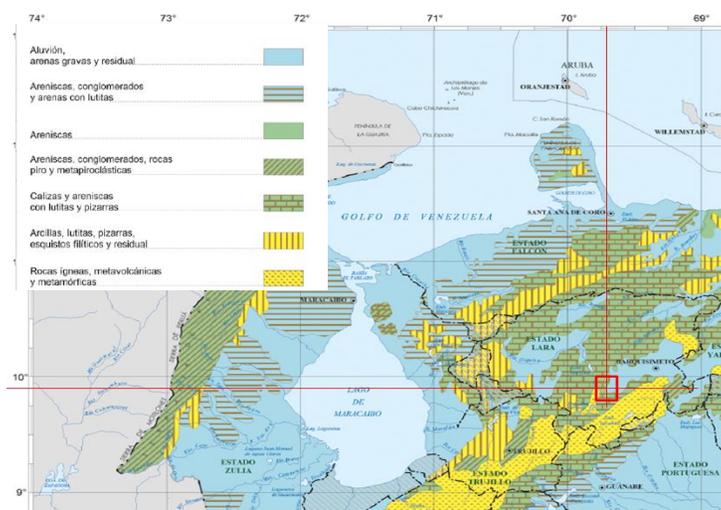


Figura 4. Hidrogeología de la zona de estudio. (Fundación Empresas Polar, 2005).

2.6. Marco geológico

2.6.1. Geología Regional

Trabajos previos

(Evanoff, Zozaya, Fernández, & Alcántara, 1957) realizaron un estudio acerca de las arcillas blancas en el estado Lara, entre las cuales se encuentran aquellas ubicadas entre las poblaciones de Quíbor y Sanare.

(Von der Osten & Zozaya, 1957) en su levantamiento geológico al suroeste del estado Lara comprueban la existencia de fallas en la región de Quíbor que cortan tanto sedimentos cuaternarios como antiguos, controlando el flujo de aguas en ese sector. Además, reconocen la existencia de pequeños depósitos cuaternarios probablemente de origen lacustre, en las cercanías de Yay y San José. Por último, reconocen al norte de la “Falla de Sanare” (que consideraron no activa) numerosas fallas más pequeñas

(orientadas N30°W y consideradas activas) que cortan casi transversalmente a la falla principal y a los pliegues (produciendo pliegues de arrastre en el terreno) tanto al norte como al sur de ésta, evidencia del desplazamiento horizontal (relativamente pequeño) y vertical.

(Jefferson, 1964) aclaró las relaciones estratigráficas de una serie de sedimentos post-eoceno ubicados entre Quíbor y Sanare, los cuales fueron incluidos por varios autores en la Formación Morán o Trujillo; considera que dichos sedimentos corresponden a la Formación El Pegón y los asigna al Mioceno y Plioceno.

(Bushman, 1965) realiza un estudio de la geología del área de Barquisimeto, en él señala que los llanos y abanicos aluviales disectados que se encuentran en las vecindades de esa población son evidencias de levantamiento análogas a las terrazas aluviales que se encuentran en los cercanos Andes Venezolanos.

(Giraldo, 1985) realiza un estudio microtectónico en rocas de la Formación El Pegón en la zona de Yay, definiendo dos regímenes tectónicos superpuestos: el primero de edad probable Mio-Plioceno distensivo y el segundo Plio-Cuaternario- Actual compresivo, en donde la dirección regional del esfuerzo horizontal máximo actuante (σ_1) que es noroeste-sureste y cercanamente este-oeste en proximidad de la falla de Boconó.

Estratigrafía regional

Las cuencas de El Tocuyo, Quíbor y Yay, se ubican en la zona noroccidental de Venezuela, en el estado Lara. Están conformadas por depósitos aluviales (Recientes) y rocas sedimentarias (poco consolidadas y consolidadas) pertenecientes a los períodos Cretácico y Terciario. (Álvarez, 2006)

Las unidades litoestratigráficas estudiadas en este trabajo son aquellas cuyas edades se comprenden entre el Mioceno hasta el Holoceno. En la zona de estudio, la unidad que se encuentra dentro de este rango temporal es la Formación El Pegón, de edad estimada Mio-Plioceno. (Álvarez, 2006)

2.6.2. Geología Local

El área de estudio se encuentra en el límite norte de los Andes Merideños, en las últimas estribaciones de dicha cordillera. Consisten en llanuras intramontañas, las cuales constituyen las primeras manifestaciones de las llamadas tierras bajas de Lara, quienes

separan geográficamente los Andes venezolanos de la Cordillera de la Costa ubicada más al noreste. Debido al cambio abrupto de pendiente que existe en el sector, la zona presenta una serie de características geomorfológicas propias de este tipo de relieve.

Formación geológica de la zona de estudio: Formación El Pegón

Localidad tipo

La localidad tipo aflora a lo largo de la Quebrada El Pegón, en el flanco oeste del cerro Alto, al noreste de Yaritagua, distrito Yaritagua, estado Yaracuy.

Extensión geográfica

(Evanoff , Bushman, & Araujo, Bloques de rocas antiguas incrustados en sedimentos del terciario inferior en la cuenca de Lara, 1959) describen la formación entre las quebradas Grande y El Pegón, al norte de Yaritagua, entre esta población y Barquisimeto. (Bushman, 1965) al sur de La Piedad, describe un afloramiento con gravas similares entre la carretera de Acarigua y la quebrada Seca, así mismo, cerca de la quebrada Baramis, entre La Piedad y el afloramiento antes dicho. (Jefferson, 1964) la describe entre Quíbor y Sanare, en donde abarca una franja de unos 13 km de largo, en sentido SO-NE, por 3 de ancho, (Campos, Guedez, & Osuna, 1977), (Campos, V, & Osuna, Geología de la Serranía de Portuguesa, 1979),, la describen en la carretera Sanare-Cabudare, consideran además que la formación se extiende desde el área de Ospino hasta la carretera Acarigua-Barquisimeto. STEPHAN (1977; 1982) expone que al este de El Tocuyo y al sur de Quíbor, la Formación El Pegón o Guamacire de está limitada al semi-graben Yay-El Yeso.

Contactos

En la localidad tipo, la formación yace en discordancia angular sobre las rocas metamórficas de las formaciones Mamey y Aroa. (Jefferson, 1964) aclara que en la región Quíbor-Sanare, yace discordantemente sobre la Formación Trujillo (Formación Morán). (Campos, V, & Osuna, Geología de la Serranía de Portuguesa, 1979) señala que en la región Sanare-Cabudare, suprayace en contacto discordante a la Formación Mamey, e infrayace en contacto discordante con terrazas aluviales.

Descripción litológica

BUSHMAN (*op. cit.*) indica que la formación está compuesta por gravas pobremente consolidadas y mal escogidas, con cantos de fragmentos de cuarzo, esquistos cuarzo-sericíticos y calizas. Presentan cierta estratificación, y al meteorizar toman un aspecto amarillo a anaranjado. Junto a las gravas se presentan bolsillos de arena amarilla. El endurecimiento de las gravas se debe a cemento calcáreo. En el área Quíbor-Sanare, JEFFERSON (*op. cit.*) indica que la Formación El Pegón consiste de gravas de color blanco, marrón y marrón amarillento, con peñones y guijarros de cuarzo blanco, ftanita y arenisca, las cuales se presentan en capas gruesas o lenticulares. Interestratificadas con las gravas, se observan capas gruesas y lentes de arenas arcillosas, friables, de color blanco a marrón claro y arcillas de color gris claro a gris azulado, con tintes de marrón. En la zona de la mina Curigua, se encuentran capas lenticulares de carbón. Al noroeste de Acarigua, la formación se compone de gravas, limolitas y lutitas varicoloreadas, con ocasionales margas gris azulosas. Además de los lignitos, STEPHAN (1982) menciona lentes delgados de yeso. Según JEFFERSON (*op. cit.*), los sedimentos de la Formación El Pegón representan una molasa post-orogénica. La presencia de lignitos y arcillas, sugiere un ambiente paludal asociado con episodios de sedimentación torrencial, evidenciados por los conglomerados y gravas. (Alvárez, *op cit*) describe intercalaciones de areniscas, conglomerados, lodolitas, limolitas y arcillas, puede verse en la [figura 5](#)

Posesión Curigua

(Evanoff, Zozaya, Fernández, & Alcántara, 1957) describen unas arcillas blancas de color gris claro a blanco, el cuerpo tendría dimensiones de 1300 m X (3-100 m) y un espesor de esta 50 m como máximo.

Esp (m)	Litología Gráfica	Litología Descriptiva
20*		Arenisca Limosa
20*		Intercalación de limolita gris y limolita amarilla
5		Limolita
2		Limolita Arenosa
4		Arenisca Limosa
2		Arcilita
5		Limolita Arenosa
8		Arcilita Limosa intercalado con Lodolita
10		Arenisca Limosa
		Conglom. Arenoso
		Arenisca Limosa

Figura 5. Columna esquematizada que muestra la secuencia sedimentaria que aflora en la estación M1. (Álvarez, 2006)

Descripción actual

En el frente de explotación se identificaron unas arenas de color marrón rojizo, cuando pierden están secas poseen un color marrón opaco, los granos son subangulares, achatados y elongados con presencia de algunos granos de tamaño canto, estos recubren unos esquistos cuarcíticos. Se avistarón unas arcillas de color gris claro a blanco, estas se encuentran en forma roca con una resistencia muy alta, cuando seca, se siente como talco al tacto, sin embargo, al mojarse es pegostosa y es fácilmente deformable; no tienen algún otro tipo de material embebido. Existe otro tipo de arcilla con un color amarillo claro, que generalmente, se la encuentra en forma de terrones, a diferencia de las anteriores, ésta si esta mezclada con otros suelos: por una parte con las arcillas blancas, y por otra con arena, algunas gravas y peñones; a la vista, no se reconocen mucho estos granos por el recubrimiento de la arcilla, pero al desmoronar los peñones resaltan a la vista. En múltiples secciones del frente de explotación del sector El Yeso, se intercalan las arcillas blancas dentro de las amarillas.



Arcillas del frente de explotación “El Yeso”



Arcilla blanca seca



Arcilla blanca mojada



Arena marrón, marrón/rojiso



Terrones de arcilla amarilla

Figura 6. Muestras litológicas del sector “El Yeso”

Zona de Yay

El mapa topográfico que cubre el área es el 6245-II-NO SANARE

La depresión de Yay se encuentra limitada al sureste por Loma Curigua, al este por las elevaciones en las que se encuentra la carretera Quíbor-Sanare, al sur por la quebrada Sanare (la cual se encuentra en un valle encajado, dándole a la unidad un aspecto amesetado en esta zona) y al oeste por las elevaciones que van desde Cerro La Sabana al sur hasta Cerro La Cabrera al norte. La zona es una franja estrecha de 3 km de ancho por 9 km de largo con una orientación aproximada N45°E (figura 6).

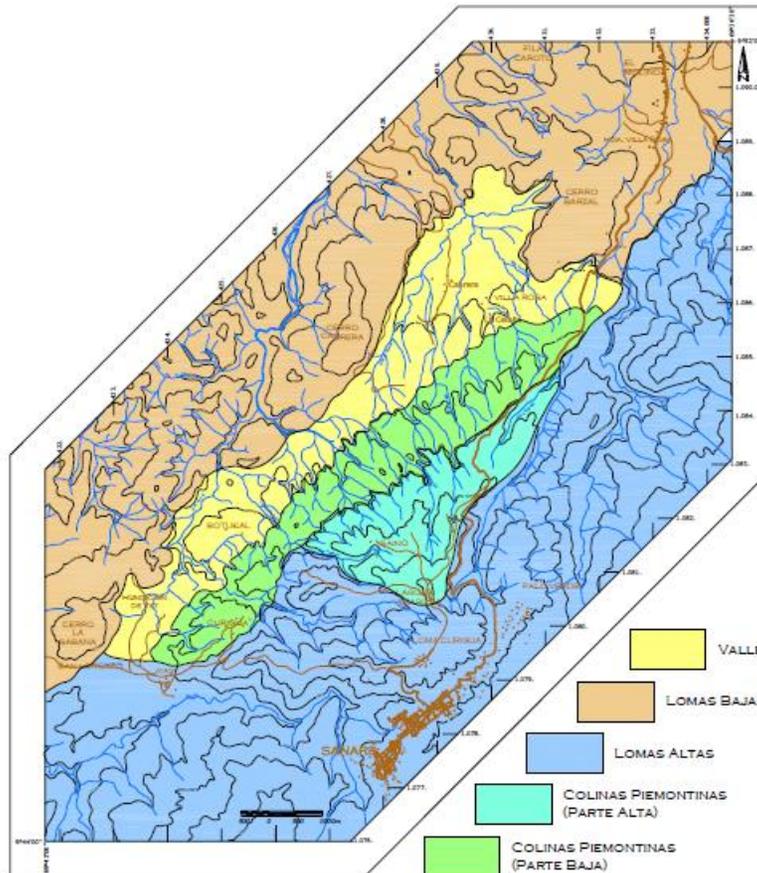


Figura 7. Unidades Topográficas Definidas en la Cuenca de Yay. (Álvarez, 2006)

A pesar de que posee dos microcuencas de drenaje, una al sur cuyo drenaje principal es la quebrada Botucal y otra al norte con la quebrada El Mamón, todo forma parte de una zona deprimida en medio de elevaciones con desniveles topográficos de hasta 400 m, por lo que pudiera asumirse como una única depresión.

Está constituida, de este a oeste, por 4 unidades topográficas: (a) lomas altas; (b) colinas piemontinas; (c) valles regulares y (d) lomas bajas.

Colinas piemontinas

Presenta desniveles topográficos de hasta 60 metros, constituyen las zonas elevadas en donde se encuentra la vía Quíbor-Sanare hasta la altura de Laguna Amarilla, además de un área de “transición” entre las zonas altas al sureste y el valle de Yay propiamente dicho. El drenaje se entalla con pendientes intermedias a elevadas, tal como en la quebrada Curigua, incrementándose hacia el noroeste, en donde la incisión en los valles es tan pronunciada que le da un cierto aspecto “amesetado” a la topografía. Los cursos de drenaje siguen un patrón cercanamente paralelo, con orientaciones preferenciales sureste-noroeste; son relativamente numerosos, pero al correr al noroeste se unen en su mayoría disminuyendo considerablemente la densidad del drenaje en la subunidad adyacente hacia esta zona. La litología es poco competente, lo cual se evidencia en la profusa formación de cárcavas, estando la manifestación más fuerte de ello justo al ENE de Curigua tal como puede observarse en la figura, en donde la intensa acción erosiva ha producido un valle estrecho de laderas empinadas y desprovistas de vegetación. En otros sectores del área de estudio, los procesos erosivos han originado procesos de tubificación, tanto verticales como horizontales, tal como el mostrado en la figura. Predominan los colores claros, los cuales se observan en las laderas sometidas a la intensa erosión.

Hacia el extremo sur de la subunidad, en la ladera norte de la quebrada Sanare, la litología cambia de coloración, sin embargo, la competencia es similar. Más hacia el norte la topografía tiene crestas más agudas, aunque se conforma de una serie de elevaciones bajas con drenajes muy entallados; la vegetación es escasa, por lo que la zona es sometida a un fuerte proceso de erosión y de formación de cárcavas, dejando expuesta una litología muy clara

Evidencias geomorfológicas de fallamiento activo

Para definir las evidencias geomorfológicas de fallamiento activo de la cuenca de Yay, se requirió de la interpretación de imágenes satelitales y mapas topográficos.

Algunas de estas evidencias pueden definirse por medio de la observación de la cuenca a escala regional, en donde se toman en cuenta datos obtenidos a partir de la visualización a grandes rasgos de la misma, en una visión de conjunto; mientras que otras evidencias se definen estudiando la cuenca más a detalle, a escala local, en donde

se realizan observaciones puntuales de una zona o área en particular dentro de la misma. En la figura pueden observarse las distintas evidencias geomorfológicas de fallamiento activo presentes en la cuenca de Yay.

Evidencias observadas a escala regional

- La forma alargada de la depresión y la distribución de las rocas sedimentarias de la Formación El Pegón que rellenan la misma, sugieren un control estructural. Además, la orientación N45°E sugiere una vinculación con la cercana falla de Boconó.

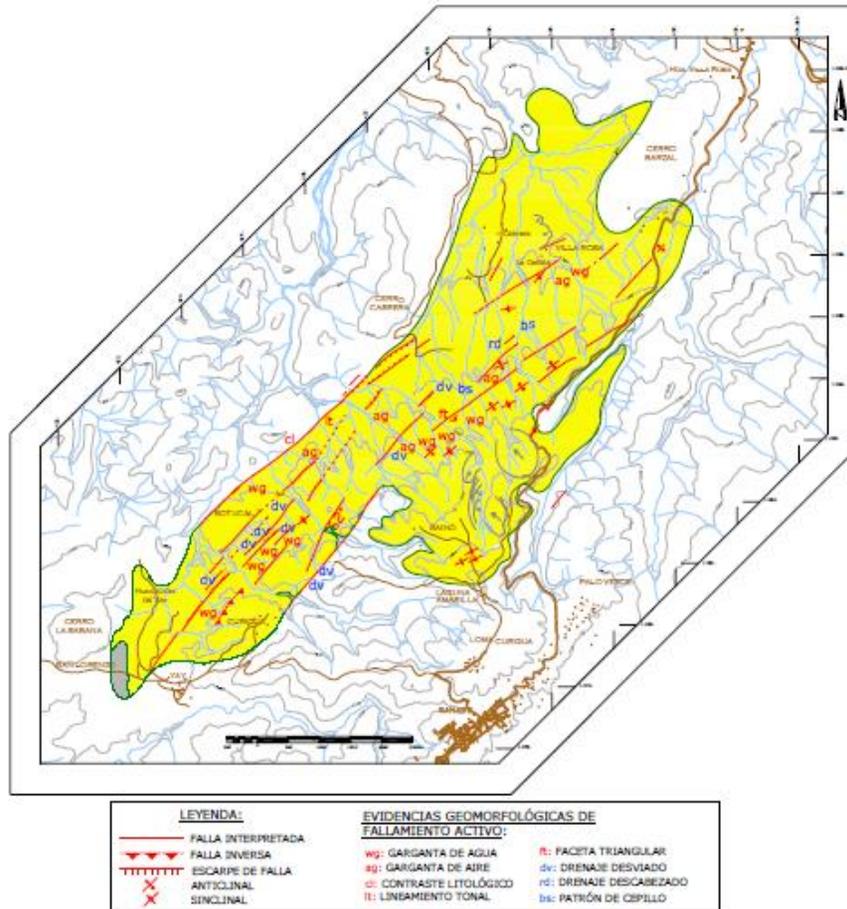


Figura 8. Mapa estructural de la cuenca de Yay en donde se indican distintas evidencias geomorfológicas presentes. (Álvarez, 2006)

Se observa una variación abrupta del ancho de la depresión a la altura del caserío de Sainó, siendo el lado sur más estrecho y abrupto, y el lado norte más ancho y de menores pendientes. La variación casi coincide con el límite entre las dos cuencas hidrográficas ya mencionadas.

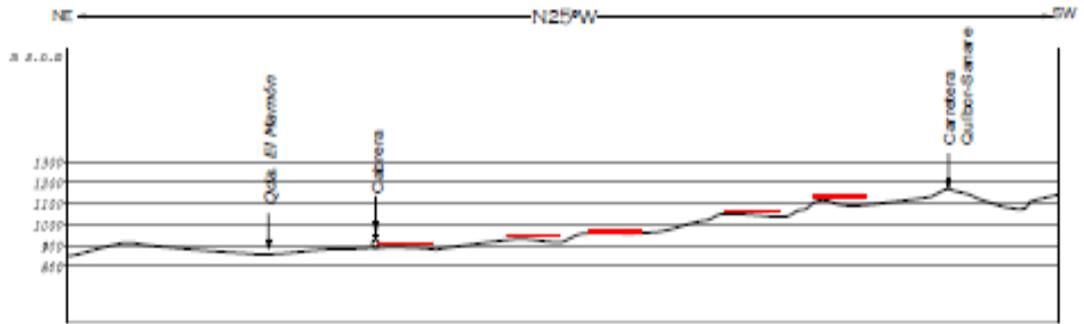


Figura 9. Corte topográfico transversal de la cuenca de Yay. Nótese los niveles escalonados que disminuyen de cota de suroeste a noreste. (Álvarez, 2006)

Evidencias observadas a escala local

- En el sector sur de la cuenca, entre Curigua y Sainó, se observan diversas evidencias locales, tanto de anomalías de drenaje como otras evidencias. Se identificaron al menos cinco drenajes desviados (dv), todos con desplazamiento dextral a lo largo de una tendencia N45°E. Se observan al menos cinco gargantas de agua (wg, water gap) formadas por quebradas que corren desde el sureste hacia el noroeste. Se tienen seis escarpes de falla alineados N45°E aproximadamente, cuatro de ellos expuestos al norte y ubicados en posición axial del valle en este sector, otro un poco más al norte y expuesto al sur, y el último se ubica en el límite norte de la cuenca en esta sección, expuesto también al sur. Por último, el límite noroeste se conforma por un lineamiento y un contraste tonal, lo que sugiere un contacto de falla para los sedimentos de la Formación El Pegón y el basamento pre-Mioceno en este sector.
- En el sector al norte del caserío de Sainó la densidad de evidencias es menor, ya que el área es mucho mayor que en el sector sur y además está menos deformada. Pueden verse cinco escarpes de falla cerca del límite norte a la altura de las quebradas Botucal y Los Naranjos, estos escarpes presentan orientaciones desde los N40°E a los N55°E, y están expuestos al norte y sur alternativamente. Se observan dos drenajes desviados (dv), uno con salto dextral bien marcado y el otro con un salto sinistral de poca longitud. Pueden verse además por lo menos cuatro gargantas de aire (ag) y cuatro gargantas de agua (wg) bien entalladas. A diferencia del sector sur las primeras se orientan paralelo al eje de la cuenca, N45°E aproximadamente, mientras que las segundas se orientan cercanamente perpendicular a esa dirección: N45°W aproximadamente. A excepción del sur de este sector, estos rasgos se encuentran desde el sector central hasta el límite sur

de la cuenca. Adyacente a la quebrada Los Naranjos en su parte media, se observa una faceta triangular expuesta al norte. Se observan dos patrones de cepillo (bs, broom shaped) en el área noreste del sector. En ambos, los cursos de agua se agrupan para continuar su recorrido al noroeste. A excepción del extremo sur, la mayoría de estas evidencias pueden verse desde la zona axial de la cuenca hacia el límite sur. Todos los contactos de este sector son estratigráficos.

- Hacia el extremo noreste de la cuenca, cerca del acceso a la Cantera Villa Rosa, se tiene un conjunto conformado por tres pequeñas quebradas paralelas que corren al noroeste y cuyas cabeceras se encuentran desviadas hacia el suroeste, evidenciándose una posible falla con salto dextral.

Estación mesotectónica M14

Este afloramiento consiste en un corte antrópico que se localiza hacia el extremo sur de la cuenca, a 500 metros del caserío de Curigua y a 1,5 km al nornoreste del poblado de Yay ([Figura 10](#)).

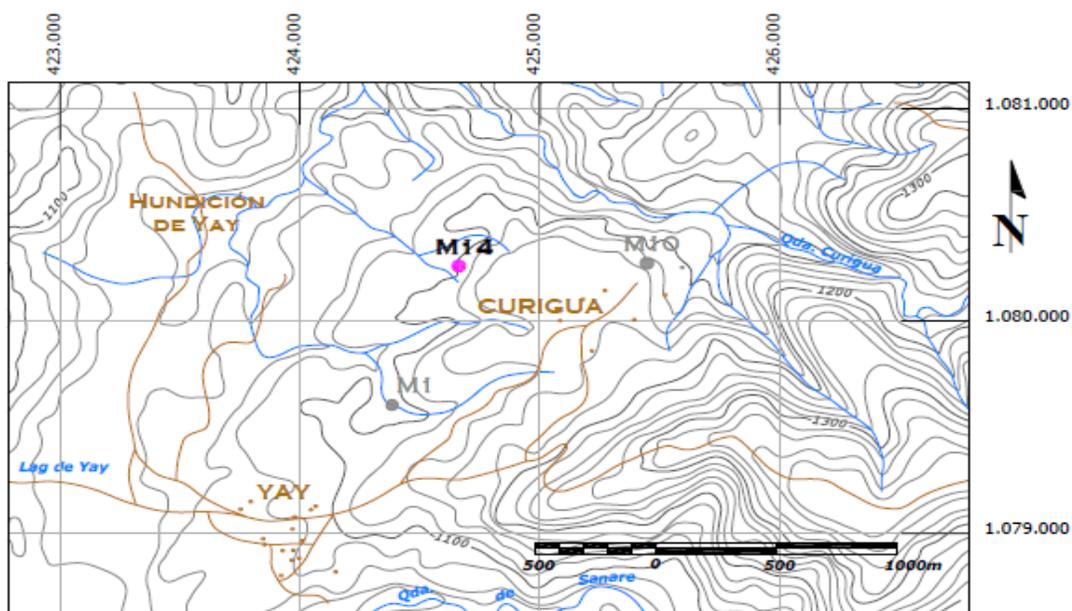


Figura 10. Mapa de ubicación de la Estación M14. (Álvarez, 2006)

En esta estación afloran rocas metamórficas alteradas, sobrecorren una secuencia sedimentaria infrayacente. La primera litología se compone de un esquisto cuarzo micáceo de color marrón con tonos rojizos, mientras que la parte sedimentaria, la constituye una limolita de color fresco gris y color meteorizado amarillo ocre ([Figura 10](#)).

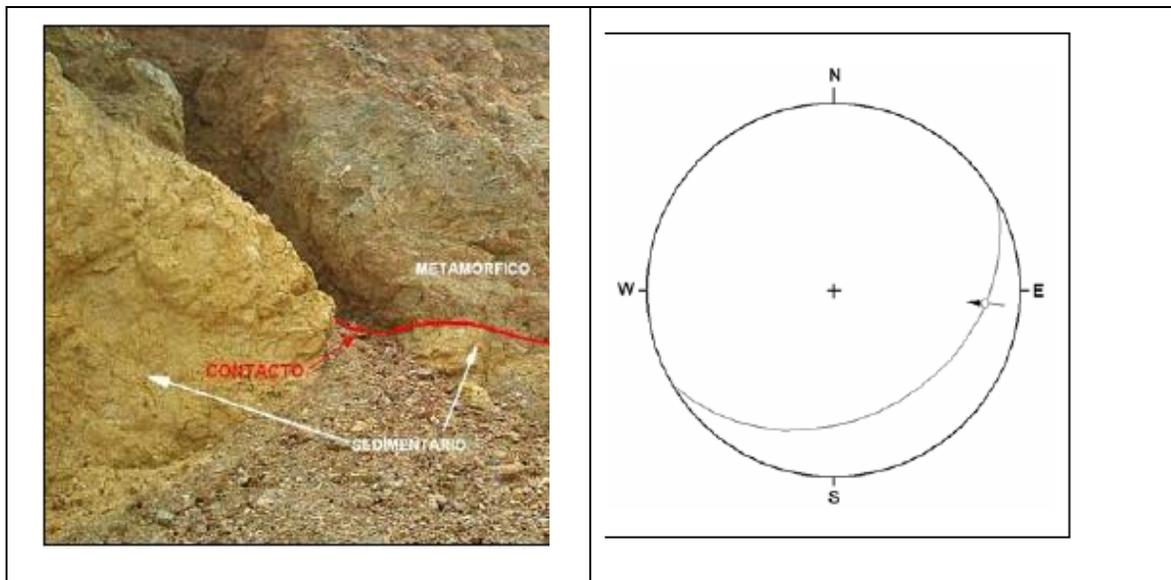


Figura 11. Estación M14: Falla medida en campo y su representación en la red de Schmidt, hemisferio inferior. Se observa el contacto entre las litologías metamórfica y sedimentaria. (Vista de la foto: S80°E) (Álvarez, 2006)

La falla medida corresponde al contacto entre las litologías que conforman el afloramiento. El plano de falla se encontró en buenas condiciones y con estrías bien desarrolladas, cuyo valor de *pitch* es mostrado en la [tabla 3](#) junto con los otros datos estructurales. Por otro lado, en la [figura 11](#) se muestra el afloramiento de la falla y su representación en red estereográfica. La roca metamórfica corresponde al bloque de techo de la falla, mientras la sedimentaria es el bloque de piso.

Tabla 3. Datos de la falla medida en la Estación M14. (Álvarez, 2006)

Falla	Actitud	Pitch	Tipo de falla
F1	N60° E32° S	40°E	Inversa

Evidencias geomorfológicas en la cuenca de Yay

La característica más resaltante de las evidencias geomorfológicas de la cuenca de Yay es que las estructuras a las que se relacionan tienen una orientación preferencial aproximada a los N45°E, paralelas a la orientación de la cuenca, lo que da una muy probable vinculación de la forma y del relleno de sedimentos de la misma con un control estructural. Otro factor a considerar es la densidad de evidencias en el sector de Curigua y en las cercanías de la quebrada Zanjón de Sainó, al sur de la cuenca en donde se ubican en posición axial, mientras que al norte, las evidencias son más frecuentes en las áreas adyacentes a la fila en donde se encuentra la carretera Quíbor-Sanare, hacia el

sureste; además entre ambas se tiene una zona en donde disminuye considerablemente la densidad de información, conformada por la parte baja de la quebrada Botucal y sus afluentes del sur.

En el sector sur las evidencias se encuentran en posición axial con respecto a la cuenca. En el suroeste se observan dos drenajes desviados ubicados al noreste de la quebrada Curigua que definen el contacto metamórfico-sedimentario en ese sector.

En el centro de la cuenca y en posición paralela al contacto se tienen cuatro gargantas de agua (*water gap*, *wg*) orientadas noroeste-sureste, las cuales se interpretan desde un punto de vista genético como gargantas antecedentes. Las mismas están adyacentes a una serie de escarpes de falla orientados perpendicularmente a ellas (noreste-suroeste) expuestos al noroeste. Por último, se observan una serie de drenajes desviados cuyas trayectorias sufren cambios de dirección de hasta 90 °, orientándose paralelos a los escarpes de falla ([Figura 12](#)). (Álvarez, 2006)

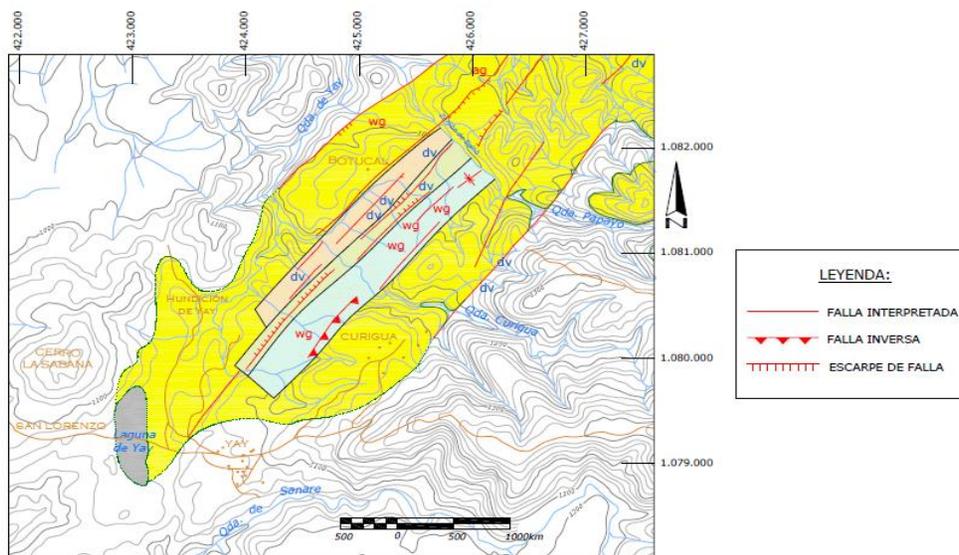


Figura 12. Disposición secuencial de las gargantas de agua, wg (en azul), los escarpes de falla (en verde) y los drenajes desviados (en naranja). Sector Curigua, zona sur de la cuenca de Yay. (Álvarez, 2006)

Las gargantas de agua (*wg*) se forman debido a que los pequeños cursos de agua van erosionando el terreno a medida que éste se va levantando (gargantas de antecedencia), los escarpes de falla se forman por ese levantamiento diferencial de bloques y los drenajes desviados son productos de la interrupción de los cursos de agua por parte de posibles contra escarpes erosionados expuestos al sureste relacionados a fallas normales. (Álvarez, 2006)

CAPITULO 3. MARCO TEÓRICO

3.1. Antecedentes de la Investigación

(Sjöberg, Large Scale Slope Stability in Open Pit Mining- A Review, 1996). En este informe técnico, el autor se enfoca en aumentar el conocimiento respecto a la estabilidad de taludes a gran escala y además desarrollar una metodología para su diseño.

(Sjöberg, Analysis of Large Scale Rock Slopes, 1999). El informe del año 1996 fue una parte de esta tesis doctoral, ya con los conocimientos adquiridos, el autor los aplicó mediante la modelación para evaluar la estabilidad de taludes a gran escala, con el soporte de casos de estudio de otros taludes, análisis de los potenciales mecanismos de falla; y estudios y verificaciones de métodos de diseño.

(Department of Mineral and Energy of Western Australia, 1999) “Geotechnical Considerations in Open Pit Mines” Provee de ejemplos y lineamientos para la práctica de ingeniería geotécnica, y a su vez busca alentar la aplicación del conocimiento más reciente a las situaciones de minería a cielo abierto.

(Tapia, Contreras, Jefferies, & Steffen, 2020).”Risk Evaluation of Slope Failure at the Chuquicamata Mine” El propósito del estudio recae en presentar la metodología empleada en la mina para la evaluación del riesgo de taludes mineros, dividiéndose en 3 partes: 1) evaluación de la probabilidad total de falla, representativa de las condiciones de estabilidad de los taludes. 2) Evaluación de las consecuencias de falla de taludes sobre la seguridad del personal. 3) Evaluación de las consecuencias de falla en términos de pérdida económica.

(Adams, 2015). “Slope Stability Acceptance Criteria for Opencast Mine Design”. El objetivo del autor fue presentar una metodología que permitiese seleccionar valores aceptables de factores de seguridad para minería a cielo abierto a través de lógica bien documentada.

(Sánchez, 2017). “Propuesta de diseño de taludes operativos y talud final de la fosa noreste de la mina Paso Diablo, Carbones del Zulia S.A, estado Zulia” Este trabajo tuvo como objetivo diseñar el talud final y operativo de un sector de la mina Paso Diablo. Dividieron el proyecto en tres fases, que simplifícadamente fueron: recolección de datos, realización de ensayos y análisis en oficina.

(Naseer & Evans, 2019). “Stability analysis of slopes using limit equilibrium and finite element methods” el documento señala la aplicabilidad de los métodos de equilibrio límite, indicando que en la etapa inicial de un proyecto es el ideal por su sencillez.

(Soler, 2019). “Integración del plan de cierre de mina en el desarrollo de la explotación del frete 1 de la concesión mineral Los Viejos, municipio Puerto Cabello, estado Carabobo” el autor señala que toda actividad minera genera impactos, y en consecuencia es imperativo establecer un plan de cierre que los solventa, el cual abarque el estudio de estabilidad, impacto ambiental y socio cultural.

3.2. Bases Teóricas

3.2.1. CLASIFICACIÓN DEL SUELO

La clasificación del suelo es uno de los primeros estudios a realizar en cualquier proyecto que pueda modificar o hacer uso del terreno, su objetivo recae en conocer el comportamiento del suelo bajo diferentes circunstancias. Generalmente, las propiedades estudiadas son:

Granulometría

Esta propiedad mide el tamaño de las partículas en el suelo, para clasificarlas desde las más grandes a las más pequeñas. Esto permite conocer qué tipo de suelo es, grava, arena, arcilla, limo, etc., y las diferentes combinaciones en que se presentan. En la [figura 13](#) se muestra detalladamente las categorías más comunes de tamaño:

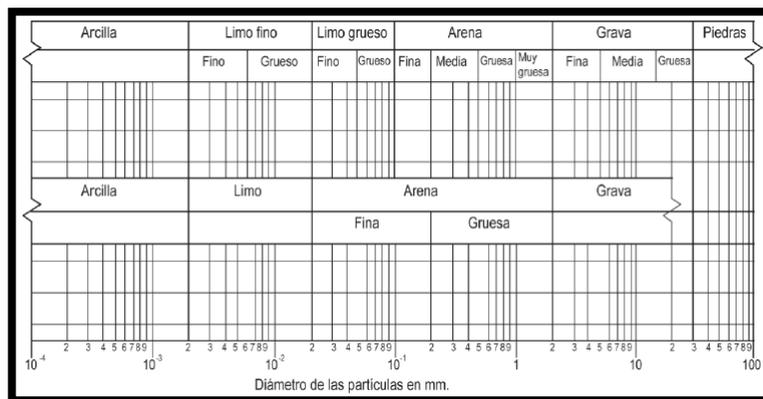


Figura 13. Clasificación del suelo por tamaño de grano. (Dirección de Obras Hidráulicas, 2013)

Asimismo, la dispersión del suelo es indicada según la fórmula 1, ello permite saber si el suelo tiende a un o múltiples tamaños

$$f = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

dónde:

F= es el nivel de dispersión de los granos

D₁₀ = es el tamaño del grano por donde pasa el 10% del material

D₆₀ = es el tamaño del grano por donde pasa el 60% del material

Plasticidad

La plasticidad es una de las propiedades principales en suelos, ella permite conocer el comportamiento del suelo frente a fuerzas súbitas e indica la capacidad que tiene para soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, ni variaciones de volumen apreciables ni o grietas (González de Vallejo, 2002). Se usan los límites de Atterberg para determinarla ([tabla 4](#)).

Tabla 4. Estados y límites de consistencia de Atterberg. (Briceño, Pérez, & Vielma, 2018)

Estados de Consistencia	Límites de Consistencia	Índices de Consistencia
<u>Estado Líquido</u> : Con las propiedades de una suspensión		
<u>Estado semilíquido</u> : Con las propiedades de un fluido viscoso.		
<u>Estado plástico</u> : El suelo es moldeable, se comporta plásticamente.	Límite líquido	Índice Plástico
<u>Estado semisólido</u> : El suelo tiene la apariencia de un sólido, pero aún disminuye de volumen por secado	Límite plástico	
<u>Estado sólido</u> : El volumen cambia por secado	Límite de contracción	Índice de Contracción

Índice Plástico, I_p

Es el rango del contenido de humedad para el cual el material se comporta plásticamente, esto es, se puede moldear sin que se agriete ni se desmorone; numéricamente el índice plástico es igual a:

$$I_p = \text{Límite Líquido (LL)} - \text{Límite Plástico (LP)} \quad (2)$$

Índice de Contracción, I_c

Es el rango del contenido de humedad para el cual el material está sufriendo contracciones y pierde su plasticidad; numéricamente el índice de contracción es igual a:

$$I_c = LP - \text{Límite de Contracción (LC)} \quad (3)$$

Límite Líquido

De acuerdo a (Geotechnical Consulting, 2024) “Se define conceptualmente como el contenido de agua en el que el comportamiento de un suelo arcilloso cambia del estado plástico al estado líquido”

Permeabilidad

Es un parámetro que representa la facilidad con que un material permite el paso del agua. Tiene un comportamiento diferente si el suelo está saturado o si se encuentra no saturado (Dirección de Obras Hidráulicas, 2013, pág. 256)

Tipos de rotura en Suelo

Algunos aspectos sobre deslizamiento circular

La forma del deslizamiento circular parece que viene controlada principalmente por la relación de los parámetros resistentes del suelo y de la geometría del talud. Los deslizamientos con los círculos más profundos ocurren en los materiales más cohesivos, lo contrario ocurre en los materiales friccionales. La explicación para esto es que la componente de fricción de la resistencia al corte aumenta con la profundidad y con el aumento de la tensión normal, mientras la cohesión no depende del nivel de tensiones.

Cuanto mayor es la diferencia entre el ángulo del talud y el ángulo de rozamiento del material del talud, la superficie de deslizamiento resulta más profunda. (Charles, 1982)

cita que la envolvente no lineal del criterio de rotura da lugar a superficies de deslizamiento más profundas con menores radios de curvatura. (Melentijevic, 2005)

Deslizamiento superficial o plano

Son movimientos lentos que se producen por fuerzas naturales y la presencia de una cara libre. Una porción del terreno está en equilibrio por la presión que le ejerce el material alrededor, al eliminar una parte, se rompe el equilibrio y da lugar al movimiento de la masa (Badillo & Rodríguez, 2005)

Tanto el deslizamiento plano como el deslizamiento circular pueden ocurrir siguiendo la línea de las discontinuidades preexistentes desde el pie hasta la cabeza del talud en un material rocoso fracturado. La superficie de deslizamiento plano suele ser el deslizamiento dominante para los taludes de pequeña altura. Con el aumento de la altura del talud, el significado de las discontinuidades en comparación con el volumen del talud disminuye, lo que conlleva más probabilidades de la aparición del deslizamiento circular

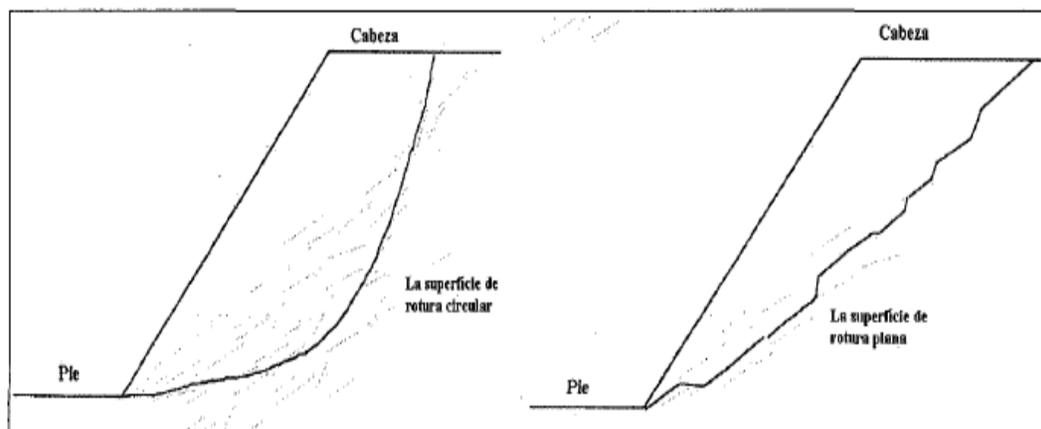


Figura 14. Deslizamiento plano vs deslizamiento circular. (Melentijevic, 2005)

Arcillas expansivas

Los suelos expansivos son aquellos que parcial o totalmente saturados aumentan significativamente su volumen cuando aumenta su contenido de humedad, a carga constante. Este término implica también la disminución de volumen o contracción si la humedad se pierde, pero debe tener presente que la contracción es simplemente el proceso inverso a la expansión. Los materiales arcillosos que son susceptibles de sufrir hinchamiento, permitiendo una gran incorporación de agua, son principalmente los pertenecientes al grupo de las esmécticas. (Angelone & Zapata, 2018, pág. 17)

3.2.2. HIDROLOGÍA

Los estudios de hidrología tienen el objetivo de cuantificar el caudal de agua que transcurre por la zona de interés, pues como indica (Franceschi, 1984) “son necesarios para proyectar obras hidráulicas de drenaje vial” refiriéndose al dimensionamiento de las dimensiones de las obras.

Precipitación

La precipitación es la fuente de todo escurrimiento de agua en esteros, ríos y también del agua almacenada en el suelo o que fluye por los acuíferos. Por precipitación se entiende la lluvia, la nieve y el granizo.

Propiedades de las Lluvias

Una tormenta es un periodo de tiempo continuo con precipitación producido por una situación meteorológica favorable, que se puede representar por un conjunto de intervalos de lluvia. Las características principales de este episodio, o evento de precipitación, desde la perspectiva de usar la información para diseñar sistemas de drenaje urbano, son su duración, magnitud total, variación de la intensidad en el tiempo y variación de la lluvia en el espacio.

Duración

Una de las principales y más evidentes propiedades de las lluvias es la duración, entendiendo por ella al total de intervalos de lluvia. La importancia de la duración de la lluvia es evidente ya que la intensidad media de la tormenta decrece con la duración y el área aportante de la cuenca crece al aumentar la duración de la tormenta. Normalmente se mide en horas o minutos.

Magnitud

Corresponde al total de agua caída durante el temporal, o el volumen de precipitación acumulado al final de la lluvia. Medida en un pluviómetro corresponde a un valor puntual, pero sobre un área más extensa la magnitud de la lluvia se ve enormemente influenciado por la variación temporal y espacial que presenta la intensidad de la lluvia. Se mide en mm.

Intensidad

La magnitud dividida por la duración corresponde a la intensidad media de la lluvia, medida en mm/hora. Es difícil definir lo que se entiende por intensidad representativa, ya que se puede hablar de intensidades máximas, medias, u otros valores que la representen.

Probabilidad de ocurrencia

La probabilidad de ocurrencia de una determinada lluvia está relacionada con la frecuencia con que se observa que ha ocurrido en un registro dado. Pero debido a que una tormenta presenta diferentes características, se trata de estimar la probabilidad de un fenómeno multivariado. Debido a ello se acostumbra fijar la duración y encontrar, para esa duración, la probabilidad de que las precipitaciones superen una cantidad determinada.

Construcción de curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

Completación de registros

Al tratar cualquier serie de datos de precipitación, deben verificarse la cantidad de registros. En ocasiones, pueden faltar datos de precipitación en cualquier nivel: diario, mensual, anual. Para estos casos, la información puede rellenarse con datos de estaciones circundantes o inclusive con los datos del mismo registro, aunque esto último sea limitado.

- Método del U.S Weather Service (Servicio Meteorológico de los Estados Unidos) Este procedimiento ha sido verificado tanto teórica como empíricamente y considera que el dato faltante en una cierta estación A, puede ser estimado en base a -los datos observados en las estaciones circundantes. El método puede ser aplicado para estimar valores diarios, mensuales o anuales faltantes.

El método consiste en ponderar los valores observados en una cantidad w , igual al recíproco del cuadrado de la distancia (D) entre cada estación vecina y la estación. La lluvia buscada P_x será igual a:

$$P_x = \frac{\sum(P_i * W_i)}{\sum W_i} \quad (4)$$

donde:

P_i = Precipitación observada para la fecha faltante, en las estaciones auxiliares circundantes (se requieren mínimo dos estaciones para aplicarlo).

$W_i = 1/D^2$, siendo D_i la distancia entre cada estación circundante y la estación incompleta, en km.

- Método Racional Deductivo

Cuando no es posible disponer de estaciones cercanas y circundantes a la estación incompleta, o bien, las existentes no cuentan con observaciones de los datos (meses) faltantes, se puede estimar el valor mensual faltante por medio de un simple promedio aritmético de los valores contenidos en el registro para ese mes, lo anterior se considera válido únicamente si es un sólo año (o máximo dos) el faltante y tal promedio se realiza con diez datos (años) como mínimo (o 20 años, en el caso de dos datos mensuales faltantes).

Cuando en el registro de lluvias mensuales, de una determinada estación, existen uno o más años incompletos, el llamado Método Racional Deductivo permite estimar los registros mensuales faltantes (como máximo once), apoyándose en la información que brindan los años completos.

$$P_i = \left(\frac{\sum P}{1200 - \sum S_i} \right) S_i \quad (5)$$

donde:

i = cada uno de los meses desconocidos, como máximo pueden ser once.

P_i = precipitación mensual desconocida en cada año incompleto, en milímetros.

$\sum S_i$ = suma de los porcentajes promedio de los meses cuya precipitación se desconoce, en porcentaje.

$\sum p$ = suma de las precipitaciones mensuales conocidas en los años incompletos, en milímetros.

S_i = porcentaje promedio asignado a cada uno de los meses desconocidos o faltantes.

- Datos fuera de serie

Son datos que se alejan significativamente de la tendencia de la data remanente. Su retención, remoción, modificación puede afectar considerablemente los parámetros estadísticos calculados, especialmente de muestras pequeñas. Todo procedimiento para

tratar datos fuera de serie requiere de criterios matemáticas e hidrológicos. Las fórmulas para su detección son las siguientes:

Umbral: es un valor indicativo, se utiliza como límite para los datos, en caso sea rebasado habrá que analizar el o los registros correspondientes. Puede ser superior o inferior.

Umbral superior

$$X_h = \bar{X} + K_n * s \quad (6)$$

Umbral Inferior

$$X_l = \bar{X} - K_n * s \quad (7)$$

donde:

Xh y Xs: Límite superior e inferior respectivamente

X = media de los datos

Kn = Valor de tabla, según el número de datos

S = desviación estándar de los datos.

Análisis probabilístico de la precipitación

Tipos de series estadísticas

Los datos de precipitación máxima diaria son generalmente presentados en un registro mensual, en el que se indica el valor máximo que ocurrió en cada mes de un año y cada máximo de los doce valores anteriores, integra el registro anual. En el procesamiento estadístico de la información anterior no se emplean todos los datos, sino que sólo se utilizarán las magnitudes más grandes o críticas, las cuales formarán una serie estadística, definida como una secuencia conveniente de datos.

Se puede indicar que básicamente se emplean dos tipos de series estadísticas, la llamada Anual y la de Duración Parcial; la primera está integrada por los eventos máximos de cada año y la segunda por los valores que supera una cierta magnitud.

Periodo de retorno de la serie anual de máximos

$$T_r = \frac{n+1}{m} \quad (8)$$

donde:

Tr = Periodo de retorno en la serie anual de máximos, en años

N = número total de eventos en la serie anual, igual al número de años de registro.

M = número de orden del evento, arreglados en forma decreciente, es decir, uno para el mayor y n para el menor.

Serie de excedentes anuales

Está formada por datos cuya magnitud es mayor que un cierto valor base, el cual es determinado de manera que el número de eventos de la serie integrada sea igual al número de años de registro.

$$T_e = \frac{n}{m} \quad (9)$$

Debe mencionarse, la probabilidad es calculada como el inverso del periodo de retorno.

Ley de Gumbel

De las varias distribuciones de valores extremos hay dos que tienen mayor aceptación, al haber demostrado que se ajustan bien al fenómeno de las crecidas de los ríos, una de ellas es la distribución de valores extremos tipo 1 o ley de Gumbel

$$P = 1 - e^{-e^{-y}} \quad (10)$$

P = Probabilidad de que un valor x sea igualado excedido

Y= Variable reducida, dada por la expresión

$$y = a \times (x - u) \quad (11)$$

u = moda de la distribución

a = parámetro de dispersión

Para una muestra de tamaño finito:

$$u = \bar{x} - \sigma_x \times \frac{\bar{y}_n}{\sigma_n} \quad (12)$$

$$a = \frac{\sigma_n}{\sigma_x} \quad (13)$$

y_n = valor medio esperado de la variable reducida

σ_n = desviación estándar de la variable reducida

σ_x = desviación estándar de los datos

x = media de los datos

Tabla 5. Valores de las variables de la distribución de Gumbel. (Chereque)

n	20	30	40	50	100	200
y_n	0.52	0.54	0.54	0.55	0.56	0.57
σ_n	1.06	1.11	1.14	1.16	1.21	1.24

Distribución de Gumbel

$$X = \bar{x} + \frac{y - \bar{y}_n}{\sigma_n} \sigma_x \quad (14)$$

Distribución Log Pearson tipo III

Para el uso de esta distribución se convierten los valores de la serie a sus logaritmos decimales y se hallan los siguientes parámetros:

Media

$$\overline{\log x} = \frac{\sum \log x}{n} \quad (15)$$

Desviación estándar

$$\sigma \log x = \sqrt{\frac{\sum (\log x - \overline{\log x})^2}{n-1}} \quad (16)$$

Coficiente de asimetría

$$Ag = n * \frac{\sum (\log x - \overline{\log x})^3}{(n-1)(n-2)(\sigma \log x)^3} \quad (17)$$

El valor de x para cualquier nivel de probabilidad se puede calcular a partir de:

$$\log x = \overline{\log x} + K \sigma \log x \quad (18)$$

K se selecciona de la siguiente tabla

Tabla 6. Coeficiente K de distribución Log Pearson tipo III. (Chereque)

Coeficiente de asimetría	Período de retorno, años							
	1,0101	1,2500	2	5	10	25	50	100
	Nivel de probabilidad, porcentaje							
Ag	99	80	50	20	10	4	2	1
3,0	-0,667	-0,636	-0,396	0,420	1,180	2,278	3,152	4,051
2,8	-0,714	-0,666	-0,384	0,460	1,210	2,275	3,114	3,973
2,6	-0,769	-0,696	-0,368	0,499	1,238	2,267	3,071	3,889
2,4	-0,832	-0,725	-0,351	0,537	1,262	2,256	3,023	3,800
2,2	-0,905	-0,752	-0,330	0,574	1,284	2,240	2,970	3,705
2,0	-0,990	-0,777	-0,307	0,609	1,302	2,219	2,912	3,605
1,8	-1,087	-0,799	-0,282	0,643	1,318	2,193	2,848	3,499
1,6	-1,197	-0,817	-0,254	0,675	1,329	2,163	2,780	3,388
1,4	-1,318	-0,832	-0,225	0,705	1,337	2,128	2,706	3,271
1,2	-1,449	-0,844	-0,195	0,732	1,340	2,087	2,626	3,149
1,0	-1,588	-0,852	-0,164	0,758	1,340	2,043	2,542	3,022
0,8	-1,733	-0,856	-0,132	0,780	1,336	1,993	2,453	2,891
0,6	-1,880	-0,857	-0,099	0,800	1,328	1,939	2,359	2,755
0,4	-2,029	-0,855	-0,066	0,816	1,317	1,880	2,261	2,615
0,2	-2,178	-0,850	-0,033	0,830	1,301	1,818	2,159	2,472
0	-2,326	-0,842	0	0,842	1,282	1,751	2,054	2,326
-0,2	-2,472	-0,830	0,033	0,850	1,258	1,680	1,945	2,178
-0,4	-2,615	-0,816	0,066	0,855	1,231	1,606	1,834	2,029
-0,6	-2,755	-0,800	0,099	0,857	1,200	1,528	1,720	1,880
-0,8	-2,891	-0,780	0,132	0,856	1,166	1,448	1,606	1,733
-1,0	-3,022	-0,758	0,164	0,852	1,128	1,366	1,492	1,588
-1,2	-3,149	-0,732	0,195	0,844	1,086	1,282	1,379	1,449
-1,4	-3,271	-0,705	0,225	0,832	1,041	1,198	1,270	1,318
-1,6	-3,388	-0,675	0,254	0,817	0,994	1,116	1,166	1,197
-1,8	-3,499	-0,643	0,282	0,799	0,945	1,035	1,069	1,087
-2,0	-3,605	-0,609	0,307	0,777	0,895	0,959	0,980	0,990
-2,2	-3,705	-0,574	0,330	0,752	0,844	0,888	0,900	0,905
-2,4	-3,800	-0,537	0,351	0,725	0,795	0,823	0,830	0,832
-2,6	-3,889	-0,499	0,368	0,696	0,747	0,764	0,768	0,769
-2,8	-3,973	-0,460	0,384	0,666	0,702	0,712	0,714	0,714
-3,0	-4,051	-0,420	0,396	0,636	0,660	0,666	0,666	0,667

Aplicabilidad de la distribución

Gráfica

La manera de comprobar la propiedad de modelos para el problema en estudio consiste en graficar la recta y plotear los puntos de la muestra; deberá cumplirse que todos los puntos caen alineados cerca de la recta.

Lo anterior se hace calculando un valor teórico de las precipitaciones en base a la ecuación anterior, donde “y” corresponde a una serie de valores fijos, calculados partiendo de la ley de Gumbel (ver [tabla 7](#)); luego, en la misma gráfica se dibujan los datos de precipitación con su probabilidad, esta última depende de la serie estadística utilizada.

Tabla 7. Variable reducida de Gumbel a partir de diferentes periodos de retorno.

Variable reducida de Gumbel		
Probabilidad	Tr	y teórica
0.01%	10000	9.21
0.05%	2000	7.60
1%	100	4.60
2%	50	3.90
3%	33.3	3.49
10%	10	2.25
20%	5	1.50
25%	4	1.25
50%	2	0.367
70%	1.43	-0.186
80%	1.25	-0.476
90%	1.11	-0.834
99%	1.01	-1.53
99.9%	1.00	-1.93

Ajuste de Bondad, Kolmogonov-Smirnov

Esta prueba de ajuste consiste en comparar las diferencias existentes, entre la probabilidad empírica de los datos de la muestra y la probabilidad teórica, tomando el valor máximo del valor absoluto, de la diferencia entre el valor observado ($F(x)$) y el valor de la recta teórica del modelo ($P(x)$), es decir:

$$\Delta = \max |F(x) - P(x)| \quad (19)$$

dónde:

$F(x)$ = distribución(es) en evaluación (Log Pearson y Gumbel)

$P(x)$ = fórmula de Weibull

$$P(x) = \frac{M}{(N+1)} \quad (20)$$

La diferencia “delta” se compara con un valor Δ_0 crítico, este valor define el margen de error permitido. Proviene de la [tabla 8](#)

Tabla 8. Valores y fórmulas para el valor crítico de la prueba de bondad Kolmogorov-Smirnov. (Villón)

Tamaño muestral N	Nivel de significación				
	0,200	0,150	0,100	0,050	0,010
1	0,9	0,925	0,95	0,975	0,995
2	0,684	0,726	0,776	0,842	0,929
3	0,565	0,597	0,642	0,708	0,828
4	0,494	0,525	0,564	0,624	0,733
5	0,446	0,474	0,510	0,565	0,669
6	0,410	0,436	0,470	0,521	0,618
7	0,381	0,405	0,438	0,486	0,577
8	0,358	0,381	0,411	0,457	0,543
9	0,339	0,360	0,388	0,432	0,514
10	0,322	0,342	0,368	0,410	0,490
11	0,307	0,326	0,352	0,391	0,468
12	0,295	0,313	0,338	0,375	0,450
13	0,284	0,302	0,325	0,361	0,433
14	0,274	0,292	0,314	0,349	0,418
15	0,266	0,283	0,304	0,338	0,404
16	0,258	0,274	0,295	0,328	0,392
17	0,250	0,266	0,286	0,318	0,381
18	0,244	0,259	0,278	0,309	0,371
19	0,237	0,252	0,272	0,301	0,363
20	0,231	0,246	0,264	0,294	0,356
25	0,210	0,220	0,240	0,270	0,320
30	0,190	0,200	0,220	0,240	0,290
35	0,180	0,190	0,210	0,230	0,270
>35	$\frac{1,07}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,14}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,22}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,36}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,63}{\sqrt{N}}$

Representación matemática de las curvas IDF

Varias fórmulas han sido propuestas para expresar matemáticamente estas curvas, entre las más comunes se tiene:

$$I = K \frac{T_r^h}{D^n} \tag{21}$$

I = intensidad, en mm/h

D = Duración de la lluvia, en minutos

Tr = Periodo de retorno en años

K,h,n = parámetros de ajuste.

Para determinarla requiere de un análisis de regresión lineal de las curvas construidas.

Extensión de curvas IDF

Consiste en dibujar la curva de I - D - F (que se desea extrapolar) en un papel doble logarítmico y al hacer esto, se observa que se suaviza la curvatura de ella. Esta curva en papel doble log. se puede convertir en línea recta si a los valores de la Duración (D) se le suman una misma cantidad “ Δt ” apropiada, esta cantidad “ Δt ” se obtiene por aproximaciones sucesivas. La ecuación de estas rectas corresponde a:

$$I = \frac{b}{(D+\Delta t)^m} \quad (22)$$

donde

I: Intensidad de lluvia (mm/h)

b: corte con el eje de las ordenadas

D: duración en horas

Δt : intervalo de tiempo para la sucesión en horas

m: pendiente de la recta

$$m = \frac{\log(I_2) - \log(I_1)}{\log(D_2) - \log(D)} \quad (23)$$

Criterios de diseño para lluvias

Periodo de Retorno

El Ministerio de Obras Públicas de Chile indica: El período de retorno, o la probabilidad de ocurrencia de una lluvia, se selecciona de acuerdo al riesgo de falla que se está dispuesto a asumir para el sistema o elemento a dimensionar, donde la falla ocurre cuando el sistema es incapaz de cumplir con su objetivo, como, por ejemplo: un canal que se desborde. En consecuencia, el gasto del proyecto deberá ser, como mínimo, el evento de máximo escurrimiento que cause la falla de la estructura. En este respecto, (Bolígana, 1979) indica que existen tres tipos de probabilidades:

Probabilidad de no ocurrencia:

$$p = 1 - \frac{1}{T_r} \quad (24)$$

Probabilidad de ocurrencia

$$j = \frac{1}{T_r} \quad (25)$$

Probabilidad de ocurrencia en un periodo de n años

$$J = 1 - p^n \quad (26)$$

O en función del periodo de retorno

$$J = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^n \quad (27)$$

Duración y distribución de la lluvia

La duración total está relacionada con el tiempo de concentración de la cuenca aportante, de modo de seleccionar una duración que genere el máximo escurrimiento. Para el diseño de elementos de conducción la duración de la lluvia debe seleccionarse siempre mayor o igual al tiempo de concentración, recomendando una duración que no exceda al tiempo de concentración por más del doble.

$$T_c \leq D \leq 2T_c$$

La duración de los hietogramas se hará abordará de la siguiente manera:

- Si el área de la cuenca es menor a 10 ha y el tiempo de concentración de la cuenca es menor a 1 hora, se recomienda usar una duración total igual a 1 hora y una distribución en intervalos variables desde 5 a 30 minutos.
- Si tanto el área de la cuenca o su tiempo de concentración es mayor al mencionado previamente, se debe usar tormentas de diseño de 24 horas de duración y una distribución temporal con intervalos variables desde 5 minutos, hasta una hora o más

Tiempo de Concentración

Es el tiempo que tarda una gota de agua en recorrer el trayecto desde el punto más alejado de la cuenca hasta su desembocadura. De acuerdo al condado (Clark County, Washington, 2021) comprende dos partes: una de flujo laminar y otra de flujo concentrado superficial; el tiempo de concentración es la sumatoria de ambos componentes.

El primero se calcula como:

$$T_t = \frac{0.42(n_s * L)^{0.8}}{P_2^{0.527}(S_0)^{0.4}} \quad (28)$$

donde:

Tt = Tiempo de viaje de flujo laminar (minutos)

L = Longitud del cauce principal (pies)

ns = Coeficiente de rugosidad efectivo de Manning para flujo laminar

P₂ = Precipitación de periodo de retorno 2 años (pulgadas)

S₀ = Pendiente del gradiente hidráulico (puede aproximarse a la pendiente de cuenca, pie/pie)

El segundo como:

$$T_t = \frac{L}{60V} \quad (29)$$

$$V = k\sqrt{S_0} \quad (30)$$

donde:

L= longitud del cauce (pie)

V = velocidad (pie/seg)

K= factor de velocidad de tiempo de concentración (pie/seg) (tabla en anexo 3)

S₀= Pendiente del cauce (pie/pie)

Magnitud

La precipitación total de la lluvia es una característica climática del lugar que se puede obtener de las relaciones de Intensidad, Duración, Frecuencia, IDF. Seleccionados el período de retorno y la duración, de estas relaciones se obtiene la precipitación total de la tormenta.

Distribución temporal

La distribución temporal de la precipitación durante una tormenta es de especial interés. Se deben adoptar distribuciones temporales de precipitación realistas y que maximicen el escurrimiento que genera la cuenca, lo que es recomendable para el análisis de sistemas de drenaje en etapas de planificación. Otra opción es emplear distribuciones teóricas de acuerdo a las curvas IDF de manera de mantener para cualquier duración el

periodo de retorno. En este caso se pueden utilizar tormentas concentradas al inicio, al centro o al final.

Distribución espacial

La distribución espacial de las precipitaciones para una misma tormenta es de interés cuando se analizan zonas extensas. Para el diseño de elementos de la red domiciliaria y secundaria se consideran tormentas espacialmente uniformes en una urbanización. Para la red primaria deben considerarse la extensión de la cuenca aportante y la disponibilidad de información para adoptar una variación espacial.

Escorrentía

Se llama escorrentía a la precipitación, que alcanza el suelo; puede quedar detenida sobre, infiltrarse en él o escurrir. El sistema de drenaje de aguas lluvias debe hacerse cargo de estos flujos, mediante obras de almacenamiento o conducción. (Dirección de Obras Hidráulicas, 2013, pág. 326)

Estimación de precipitación efectiva mediante el número de curva del Servicio de Conservación del Suelo (SCS)

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.8S)} \quad (31)$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \text{ (pulg)} \quad \text{ó} \quad S = \frac{25400}{CN} - 254 \text{ (mm)} \quad (32)$$

donde:

Q= precipitación efectiva (pulg o mm)

P = lluvia (pulg o mm)

S = Potencial máximo de retención después de escorrentía (pulg o mm)

CN= Número de curva (tablas en anexo II)

3.2.3. DISEÑO DE TALUDES

Los elementos de diseño de un talud son dos, su altura y el ángulo de la cara libre, forman parte de los bancos de la cantera. Ver [figura 15](#). Su diseño requiere de determinar la combinación altura-ángulo para

Los elementos de diseño de un banco son múltiples, como puede verse en la figura 8, de estos la cara inclinada con un cierto ángulo y de altura H corresponden al talud (Sjöberg,

Large Scale Slope Stability in Open Pit Mining- A Review, 1996) En su diseño es de vital importancia que la combinación ángulo-altura asegure que no fallará.

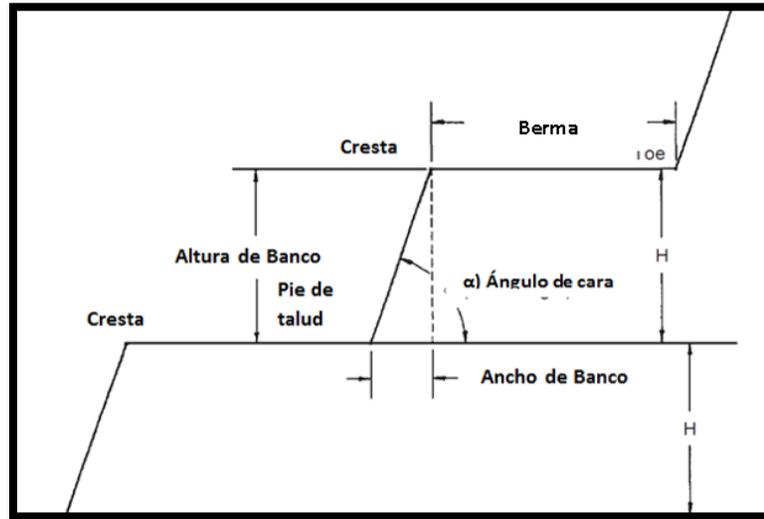


Figura 15. Partes de un banco. (Hustrulid, Kuchta y Martin, 2013)

Factor de seguridad y Equilibrio límite

El coeficiente de seguridad (también conocido como factor de seguridad) es el cociente entre el valor calculado de la capacidad máxima de un sistema y el valor del requerimiento esperado real a que se verá sometido. Por este motivo es un número mayor que uno, que indica la capacidad en exceso que tiene el sistema por sobre sus requerimientos (Ochoa & Reyes, 2011)

Según tales condiciones, es permitido establecer las ecuaciones de equilibrio entre fuerzas que inducen el deslizamiento (actuantes) y las fuerzas resistentes. Los análisis proporcionan el valor del factor de seguridad del talud para la superficie en análisis, bajo equilibrio estricto o equilibrio límite de las fuerzas que actúan Ochoa y Reyes (Op cit). Este factor se expresa de la siguiente forma

$$F = \frac{\text{Fuerzas Resistentes}}{\text{Fuerzas Actuantes}} \quad (33)$$

O expresado en términos de esfuerzos:

$$F = \frac{\text{Fuerzas Resistentes}}{\text{Fuerzas deslizantes o actuantes}} \quad (34)$$

Después de evaluar el factor de seguridad de la superficie supuesta, es necesario analizar otras superficies de rotura, hasta encontrar la condición con el menor factor, reconocida como superficie potencial de rotura del talud, este factor se toma como el factor de seguridad de todo el talud.

Las fuerzas que actúan sobre un plano de rotura o deslizamiento potencial, suponiendo que no existen fuerzas externas sobre el talud, son las debidas al peso del material, W a la cohesión c , y a la fricción, ϕ , del plano ver [figura 16](#).

(Badillo & Rodríguez, 2005)

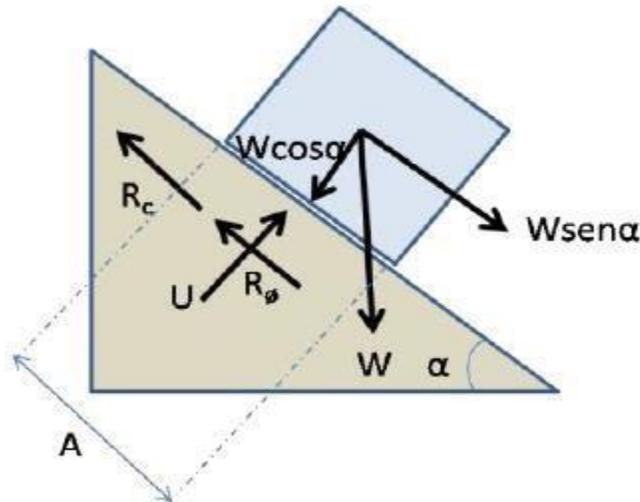


Figura 16. Fuerzas actuando sobre una superficie de rotura en un talud (Ochoa & Reyes, 2011)

En este caso, el factor de seguridad viene dado por la siguiente ecuación:

$$F = \frac{R_c + R_\phi}{S} \quad (35)$$

Siendo:

R_c = las fuerzas cohesivas = cA .

R_ϕ = las fuerzas friccionantes = $(W * \cos \alpha) * \tan \phi$.

S = las fuerzas que tienden al deslizamiento = $(W * \cos \alpha)$.

A = área del plano de rotura.

Si existe U , es decir, las fuerzas totales debido a una presión de agua sobre la superficie A ; la ecuación se traduciría a:

$$R_\phi = (W * \cos \alpha - U) * \tan \phi \quad (36)$$

Métodos de Cálculo de FS para suelos

Método de Bishop Simplificado

El método propuesto por Bishop en 1955 analiza la estabilidad de un talud con superficie de falla (SPF) del tipo circular, tomando en cuenta el efecto de las fuerzas entre dovelas. Al tratarse de un Método de Dovelas, la masa de suelo deslizante debe ser dividida en n fajas verticales (figura 17a), de manera de estudiar las fuerzas (figura 17b) y momentos involucrados en cada una de las rebanadas definidas y determinar así el FS asociado al caso (Plaza & Rodríguez, Análisis Comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales, 2013).

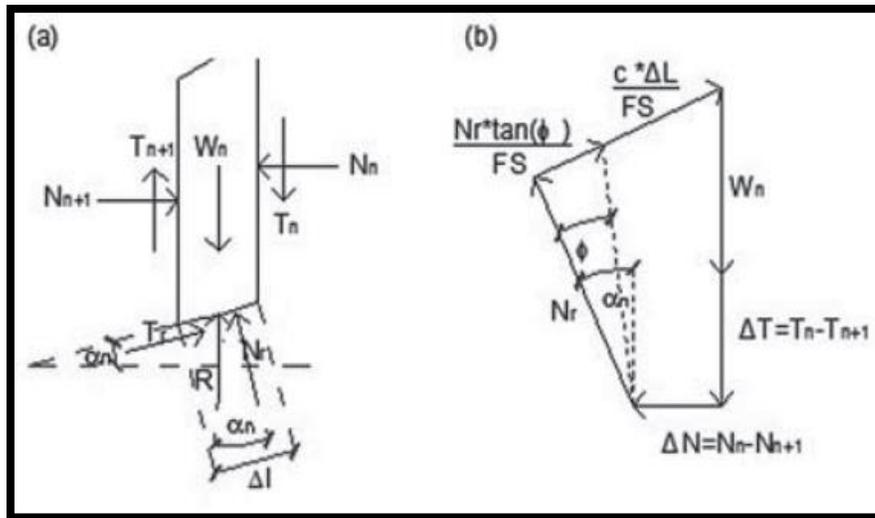


Figura 17. Análisis de estabilidad de taludes por el método de Bishop.

(a) Esquema de las fuerzas que actúan en la n^{ma} dovela, b) Diagrama de fuerzas en equilibrio de la n^{ma} dovela. (Plaza & Rodríguez, Análisis Comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales, 2013)

$$FS = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} [c \times b + W_n \times \tan(\varphi)] \times \frac{1}{m_{\alpha(n)}}}{\sum_{n=1}^{n=p} [W_n \times \sin(\alpha_n)]} \quad (37)$$

donde:

$$m_{\alpha(n)} = \cos(\alpha_n) + \frac{\tan(\varphi) \times \sin(\alpha_n)}{FS} \quad (38)$$

Método de Janbú

La principal consideración de este método es que las fuerzas entre dovelas son solo horizontales, no tomando en cuenta las fuerzas cortantes. A diferencia del método de Bishop, en este caso la SPF no debe ser obligatoriamente circular. Esto se refleja en la aplicación de un factor de corrección f_0 , el que depende netamente del nivel de curvatura que presente la superficie de rotura ([figura 18](#))

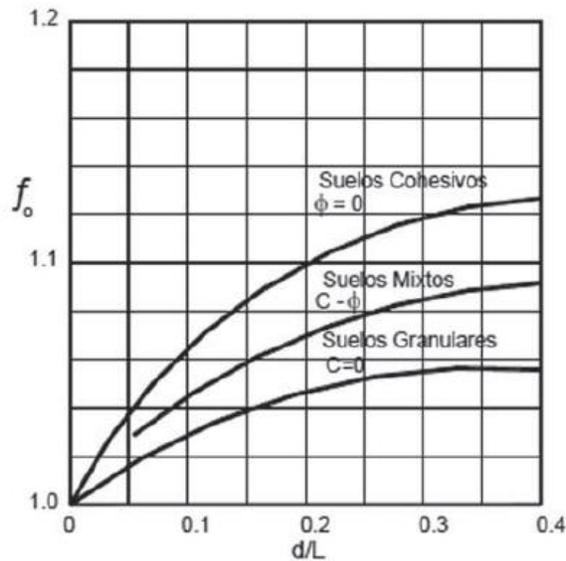


Figura 18. Diagrama del factor f_0 utilizado en el método de Janbu. (Plaza & Rodríguez , Análisis Comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales, 2013)

$$FS = \frac{f_0 * \sum \left[[c \times b + W_n \times \tan(\varphi)] \times \frac{1}{\cos(\alpha) \times m \times \alpha} \right]}{\sum W * \tan(\alpha)} \quad (39)$$

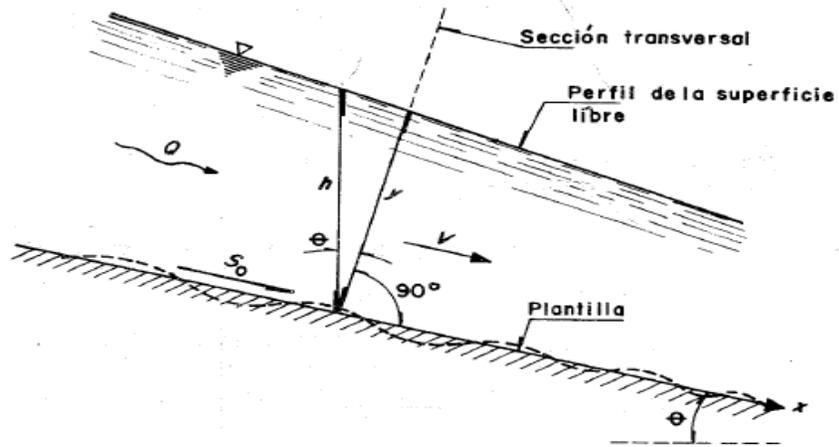
Valores aceptables del factor de seguridad

Numerosos estudios se han hecho para determinar el valor que debe tener el factor de seguridad para considerarse “seguro”, en este respecto (Ayala, 1986)) señala que varían entre 1.10 y 1.60 según el tipo de obra, altura y parámetros geotécnicos estudiados. Lo anterior coincide con lo descrito por (Hustrulid, Kuchta, & Martin, 2013) y (Adams, 2015) quienes indican que el factor de seguridad para obras mineras debe ser mayor o igual a 1.2.

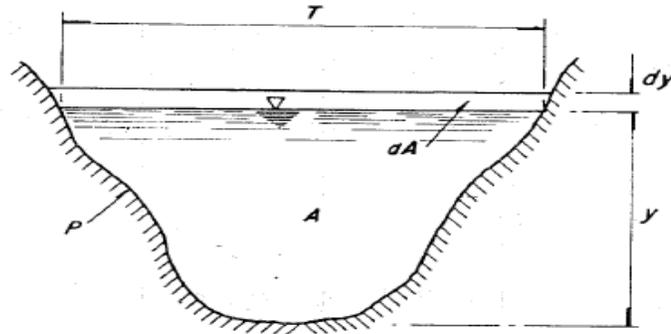
3.2.4. ASPECTOS HIDRÁULICOS

Los elementos geométricos son propiedades de una sección del canal que puede ser definida enteramente por la geometría de la sección y la profundidad del flujo. Se describen a continuación. Ver la [figura 19](#) para la representación gráfica, y la [figura 20](#)

- Tirante normal (y): es la distancia vertical del punto más bajo de la sección del canal a la superficie libre
- Ancho superior (T): es el ancho de la sección del canal en la superficie libre
- Área hidráulica (A): es el área de la sección transversal del flujo normal a la dirección del flujo
- Perímetro mojado (P): es la longitud de la línea de la intersección de la superficie mojada del canal con la sección transversal normal a la dirección del flujo
- Radio hidráulico (R): es la relación entre el área mojada y el perímetro mojado
- Profundidad hidráulica (D): es la relación del área mojada con el ancho superior
- Borde libre (F): es el espacio entre la cota de la corona y la superficie del agua



a) Corte longitudinal



b) Sección transversal

Figura 19. Elementos geométricos de un canal. (Sotelo, 2002)

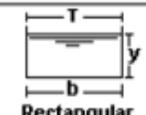
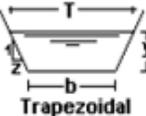
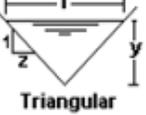
Sección	Area hidráulica A	Perímetro mojado P	Radio hidráulico R	Espejo de agua T
 Rectangular	by	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	b
 Trapezoidal	$(b+zy)y$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$b+2zy$
 Triangular	zy^2	$2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$	$2zy$
 Circular	$\frac{(\theta - \text{sen}\theta)D^2}{8}$	$\frac{\theta D}{2}$	$(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta})\frac{D}{4}$	$(\text{sen}\frac{\theta}{2})D$ ó $2\sqrt{y(D-y)}$
 Parabólica	$\frac{2}{3}Ty$	$T + \frac{8y^2}{3T}$	$\frac{2T^2y}{3T+8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$

Figura 20. Elementos geométricos de las secciones más comunes. Recuperado de: http://ingenieriacivil.tutorialesaldia.com/wp-content/uploads/2012/02/01_Elementos-Geometricos-en-Canales.png

Clasificación de los Escurrimientos según el espacio

Flujo, régimen, o escurrimiento uniforme: se verifica si las propiedades del escurrimiento en el instante de observación no cambian en todo el cauce.

Flujo variado: ocurre si las propiedades del escurrimiento en el instante de observación cambian de una sección a otra del escurrimiento

Escurrimiento variado

Se caracteriza por variaciones en la velocidad de flujo y de su altura, existen tres estados: crítico, subcrítico y supercrítico. Cuando el flujo se verifica con el mínimo de energía necesaria para el movimiento, se encuentra en estado crítico; las condiciones de flujo son únicas, solamente una altura y velocidad posibles; el número de Froude de flujo vale 1. Este flujo separa los tipos de escurrimiento en cauces abiertos en dos: subcrítico y supercríticos.

$$F = \frac{V}{\sqrt{gd}} \quad (40)$$

donde:

F= Número de Froude

V= Velocidad media del flujo

G = Aceleración de la gravedad

D= Profundidad media

Ríos

Flujo Subcrítico

El flujo subcrítico es tranquilo, de baja velocidad y altura importante, la velocidad media es inferior a la velocidad de las ondas, por lo tanto, estas pueden remontar la corriente. En este régimen la altura de agua es superior a la altura crítica, y la velocidad es menor a la crítica. El número de Froude es inferior a 1,0.

Flujo Supercrítico

El flujo es rápido, y las alturas de agua bajas. La velocidad del flujo es superior a la velocidad de las ondas superficiales, por lo tanto, estas no pueden remontar la corriente. La altura de agua es inferior a la crítica y la velocidad es superior a la velocidad crítica. El número de Froude es superior a 1,0.

Escurrimiento Uniforme

El escurrimiento uniforme se caracteriza porque la velocidad y la altura de agua permanecen constantes a lo largo de la canalización. Esto requiere que la forma y tamaño de la sección transversal y las propiedades del cauce sean también constantes. En estas condiciones la pendiente de fondo, i , la pendiente del eje hidráulico, I , y la pendiente de la línea de energía, J , son iguales.

$$V = \frac{R^{\frac{2}{3}} \times s^{\frac{1}{2}}}{n} \quad (41)$$

donde

S: Pendiente de fondo

n: Rugosidad del lecho

Coefficiente de Manning

Para materiales no cohesivos puede estimarse mediante las fórmulas 40 a 43, para materiales cohesivos deben emplearse tablas.

$$\text{Garde y Raju} \quad 0.015d_{50}^{\frac{1}{6}} \quad (42)$$

$$\text{Strickler} \quad 0.034d_m^{1/6} \quad (43)$$

$$\text{Meyer-Peter} \quad 0.0122d_{90}^{\frac{1}{6}} \quad (44)$$

$$\text{Lane-Carlson} \quad 0.0152d_{75}^{1/6} \quad (45)$$

Método del esfuerzo tangencial permisible

Consiste en igualar el esfuerzo tangencial que produce el flujo con el tangencial permisible T_p que se adopte en el diseño, de acuerdo con el factor de seguridad y el valor de T_c que resiste el material antes de ser arrastrado. El procedimiento es el siguiente:

- a) De acuerdo con las características del material, se determina el esfuerzo tangencial crítico: fórmula 45 para arcilla amarilla, fórmula 46 para arena, y la gráfica de la [figura 21](#), para arcilla blanca. También se selecciona el factor de seguridad f , y el permisible resulta: T_c/f .

$$T_{pt} = \frac{T_c}{f} \quad (46)$$

$$\tau_c = 0.16279 * I_p^{0.84} \quad (47)$$

$$\tau_c = (0.7005 + 0.0427 * \sigma_g + 0.3578 * \sigma_g^2)(0.047 * g * \rho * (S_s - 1)d_{50} \quad (48)$$

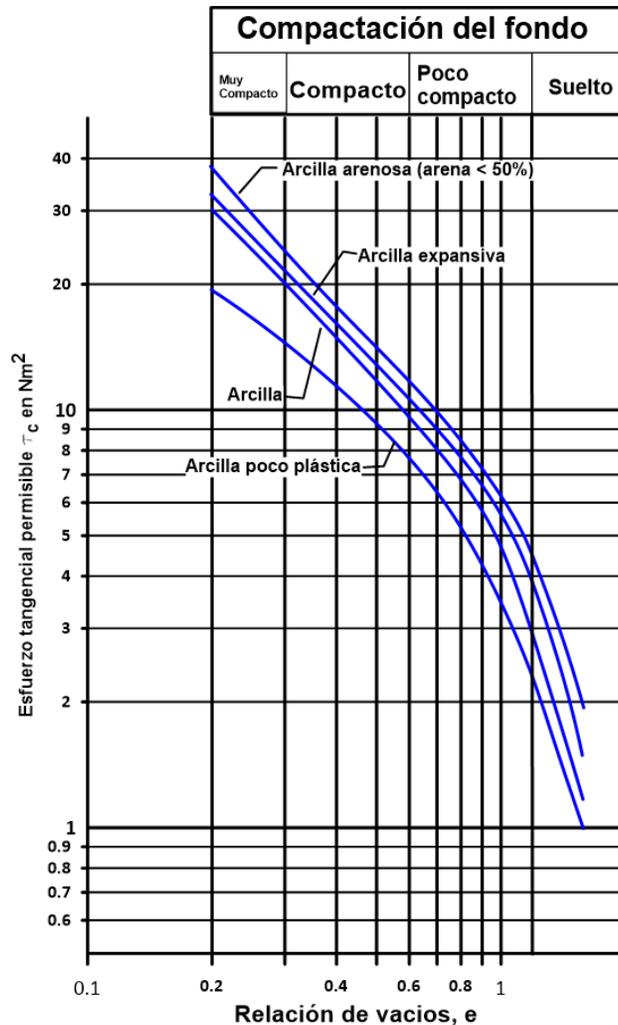


Figura 21. Esfuerzo crítico para material cohesivo. (Ex Unión Soviética, 1936) citado de (Sotelo, 2002)

- b) Se selecciona al coeficiente de Manning
- c) Se determina el ángulo φ , de reposo del material
- d) Se selecciona el ángulo θ de inclinación del talud de modo que $\theta < \varphi$
- e) Se obtiene el valor de K con la ecuación

$$K = \sqrt{1 - \frac{\text{sen}^2(\theta)}{\text{sen}^2(\varphi)}} \quad (49)$$

- f) El esfuerzo tangencial permisible T_{pt} en los taludes se obtiene de la expresión

$$\tau_{pt} = K * \tau_{pb} \quad (50)$$

- g) Los esfuerzos tangenciales máximos producidos en taludes y taludes son:

$$y = \frac{\tau_{pt}}{g\rho S \varepsilon_t} \quad (51)$$

$$y = \frac{\tau_{pb}}{g\rho S\varepsilon_b} \quad (52)$$

- h) Se supone una relación b/y
- i) Se obtiene ε_b y ε_t de las figuras en el [anexo iv](#)
- j) Se calculan los tirantes de "g"
- k) Se calcula b con el valor y elegido
- l) Se revisa que la geometría sea capaz de conducir el caudal, mediante la ecuación de Manning
- m) Si difiere se repite el procedimiento
- n) Se ajusta la sección para la construcción

Perfiles de flujo

El perfil que adopta la superficie libre del agua en cualquier condición de flujo en un canal se conoce como perfil del flujo o perfil hidráulico

La forma que adopta el perfil del flujo está directamente asociada con la pendiente de la plantilla S_0 y con los valores/ de S_f y número de Froude al cuadrado (F^2) Para ello, la discusión se simplifica si se acepta que el canal sea prismático y de pendiente pequeña.

Por lo que respecta a la pendiente de la plantilla, S_0 es positiva si desciende en la dirección del flujo, negativa si asciende y cero si es horizontal. Un flujo uniforme de tirante Y_n se puede establecer sólo sobre una pendiente positiva, por lo que dicha pendiente y los perfiles del flujo resultantes se designan como (representado gráficamente en la [figura 22](#)):

- Subcrítica si $Y_n > Y_c$; perfiles tipo M.
- Crítica si $Y_n = Y_c$; perfiles tipo C.
- Supercrítica si $Y_n < Y_c$; perfiles tipo S.
- Horizontal, $Y_n = \infty$; perfiles tipo H.
- Negativa o adversa, Y_n no existe; perfiles tipo A.

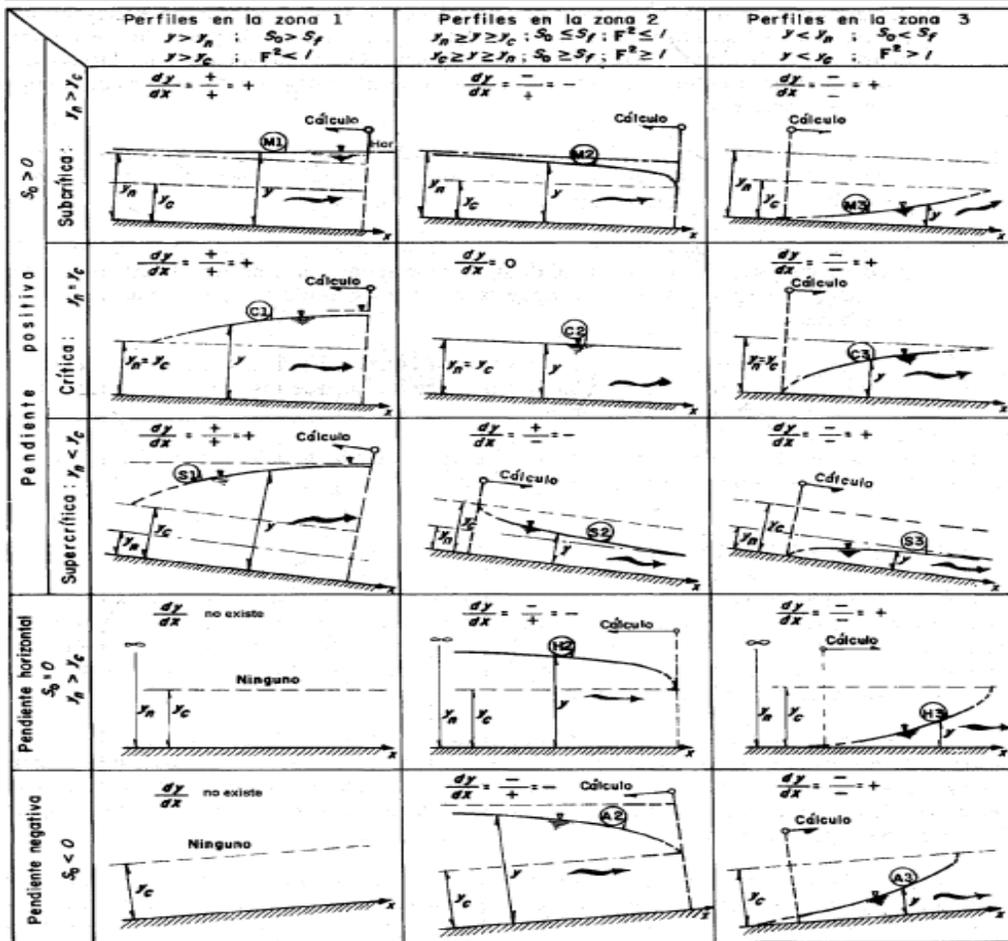


Figura 22. Perfiles de Flujo. (Sotelo, 2002)

Cálculo de perfiles de flujo. Método directo por pasos

Permite el cálculo directo de la distancia que separa dos secciones: una de tirante previamente calculado y la otra de tirante estimado dentro del intervalo en que varía. La distancia entre las dos secciones debe ser pequeña, de acuerdo con la longitud del tramo en que deba efectuarse el cálculo.

$$X_2 = \frac{E_2 - E_1}{S_0 - S_f} \quad (53)$$

Estimación de caudales en canales naturales

Para aplicar el método debe seleccionarse una parte del río más o menos recta, de longitud no menor de 6 veces el ancho del cauce, y sección casi uniforme, y dividirla en diez tramos aproximadamente iguales; o bien, seleccionar diez tramos independientes a lo largo del cauce.

Conociendo el área y radio hidráulicos de la sección del cauce se calcula K, debe distinguirse K_u (sección aguas arriba) y K_d (sección aguas bajo)

$$K = \frac{AR_h^{\frac{2}{3}}}{n} \quad (54)$$

Se determina el promedio geométrico

$$\bar{K} = \sqrt{K_u K_d} \quad (55)$$

Valor inicial de pendiente S, delta y' corresponde al desnivel entre las alturas de agua medidas en el cauce

$$\bar{S}_0 = \Delta y' / \Delta x \quad (56)$$

La primera aproximación del gasto

$$Q_0 = \bar{K} \sqrt{\bar{S}_0} \quad (57)$$

Con el valor aproximado del gasto, se calculan las cargas de velocidad en las dos secciones, y se utiliza la formula siguiente para determinar la pendiente

$$\bar{S}_{t+1} = \frac{\Delta y' + k_t \left(\frac{V_u^2}{2g} - \frac{V_d^2}{2g} \right)}{\Delta x} \quad (58)$$

De allí se aplica la ecuación anterior con la nueva pendiente y se comparan con el gasto anterior. En caso tal que ambos sean diferentes, se toma el promedio de ambos caudales y se recalcula la pendiente, hasta que sean aproximadamente iguales.

Los valores de k_t pueden ser:

- 0.7 si hay expansión gradual en el tramo
- 0.5 si hay expansión brusca
- 1 si no hay cambio del área o no se considera la pérdida
- 1.2 si hay contracción gradual
- 1.5 si hay contracción brusca

CAPITULO IV. MARCO METODOLÓGICO

En éste se describen los procedimientos que se seguirán para alcanzar cada uno de los objetivos planteados, los cuales se tratan bajo las características particulares del tipo y diseño de la investigación.

4.1. Tipo de la investigación

La investigación se enmarca en dos tipos. El primero, no experimental, pues no existe la manipulación deliberada de las variables, de modo que se estudiarán tal como se muestran en la naturaleza, sin planes premeditados para modificarlas (Sarmiento, 2019), y también es de Campo, dado que, una parte de la información se obtiene directamente del lugar bajo estudio (Lifeder Education, 2022)

4.2. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es no experimental transeccional. El estado de las variables no cambiará de algún modo, por el contrario, serán descritas y analizadas, con el fin de conocer su comportamiento y cómo se interrelacionan entre sí (Hernández, Fernández, & Pilar, 1997)

4.3. Población y muestra

La población corresponde a cuatro (04) hectáreas de la Cantera Curigua ubicada estado Lara, mientras que la muestra será el sector El Yeso el cual se tiene planificado para explotación.

4.4. Procedimiento Experimental

Se plantea la división del proyecto en seis (6) etapas, tal como muestra la [figura 23](#) y se explica más adelante.

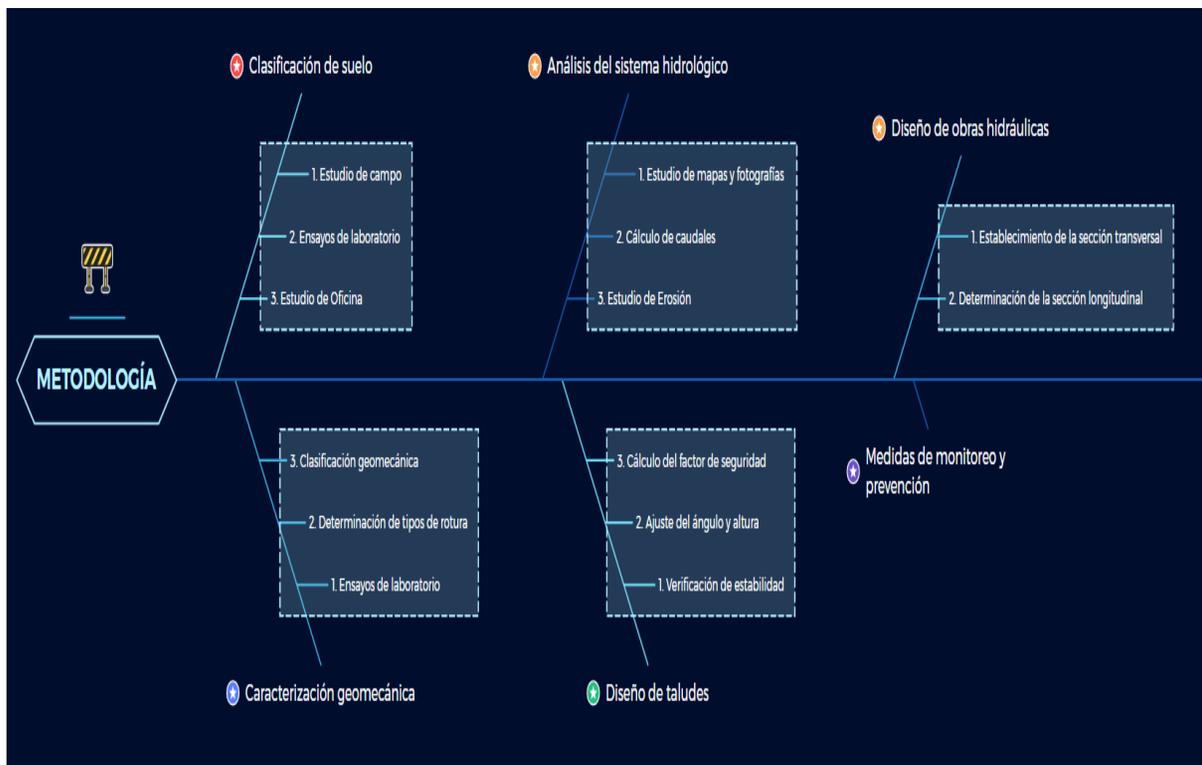


Figura 23. Plan de trabajo general.

4.4.1. Clasificación del suelo

El objetivo de esta fase es conocer el tipo de suelo que existe. Para llevar a cabo este fin de la mejor manera posible, es inevitable recolectar muestras de suelo, y someterlas a ensayos de laboratorio, de manera que se midan sus propiedades físicas, como es el caso de: la granulometría, la plasticidad y húmeda, y entonces contrastar con la información bibliográfica recabada.

Códigos del estándar ASTM utilizados

- ASTM D422:63 (R07): Método estándar para el análisis del tamaño de partículas de suelos.
- ASTM D2487:11: Clasificación de Suelos para Propósitos de Ingeniería (Sistema de Clasificación Unificada de Suelos)
- ASTM D854:11: Gravedad específica de los sólidos del suelo por picnometría
- ASTM D4318:17: Límite líquido, límite plástico, e índice de plasticidad de suelos
- ASTM D2216:19: Determinación en laboratorio de contenido de agua (humedad) de suelos y rocas por medio de masa.
- ASTM D3080/3080M:11: Corte directo de suelos bajo condiciones drenadas y consolidadas.
- ASTM D7928: 21e1: Distribución de tamaño de partículas (gradación) de suelos de grano fino usando el análisis de sedimentación (Hidrómetro).

Equipos

Desecador, espátula, picnómetros, capsulas de desecación, tamices

Bomba de vacío GAST MANUFACTURING, INC.DOA-V720-AA

Balanza Setra BI-410S

Cuchara Casagrande automática. Marca Humboldt MFG, CO, modelo H-4226

Máquina de corte directo. Marca Wykeham-Farrance, modelo 25403, serial 108818.

4.5.2. Caracterización Geomecánica

Una parte de las muestras de la etapa anterior será utilizada para determinar sus propiedades mecánicas, estos datos se vaciarán en software, para reconocer los potenciales tipos de rotura en los taludes, y finalmente clasificar geomecánicamente cada uno de los sectores de la cantera.

Equipo.

- Brújula tipo Brunton
- Cinta métrica
- Libreta de campo
- Estadillo con datos de interés

4.5.3. Análisis del sistema hidrológico

Evidentemente debe realizarse el estudio de las diferentes cuencas y cauces de la región, para calcular el(los) caudal(es) de diseño de las obras hidráulicas. Ante todo, debe realizarse el estudio de mapas topográficos y fotografías aéreas, para delimitar cuencas, y luego seleccionar el método de cálculo de caudales en función del tamaño de ésta (Dirección de Obras Hidráulicas, 2013) y (Franceschi, 1984). En último término se determina su erosión.

Equipo:

- Distanciómetro
- Vara graduada

Software

- ARCGIS versión 10.8

- Hydronogmon 4
- HEC-HMS versión de mayo 2024
- Microsoft Office
- Google Earth Pro

4.5.4. Diseño de Taludes, Obras Hidráulicas y selección de Medidas de monitoreo

En la primera mitad del proyecto, se han adquirido una serie de datos, ya en esta segunda parte se procederá, primeramente, a la parametrización de los elementos de los taludes, en segundo lugar, el diseño de las obras hidráulicas y finalmente la selección de las medidas de monitoreo.

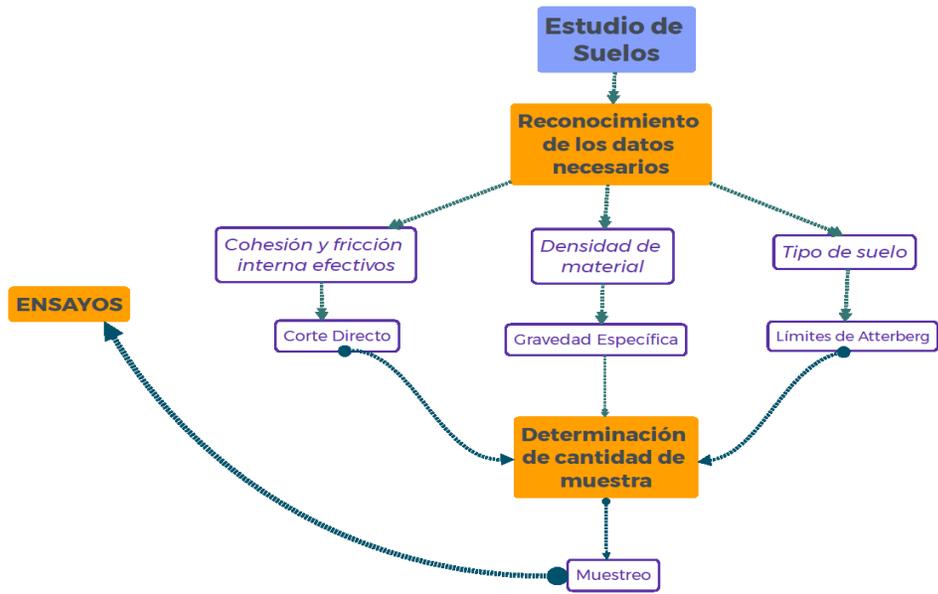
El diseño de los taludes es un proceso iterativo de: verificación del factor de seguridad (FS), inicial- ajuste de elementos constructivos y cálculo de FS, el ciclo termina una vez que el FS se encuentre dentro de los valores preestablecidos.

El diseño de obras hidráulicas comprende dos áreas, en la primera se determinan la forma de la sección, altura de agua y su velocidad de entrada al sistema, para luego establecer los perfiles de flujo a lo largo.

Finalmente, se establecerán las medidas de monitoreo necesarias para mantener el correcto funcionamiento de ambos, taludes y canales

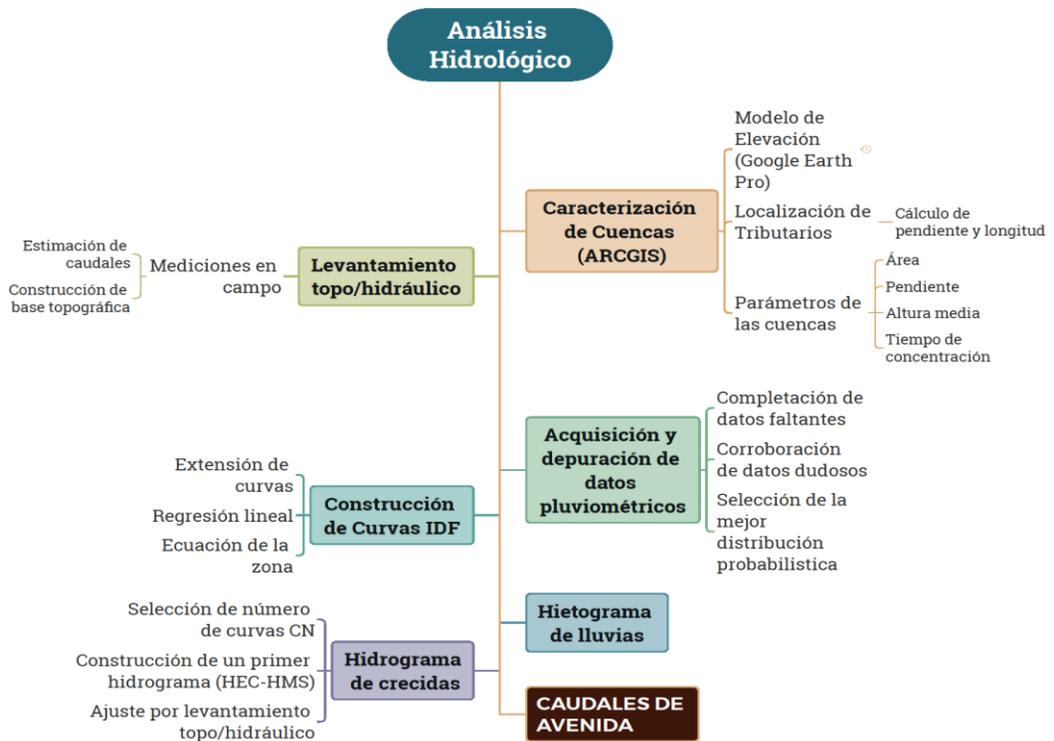
Software:

- Slide versión 6
- HCanales versión 3
- Autodesk, AutoCAD Civil 3D versión 2018



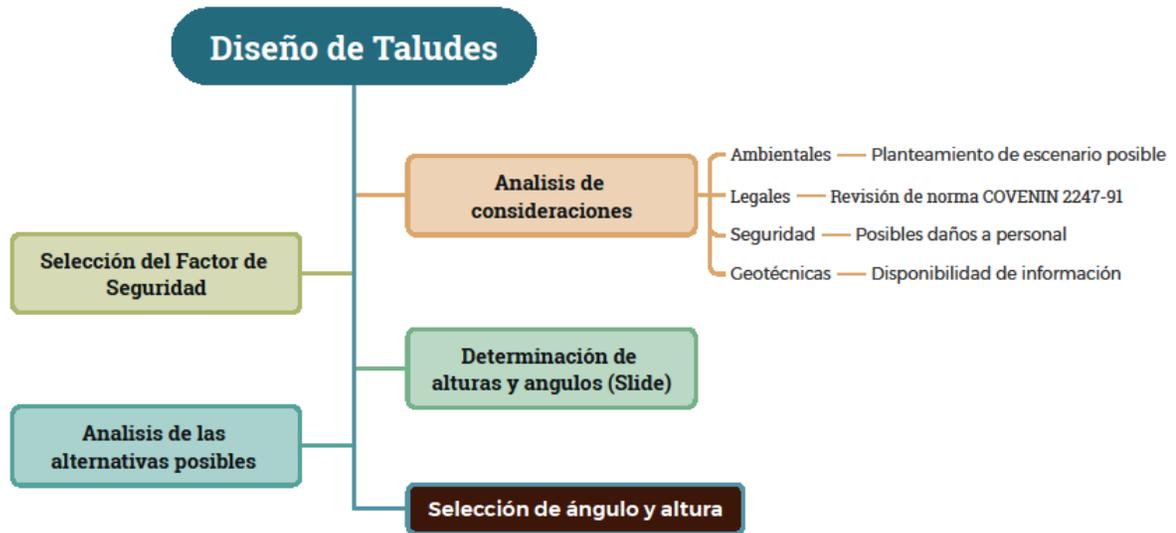
Presented with xmind

Figura 24. Esquema de trabajo para estudio de suelos



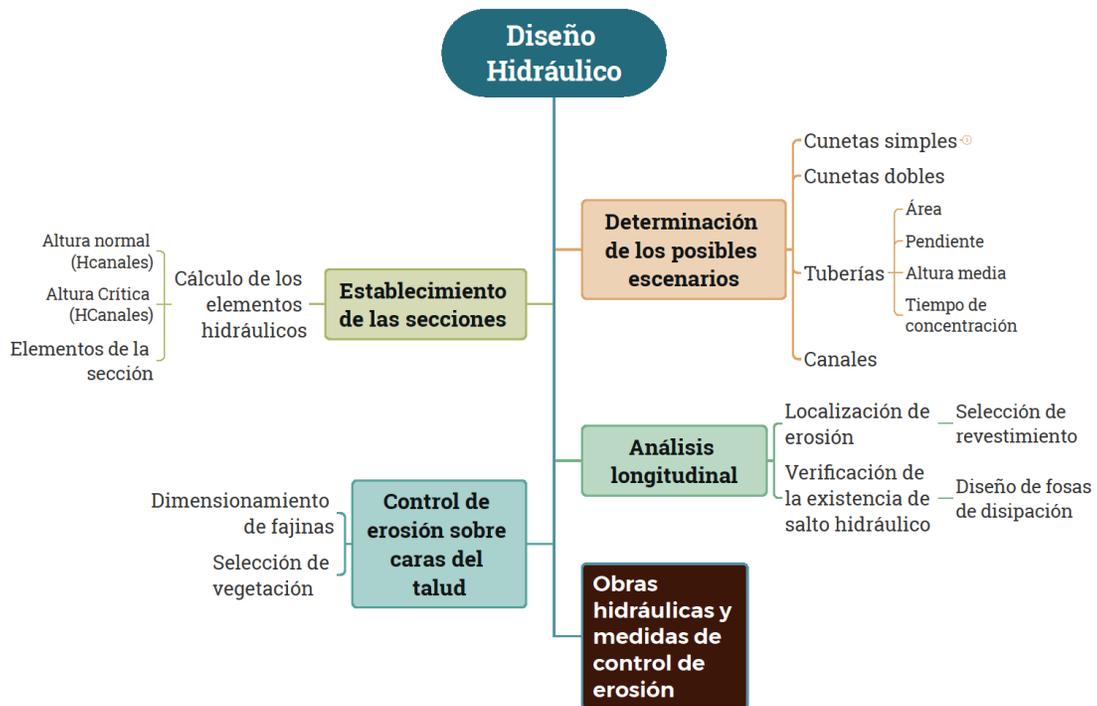
Presented with xmind

Figura 25. Esquema de trabajo para análisis hidrológico.



Presented with xmind

Figura 26. Esquema de trabajo de diseño de taludes



Presented with xmind

Figura 27. Esquema de trabajo de diseño hidráulico

CAPITULO V ANALISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1. Clasificación de los suelos y arcillas de acuerdo al SUCS

Para asegurar la precisión en los tipos de suelo, se necesita conocer sus diversas propiedades, requiere sólo aquellas que puedan utilizarse más adelante. En el trabajo se hace enfoque en: la gravedad específica, granulometría, y, en el caso particular de las arcillas unos límites definidos; los cuales, permitirá definir los parámetros hidráulicos y mecánicos buscados.

5.1.1. Investigación en el sitio

Se obtuvo una primera aproximación de lo que podrían ser estos suelos en una visita de campo. En la visita se identificaron tres suelos, cuyos colores son: suelo 1, marrón, marrón-rojizo; suelo 2 amarillo claro y suelo 3, blanco, gris claro, en el apartado 5.2 puede verse como se distribuyen. Basados en un criterio granulométrico y de comportamiento del material se hizo una primera clasificación:

El marrón rojizo se determinó como arena (**S, símbolo de arena en inglés: Sand**), al verlo ([figura 6](#)) los granos que lo componen son claramente visibles: mayoritariamente de dimensiones 1 mm y se evidencian algunas gravas; esto indica que se trata de una arena, mas, sin embargo, no el tipo exacto, pues no se sabe la composición de finos.

En el caso del suelo amarillo los granos no se veían, aunque degustando el material se identificaron dos texturas: una fina parecida a la harina de trigo y otra con algunos granos como si fuese azúcar, dando indicativo que se trata de una mezcla entre arcilla y arena. Para precisar un poco más el tipo de arcilla se practicaron otros criterios; el de resistencia arrojó que es moderada, porque no se disgrega inmediatamente con las manos al aplicarle fuerza, en cuanto a su dureza es media también; se moldearon bastones (barritas de pequeño diámetro) de este material; primero se formaba una bola la cual se rodaba entre las manos, cuando alcanzaba cierto diámetro se desmenuzaba y remodelaban de nuevo, hasta que se rompieran durante el proceso, para llegar a esto último tomaba entre 4 y 5 ciclos. Al final, estaba duro, pero podía deformarse con los

dedos. Ambas pruebas indicaron una arcilla de baja plasticidad **CL-S** (S por los granos mencionados)

Finalmente, del suelo blanco se sabía que era una arcilla, mas no el tipo. Se encuentra en estado de roca, a diferencia de la arcilla anterior, la blanca no se disgrega con las manos y se requieren entre 10-12 ciclos para que se desmenuce el bastón durante el proceso, al final de este último, es muy dura, no se deforma a menos que se aplique mucha fuerza. Ambas pruebas indican que se trata de una arcilla de alta plasticidad **CH**.

Debe mencionarse que la clasificación en campo por sí sola, no ofrece precisión suficiente; por esto, se realizaron ensayos de laboratorio, con las muestras tomadas, cuyas coordenadas se muestran en la [tabla 9](#).

Tabla 9. Coordenadas de muestreo.

COORDENADAS DE LAS MUESTRAS			
MUESTRA	NORTE	ESTE	ALTURA
SB	1079796	424339	1104
SA	1079821	424366	1104
SR	1079767	424371	1110

5.1.2 Ensayos de laboratorio

El sector el Yeso lo constituyen tres materiales: arenas bien gradadas con gravas, **SW - G**, de color marrón rojizo, arcillas arenosas de baja plasticidad, **CL - S**, de color amarillo, y arcillas plásticas, **CH**, de color blanco. Esto basado en tres propiedades: gravedad específica, distribución granulométrica, y en el caso de las arcillas límites de Atterberg.

Algunos comentarios sobre los ensayos

En esta fase se realizaron diferentes ensayos para determinar el tipo de suelo a través de: gravedad específica, análisis granulométrico, límites de Atterberg, corte directo. cada uno sirvió como indicador para la clasificación. Es necesario denotar que el ensayo de corte no se realizó en las arcillas blancas por falta de acceso al laboratorio, para realizarlo, el tiempo de ensayo es de mínimo 24 horas para asegurar la condición de drenaje, exigiendo quedarse en el laboratorio por todo ese periodo.

El ensayo de gravedad específica se aplicó utilizando el método B para muestras secadas al horno, se hizo una sola vez para cada suelo, dejando las muestras en vacío por + 24 horas. En el caso de los límites de Atterberg, se empleó el material entre las mallas 40 y 60; se realizaron los cilindros del límite plástico sobre papel absorbente. Para el análisis granulométrico por hidrometría, se utilizó el hidrómetro 152H, la pulpa utilizada fue la del pasante malla 200, debe resaltarse que el laboratorio no cuenta con mezclador exigido por la norma: sustituido por una vara para mezclar.

El análisis granulométrico por tamizado se realizó para las arcillas amarillas y las arenas, para el tipo de suelo se aplicó la vía húmeda para lavar la parte arcillosa; la gruesa se cuarteó manualmente, luego se tamizó, las arcillas blancas se lavaban completamente. El ensayo de resistencia al corte se aplicó para la arcilla arenosa y las arenas con grava, anotando los valores de desplazamiento vertical, horizontal y esfuerzo cortante; la primera con cargas de 0,50, 1 y 2 kgf/cm², con excepción de la arena, en el punto de 1 kgf/cm² se sustituyó por 0,75 kgf/cm², un tiempo de ensayo de 4 horas, tomando mediciones cada 3 minutos durante las primeras 2 horas, luego, cada 6 minutos por una hora, en la etapa final cada 15 minutos; las arenas se ensayaron por 30 minutos: mediciones cada 30 segundos por 15 minutos, luego cada 1 minuto por 7 minutos, finalmente cada 2,50 minutos el resto del ensayo.

Arenas

Utilizando el diagrama de flujo de la [figura 30](#) y otras gráficas se corroboró la existencia de unas arenas bien gradadas con grava, **SW-G**. En primer lugar, la cantidad de partículas tamaño arena es mayor al de gravas, en la [figura 28](#) se muestra que las primeras cubren 68,3 % de la distribución, y las segundas 31,7 %, indicando un suelo arenoso, ahora bien, estas arenas no cuentan, prácticamente, de materiales finos, puesto que sólo se presentan en un 3 % de la distribución; las arenas cuentan con diversos tamaños de grano los cuales aumentan secuencial y paulatinamente, indicando que están bien gradadas, esto es evidenciable con el coeficiente de uniformidad (Cu) y el de curvatura (Cc), cuyos valores son de 2,61, y 11,61 respectivamente. Bajo este criterio, se trata de unas arenas bien gradadas con grava **SW- G** (Well Graded Sand (SW) with Gravel (G)), como se indicó anteriormente.

Los finos en de las arenas se caracterizan por: un límite líquido (LL) = 48 %, límite plástico = 25,07 % e índice de plasticidad (IP) = 22,93, dichos valores indican que la parte fina es una arcilla de baja plasticidad **CL** (ver [figura](#) en anexo); cuya distribución de tamaño es: 33,62 % son limos, 12,3 % de arcillas y 21 % de partículas coloidales (ver [figura](#) 30).

La densidad del suelo es menor a otras vistas en el estándar, 2,56 g/cm³ mientras la del estándar ASTM es de 2,66 g/cm³ en promedio, lo cual puede ser una diferencia entre los suelos de cada sitio

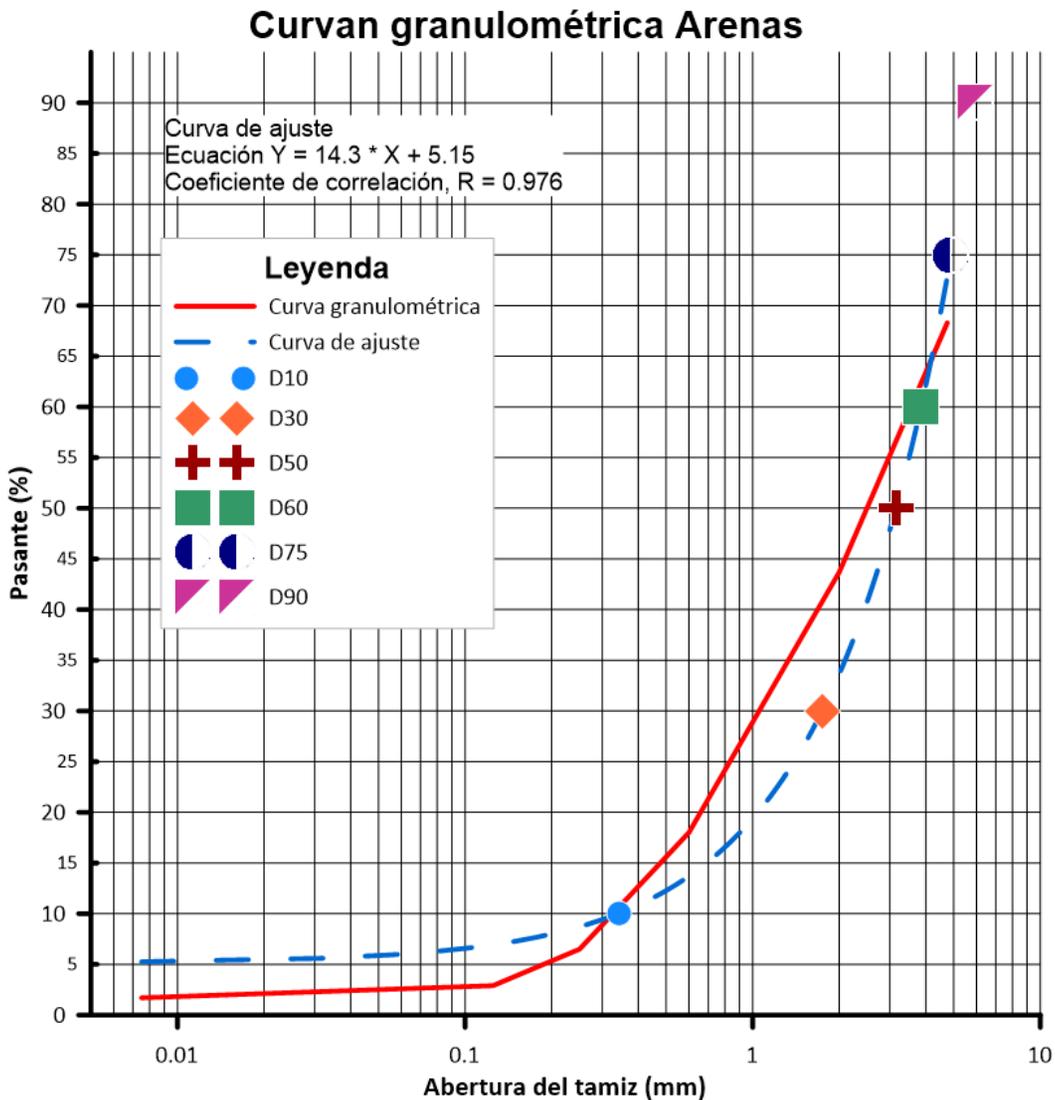


Figura 28. Distribución granulométrica gruesa SR

Granulometría fina SR

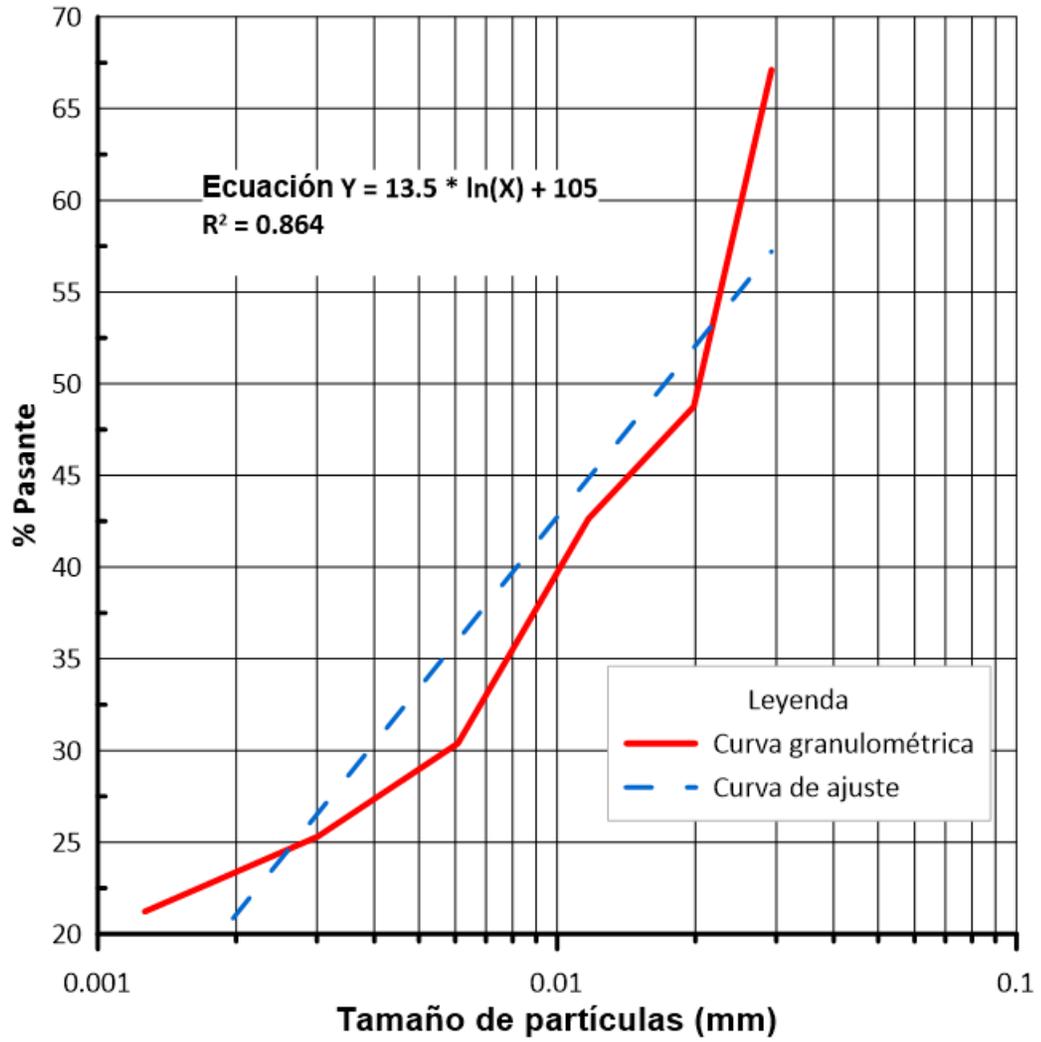


Figura 29. Distribución granulométrica fina SR.

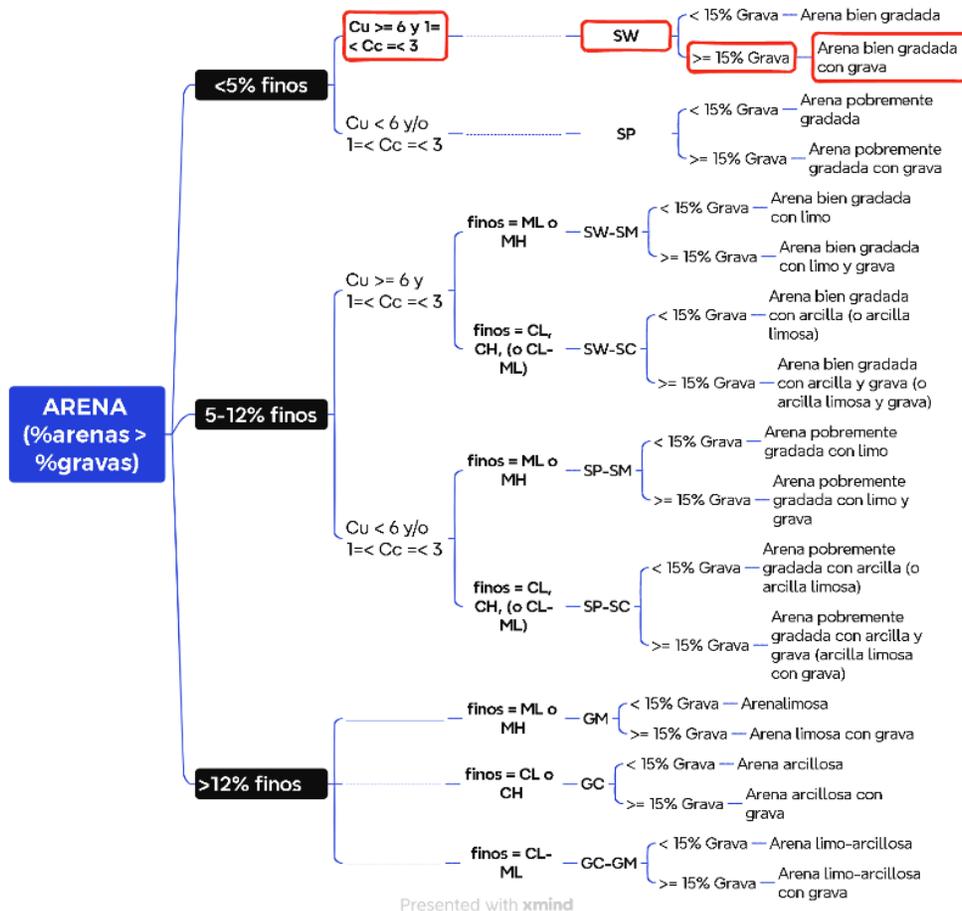


Figura 30. Sistema de Clasificación Unificada de Suelos para arena.

La curva granulométrica de la [figura 28](#) es clave para el diseño hidráulico. En el apartado [3.2.4](#) se definieron diversos parámetros para el diseño de canales, entre ellos: “n” de Manning, esfuerzo tangencial crítico y tangencial crítico permisible, los cuales se determinarán con las ecuaciones 40-43 para la “n” y 44 y 46 para el esfuerzo, el factor de seguridad será de 1,30 igual a los taludes de los bancos, ver sección [5.4](#) para mayor información. De acuerdo a lo anterior, estos valores corresponden a:

- $N = 0.018$
- $T_c = 4.28 \text{ N/m}^2$ y $T_{pc} = 3,27 \text{ N/m}^2$

Arcilla Amarilla

Esta clasificación se realizó con la [figura 33](#), la cual muestra que se trata de una arcilla arenosa de baja plasticidad **CL-S**. Es una arcilla porque el 54,4 % de la distribución es menor al tamiz nº200, debido al alto porcentaje de partículas de arena, 32 %, es una arcilla arenosa. Ahora bien, el tipo de arcilla es definido mediante otras dos propiedades: límite de líquido e índice de plasticidad; para el suelo en cuestión estos valores corresponden a: 27 % y 16,1 %, por lo cual se trata de una arcilla de baja plasticidad **CL**

(vea la [figura 35](#)), y debido a la gran cantidad de arena y al 13,6 % en contenido de gravas ([figura 32](#)), se convierte en una arcilla arenosa de baja plasticidad **CL-S**. La fracción fina se muestra en la [figura 31](#), indica que un 26 % son limos; 20,8 % arcillas; y, 35 % de partículas coloidales.

La gravedad específica de este suelo es de 2,64 g/cm³, la cual se encuentra por debajo de los valores obtenidos por otros laboratorios en el estándar utilizado, y de los valores teóricos consultados en la bibliografía.

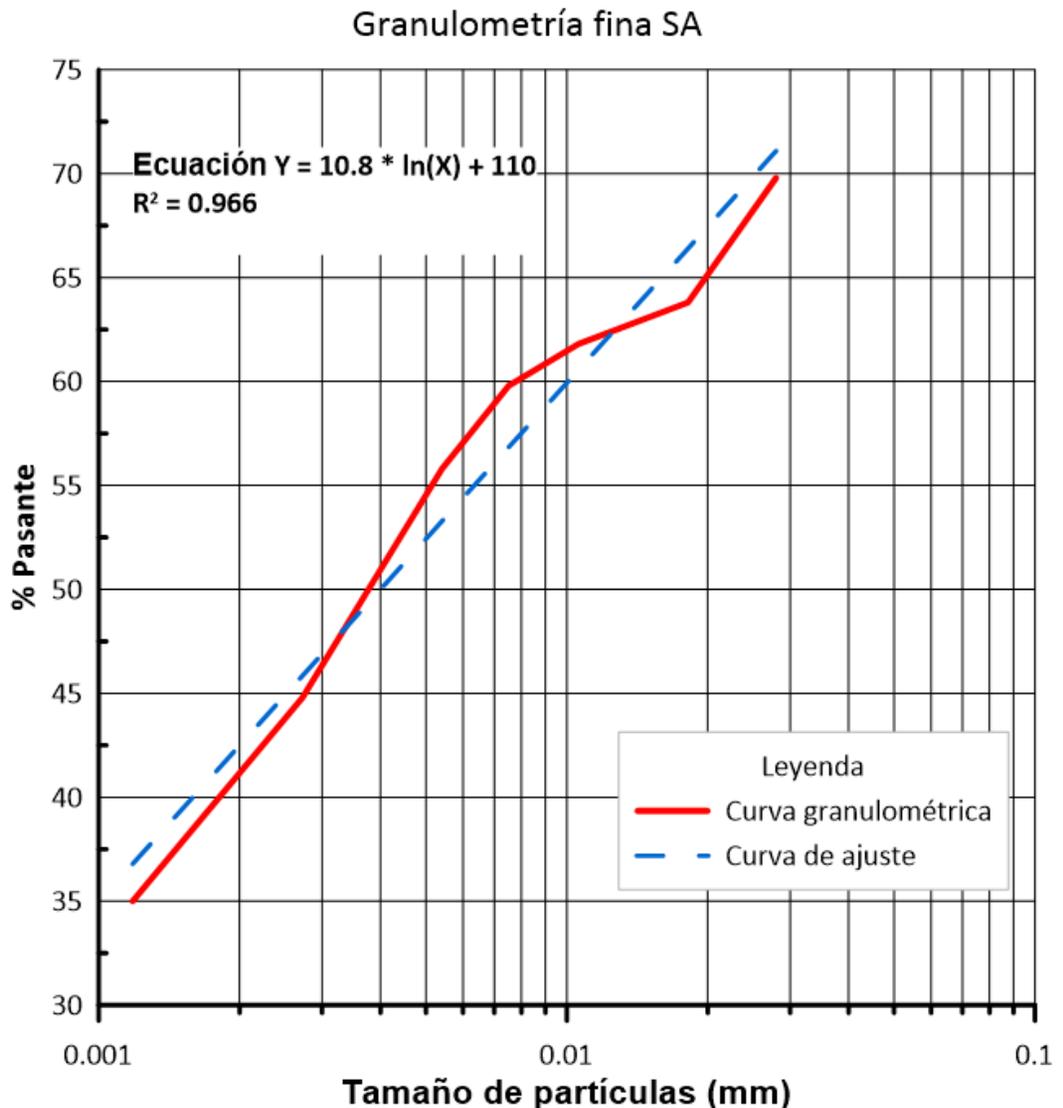


Figura 31. Distribución granulométrica fina de arcilla arenosa CL

Granulometría gruesa Arcilla arenosa

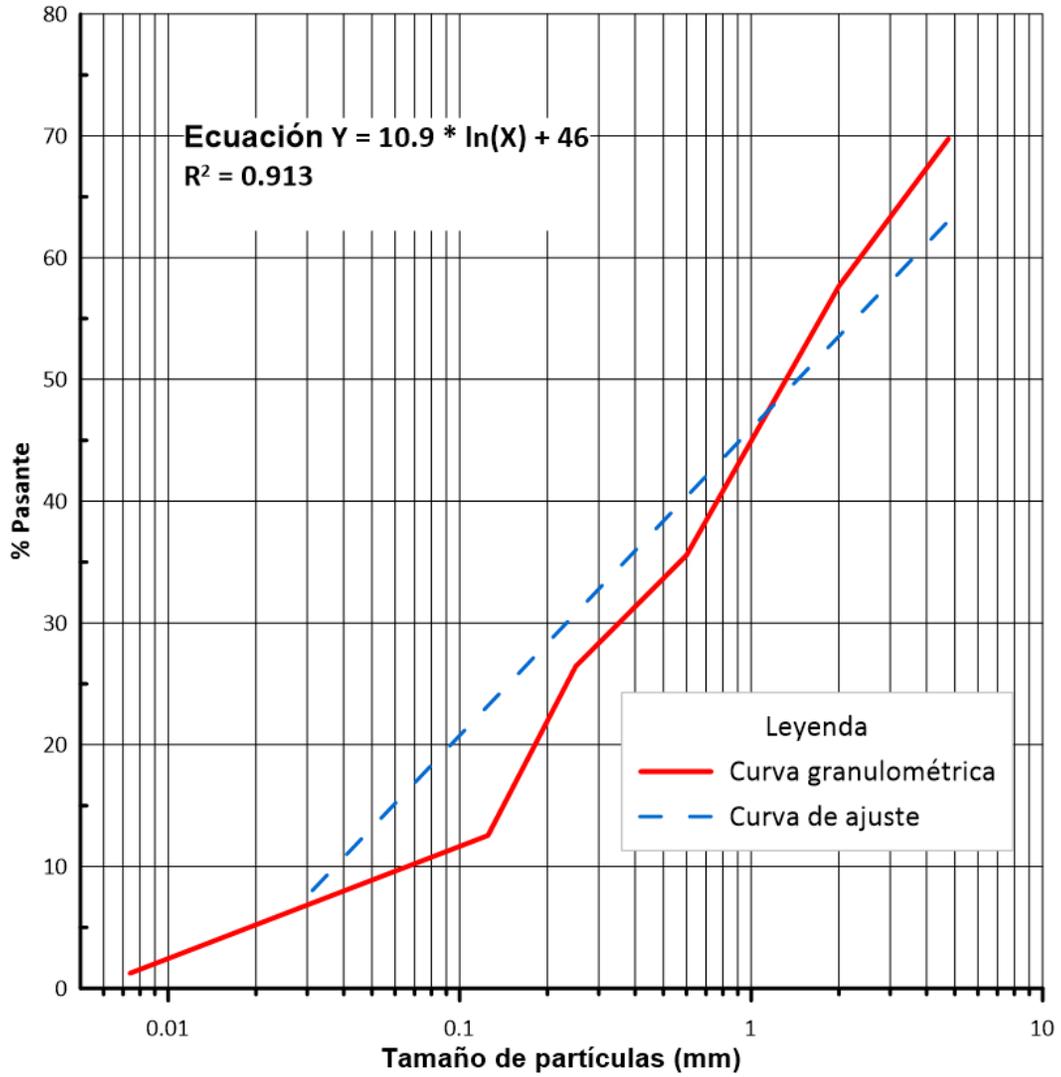


Figura 32. Distribución granulométrica gruesa arcilla arenosa CL-S.

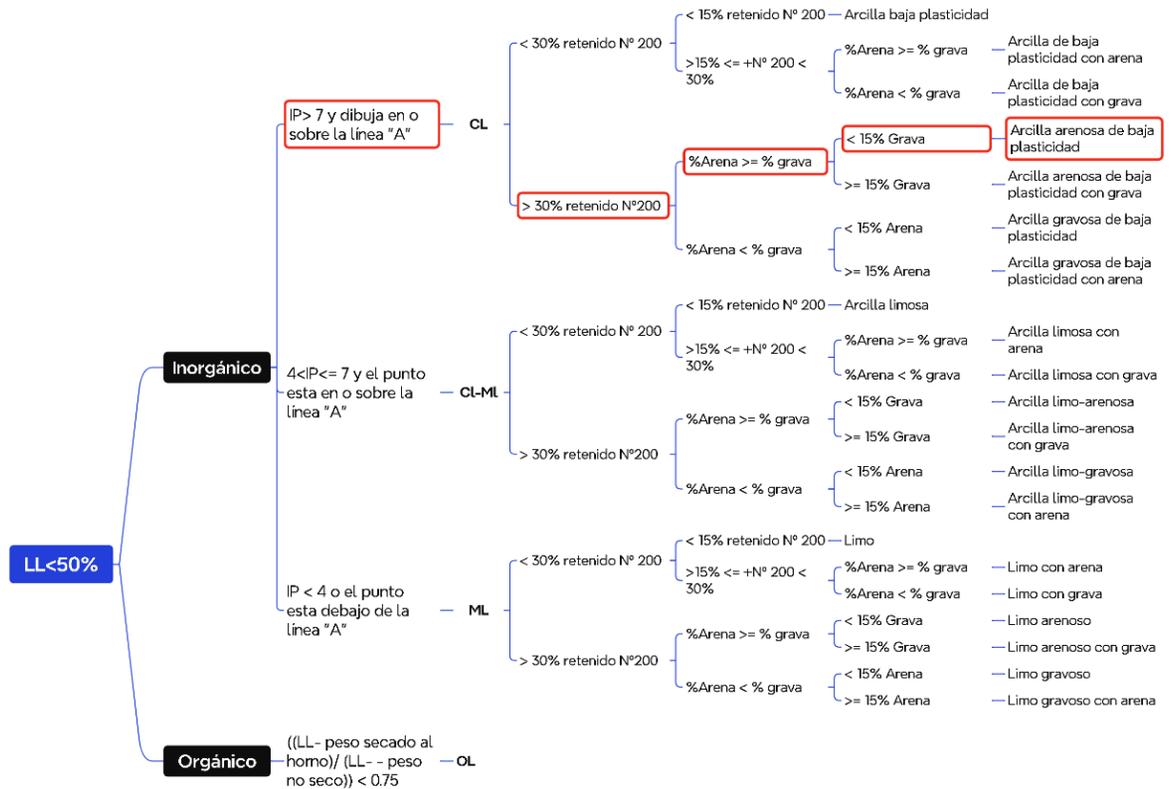


Figura 33. Sistema de Clasificación Unificada de Suelos, grano fino.

Arcilla Blanca

Este suelo es una arcilla de alta plasticidad del grupo **CH** según la clasificación del SUCS. Su granulometría se ensayó sólo por medio fino; los resultados indican: 24 % de limos, 34,8 % de arcillas y 36 % de partículas coloidales (figura 34). Por otra parte, los límites de Atterberg fueron: líquido = 53,43 %, plástico = 22,15 % e IP = 28, del gráfico en la figura 35 el y el diagrama de flujo en la figura 36 este suelo es una arcilla plástica **CH**. El ensayo de gravedad específica arrojó un valor de 2,65 g/cm³, lo cual indica también que es una arcilla del grupo **CH**, de acuerdo al estándar trabajado

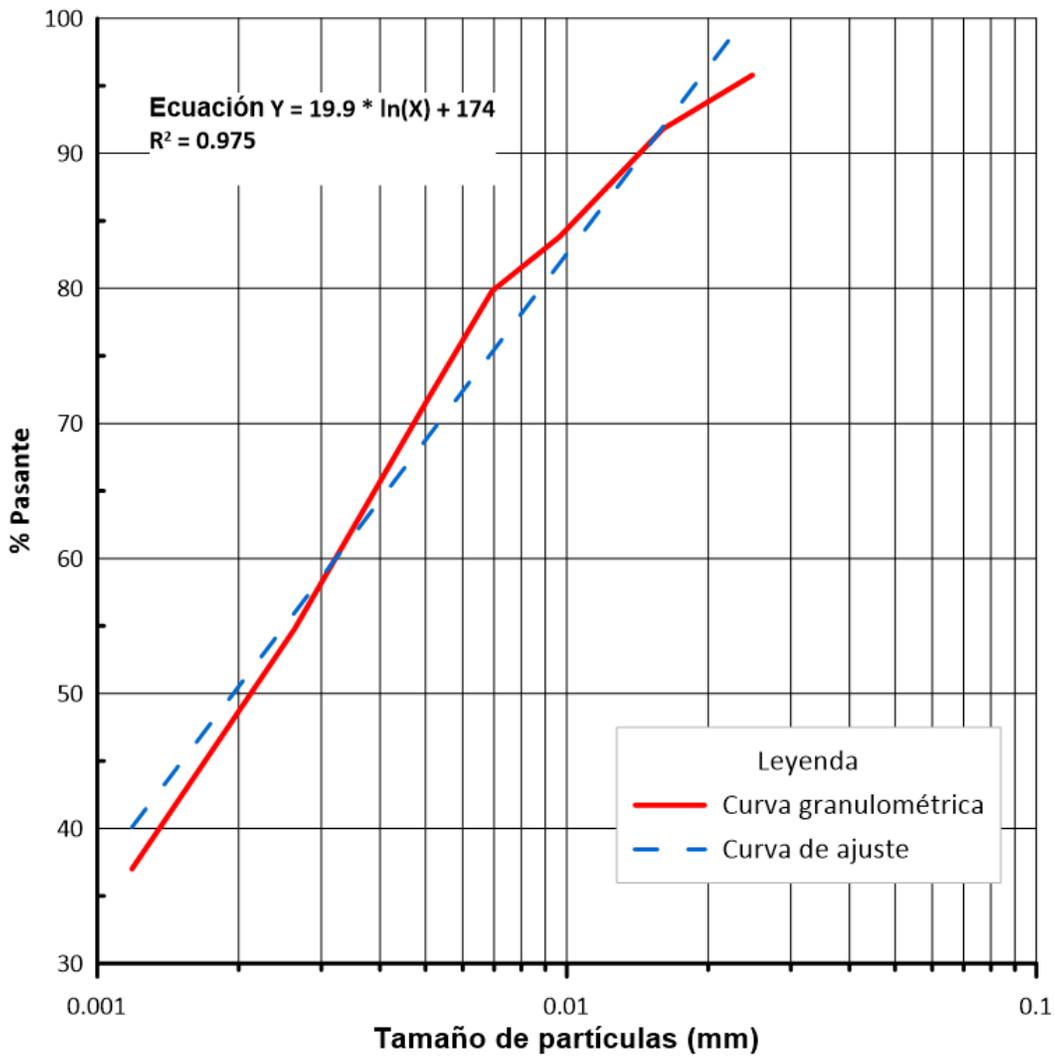


Figura 34. Distribución granulométrica SB.

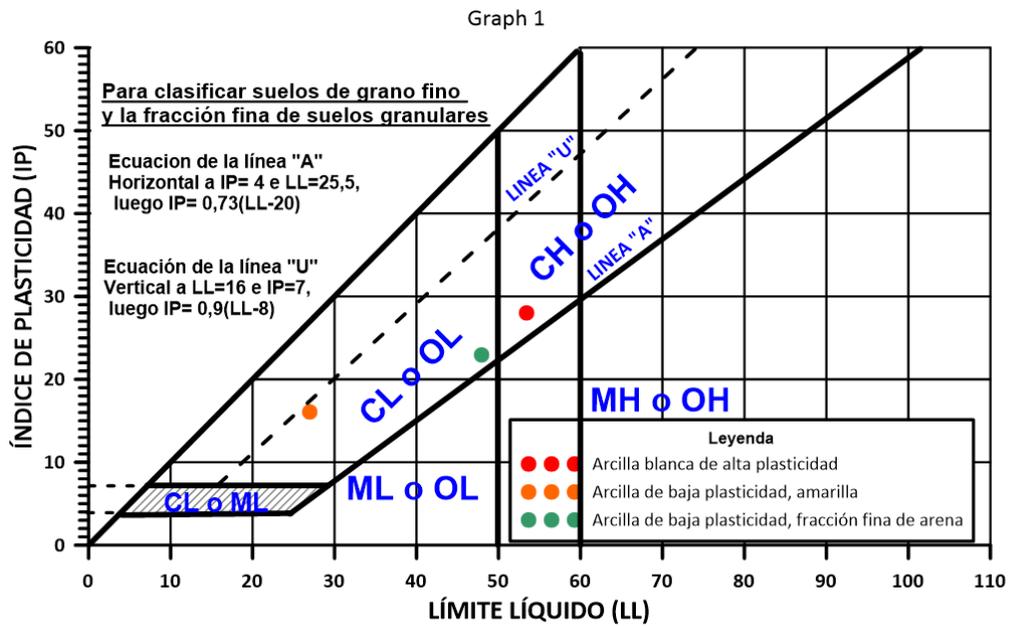


Figura 35. Límite líquido vs Índice de Plasticidad

Tabla 10. Propiedades mecánicas de deslizamiento y permeabilidad de los suelos.

Tipo de Suelo	Permeabilidad (cm/s)	E.T permisible N/m ²	N de Manning	Índice de vacíos	Peso unitario (KN/m ³)	Cohesión efectiva (kPa)	Fricción interna efectiva(°)
SW-G	0.001-0.00009 (*)	4	0,018	0,65	15,5	1.95	28.7
CL-S	0.00001-0.0000009 (*)	3	0,025	0,55	16,7	14.73	24.49
CH	<0.0000009 (*)	30	0,04	(-)	(-)	103 (*)	20 (*)

* significa que son valores teóricos, los demás experimentales
E.T= Esfuerzo tangencial

Posibilidad de expansión de los suelos

La expansión es un fenómeno que ocurre en suelos arcillosos; comprende el aumento de su volumen, cuando absorbe agua. Esto depende de la composición mineralógica que tenga. Suele aproximarse mediante el índice plástico y la fracción de arcillas del suelo, cuyos valores típicos se muestran en la [tabla 12](#). Considerando las tablas [11](#) y [12](#), con el gráfico de la [figura 37](#) tienen una capacidad de hincharse hasta un 5 %.

De acuerdo a esta gráfica, los suelos serán más o menos expansivos de acuerdo a su composición mineralógica. Los elementos químicos de un suelo forman enlaces, los cuales tienden a tener espacios entre sí, según el tamaño de las moléculas; moléculas más grandes generan mayores espacios. El agua se posiciona en estos agujeros.

Para valores más precisos es necesario realizar ensayos específicos para esa propiedad. En este aspecto (Angelone & Zapata, 2018) nombran a los ensayos: Hinchamiento libre, presión de hinchamiento, prueba VSR.

Tabla 11. Índice de activación de las arcillas

Índice de Activación (IA)			
Suelo	IP	Finos (%)	IA
Arcilla de baja plasticidad	30,63	42,5	0,721
Arcilla de alta plasticidad	28	50	0,560

Tabla 12. Valores típicos del índice de activación. (Budhu, 2015)

Descripción	Índice de Actividad (IA)
Inactiva	<0.75
Normal	0.75–1.25
Activa	1.25–2
Muy (altamente) activa (e.j., montmorillonita o bentonita)	>6

Descripción	Índice de Actividad (IA)
Minerales	
Caolinita	0.3–0.5
Ilita	0.5–1.3
Na-montmorillonita	4–7
Ca-montmorillonita	0.5–2.0

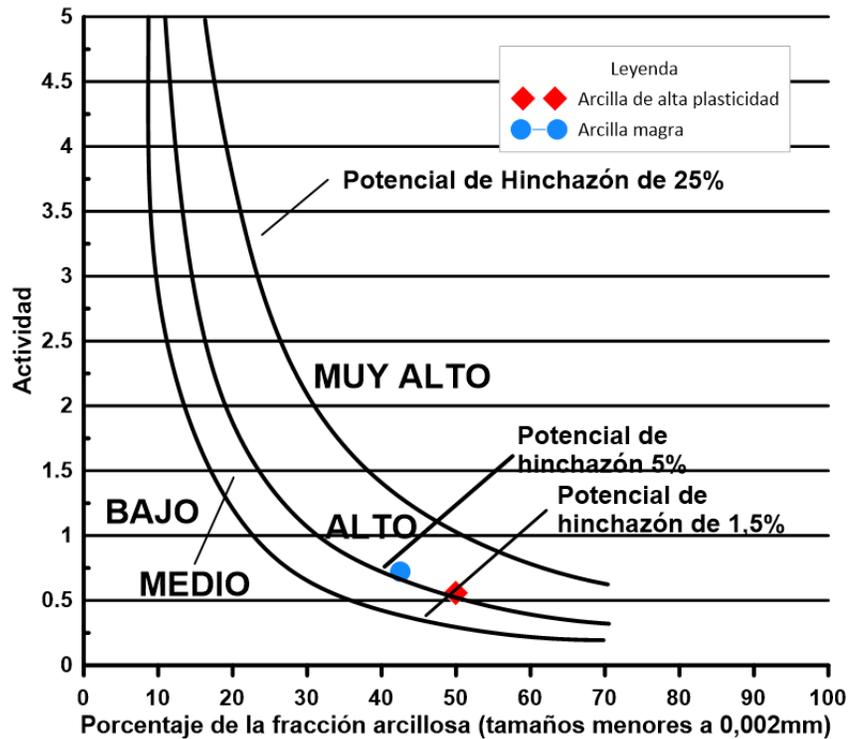


Figura 37. Grados de actividad eléctrica de la arcilla. (Angelone & Zapata, 2018)

5.2. Caracterización geomecánica de arcillas y suelos

En este apartado se puntualiza que el tipo de falla es circular debido a como se presenta el material: suelo seco, a excepción de dos puntos particulares.

El frente de explotación se compone prácticamente de suelos; bien los tipos de falla en este estado son diversos, aun así, debido a que el material es mayormente arcilloso se espera que la falla sea circular.

5.2.1. Características generales del afloramiento

Acceso

El frente del afloramiento se encuentra al suroeste del pueblo de Sanare (CC: 428567.22 E, 1078150.33 N); se llega por la carretera marcada en azul (4,50 km aprox.), este es su único acceso (ver [figura 38](#)). El afloramiento puede dilucidarse en la [figura 39](#), se divide en 3 bancos de: 6 m, 12 m y 6 m; fue excavado por la empresa Balgres inicialmente.

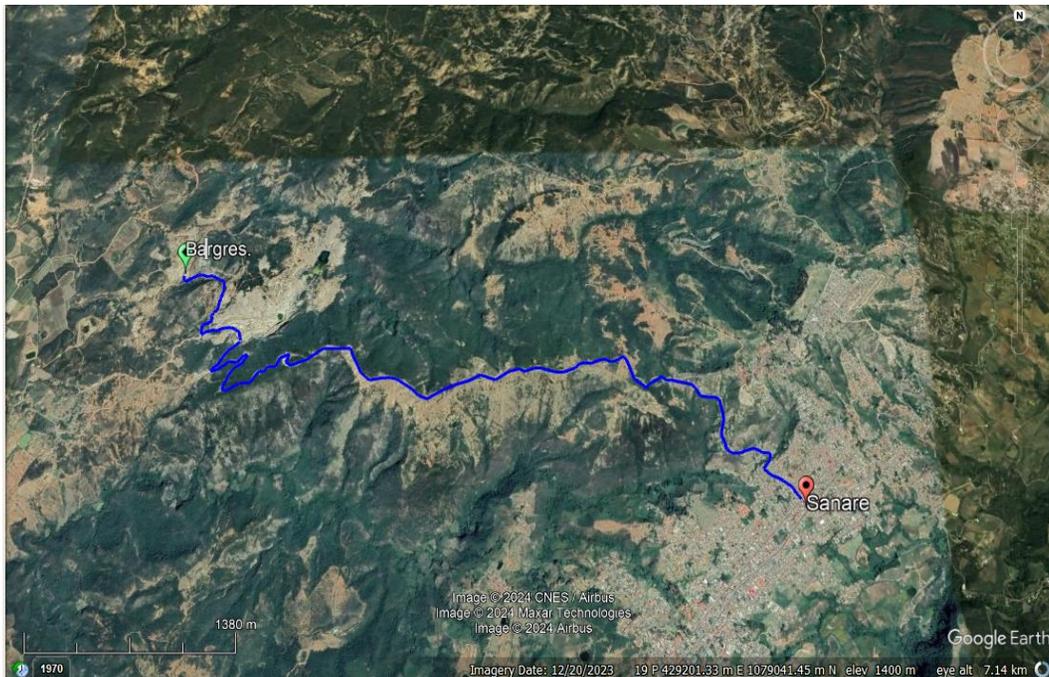


Figura 38. Acceso al frente de explotación Balgres. (Google, 2021)



Figura 39. Frente de explotación, vista panorámica Distribución litológica

El apartado [5.1](#) demostró los distintos suelos que existen. Estos se distribuyen de 3 formas en el frente, denotando tres zonas: Sur, Central, Norte. En los títulos siguientes se profundiza cada una de ellas.

Zona Sur

Aun cuando las arcillas son mayoritarias, en esta zona el tipo de falla es un deslizamiento superficial. Esta zona está compuesta de las arenas y arcillas, si revisa la [figura 40](#) verá que existe una cantidad de arcillas mayor que de arena y que ambas están en contacto claramente. Debido a la presencia mayoritaria de arcilla se esperaría una falla circular, sin embargo, el arrastre que ha generado el agua ha dejado a la arena en un estado suelto, en este estado la más mínima acción mueve el material, en contraste, las arcillas aún son capaces de mantenerse cohesionadas. Entonces, debido a la diferencia entre el estado de los materiales, esta sección es más propensa a deslizamientos someros.

Las fallas en suelo podrían no ser las únicas, sería necesario estudiar el frente mediante mecánica de rocas. En la zona también se encontraron algunos esquistos con vetas de cuarzo, los cuales no se visualizan hasta ver la falla en la Zona Norte; estos esquistos abren la posibilidad a fallas de tipo: planar y cuña, los cuales tienen un análisis diferente. Lo que puede abrir la posibilidad de estudio es el área que ocupe la roca en el frente de explotación: en un primer escenario, si aflora sólo en áreas pequeñas no sería necesario realizar tal estudio, recuerde que la razón por la cual se han seleccionado las fallas en suelo es por la gran extensión que tienen en el frente, si esta distribución no cambia notablemente se puede continuar con las mismas asunciones. En cambio, si las rocas tienen un rastro continuo y una extensión considerable, es obligatorio estudiar las discontinuidades que pudieran presentarse.



Figura 40. Zona Sur del Sector

Zona Central

Descripción

Los dos primeros taludes se componen de la arcilla de baja plasticidad, por encima de ellas se sitúan las arenas bien gradadas y por debajo, arcillas de alta plasticidad. A diferencia de la zona anterior, el contacto entre los estratos es horizontal. Aguas arriba, a cota 1130, se visualizó una estructura mayor de $N61^{\circ}E31^{\circ}S$, 5 m de longitud y profundidad de 1.5 m; (Álvarez, 2006) la clasificó como una falla inversa, denotando que la zona estuvo sometida a esfuerzos compresivos. Por otra parte, las cárcavas profundas (1-4m) demuestran la influencia del agua de escorrentía e implica lo siguiente: la pendiente del terreno se dirige hacia el frente de explotación. En la [figura 41](#) se dilucidan las cárcavas y en la [figura 42](#), la abertura de la falla.

Análisis

A diferencia de la Zona Sur, en la Norte se esperan fallas circulares profundas. En esta zona las arenas están compactadas, se puede caminar sobre ellas sin hundirse; y tampoco existe un rastro de deslizamiento somero, por lo cual poseen cierta estabilidad. Por otra parte, el estrato infrayacente (ver [figura 43](#)) a las arenas corresponde a las arcillas de baja plasticidad, recordando lo que indica la teoría, las razones por la que ocurre las fallas profundas atienden a las propiedades mecánicas que controlan el deslizamiento: mientras menor sea el ángulo de fricción interna y cuanto más cohesiva,

más profunda la falla (ver [aspectos de falla circular](#)) Como no se han avistado algún deslizamiento somero en el estrato superior y el material infrayacente es cohesivo y con bajo ángulo de fricción, se espera que la falla sea circular.

Aparte de la inexistencia de deslizamientos someros, los suelos tienen ángulos de fricción interna bajos, y en el caso de la arcilla, cohesión; para superar la resistencia que oponen los materiales es necesario una mayor fuerza, la cual sólo incrementa con el peso, que ocurre aumentando la profundidad (más sobre esto en aspectos de falla circular), bajo este mecanismo es que las fallas en arcillas y materiales parecidas son profundas.



Figura 41. Zona Central



Figura 42. Falla inversa en el sector. La brújula y los lentes apuntan hacia el norte

Zona Norte

En la zona norte se pierde de vista la forma de los taludes que vienen de la zona central, sólo la franja del primero se mantiene visible. El resto lo cubren las arenas. Ver [figura 43](#)

En esta zona se espera igual a la anterior una falla circular, por las mismas razones: no hay señales de deslizamiento somero, y las arcillas constituyen la mayoría del estrato.



Figura 43. Zona Norte

5.2.2. Falla como grieta de tracción

La falla inversa no representa un riesgo para la estabilidad de los taludes. En primer lugar, las direcciones de buzamiento son opuestas, mientras la falla buza hacia el sur, los taludes lo hacen al norte, lo cual elimina la posibilidad de deslizamientos similares a la falla planar, Aunque es cierto, la falla podría recargarse de agua, y presionar las paredes, no sería suficiente para obligar a los bloques a separarse, las grietas de tracción si se separan, por tanto, no actúan como estas grietas.

La presencia de esquistos en la falla y en la Zona Sur, podrían afectar a los análisis de estabilidad. Se ha considerado analizar la estabilidad de los taludes como un suelo, pues es de lo cual está compuesto prácticamente todo el frente, sin embargo, los esquistos podrían sugerir estudios de la mecánica de rocas; es algo que deberá evaluarse durante el desarrollo del frente.

5.2.3 Condiciones para el análisis de estabilidad

Como se ha descrito hasta ahora, el frente de explotación se compone prácticamente de suelos, y 2 de las 3 zonas se espera que las fallas sean circulares. Para fallas más someras se emplea el método de Janbu y para las profundas el de Bishop modificado; Slide no puede emplear ambos al mismo tiempo, por lo cual se debe ajustar el problema para uno sólo, debido a que en la mayoría del Sector se espera una falla circular el método de Bishop es el adecuado. Se analizarán los taludes en un estado seco, pues es como se encuentran, en cuanto a los demás datos, debe referirse a la sección anterior y a la [5.4](#).

5.3. Sistema natural de drenaje en la cantera

El análisis de este sistema tiene un objetivo: estimar el caudal para el diseño del drenaje superficial. Este parámetro depende de 3 factores: tipo de suelo, topografía y clima (precipitación). El tipo de material ya se caracterizó en la sección 5.1, de la cual se concluyó que existen arcillas y arenas, siendo las arcillas impermeables y las arenas permeables. El segundo factor sí no ha sido determinado; comprende la caracterización de las cuencas en el sector a través de: su área, pendiente, altura media, cauces. El tercero, engloba el comportamiento de la precipitación: cuándo llueve y con qué

intensidad lo hace. Con los factores se establece un diagrama de comportamiento de los caudales, conocido como hidrograma de crecidas

5.3.1. Cuencas

Las cuencas engloban el factor topográfico, conocerlas permite saber: dónde se concentra el agua, en qué dirección drena e inclusive dan una aproximación del tiempo de recorrido entre el inicio y final del cauce. Por ejemplo, en la [figura 44](#), se muestran las dos cuencas en el Sector, una al norte y otra al sur; la primera de ellas comienza desde un cerro de cota 1164 msnm y finaliza en una planicie de cota 1098 msnm, este desnivel dirige el agua hacia el noroeste de la zona, la cual se acumula en el centro de la cuenca debido a la predisposición que tienen las pendientes del terreno, la derecha de la cuenca dirige el agua hacia el oeste y la izquierda al este, formando una “V” y un cauce de 515 m en la intersección, el tiempo le toma al agua recorrerlo puede verse en la [tabla 13](#) como tiempo de concentración. En la cuenca 2 se forma una “V” también, sin embargo, lo hace con un cambio topográfico más marcado: un valle formado por dos cerros, donde el primero es el mismo que la cuenca anterior, y el segundo esta al sur de éste; la cuenca es más grande, y tiene un cauce mayor longitud (870m), ve la [tabla 14](#) para mayor información y el [mapa topográfico](#) para una mejor visualización

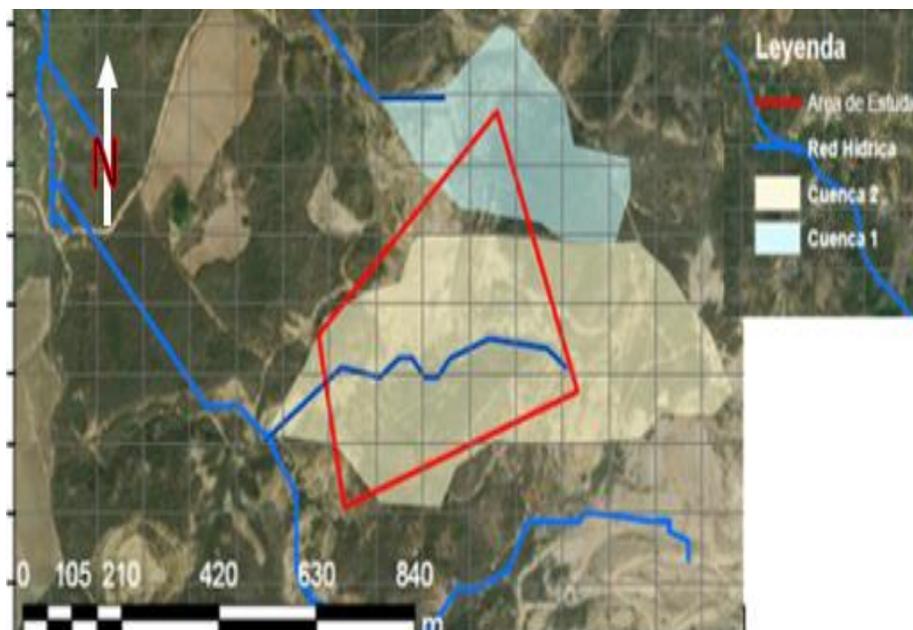


Figura 44. Cuencas hidrográficas en El Yeso

Tabla 13. Parámetros geomorfológicos de la cuenca 1

PARAMETROS	UND	CUENCA
Superficie total de la cuenca	km ²	0.090
Perímetro	km.	1.378
Desnivel total de la cuenca	km.	0.0794
Altura media de la cuenca	msnm.	1124
Pendiente cuenca	%	17.5%
Tiempo de Concentración	min.	14.9

Tabla 14. Parámetros geomorfológicos de la cuenca 2.

PARAMETROS	UND	CUENCA
Superficie total de la cuenca	km ²	0.248
Perímetro	km.	2.339
Desnivel total de la cuenca	km.	0.0918
Altura media de la cuenca	msnm.	1129
Pendiente cuenca	%	18.5%
Tiempo de Concentracion	min.	28.9

5.3.2. Precipitación

Se modela a través de una gráfica indicando el valor pico de precipitación en un periodo de tiempo determinado. Su construcción es un proceso que comprende: la adquisición y completación de datos de estaciones pluviométricas, la depuración de datos dudosos, modelamiento probabilístico de la serie, construcción de las curvas IDF y construcción del hietograma a partir de estas curvas.

Registros

Los datos empleados fueron tomados de las tres estaciones meteorológicas de la [tabla 15](#). Cada estación pluviométrica tiene sus datos divididos en intervalos de 15 minutos, 30 minutos, 1, 2, 3, 6 9, 12 y 24 horas, a cada intervalo de las estaciones le faltaban al menos 12 registros; la completación de los registros se llevó a cabo únicamente en la estación Sanare, porque es la más cercana al Sector (aproximadamente 4,50 km), la metodología aplicada fue la siguiente:

Llenar la mayor cantidad de datos mediante el método del US Weather Service (ver [aquí](#))

En caso no se pueda aplicar el método anterior, se procede a completar los años que tengan hasta 2 registros vacíos (máximo) mediante un promedio, esto es, si falta el mes de agosto de 1995, promediar la precipitación del mes de agosto de los otros años disponibles. Cuando el método anterior no pueda ser aplicado, seguir con el método racional deductivo ([aquí](#)). Como resultado se obtiene cada serie completa.

Tabla 15. Estaciones meteorológicas empleadas. (INAMEH)

Estación	Serial	Norte (m)	Este (m)	Altitud (msnm)	Periodo (años)
Sanare	2234	1077012	427974	1330	1971-2000
Tocuyo Dos Cerritos	2268	1077263	411491	644	1969-2000
Quíbor	2204	1091642	439241	1070	1975-2000

Datos dudosos

En ocasiones, las series tienen datos de comportamiento “extraordinario”, esto son precipitaciones muy altas o bajas, que no siguen la tendencia de los años anteriores, en cuyo caso deben ser debidamente documentadas, en otras situaciones, estos eventos representan errores de medición. Para verificar si existió algún imprevisto, se empleó el método de [datos dudosos](#); se descubrió un registro alto en septiembre de 1974 de las series: de 15 minutos, 30 minutos, 1 hora y 2 horas en la estación Sanare, el tratamiento para este caso fue eliminarlo, y luego sustituirlo por el máximo siguiente, en la [figura 45](#) puede ver este dato. Este procedimiento se aplicó para todas las series, los resultados finales pueden verlos en el [anexo II](#)

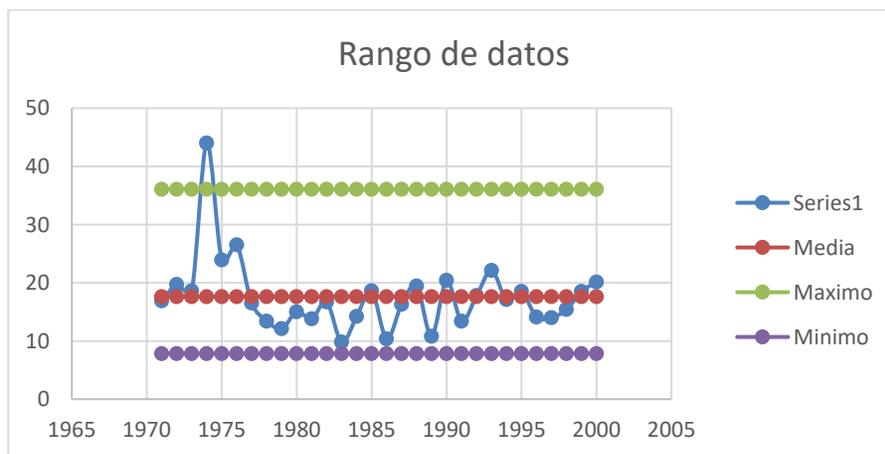


Figura 45. Dato fuera de la serie de 15 minutos año 1974, estación Sanare

Modelamiento Probabilístico

Este modelo se aplicó porque se necesitan valores de intensidad de periodos de retorno mayores a 30 años, debido a la probabilidad de falla que tienen las obras y el tiempo de vida de la cantera (más sobre esto en las secciones 5.4 y 5.5). Los modelos empleados fueron discutidos en [análisis probabilístico](#) del marco teórico. Ahora bien, la selección de la distribución probabilística depende de una comparación entre los valores de la Dmax calculada, buscando aquella con la menor distancia posible; la distancia entre puntos se estima mediante la prueba de [bondad](#), realizada con el software Hydrognomon 4. Los resultados se encuentran en la [tabla](#) 16. Se indica que el tipo de distribución no es igual para cada una de las series, por ejemplo, la LogPearson es mejor para la serie de 24 horas, pero no para la de 9 horas.

Tabla 16. Resultados de la prueba de bondad Kolmogonov-Smirnov

Series (horas)	24	12	9	6	3	2	1	30 minutos	15 minutos
Distribución									
LogPearson tipo III	0.0593	0.0898	0.113	0.0781	0.0699	0.067	0.105	0.0800	0.0773
Gumbel	0.0669	0.0816	0.108	0.0834	0.0769	0.0785	0.128	0.102	0.0947

Las distribuciones abren paso a una construcción preliminar de las curvas IDF como, por ejemplo, la de periodo de retorno de 25 años en la [figura](#) 46. Sin embargo, las curvas tienen una duración mínima de precipitación de 15 minutos debido a que la estación tiene datos a partir de 15 minutos, en caso se requiriera conocer el comportamiento anterior a ese tiempo, no sería posible. En este sentido debe realizarse una extensión de la curva, para hallar las duraciones de 10 y 5 minutos.

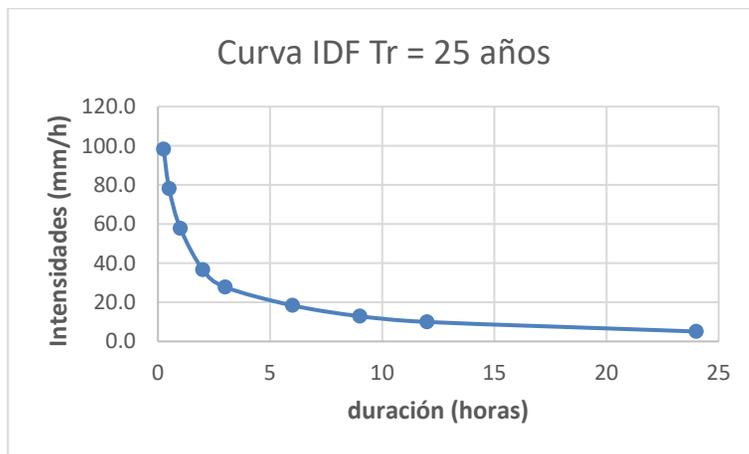


Figura 46. Curva de Intensidad-Duración-Frecuencia Tr= 25 años.

Las extensiones siguen el procedimiento [analítico](#) el cual da una ecuación como resultado. Para este método se tomaron las intensidades de: 24 horas, 2 horas y 15 minutos, porque de lo contrario la ecuación proyectaría erróneamente los valores extremos, por ejemplo, si hubiera tomado los puntos en 15 minutos, 30 minutos y una hora, la ecuación extiende las intensidades con valores por debajo a los medidos, en el caso inverso (valores 9,12, 24 horas), ocurre de igual manera.

Si recuerda la teoría, la curva está representada para tres índices: b , m y Δt se muestran, los valores esta para periodo de retorno en la zona de estudio se encuentran en la [tabla 17](#), a través de estas ecuaciones puede realizarse la extensión a cualquier duración de las curvas (que sea físicamente viable).

Tabla 17. Parámetros de la ecuación analítica para la extensión de curvas IDF

PARAMETROS DE ECUACIÓN						
Tr	logb	b	m	Delta t	Intensidad 5 min	intensidad 10 min
2	1.7	55.0	0.9	0.6	78.2	70.3
5	1.8	69.1	0.9	0.6	94.1	85.0
10	1.9	75.8	0.9	0.6	105.1	95.0
25	1.9	84.3	0.9	0.6	119.3	107.7
50	2.0	90.8	0.9	0.6	129.8	117.1
100	2.0	96.1	0.9	0.6	140.5	126.5

Intensidades de lluvia esperadas

De acuerdo a la [figura 47](#) la máxima intensidad para un periodo de retorno de 100 años es 200.87 mm/h; desciende con el tiempo hasta alcanzar el mínimo en la gráfica de 49.55 mm/h. Este comportamiento lo siguen los demás periodos, sólo con intensidades

menores. Las lluvias esperadas en el Sector dependen del tiempo de duración y el periodo de retorno seleccionado; en consecuencia, no pueden establecerse valores específicos hasta que no sean correctamente definidos. Con esto en consideración, se formuló una ecuación que modela el comportamiento de la intensidad de lluvia en la cuenca, su uso se remite a duraciones de 5 minutos a 24 horas y periodos de retorno no superiores a 150 años.

$$I = \frac{292.161 \times T_r^{0.1155}}{t^{0.563276}}$$

donde:

Tr= periodo de retorno (años)

t = duración (min)

I = intensidad de precipitación en mm/h

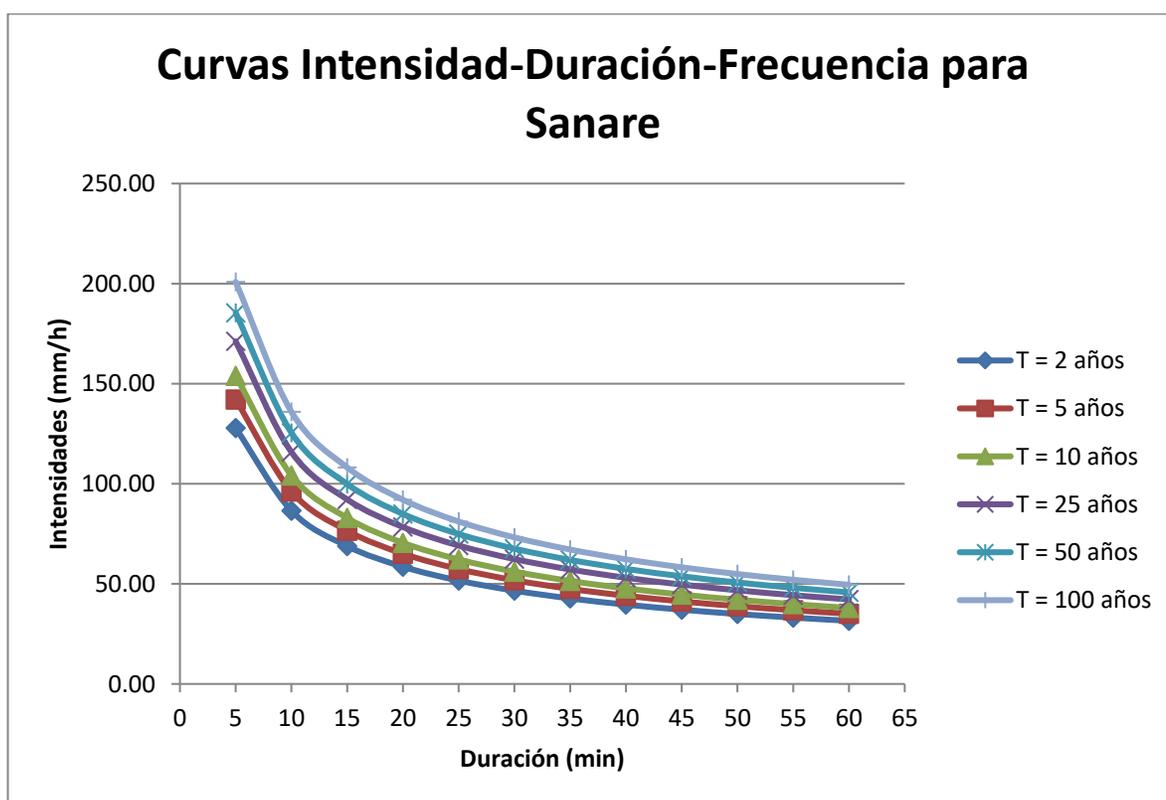


Figura 47. Curvas IDF de Sanare, en minutos

Temporadas de lluvia

En la [figura 49](#) puede visualizarse el comienzo de la temporada de lluvia: abril y mayo; disminuye la cantidad entre agosto y septiembre; luego, arrecia de octubre a noviembre.

Actualmente, la temporada de lluvias tiende a comenzar en el mes de mayo y finalizar en noviembre, en este sentido, continua la tendencia.

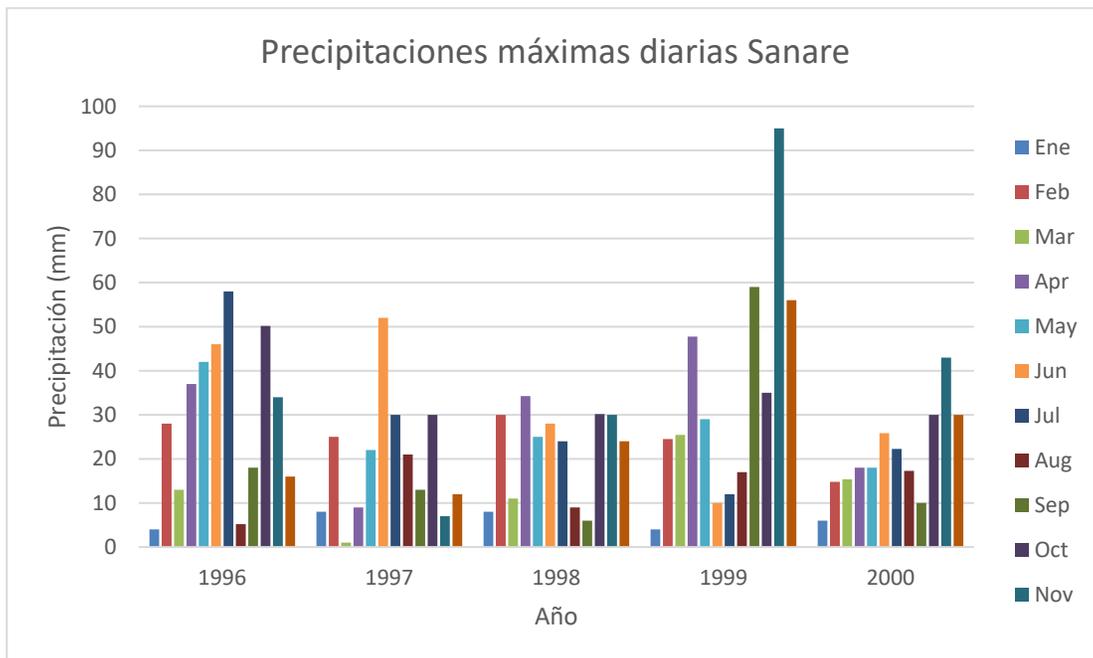


Figura 49. Precipitaciones máximas diarias Sanare. (INAMEH)

5.3.3. Lluvia de diseño

Periodo de retorno

El periodo de retorno se enlaza a la vida útil de los bancos de la cantera. En el diseño de obras hidráulicas el periodo de retorno se selecciona pensando en los daños sobre la obra, ocasionados por la ocurrencia de un evento de precipitación, pues si ella no puede cumplir su objetivo (inundación) se generan una serie de consecuencias a su entorno; por esto, para estructuras que deben durar mucho tiempo se escogen periodos largos, porque les permite soportar eventos de gran intensidad de lluvia, lo inverso también cumple: estructuras de corta duración necesitan periodos de retorno cortos. Para las obras hidráulicas de la cantera no se discute un periodo de retorno largo o corto, sino el necesario: aquel que asegure el funcionamiento de las cunetas de los bancos (por ejemplo) durante el tiempo de vida de la cantera. Ahora bien, los bancos no tienen un tiempo de vida fijo y las cunetas deben adaptarse a ello, cómo se adapte es un problema que se resuelve estableciendo primero el tiempo de vida que tendrá, y definirlo supone múltiples consideraciones que por ser complejas se tratarán en un apartado concreto.

Duración

La duración de la tormenta se une al tiempo de concentración de la cuenca (Dirección de Obras Hidráulicas, 2013). Este puede ser de hasta 2 veces este valor. Visualizando los resultados de las tablas 13 y 14, para cada cuenca estos valores serán: Cuenca 1, 30 minutos, Cuenca 2, 60 minutos.

5.4. Configuración de los taludes del frente de trabajo

La configuración del frente de trabajo depende de dos macro-factores: el diseño geométrico de los bancos y la dirección que se les dará para despejar el estéril encima del yacimiento. Bien es cierto, el diseño de los bancos conlleva dimensionar: la altura de los bancos, su ancho y los diversos ángulos de inclinación: del banco, entre rampas y de la excavación total; la selección no se realiza al azar, porque debe cumplir con: un drenaje adecuado del agua, un criterio de estabilidad y el objetivo a cumplir, en este caso evitar la contaminación del recurso. En segunda instancia, el rumbo de los bancos debe permitirle aflorar la mayor área posible de la capa de arcilla, lo cual se realiza eliminando la mayor capa de estéril.

El área de desbroce abarca un total de 32 hectáreas (ver [figura 50](#)); comienza en el nivel 1104 y finaliza en el 1140, justo antes de otro frente de explotación abandonado. Estos factores condicionan a los taludes en dos maneras: primero, el desnivel a descender son 36m; y, segundo, los bancos tienen que acoplar ambos frentes de explotación, en consecuencia, la dirección de desarrollo seguirá la línea de borde del frente abandonado aguas arriba. (puede verse en plano topográfico del [anexo V](#))

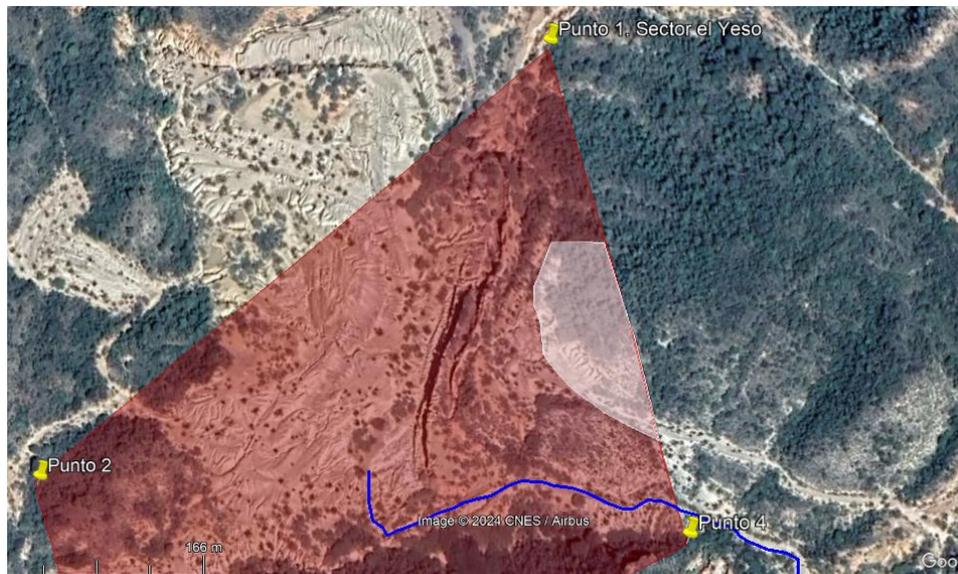


Figura 50. Frente abandonado. (Google, 2024). Nota. El frente está encerrado en el polígono blanco.

5.4.1. Criterio de estabilidad

El criterio de estabilidad se reduce a la selección del factor de seguridad, para obtenerlo es menester contextualizar todos los componentes que afectan a la estabilidad, y, también aquellos que se verán afectados en caso de la ocurrencia de una falla. Los que afectan a la estabilidad corresponden a: grado de los mecanismos de falla, tiempo de vida de los taludes y restricciones legales, estos buscando determinar el grado de confianza geológica y el tiempo de vida de diseño; los componentes afectados son 3: ambiente, obreros, la integridad de cantera para continuar operaciones, éstos buscan establecer las consecuencias que traería consigo un movimiento de tierra.

Situación del frente

Los taludes no son permanentes, pero tienen que permanecer estables durante el tiempo de vida de la cantera, 20 años, lo cual restringe el tiempo de diseño. Por otra parte, existe una restricción legal a la geometría del talud. Como se vio en el apartado [5.2](#), el conocimiento de la geología, estructuras mayores y tipos de falla está considerablemente limitado, en consecuencia, no se conocen todos los tipos de falla posibles en el yacimiento. Las consecuencias que puede causar una falla de alguno(s) taludes pueden ser: ambientales, laborales y económicas; contaminación de alguno de los cauces, daño a personas y pérdida de maquinaria y tiempo.

Vida de diseño

Un hecho que siempre prevalece es el siguiente: el tiempo de vida de un talud termina cuando es excavado. Para este proyecto, no se sabe exactamente cuando ocurre. Algo es seguro: los taludes del desbroce deben mantenerse estables, aún, cuando se explote el yacimiento; si el yacimiento requiere moverlos, ellos se moverán. No se puede decir que el tiempo de vida sea estrictamente el mismo que el de la concesión, sin embargo, ese es el máximo admisible ahora mismo. De esto, que el tiempo de vida se encuentre los 0,5 a 10 años de la 19.

El frente de explotación tiene el rango de vida de 0,5 a 10 años en [tabla 19](#), porque no se desea descartar la posibilidad de un frente unificado en el futuro, en el Sector existen dos frentes de explotación, donde el abandonado (de ahora en adelante FA) se encuentra al este del de interés. Ahora mismo, la explotación puede desarrollarse de dos maneras: banqueando la arcilla hacia el este o desarrollar al oeste; la primera opción implica dejar al FA atrás y unos bancos permanentes, lo que acarrearía: una pérdida de recursos; en el otro caso, se perfilarían los taludes hasta que desaparezca el estéril y aflore la arcilla blanca. En el primer caso los taludes serían permanentes (con vida mayor a 20 años) y en el segundo semipermanentes (0,5- 10 años). Para dejar abierta la posibilidad de desarrollar cualquiera de las soluciones, se asumirá un tiempo de vida de 0,5-10 años.

Restricciones legales

Existe una restricción legal a la altura de los taludes. La norma COVENIN 2497 restringe la altura de los taludes en arcilla y arena a 5 metros de altura.

Consecuencias de la falla

Las consecuencias de una falla pueden afectar fundamentalmente tres áreas: Ambiental, Negocio, Seguridad y Salud. Aunque no esté dentro de los alcances del proyecto determinar: velocidad, cantidad de material movido por la falla, área afectada; puede establecerse un posible escenario: en caso de una falla de la excavación total en estéril, la dirección que este seguiría es perpendicular a la cara libre: de frente hacia el cerro, de manera que no afectaría al cauce hacia el sur, y probablemente tampoco al que esta hacia el norte; en el peor de los casos, el material podría chocar con el cerro y seguir aguas abajo y alcanzar el cauce, sin embargo habría que comprobarlo; tomando el caso

en que esto no ocurra, realmente la falla de la excavación no afectaría al ambiente de alguna manera.

Desde el punto de vista del Negocio podría tener, cuando mucho, un retraso en las operaciones de desbroce. Existiría sólo maquinaria y operadores para el desbroce. No hay producción ni instalaciones que pueden verse afectadas por la falla de los taludes, por lo cual la consecuencia recae solo en remover el material movido.

Desde Seguridad y Salud, podrían ocurrir movimientos rápidos durante las operaciones, más habría que investigarlo. La precipitación es el principal causante de los movimientos de tierra; los cuales ocurren durante temporadas de lluvia cuando el material es erosionado, del resto se mantienen estables.

Tabla 18. Niveles de consecuencia según categoría. (Adams, 2015)

Categoría del Impacto	Nivel de Consecuencia				
	Insignificante	Menor	Moderado	Mayor	Catastrófico
Seguridad y Salud	Lesión de primeros auxilios (e.j. deslizamiento) Muy lento con Riesgo menor de seguridad)	Lesión con ayuda de hospital (e.g. Movimiento lento a moderado del talud donde las personas pueden exponerse a caídas de roca, peligros de grieta de tensión)	Lesión grave (LTI)	Pérdida permanente	Fatalidad (e.j. Cualquier falla con gente expuesta)
Ambiental	Contenido (e.g. falla contenido, sedimentos mínimos en el agua)	Impacto localizado (e.g. sedimento controlado por estructuras)	Impacto dentro de la mina (Falla de una pared alta contenido o dentro del pit)	Impacto puede ser remediado (e.g. derrumbe descontrolado)	Impacto severo (e.j. desborde o ruptura de diques de piscinas de lixiviación)
	Sin retraso, costos <	Retraso mínimo	Pérdida total \$100K	Pérdida total \$5M	Pérdida financiera total
Negocio	\$10K (e.j. falla pequeña fuera del area)	\$10 - \$100K (e.j. falla de taludes entre rampas)	- \$5M (e.g. Acceso principal destruido)	\$100M (Parálisis de producción por largos periodos)	> \$100M (falla grande para cerrar mina)

Con todo lo anterior se ha considerado la [tabla 17](#) para determinar el rango de factor de seguridad apropiado para el proyecto. Primero, los taludes tendrán un tiempo de vida de 0,5 a 10 años, aun no se saben si son permanentes, las consecuencias de falla son insignificantes a menores, y el grado de confiabilidad en este caso es bajo, en consecuencia, **el factor de seguridad adecuado a la situación es de al menos 1.3**

Tabla 19. Matriz de selección de factor de seguridad. (Adams, 2015)

Nivel de Consecuencia		Insignificante a menor			Moderado			Mayor a catastrófico		
		Alta	Medio	Bajo	Alta	Medio	Bajo	Alta	Medio	Bajo
Corte permanente o ladera natural	Min FS	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	1.5	1.4	1.5	1.6
	Tiempo de vida >10 años									
Corte o relleno	Min FS	1.2	1.25	1.3	1.2	1.3	1.4	1.3	1.4	1.5
	Tiempo de vida 0.5-10 años									
Corte o relleno temporal	Min FS	1.2	1.25	1.3	1.25	1.3	1.35	1.25	1.35	1.4
	(Tiempo de Vida <6 meses)									
Excavación para relleno inmediato	Min FS	1.05	1.1	1.15	1.1	1.15	1.2	1.15	1.2	1.25
	Tiempo de Vida <muchos días									

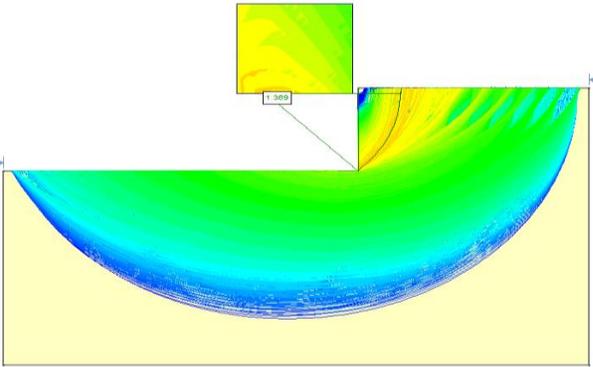
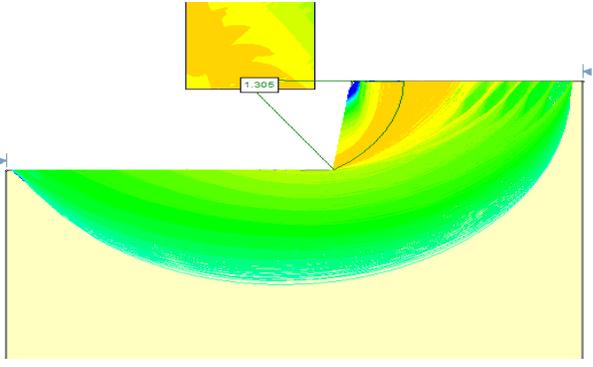
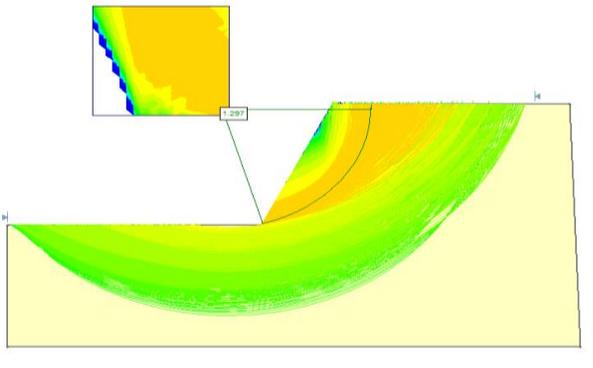
5.4.2. Alternativas de diseño

El diseño propone un problema complejo, el cual debe resolverse por fases. En esta primera etapa se aproxima una configuración de los taludes que cumpla con el segundo objetivo mencionado al comienzo de este apartado: los taludes deben permitir el afloramiento de la mayor área de la capa de arcilla. Luego, en la segunda etapa se somete la disposición determinada a posibles sistemas de drenaje para verificar si es viable; las alternativas del sistema de drenaje se tratan en un apartado propio igualmente. A continuación, se procede con la primera fase.

Estabilidad

Se buscaron alternativas evaluando la estabilidad bajo los parámetros establecidos en la [tabla 10](#) sobre taludes secos y el criterio anterior, empleando iteraciones sucesivas de ángulos, manteniendo una altura y los parámetros de los suelos, estas iteraciones terminaban al momento que el factor de seguridad era alcanzado. En la [tabla 20](#) y la [tabla 21](#) se muestran los resultados, denotándose que el ángulo de la cara disminuye con los incrementos de altura.

Tabla 20. Resultados de estudio de estabilidad en taludes de arcilla arenosa CL-S

Configuración	Comentarios
	<ul style="list-style-type: none"> • Altura: 3 metros • Angulo: 90 ° • FS = 1,369 • Superficie de falla en arcilla arenosa
	<ul style="list-style-type: none"> • Altura: 4 metros • Angulo: 82 ° • FS = 1,305 • Superficie de falla en arcilla arenosa
	<ul style="list-style-type: none"> • Altura: 6 metros • Angulo: 65 ° • FS = 1,297 • Superficie de falla en arcilla arenosa de falla en arcilla arenosa

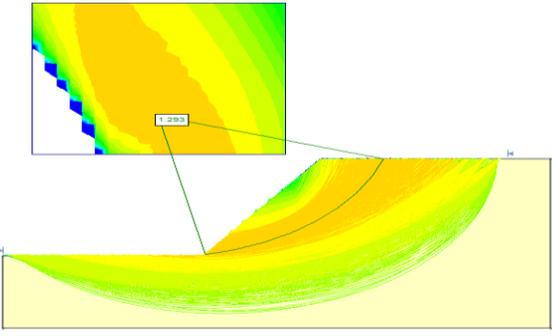
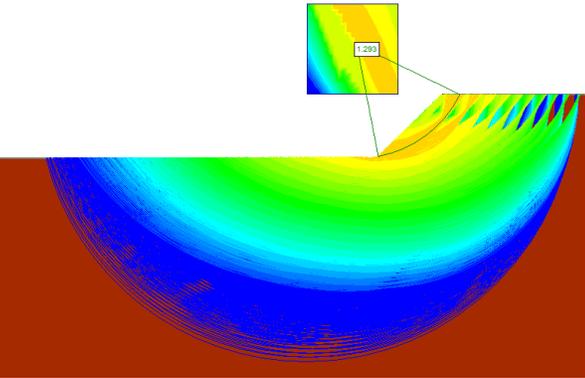
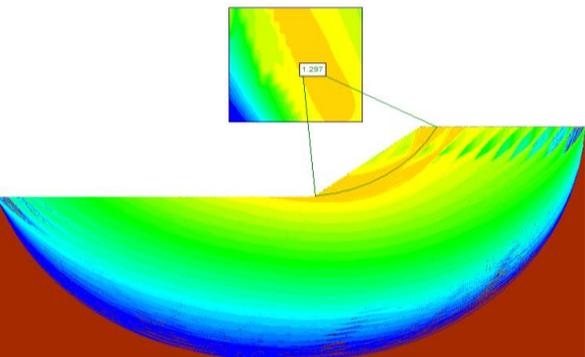
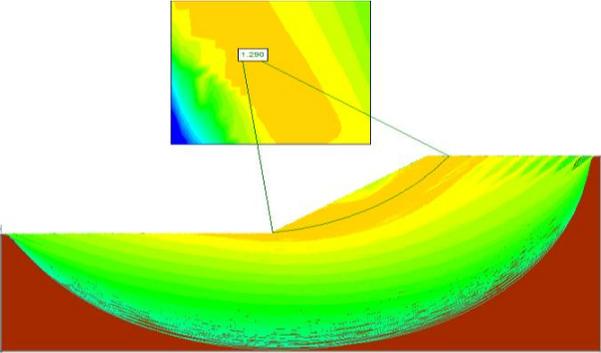
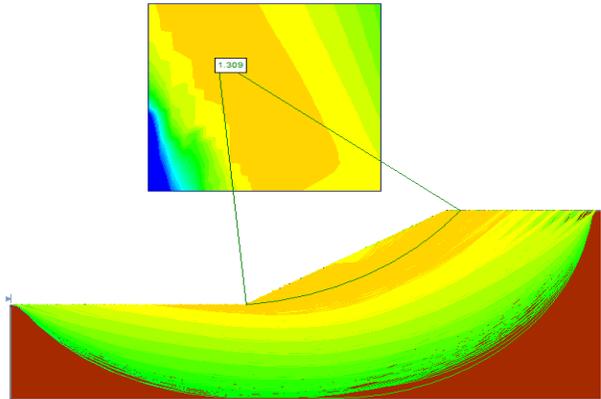
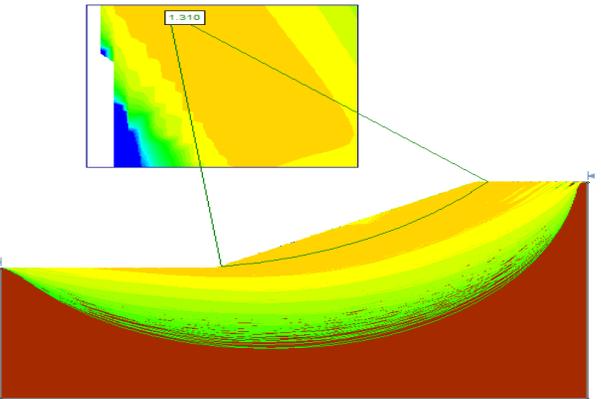
Configuración	Comentarios
	<ul style="list-style-type: none"> • Altura: 8 metros • Angulo: 54 ° • FS = 1,293 • Superficie de falla en arcilla arenosa

Tabla 21. Resultados de estudio de estabilidad en taludes de arena bien gradada con gravas SW- G

Configuración	Comentarios
	<ul style="list-style-type: none"> • Altura: 2 metros • Angulo: 44 ° • FS = 1,293 • Superficie de falla en arenas bien gradadas con grava
	<ul style="list-style-type: none"> • Altura: 3 metros • Angulo: 37 ° • FS = 1,297 • Superficie de falla en arcilla arenosa

Configuración	Comentarios
	<ul style="list-style-type: none"> • Altura: 4 metros • Angulo: 35 ° • FS = 1,290 • Superficie de falla en arcilla arenosa de falla en arcilla arenosa
	<ul style="list-style-type: none"> • Altura: 6 metros • Angulo: 31 ° • FS = 1,309 • Superficie de falla en arcilla arenosa
	<ul style="list-style-type: none"> • Altura: 8 metros • Ángulo de cara: 29 ° • FS = 1,310 • Superficie de falla en arenas bien gradadas con grava

Selección de dimensiones

La capa de arcilla aflora más mediante bancos altos con inclinaciones verticales/sub-verticales, porque no cubren tanto espacio; debido a esto, la selección entre configuraciones dependerá del recorrido que requieran.

La mejor configuración recorre la menor distancia horizontal. En el análisis se comparan los elementos de diferentes alturas de banco: ángulo, ancho de berma y su recorrido necesario. La combinación de la proyección horizontal del talud y el ancho de la berma

dan lugar al recorrido que requiere cada nivel para formarse; ella permite saber la posición final y el número de bancos que tendrá. Virtualmente, mayor cantidad de bancos recorren mayores distancias, lo cual reduce el espacio disponible del frente de explotación.

Caso arena

En el caso de la arena la mejor configuración resulta de 6 m ángulo de 31 ° y una berma de 6 m. En la [tabla 22](#) se muestran las diferentes configuraciones consideradas: desde alturas de 2 m hasta 8 m; denotando que desplazamiento horizontal se reduce a medida que aumenta la altura y el ángulo; esto ocurre como consecuencia de la reducción del número de bancos. Por lo anterior el banco menos eficiente, para reducir distancias, es el de 2 m pues requiere de 57,2 m, mientras otro de 6 m desciende de igual manera, pero requiere sólo de 41,4 m.

Tabla 22. Comparativa de las configuraciones de taludes en arena.

Altura de bancos (m)	ARENA				
	Angulo de Cara de Talud (°)	Ancho del banco (m)	Factor de Seguridad	Nº de bancos necesarios	Avance total (m)
2	45	4.9	1.293	9	57.2
3	37	5.1	1.297	6	49.4
4	35	5.3	1.290	4 en de 4 m y 1 de 2 m	44.26
6	31	5.7	1.309	3	41.36
8	29	6.1	1.310	2 de 8 m y 1 de 2 m	44

Caso Arcilla

Las arcillas tienen un razonamiento igual al anterior, sin embargo, requieren de 25,5 m, si mantienen una configuración de 6 m, ángulo de 65 ° y bermas iguales ([tabla 23](#)).

Tabla 23. Comparativa de las configuraciones de taludes en arcilla.

Altura de bancos (m)	ARCILLA				
	Angulo de Cara de Talud (°)	Ancho del banco (m)	Factor de Seguridad	Nº de bancos necesarios	Avance total (m)
2	90	4.9	1.429	9	44,1
3	90	5.1	1.369	6	30.6
4	83	5.3	1.305	4 de 4m y 1 de 2m	28
6	65	5.7	1.297	3	25.5
8	54	6.1	1.293	2 de 8m y 1 de 2m	28.7

Restricción legal

Ambas configuraciones de 6 m superan lo indicado por la norma. Excavar los taludes con 5 m de altura genera: inestabilidad en la cresta o reduce el área efectiva liberable. Cada estrato tiene una altura de 18 m en el frente de explotación, al excavarlos a intervalos indivisibles por ese número ocurre uno de dos casos: se construye el talud con el mismo ángulo, los primeros 3 estratos quedan en un mismo material y un cuarto con 3 m en arcilla y 1 arena; debido a que el ángulo estabilidad de ambos es diferente, la cresta del talud es inestable. En el otro caso, se termina el talud a 3 m y se excava uno de 2 m con el ángulo y ancho necesarios: aumentado el recorrido necesario.

Es preferible, entonces, configurar los taludes con alturas de 6 m para: mantener su estabilidad y una división clara entre estratos.

5.4.3. Configuración tentativa del talud general

Existen dos configuraciones aplicables, dependientes de los dominios litológicos observados. La configuración de los taludes se compone como se mencionó en el apartado anterior: una de 3 en arena y 3 en arcilla; otra de 5 en arena y 1 en arcilla, sin embargo, la aplicación de uno otro depende de su localización; los taludes abajo de la línea negra ([figura 51](#)) están compuesto de un talud en arcilla y 5 en arena, arriba de ella, los taludes se dividen en: 3 en arcilla y 3 en arena. En consecuencia, el ángulo del talud general cambia dependiendo de la litología: 28 ° y 25 ° respectivamente.

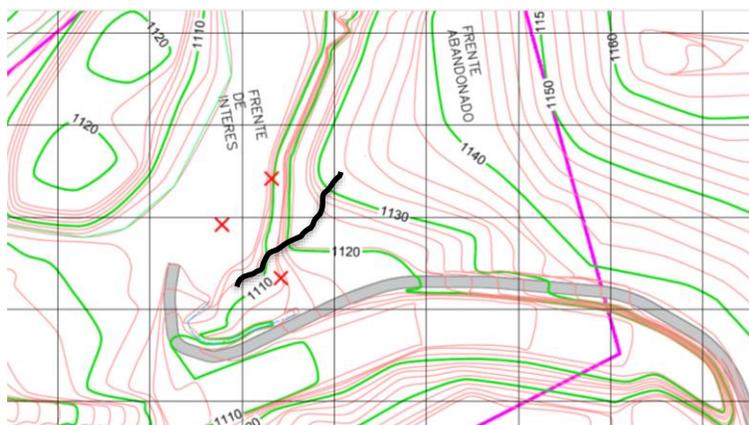


Figura 51. Mapa topográfico de “El Yeso”.

Estos ángulos no representan la configuración final. Como ya se ha descrito: el agua de escorrentía produce cárcavamiento y derrumbe de material; en consecuencia, su canalización debe acabar con estos fenómenos. Para ello, se requieren obras hidráulicas, las cuales serán discutidas más adelante; sin hacer mucho hincapié, la utilización de cunetas es esencial en este caso; aplicarlas requería de ensanchamiento a cada lado de la berma de los bancos, aumenta su longitud, en consecuencia, ocurre: disminución del área efectiva a remover y del ángulo del talud total. Hasta que sean dimensionadas, no podrán determinarse ni el área efectiva removida, ni el volumen de material a extraer.

5.5. Medidas de control de agua

Hasta ahora coexisten dos incógnitas pendientes: el caudal y la configuración de los taludes con el sistema de drenaje, a continuación, se resuelve la primera incógnita y se definen los posibles sistemas de drenaje sin considerar los taludes.

5.5.1. Selección del periodo de retorno

De la sección [5.4.1](#) se concluyó que el tiempo de vida de los taludes varía, 10-20 años, 0,5-10 años. Las obras hidráulicas construidas para los taludes no deben fallar en ese periodo; su periodo de retorno, entonces, tiene un mínimo de 10 años. Sin embargo, diseñar con este periodo de retorno significa que las obras fallen entre 1 y 2 veces en la cantera, la probabilidad de que falle una vez es 65% y una segunda de 88% (referirse a la [tabla 24](#)), por lo cual se debe seleccionar un mayor periodo: 50 años en este caso decanta hacia la seguridad.

Tabla 24. Probabilidad de ocurrencia (J) en fracción. (Bolígana, 1979)

Tr (años)	VIDA ÚTIL DE LA OBRA O PROPIEDAD (años)					
	2	5	10	20	50	100
100	0.02	0.05	0.10	0.18	0.39	0.63
50	0.04	0.10	0.18	0.33	0.64	0.87
25	0.08	0.18	0.34	0.56	0.87	0.98
10	0.19	0.41	0.65	0.88	0.99	1.00
5	0.36	0.67	0.89	0.99	1.00	1.00
2	0.75	0.97	1.00	1.00	1.00	1.00

5.5.2. Caudales de diseño

Con el periodo de retorno establecido se prosigue con el punto [5.3.3](#) definición del hietograma de diseño y el hidrograma de crecidas, el pico de este último define el caudal de diseño.

Caudal de cuenca 2 real

El caudal real de la cuenca 2 es de 1,42m³/s, para medir este caudal se dimensionaron diferentes secciones del canal en la cuenca, tomando el ancho del cauce y la altura de las marcas de agua en los bordes. Se discriminaron las secciones de los cauces, buscando la más recta posible, sin expansiones y/o reducciones considerables ($\pm 30\%$ de la base del canal) de las secciones, además de pendiente constante, luego, se estimó el caudal con el [método](#) correspondiente Los resultados se encuentran [anexo III](#).

Hietogramas de diseño

Los hietogramas de diseño están definidos para un periodo de retorno de 50 años, su duración es diferente en cada cuenca. En la cuenca 1 se ha establecido una duración de una hora y para la cuenca 2 de 24 horas, siguiendo lo establecido en [duración y distribución de la lluvia](#). Los hietogramas pueden verse en la [figura 52](#) y en la [figura 53](#); se ha asumido que el pico ocurre a la mitad de la lluvia.

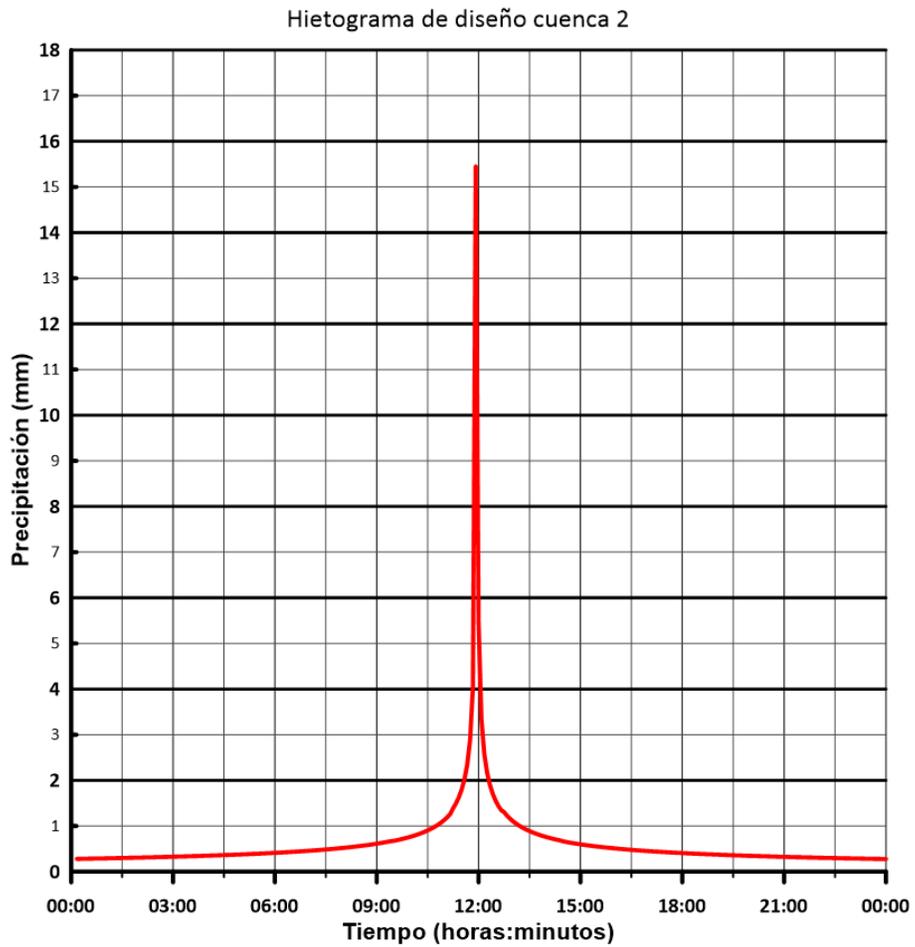


Figura 52. Hietograma de diseño de cuenca 2

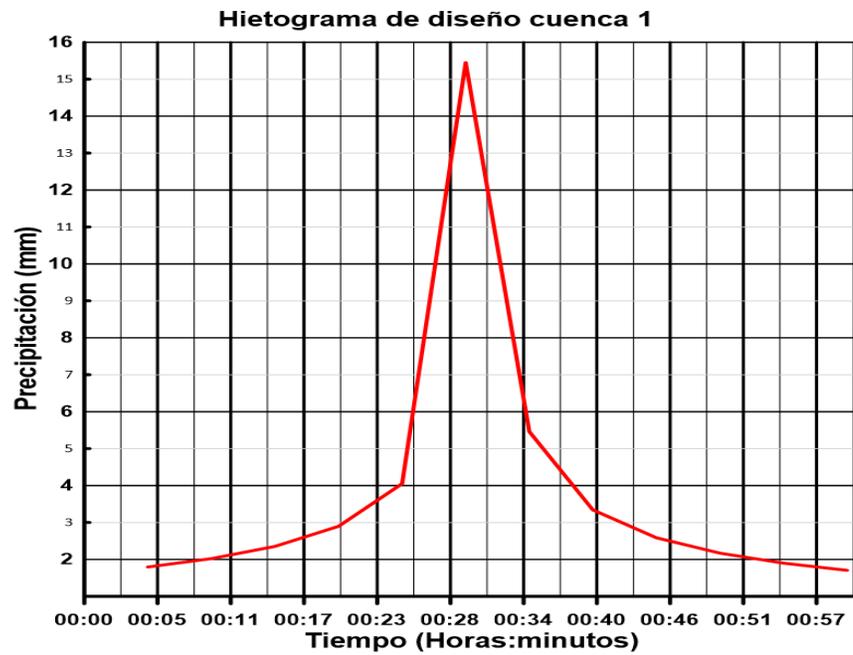


Figura 53. Hietograma de diseño 1 hora cuenca 1.

Hidrograma de crecidas

El hidrograma de crecidas se creó en dos fases: elaboración y optimización. Se elaboró el hidrograma de la cuenca 2 bajo los siguientes parámetros:

- CN = 60,2
- Área= 25 ha
- Hietograma de 24 horas
- Peak Rate Factor (PRF) = 484

El PRF es un parámetro utilizado por HEC-HMS para calcular el caudal de la fórmula 59, tiene valores entre 100-600, donde el estándar es 484.

$$Q_p = \frac{PRF * A}{T_p} \quad (59)$$

donde:

Qp: Caudal pico del hidrograma unitario ft³/s

A: área de la cuenca en mi²

T_p: Tiempo al pico en horas

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_p \quad (60)$$

donde

t_r: duración de precipitación excedente, es un parámetro interno del programa (horas)

t_p: tiempo de retardo en horas, es el 60 % del tiempo de concentración de la cuenca

El CN se puede seleccionar directamente de las tablas en anexo II, en caso que diferentes suelos ocupen la zona, se calculará una CN equivalente como la suma de los CN de cada región multiplicada por el área que ocupa y dividida por el área total:

$$CN_{eq} = \frac{\sum A_i * CN_i}{A_{total}} \quad (61)$$

En el caso anterior, estos pares son: 10 hectáreas y CN = 32, 15 hectáreas CN = 79, una descripción de estos números de curva la encuentran [aquí](#).

La [figura](#) 54 indica que los parámetros de la cuenca deben ajustarse. El caudal pico tiene un valor de 2,20 m³/s, +54,9% superior al real. Esto se realiza con cambiando el PRF de la cuenca por uno más bajo. Un PRF de 250 es una buena estimación, otorga un caudal de 1,50 m³/s, +5,60% por encima del real (ver [figura](#) 55).

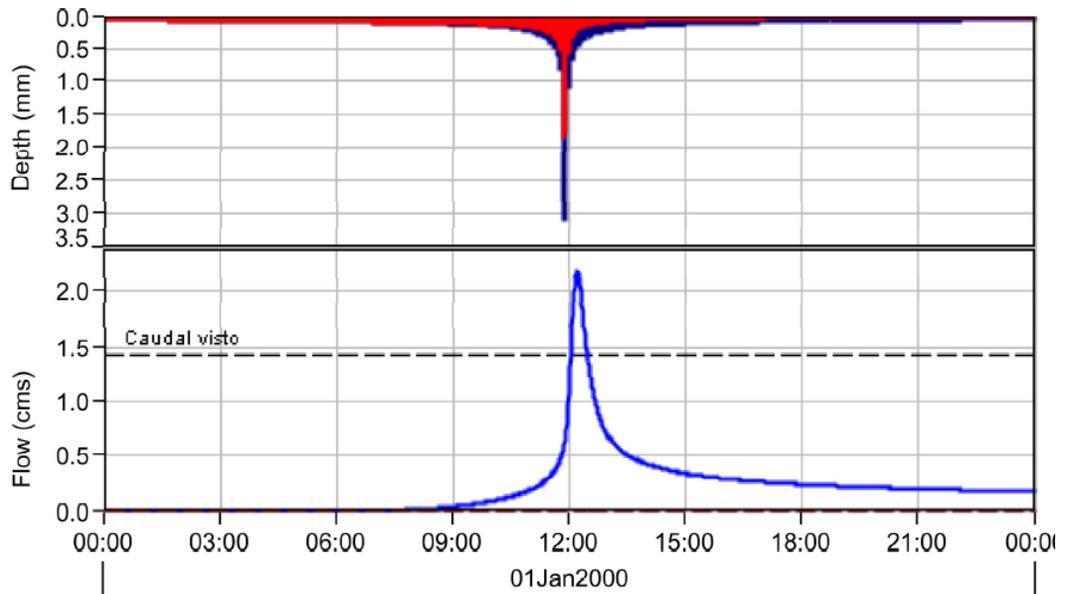


Figura 54. Hidrograma de crecidas cuenca 2

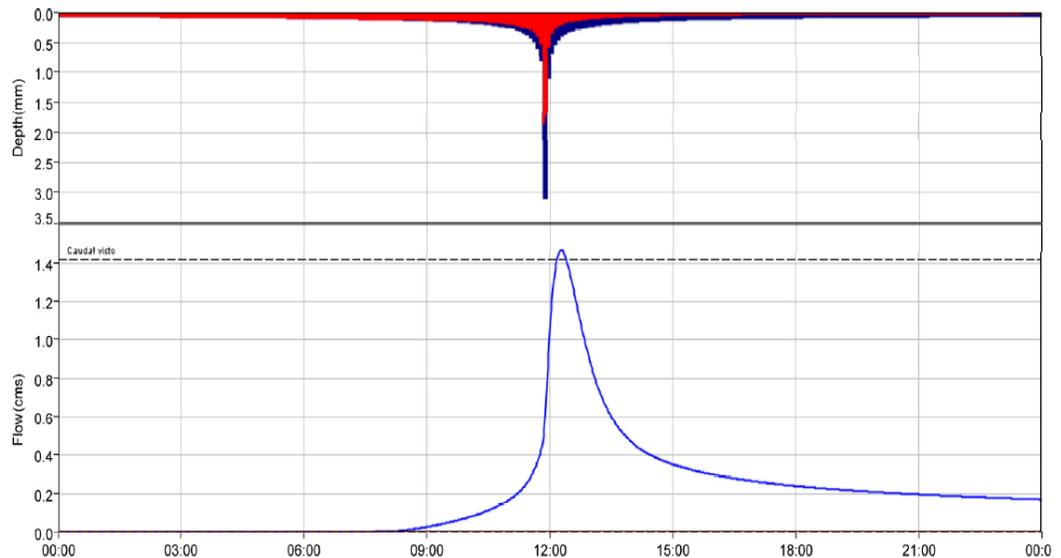


Figura 55. Hidrograma de crecidas optimizado cuenca 2

Los parámetros de la cuenca 1 son: m^3/s

- CN = 71,1
- Área= 9,77 ha
- Hietograma de 1 hora
- Peak Rate Factor (PRF) = 250

Con CN determinado como: 3,94 ha CN = 94, 2,78 ha CN= 32, 2,99 ha CN = 79, caudal en [figura 56](#).

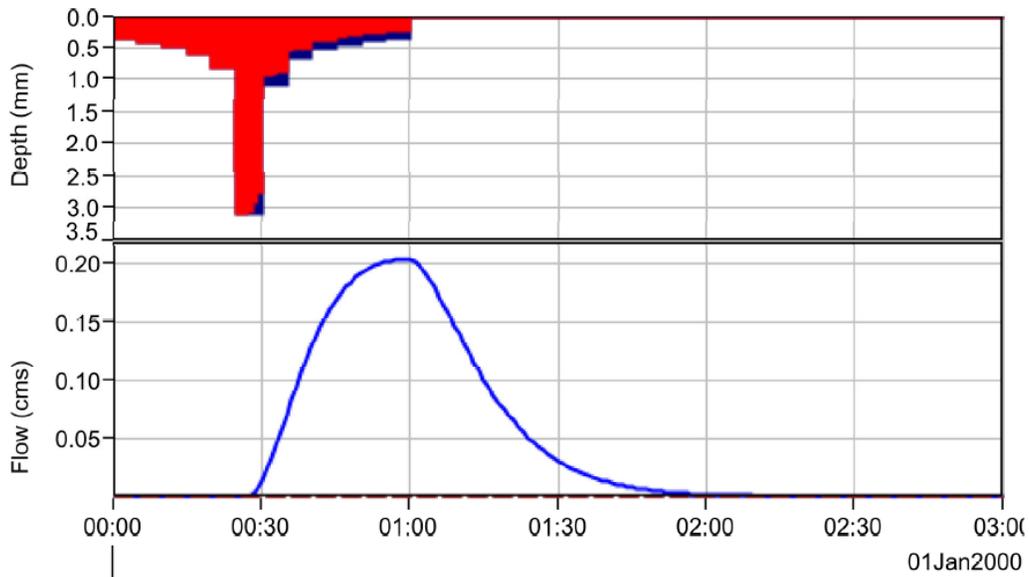


Figura 56. Hidrograma de crecidas natural para cuenca 1

El caudal de la cuenca 1 representa la crecida para un estado sin modificar, es decir, sin la intervención minera correspondiente, por lo cual, no puede utilizarse para un diseño, pues representaría una solución para una situación inexistente. El movimiento de tierras cambia la distribución areal de los suelos, reduciendo unos, incrementando otros; además, al inicio, remueve la vegetación. Todos estos factores afectan considerablemente a la escorrentía. Todas las modificaciones pueden representarse a través de un nuevo número de curvas CN:

CN determinado como: 5.60 ha CN = 94, 1,72 ha CN= 77 (descripciones de estos [aquí](#)) 2,99 ha CN = 79, bajo este esquema el caudal es de 0,76 m³/s ([figura 57](#))

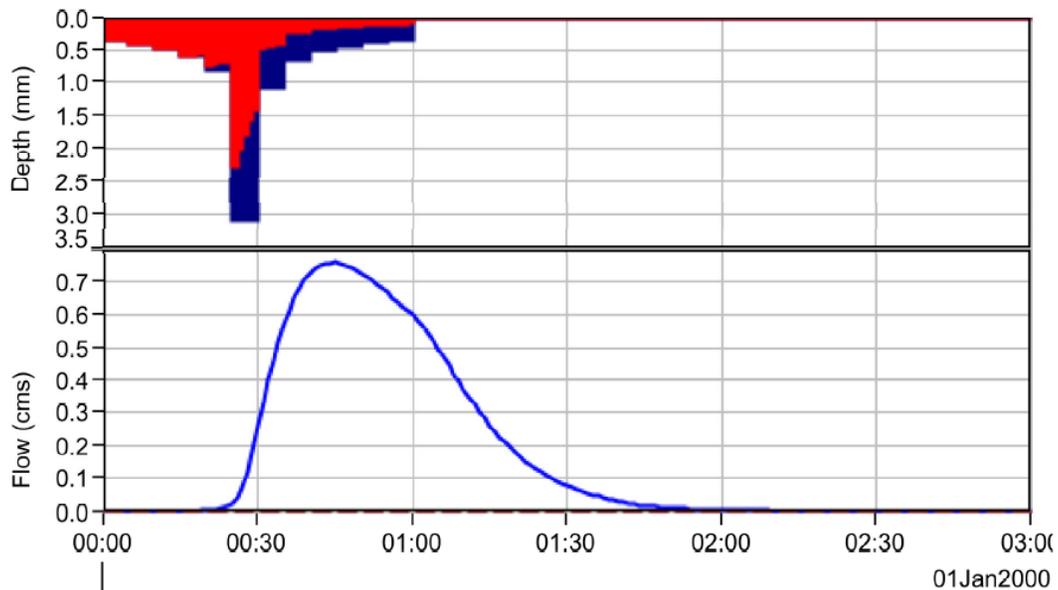


Figura 57. Hidrograma de crecida cuenca 1 modificada

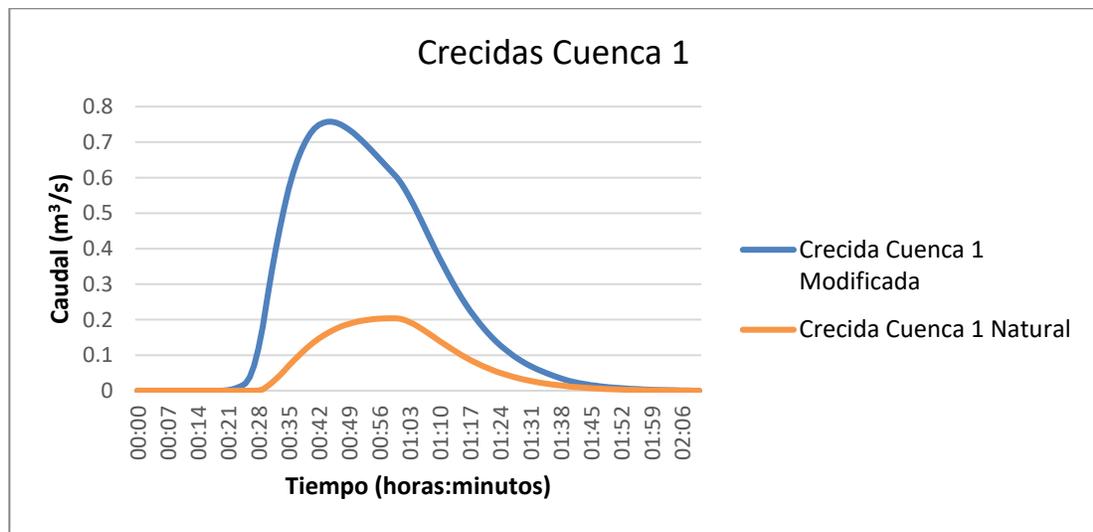


Figura 57. Hidrograma de crecidas para cuenca 1 (conjuntas).

5.5.3. Alternativas de diseño

Todas las alternativas de diseño se consideran en la [tabla 25](#), fueron determinados a través del método del [esfuerzo tangencial permisible](#) con los parámetros definidos para [arenas](#) y [arcillas](#), debido a que es prácticamente imposible obtener un valor exacto de caudal se usó una tolerancia del $\pm 5\%$. Al mencionar un canal simple, se refiere a una cuneta en la base talud; un canal doble tiene el anterior más otra cuneta en corona. Los demás canales son los transversales, recolectan el agua de las cunetas y las redirigen a otros lugares.

La distribución de caudal se ata al número de bancos, así, si hay 6 bancos deben existir 7 canaletas simples, una en el pie de cada uno y otra en el nivel más alto al ancho de berma para la recolección, así el caudal es $1/7$ del total, para las simples, son 13, dos en cada banco (corona de la berma y base del talud) y la otra en el banco más alto.

Tabla 25. Alternativas posibles de canales.

Material	Canal	Cuenca	Caudal (m ³ /s)	Base (m)	Tirante (m)	Libre bordo (m)	Velocidad (m/s)	Pendiente (m/m)
AB	Simple	Cuenca 1	0.108	0.7	0.2	0.35	0.77	0.013
AA	Simple	Cuenca 1	0.108	0.7	0.48	0.40	0.30	0.00047
AR	Simple	Cuenca 1	0.108	0.7	0.28	0.37	0.55	0.0012
AB	Doble	Cuenca 1	0.058	0.8	0.11	0.33	0.66	0.023
AA	Doble	Cuenca 1	0.058	0.8	0.2	0.35	0.36	0.0006
AR	Doble	Cuenca 1	0.058	0.8	0.14	0.34	0.52	0.0025
AB	Rectangular	Cuenca 1	0.7575	2.25	0.34	0.39	0.99	0.0069
AA	Rectangular	Cuenca 1	0.7575	2.25	0.9	0.51	0.35	0.00018
AR	Rectangular	Cuenca 1	0.7575	2.25	0.5	0.43	0.67	0.0006
AB	Simple	Cuenca 2	0.21	1.3	0.2	0.35	0.81	0.012
AA	Simple	Cuenca 2	0.21	1.3	0.5	0.40	0.31	0.00033
AR	Simple	Cuenca 2	0.21	1.3	0.26	0.37	0.62	0.0125
AB	Doble	Cuenca 2	0.112	0.9	0.16	0.34	0.78	0.012
AA	Doble	Cuenca 2	0.112	0.9	0.43	0.38	0.30	0.00085
AR	Doble	Cuenca 2	0.112	0.9	0.21	0.35	0.59	0.0015

Nota: AA; Arcilla amarilla, AB: Arcilla Blanca, AR: Arena

5.6. Acoplamiento del sistema de drenaje al diseño del frente

Las diferentes alternativas planteadas anteriormente se sopesan contra el diseño inicial de los bancos y se buscan los posibles problemas que puedan tener si fueran a ser aplicadas.

5.6.1 Cunetas

De la [tabla 25](#) se puede verificar que las cunetas pueden estar en la base del talud, para lo cual se requerirá colocar una pendiente hacia ella, para que el agua no corra sobre la cara. Por otra parte, pueden colocarse otra sobre la corona, en este caso las pendientes comenzarían a mitad de la berma y se dirigiría una hacia la corona y otra hacia la base, como una cuña invertida. El inconveniente de ambas alternativas surge de la pendiente para evitar arrastre: son prácticamente horizontales; si bien no dañan las paredes durante el flujo, se inundan y no drenan rápido el agua, y, además, si se les subiera la pendiente, crearían una zanja a los lados. Por ejemplo, el primer talud del nivel 1134 tiene una longitud aproximada de 120 m, si se le colocara una pendiente de 0,50 % a la cuneta, ésta terminaría en el nivel 1128 (tiene una longitud de 200 m). Por ende, no deben aplicarse.

Una alternativa plausible al caso: correr el agua sobre el mismo banco. Tendría que colocarse una pendiente hacia la cara del talud (peralte); y, una pendiente al banco, haciéndolo descender.

5.6.2 Canal en cuenca 2

Para el desagüe de escorrentía en esta cuenca deben emplearse tubos. A diferencia de la rápida al norte de la cantera, existen accesos desde la vía principal, conectados a cada uno de los niveles en los bancos. Excavar un canal abierto representa interrumpir la conexión entre los bancos y la vía, pues hay que abrir una zanja entre los dos. Véase la [figura 59](#) en caso de reconectar, se tendría que rellenar entre el banco y la vía, dejando un tubo enterrado e inclinado para evitar la desembocadura sobre la cara del talud del banco. Al conectar todos los bancos a la vía, básicamente se tendría un tubo enterrado sin canal alguno.

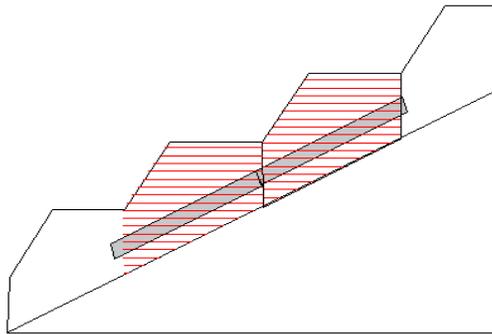


Figura 59. Representación de colocación de tubo entre bancos y vía. Nota. Lo subrayado en rojo representa el relleno.

Sin algún canal, queda la pregunta: ¿cómo, entonces, se conecta el agua de escorrentía con el tubo? Para ello podría colocarse: un tubo al final de la cuneta que dirija el agua o abrir una zanja y que el agua corra por ella; en cualquiera de los casos implicaría un costo adicional: tubos nuevos o encofrado para mantener estables las zanjas.

Desembocadura del canal

Dónde terminaría el tubo esta predeterminado por la diferencia de cota entre el frente y la base del cauce natural. Actualmente la base del cauce se encuentra a cota 1110 msnm y la del frente 1104 msnm, diferencia de 6 m, la cual seguirá ampliándose a medida que se desarrolle la cantera. El tubo planteado debe finalizar a una cota superior a la base del cauce para asegurar el desagüe, en este caso aproximadamente a cota 1112 msnm.

Realmente, considerando el desarrollo que tendrá la cantera, la solución no es viable. La cantera está destinada a seguir descendiendo a medida que se explota, lo cual incrementa la diferencia de cota dicha; considerando que el frente abandonado puede ser explotado, requerirá del reperfilamiento de los taludes hacia el este y como consecuencia dejaría un vacío. Con esta posibilidad latente, colocar los tubos es un sin sentido, pues, el objetivo que tienen es conectar la vía de acceso con los bancos, si no van a existir, por qué hacer la inversión.

5.6.4. Conclusión de las alternativas

El uso de cunetas y tubos complica el diseño de la cantera considerablemente: las primeras crean zanjas inestables e inmantenibles; la segunda podría aplicarse, pero limitaría el desarrollo de la cantera, y aun así, tendría que excavarse una zanja al norte para captar las aguas de la otra cuenca.

Cabe preguntarse, si, enviar toda el agua hacia un solo lado (cuenca 1) resulta efectivo. Si fuera el caso, se eliminaría el tubo por completo.

5.6.5. Otro conjunto de alternativas

Ampliación de cuenca 1

Lo anterior puede realizarse mediante una ampliación de la cuenca 1, conllevaría al cambio de diversos factores: incremento de área de 0,097 km² a 0,14 km² (ver [figura 60](#)), el tiempo de concentración no sufrió cambios significativos; el caudal para la cuenca crece a 1,05 m³/s.

La distribución de suelos también cambia: CN determinado como: 8,2 ha CN = 94, 2,67 ha CN= 77, 4,07 ha CN = 79, el CN_{eq}= 85,8, el caudal se ve en la [figura 61](#).

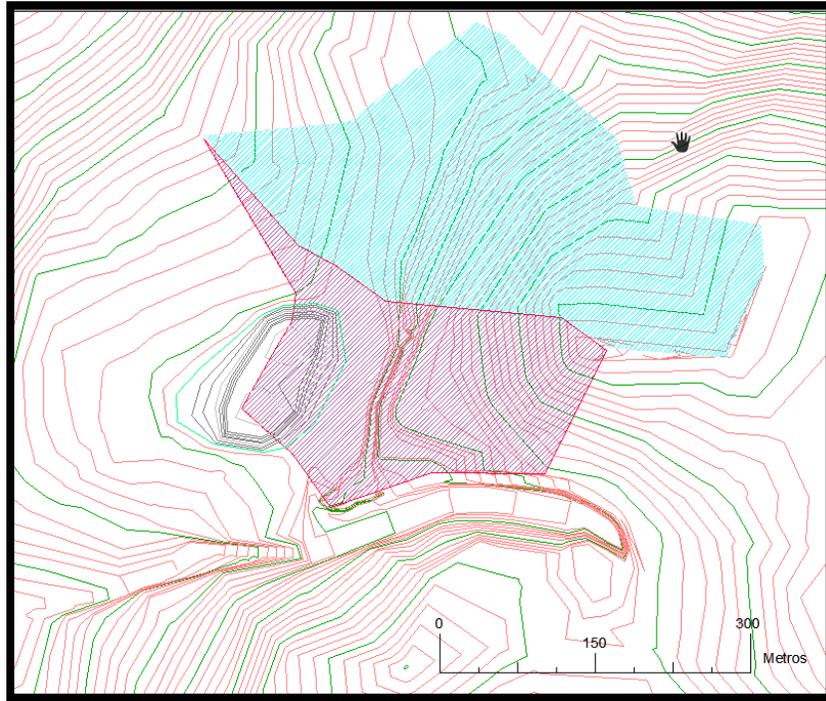


Figura 60. Cuenca 1 ampliada.

Nota: En verde la cuenca 1 original, en rojo zona anexada.

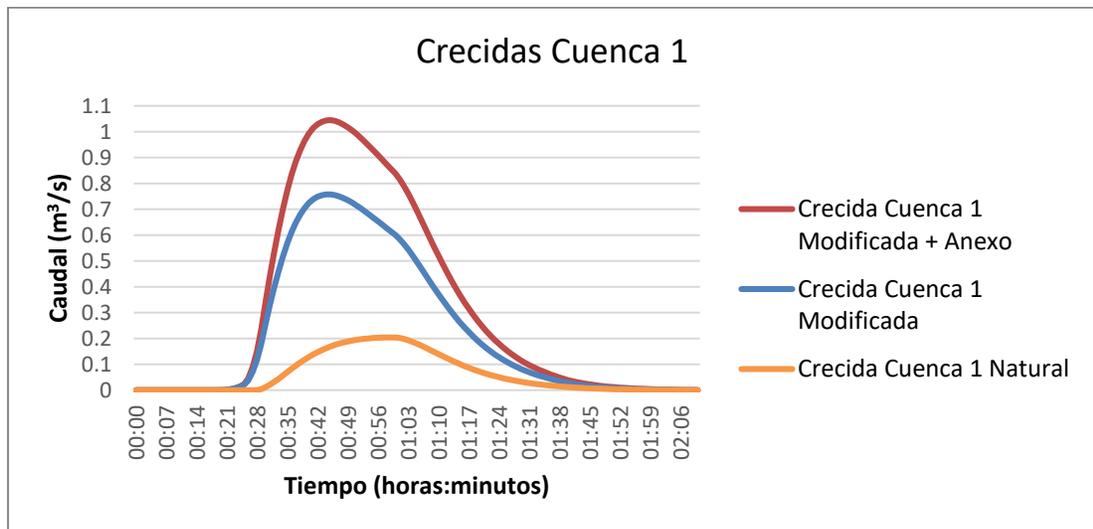


Figura 61. Hidrograma de Crecidas Cuenca 1, actualizado.

Alternativas de diseño

Escorrentamiento sobre bermas

Ya se demostró que cunetas no pueden emplearse, aun así, es inminente la existencia de agua sobre las bermas y taludes, como no se puede dirigir hacia un punto particular, es mejor controlarlas, para que no alcance la cara inclinada. Esto puede modelarse suponiendo que la berma es un canal triangular como el de la [figura 62](#). En este caso, las

pendientes de los lados difieren: una corresponde a la inclinación del talud y la otra al peralte de la vía, donde lo que debe verificarse es el perímetro mojado, para determinar la existencia de desbordes.

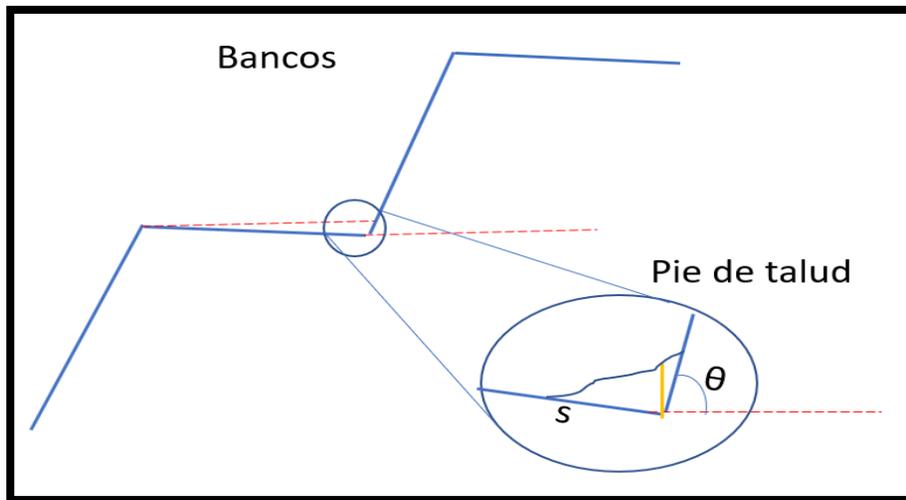


Figura 62. Modelo de canal triangular

Nota: S: Peralte, tita: ángulo talud, línea amarilla corresponde a tirante de agua

Tabla 26. Canales triangulares sobre arcilla amarilla

Pendiente Longitudinal (%)	Material	Tirante (m)	Peralte (%)	Perímetro (m)	Velocidad (m/s)
1	Arcilla*	0,105	1	10,47	0,03
1	Arcilla	0,081	1	8,13	0,04
1	Arcilla*	0,138	2	6,90	0,04
1	Arcilla	0,105	2	5,27	0,06
1	Arcilla*	0,162	3	5,40	0,06
1	Arcilla	0,123	3	4,09	0,08
1	Arcilla*	0,181	4	4,54	0,07
1	Arcilla	0,137	4	3,42	0,09
1	Arcilla*	0,198	5	3,96	0,08
1	Arcilla	0,149	5	2,98	0,10
1,75	Arcilla*	0,162	3	5,40	0,06
1,75	Arcilla	0,110	3	3,68	0,08
1,75	Arcilla*	0,181	4	4,54	0,07
1,75	Arcilla	0,123	4	3,08	0,10
1,75	Arcilla*	0,198	5	3,96	0,08
1,75	Arcilla	0,134	5	2,68	0,11

Nota: El asterisco se refiere a condición de altura crítica del canal

Tabla 27. Canales triangulares sobre arena

Pendiente Longitudinal (%)	Material	Tirante (m)	Peralte (%)	Perímetro (m)	Velocidad (m/s)
1	Arena*	0,160	3	5,33	0,056
1	Arena	0,107	3	3,56	0,084
1	Arena*	0,178	4	4,46	0,066
1	Arena	0,118	4	2,96	0,099
1	Arena*	0,193	5	3,87	0,074
1	Arena	0,128	5	2,56	0,113
1,75	Arena*	0,160	3	5,33	0,056
1,75	Arena	0,096	3	3,21	0,093
1,75	Arena*	0,178	4	4,46	0,066
1,75	Arena	0,107	4	2,67	0,110
1,75	Arena*	0,193	5	3,87	0,074
1,75	Arena	0,115	5	2,31	0,125

Nota: El asterisco se refiere a condición de altura crítica del canal

Emplear el peralte de 5 % es la mejor opción. De la [tabla 26](#) se evidencia que peraltes menores a 3 % generan escurrimiento hacia las caras de los taludes, debido a que el perímetro del agua supera al ancho de la berma, por lo cual no se deben emplear; por otra parte, con este peralte las vías siguen casi cubiertas, por lo cual, valores más altos reducen el área mojada. Entre los calculados en la [tabla 27](#), 5 % resulta una mejor opción: la variación de la velocidad es poca y el perímetro mojado es la mitad del perímetro con 3 % de peralte.

Selección de la pendiente longitudinal

De acuerdo a (Suárez, 2001) la pendiente debería ser de al menos 3 %, para un rápido escurrimiento, para el problema en cuestión, el valor es inadecuado, casi, totalmente. En la [tabla 28](#) se denota la altura de los bancos, al comenzar desde la pista; se evidencia en uno de ellos un desnivel considerable al final, para solventarlo bien podría: empinarse la pendiente del nivel 1140 o disminuir la del nivel 1132. El primer caso supone un problema de estabilidad sobre del banco generado, pues sería superior a los 7m, considerando que de la arcilla blanca no se conocen sus datos experimentales, es mejor mantenerse con la altura mencionada. Esto guía hacia la segunda opción: reducir la pendiente de los niveles siguientes, en este caso reducirla al 1.75 % (o 1 °), da resultados permisibles, referirse a la [tabla 29](#).

Para asegurar el drenaje y la estabilidad de los taludes la opción más viable es utilizar dos pendientes diferentes en los bancos. Como se ha mencionado, los bancos son el medio de conducción del agua, como tal deben inclinarse para evitar su inundamiento, sin embargo, esto tiene implicaciones en el diseño del frente. Al inclinarse, los bancos descienden, perdiendo cota, si, por ejemplo, el inicio del banco está a cota 1140 msnm, tiene una longitud de 200 m y una inclinación de 0,50 %, al final, el banco estará a cota 1139 msnm, por otra parte, el banco siguiente con 250m y misma inclinación terminaría con cota 1130,50 msnm; la altura aproximada del talud sería de casi 9 m, altura que se encuentra por encima de la permitida. Para evitar que los taludes se desestabilicen se reduciría la pendiente longitudinal de los taludes bajo el nivel 1140. En un primer análisis, se realizan con la pendiente teórica de 3 % sugerida por (Suárez, 2001), sin embargo, aplicarla desestabiliza los taludes; ajustándose a 1° o 1,75%, sería estables, en las tablas [28](#) y [29](#) se visualiza como el talud entre los niveles 1140 y 1132, tienen inicialmente un talud de más de 9 m, luego de cambiar la pendiente, se redujo a 6.2 m

Tabla 28. Disposición de los bancos, pendiente 3%

Nivel en pista	Cota de la cresta	Cota final interna	Altura de banco (m)
1140	1133,4	1133,1	6,9
1132	1124,4	1124,1	9,4
1128,3	1119,8	1119,5	4,9
1125,3	1116,6	1116,3	3,5
1121,4	1112,2	1111,9	4,6
1120	1111,6	1111,3	1,0

Nota: Cota interna=cota del pie de talud

Tabla 29. Disposición de los bancos, pendiente variable

Nivel en pista	Cota final cresta	Cota final interna	Altura de banco (m)
1140	1133,4	1133,1	6,9
1132	1127,5	1127,2	6,2
1128,3	1123,6	1123,0	4,5
1125,3	1120,3	1119,9	3,7
1121,4	1116,3	1115,8	4,6
1117*	1111,6	1111,4	4,9
1112,8*	1107,4	1107,1	4,6

Nota: el (*) indica el uso de una rampa

5.7. Ángulos de talud

Ya se ha resuelto la incógnita del drenaje haciendo que el agua escurra sobre las bermas, ahora, el problema se reduce a establecer las dimensiones finales de los taludes. Del apartado anterior, se deduce también que los ángulos de las caras cambiarán debido a las alturas prevaecientes, por lo cual, lo prestablecido en la primera selección no es totalmente válido. El factor de seguridad sí se mantiene, pero los taludes en arcilla se empinan aún más: 70° (ver [figura 63](#)); en arena se mantendrán igual a 31° ([figura 64](#)).

Detonótese, que en ambas gráficas la relación entre el ángulo de talud y la altura es la siguiente: siempre que se quiera construir taludes más altos, el ángulo de la cara inclinada debe reducirse, lo inverso también aplica

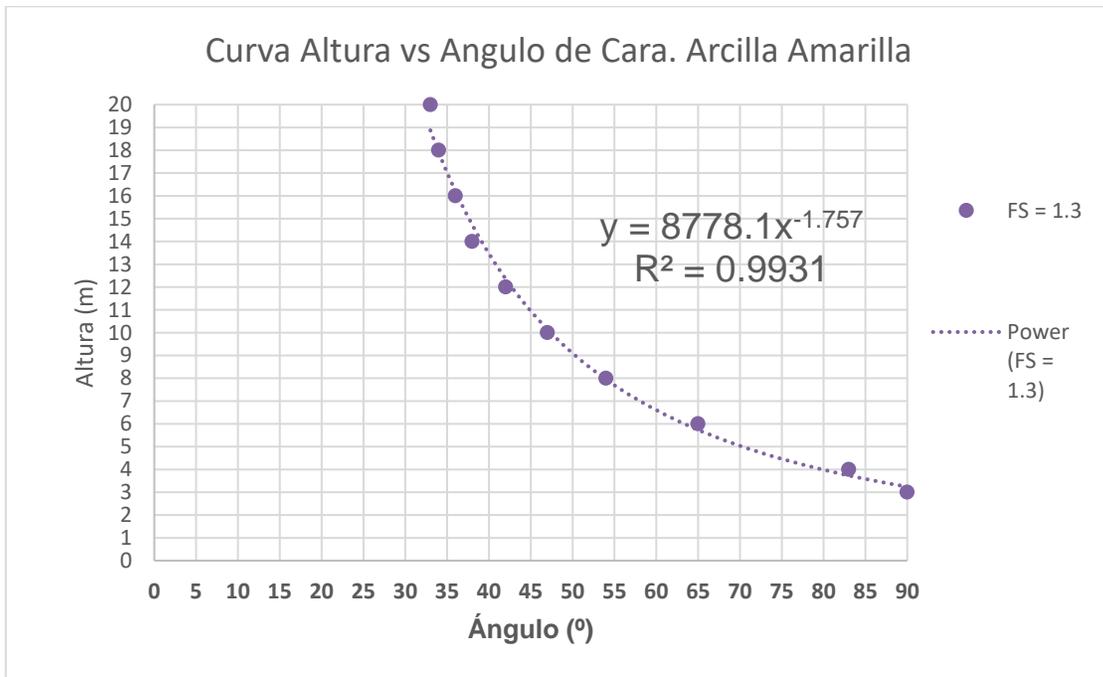


Figura 63. Curva de diseño de taludes en banco, arcilla amarilla.

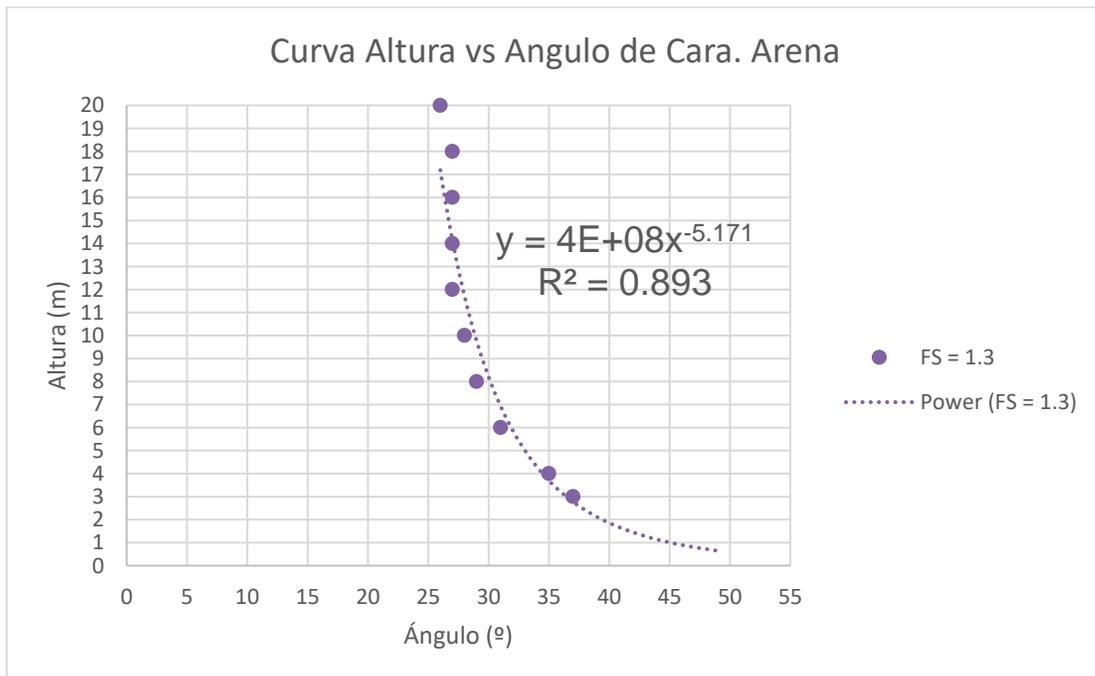


Figura 64. Curva de diseño de taludes en banco, arena.

5.7.1. Diseño de talud general

La configuración del talud general se observa en la [figura 65](#). Se denota que su ángulo final es de 26° y tiene un factor de seguridad de 1,63 de acuerdo a la [figura 66](#), el volumen total a remover es de $156,420 \text{ m}^3$ ([tabla 30](#)) y a rellenar 3476 m^3 . En el anexo V se puede ver el [mapa de la topografía modificada final](#) y del [canal transversal](#)

Tabla 30. Volumen de corte y relleno para cada banco.

Banco	Volumen de corte (m ³)	Volumen de relleno (m ³)
1	18590	(-)
2	20952	(-)
3	18352	45.6
4	15415	262
5	16699	440
6	20550	601
7	11769	115
8	7776	477
9	4296	1194
10	10898	107
11	8480	2.5
12	1014	95
13	482	49
14	391	23

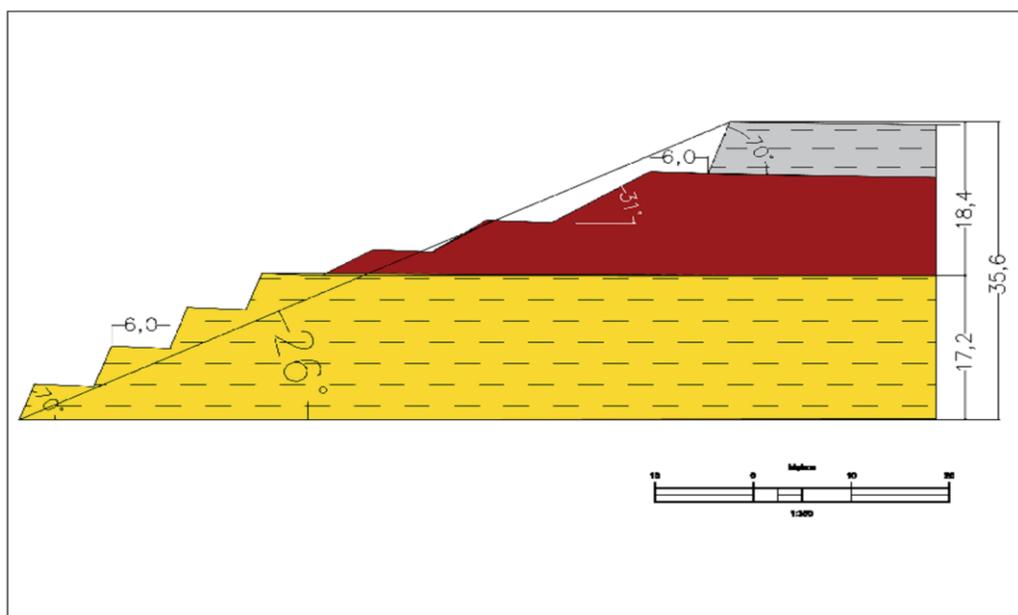


Figura 65. Configuración de talud final. En amarillo la arcilla de baja plasticidad, rojo arena, gris claro las arcillas del frente abandonado

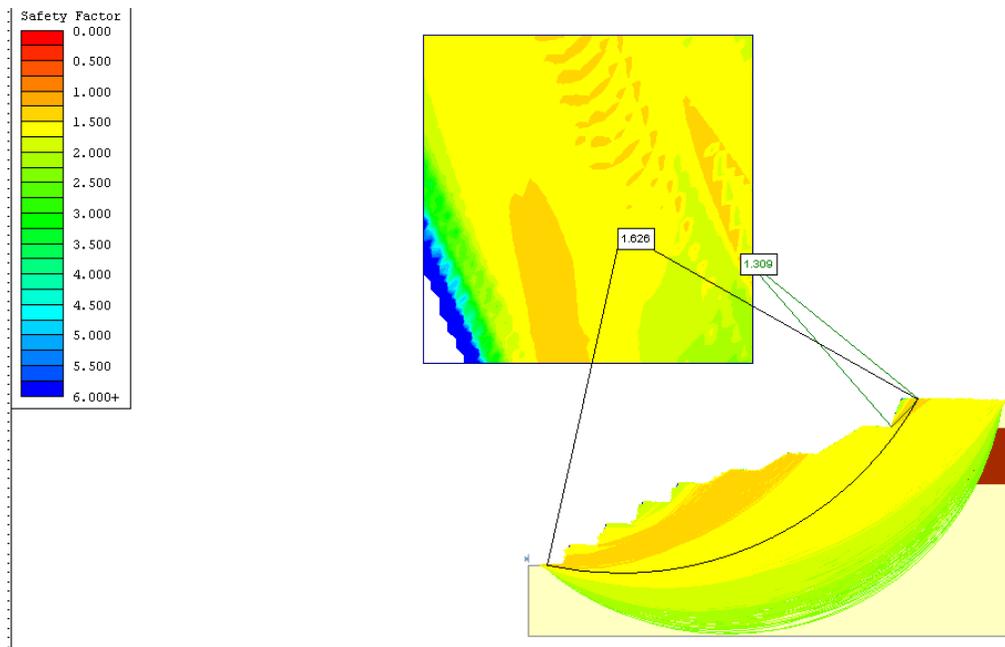


Figura 66. Estabilidad del talud final.

5.8. Canal transversal recolector

Hasta ahora el agua sobre las bermas ha sido controlada, sin embargo, aún deben enviarse a un lugar dónde no generen problemas. Este lugar corresponde al cauce natural de la cuenca al norte, enviar el agua de los taludes hacia allí necesita de un canal que corte (transversal) los taludes en todos sus niveles, y dejar al agua caer libremente.

El canal se ubicaría al borde del área de la concesión El Yeso (ver [situación actual de la cantera](#) anexo); en cuanto geometría, ésta sería paralelo al perfil de los taludes, es decir, donde exista una cara inclinada, el canal se inclina, y si se encuentre con las bermas, sería paralelo o subparalelo a ésta. Sería un canal rectangular, de base 2 m, véase [tabla 31](#).

Nota sobre la tabla mencionada: Se encuentra una pendiente, en ningún momento se emplea para el diseño del canal, como se mencionó, el canal transversal seguirá la secuencia de los bancos, no tiene sentido seguir una pendiente prácticamente horizontal.

Tabla 31. Secciones del canal transversal, cuenca 1 + anexo.

Material	Canal	Cuenca	Caudal (m ³ /s)	Base (m)	Tirante (m)	Libre bordo (m)	Velocidad (m/s)	Pendiente (m/m)
AB	Rectangular	Cuenca 1 + anexo	1,05	2	0,64	0,46	0,82	0,0043
AA	Rectangular	Cuenca 1 + anexo	1,05	2	1,12	0,58	0,47	0,00032
AR	Rectangular	Cuenca 1 + anexo	1,05	2	0,77	0,49	0,68	0,00045

El recubrimiento es necesario

Una de las situaciones donde se presenta tirante crítico ocurre en el cambio de pendiente a una más empinada (Sotelo, 2002), de acuerdo a esto, la erosión en el canal se presentará cuando la velocidad de flujo supere a la velocidad que puede soportar el material, esto ocurre en las secciones inclinadas después de las bermas, en la [tabla 32](#) se muestran las velocidades críticas de cada berma bajo su caudal. Tomando la velocidad de los canales sin arrastre como permisible (recordar [tabla 25](#)) los valores son: de la arcilla amarilla es 0,40 m/s, y de la arena 0,60 m/s, en promedio; las velocidades arrastran material desde el inicio, por lo cual un recubrimiento es necesario. Por las velocidades manejadas y su disponibilidad, los gaviones son una opción; restaría verificar la estabilidad de los gaviones durante el flujo.

Tabla 32. Condiciones Hidráulicas del canal transversal.

Caudal (m ³ /s)	S (m/m)	Yn rápida(m)	Yn pista (m)	Yc (m)	Vc (m)
0,15	0,60	0,0285	0,100	0,083	0,90
0,30	0,60	0,0435	0,155	0,132	1,14
0,45	0,60	0,0557	0,200	0,173	1,30
0,60	2,75	0,0417	0,241	0,209	1,43
0,75	2,75	0,0478	0,279	0,243	1,54
0,90	2,75	0,0535	0,315	0,274	1,64
1,05	2,75	0,0588	0,349	0,304	1,73

Erosión del canal

Aún con los gaviones, se presenta erosión a partir de los bancos más inclinados, en la [tabla 33](#), se demuestra su comienzo entre 0.5-0,6m sobre el canal. Reiterando en la

disponibilidad de los gaviones, la solución recae en un mantenimiento de las secciones mencionadas

Tabla 33. Análisis longitudinal de canal sobre ladera, resultados

Caudal (m ³ /s)	S (m/m)	Y (m)	V (m/s)	Distancia sobre canal (m)	Longitud del canal (m)
0,15	0,6	0,0285	2,630	0,92	12,0
0,30	0,6	0,0435	3,450	1,32	8,75
0,45	0,6	0,0557	4,040	2,34	7,12
0,60	2,75	0,0530	5,660	0,64	4,84
0,75	2,75	0,0629	5,960	0,66	5,26
0,90	2,75	0,0800	5,630	0,51	4,87
1,05	2,75	0,0940	5,590	0,5	3,62

Desfase con respecto a los bancos

Uno de los fenómenos que ocurre es el salto hidráulico; resulta del cambio de pendiente empinada a una horizontal o sub-horizontal; y, se caracteriza por un cambio de tirante: uno bajo hacia uno alto. Debido a las pendientes en los taludes (el canal las sigue en paralelo) y los cambios al alcanzar un banco, se formará un salto. De manera que debe existir un desfase entre los bancos y el canal para asegurar que el agua no suba por encima de ellos.

En la [tabla 34](#) se muestran las alturas: antes y después del salto, en los primeros 3 escalones desde aguas arriba, los saltos son contenidos por el canal, sin embargo, en los siguientes es necesario emplear un ascenso brusco del piso para contenerlo y llevar un control del tirante sobre los canales. El último salto sobre los bancos ocurre en el nivel 1107,1, de la altura esperada, el desfase entre los bancos y el canal debe ser de 0,7 m.

Tabla 34. Alturas de salto hidráulico.

Nivel	Altura antes del salto (m)	Altura después del salto (m)	Altura esperada (m)	Notas
1127,2	0,04	0,15	0,15	(-)
1123,0	0,08	0,20	0,20	(-)
1119,9	0,12	0,24	0,24	(-)
1115,8	0,05	0,57	0,27	escalón de 30 cm
1111,4	0,07	0,62	0,32	escalón de 30 cm
1107,1	0,06	0,78	0,33	escalón de 45 cm
1104,0	0,06	0,95	0,35	escalón de 60 cm

Otra aplicación de las fosas empleadas es mantener el material arrastrado en estas secciones, su extracción será necesario para asegurar el debido funcionamiento hidráulico.

Luego de descender los bancos, la rápida se conecta a otro canal para dirigir el agua al cauce natural al noroeste de la zona. En éste, igualmente, se forma un resalto, controlándose con un escalón de 60 cm.

5.9. Erosión sobre las caras de los taludes

Para controlar la erosión de las caras, a largo plazo, se utiliza alguna especie vegetal (Suárez, 2001), la cual requiere de unas características específicas. Una de las más utilizadas es el pasto Vetiver, es capaz de crecer hasta 2000 msnm, su temperatura se encuentra en el rango de 5-45 °C con lluvias de 600-6000 mm/año. Se aplica al entorno del trabajo.

Mientras se arraiga el pasto, deberá emplearse un medio de control de erosión temporal: las fajinas son empleadas para este fin. Estas pueden diseñarse como canales triangulares, transportando un caudal igual o proporcional al de los bancos.

Sin embargo, la siembra de pasto será aplicable solo a los taludes en arena. Los taludes en arcilla poco interceptan la lluvia, debido a la inclinación tan empinada que tienen; las fajinas serán suficientes.

De todo lo anterior, se requerirán de estacas de madera de al menos 1.5 m, las cuales serán enterradas 70 cm en los bancos, necesitarán de una inclinación de 1 % para descargar el agua. Deberán construirse de manera intercalada siguiendo la [figura 67](#), 15 m de extensión y separación de 1.5 m (Suárez, 2001).

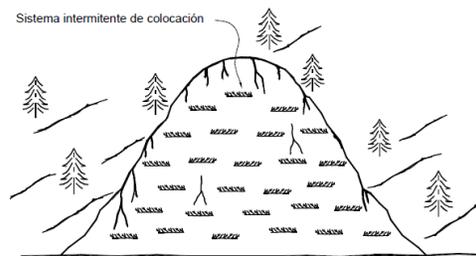


Figura 67. Capas de hierba apoyadas en trinchos o fajinas. (Suárez, 2001)

5.10. Medidas de prevención y monitoreo

5.10.1. Taludes

Medición y documentación de geometría

Verificar que el diseño se esté llevando a cabo. Para la validación del diseño propuesto se deben controlar los elementos que los componen: la altura, el ángulo y el ancho de la berma. Los ángulos podrán medirse con clinómetros o brújulas directamente sobre el talud. Para la altura y ancho de berma, el distanciómetro, en caso de su indisposición una cinta métrica, también, sirve. Estas operaciones pueden realizarlas el personal obrero con adiestramiento.

Construcción de modelo geotécnico

Se deben actualizar todos los factores que puedan afectar a la estabilidad de los taludes: litológicos, estructurales, macizo rocoso e hidrogeología. Con los bancos en desarrollo se podrían visualizar: cambios en el espesor y buzamiento de los estratos; particularmente, es imperativo corroborar la extensión e inclinación del esquistos visualizado. La existencia de esquistos abre posibilidades a nuevos mecanismos de falla: planear, cuña, desprendimiento..., en este sentido, el personal calificado deberá levantar las estructuras de deformación que se avisten: plegamientos, diaclasas, juntas, luego evaluar la plausibilidad de los mecanismos.

De la información anterior, se generará la clasificación de macizo rocoso para diversas zonas del yacimiento. Finalmente, se debe muestrear y recopilar información cercana a

la falla. Como se explicó en el apartado 5.2, la humedad en la falla sugiere recarga de agua de escorrentía, por tanto, no se descarta la alteración de la litología.

5.10.2. Canales

Como se ha discutido, los canales requieren de mantenimiento. El recubrimiento es estable sólo en los primeros 3 bancos; luego, las velocidades alcanzan velocidades importantes que lo arrastran; bien es cierto, estos materiales quedan en las fosas de disipación diseñadas. En este sentido, para mantener el funcionamiento de los canales es necesario: limpiar eventualmente las fosas y reutilizar el material de recubrimiento

CONCLUSIONES

Clasificación de suelo

Se lograron identificar 3 tipos de suelos: arenas bien gradadas con grava **SW-G**, arcilla arenosa de baja de plasticidad **CL-S** y arcilla de alta plasticidad **CH**. Esto se realizo con una identificación inicial en campo, y luego, un análisis de laboratorio para corroboración. Éste ultimo englobó 2 criterios para las arenas y 3 para las arcillas: los dos primeros son el de gravedad especifica y granulometría, éstos aplican para todos los suelos; en el caso de las arcillas el último criterio es de límites de Atterberg. A continuación, se encuentra un resumen de estos valores.

SW-G

- Gravedad específica: 2,56 g/cm³
- Granulometría: 68,3 % arena, 31,7 % grava. Contenido de finos 3 %

CL-S

- Gravedad específica: 2,64 g/cm³
- Granulometría: 32 % arena, 13,6 % grava, 54,4 % arcilla
- Límites de Atterberg: Límite líquido 27%, índice de plasticidad 16,1%

CH

- Gravedad específica: 2,65 g/cm³
- Granulometría: 95 % arcilla
- Límites de Atterberg: Límite líquido 53%, índice de plasticidad 28%

De estos valores y la teoría se determinaron las propiedades hidráulicas y las mecánicas a emplear de cada uno:

Arena con grava

- N de Manning= 0.018
- $T_c = 4.28 \text{ N/m}^2$ y $T_{pc} = 3,27 \text{ N/m}^2$
- Angulo de fricción interna efectivo= 28,7 °
- Cohesión= 2 KPa
- Índice de vacíos= 0,55
- Peso unitario = 15,5 KN/m³

Arcilla arenosa CL-S

- N de Manning = 0.025
- $T_c = 1,67 \text{ N/m}^2$ y $T_{pc} = 1,29 \text{ N/m}^2$

- Angulo de fricción interna efectivo= $24,5^\circ$
- Cohesión= 14,7 KPa
- Índice de vacíos= 0,65
- Peso unitario = $16,7 \text{ KN/m}^3$

Arcilla CH

- N de Manning = 0.040
- $T_c = 30 \text{ N/m}^2$ y $T_{pc} = 23 \text{ N/m}^2$
- Angulo de fricción interna = 20°
- Cohesión= 103 KPa

Las arcillas tienen una capacidad de expandirse hasta un 5 %.

Teóricamente, las arcillas son impermeables, mientras las arenas son permeables.

Caracterización geomecánica

- El frente de explotación se divide en tres zonas: sur, central y norte. La zona sur tiene un plano de contacto inclinado entre los estratos que la conforman, además de un afloramiento de esquisto; la zona central muestra carcavamiento profundo, asimismo, una falla inversa aguas arriba del frente; la zona norte es una ladera natural.
- La existencia de suelos es predominante, en consecuencia, se espera que la posible falla sea de tipo circular.
- El análisis de inestabilidad se debe llevar a cabo con el método de Bishop Simplificado bajo condiciones secas y los datos anteriores.

Análisis del sistema de drenaje

- Sobre el frente de explotación actúan dos cuencas diferentes, una ubicada al norte y otra al sur; la primera drena al noroeste, tiene un área de 9.7 hectáreas y le toma 30 m al agua alcanzar el final de su cauce, la segunda, drena al suroeste tiene un área de 24.8 hectáreas y al agua le toma 60 min.
- Los periodos de mayor precipitación ocurren entre mayo-junio y agosto-noviembre
- La intensidad de lluvia de la zona puede modelarse a través de la ecuación:

$$I = \frac{292.161 \times T_r^{0.1155}}{t^{0.563276}}$$

- Los caudales asociados a cada cuenca son: cuenca 1 de 0,76 m³/s, cuenca 2, 1,46 m³/s. El caudal de diseño aplicado a las obras en la cuenca 1 + anexo es de 1,05 m³/s.

Diseño de los taludes

- La relación entre el ángulo de cara de talud y su altura es inversa, esto quiere decir que para taludes más altos es necesario reducir la inclinación de su cara. Lo inverso también aplica.
- Los taludes en arcilla tendrán un FS_{min} de 1,3, ángulo de cara de 70 °, de altura variable y una berma de 6 m.
- Los taludes en arena tendrán el mismo FS de 1,3 y ancho de berma que en arcilla, su ángulo 31 ° y la altura variable
- La cota de 1140 msnm será rebajada con una inclinación del 3 %
- El resto de los bancos tienen una inclinación de 1,75% y comienzan desde la vía de acceso disponible.
- El ángulo del talud total es de 26 ° y tendrá una altura de 36m.
- El volumen total a remover es de 156,420 m³ y a rellenar 3476 m³.

Medidas de control de agua

- Es necesario anexar 4,3 hectáreas de la cuenca 2 a la cuenca 1, resultando en una cuenca de 14 hectáreas, el tiempo de concentración se mantiene igual. El caudal incrementa a 1,05 m³/s.
- El agua corre libremente sobre los bancos, los cuales tienen peralte de 5 %.

- Las aguas de los bancos desembocan sobre un canal transversal al norte, llegando al final del área establecida. Este tiene un ancho de 2 m y sigue la tendencia de los bancos: cara inclinada-pista. Se inclina un 1 % en las secciones paralelas a la pista. El canal en general se encuentra 70 cm por debajo de las cotas de los bancos. En los primeros cuatro bancos, desde aguas abajo, se emplean fosas de disipación de energía, referirse al anexo V.
- El canal transversal debe recubrirse con gaviones debido a la velocidad erosiva.
- El canal que conecta el canal transversal y el cauce natural se recubrirá de gaviones, solo en los primeros 6 m. Este canal tiene una inclinación del 1 %, una sección rectangular de base 2 m.

Medidas de prevención y monitoreo

- Medir ángulo de cara, altura de banco y ancho de berma
- Documentar cualquier cambio litológico, estructural y otros de interés geotécnico para crear el modelo geotécnico.
- Se debe supervisar el canal en gaviones y la transición gavión-canal por arrastre y daños en su estructura.

RECOMENDACIONES

- Estudiar el potencial de hinchamiento de las arcillas con ensayos directos.
- Se recomienda realizar los estudios de geomecánica necesarios al frente abandonado aguas arriba. Con ello, se pretende evaluar la estabilidad de sus paredes, con lo cual podrá evaluarse la posibilidad de remover toda la arena y correr más el frente de explotación.
- Realizar ensayos de compresión a la arcilla blanca, los datos serán para ajustar la sección del canal.
- Se sugiere evaluar la instalación de pluviómetros para originar la base de datos de precipitaciones.

REFERENCIAS

- Ex Unión Soviética. (1936). The maximum permissible mean velocity in open channels. *Hydrotechnical Construction, Volumen 5*, 5-7.
- Adams, B. M. (2015). Slope Stability Acceptance Criteria for Opencast Mine Design. *12th Australia New Zealand Conference on Geomechanics*. Wellington, Nueva Zelanda: Brian Mark Adamas. Recuperado el 18 de Octubre de 2023, de https://www.researchgate.net/publication/279196497_Slope_Stability_Acceptance_Criteria_for_Opencast_Mine_Design
- Álvarez, M. (2006). *Estudio Neotéctónico de las cuencas de El Tocuyo, Quíbor y Yay, estado Lara*. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Obtenido de <http://saber.ucv.ve/handle/10872/14781>
- Angelone, S., & Zapata, R. (2018). Caracterización de Suelos Arcillosos y Limosos. Argentina. Obtenido de <https://www.fceia.unr.edu.ar/Geologíaygeotecnia/TIPOS%20DE%20SUELO.pdf>
- Ayala, J. (1986). *Manual de Taludes*. Madrid, España: Instituto Geológico y Minero de España. Obtenido de https://info.igme.es/SidPDF/065000/075/65075_0001.pdf
- Badillo, J., & Rodríguez, R. (2005). *Mecánica de Suelos. Fundamentos de la Mecánica de Suelos* (Vol. Tomo I). Ciudad de México: Editorial Limusa. Obtenido de https://www.academia.edu/60941469/Mec%C3%A1nica_de_Suelos_Tomo_I_Fundamentos_de_la_M%C3%A9canica_de_Suelos_Ju%C3%A1rez_Badillo_Rico_Rodr%C3%ADguez
- Boligana, J. (1979). *Drenaje Urbano*. Caracas: Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales y Renovables. Obtenido de <https://www.scribd.com/document/356022065/DRENAJE-URBANO-BOLINAGA-pdf>
- Briceño, J., Pérez, C., & Vielma, L. (2018). *Nociones de Mecánica de Suelos*. Mérida, Venezuela: Universidad de Los Andes.

- Budhu, M. (2015). *Soil Mechanics Fundamentals*. Arizona: Wiley Blackwell. Obtenido de https://www.academia.edu/34808450/Soil_mechanics_fundamentals_by_muni_budhu_wiley_blackwell_civilengforall
- Bushman, J. R. (Febrero de 1965). Geología del area de Barquisimeto, Venezuela. *Boletín de Geología*, VI, págs. 3-112.
- Campos, V., Guedez, V., & Osuna, S. (1977). Geología de la región noroeste de Acarigua y al sur de la Falla de Boconó. *II Congreso Latinoamericano de Geología, Memoria 3*, págs. 1669-1681.
- Campos, V., V, G., & Osuna, S. (1979). Geología de la Serranía de Portuguesa. *Boletín de Geología*, págs. 3-40.
- Charles, J. A. (1982). An Appraisal of the Influence of a Curved Failure Envelope on Slope Stability. *Geotechnique, Volumen 32*, 389-392.
- Chereque, W. M. (s.f.). *Hidrología*. Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú. Obtenido de <https://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/28689>
- Clark County, Washington. (2021). *Clark County Stormwater Manual, Book 2- BMP Design*. Washington. Obtenido de <https://clark.wa.gov/public-works/stormwater-code-and-manual>
- Department of Mineral and Energy of Western Australia. (1999). *Geotechnical Considerations in Open Pit Mines. Guideline*. The Government of Western Australia. Recuperado el 17 de Octubre de 2023, de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.dmp.wa.gov.au/Documents/Safety/MSH_G_GeotechnicalConsiderationsOpenPitMinespdf.pdf
- Dirección de Obras Hidráulicas. (2013). *Manual de Drenaje Urbano*. Chile: Ministerio de Obras Públicas de Chile. Recuperado el 2 de Noviembre de 2023, de <https://repositoriodirplan.mop.gob.cl/biblioteca/items/4379116e-eceb-479c-ad6b-fdfc6b3b3a8c/full>
- Evanoff, J., Bushman, J. R., & Araujo, E. (Diciembre de 1959). Bloques de rocas antiguas incrustados en sedimentos del terciario inferior en la cuenca de Lara. V, 67-80.
- Evanoff, J., Zozaya, D., Fernández, S., & Alcántara, C. (Diciembre de 1957). Arcillas Blancas en el estado Lara. *Boletín de Geología*, IV, pág. 97.

- Franceschi, L. (1984). *Drenaje Vial*. Caracas, Venezuela: Colegio de Ingenieros de Venezuela. Obtenido de <https://www.scribd.com/document/201332522/Drenaje-Vial-Luis-e-Franceschi-2>
- Fundación Empresas Polar. (febrero de 2005). Geos Venezuela. Apéndice cartográfico. Mapas nacionales y estatales. Caracas, Distrito Capital, Venezuela. Obtenido de <https://bibliofep.fundacionempresaspolarg.org/publicaciones/colecciones/apendice-cartografico/>
- Geotechnical Consulting. (2024). *Geotechnical Consulting ABC*. Obtenido de <https://geotecniaymecanicasuelosabc.com/limites-atterberg/>
- Giraldo, C. (1985). *Néotectonique et sismotectonique de la région d'El Tocuyo-San Felipe (Vénézuéla centro-occidental)*. Université de Montpellier II. Université de Montpellier II. Recuperado el 28 de Octubre de 2023
- González de Vallejo, L. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid, España: Pearson, Prentice Hall.
- Google. (16 de 01 de 2024). *Google Earth - Sanare - Lara*. Obtenido de <https://earth.google.com/web/search/sanare,+lara/@9.7511009,-69.6525908,1340.26411958a,4507.39319894d,35y,0h,0t,0r/data=CncaTRJHCiUweDhIN2Q5ZDkzZTNmMjUzYTE6MHgyYzMzNWY0N2U0ZGExZGQ1GT53gv3XgSNAIbMKmwGuaVHAKgxzYW5hcmUsIGxhcmEYAiABliYKJAnuPty4rbMmQBF0z03K930>
- Google, I. (2021 de Enero de 2021). *Google Earth*. Obtenido de Google Earth: <https://earth.google.com/web/search/sanare,+lara/@9.75790322,-69.6735406,1366.14614596a,5312.57685846d,35y,0h,0t,0r/data=CigiJgokCfrnaacqQTVAEffnaacqQTXAGUWAnv7bz0IAIUkAnv7bz0nAOgMKATA>
- Hernández, R., Fernández, C., & Pilar, L. B. (1997). *Metodología de la Investigación*. (M. d. Pérez, Ed.) McGraw-Hill. Obtenido de https://www.uv.mx/personal/cbustamante/files/2011/06/Metodologia-de-la-Investigaci%C3%83%C2%B3n_Sampieri.pdf
- Hustrulid, W., Kuchta, M., & Martin, R. (2013). *Open Pit Mine Planning and Design* (Vol. I y II). CRC Press.

- Jefferson, C. (1964). Post. Eoceno entre Quíbor y Sanare, Estado Lara. *Boletín de Geología*, 219-224. Recuperado el 27 de Octubre de 2023
- Lifeder Education. (9 de Abril de 2022). Tipos de investigación científica: cualitativa, cuantitativa, experimental, campo. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=2J4ONmYQqz0>
- Melentijevic, S. (2005). *Estabilidad de taludes en macizos rocosos con criterios de rotura no lineales y leyes de fluencia no asociada*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Obtenido de <https://oa.upm.es/722/>
- Naseer, S., & Evans, R. (2019). Stability analysis of slopes using limit equilibrium and finite element methods. *2nd Conference on Sustainability in Civil Engineering* (pág. 7). Islamabad, Pakistan: Capital University of Science and Technology. Recuperado el 20 de Octubre de 2023, de https://www.researchgate.net/publication/359524563_STABILITY_ANALYSIS_OF_SLOPES_USING_LIMIT_EQUILIBRIUM_AND_FINITE_ELEMENT_METHODS
- Ochoa, K., & Reyes, R. (2011). *Propuesta de los parámetros para el diseño de estabilidad de taludes y de los depósitos finales en Minera Loma de Níquel, C.A. Municipio Guaicaipuro, estado Miranda*. Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Departamento de Minas. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Obtenido de <http://saber.ucv.ve/handle/10872/15487>
- Plaza, S., & Rodríguez, C. (2013). Análisis Comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. *Revista de la Construcción*, 17-29. Obtenido de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-915X2013000100003
- Plaza, S., & Rodríguez, C. (abril de 2013). Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. *Revista de la Construcción*, Volumen 12. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2013000100003>
- Sánchez, T. (2017). *Propuesta de diseño de taludes operativos y talud final de la fosa noreste de la mina Paso Diablo, Carbones del Zulia S.A, estado Zulia*. Trabajo

Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Departamento de Minas, Caracas, Venezuela. Recuperado el 19 de Octubre de 2023, de <http://saber.ucv.ve/handle/10872/15850>

Sjöberg, J. (1996). *Large Scale Slope Stability in Open Pit Mining- A Review*. Reporte Técnico, Luleå University of Technology., Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, Mining and Geotechnical Engineering., Suecia. Recuperado el 15 de Octubre de 2023, de <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:995561/FULLTEXT01.pdf>

Sjöberg, J. (1999). *Analysis of Large Scale Rock Slopes*. Suecia: Luleå University of Technology, Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, Mining and Geotechnical Engineering. Recuperado el 20 de Octubre de 2023, de <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A991784&dswid=2836>

Soler, P. (2019). *Integración del plan de cierre de mina en el desarrollo de la explotación del frente 1 de la concesión minera Los Viejos, Municipio Puerto Cabello, estado Carabobo*. Departamento de Minas. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela. Recuperado el 16 de Octubre de 2023, de <http://saber.ucv.ve/handle/10872/20156>

Sotelo, G. Á. (2002). *Hidráulica de Canales*. Ciudad de México, México: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Suárez, J. (2001). *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga: División Editorial y de Publicaciones, Universidad Industrial de Santander.

Tapia, A., Contreras, L., Jefferies, M., & Steffen, O. (2020). Risk Evaluation of Slope Failure at the Chuquicamata Mine. *In Slope Stability 2007, Proceedings of the 2007 International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering* (pág. 18). Perth, Australia: Luis Fernando Contreras. Recuperado el 18 de Octubre de 2023, de https://www.researchgate.net/publication/342160632_Risk_Evaluation_of_Slope_Failure_at_the_Chuquicamata_Mine

Villón, M. B. (s.f.). *Hidrología Estadística*. Lima, Perú: Instituto Tecnológico de Costa Rica, Departamento de Ingeniería Agrícola. Obtenido de https://www.academia.edu/94279341/HIDROLOG%3%8DA_ESTADISTICA_M%3%A1ximo_Vill%3%B3n_B%3%A9jar

Von der Osten, E., & Zozaya, D. (Diciembre de 1957). Geología de la parte suoreste del estado Lara. *Boletín de Geología, IV*, pág. 97.

ANEXO I: ENSAYOS DE LABORATORIO

Gravedad específica

Resultados de Gravedad

Gravedad Específica							
Muestra	Picnómetro	Masa de suelo (g)	Masa de picnómetro y agua (g)	Masa de picnómetro , agua y muestra (g)	Gravedad específica (g/cm ³)	Factor de corrección (K)	Gravedad específica corregida(g/cm ³)
SA	356	10.009	82.319	88.531	2.64	0.99821	2.63
SR	364	10.356	81.81	88.127	2.56	0.99821	2.56
SB	596	15.267	147.311	156.808	2.65	0.99821	2.64



Picnómetros antes y después de vacío. A la derecha antes, a la izquierda: después

Granulometría por hidrometría

PRUEBA DE HIDROMETRÍA ARCILLA BLANCA DE ALTA PLASTICIDAD)								
Tiempo	R (g/l)	Rd (g/l)	Rc (g/l)	T (°C)	K (sin unidad)	L (cm)	D (mm)	%Pasante
2	51	52	47,9	27	0,01258	7,8	0,02484	95,8
5	49	50	45,9	27	0,01258	8,1	0,01601	91,8
15	45	46	41,9	26,9	0,01258	8,8	0,009636	83,8
30	43	44	39,9	27	0,01258	9,1	0,006929	79,8
60	39	40	35,9	27,5	0,01258	9,7	0,005058	71,8
250	30	31	27,4	28	0,01244	11,2	0,002633	54,8
1440	22	23	18,5	26,3	0,01272	12,5	0,001185	37

PRUEBA DE HIDROMETRÍA ARCILLA DE BAJA PLASTICIDAD AMARILLA								
Tiempo	R (g/l)	Rd (g/l)	Rc (g/l)	T (°C)	K (sin unidad)	L (cm)	D (mm)	%Pasante
2	38	39	34,9	27	0,01258	9,9	0,02799	69,8
5	35	36	31,9	27	0,01258	10,4	0,01814	63,8
15	34	35	30,9	27	0,01258	10,6	0,01058	61,8
30	33	34	29,9	27,1	0,01258	10,7s	0,007513	59,8
60	31	32	27,9	27,1	0,01258	11,1	0,005411	55,8
250	25	26	22,4	28,1	0,01244	12	0,002725	44,8
1440	21	22	17,5	26,9	0,01258	12,7	0,001181	35

PRUEBA DE HIDROMETRÍA ARENA								
Tiempo	R (g/l)	Rd (g/l)	Rc (g/l)	T (°C)	K (sin unidad)	L (cm)	D (mm)	%Pasante
2	36	37	32,9	27	0,01297	10,2	0,02929	67,1173
5	27	28	23,9	27	0,01297	11,7	0,01984	48,757
15	24	25	20,9	27	0,01297	12,2	0,01170	42,6369
30	21	22	17,9	27	0,01297	12,7	0,008439	36,5167
60	18	19	14,9	27,2	0,01297	13,2	0,006083	30,3966
250	15	16	12,4	28,5	0,01283	13,7	0,003003	25,2965
1440	13	14	10,4	28	0,01283	14	0,001265	21,2164

Límites de Atterberg.

Ensayo. Cuchara de Casagrande
Límite líquido, abertura cerrada



Arcilla de alta plasticidad



Porción pasante 200 de arena con
gravas



Arcilla de baja plasticidad

Límite plástico



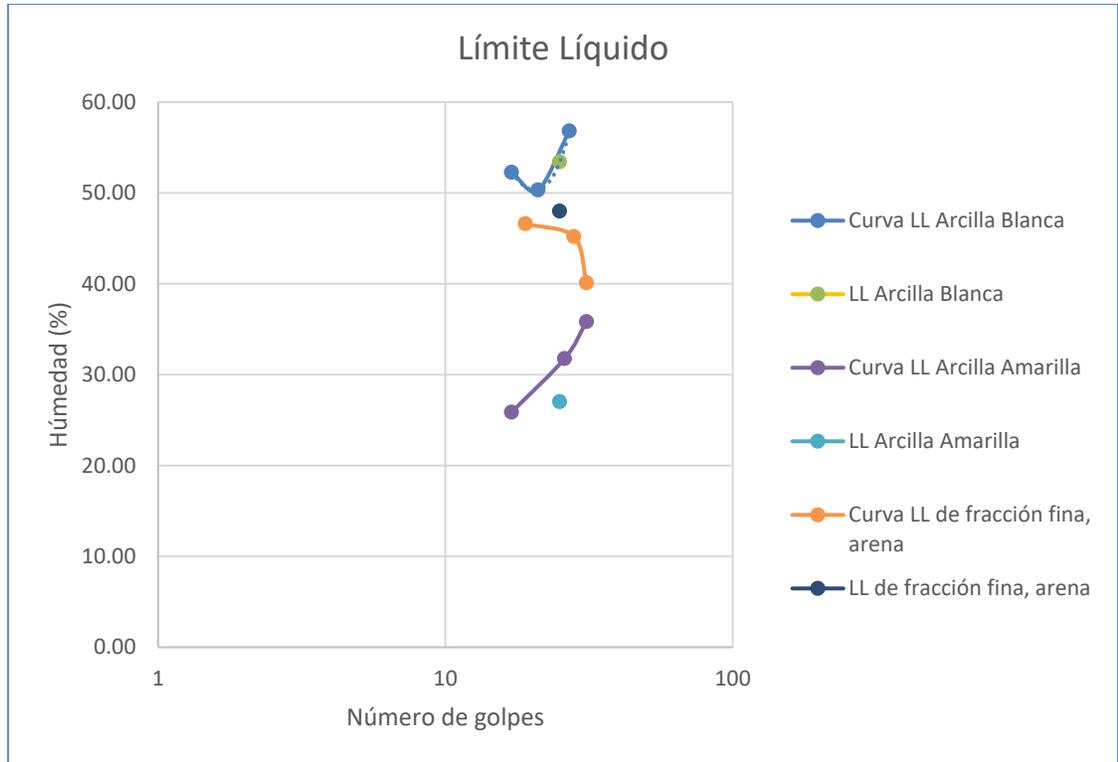
Arcilla de alta plasticidad

Porción fina de arenas con gravas

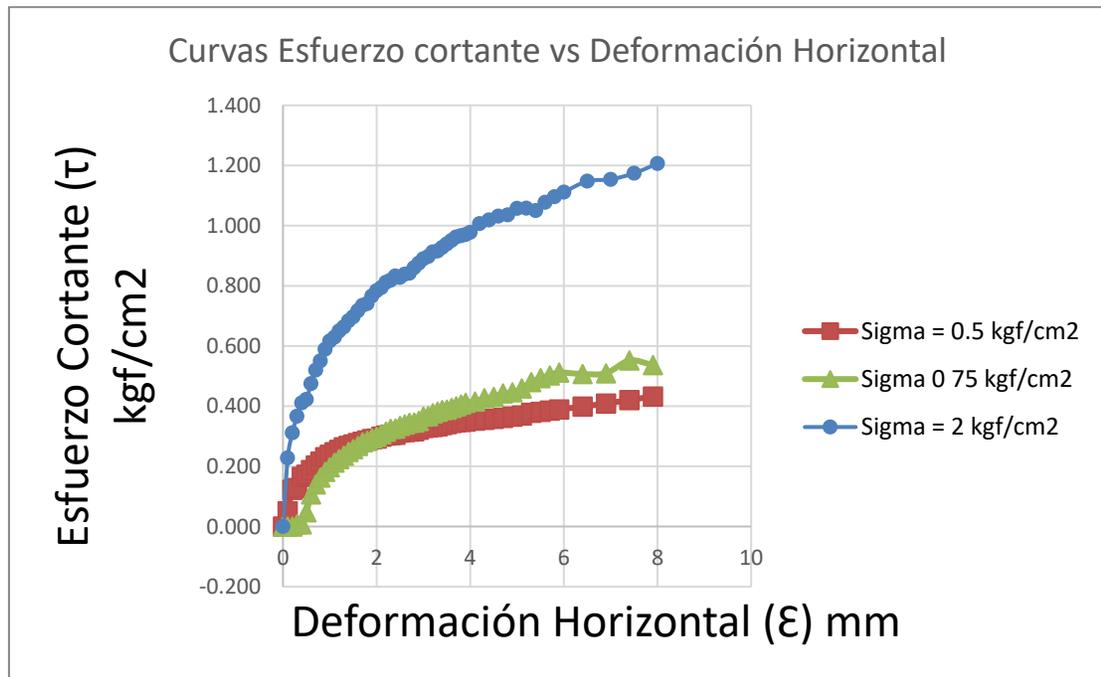


Arcila magra

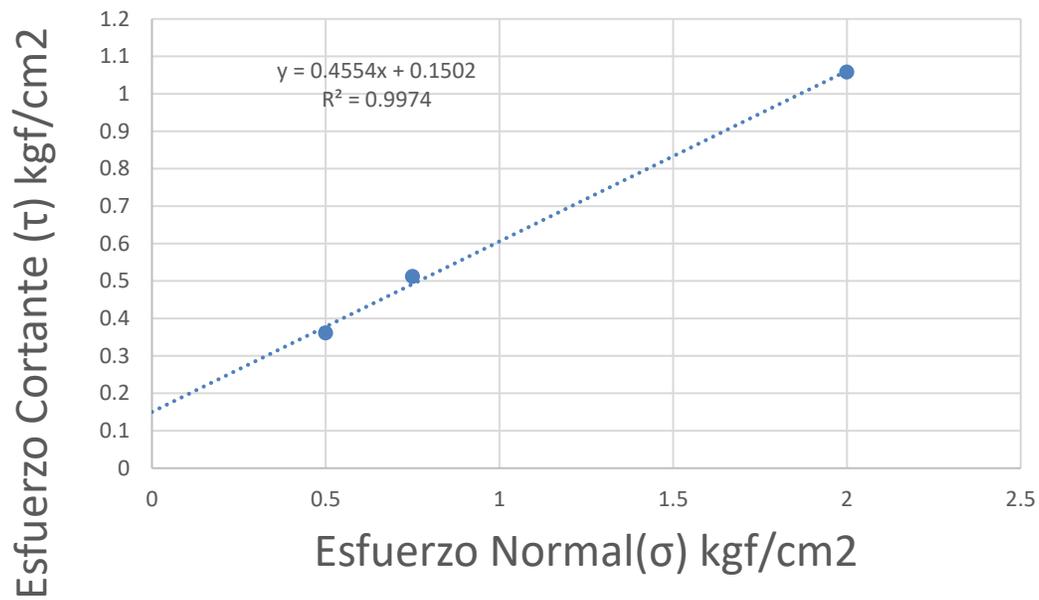
Resultados



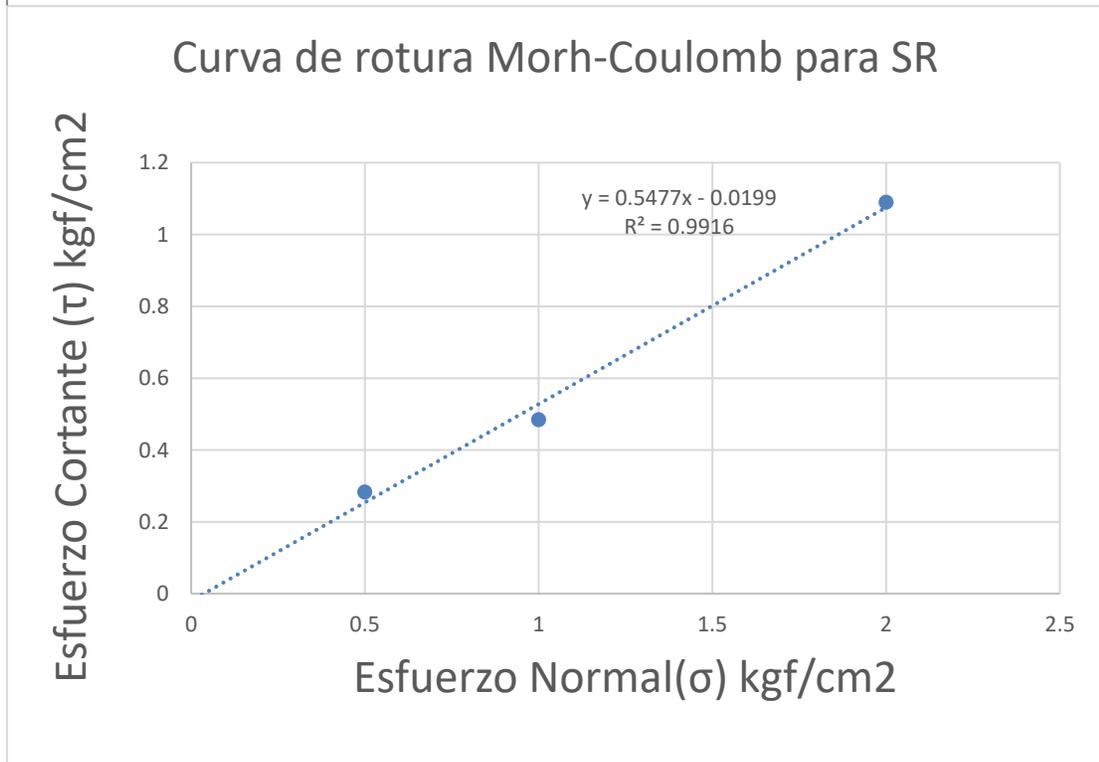
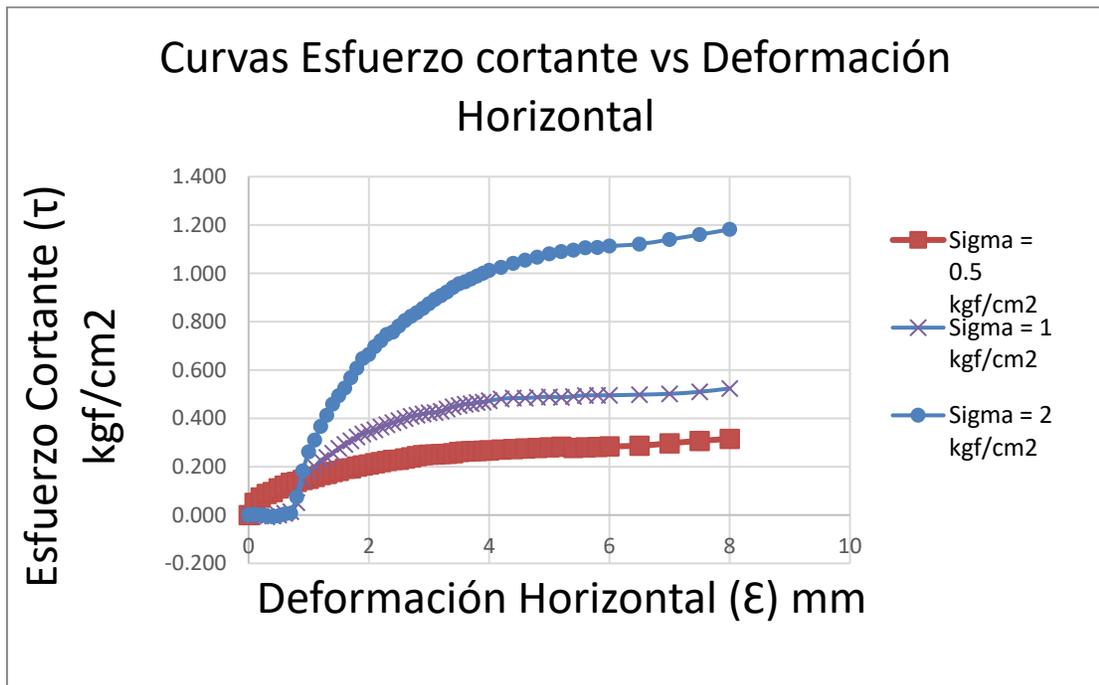
Resultados de ensayo de corte directo para arcillas CL-S



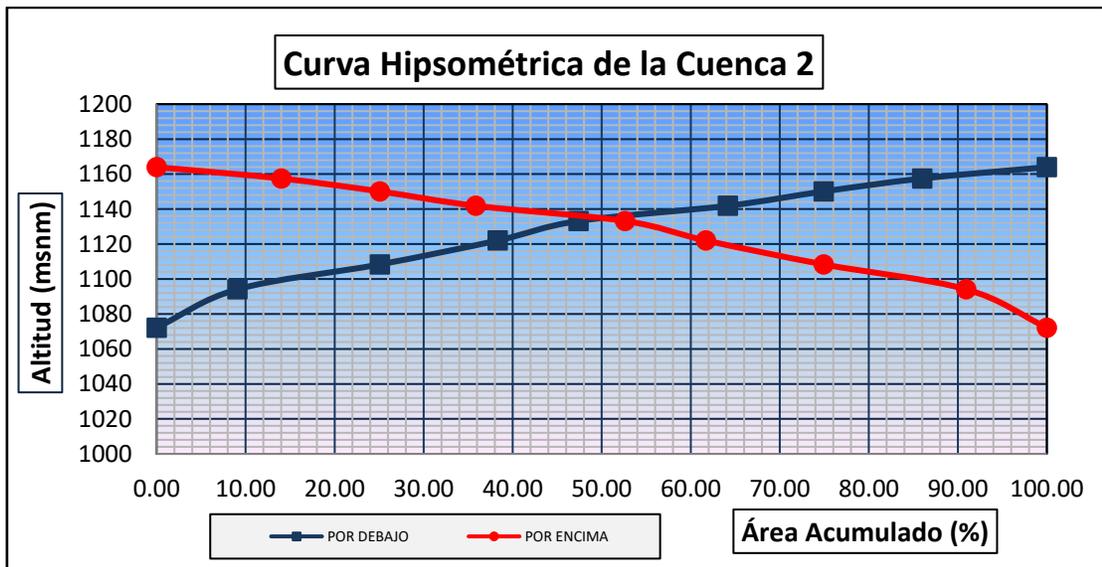
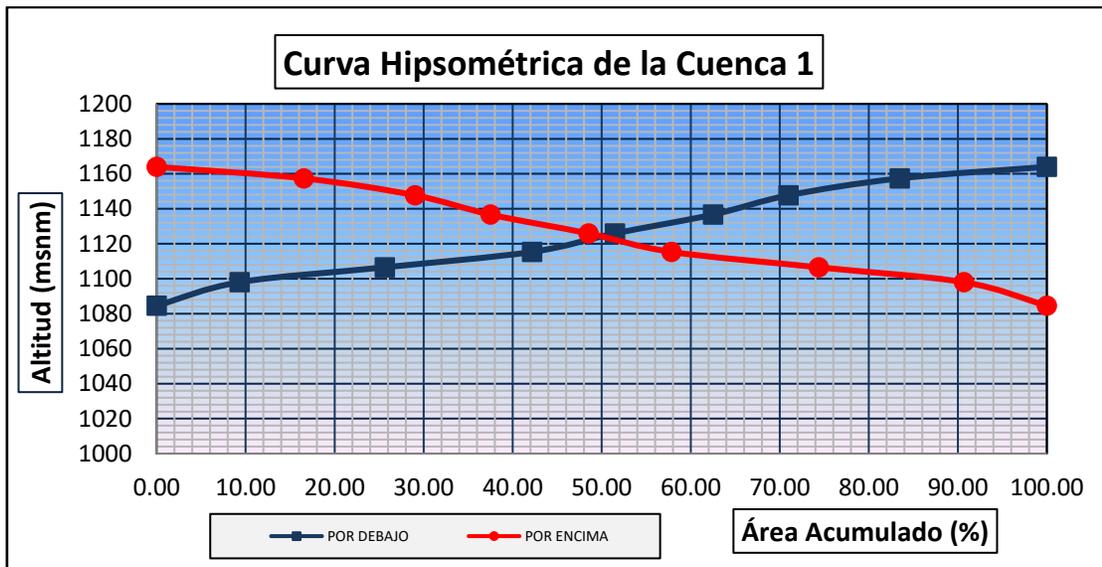
Curva de rotura Morh-Coulomb para Arcilla de baja plasticidad



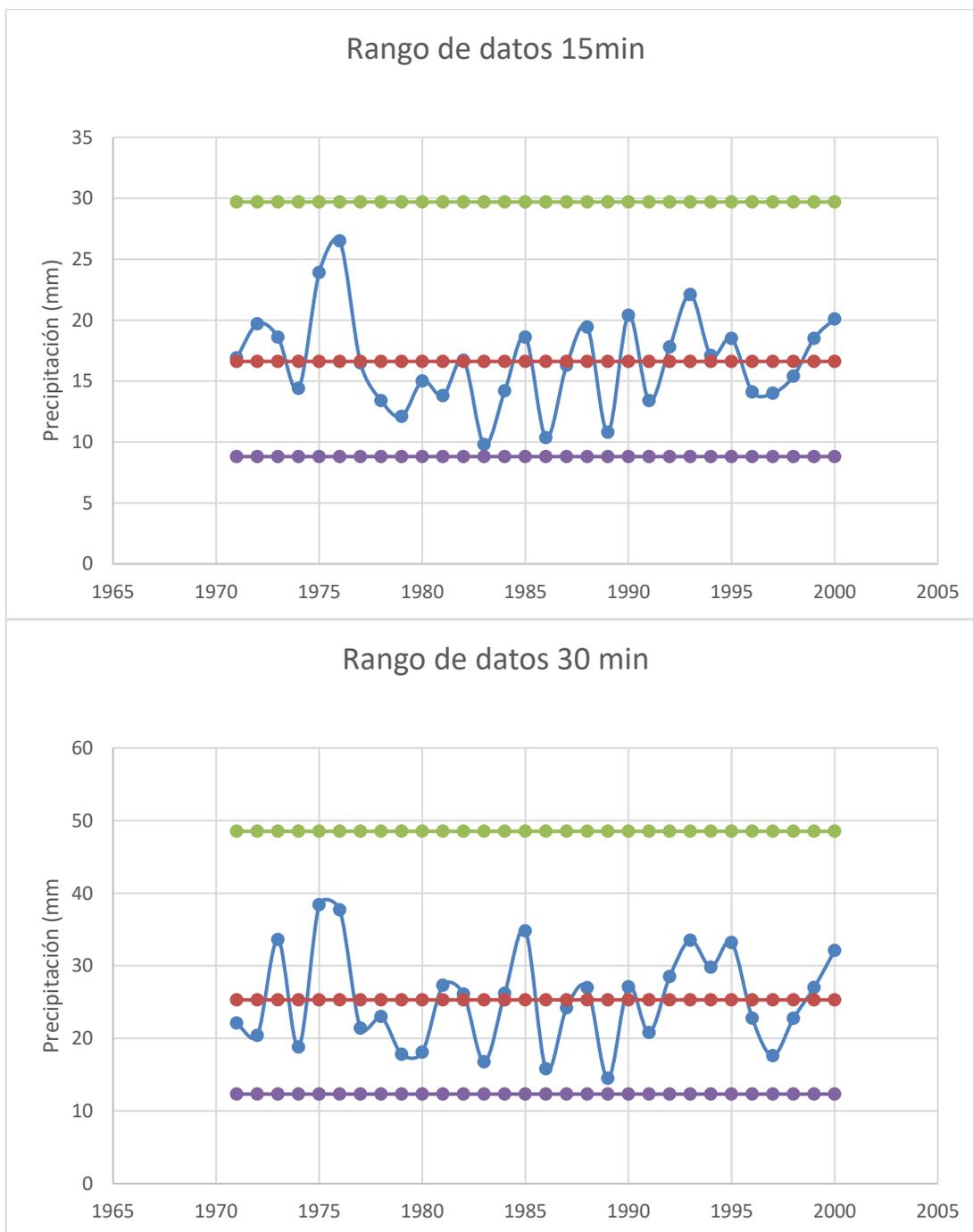
Resultados ensayo de corte directo sobre arenas bien gradadas.



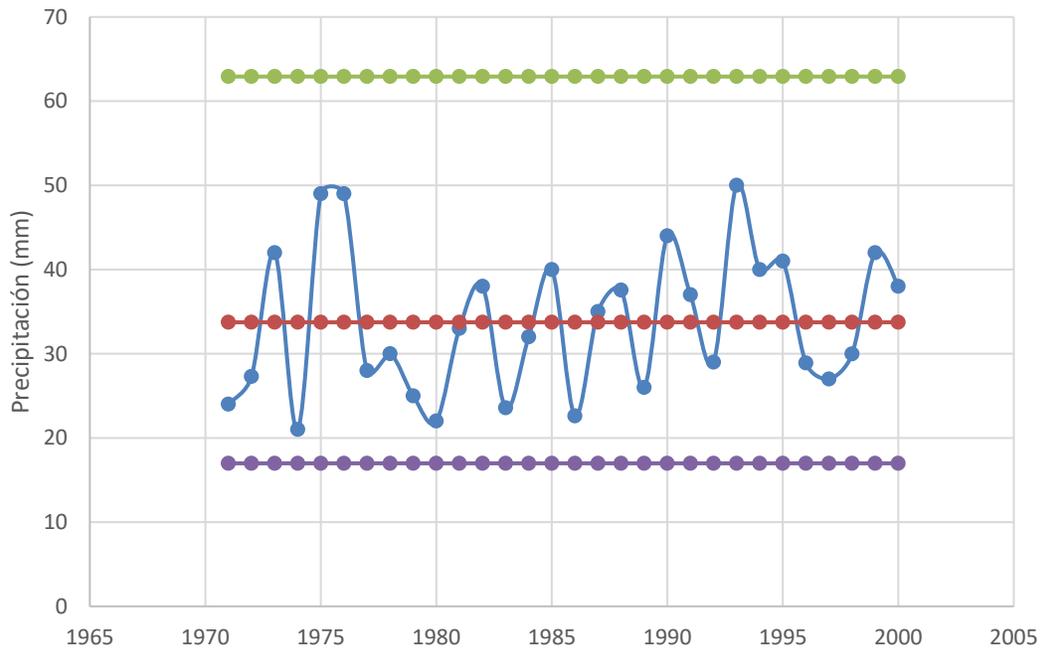
ANEXO II: ESTUDIO HIDROLOGICO



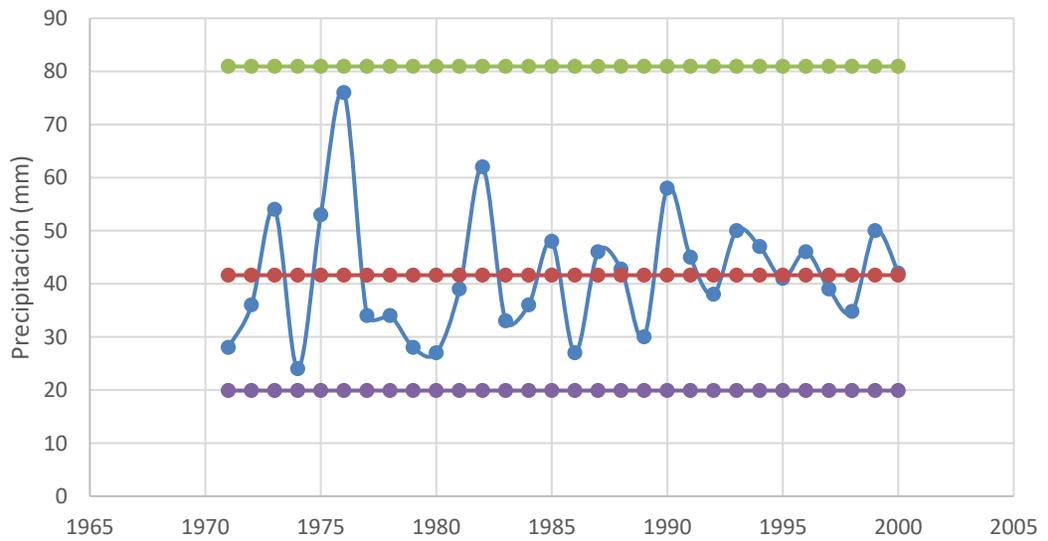
Verificación de datos dudosos de precipitaciones a diferentes intervalos en la estación Sanare.

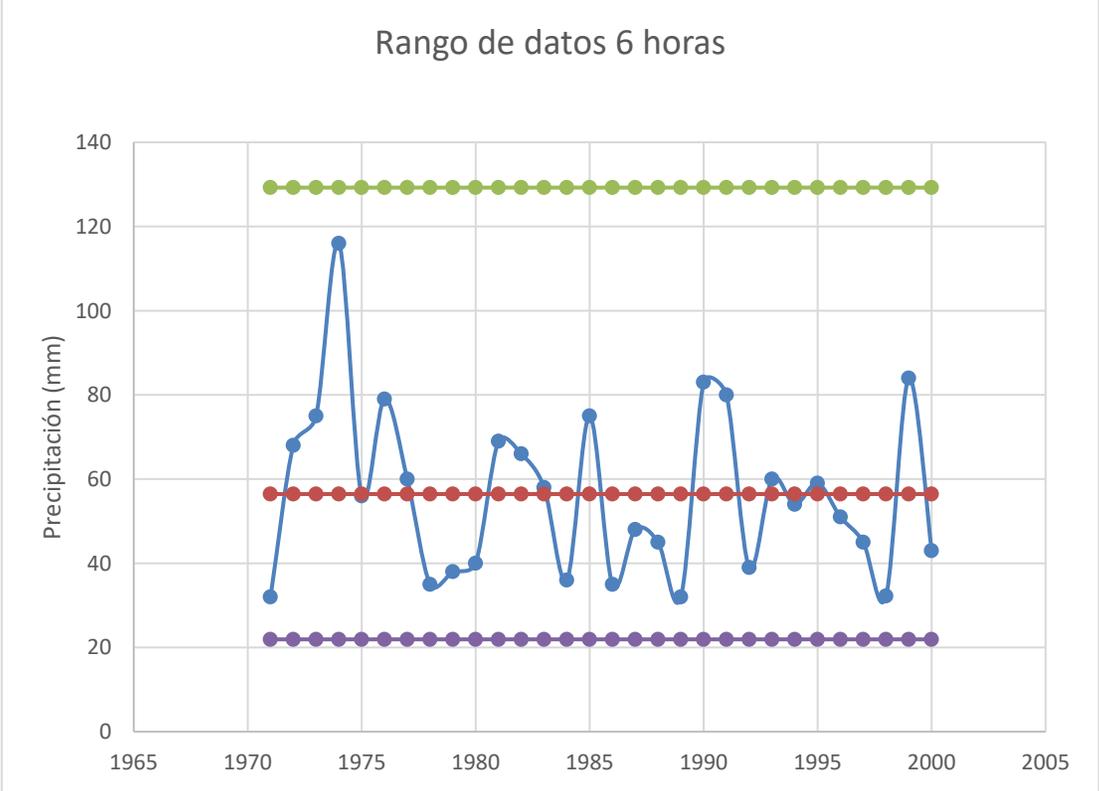
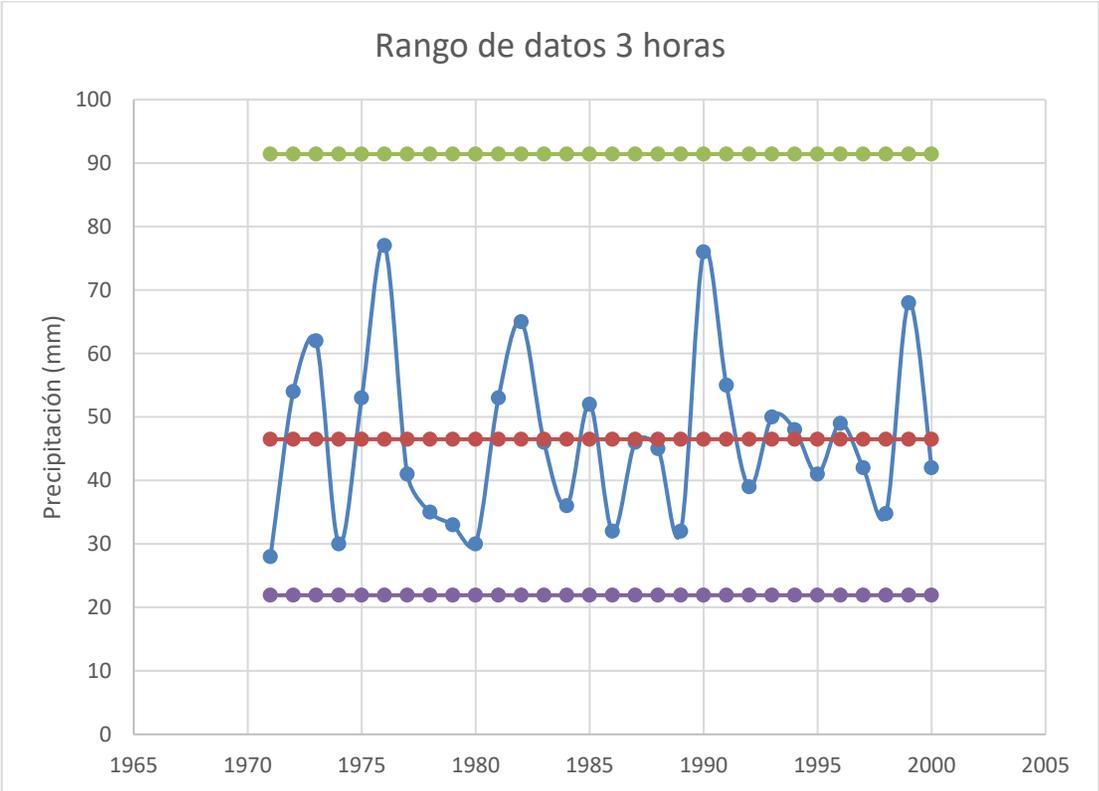


Rango de datos 1 hora

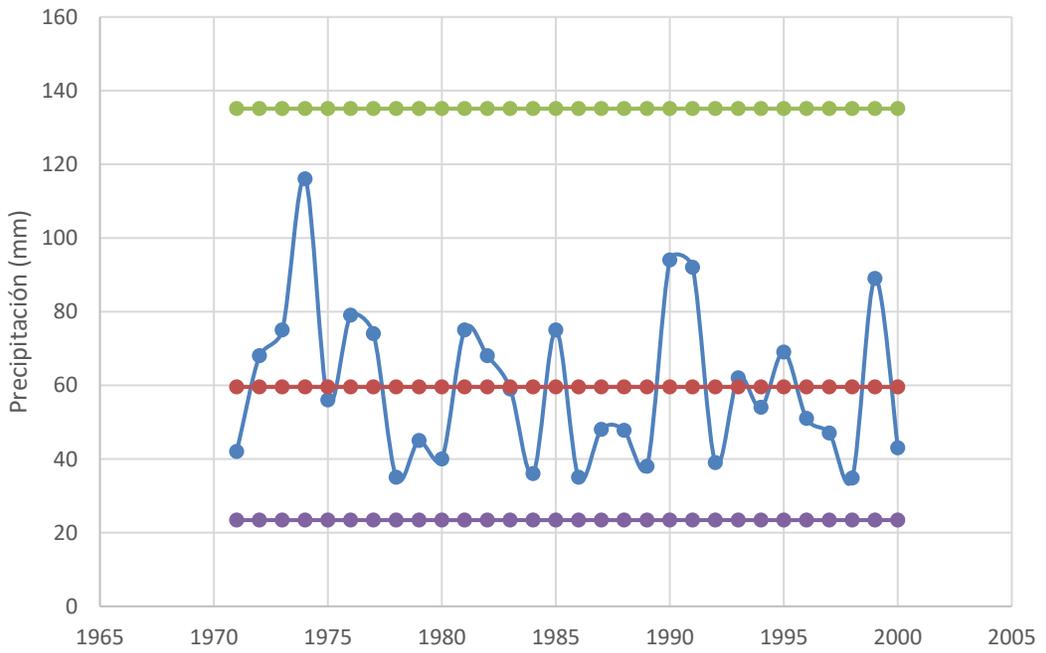


Rango de datos 2 horas

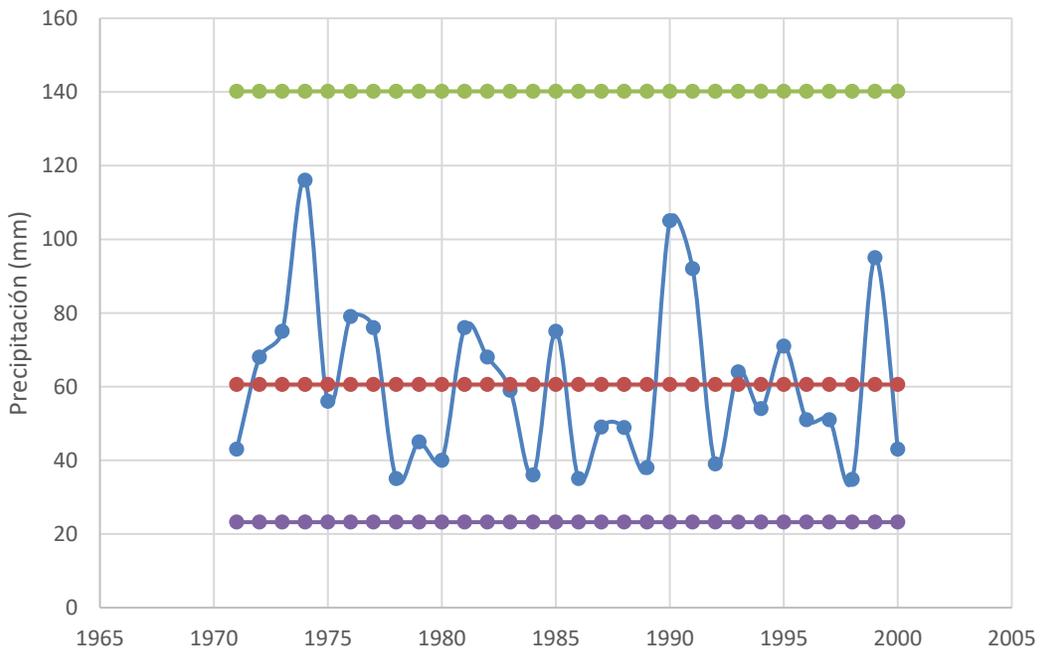




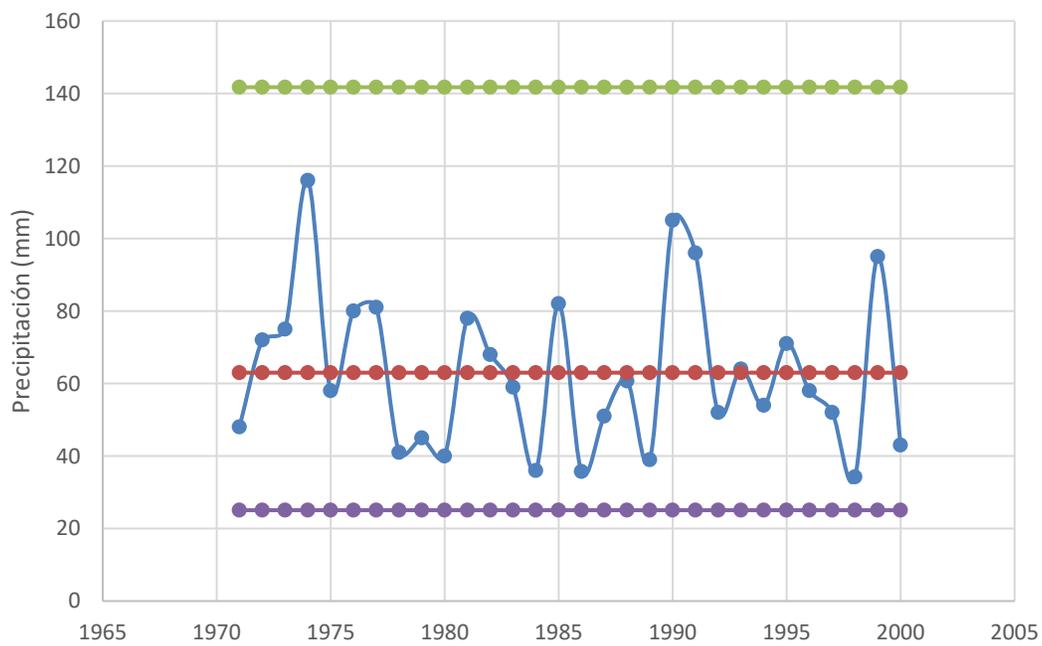
Rango de datos 9 horas



Rango de datos 12 horas



Rango de datos 24 horas



**Datos de precipitación para elaboración de curvas IDF, estación Sanare,
edo Lara**

Años	15 min	30 min	1 hora	2 horas	3 horas	6 horas	9 horas	12 horas	24 horas
1971	16.9	22.1	24.0	28.0	28.0	32.0	42.0	43.0	48.0
1972	19.7	20.4	27.3	36.0	54.0	68.0	68.0	68.0	72.0
1973	18.6	33.6	42.0	54.0	62.0	75.0	75.0	75.0	75.0
1974	14.4	18.8	21.0	24.0	30.0	116.0	116.0	116.0	116.0
1975	23.9	38.4	49.0	53.0	53.0	56.0	56.0	56.0	58.0
1976	26.5	37.7	49.0	76.0	77.0	79.0	79.0	79.0	80.0
1977	16.5	21.4	28.0	34.0	41.0	60.0	74.0	76.0	81.0
1978	13.4	23.0	30.0	34.0	35.0	35.0	35.0	35.0	41.0
1979	12.1	17.8	25.0	28.0	33.0	38.0	45.0	45.0	45.0
1980	15.0	18.1	22.0	27.0	30.0	40.0	40.0	40.0	40.0
1981	13.8	27.3	33.0	39.0	53.0	69.0	75.0	76.0	78.0
1982	16.7	26.1	38.0	62.0	65.0	66.0	68.0	68.0	68.0
1983	9.8	16.8	23.6	33.0	46.0	58.0	59.0	59.0	59.0
1984	14.2	26.2	32.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0
1985	18.6	34.8	40.0	48.0	52.0	75.0	75.0	75.0	82.0
1986	10.4	15.8	22.6	27.0	32.0	35.0	35.0	35.0	35.7
1987	16.3	24.2	35.0	46.0	46.0	48.0	48.0	49.0	51.0
1988	19.4	27.0	37.6	42.8	45.0	45.0	47.8	48.9	60.7
1989	10.8	14.5	26.0	30.0	32.0	32.0	38.0	38.0	39.0
1990	20.4	27.1	44.0	58.0	76.0	83.0	94.0	105.0	105.0
1991	13.4	20.8	37.0	45.0	55.0	80.0	92.0	92.0	96.0
1992	17.8	28.5	29.0	38.0	39.0	39.0	39.0	39.0	52.0
1993	22.1	33.5	50.0	50.0	50.0	60.0	62.0	64.0	64.0
1994	17.1	29.8	40.0	47.0	48.0	54.0	54.0	54.0	54.0
1995	18.5	33.2	41.0	41.0	41.0	59.0	69.0	71.0	71.0
1996	14.1	22.8	28.9	46.0	49.0	51.0	51.0	51.0	58.0
1997	14.0	17.6	27.0	39.0	42.0	45.0	47.0	51.0	52.0
1998	15.4	22.8	30.0	34.8	34.8	32.2	34.8	34.8	34.2
1999	18.5	27.0	42.0	50.0	68.0	84.0	89.0	95.0	95.0
2000	20.1	32.1	38.0	42.0	42.0	43.0	43.0	43.0	43.0

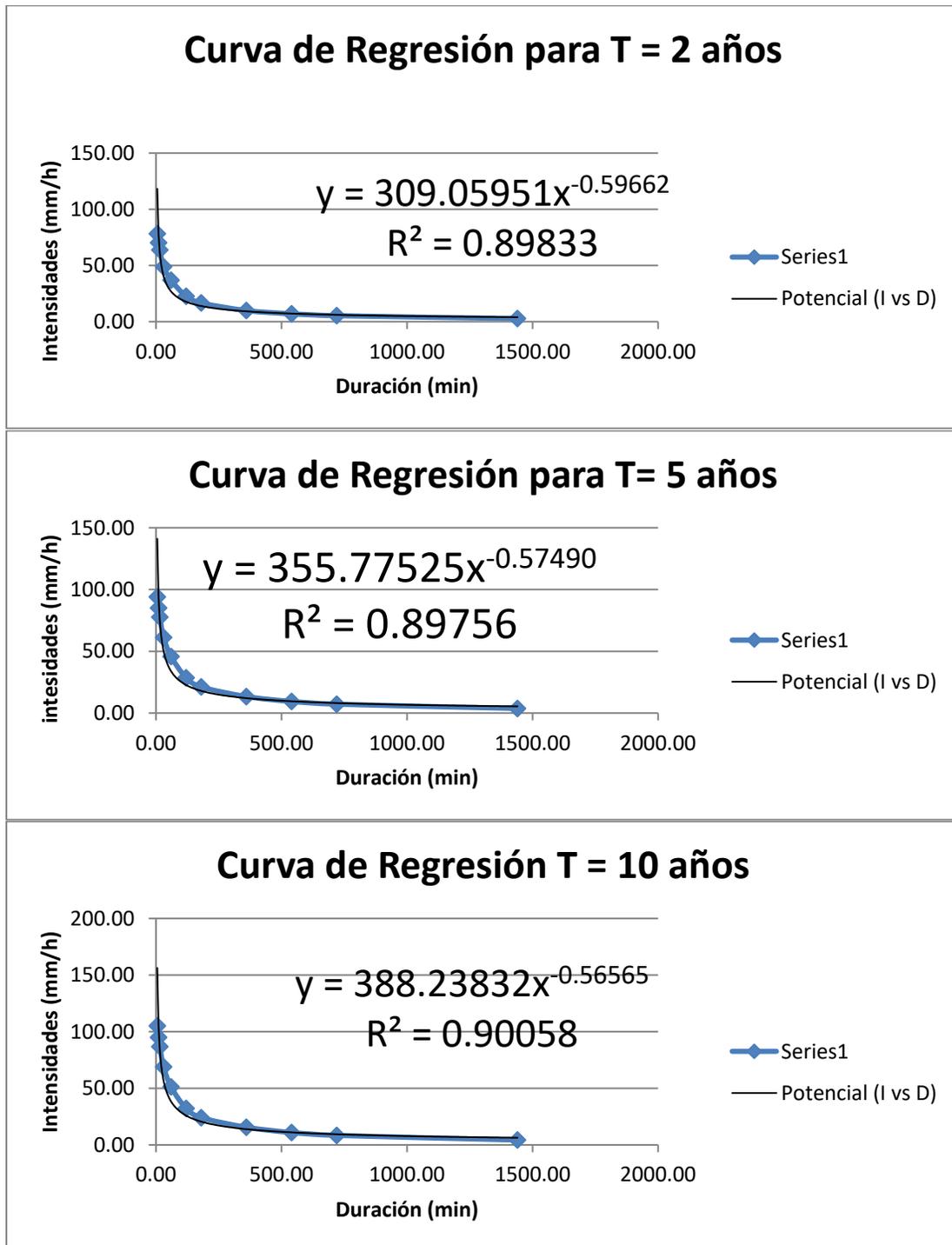
Números de curva para tierras cultivadas de agricultura (United States Department of Agriculture, 1986)

Números de curva para zonas agrícolas cultivadas							
Descripción de la cobertura			Número de curva según grupo hidrológico de suelo				
Tipo de cobertura	Tratamiento	Condición hidrológica	A	B	C	D	
Labrado	Suelo descubierto	(-)	77	86	91	94	
	Residuo de cultivo (RC)	Pobre	76	85	90	93	
		Buena	74	83	88	90	
Cultivo en hileras	Hilera recta (HR)	Pobre	72	81	88	91	
		Buena	67	78	85	89	
	HR + RC	Pobre	71	80	87	90	
		Buena	64	75	82	85	
	Contorno (C)	Pobre	70	79	84	88	
		Buena	65	75	82	86	
	C + RC	Pobre	69	78	83	87	
		Buena	64	74	81	85	
	Contorno y terraceado (CyT)	Pobre	66	74	80	82	
		Buena	62	71	78	81	
	CyT + RC	Pobre	65	73	79	81	
		Buena	61	70	77	80	
	Granos pequeños	Residuo de cultivo (RC)	Pobre	65	76	84	88
			Buena	63	75	83	87
		HR + RC	Pobre	64	75	83	86
Buena			60	72	80	84	
Contorno (C)		Pobre	63	74	82	85	
		Buena	61	73	81	84	
C + RC		Pobre	62	73	81	84	
		Buena	60	72	80	83	
Contorno y terraceado (CyT)		Pobre	61	72	79	82	
		Buena	59	70	78	81	
CyT + RC		Pobre	60	71	78	81	
		Buena	58	69	77	80	
Legumbres al aire libre o prados de rotación	HR + RC	Pobre	66	77	85	89	
		Buena	58	72	81	85	
	C	Pobre	64	75	83	85	
		Buena	55	69	78	83	
	CyT	Pobre	63	73	80	83	
		Buena	54	67	76	80	

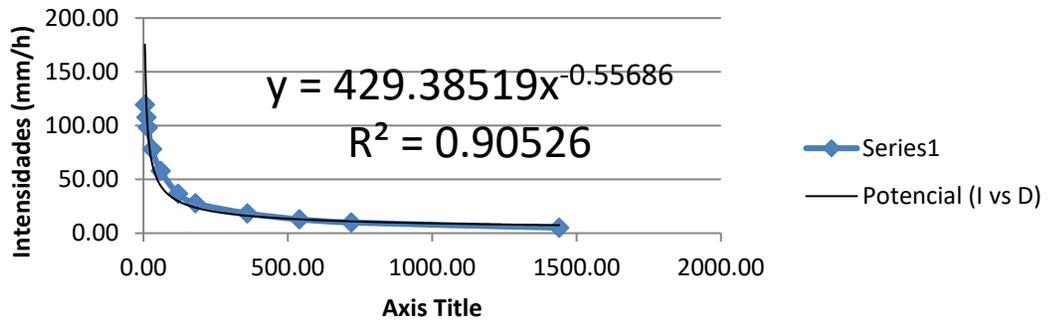
Números de curva para otras zonas agrícolas (United States Department of Agriculture, 1986)

Descripción de la cobertura		Número de curva según grupo hidrológico de suelo			
Tipo de cobertura	Condición hidrológica	A	B	C	D
Pasto, pradera, cubierta continua para pastoreo	Pobre	68	79	86	89
	Aceptable	49	69	79	84
	Bueno	39	61	74	80
Prados- grama continua, protegida de pastoreo y generalmente cortada para heno	(-)	30	58	71	78
Corta- maleza rebajada	Pobre	48	67	77	83
	Aceptable	35	56	70	77
	Bueno	30	48	65	73
Bosques- combinación de grama (granja de huertos o arboles)	Pobre	57	73	82	86
	Aceptable	43	65	76	82
	Bueno	32	58	72	79
Bosques	Pobre	45	66	77	83
	Aceptable	36	60	73	79
	Bueno	30	55	70	77
Granjas- edificios, caminos	(-)	59	74	82	86

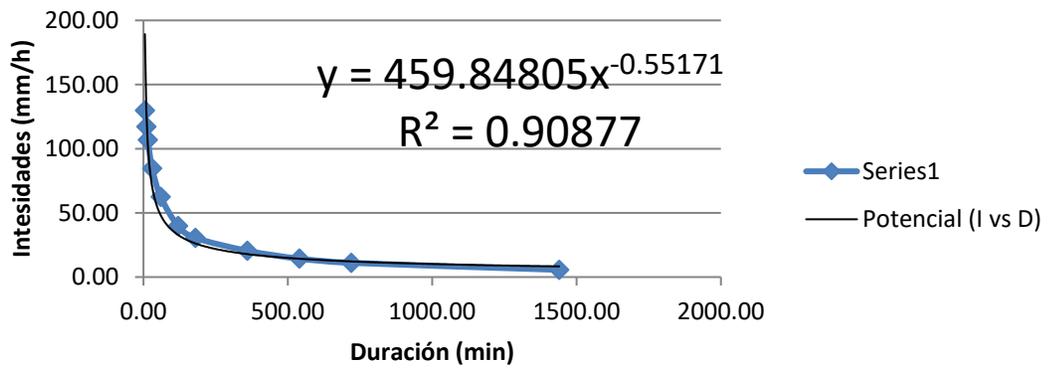
Curvas de regresión lineal para IDF



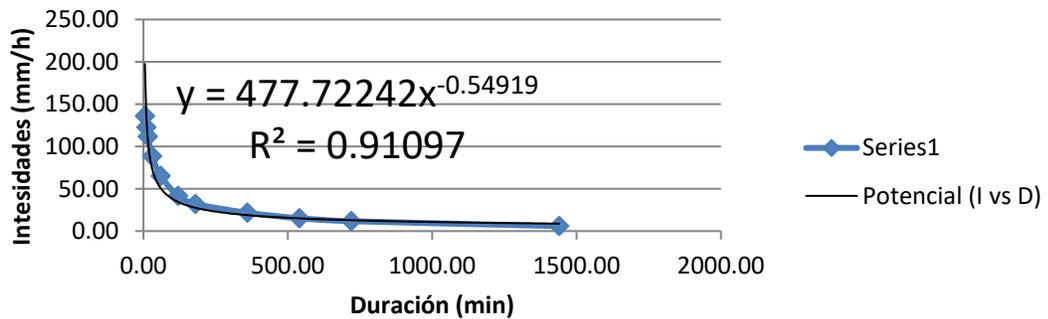
Curva de Regresión para T= 25 años

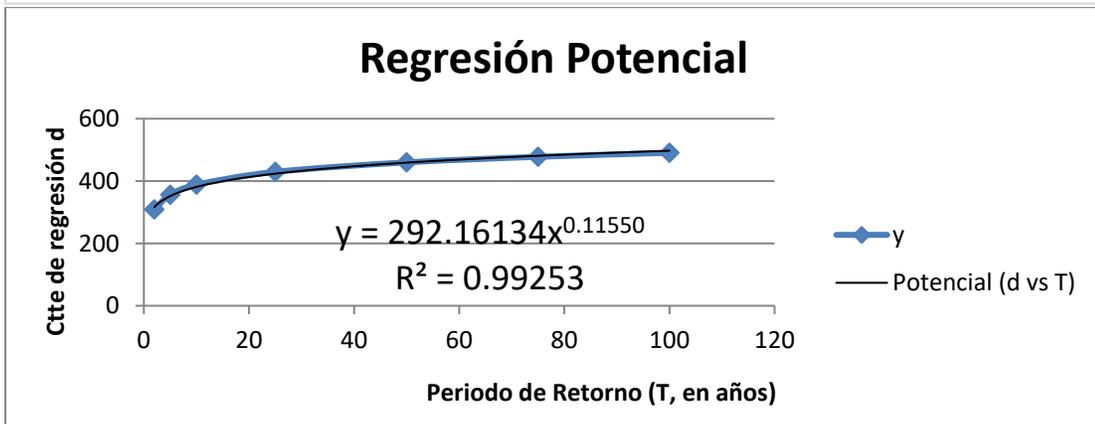
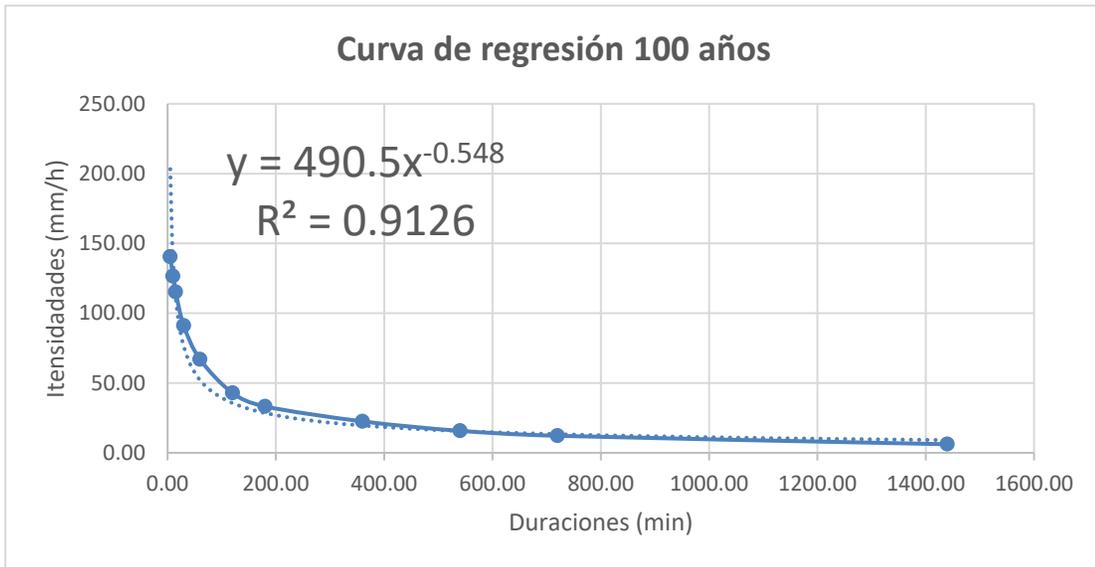


Curva de Regresión para T = 50 años



Curva de Regresión para T = 75 años





Extensión de curvas IDF

Tr	logb	b	m	Delta t	Intensidad 5 min	intensidad 10 min
2	1.7	55.0	0.9	0.6	78.2	70.3
5	1.8	69.1	0.9	0.6	94.1	85.0
10	1.9	75.8	0.9	0.6	105.1	95.0
25	1.9	84.3	0.9	0.6	119.3	107.7
50	2.0	90.8	0.9	0.6	129.8	117.1
75	2.0	94.1	0.9	0.6	136.0	122.6
100	2.0	96.1	0.9	0.6	140.5	126.5

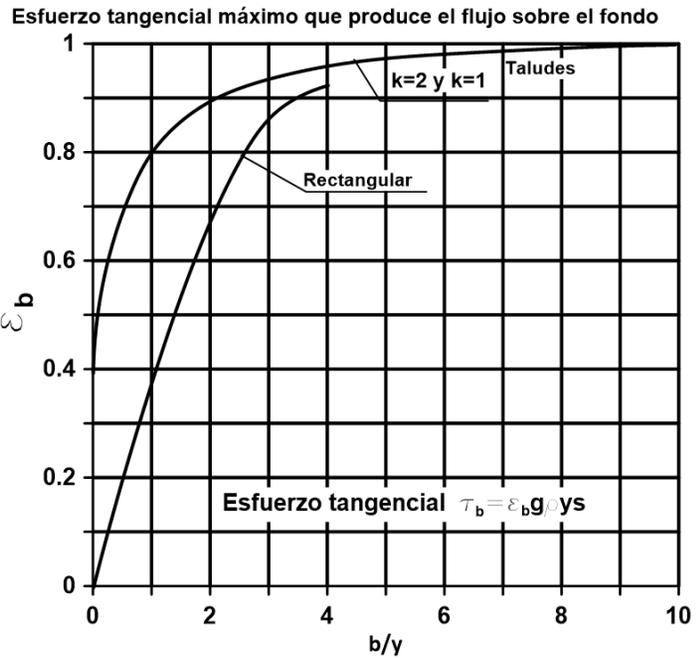
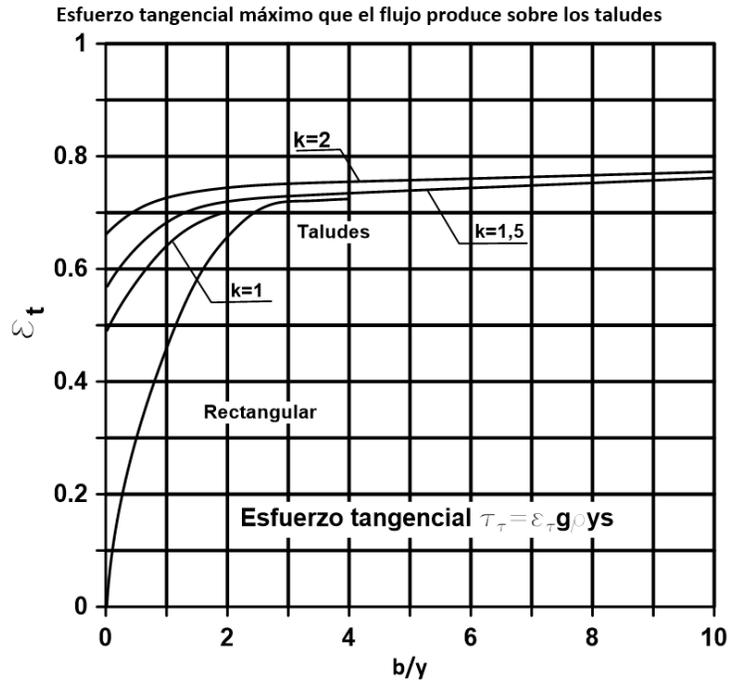
CÁLCULO DE CAUDALES IN SITU EN LA CUENCA 2

S0 (m/m)	Qi (m3/s)	area aguas arriba (m2)	velocidad aguas arriba (m/s)	carga aguas arriba (m)	area aguas abajo (m2)	velocidad aguas abajo (m)	carga aguas abajo (m)	S (m/m)	Q (m3/s)	diferencia (m3/s)
0.000877	1.356	2	0.678	0.023	2.400	0.565	0.016	0.001	1.413	5.71E-02
0.000953	1.385	2	0.692	0.024	2.400	0.577	0.017	0.001	1.416	3.09E-02
0.000956	1.400	2	0.700	0.025	2.400	0.583	0.017	0.001	1.417	1.68E-02
0.000958	1.409	2	0.704	0.025	2.400	0.587	0.018	0.001	1.418	9.10E-03
0.000959	1.413	2	0.707	0.025	2.400	0.589	0.018	0.001	1.418	4.94E-03
0.000959	1.416	2	0.708	0.026	2.400	0.590	0.018	0.001	1.418	2.68E-03
0.000959	1.417	2	0.709	0.026	2.400	0.590	0.018	0.001	1.418	1.46E-03
0.000959	1.418	2	0.709	0.026	2.400	0.591	0.018	0.001	1.419	7.90E-04
0.00096	1.418	2	0.709	0.026	2.400	0.591	0.018	0.001	1.419	4.29E-04
0.00096	1.418	2	0.709	0.026	2.400	0.591	0.018	0.001	1.419	2.33E-04
0.00096	1.418	2	0.709	0.026	2.400	0.591	0.018	0.001	1.419	1.26E-04
0.00096	1.419	2	0.709	0.026	2.400	0.591	0.018	0.001	1.419	6.867E-05
0.00096	1.419	2	0.709	0.026	2.400	0.591	0.018	0.001	1.419	3.728E-05
0.00096	1.419	2	0.709	0.026	2.400	0.591	0.018	0.001	1.419	2.024E-05

Flujo laminar, valores de "n" y "k" usados en Cálculos de Tiempo para hidrogramas (Clark County, Washington, 2021)	
"n _s " Valores para flujo laminar de la ecuación de Manning (para los primeros 300 pies de recorrido)	ns
Superficies lisas (concreto, asfalto, grava o suelo aplacado)	0,011
Suelo labrado o suelo suelto (sin residuos)	0,05
Suelo cultivado con cubierta residual (s < 0,20 m/m)	0,06
Suelo cultivado con cubierta residual (s > 0,20 m/m)	0,17
Pequeñas praderas y césped	0,15
Gramma densa	0,24
Gramma de bermuda	0,41
En intervalos (natural)	0,13
Árboles o bosques con poca maleza	0,40
Árboles o bosques con maleza densa	0,80
"k" Valores usados in Tiempo de Viaje/Cálculos de Tiempo de Concentración	k
Bosques con basura y praderas (n = 0,10)	3
Suelo con maleza y algunos árboles (n=0,060)	5
Labrada o mínimamente cultivada (n= 0,040)	8
Gramma alta (n=0,035)	9
Gramma corta, pastos y praderas (n=0,030)	11
Casi suelo descubierto (n = 0,25)	13

ANEXO III: DISEÑO HIDRAULICO

Gráficas método del esfuerzo tangencial permisible



Secciones de canales. Datos de entrada método del esfuerzo tangencial permisible

Arcilla de baja plasticidad

DATOS DE ENTRADA					
Tc	2,883806	N/m ²	Tpc	2,218312	N/m ²
Tipo de Canal	Recto		θ	0,270431	
K (arcilla)	1	AD	k	3,607213	
Factor de seguridad	1,3		kr	3,5	
Fricción I,	24,49	°	Tpt	2,218312	N/m ²
n de Manning	0,025				
Caudal (m ³ /s)	-	m ³ /s	Gravedad	9,81	m/s ²
S	-	m/m	LS de caudal		m ³ /s
ρ agua	997	kg/m ³	LI de caudal		m ³ /s
Tolerancia	3	%	lp	30,62789	%

Arena

DATOS DE ENTRADA					
Tc	4,253536	N/m ²	Tpc	3,271951	N/m ²
Tipo de Canal	Recto		θ	0,343909	
K	0,712067	AD	k	2,792191	
Factor de seguridad	1,3		kr	2,75	
Fricción I,	28,7	°°	Tpt	2,32985	N/m ²
n de Manning	0,018				
Caudal	-	m ³ /s	Gravedad (m/s ²)	9,81	m/s ²
S (m/m)	-		LS de caudal		m ³ /s
ρ agua	997	kg/m ³	LI de caudal		m ³ /s
Tolerancia (%)	3	%	d50	3,14	mm

Arcilla de alta plasticidad

DATOS DE ENTRADA					
Tc	30	N/m ²	Tpc	23,07692	N/m ²
Tipo de Canal	Recto		θ	0,628398	
K (arcilla)	1	AD	k	1,376151	
Factor de seguridad	1,3		kr	0	
Fricción I,	20	°	Tpt	23,07692	N/m ²
n de Manning	0,04				
Caudal		m ³ /s	Gravedad	9,81	m/s ²
S		m/m	LS de caudal		m ³ /s
ρ agua	997	kg/m ³	LI de caudal		m ³ /s
Tolerancia	3	%			

Análisis longitudinal de flujo sobre bancos

Pendiente Longitudinal = 1% y Z1 = 1%, arcilla					
Y (m)	Area (m ²)	V (m/s)	X (m)	Perímetro 1	Perímetro 2
0,10474	5,261081435	0,029652	0	10,47451	0,11529
0,09474	4,758781435	0,032782	0,99916	9,474456	0,104283
0,08474	4,256481435	0,03665	1,99798	8,474406	0,093275
0,081284	4,08291916	0,038208	-2,343	8,128854	0,089472

Pendiente Longitudinal = 1% y Z1 = 2%, arcilla					
Y (m)	Area (m2)	V (m/s)	X (m)	Perímetro 1	Perímetro 2
0,137953	3,480546719	0,044821	0	6,899015	0,151848
0,127953	3,228246719	0,048323	0,99868	6,398915	0,140841
0,117953	2,975946719	0,05242	1,99699	5,898815	0,129834
0,105401	2,65927121	0,058663	3,24923	5,271112	0,116018

Pendiente Longitudinal = 1% y Z1 = 3%, arcilla					
Y (m)	Area (m2)	V (m/s)	X (m)	Perímetro 1 (m)	Perímetro 2 (m)
0,161949	2,736372196	0,05701	0	5,400677	0,178262
0,151949	2,567407196	0,060762	0,99831	5,067197	0,167254
0,141949	2,398442196	0,065042	-1,9962	4,733717	0,156247
0,122698	2,073159504	0,075247	3,91559	4,091718	0,135057

Pendiente Longitudinal = 1% y Z1 = 4%, arcilla					
Y (m)	Area (m2)	V (m/s)	X (m)	Perímetro 1	Perímetro 2
0,18137	2,30884171	0,067566	0	4,537879	0,199639
0,17137	2,18154171	0,071509	0,99799	4,287679	0,188632
0,16137	2,05424171	0,07594	1,99555	4,037479	0,177624
0,15137	1,92694171	0,080957	2,99254	3,787279	0,166617
0,14137	1,79964171	0,086684	3,98878	3,537079	0,15561
0,136661	1,73969287	0,089671	4,45762	3,419254	0,150426

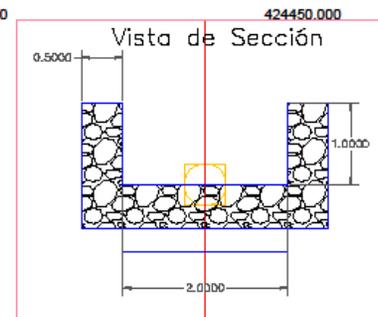
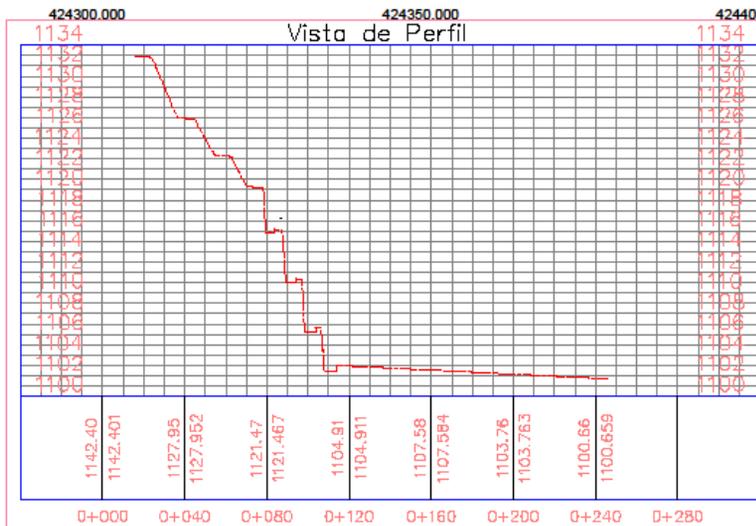
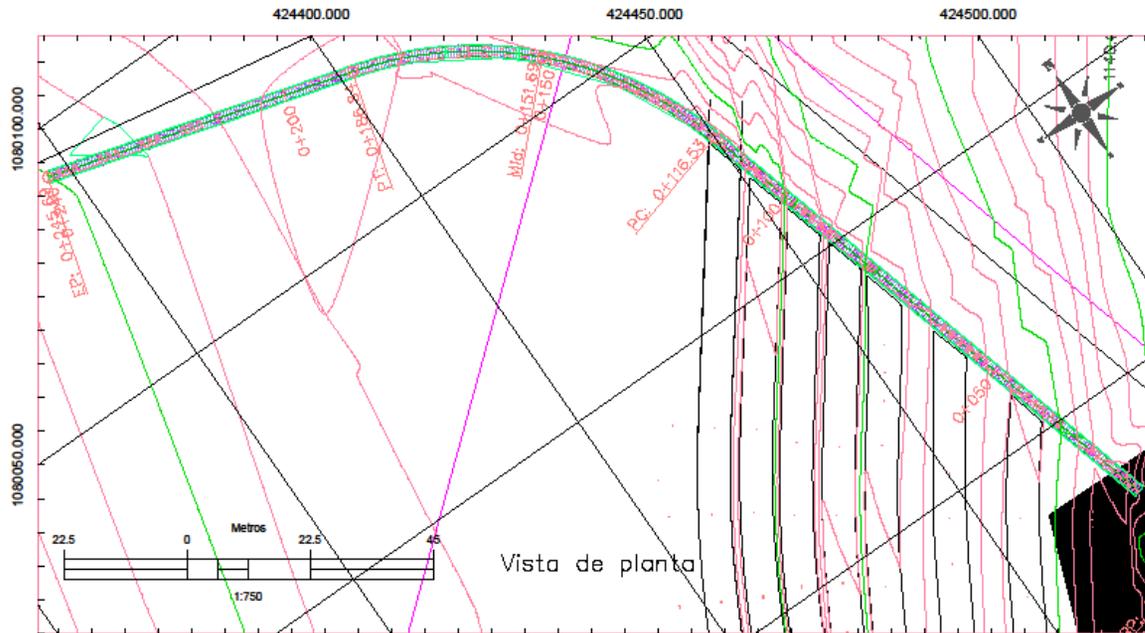
Pendiente Longitudinal = 1% y Z1 = 5%, arcilla					
Y (m)	Area (m2)	V (m/s)	X (m)	Perímetro 1	Perímetro 2
0,197946	2,024988203	0,077037	0	3,963867	0,217885
0,187946	1,922688203	0,081136	0,99772	3,763617	0,206877
0,177946	1,820388203	0,085696	1,99499	3,563367	0,19587
0,167946	1,718088203	0,090799	2,99167	3,363117	0,184863
0,157946	1,615788203	0,096547	3,98762	3,162867	0,173855
0,148575	1,519923916	0,102637	4,92005	2,975215	0,163541

Pendiente Longitudinal = 1,75% y Z1 = 5%, arcilla					
Y (m)	Area (m2)	V (m/s)	X (m)	Perímetro 1	Perímetro 2
0,197946	2,024988203	0,077037	0	3,963867	0,217885
0,187946	1,922688203	0,081136	0,56988	3,763617	0,206877
0,177946	1,820388203	0,085696	1,13946	3,563367	0,19587
0,167946	1,718088203	0,090799	1,70868	3,363117	0,184863
0,157946	1,615788203	0,096547	2,27744	3,162867	0,173855
0,133775	1,368523359	0,113991	3,64936	2,678852	0,14725

Pendiente Longitudinal = 3% y Z1 = 5%, arcilla					
Y (m)	Area (m2)	V (m/s)	X (m)	Perímetro 1	Perímetro 2
0,197946	2,024988203	0,077037	0	3,963867	0,217885
0,187946	1,922688203	0,081136	0,33235	3,763617	0,206877
0,177946	1,820388203	0,085696	0,66451	3,563367	0,19587
0,167946	1,718088203	0,090799	0,99646	3,363117	0,184863
0,157946	1,615788203	0,096547	1,32812	3,162867	0,173855
0,147946	1,513488203	0,103073	1,65942	2,962618	0,162848
0,137946	1,411188203	0,110545	1,99025	2,762368	0,151841
0,120917	1,236976969	0,126114	2,55207	2,421353	0,133096

Pendiente Longitudinal = 1,75% y Z1 = 5%, arena					
Y (m)	Area (m2)	V (m/s)	X (m)	Perímetro 1	Perímetro 2
0,193484	2,095434989	0,074448	0	3,87452	0,37496
0,183484	1,987134989	0,078505	0,56978	3,67427	0,355581
0,173484	1,878834989	0,08303	1,13926	3,47402	0,336202
0,163484	1,770534989	0,088109	1,70835	3,273771	0,316822
0,153484	1,662234989	0,09385	2,27696	3,073521	0,297443
0,115246	1,248112983	0,124989	4,44342	2,307797	0,223339

**ANEXO IV MAPAS: ESTAN REFERENCIADOS A SIRGAS
REGVEN N19**



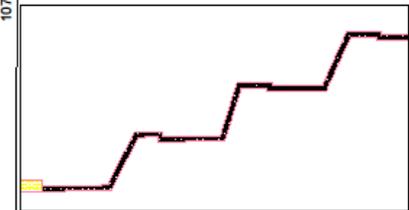
Vista de sección: escala 1:50
 Vista de perfil: escala de anotación 1:500
 escala general 1:2000



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
 FACULTAD DE INGENIERIA
 ESCUELA DE GEOLOGÍA, MINAS Y GEOFISICA
 TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ELABORACION DEL PLAN DE ESTABILIZACION DE TALUDES EN EL SECTOR "EL YESO", CANTERA CURIGUA, MUNICIPIO ANDRES ELOY BLANCO, ESTADO LARA

VISTAS DE CANAL TRANSVERSAL
 DETALLE DE ESCALONES



FOSAS DE DISIPACIÓN, DESDE AGUAS ABAJO

- Fosa 1) L= 6.15, escalón de 60cm
- Fosa 2) L= 5.40m, escalón de 45cm
- Fosa 3 y 4) L= 4.75m, escalón de 30cm

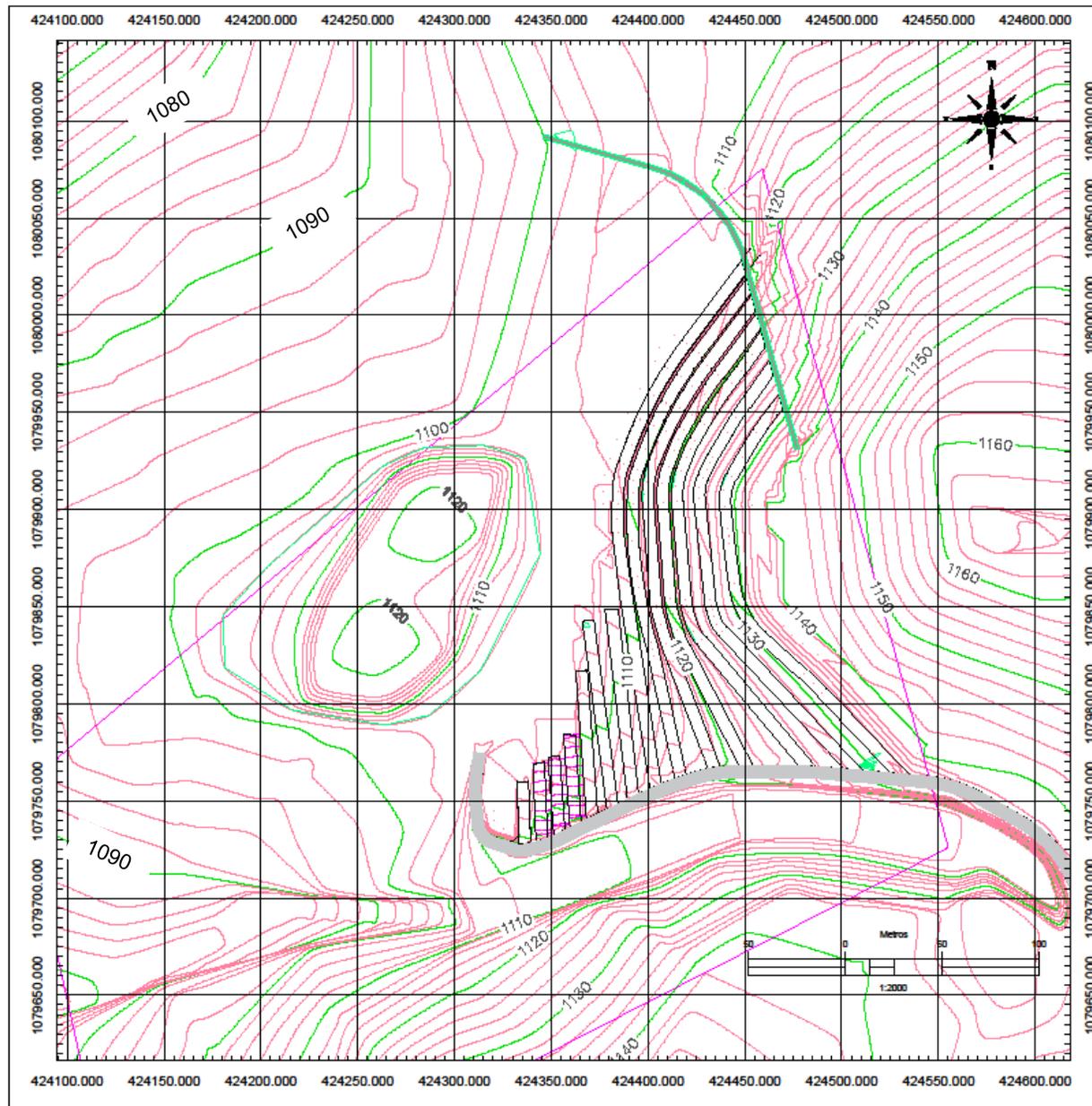
AUTOR: JUAN CARLOS SÁNCHEZ ROJAS

FECHA

09/07/2024

Formato:

A3



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
 FACULTAD DE INGENIERIA
 ESCUELA DE GEOLOGÍA, MINAS Y GEOFISICA
 TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

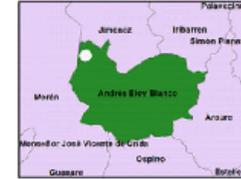
ELABORACION DEL PLAN DE ESTABILIZACION DE
 TALUDES EN EL SECTOR "EL YESO", CANTERA
 CURIGUA, MUNICIPIO ANDRES ELOY BLANCO,
 ESTADO LARA

MAPA TOPOGRAFICO MODIFICADO DE "EL YESO"

LOCALIZACIÓN NACIONAL



LOCALIZACIÓN ESTADAL

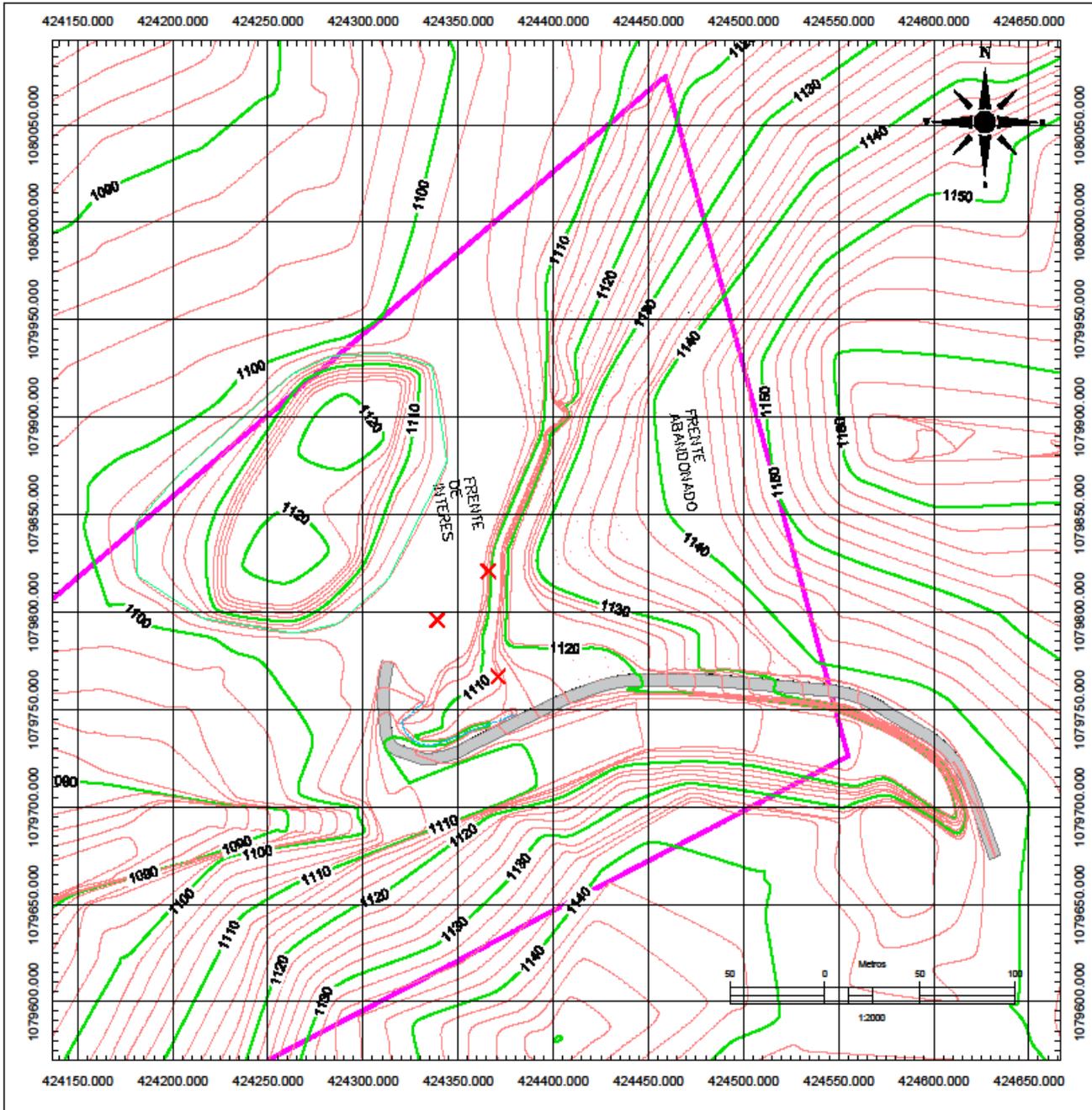


AUTOR: JUAN CARLOS SÁNCHEZ ROJAS

FECHA	Formato:	ESCALA
09/07/2024	A3	1:2000

LEYENDA:

— Curvas menores	— Canal
— Curvas mayores	
— Área de la concesión	
— Vías de acceso	





UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE GEOLOGÍA, MINAS Y GEOFISICA
TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ELABORACION DEL PLAN DE ESTABILIZACION DE TALUDES EN EL SECTOR "EL YESO", CANTERA CURIGUA, MUNICIPIO ANDRES ELOY BLANCO, ESTADO LARA

MAPA TOPOGRAFICO: SITUACIÓN ACTUAL DE LA CANTERA

LOCALIZACIÓN NACIONAL



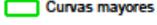
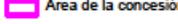
LOCALIZACIÓN ESTADAL



AUTOR: JUAN CARLOS SÁNCHEZ ROJAS

FECHA	Formato:	ESCALA
09/07/2024	A3	1:2000

LEYENDA:

 Curvas menores	 Puntos de muestreo
 Curvas mayores	
 Área de la concesión	
 Vías de acceso	