

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

PROPUESTA DE UN SISTEMA DE CONTROL INTEGRAL DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN HÍDRICA, MINA A CIELO ABIERTO C.V.M. S.A. DIVISIÓN-NÍQUEL, TIARA – ESTADO ARAGUA.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Bachiller José R. Cova B
Para optar al Título
De Ingeniero de Minas

Caracas, junio 2018

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

PROPUESTA DE UN SISTEMA DE CONTROL INTEGRAL DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN HÍDRICA, MINA A CIELO ABIERTO C.V.M. S.A. DIVISIÓN-NÍQUEL, TIARA – ESTADO ARAGUA.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Alba Castillo
TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Luís G. Bolívar A

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Bachiller José R. Cova B
Para optar al Título
De Ingeniero de Minas

Caracas, junio 2018

DEDICATORIA

A mis dos hijos Christopher Cova y April Cova, que han sido mi motor de avance.

A mi esposa Liliana Villegas por su apoyo y consideración en todo este tiempo que tenemos juntos.

Para lograr tener éxito, tu deseo de éxito debe ser mayor que tu miedo al fracaso.
Bill Cosby

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a todas las personas que de una forma u otra me ayudaron en la realización de este trabajo que por fin llega a buen término, pero principalmente a Dios y a nuestra ilustre casa de estudios, La Universidad Central de Venezuela, por habernos permitido formar parte de ella.

A todos en minera C.V.M. S.A. División-Níquel, a Wuilmer Guzmán, Ebelio Barajas, Jorge Andrade, Irene Medina, entre otros, pero especialmente a mi tutor y amigo Luís Bolívar, por su apoyo y comprensión brindarnos cuando más la necesitaba.

Al Departamento de Minas, en especial a los profesores Katherine Silva, Aurora Piña, Sasha Cazal y mi tutora Alba Castillo por la ayuda brindada.

A mis compañeros y amigos Héctor Rodríguez y Rafael Echezuria, por compartir en los momentos de viaje.

Cova B. José R

“PROPUESTA DE UN SISTEMA DE CONTROL INTEGRAL DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN HÍDRICA, MINA A CIELO ABIERTO C.V.M. S.A. DIVISIÓN-NÍQUEL, TIARA – ESTADO ARAGUA.”

Tutor Académico: Prof. Alba Castillo.

Tutor Industrial: Ing. Luis G. Bolívar A.

Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica (Minas). 2018, 177 páginas.

Palabras claves: Aragua (Estado), Erosión Hídrica, Empresa Minera C.V.M., S.A. División Níquel, Minería a Cielo Abierto.

RESUMEN

El presente Trabajo Especial de Grado, se desarrolló en la empresa minera C.V.M. S.A. División-Níquel, ubicada en Venezuela, entre los estados Aragua y Miranda. El propósito es la propuesta de un sistema de control integral de sólidos en suspensión hídrica, previa cuantificación de la pérdida de suelo se efectuó mediante el método experimental de Parcelas de Erosión con Clavos y la aplicación del modelo RUSLE, (siglas en inglés de Revised Universal Soil Loss Equation). Ambos, método y modelo permiten evaluar la susceptibilidad en el proceso erosivo, con el objeto de planificar y diseñar un sistema más adecuado para mantener y mejorar el rendimiento durante el uso minero del territorio, con miras a la recuperación de la cobertura vegetal y al cierre de mina.

Fueron realizadas observaciones y mediciones en sitio para complementar el análisis, que incluyó las principales variables: hidrológicas (lluvia, escorrentía), geomorfológicas (longitud y pendiente del terreno), geológica-geoquímica (granulometría y esfericidad de partículas) y biológica (cobertura vegetal, aunque esta última removida), todas necesarias para la cuantificación referida. Adicionalmente se elaboraron gráficos de espesores de pérdidas o ganancias de suelo, durante los eventos lluviosos en los meses de septiembre a diciembre del 2016.

El método de Parcelas de Erosión con Clavos, consideró la instalación de dos parcelas en cada sector correspondiente de la mina, con dimensiones de 25 m², donde se colocaron 90 a 100 clavos de erosión que eran medidos luego de cada lluvia erosiva. Las parcelas fueron localizadas en rangos de pendiente de 8 a 10%.

Al final de cuatro meses de mediciones (septiembre, octubre, noviembre y diciembre), la precipitación total fue 1.163,12 mm/año, obteniendo resultados de erosión neta para los distintos meses de: 304 ton/ha para el mes de septiembre, 384 ton/ha para el mes de octubre, 288 ton/ha en noviembre y 304 ton/ha en diciembre. Estos valores y los adquiridos por RUSLE, se consideraron para el diseño del canal de escorrentía con la ayuda del software libre Hcanales.

Este diseño comprende nueve (9) tramos de canal perimetral para la recolección de las aguas superficiales, reconstrucción y mantenimiento de seis (6) gaviones que se emplearán para la retención de los sedimentos transportados por el drenaje natural, y redimensionamiento de dieciocho (18) lagunas o cuencas de sedimentación.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	3
FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.1. Planteamiento del Problema.....	3
1.2. Objetivos de la Investigación	4
1.3. Justificación de la Investigación	4
1.4. Alcance y Limitaciones de la Investigación.....	5
CAPÍTULO II	7
GENERALIDADES DEL PROYECTO MINERO	7
2.1 Ubicación Geográfica.....	7
2.2 Características Físicas y Naturales	8
2.3 Reseña Histórica de la Empresa	13
2.4 Geología Regional.....	14
2.5 Geología Local	16
CAPÍTULO III.....	26
MARCO TEÓRICO	26
3.1 Antecedentes	26
3.2 Suelo, Tipos, Propiedades y Constitución Mineral	27
3.3 Erosión, Agentes, Tipos de Erosión y Procesos que Intervienen.....	33
3.4 Mecánica y Factores que Determinan la Erosión Hídrica.....	44
3.5 Erosividad, Erosionabilidad, Estimación y Medición de la Erosión Hídrica..	47
3.6 Criterios Hidrológicos (Caudal de la Cuenca Hidrográfica).....	60
3.7 Sistemas de Drenaje y Tipos de Estructuras	66
3.8 Dimensiones, Ubicación y Tamaño de las Cuencas de Sedimentación	74
CAPITULO IV	82
MARCO METODOLÓGICO	82
4.1 Tipo de Investigación	82

4.2	Diseño de la Investigación	83
4.3	Población y Muestra.....	84
4.4	Recolección de Datos	86
4.4.1	Técnicas Utilizadas	86
4.4.2	Instrumentos	87
4.5	Procedimiento Experimental.....	91
4.5.1	Etapa de Recopilación de Material Técnico.....	92
4.5.2	Etapa de Actividades de Campo	92
4.5.3	Etapa de Ensayos de Laboratorio.....	93
4.5.4	Etapa de Diseño.....	93
CAPITULO V.....		95
DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN		
HÍDRICA.....		95
5.1	Perspectiva del Diseño para el Control de Sólidos en Suspensión Hídrica	95
5.2	Construcción de la Lluvia de Diseño	96
5.2.1	Ajuste de los Datos a la Función de Distribución de Probabilidad de Gumbel.....	97
5.2.2	Diseño de las Curvas IDF para la C.V.M. S.A. División-Níquel.	102
5.3	Evaluación de la Erosión Hídrica.....	105
5.3.1	Recolección de Muestras del Material	107
5.3.2	Ensayos de Laboratorio.....	108
5.3.3	Evaluación Local de los Procesos Erosivos	113
5.4	Conducción de Aguas de Escorrentía	120
5.4.1	Criterio Hidrológico (Caudal de Diseño).....	121
5.4.2	Elementos Geométricos del Canal	130
5.4.3	Elementos de Retención de Sólidos	133
5.5	Programa de Control y Mantenimiento.....	139
CONCLUSIONES.....		142
RECOMENDACIONES.....		145
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		147

ANEXOS I	150
RESUMEN DE PRECIPITACIONES C.V.M. S.A. DIVISIÓN-NÍQUEL	150
ANEXOS II	152
REPRESENTACIÓN MATEMÁTICA DE LAS CURVAS INTENSIDAD- DURACIÓN-PERÍODO DE RETORNO	152
ANEXOS III	159
EVALUACIÓN LOCAL DE LOS PROCESOS EROSIVOS	159
ANEXOS IV.....	176
INFORME TÉCNICO.....	176
REPORTE DE RESULTADOS.....	176
ANEXOS V	177
ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DE LAS SECCIONES DE LOS CANALES	177

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Ubicación geográfica de la empresa C.V.M. S.A. División-Níquel.....	7
Figura 2. 2 Escala utilizada para cifrar la cantidad de nubes.	11
Figura 2. 3 Ubicación de las distintas Estaciones Climatológicas.	12
Figura 2. 4 Extensión geográfica del complejo ofiolítico desde Tiara, estado Aragua, hasta Táchata, estado Miranda. Imagen de radar (1995).	15
Figura 2. 5 Mapa geológico simplificado de la parte occidental del Estado Miranda, indicando el área de afloramientos de las rocas ultra-básicas de Loma de Hierro. Simplificado de Bellizzia (1967).	18
Figura 2. 6 Perfil litológico del suelo.....	19
Figura 3. 1 Distintos tipos de formaciones de suelo.	29
Figura 3. 2 Formación de lateritas por corrientes de agua ocasionales.....	31
Figura 3. 3 Cauce característico de la C.V.M. S.A. División-Níquel, con presencia de sedimentos de diverso tamaño.	34
Figura 3. 4 Tipos de erosión en función del agente dominante.	36
Figura 3. 5 (a) Desplazamiento de partículas en una ladera producido por el salpique. (b) Aparición de pináculos o micropedestales bajo las piedras que actúan de escudo protector.	40
Figura 3. 6 La erosión laminar predomina en las superficies regulares de una ladera situada entre dos surcos (sheet erosion). En estos se concentra el flujo de agua y aumenta la capacidad de socavación y arrastre (rill erosion).....	43
Figura 3. 7 Diagrama de Hjulstrom, el cual indica la velocidad mínima requerida para desprender, transportar o depositar partículas de suelo, según su diámetro, para flujos de agua.	45
Figura 3. 8 Esquema de las varillas en el suelo, representando los procesos de erosión y sedimentación.....	49

Figura 3. 9 Varillas utilizadas para mediciones de los procesos de erosión y sedimentación C.V.M. S.A. División-Níquel.	49
Figura 3. 10 Determinación gráfica del índice de erosionabilidad K.	56
Figura 4. 1. Etapas de la Investigación.	84
Figura 4. 2 Áreas de Explotación en Minera Loma de Níquel.	85
Figura 4. 3 Formulario para el registro de los datos.	87
Figura 4. 4 Horno Memmert para secado de muestras.	88
Figura 4. 5 Difractómetro Philips PW 1840.	89
Figura 4. 6 Horno Memmert para secado de muestras.	90
Figura 4. 7 Ensayo de Casagrande.	90
Figura 4. 8 Mastersizer 2.000 de Marvel Instrument.	91
Figura 4. 9 Etapas del Procedimiento Experimental.	92
Figura 5. 1 Familia de rectas IDF generadas por el método del pluviómetro.	105
Figura 5. 2 Medición de los clavos de erosión.	106
Figura 5. 3 Personal involucrado.	107
Figura 5. 4 a) Apertura inicial en el talud de la escombrera; b) Apertura profunda; c) Extracción de muestra puntual; d) Muestra puntual en bolsa plástica.	107
Figura 5. 5 Recolección de muestras.	108
Figura 5. 6 Diagrama de Casagrande para la muestra de arcilla de la C.V.M S.A División-Níquel.	109
Figura 5. 7 Curva granulométrica para distintos tamaños de partículas.	110
Figura 5. 8 Gráfica de análisis granulométrico por difracción láser de materias primas.	111
Figura 5. 9 Difractograma de las distintas fases de la arcilla.	113
Figura 5. 10 Cuantificación de suelo del mes de Septiembre 2016.	115
Figura 5. 11 Cuantificación de suelo del mes de Octubre 2016.	116
Figura 5. 12 Cuantificación de suelo del mes de Noviembre 2016.	117
Figura 5. 13 Cuantificación de suelo del mes de Diciembre 2016.	117

Figura 5. 14 Grafica de erosión neta aproximada en la C.V.M. S.A. División-Níquel.	118
Figura 5. 15 Cuantificación de suelo por los metodos de los clavos de erosión y RUSLE.	120
Figura 5. 16 Vista satelital de las subcuencas hidrográficas donde se ubica la C.V.M. S.A. División-Níquel.....	122
Figura 5. 17 Relieve de la subcuenca que distribuye la carga de agua en el Sector 1.	123
Figura 5. 18 Vista satelital de la ubicación geográfica de la subcuenca que distribuye la carga de agua en el Sector 1.	124
Figura 5. 19 Relieve de la subcuenca que distribuye la carga de agua en el Sector 2.	125
Figura 5. 20 Vista satelital de la ubicación geográfica de la subcuenca que distribuye la carga de agua en el Sector 2.	126
Figura 5. 21 Relieve de la cuenca que distribuye la carga de agua en el Sector 3... 127	
Figura 5. 22 Vista satelital de la ubicación geográfica de la cuenca que distribuye la carga de agua en el Sector 3.	128
Figura 5. 23 Canal de geometría rectangular.	131
Figura 5. 24 Elementos de canal de geometría rectangular elaborado en Hcanales.132	
Figura 5. 25 Ubicación geográfica de los gaviones que se encargan de la retención de los sedimentos transportados por las aguas de escorrentías en el Sector 1.	134
Figura 5. 26 Diagrama de la sección de los gaviones.	135
Figura 5. 27 Comparación de altura del gavión.	136
Figura 5. 28 Estructura colapsada por la fuerza de empuje.	137
Figura 5. 29 Gavión colmatado de sedimentos, se observa la estructura firme.	137
Figura 5. 30 Laguna de retención de sedimentos.	138

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Datos sobre estaciones meteorológicas en la región de Las Tejerías -Tiara - El Consejo, Edo Aragua.....	9
Tabla 2. 2 Evaporación mensual y anual (mm).....	9
Tabla 2. 3 Principales Características Climatológicas Estación Tiara (Media Anual Máxima Periodo 1952-1992 MARNR).....	11
Tabla 2. 4 Comportamiento de los elementos químicos de la Zona 1.	20
Tabla 2. 5 Comportamiento de los elementos químicos de la Zona 2.	21
Tabla 2. 6 Comportamiento de los elementos químicos de la Zona 3.	21
Tabla 2. 7 Comportamiento de los elementos químicos de la Zona 4.	22
Tabla 3. 1 Funciones del suelo.	28
Tabla 3. 2 Propiedades típicas de los suelos tropicales lateríticos.	30
Tabla 3. 3 Ejemplo de vida útil frente a diferentes tasas de erosión.	38
Tabla 3. 4 Categorías para considerar distintos grados de erosión hídrica.	38
Tabla 3. 5 Velocidad terminales (m/s) de caída de las gotas de lluvia.	41
Tabla 3. 6 Valores de diámetro y velocidad de las gotas para diferentes intensidades de lluvia.....	41
Tabla 3. 7 Clasificación de cárcavas según su profundidad y área de drenaje.	44
Tabla 3. 8 Valores de K asociados a la textura y al contenido de materia orgánica. .	57
Tabla 3. 9 Valores del Factor topográfico (LS) para distintos grados y longitudes de pendiente.	59
Tabla 3. 10 Valores de C para cobertura vegetal.	59
Tabla 3. 11 Valores de C para bosques.	60
Tabla 3. 12 Valores del factor P en función de la pendiente.....	60
Tabla 3. 13 Coeficiente de escorrentía.	63
Tabla 3. 14 Ejemplo de cálculo de Períodos de Retorno para eventos máximos anuales de lluvia.....	65

Tabla 3. 15	Velocidad máxima admisible para canales no revestidos.	68
Tabla 3. 16	Pautas recomendadas para terrazas de desagüe.	69
Tabla 3. 17	Valores máximos de velocidad de flujo para evitar erosión.	71
Tabla 3. 18	Valores básicos del coeficiente de Manning en canales no recubiertos..	72
Tabla 3. 19	Valores básicos del coeficiente de Manning en canales recubiertos.....	73
Tabla 3. 20	Viscosidad Cinemática del Agua.	75
Tabla 3. 21	Intervalos granulométricos.....	76
Tabla 3. 22	Distribución granulométrica de sólidos en suspensión.	79
Tabla 5. 1	Datos de precipitaciones máximas diarias (mm), en la C.V.M. S.A. División-Níquel durante los años 1999-2016.	97
Tabla 5. 2	Distribución de probabilidades pluviométricas según los parámetros de Gumbel.....	98
Tabla 5. 3	Cálculo de las variables probabilísticas mediante Gumbel.....	99
Tabla 5. 4	Cálculo de las Precipitaciones Diarias Máximas Probables para distintas frecuencias.....	100
Tabla 5. 5	Precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración de lluvias.	101
Tabla 5. 6	Intensidades de lluvia a partir de Pd, según su Duración de precipitación y Frecuencia.	102
Tabla 5. 7	Resumen de los valores de regresión lineal para distintos años.	103
Tabla 5. 8	Intensidades - Tiempo de duración - Frecuencia.	104
Tabla 5. 9	Determinación de los límites de Atterberg en materias primas.	109
Tabla 5. 10	Determinación de Análisis Granulométrico.....	110
Tabla 5. 11	Análisis granulométrico por difracción láser de materias primas.....	111
Tabla 5. 12	Densidades aparentes del suelo de la C.V.M. S.A. División-Níquel....	112
Tabla 5. 13	Minerales presentes en las distintas fases de la muestra de arcilla.	113
Tabla 5. 14	Promedio de precipitaciones mensuales obtenidas durante el desarrollo de esta investigación.	114
Tabla 5. 15	Suelo movilizado.....	115

Tabla 5. 16 Estimación de pérdida de suelo por clavos de erosión.....	119
Tabla 5. 17 Estimación de pérdida de suelo por RUSLE.....	119
Tabla 5. 18 Caudal aproximado de la subcuenca del Sector 1.....	125
Tabla 5. 19 Caudal aproximado de la subcuenca del Sector 2.....	126
Tabla 5. 20 Caudal aproximado de la subcuenca del Sector 3.....	128
Tabla 5. 21 Afectación de la altitud sobre la precipitación.....	130
Tabla 5. 22 Resultados de la determinación de los elementos geométricos para las distintas secciones de canales.....	132
Tabla 5. 23 Resultados de la comparación entre criterios del canal (tirante normal, máxima eficiencia y mínima infiltración).	133

INTRODUCCIÓN

La erosión es un proceso natural que conlleva la pérdida de suelo de un determinado lugar y que afecta a todos los terrenos que se encuentran expuestos a la acción de la lluvia o el viento. Dicho proceso se ve fuertemente incrementado en aquellas zonas donde las actividades humanas han modificado el equilibrio de los factores del medio natural, dejando el suelo desprotegido de la cubierta vegetal, compactando la superficie o alterando el flujo del agua de escorrentía.

La C.V.M. S.A. División-Níquel, empresa a cargo de la explotación del yacimiento níquelífero Loma de Hierro, ubicado entre los estados Aragua y Miranda, aproximadamente a 87 Km. al suroeste de la ciudad de Caracas, a $10^{\circ} 10'$ latitud norte y $67^{\circ} 08'$ longitud oeste, cuenta con un área aproximadamente de 7 km en dirección N 75° E y un ancho variable entre 0.5 y 2 Km y profundidad variable. El método de explotación es a cielo abierto (minería de banco selectivo), sin la utilización de explosivos; empleando equipos de arranque mecánico para la extracción del mineral denominado saprolita. El acarreo se realiza en camiones de 55 toneladas de capacidad nominal, que lo trasladan hasta la zona de trituración, para ser llevado a los tamaños requeridos por la planta de beneficio mineral.

Para realizar la primera etapa del proceso de explotación se debe hacer la descubierta de las zonas superficiales no explotables, dejando el suelo sin ninguna protección, originando que en los meses de lluvia la erosión hídrica actúe directamente sobre la superficie, degradando y produciendo la pérdida de una significativa cantidad de suelo la cual es transportada aguas abajo.

En la Empresa la información cuantitativa sobre los volúmenes de pérdida de suelo es escasa, siendo que muy pocos esfuerzos han sido destinados a la investigación en este campo. Es por ello, que se realizó un estudio que pretende generar mayor información respecto al proceso de erosión, que genera la pérdida de suelo para lo cual se contrasta el uso de dos herramientas de análisis para la estimación de la erosión hídrica, una de tipo predictivo y otra experimental o de medición de campo. La primera,

un modelo, se refiere a la Ecuación Universal Revisada de Pérdidas de Suelo (RUSLE) y la segunda, las Parcelas de Erosión con Clavos. El resultado arrojado por ambas herramientas da paso a la propuesta del sistema de control integral de sólidos en suspensión hídrica, cuya implementación puede ser que capaz de captar y transportar los sedimentos.

El presente estudio, se encuentra dividido en cinco (5) capítulos:

- El capítulo I, corresponde al fundamento de la investigación, donde se presenta resaltado el problema, los objetivos, la justificación, alcances y limitaciones de la investigación.
- El capítulo II muestra las generalidades de la Empresa así como información física y geológica suficiente, para comprender el tipo de yacimiento explotado por la operadora.
- El capítulo III, es una compilación teórica como base de la investigación.
- El capítulo IV, comprende una descripción de la metodología implementada en el estudio.
- El capítulo V presenta el análisis e interpretación de los resultados de la investigación.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del Problema

Una de las afectaciones ambientales que suele desestimarse en la actividad minera es la erosión. Ésta es un proceso natural en el que los suelos varían en su espesor, desestabilizando los taludes y produciendo sedimentos que colmatan los sistemas naturales o artificiales que controlan el excedente de escorrentías superficiales.

En consecuencia, es uno de los mayores problemas que afecta a la minería a cielo abierto, por el efecto del arrastre de sedimentos, principalmente por el agua de lluvia, o erosión hídrica. Esta situación que perturba sobre todo a las regiones tropicales de relieve montañoso donde se concentran las lluvias en unos pocos meses, alcanzando intensidades erosivas significativas.

La C.V.M. S.A. División-Níquel, empresa dedicada a la extracción de mineral de níquel en minería a cielo abierto, carece de datos precisos sobre la cantidad de suelo que se pierde en una mina a cielo abierto a causa de la erosión, así como tampoco el costo económico que esto implica para la producción mineral. Por otro lado el sistema de drenaje actual se encuentra en deplorables condiciones para mitigar la fuerza erosiva producida por los sedimentos transportados.

Es por ello la necesidad de realizar un estudio amplio e integral referente al balance hídrico de la zona, a fin de cuantificar el arrastre de sedimentos que se produce en los meses lluviosos y los volúmenes de las aguas que circulan por la zona de producción. Con este estudio se puede obtener información para mejorar las condiciones del sistema de drenaje a futuro.

1.2. Objetivos de la Investigación

- **Objetivo General**

Proponer un diseño del sistema de control integral de sólidos en suspensión hídrica en las áreas de operaciones mineras, con la finalidad de adecuar el sistema de control actual y proponer recomendaciones para la expansión del desarrollo minero.

- **Objetivos Específicos**

- Sistematizar las variables físico-naturales, del área en estudio.
- Evaluar la situación del sistema de drenaje y control de erosión-sedimentación general de la mina.
- Representar gráficamente con apoyo informático los requerimientos o necesidades, resultantes de las evaluaciones realizadas en las zonas en estudio.
- Cuantificar los sólidos suspendidos hídricamente con fines de determinación de capacidades, de conducción, retención y contención.
- Recomendar acciones para la planificación del sistema integral de control de sólidos suspendidos en el área general del derecho minero.
- Diseño del sistema de control integral de sólidos en suspensión hídrica de la mina actual.

1.3. Justificación de la Investigación

En nuestros días, la estimación de los datos de escorrentía y pérdida de suelo para el trópico húmedo se realiza utilizando modelos empíricos específicos creados en otras zonas del mundo o a partir de los resultados de otras investigaciones que obviaron la importancia de algunos factores que influyen en este fenómeno. Por ejemplo, en este estudio se consideran: el tiempo de medición, el tamaño de las parcelas de medición y el diseño estadístico, entre otros factores relevantes.

Por tal motivo, en la C.V.M. S.A. División-Níquel, se planteó este proyecto de cuantificación de pérdida de suelo y arrastre de sedimentos, a partir del suelo laterítico para obtener una estimación de la cantidad superficial de sedimentos que se transporta

debido a la acción de la erosión hídrica, para mejorar el sistema de captación y conducción del drenaje actual. Vale destacar que actualmente la Empresa no dispone en su base de datos la estimación de estos volúmenes de sedimento que se ha generado por años. Esto indica la necesidad e importancia de preparar y validar un proyecto que permita generar los datos necesarios y evitar las imprecisiones a la hora de elaborar la planificación minera en el complejo industrial.

En este proyecto de investigación, al determinar las zonas con mayor grado de erosión del suelo, junto con su granulometría y la distribución del sistema de drenaje, ya implementado, permitirá optimizar la captación de aguas de escorrentías, ayudando a depositar los sedimentos en suspensión, evitando que: i) estos lleguen a los cauces principales de los ríos aledaños a la mina y ii) la alteración de la calidad del agua que llega a las comunidades que se encuentran cerca de la C.V.M. S.A. División-Níquel.

1.4. Alcance y Limitaciones de la Investigación

- Alcance:
 - Determinar, el volumen de sedimentos que pueden ser generados en la mina a cielo abierto con mena de níquel, en función a su superficie descubierta, las pendientes presentes en el terreno y la precipitación anual. Esto permitirá:
 - Planificar y diseñar la conducción de aguas y la retención de sólidos en suspensión hídrica.
 - Definir la capacidad de las lagunas de sedimentación requeridas en el área de desarrollo minero.
 - Calcular los costos operativos asociados por la necesidad de dragar las lagunas de captación de sedimentos, según un programa pre - establecido para el dragado anual.
- Limitaciones:
 - Condición actual de la Empresa, para la toma de registros de campo (escasez de recurso vehicular para el desplazamiento y registro de datos de campo).

- Ausencia de datos históricos para la conciliación de los datos para esta investigación.
- Poca capacidad de análisis de muestras de campo, en el laboratorio de la Empresa, por falta de insumos.

CAPÍTULO II GENERALIDADES DEL PROYECTO MINERO

2.1 Ubicación Geográfica

- **Relativa**

El Yacimiento Loma de Hierro, está localizado aproximadamente a 87 Km. al suroeste de la ciudad de Caracas, a $10^{\circ} 10'$ latitud norte y $67^{\circ} 08'$ longitud oeste, con las siguientes dimensiones aproximadas: 7 Km. de largo en dirección N 75° E y un ancho variable entre 0.5 y 2 Km.

- **Político Administrativa**

La C.V.M. S.A. División-Níquel, se encuentra ubicada en el KM. 19 (Figura 2.1) de la nueva vía Tiara, estado Miranda, municipio Guaicaipuro. La vía que da acceso a la Empresa se encuentra en el Km. 54 de la Autopista Regional del Centro.

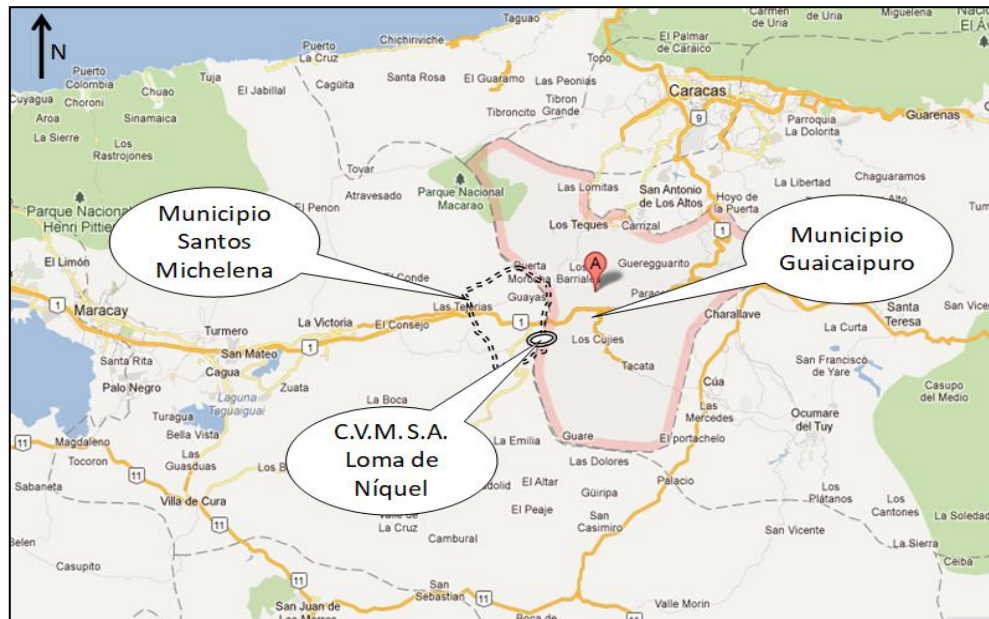


Figura 2. 1 Ubicación geográfica de la empresa C.V.M. S.A. División-Níquel.
Fuente: Tomado de Informe Técnico del Departamento de Geología, Loma de Níquel.

2.2 Características Físicas y Naturales

En este apartado se presenta información básica de procesos climatológicos e hidrometeorológicos en la cuenca del río Mesía, en los alrededores de la población de Tiara en el estado Aragua, promedio en la región que incluye al área de estudio, acerca de: clima, precipitación, evaporación, temperatura, radiación, insolación, humedad relativa, nubosidad y viento.

Cabe destacar que el análisis técnico sería realizado con mayor precisión si fuera posible contar con instalaciones hidrometeorológicas mínimas pero suficientes para medir las variaciones microclimáticas que resultan cuando grandes extensiones de cobertura vegetal son removidas, originando las alteraciones en los valores de evaporación y especialmente de evapotranspiración locales.

- **Clima**

Previo a la explotación mineral existió un número de estaciones meteorológicas en las cercanías de Loma de Hierro, estas brindaron información valiosa para que durante el desarrollo del estudio de factibilidad, con lo cual se pudo confirmar que el clima predominante de la zona es de tipo Tropical de Altura. Los datos mostrados en la Tabla 2.1 presentan: tipo de estación de medición, período de funcionamiento, ubicación y elevación sobre el nivel medio del mar (msnm). Se destaca la variabilidad en la elevación entre 395 y 1.005 msnm, con relación a la elevación media del proyecto minero en estudio.

- **Precipitación**

El promedio máximo de lluvia anual fue registrado en las estaciones de la Hacienda La Emilia de 1.580 mm (585 msnm) y en la de Tiara con 1.405 mm (750 msnm) y el mínimo en la estación Quebrada Seca con 826 mm (650 msnm). Los registros de lluvia para la estación de Tiara, localizada en las cercanías del yacimiento mineral son considerados representativos del área donde las actividades mineras tienen lugar.

Cabe destacar que el rango de variación en elevación, entre estaciones meteorológicas, es de 165 msnm, mientras que el rango de variación en la precipitación anual promedio en la etapa previa a la actividad minera fue de 175 mm.

Tabla 2. 1 Datos sobre estaciones meteorológicas en la región de Las Tejerías -Tiara - El Consejo, Edo Aragua.

Estación	Tipo de Estación	Serial del Modelo	Período de Funcionamiento	Coordenadas		Elevación (msnm)
				Latitud	Longitud	
Tiara	CR	1478	52-92	10°07'49"	67°09'00"	750
San Francisco Pao	CR	441	66-92	10°05'45"	67°17'05"	640
Fila Guaraima	CR	9303	72-92	10°11'00"	67°17'37"	1.005
Embalse Zuata	CR	1475	44-88	10°12'46"	67°22'58"	512
El Consejo	CR	1465	53-92	10°14'30"	67°16'10"	553
La Urbina Quebrada Seca	CR	1455	40-92	10°16'53"	67°15'40"	650
Pie de Cerro	CR	1469	40-92	10°19'24"	67°19'15"	780
Las Tejerías	CR	589	53-92	10°15'21"	67°10'18"	484
Rio Arriba	CR	589	59-92	10°09'00"	67°01'00"	395
Hacienda La Emilia	CR	1488	59-92	10°06'00"	67°06'00"	585
Santa Cruz Edafológica	CI	417	66-91	10°10'00"	67°29'15"	444

Fuente: *Feasibility Study Loma de Hierro Project, (1995).*

- **Evaporación**

La estación climatológica Santa Cruz Edafológica, es la más cercana de este tipo y tiene registros de evaporación entre 1966 y 1991 (serie de 26 años). En las regiones tropicales la evaporación mensual varía muy poco, sin importar si el periodo es seco o lluvioso. La Tabla 2.2 muestra los registros mensuales y anuales, en promedio, de las estaciones antes mencionadas. El total de evaporación es 2.377,6 mm, el cual es bastante superior al promedio anual de precipitación, que en la estación de Tiara es 1.405 mm. Haciendo la diferencia entre evaporación y precipitación queda en 972,6 mm

Tabla 2. 2 Evaporación mensual y anual (mm).

Datos	Meses												Anual (mm)
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Media	221,8	238,7	287,8	245,5	199,9	175,3	172,8	165,6	159,6	166,1	156,2	188,4	2.377,6

Fuente: *Feasibility Study Loma de Hierro Project, (1995).*

- **Temperatura**

La temperatura anual es de 26 °C, con una media máxima de 31,9 °C y una media mínima de 21 °C. El máximo absoluto es de 40,8 °C en abril y el mínimo absoluto es de 13,7 °C en diciembre.

- **Radiación**

La radiación total anual es de 147,842 cal/m², con una media mensual de radiación diaria de 405 cal/m². La máxima mensual de radiación diaria es de 674 cal/m² (marzo) y la mínima de 84 cal/m² (mayo). La radiación es un factor importante en la formación de neblina en la noche con un cielo despejado y atmósfera estable. La neblina en las mañanas es muy común durante todo el año.

- **Insolación**

La insolación media anual por día es de 7,3 horas y el máximo absoluto es de 12 horas, alcanzado en el mes de junio.

- **Humedad Relativa**

La humedad relativa media anual es de 70 %, con una media máxima de 89 % y una media mínima de 46 %. La humedad relativa máxima absoluta es de 100 % y la mínima absoluta es de 11 %.

- **Nubosidad**

La nubosidad media anual es de 5 octavos con una media mensual máxima de 6 octavos y una media mínima mensual de 4 octavos. La media anual es de 5 octavos indicando que el área tiende a ser nublada la mayor parte del año, excepto entre diciembre y marzo cuando está normalmente despejado.






CANTIDAD DE OCTAS	CONCEPTO	SÍMBOLO
0	Despejado	
1 a 2	Escasa nubosidad	
3 a 4	Nubosidad parcial	
5 a 7	Nublado	
8	Cubierto	

Figura 2. 2 Escala utilizada para cifrar la cantidad de nubes.

- **Viento**

La velocidad media anual del viento es de 8 km/h y la máxima registrada es de 73 km/h. La dirección de los vientos que prevalecen sopla en las direcciones Este y Noreste.

Tabla 2. 3 Principales Características Climatológicas Estación Tiara (Media Anual Máxima Periodo 1952-1992 MARNR).

Precipitación	1.405,7 milímetros/años
Días de lluvia	168 al año
Temperatura	26 °C
Evaporación	2.377,6 milímetros/años
Insolación	2.672,9 horas/año
Radiación	147.842 calorías/cm ²
Humedad relativa	70 %
Nubosidad	5 octavos
Velocidad del viento	8 kilómetros/ hora
Dirección predominante	Este- Noreste

Fuente: Evaluación del Impacto Ambiental de la Explotación del Yacimiento de Níquel de Loma de Hierro. CTI. (1995).

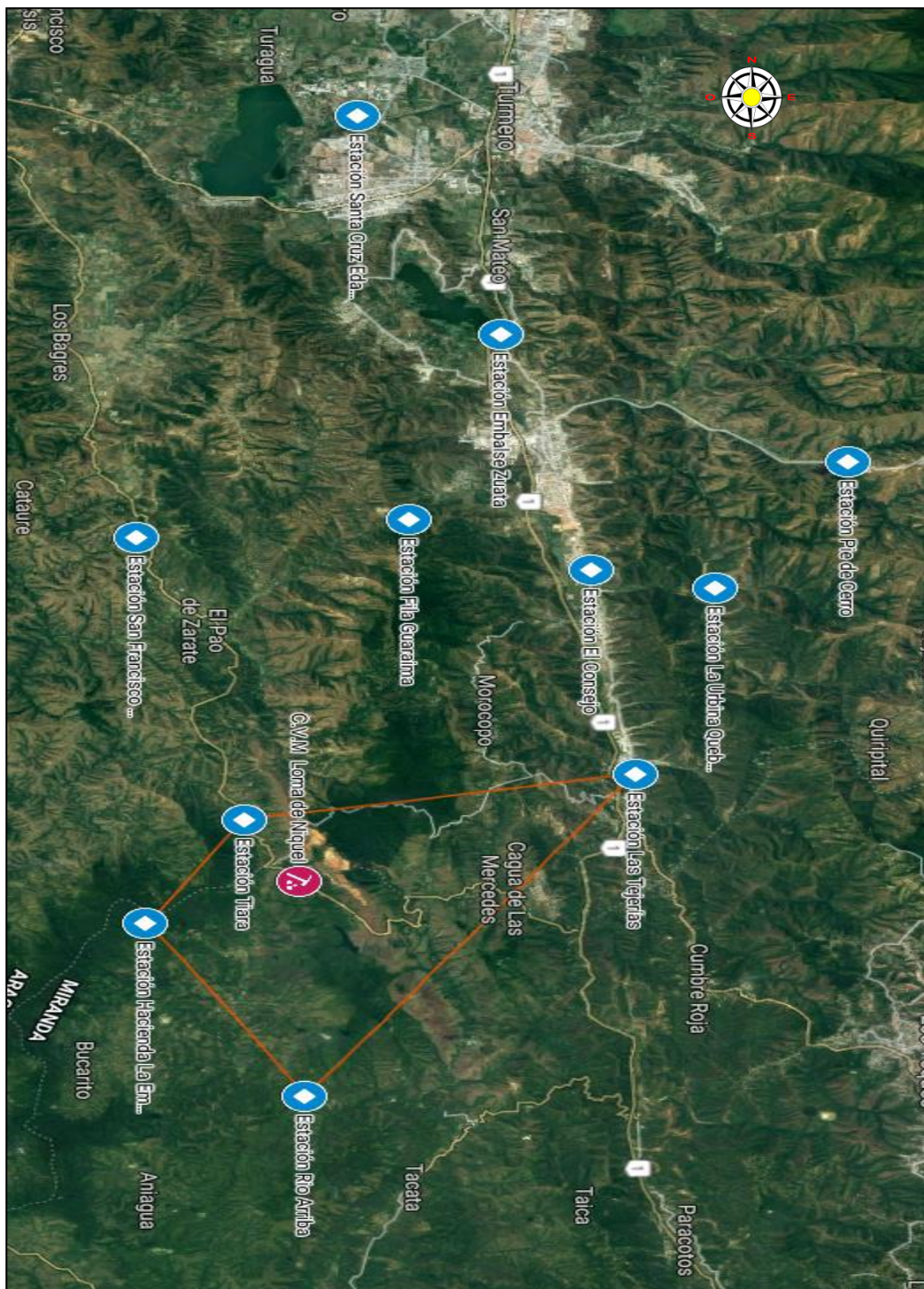


Figura 2. 3 Ubicación de las distintas Estaciones Climatológicas.
Fuente: Google Maps (2016).

2.3 Reseña Histórica de la Empresa

En 1941 fue descubierto el yacimiento níquelífero tradicionalmente llamado Loma de Hierro. Posteriormente fueron explorados los depósitos de lateritas níquelíferas en las inmediaciones de San Casimiro (Aragua) y Las Trincheras (Carabobo); pero el más importante de estos yacimientos por sus reservas fue el de Loma de Hierro. En el año 1970, el Ministerio de Minas e Hidrocarburos (ahora extinto) asumió los derechos sobre este yacimiento y mediante Decreto N° 437; publicado en la Gaceta Oficial de la República de Venezuela de fecha 19 de noviembre de 1970 declaró afectado para el desarrollo del proyecto níquelífero Loma de Hierro, un polígono de aproximadamente 7.000 has con 26 áreas ubicado entre los pueblos de Tiara y Altagracia de la Montaña perteneciente a los municipios Santos Michelena del estado Aragua y Guacaipuro del estado Miranda respectivamente.

En diciembre de 1992, el referido Ministerio concede los derechos para la explotación del yacimiento a la empresa Cofeminas, C.A. El estudio de factibilidad fue financiado y gerenciado por el grupo Anglo American, importante grupo internacional con inversiones en recursos naturales. El proyecto minero fue elaborado por Tecnoconsult, empresa venezolana de ingeniería de consulta. Con la incorporación al grupo Anglo American de Cofeminas, C.A., en 1996, cambia la razón social y pasa a llamarse Minera Loma de Níquel, C.A., empresa operativa responsable por el desarrollo del proyecto.

Minera Loma de Níquel inicia operaciones a finales del año 2000, siendo oficialmente inaugurada por el entonces Presidente Hugo Chávez Frías, en marzo del 2001. Ésta fue la mayor operación minera privada de gran escala en el país y formó parte del Grupo Anglo American, hasta el 10 de noviembre del 2012, cuando cesó la extracción y producción en Venezuela. Tras el vencimiento del período de las concesiones y los permisos ambientales para continuar su operación, Minera Loma de Níquel, el 11 de noviembre de 2012 es asumida por la Corporación Venezolana de Minería S.A., División Níquel y pasa a llamarse Loma de Níquel.

La producción mineral ha estado en el orden de 17.500 toneladas por año de aleación de ferroníquel de bajo carbón, destinado a la producción de acero inoxidable. El programa de extracción y procesamiento mineral está diseñado para una producción máxima de 1,3 millones de toneladas secas al año, con un contenido de níquel promedio de 1,50%, por un período de treinta años.

Esta empresa es reconocida (como una gran empresa) por sus niveles de productividad y calidad en la producción de Ferroníquel, contemplando la seguridad, la responsabilidad social y la protección del ambiente.

2.4 Geología Regional

La geología de la región central del país está caracterizada por las formaciones geológicas Tucutunemo y Tiara, ambas depositadas a partir del Mesozoico hasta el Cenozoico, cuando fueron sometidas a los grandes efectos metamórficos y tectónicos, como la influencia de la placa del Caribe sobre la placa Suramericana (límite convergente), responsable en gran parte por la formación de los cinturones orogénicos que integran la Cordillera de la Costa.

El cuerpo principal del Complejo Ofiolítico de Loma de Hierro (Figura 2.4), tiene una extensión aproximada de 21 Km, desde unos 4 Km al oeste del poblado de Tiara, estado Aragua, hasta las proximidades de Tácata, estado Miranda, con una anchura variable entre 1 y 5 Km de distancia, en dirección N 70 E. Existen dos tipos principales de vegetación en el yacimiento: la sabana abierta ubicada entre los 800 y 1.300 msnm y el bosque nublado entre los 1.100 y 1.300 msnm.

El área de estudio se ubica en una estribación montañosa de la serranía del interior, altamente influenciada por las características litoestructurales y de procesos geomorfológicos en vertientes y laderas presentes en la zona.

En ella afloran dos conjuntos de rocas; uno metamórfico y el otro ígneo, pertenecientes a dos unidades litoestratigráficas conocidas como la Formación: de Tucutunemo (período probable cretáceo superior) y de Tiara (cretáceo superior).

- **Formación Tucutunemo**

Está presente en la parte norte del área, se trata de una secuencia de rocas metasedimentarias y consiste principalmente de filitas carbonáceas a las cuales se intercalan metarenisca cuarza-fedespáticas y limonitas.

González de Juana (1980) sostiene que la Formación Tucutunemo se extiende de Este a Oeste, desde la Región (de) Los Teques - Cúa en el estado Miranda, hasta la región de Tinaquillo en el estado Cojedes, atravesando parte de los estados Guárico y Aragua.

En cuanto a la edad, inicialmente fue considerada de edad Cretácico, pero Benjamini et al. (1986) en estudios posteriores le asignan una edad Paleozoico Tardío (Pérmico) que es aceptada por otros autores hasta que haya disponible mayor información.

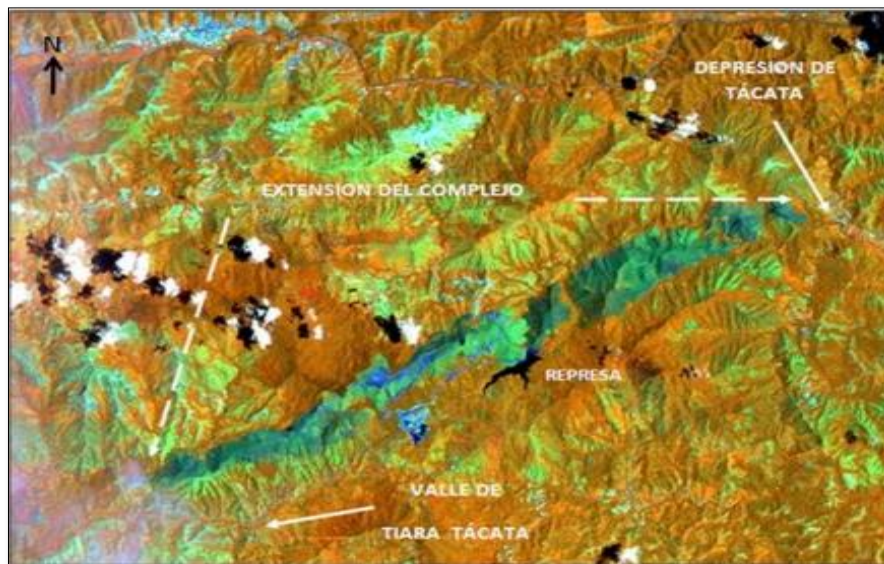


Figura 2. 4 Extensión geográfica del complejo ofiolítico desde Tiara, estado Aragua, hasta Táchata, estado Miranda. Imagen de radar (1995).

Fuente: Tomado de Informe Técnico del Departamento de Geología, Loma de Níquel.

- **Formación Tiara**

Está constituida por rocas ígneas tanto extrusivas (rocas volcánicas) como intrusitas (peridotitas serpentinizadas y gabros).

Smith (1953) utiliza el término Rocas Volcánicas de Tiara, a la secuencia de rocas volcánicas que aflora en la Región Loma de Hierro y de Táchata, estados Aragua y Miranda. El autor reescribe como Formación Volcánica de Tiara a la secuencia más joven, que aflora en la localidad tipo de Tiara y (en el área) al Norte de San Sebastián de los Reyes.

Según Smith (1952), la formación presenta unos 900 metros de espesor, mientras que Shagam, (1960) estima un espesor superior a los 400 metros. La edad para las rocas aflorantes en la región tipo no se ha determinado. Sin embargo, Piburn (1961) reporta una edad *K - Ar* de 100+/-10 Ma (Cretáceo superior).

2.5 Geología Local

En lo relativo a la geología local, se describen el Complejo Ofiolítico de Loma de Hierro y las zonas verticales del yacimiento níquelífero: Laterita, Transición Laterita-Saprolita, Saprolita y Roca Base.

En Venezuela, los depósitos de níquel se asocian con rocas ultra básicas serpentinizadas de la Cordillera de la Costa. Todos los depósitos y manifestaciones estudiadas son del tipo regolítico. Hasta el momento en el país no se han ubicado depósitos primarios de níquel asociados con sulfuros de origen magmático.

- **Complejo Ofiolítico de Loma de Hierro**

Según la cartografía nacional del Instituto Geográfico Nacional Simón Bolívar (IGNSB), el yacimiento de saprolita níquelífera de Loma de Hierro se encuentra en la latitud 10° 11' N y la longitud 67° 08' W, de origen Mesozoico-Cretácico. (Loma de Níquel, 2000).

Los primeros autores que trabajaron con esta unidad fueron Smith (1952), Maclachlan et al. (1960) y Graterol (1967), los cuales la cartografían y describen como

rocas ultramáficas pero sin asignarle nombre formal. El concepto de ofiolita aplicado a este Complejo aparece por primera vez en Bellizzia (1967) y Graterol (1967), y posteriormente Van Berkel (1988) y Van Berkel et al. (1989) formalmente proponen utilizar el nombre de "Complejo Ofiolítico de Loma de Hierro", como una unidad litodémica del tipo complejo estructural, incluyendo a las rocas ultramáficas, gabroides y volcánicas, si bien estas últimas corresponden a la Formación Tiara de otros autores.

La descripción litológica de esta unidad es realizada por Graterol (1972), el cual señala que el complejo peridotita-gabro se compone de peridotita serpentinizada, troctolita y gabro asociado a basalto. La peridotita es principalmente una harzburgita de grano grueso con olivino y enstatita de color negro a verdoso de acuerdo al grado de serpentinización. La mineralogía del gabro está compuesta principalmente de clinopiroxeno y plagioclasa cálcica muy alterada.

La localidad tipo de esta unidad se encuentra en la Fila de Loma de Hierro, ubicada a unos 20 km al sur de Tejerías, estados Aragua y Miranda, mientras que la extensión geográfica de su cuerpo principal es de unos 21 km, desde unos 4 km al oeste del poblado de Tiara, estado Aragua, hasta las proximidades de Tácata, estado Miranda, con una anchura variable entre 1 a 5 km.

La edad que ha interpretado Beck (1985, 1986) en base a la asociación de las rocas ultramáficas y gabroides, es Cretácica.

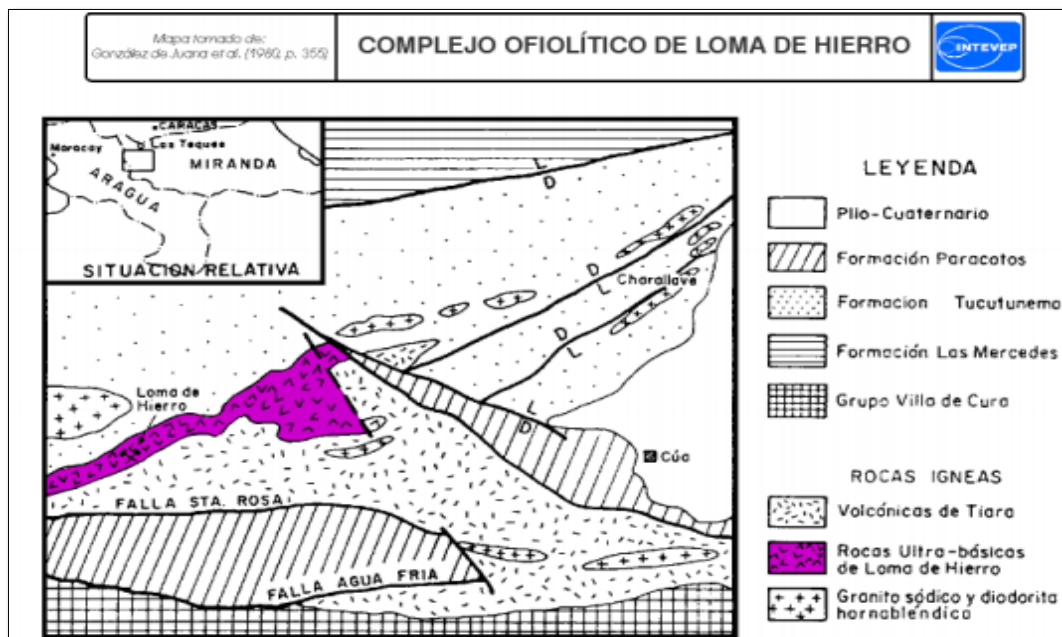


Figura 2. 5 Mapa geológico simplificado de la parte occidental del Estado Miranda, indicando el área de afloramientos de las rocas ultra-básicas de Loma de Hierro. Simplificado de Bellizzia (1967).
Fuente: www.pdvsa.com/lexico (21/10/2010).

Se puede afirmar que el manto regolítico que cubre al complejo es producto de un proceso de alteración superficial, activo bajo determinadas condiciones climáticas y topográficas, que se denomina laterización. Los cambios bruscos de temperatura y la circulación subterránea de las aguas de infiltración, alteran gradual y progresivamente a la roca, predominando la acción geoquímica de disolución o ataque sobre la mecánica de erosión. Las aguas se infiltran por las fisuras o diaclasas producidas por efecto de los efectos dinámicos, posiblemente durante el emplazamiento de la masa peridotítica, y ponen rápidamente en solución a los silicatos de magnesio y hierro anhidros. En esta etapa de alteración, la roca tiene aproximadamente su estructura primitiva: lamelas de hidratos de hierro y de sílice residual.

Durante el proceso, la roca adquiere un mayor grado de porosidad y permeabilidad, facilitando la penetración y circulación de las aguas de infiltración y el ataque continuo a la roca fresca por reacciones geoquímicas, también se produce la

eliminación de los productos en solución durante algún tiempo después del período de lluvias intensas.

Las formas topográficas del yacimiento indican período de reposo alternando con levantamiento. Muchos de los suelos níquelíferos se formaron y concentraron durante períodos de reposo asociados a una profunda meteorización, interrumpidos por períodos de levantamiento, lo cual originó una erosión acelerada.

- **Descripción del Yacimiento Níquelífero**

Para el yacimiento se establecieron cuatro zonas litológicas variables como se muestra en la Figura 2.6:

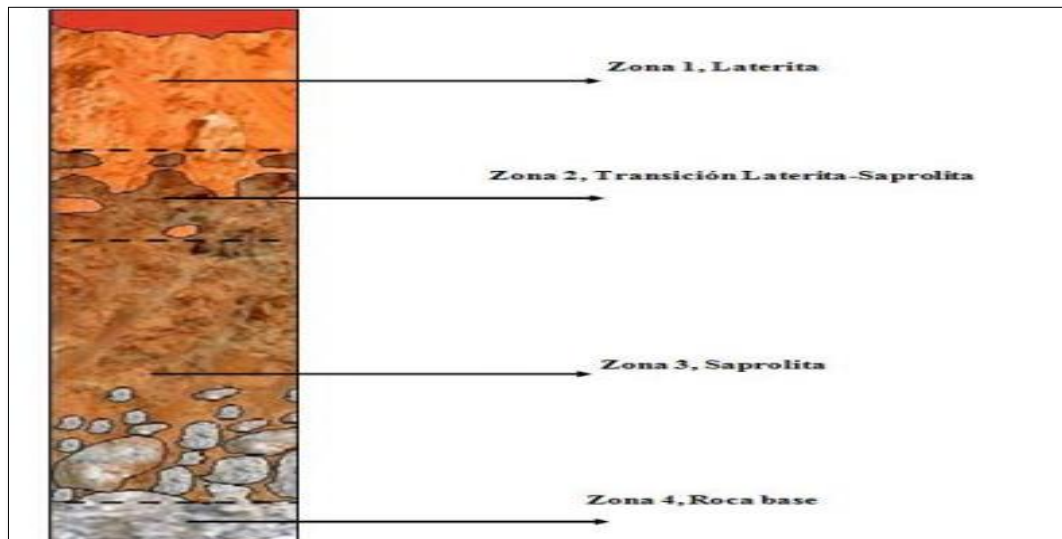


Figura 2. 6 Perfil litológico del suelo.

Fuente: Tomado de Informe Técnico del Departamento de Geología, Loma de Níquel.

- **Zona 1 (Laterita)**

Se compone por un horizonte de suelo denominado laterita, es un manto arcilloso, de color rojizo con un peso específico elevado por su alto contenido de hierro que oscila entre 35-45 % y un contenido de níquel relativamente bajo (0.8 %). El material es poroso y permeable, con una humedad media de 24,77 %.

Desde un punto de vista mineralógico los óxidos y los hidróxidos del hierro prevalecen en la forma de concreciones, así como en minerales de arcilla. Este material se considera estéril, debido al alto contenido de hierro que dificulta el proceso pirometalúrgico, es por ello este material es depositado en las escombreras destinadas su almacenamiento. La Tabla 2.4, muestra la concentración natural promedio de los elementos químicos fundamentales: níquel (Ni) y hierro (Fe) de los elementos químicos más importantes para la concentración de ferroníquel.

Tabla 2. 4 Comportamiento de los elementos químicos de la Zona 1.

(%)	Mínimo	Máximo	Media
Ni	0,1	1,2	0,79
Fe	35	71	46,84

Fuente: Tomado de Informe Técnico del Departamento de Geología, Loma de Níquel.

○ **Zona 2 (Transición Laterita-Saprolita)**

Zona de transición, es el límite entre la zona 1 y 2. Se diferencia de la Zona 1 debido a su color amarillento y a un contenido más alto de minerales de arcilla. Es una capa muy porosa y casi impermeable. Los valores de humedad se encuentran entre 13 % y 52 %. Esta capa aún se considera estéril ya que está suprayacente a la saprolita, sin embargo, durante el proceso de explotación, el material de la zonas de transición se debe almacenar en patios destinados al remanejo por su alto grado de níquel (1,2 %), debido a que este material se utiliza para realizar mezcla con otros material proveniente de otro sector que tenga un bajo contenido de Ni o Fe, y así obtener la relación adecuada para el procesos metalúrgicos. Como puede apreciarse en la Tabla 2.5 los valores de las concentraciones promedio de los elementos químicos fundamentales.

Tabla 2. 5 Comportamiento de los elementos químicos de la Zona 2.

(%)	Mínimo	Máximo	Media
Ni	1,21	5,1	1,56
Fe	35	71	44,63

Fuente: Tomado de Informe Técnico del Departamento de Geología, Loma de Níquel.

o **Zona 3 (Saprolita)**

Este horizonte de suelo está compuesto por saprolitas, una roca que se ha meteorizado a tal grado que constituye una masa de arcilla o grava donde todavía se pueden ver estructuras de la roca original y Serpentininas ($Mg_3Si_2O_5(OH)_4$) es un término que engloba principalmente los minerales Lizardita, Antigorita y Crisotilo, siendo los dos primeros los más frecuentes. En esta zona se tiene en cuenta la relación SiO_2 / MgO , por la alteración de minerales ricos en Mg como Olivino y Piroxenos. Su color varía entre marrón amarillento y pálido verde. Es altamente poroso, muy fracturado y su humedad se encuentra entre 15 y 46 %. Desde el punto de vista económico, esta es la zona más importante para explotar debido a la alta composición de níquel, la cual se puede observar en la Tabla 2.6, las concentraciones promedio de los elementos químicos fundamentales.

Tabla 2. 6 Comportamiento de los elementos químicos de la Zona 3.

(%)	Mínimo	Máximo	Media
Ni	0,81	7,11	1,64
Fe	3,24	64,96	14,02
SiO_2/MgO	0,54	194,38	1,90

Fuente: Tomado de Informe Técnico del Departamento de Geología, Loma de Níquel.

La mena de níquel es la Garnierita, mineral del grupo silicatos, con la fórmula química $(\text{Ni, Mg})_6(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}$ y es uno de los minerales de níquel más empleado en la extracción de este metal; aparece asociada frecuentemente con la Magnesita $(\text{Mg, Fe})\text{CO}_3$, Cromita $(\text{Cr}_2\text{FeO}_4)$ y Magnetita $(\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4)$, los cuales son minerales accesorios presentes en esta zona. Durante el proceso de la explotación, esta roca (sapolita) se considera como la materia prima para la planta de procesamiento mineral, siendo que el indicador metalúrgico es el valor mínimo del Ni.

○ **Zona 4 (Roca Base)**

El principal tipo litológica presente en esta zona son las peridotitas, rocas plutónicas ultramáficas sin cuarzo, ni feldespatos. Están constituidas por Olivino, Piroxenos y Anfíboles junto a menores cantidades de Magnetita, Ilmenita y Cromita, en su mayoría serpentinizadas. Este material se presenta en la forma de bloques de varias dimensiones, alcanzando a veces 3 metros de espesor. El color del material varía entre amarillento verde y gris, y está cortado por pequeñas venas de mineral Pirolusita $(\text{Mn}^{+4}\text{O}_2)$. En ciertas partes del depósito, los bloques de roca se encuentran fracturados. Estas fracturas son rellenadas por los minerales Garnierita y Ópalo. El contenido de níquel es variable, por consiguiente, no se explota durante la operación de la mina. Su humedad media es baja (14%) aproximadamente. La Tabla 2.7 muestra el comportamiento químico de los elementos más relevantes.

Tabla 2. 7 Comportamiento de los elementos químicos de la Zona 4.

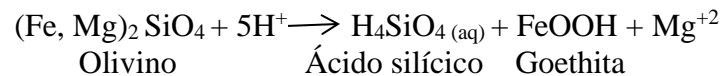
(%)	Mínimo	Máximo	Media
Ni	0,03	0,92	0,43
Fe	1,09	34,91	8,22
SiO₂/MgO	0,43	418,33	2,80

Fuente: Tomado de Informe Técnico del Departamento de Geología, Loma de Níquel.

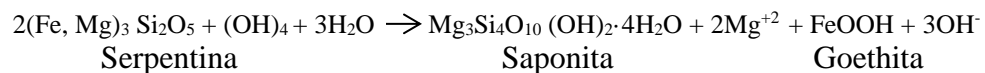
- **Lateritas de Ni Tipo Silicatos Hidratados**

Las lateritas de níquel tipo silicatos hidratados son la tipología de lateritas níquelíferas de este estudio. Las más conocidas se encuentran en regiones tectónicamente activas, de relieve moderado, como en el Sudeste de Asia y Oceanía, en América Central y el Caribe (Golightly, 1979).

En colinas y laderas, el nivel freático permanece por debajo del frente de meteorización. En la exposición del perfil laterítico, bajo condiciones meteóricas, el mineral Olivino es el primer mineral en ser alterado por intemperismo. El producto de la hidrólisis de éste es la formación del mineral Goethita junto con ácido silícico y magnesio.



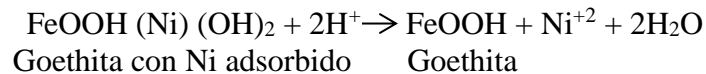
Cuando finaliza la hidrólisis del Olivino comienza la de los minerales Piroxeno y Serpentina. Y los productos mineralógicos son: Esmectita, una categoría de minerales de arcilla que tienen una estructura cristalina de tres capas (una capa de alúmina y dos capas de sílice) y que presentan la característica común de hinchamiento por hidratación cuando se exponen al agua y Óxidos de hierro con la lixiviación del elemento químico Magnesio.



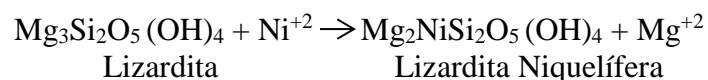
El níquel liberado por la meteorización del Olivino y la Serpentina se mantiene en el perfil, mayoritariamente en el mineral secundario Goethita, aunque también en el otro mineral secundario Saponita (Brand y Butt, 2001).

Estas transformaciones causan un aumento de la porosidad de modo que las soluciones se infiltran rápidamente y son menos alcalinas y, por lo tanto, la densidad disminuye más del 50%. Los silicatos primarios son pseudomorfizados por Oxihidróxidos de Hierro y Esmectitas. Los Óxidos de Hierro y las Esmectitas continúan los procesos de hidrólisis, lixiviando casi por completo el Magnesio. Como consecuencia, en el horizonte superior dominan Óxidos de Hierro; o bien, Caolinita o Gibbsita si las concentraciones de Aluminio son muy altas. En esta etapa, la textura de la roca original es irreconocible debido al aumento de la porosidad entre las fracturas y la presencia de microfallas.

Con la pérdida total de más del 70% de la masa inicial, la concentración residual por si sola puede dar más de un 1% en Níquel. Cuando la vegetación es abundante, los suelos orgánicos producen soluciones con pH bajos, y durante el curso de meteorización, los Óxidos de Hierro en los horizontes superiores pueden ser disueltos y volver a precipitar, lo que produce la lixiviación del Níquel.



Finalmente, el Níquel es transportado a las profundidades del perfil laterítico y puede ser reabsorbido por Goethita o bien reaccionar con los productos de la meteorización del Olivino, Serpentina y otros minerales para formar “Garnierita” y otros silicatos de magnesio hidratados. Los Óxidos de Manganeso también se encuentran en la parte inferior de la zona de los óxidos con precipitaciones de Níquel y sobre todo de Cobalto (Golightly, 1979; Peletier, 1996). El Níquel también puede reemplazar al Magnesio en la Serpentina.



Debido al drenaje local en condiciones impuestas por la tectónica, estructura y topografía los resultados de los procesos de hidrólisis son compuestos silicatados y/o óxidos hidratados. La tasa de erosión elevada limita la profundidad de meteorización en valores inferiores a 30 m, por lo tanto, en las zonas de menor relieve los perfiles lateríticos serán menos maduros (Budel, 1982).

CAPÍTULO III MARCO TEÓRICO

3.1 Antecedentes

Pinilla (1999), en su Trabajo Especial de Grado (en adelante, TEG): “Alternativas para el manejo y disposición de minerales no conformes en el cuadrilátero ferrífero San Isidro, estado Bolívar, CVG Ferrominera Orinoco C.A”, en su investigación propone el diseño de obras de drenaje que mejoren la conducción de las aguas provenientes de las lluvias para proteger el suelo de la erosión hídrica y controlar la emisión y el transporte de los sedimentos.

Van Zanten (2003), en su TEG: “Diseño de manejo de aguas de mina, en el pit baqueta de la mina paso diablo, estado Zulia, como aporte al desarrollo sustentable de la región”, en el estudio propone la construcción de obras de drenaje para conducción de aguas de mina y retención de sólidos en suspensión hídrica y elaboró curvas IDF para el dimensionamiento de la canalización de aguas de escurrimiento.

Vivas (2005), en su TEG: “Propuesta de un modelo estratégico de gestión ambiental para las empresas productoras de ferroníquel”, la investigación plantea un modelo estratégico de gestión ambiental, con énfasis en el manejo de escoria, derivado de la obtención del ferroníquel integrando indicadores ambientales.

Barrientos (2007), en su TEG: “Evaluación de vías y drenajes con fines de mejoramiento del rendimiento de operaciones mineras para las canteras de arcilla y caliza en Holcim (Venezuela) C.A., planta Cumarebo, estado Falcón”, evalúa un diseños alternativos de drenaje y vías de acarreo del mineral desde los bancos de explotación hasta la planta de trituración, para su procesamiento, elaboración y comercialización, con el fin de mantener y mejorar el rendimiento de la operación.

Pizarro, Morales y Otros (2010), en su proyecto: “Propuesta de un modelo de estimación de erosión hídrica para la Región de Coquimbo, Chile”, en el cual se instalaron parcelas de investigación con clavos de erosión, y cuya información

conseguida permitió la elaboración de modelos matemáticos que fuesen capaz de predecir el volumen a erosionar de un suelo.

Ochoa y Reyes (2011), en su TEG: “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”, realizan un estudio de las condiciones de estabilidad de los taludes, con el fin de que se puedan ejecutar de forma segura las labores de planificación y operación de mina.

Gavidia (2017), en su TEG: “Propuesta de plan de cierre del frente 2 de la cantera Carayaca, Distrito Capital”, el autor evalúa la erosión hídrica utilizando el método de parcelas experimentales con clavos de erosión, demostrando que el proceso que predomina es la erosión.

3.2 Suelo, Tipos, Propiedades y Constitución Mineral

El suelo, un agregado natural de granos minerales, con o sin componentes orgánicos, que puede separarse por medios mecánicos comunes, tales como la agitación en el agua (Peck, et.al., 1983).

Como establece Marín (1991) los suelos son producto de la descomposición de las rocas por procesos físico-químicos. Entre los procesos físicos podemos citar principalmente a la fatiga y el desgaste; los cambios de temperatura, la acción del agua corriente, el viento, etc.

La descomposición de la roca también ocurre por fenómenos químicos de los minerales constituyentes. Las arenas, las gravas y ciertos limos inorgánicos son originados por procesos físicos, y los suelos arcillosos, son originados generalmente por la meteorización química de los minerales de la roca.

Los materiales producto de la descomposición de la roca, posteriormente son transportados, por el agua o por el viento a lugares distantes, formando a su vez depósitos nuevos que cubren la corteza de las rocas originarias o anteriores. Estos suelos son catalogados como suelos transportados.

No todos los suelos son transportados a distancia de su roca originaria: suelos residuales son aquellos que permanecen sobre o asociados a la misma roca que les dio origen. En toda forma debe suponerse que los suelos residuales posteriormente deberán ser transportados a lugares distantes. Los depósitos homogéneos son aquellos que tienen un solo tipo de material, sea arcilla o arena, variando ciertas características locales como humedad, graduación, pero que en general se trata de un mismo tipo de suelo. Los depósitos heterogéneos son aquellos formados por estratos de varios tipos de suelos.

El suelo es una fina capa superficial de la Biosfera, en la que tienen lugar muchos procesos esenciales para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres, por ejemplo, el suministro de agua y de nutrientes para las plantas, la descomposición de los restos orgánicos de los seres vivos, o la producción de fitomasa (Tabla 3.1).

Tabla 3. 1 Funciones del suelo.

Económicas	Producción de alimentos, fibras, energía, minerales, vías comunicación, etc.
Ecológicas	Suministro de nutrientes, reciclaje de materia orgánica, ciclo del agua, filtro de contaminantes.
Biológicas	Hábitat para la fauna y microorganismos, banco de genes, reserva de biodiversidad, etc.
Hidrológicas	Almacén de agua, control de la escorrentía, suministro para las plantas.
Control de la contaminación	Fuente y sumidero para contaminantes, reciclaje residuos. Capacidad filtrante, Fuente y depósito de gases invernadero.
Paisaje y patrimonio cultural	Indicador de la evolución del paisaje, preservación material paleontológica.

Fuente: Modificado a partir de Bullock et al, (1999).

Los suelos pueden dividirse en dos amplios grupos: suelos cuyo origen se debe a la descomposición física y/o química de las rocas, es decir, los suelos inorgánicos, y suelos cuyo origen es principalmente orgánico:

Suelos Inorgánicos: En ellos, el producto del intemperismo de las rocas permanece en el sitio donde se formó y da origen al suelo residual, en caso contrario, forman un suelo transportado, cualquiera sea el agente transportado como puede ser observado en la Figura 3.1.

Suelos Orgánicos: Se forman casi siempre in situ. Muchas veces, la cantidad de materia orgánica, ya sea en forma de humus o de materia no descompuesta, o en su estado de descomposición, es tan alta con relación a la cantidad de suelo inorgánico que las propiedades que pudieran derivar de la porción mineral quedan eliminadas.

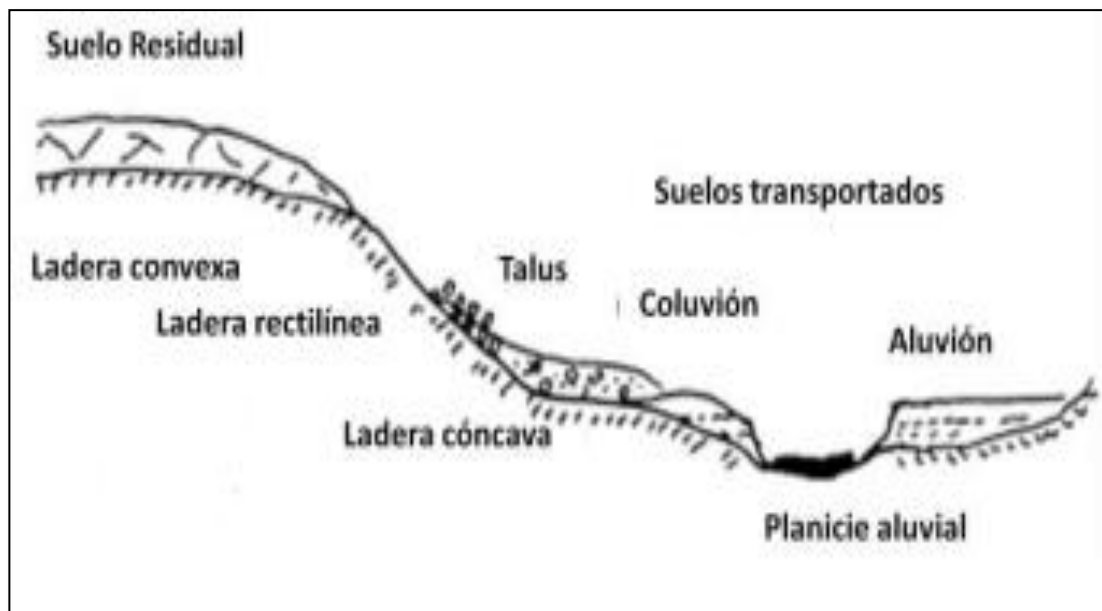


Figura 3. 1 Distintos tipos de formaciones de suelo.
Fuente: Suárez, (2001).

- **Tipos de Suelos**

- **Lateríticos**

Son suelos arcillosos ricos en aluminio y hierro son muy frecuentes y se caracterizan por la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio; el hierro en pequeñas cantidades, que es movilizadado por el agua subterránea, es luego oxidado.

El movimiento cíclico de los niveles de agua conduce a la acumulación de óxidos de hierro, formando una capa de suelos cementados, generalmente semipermeables (Figura 3.2). Estos materiales se van endureciendo en presencia del aire, formando suelos lateríticos, los cuales poseen una gradación que puede ir desde las gravas a las arcillas y una plasticidad de baja a intermedia (Tabla 3.2). Es el proceso fisicoquímico que convierte el suelo o roca en laterita.

Tabla 3. 2 Propiedades típicas de los suelos tropicales lateríticos.

Propiedad	Valor
Contenido de agua	10 a 49 %
Límite líquido	33 a 90 %
Límite plástico	13 a 31 %
Porcentaje de arcilla	15 a 45 %
Peso unitario seco	1,6 a 2,0 gr/cm ³
Ángulo de fricción interna	28° a 39°

Fuente: Suárez, (2001).

Las lateritas no son derivadas directamente de las rocas, sino que son el resultado de la remoción gradual de sílice y sales solubles. Este proceso ocurre cuando el agua percola a través del suelo o la roca. La grava laterítica es un suelo de consistencia gruesa, granular, que tiene partículas que se forman de la cementación de partículas más pequeñas. Al clasificarse, podría ser grava o arena, pero posee matriz de arcillas o limos. Estos suelos comúnmente son de color rojo.

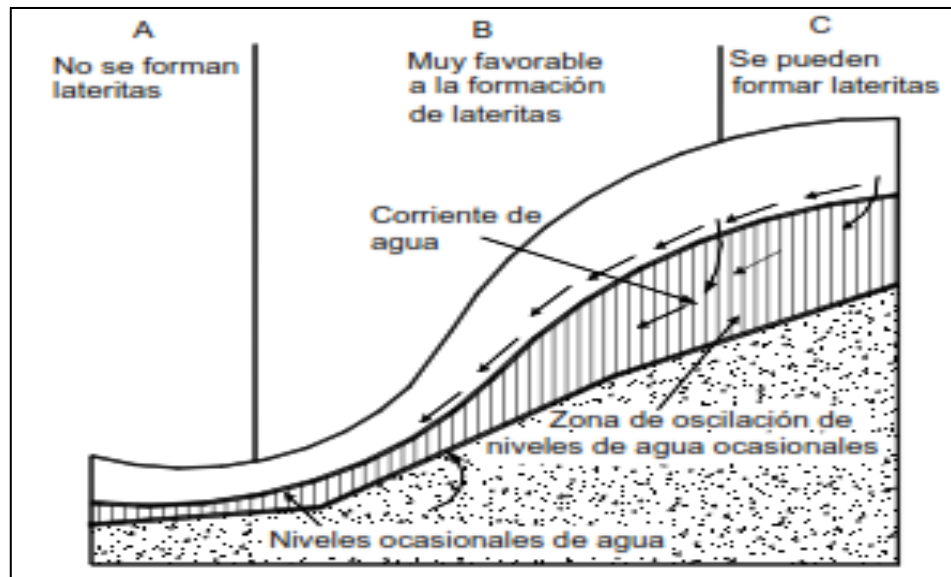


Figura 3. 2 Formación de lateritas por corrientes de agua ocasionales.
Fuente: Suárez, (2001).

- **Saprolíticos**

Suelo residual en el que se conservan la textura y las estructuras de la roca original. Normalmente presente una textura limosa o areno-limosa y colores abigarrados en los que predominan los tonos rojizos debido a la oxidación del hierro de los minerales primarios.

La formación del saprolito es un proceso iso-volumétrico (Stolt & Baker 1994) pero la mitad o más de la masa de la roca se pierde por lixiviación de sílice, hierro y bases. El aumento de la microporosidad resulta de cambios en los minerales fácilmente meteorizados (plagioclasa, biotita, olivino, piroxenos, etc.) y las pérdidas lentas por lixiviación. Esto aumenta la capacidad de retención de agua del saprolito permitiendo la penetración de las plantas y aumentando la meteorización por el consumo de potasio, la producción de ácidos orgánicos y el desprendimiento de bióxido de carbono. Las raíces también crean canales que conducen el agua más rápidamente, permitiendo la

iluviación profunda de la arcilla en las últimas etapas de desarrollo (Graham et al. 1994).

- **Propiedades Intrínsecas**

De acuerdo con Marín (1991) las características físicas, llamadas propiedades índices de los suelos, que pueden llevarnos a localizar y diferenciar las características de un suelo en relación a otro, y al mismo tiempo, prever su comportamiento mecánico, son: granulometría, plasticidad y peso específico.

- **Granulometría**

El análisis granulométrico o análisis mecánico de un suelo consiste en separar y clasificar por tamaños las partículas que lo componen, determinando en porcentaje del peso total la cantidad de granos de distintos tamaños que contiene dicho suelo.

- **Plasticidad**

Según Ugas (1985), señala que la característica típica de los materiales finos es la plasticidad. La plasticidad es más bien un fenómeno electroquímico de los materiales finos, particularmente arcillosos y son capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse.

La plasticidad es la capacidad de un suelo para tomar formas diversas. Convencionalmente se supone que los suelos a medida que disminuyen su contenido de humedad va pasando por diferentes estados. Si un suelo está en solución con el agua puede disminuir por evaporación el contenido del agua, hasta convertirse en un barro fluido que poco a poco puede adoptar una forma con ligera deformación: en este caso, se dice que el suelo ha pasado del estado líquido al estado plástico.

- **Peso Específico**

De acuerdo con Ugas (1985) el concepto de peso específico en la mecánica de suelos se aplica generalmente a la relación de peso respecto al volumen. El uso acostumbrado de términos ha llevado a denominaciones que generalmente se prestan a

confusiones. Así por ejemplo, al peso específico se lo llama peso unitario y en algunas ocasiones densidad.

- **Constitución Mineral de los Suelos**

Los suelos gruesos están formados principalmente por silicatos, feldespatos de potasio, sodio o calcio, micas, olivino, serpentinas, etc.; óxidos, predominantemente cuarzo, limonita, magnetita y corindón; carbonatos, destacando la calcita, dolomita y sulfatos. En estos suelos, el comportamiento mecánico e hidráulico está principalmente condicionado por su compacidad y por la orientación de sus partículas, por lo que la mineralogía pasa a segundo plano.

En el caso de suelos arcillosos, están compuestos por silicatos de aluminio, presentando algunas veces, silicatos de magnesio, hierro y otros metales hidratados. Estos minerales, presentan una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas, que se presentan en la variedad silícica y alumínica.

3.3 Erosión, Agentes, Tipos de Erosión y Procesos que Intervienen

La palabra erosión proviene del latín *erodere* que significa roer, desprender o desgarrar. La erosión del suelo se refiere a la eliminación, transporte y pérdida neta del mismo (Constantinesco, 1976).

Para Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 1997), la erosión constituye la remoción física del suelo por la acción del impacto de caída de las gotas de lluvia, energía del flujo superficial y subterráneo, hielo, velocidad del viento y fuerza de la gravedad.

Según Suárez (1998), la erosión es el desprendimiento, transporte y depositación de partículas o masas pequeñas de suelo o roca, por acción de las fuerzas generadas por el movimiento del agua o el viento. El flujo puede concentrarse en canales produciendo surcos y cárcavas. Las gotas de lluvia pueden contribuir al desprendimiento de las partículas o granos, los cuales se pueden traducir en sedimentación de materiales en el pie del talud.

Por su parte, la Comisión de las Comunidades Europeas (2002), define a la erosión como un fenómeno geológico natural causado por el desprendimiento de partículas del suelo a causa de la acción del agua o el viento, las cuales son depositadas en otro lugar, en donde este último proceso es conocido como sedimentación (Figura 3.3).



Figura 3. 3 Cauce característico de la C.V.M. S.A. División-Níquel, con presencia de sedimentos de diverso tamaño.
Fotografía tomada por José Cova (2016).

El proceso físico de erosión incluye el desprendimiento y transporte de partículas insolubles, tales como arena, limo, arcilla y materia orgánica. El transporte puede ser lateral, sobre la superficie o vertical en el perfil del suelo a través de los espacios porosos vacíos y grietas. La remoción de material soluble bajo la forma de sustancias disueltas se denomina erosión química, la que puede ser causada por la escorrentía superficial o por el flujo subsuperficial (FAO, 1997).

- **Agentes que Aceleran la Erosión**

Diversos autores han manifestado que el proceso de erosión se presenta de distintas formas. Así por ejemplo, si es clasificada por su origen, se puede hablar de

erosión natural y erosión antrópica. Respecto al primer caso, García-Chevesich (2008) señala que las cuencas, los valles y las playas en donde vive el hombre han sido creadas bajo distintos procesos erosivos, los cuales se caracterizan por poseer lentas tasas de erosión, en las cuales el hombre no es capaz de distinguir o darse cuenta de los cambios topográficos que ocurren. Este tipo de erosión natural se denomina erosión geológica.

Ahora si se habla de erosión antrópica, existen numerosos ejemplos erosivos, que han sido inducidos por un repentino e inadecuado uso de la tierra, relativos a la tala de un bosque, un incendio forestal, un subsolado, un sitio en construcción o una excesiva cantidad de animales, los que provocan una alteración en el ciclo hidrológico, afectando las capas protectoras del suelo y la capacidad de infiltración de éste. Al respecto, la Asociación Española Agricultura de Conservación / Suelos Vivos (2005), señala que las actividades humanas pueden acelerar en gran medida las tasas de erosión, particularmente en el mundo agrario, donde la agricultura convencional ha provocado un aumento de dichas tasas de manera considerable. Este indebido uso de la tierra se puede traducir en un desmesurado incremento en las tasas de pérdida de suelo superficial, proceso denominado erosión acelerada (García-Chevesich, 2008).

En el mismo sentido, es importante mencionar que la erosión puede ser provocada por distintos agentes, los cuales generan una energía capaz de erosionar el suelo, en donde éstos pueden actuar solos, o en conjunto.

- **Tipos de Erosión**

La superficie terrestre se ve afectada por la acción de fuerzas naturales que producen o facilitan el desplazamiento de partículas individuales o de la masa del suelo. La fuerza de la gravedad es el principal motor de los procesos erosivos pero, por sí misma, solo es capaz de producir erosión cuando la pendiente es suficientemente elevada para permitir el deslizamiento del suelo. En este caso, ocurren los movimientos en masa, como los deslaves, derrumbes, reptaciones, etc. Cuando, además de la gravedad, interviene la energía cinética de un fluido como el aire o el agua, los desplazamientos de partículas son muy importantes y extensos. En el caso de la erosión eólica las partículas pueden ser transportadas por el viento a grandes distancias. La

erosión hídrica, no obstante, es la que tiene mayores repercusiones ambientales y económicas. En la Figura 3.4 se muestra una clasificación de los tipos de erosión.

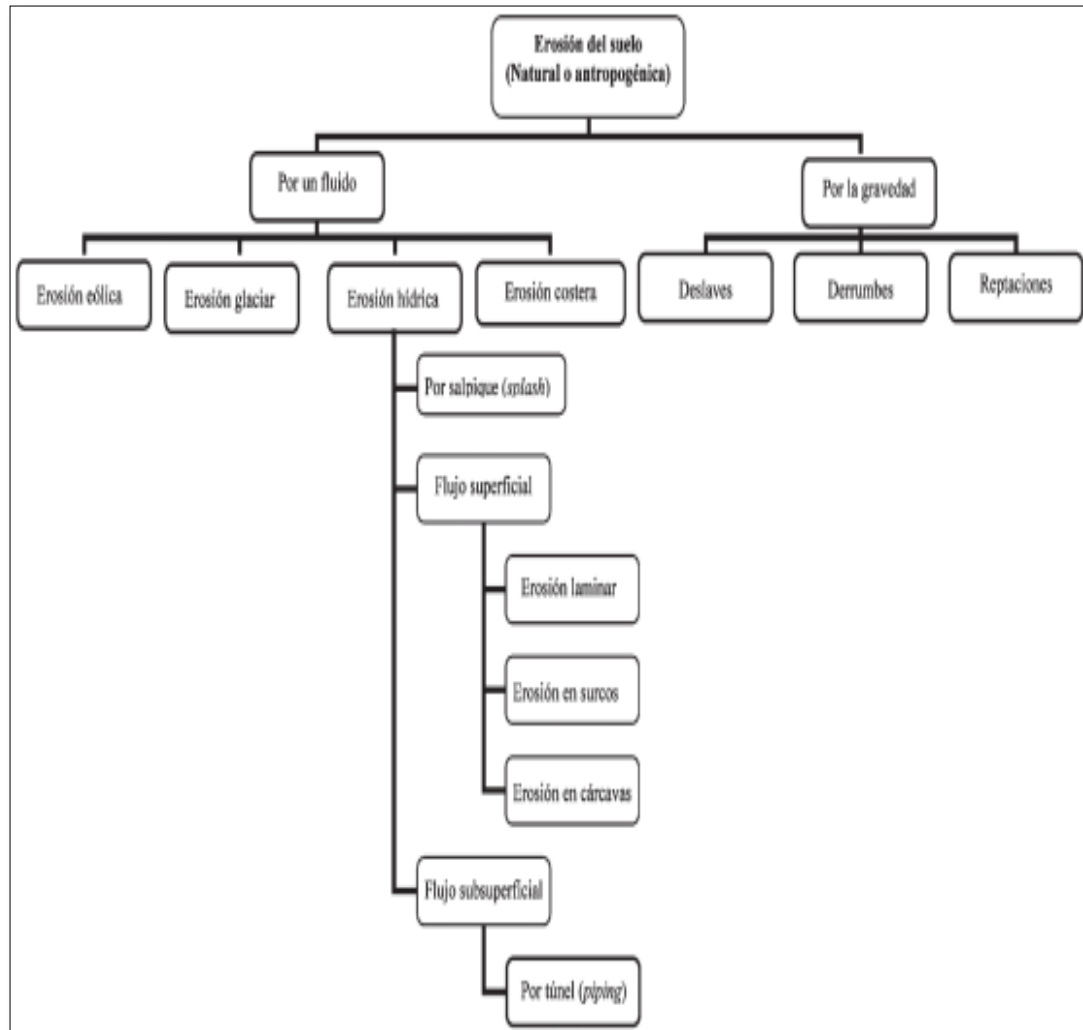


Figura 3. 4 Tipos de erosión en función del agente dominante.
Fuente: Modificado a partir de Lal, (1990).

Desde un punto de vista aplicado, se puede definir el concepto de vida útil de un suelo (L) frente a una tasa de erosión, como el tiempo en que permanecerá productivo afectado por esta tasa de erosión (Stoking & Pain, 1983).

$$L = (P_i - P_0) da / (Z - Z_0)$$

Dónde:

P_i = Profundidad actual (m)

P_0 = Profundidad mínima efectiva (m)

da = Densidad aparente ($Mg\ m^{-3}\ 10^3$)

Z = Tasa de degradación anual media ($Mg\ ha^{-1}\ a^{-1}$)

Z_0 = Tasa de erosión tolerable ($Mg\ ha^{-1}\ a^{-1}$)

En la Tabla 3.3, se muestra un ejemplo de la vida útil de dos (2) suelos de distinta textura, sometidos a distintos grados de erosión. Estos datos deben ser considerados como un ejercicio para poder estimar el efecto que puede tener sobre un determinado suelo distintas prácticas de cultivo más o menos erosivas, pero no para calcular pérdidas reales.

Debe tenerse en cuenta que la erosión hídrica no es un proceso continuo de degradación, sino que se produce por eventos de lluvia muy irregulares en intensidad y frecuencia. Por lo tanto, las tasas medias de erosión solo tienen un valor indicativo. Para establecer grados de intensidad de la erosión hídrica, la FAO (1979) propuso las categorías que se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3. 3 Ejemplo de vida útil frente a diferentes tasas de erosión.

Tipo de suelo	Textura Franco-arenosa			Textura arcillosa		
	Densidad aparente (Mg ha ⁻¹ m ⁻¹)	14 000			13 000	
Tasa aceptable (Mg ha ⁻¹ a ⁻¹)	1			1		
Profundidad mínima útil (m)	0,20			0,15		
Profundidad actual (m)	0,5	0,3	0,25	0,3	0,25	0,20
Tasas erosión (Mg ha ⁻¹ a ⁻¹)	Vida útil (años)					
2	2800	1400	700	1950	1300	650
5	700	350	175	488	325	163
10	311	156	78	217	144	72
20	147	74	37	103	68	34
50	57	29	14	40	27	13
100	28	14	7	20	13	7

Fuente: Stoking and Pain, (1983).

Tabla 3. 4 Categorías para considerar distintos grados de erosión hídrica.

Intensidad	Mg ha ⁻¹ a ⁻¹	Mm a ⁻¹
Ligera	<10	<0,6
Moderada	10 - 50	0,6 – 3,3
Alta	50 - 200	3,3 – 13,3
Muy alta	>200	>13,3

Fuente: FAO, (1979).

○ Erosión Hídrica

Los procesos de erosión hídrica están estrechamente relacionados con las rutas que sigue el agua en su paso a través de la cobertura vegetal y su movimiento sobre la superficie del suelo (Morgan, 1997). Este tipo de erosión es causada por la acción de las gotas de lluvia al impactar una superficie de terreno no debidamente protegida por vegetación. Esta acción separa partículas de los agregados del suelo, las que posteriormente son arrastradas por el escurrimiento superficial de las aguas. La importancia del efecto de las gotas radica en que son capaces de dispersar partículas a

distancias de 150 cm del punto de impacto y levantarlas a alturas de 60 cm (Peña, 1992).

La energía disponible por el flujo pre-canalizado es insignificante si se compara con la que poseen las gotas de lluvia, que pueden caer con velocidades terminales de hasta 9 m/s. La velocidad del flujo pre-canalizado fluctúa entre 0,05 a 0,20 m/s, o valores ligeramente inferiores o superiores a este intervalo (Peña, 1992).

- **Procesos que Intervienen en la Erosión Hídrica**

Desde el momento en que una gota de lluvia incide sobre la superficie del suelo, tienen lugar una secuencia de procesos que producen el desplazamiento y el transporte de partículas. A efectos de estudio es conveniente diferenciar entre los siguientes tipos si bien en la mayoría de casos se dan simultáneamente:

- Erosión por salpicadura, chapoteo (*splash*).
- Erosión por escorrentía superficial (*overland flow*).
 - Flujo laminar o difuso (*sheet erosion, inter-rill erosion*).
 - Flujo concentrado (*rill erosion, gully erosion*).
- Erosión por flujo subsuperficial (*piping*).
- Movimientos en masa.
 - Deslaves (flujos de barro).
 - Derrumbes (deslizamientos por gravedad).

- **Erosión por Salpicadura (*splash*)**

Consiste en el arranque y desplazamiento de partículas del suelo por impacto de las gotas de lluvia. Depende sobre todo de la energía cinética con que impactan las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo. Cada tormenta aportará una energía cinética acumulada en función de las dimensiones de las gotas (intensidad de la lluvia) y de la cantidad de agua caída. Depende también de la resistencia específica de cada suelo a este proceso erosivo, es decir de la estabilidad de la estructura, de la textura, contenido de materia orgánica, cobertura vegetal, etc. En la superficie de los suelos

afectados por este proceso se observa a menudo la aparición de “pináculos” (Figura 3.5). Para medir la cantidad de partículas desplazadas por el salpique se utilizan embudos o tazas situadas a nivel del terreno, o mejor las denominadas tazas de Morgan que permiten cuantificar el desplazamiento en una ladera (Porta et al, 2003).

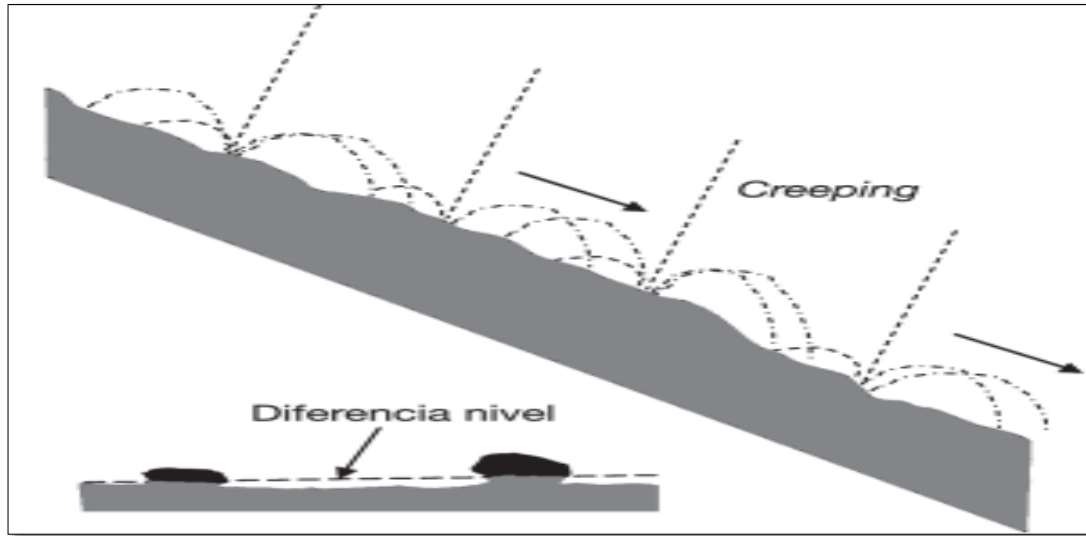


Figura 3. 5 (a) Desplazamiento de partículas en una ladera producido por el salpique. (b) Aparición de pináculos o micropedestales bajo las piedras que actúan de escudo protector.
Fuente: Suárez, (1980).

Las velocidades terminales para diferentes diámetros y alturas de caída de las gotas de lluvia pueden ser apreciadas en la Tabla 3.5, de donde se intuye el efecto que puede tener la caída de una gota de lluvia desde el dosel de un bosque en caso de encontrar un suelo con el horizonte de hojarasca pobremente desarrollado como ya se había anotado.

Tabla 3. 5 Velocidad terminales (m/s) de caída de las gotas de lluvia.

Diámetro gotas (mm)	Altura de caída de las gotas (m)		
	2,0	4,0	8,0
1,5	4,50	5,25	
3,0	5,37	6,68	7,75
5,0	5,79	7,50	8,86

Fuente: Laws, 1958 en Gutiérrez, (1983).

Asimismo, el diámetro y por tanto la velocidad de las gotas se encuentran estrechamente correlacionados con la intensidad de la precipitación, correspondiendo mayores diámetros y velocidades a mayores intensidades (Tabla 3.6).

Tabla 3. 6 Valores de diámetro y velocidad de las gotas para diferentes intensidades de lluvia.

Forma de lluvia	Intensidad (mm/h)	Diámetro (mm)	Velocidad (m/s)
Niebla	0,13	0,055	0,1
Llovizna	0,25	0,5	4,0
Lluvia ligera	0,75	1,0	5,5
Lluvia	18,0	2,0	6,5
Chubasco	100	4,0	9,0

Fuente: Gutiérrez, (1983).

○ **Erosión Laminar (*sheet erosion*)**

Consiste en la remoción de delgadas capas de suelo extendidas en forma más o menos uniforme en toda la superficie del suelo; es poco apreciable ya que la cantidad total de suelo removido en un aguacero es generalmente pequeña, y ya cuando se detecta sólo queda una delgada capa de suelo. La erosión laminar es el efecto combinado de la acción del golpeteo que desprende las partículas de suelo y la escorrentía; Su acción selectiva sobre las partículas genera “pavimentos de erosión” (Suárez, 1980), los cuales se producen por la remoción y arrastre de las partículas más livianas tales como arcilla y materia orgánica, quedando sobre la superficie suelos gravillosos o pedregosos. De aquí se desprende su efecto también sobre la fertilidad de los suelos y su productividad; este tipo de erosión arrastra únicamente la capa superior

del suelo, y se propicia en suelos localizados en condiciones de fuerte pendiente, sin vegetación adecuada y con bajo contenido de materia orgánica.

- **Erosión por Escorrentía Concentrada o Surcos (*rills*)**

Se produce por la concentración del flujo superficial en cicatrices o incisiones lineales sobre el terreno (Figura 3.6). El agua de escorrentía fluye sobre la superficie del talud y a su paso va levantando y arrastrando partículas de suelo, formando surcos (*rills*). La capacidad de transporte de partículas aumenta al crecer la velocidad del agua en el surco y también al aumentar la densidad del fluido por la mayor concentración de partículas en suspensión. En esta situación se produce la socavación de las paredes del cauce que suministra más partículas y también erosión remontante. Adopta distintas morfologías lineales y tamaños excavados por la fuerza erosiva del agua: surcos (*rills*), que pueden ser eliminados fácilmente por las operaciones de laboreo; cárcavas (*gully*), al profundizarse y ampliarse los surcos de erosión se convierten en cárcavas. Las cárcavas constituyen el estado más avanzado de erosión y se caracterizan por su profundidad, que facilita el avance lateral y frontal por medio de desprendimientos de masas de material en los taludes de pendiente alta que conforman el perímetro de la cárcava.

- **Tipos de Cárcavas.**

De acuerdo a su forma las cárcavas pueden ser clasificadas en seis categorías diferentes, a cuya descripción se procede conforme a los planteamientos de Moder (1983a).

- **Lineal:** De forma larga y con cabeza angosta, de pocos tributarios en sus costados; puede ensancharse y dar origen a los tipos restantes.
- **Bulbosa:** Ancha y espatulada en el extremo superior, pudiendo ser lineal en su parte baja; a menudo sigue el curso de un drenaje viejo. Tiene pequeños tributarios en todos los costados; al irse desarrollando da origen a la cárcava de tipo dendrítico.

- Dendrítica: Formada por muchos tributarios en forma ramificada; puede originarse siguiendo las líneas de un drenaje natural; su cabeza puede tener forma de semicírculo.
- Enrejada: Los tributarios entran al canal formando aproximadamente un ángulo de 90°; se desarrolla principalmente en zonas planas.
- Paralela: Compuesta por una o más cárcavas que desaguan en una sola.
- Compuesta: Combinaciones de dos o más formas, dándose especialmente en zonas con problemas avanzados de erosión.

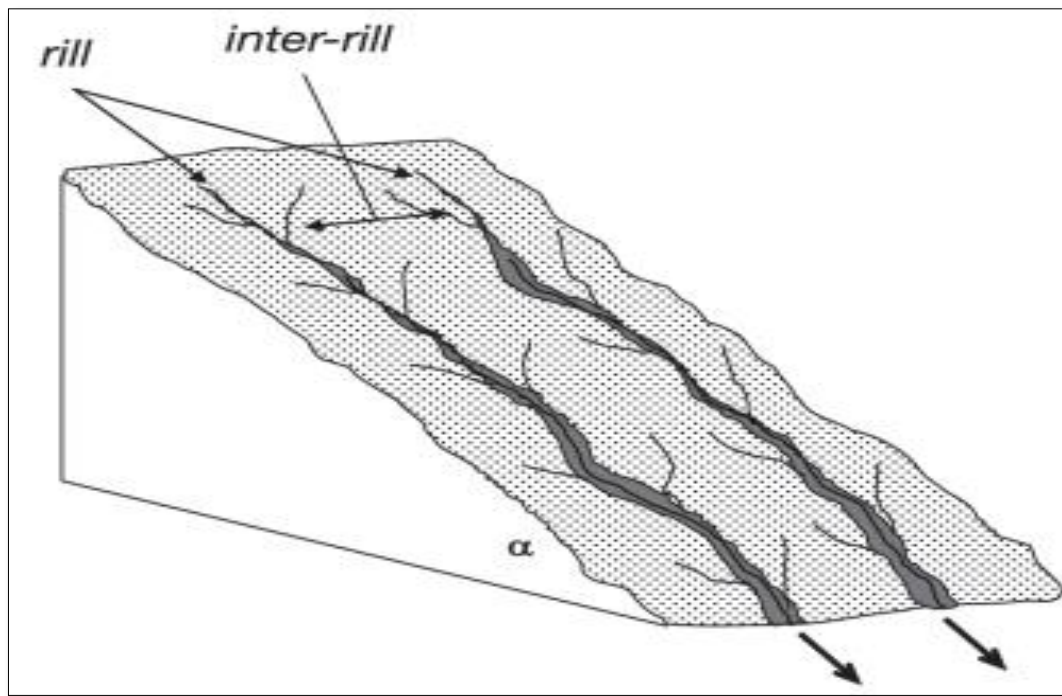


Figura 3. 6 La erosión laminar predomina en las superficies regulares de una ladera situada entre dos surcos (sheet erosion). En estos se concentra el flujo de agua y aumenta la capacidad de socavación y arrastre (rill erosion).

Fuente: Suárez, (1980).

Por otra parte, las cárcavas pueden ser clasificadas de acuerdo a su tamaño tomando como parámetros la profundidad y el área de drenaje:

Tabla 3. 7 Clasificación de cárcavas según su profundidad y área de drenaje.

Tamaño	Profundidad (m)	Área de drenaje (ha)
Pequeña	< 1	< 2
Mediana	1 – 4,5	2 – 20
Grande	> 4,5	> 20

Fuente: Moder, (1983^a).

3.4 Mecánica y Factores que Determinan la Erosión Hídrica

Este proceso es complejo y está influido por la cantidad, intensidad y duración de la lluvia, naturaleza del flujo superficial, naturaleza del suelo y su pendiente, y el tipo de cubierta vegetal. No obstante, siempre el material debe primero ser suelto antes de ser transportado, y este movimiento es el resultado del impacto de la gota de lluvia, de la turbulencia producida por ellas y el agua de escurrimiento (Peralta, 1976).

Se necesita un enorme gasto de energía para romper los agregados y terrones del suelo y el proceso puede ser separado claramente en tres etapas:

- ❖ Las partículas se sueltan de la masa del suelo.
- ❖ Las partículas son transportadas.
- ❖ El material es depositado.

Hjulstrom (1935) determinó la velocidad mínima requerida para el desprendimiento (erosión), transporte y depositación de partículas de suelo, según su diámetro (Figura 3.7). Nótese que se necesitan mayores velocidades para el desprendimiento de una partícula dada. Sin embargo, ésta será transportada en forma de suspensión, sólo si la velocidad del caudal es alta o, en su defecto, si la partícula posee un diámetro reducido. De lo contrario, dicha partícula será depositada en un corto lapso.

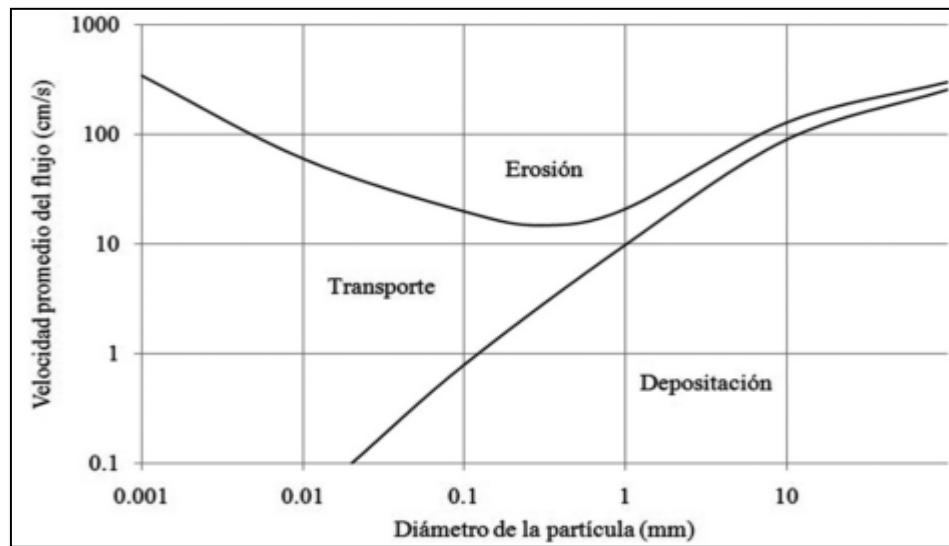


Figura 3. 7 Diagrama de Hjulstrom, el cual indica la velocidad mínima requerida para desprender, transportar o depositar partículas de suelo, según su diámetro, para flujos de agua.
Fuente: Hjulstrom, (1935).

La máxima erosión se produce cuando el escurrimiento contiene la suficiente cantidad de material abrasivo que le permite extraer la mayor cantidad de partículas del suelo (Peralta, 1976). Pero también la intensidad de desprendimiento disminuye con el aumento de la carga de sedimentos y cuando se alcanza la carga máxima (Morgan, 1997).

- **Factores que Determinan la Erosión Hídrica**

Los factores son parámetros naturales o artificiales que determinan la magnitud de la perturbación, tal como clima, topografía, suelo, vegetación y manejo (acción antrópica), (FAO, 1997).

- **Clima**

Precipitación, evaporación, temperatura, viento y humedad relativa constituyen los elementos climáticos más importantes (Bennett, 1965). De estos elementos, el que tiene más importancia es la precipitación. Su acción se deja sentir por: la cantidad de agua caída, la época del año en que esta cae, su intensidad y la duración (FAO, 1997).

Por lo tanto la erosividad de una tormenta es función de su intensidad y duración, y de la masa, diámetro y velocidad de las gotas de lluvia (Morgan, 1997).

- **Suelo**

El suelo se representa por su grado de erosionabilidad, es decir la susceptibilidad del suelo a ser erosionado (FAO, 1997). La resistencia de un suelo depende, en parte, de su posición topográfica, pendiente y grado de alteración. La erosionabilidad varía con la textura del suelo, la estabilidad de los agregados, la resistencia al esfuerzo cortante, la capacidad de infiltración y los contenidos minerales y orgánicos (Morgan, 1997).

- **Topografía**

Las características topográficas que ejercen una marcada influencia sobre la erosión son; el grado de inclinación, longitud y forma de la pendiente, y tamaño y forma de la cuenca (FAO, 1997). La erosión aumenta con frecuencia cuando la longitud de la pendiente es mayor (Bennett, 1965). En determinadas condiciones la variación del largo de la pendiente puede causar mayor efecto sobre las pérdidas de suelo que los cambios en su grado de inclinación (Mancilla, 1995). En cuanto a la forma de la pendiente, esta también juega un rol importante, ya que terrenos con gradientes cóncavas o convexas no tienen similar comportamiento, aunque la pendiente promedio sea la misma (Mancilla, 1995).

- **Vegetación**

El manto vegetal influye sobre la proporción del escurrimiento del agua de lluvia y del arrastre del suelo más que cualquier otro factor físico por separado (Bennett, 1965). La vegetación actúa como una capa protectora o amortiguadora entre la atmósfera y el suelo. Los componentes aéreos como hojas y tallos, absorben parte de la energía de las gotas de lluvia y del agua en movimiento. Cuando el suelo se encuentra cubierto con plantas o residuos, la masa vegetal absorbe la energía de las gotas que caen. El agua caída se escurre lentamente hasta la superficie del suelo donde infiltra con rapidez, pues la cobertura impide el taponamiento de los poros (Derpsch, 2004).

- **Acción Antrópica**

Las actividades antropogénicas se manifiestan a través del mal uso de los recursos naturales. Entre las actividades humanas relacionadas con la erosión se incluyen la agricultura, pastoreo, minería, silvicultura, recreación, urbanismo y vialidad, entre otras (FAO, 1997).

3.5 Erosividad, Erosionabilidad, Estimación y Medición de la Erosión Hídrica

- **Erosividad**

Las pérdidas del suelo están estrechamente relacionadas con la lluvia, en parte por el poder de desprendimiento del impacto de las gotas al golpear el suelo y, en parte, por la contribución de la lluvia a la escorrentía superficial (López, et.al., 2002, p.295).

- **Erosionabilidad**

Es la susceptibilidad o facilidad con que un suelo es desprendido y transportado por los fenómenos erosivos (Castillejo, 1999). Mientras que Tavares Salomão (1995) la define como el índice que expresa la capacidad de la lluvia de provocar erosión.

La erosionabilidad de un suelo o de una roca es la inversa de la resistencia a la erosión. Un terreno con erosionabilidad elevada sufrirá más erosión que otro con erosionabilidad baja si ambos están expuestos a las mismas condiciones climatológicas (López, et.al., 2002, p.297).

- **Estimación y Medición de la Erosión Hídrica**

El conocimiento de la tasa de erosión en un sitio es fundamental para decidir el manejo y las medidas de conservación de suelos más adecuadas; por ello, es importante obtener datos confiables acerca del proceso y la velocidad a la que se está perdiendo el suelo (Pando et al, 2003).

La importancia económica y las repercusiones ambientales que tiene la erosión han llevado al desarrollo de muchos modelos para estimar las pérdidas de suelo, especialmente en áreas de cultivo o cuencas hidrográficas. La complejidad de los procesos erosivos, los muchos factores que intervienen y la irregularidad espacial y

temporal, suponen una dificultad para poder hacer predicciones de las pérdidas de suelo que sean fiables.

Los modelos que tratan de estimar las pérdidas de suelo se pueden subdividir en dos (2) grupos. Aquellos que se basan en los procesos físicos que tienen lugar en la erosión, es decir que se basan en ecuaciones matemáticas que tienen en cuenta las leyes de conservación de la masa y la energía, y los modelos empíricos que utilizan una serie de algoritmos matemáticos y de correlaciones con factores erosivos, pero sin que se pueda establecer una relación directa de causa-efecto con las pérdidas de suelo. Conviene recordar que los modelos para predecir la erosión han sido establecidos considerando unos límites para cada variable, por lo que no se debe extrapolar su uso fuera de estos márgenes. Los resultados que proporciona un modelo deben interpretarse correctamente.

Dada la complejidad de los fenómenos naturales que intervienen en la erosión, hay modelos que tienen un enfoque probabilístico, es decir que asocian una probabilidad a cada suceso erosivo. De los modelos existentes se han citado algunos métodos para medir las pérdidas reales de suelo que han producido determinados eventos de lluvia, entre ellos se encuentran: el método de mediciones localizadas (PEC) y los modelos empíricos (RUSLE).

- **Mediciones Localizadas**

Es cuando se puede realizar una medición directa de los cambios en el nivel del suelo, esto ocurre cuando los índices de erosión son elevados y predecible. Para realizar dicha estimación se emplea el método de Parcelas de Erosión con Clavos.

- **Parcelas de Erosión con Clavos (PEC)**

Este es un sistema sencillo y de bajo costo que permite establecer una muestra de un gran número de puntos y obtener una estimación válida (Hudson, 1997). Consiste en introducir en el suelo una varilla medidora de manera que en su parte superior se puedan percibir los cambios en el nivel de la superficie del suelo (Figura 3.8). Las varillas pueden ser de madera, hierro o cualquier otro material que no se deteriore, que

sea fácil de obtener y de bajo costo. La varilla debe tener una extensión que se pueda introducir en el suelo para obtener un dato concreto: 300 mm es una longitud corriente, puede ser menor si se trata de un suelo poco profundo o mayor si se trata de un suelo suelto. Es preferible que tenga un diámetro de unos 5 mm o menos, ya que un espesor mayor puede interferir con la corriente de superficie y provocar su desgaste (Hudson, 1997).

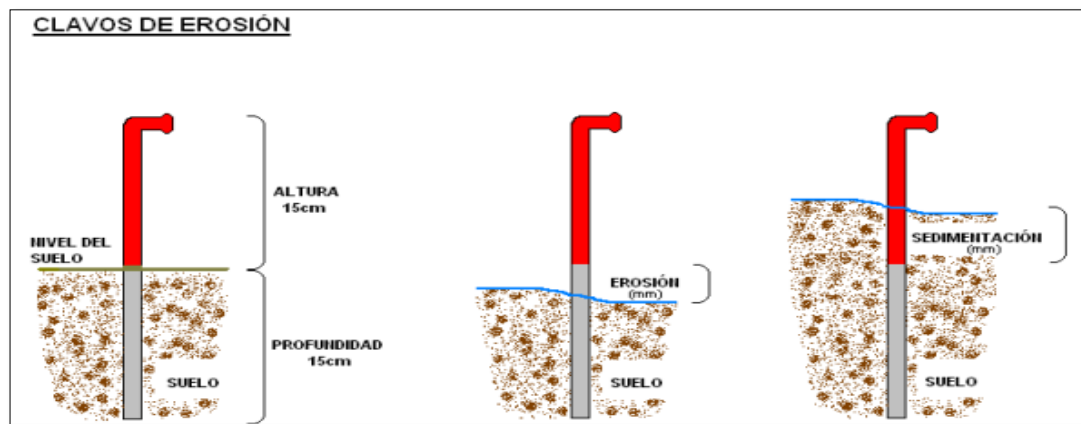


Figura 3. 8 Esquema de las varillas en el suelo, representando los procesos de erosión y sedimentación. Fuente: Hudson, (1.997).



Figura 3. 9 Varillas utilizadas para mediciones de los procesos de erosión y sedimentación C.V.M. S.A. División-Níquel. Fotografía tomada por José Cova (2016).

Erosión Media y Sedimentación Media

La erosión media se estima al sumar los incrementos en altura, medidos entre el tiempo i y el tiempo $i+1$, de todos los clavos de la parcela que denotaron la presencia de procesos erosivos, dividida esta sumatoria por el total de clavos presentes en la parcela. Esto define una altura de erosión promedio que normalmente se expresa en milímetros. Si este valor se transforma a metros y se multiplica por los 10.000 m^2 que posee una hectárea, se tendrá una estimación de la erosión en m^3/ha . Asimismo, si este valor se multiplica por la densidad aparente del suelo, se tiene la expresión de la erosión en toneladas por hectárea de superficie.

Del mismo modo, es posible calcular la sedimentación producida en la parcela, pero considerando como sumatoria el valor decremental de la altura del clavo, lo que significa que se han verificado procesos de sedimentación. Así también, la sumatoria de los milímetros de los clavos que mostraron sedimentación, es dividida por el total de clavos de la parcela. Para llevar la expresión a m^3/ha o ton/ha , se procede de igual forma a como se hizo con la erosión.

La expresión matemática que determina estos procesos, planteada por Cuitiño (1999) y posteriormente redefinida por Pizarro y Cuitiño (2002), se presenta a continuación:

$$X = Y * D_a * 10 \quad (1)$$

Donde:

X = Suelo erosionado o sedimentado (ton/ha).

Y = Altura media de suelo erosionado o sedimentado (mm).

D_a = Densidad aparente del suelo (ton/m^3).

Erosión Neta

Se denomina como erosión neta (En) a la diferencia entre la erosión y la sedimentación ocurrida en una ladera, expresada en metros cúbicos por hectárea o toneladas por hectárea (Cuitiño, 1999). Se expresa como:

$$En = E - S \quad (2)$$

Donde:

En = Erosión neta (ton/ha).

E = Erosión media de la parcela (ton/ha).

S = Sedimentación media de la parcela (ton/ha).

Suelo Movilizado

Se habla de suelo movilizado al cuantificar tanto la erosión media como la sedimentación ocurrida. La expresión matemática permite describir la totalidad de suelo que se movilizó en el terreno, en toneladas por hectárea (Cuitiño, 1999). Su expresión matemática es:

$$Sm = E + S \quad (3)$$

Donde:

Sm = Suelo movilizado (ton/ha).

E = Erosión media (ton/ha).

S = Sedimentación media (ton/ha).

Basándose en el principio de medición de las parcelas con clavos de erosión, Hudson (1997) sugiere otros métodos factibles de aplicar como el pintar líneas por encima del nivel del suelo alrededor de rocas, de raíces de árboles o de cualquier otro elemento firme y estable. La erosión revelará una banda no pintada por debajo de la línea marcada, indicando pérdida de suelo. Asimismo, la instalación de cuellos de botella o evidenciar montículos de material en torno a árboles o a sus raíces, luego del paso de escorrentías, son otras iniciativas que permiten identificar impactos ambientales, pero no son tan precisas en las estimaciones.

- **Modelos Empíricos**

Es el que se basa en la observación o el experimento y no deriva de la teoría. Se ajusta a los hechos observados y permite predecir lo que sucederá en ciertas circunstancias, porque ya se sabe lo que ha sucedido antes en esas mismas condiciones. En esta investigación se aplica la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisada (RUSLE).

- **Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Revisada (RUSLE)**

A finales de los años cuarenta se empezaron a estudiar una serie de modelos de erosión encaminados a predecir, estimar y cuantificar las pérdidas de suelo, debidas a la erosión superficial, que se produce en una zona determinada. Como fruto de estas investigaciones, es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo de Wischmeier y Smith, (1958). Su representación es la siguiente:

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (4)$$

Dónde:

A: Pérdida media anual de suelo (t / ha/ año).

R: Factor de lluvia.

K: Factor de erosionabilidad del suelo.

L: Factor de longitud del declive del talud.

S: Factor de pendiente del talud.

C: Factor de cubierta vegetal y uso del suelo.

P: Factor de control de la erosión.

El modelo USLE fue desarrollado inicialmente como una herramienta para asistir a los conservacionistas en la planificación del uso agrícola de las tierras. Sin embargo las investigaciones realizadas y experiencias colectadas desde los años 70 han provisto de amplia información adicional y mejor tecnología, aportando a la actualización de la base de datos, el análisis de la información adicional y de los principios fundamentales que describen los procesos hidrológicos y de la erosión (FAO, 1997). La necesaria actualización que requería la incorporación de nuevos procesos, datos y de mejorar algunos puntos de discusión, llevó a la elaboración de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Revisada (RUSLE), diseñada para predecir la erosión del suelo en pendientes, como guía para la planificación de la conservación a nivel de predios. Además, puede usarse para estimar la liberación de sedimentos de cuencas (FAO, 1994). RUSLE no determina si la pérdida de suelo es excesiva en un sitio, o si los sistemas de control de erosión han fallado. El usuario de RUSLE toma tales decisiones basado en numerosos criterios de pérdida de suelo y estimaciones de liberación de sedimento (Dissmeyer y Foster, 1980).

Factor Erosividad de la Lluvia (R)

Depende de la intensidad de la lluvia y de la cantidad de agua caída en cada episodio de precipitación a lo largo de años. Se calcula como la suma de los productos de la energía cinética de cada episodio de lluvia por su intensidad máxima, considerando intervalos de 30 minutos.

$$R = \sum E I_{30} \quad (5)$$

Dónde:

E = Energía cinética de la lluvia

I_{30} = Intensidad máxima en 30 minutos de cada episodio (mm h^{-1})

Para su cálculo, se necesita disponer de información de estaciones pluviométricas que hayan registrado de forma detallada la cantidad de agua de lluvia en función del tiempo durante unos 10 años. Este factor se basa en que las lluvias de mayor intensidad contienen una proporción mayor de gotas de tamaño grande, por lo que la energía cinética con que impactan sobre la superficie del suelo es también mayor. Existen diversas ecuaciones que relacionan la intensidad de la lluvia con la energía cinética equivalente, por ejemplo la que fue propuesta por Wischmeier & Smith,

$$E_c = (0,119 + 0,0873 \log_{10} I) I_{30} \quad (6)$$

Dónde:

E: Energía cinética ($\text{Mj.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$).

I: Intensidad (mm/h).

I_{30} : Intensidad máxima en 30 minutos.

Como se ha mencionado, el factor de lluvia R, se define como el producto de dos características de la lluvia: la energía cinética E y la intensidad máxima durante 30 minutos I. El valor de R puede estimarse para un chubasco mediante la ecuación:

$$R = \frac{[\sum(1,213+0,89*\log_{10}*I_j)*(I_j*T_j)]* I_{30}}{173,6} \quad (7)$$

Dónde:

I_j : Intensidad de precipitación para un incremento de intensidad (mm/h).

T_j : Período del incremento del chubasco (h).

I_{30} : Intensidad máxima de precipitación en 30 minutos.

j : Incremento del chubasco.

n : Número de incrementos del chubasco.

Si se calcula R como producto de las dos variables citadas, los valores de E pueden estimarse con una tabla donde están tabulados los valores, conociendo la intensidad de precipitación en una hora.

Es importante resaltar que la erosión es un fenómeno muy irregular que se origina de forma mayoritaria durante intervalos de tiempo relativamente cortos de precipitación muy intensa. Por lo tanto, las intensidades medias de precipitación diaria no sirven para estimar la agresividad de la lluvia. Sin embargo Páez *et al.*, (1989), establecieron ecuaciones de regresión para determinar la erosividad de las lluvias mensualmente en varias localidades del país, en función de la lámina promedio mensual (L (mm)):

San Felipe, Edo. Yaracuy: $R = -345,9 + 10,1 L$.

Guanare, Edo. Portuguesa: $R = -258,2 + 9,38 L$.

La Asunción, Edo. Nueva Esparta: $R = -251,7 + 10,0 L$.

Maturín, Edo. Monagas: $R = -249,3 + 8,2 L$.

Aragua de Barcelona, Edo. Anzoátegui: $R = -118 + 8,0 L$.

Valencia, Edo. Carabobo: $R = -70,6 + 7,6 L$.

Valle de la Pascua, Edo. Guárico: $R = -276,9 + 10,4 L$.

Yaritagua, Edo. Yaracuy: $R = -82,7 + 6,5 L$.

La Paragua, Edo. Bolívar: $R = 237,9 + 8,7 L$

“Bosque seco tropical”: $R = -190,5 + 8,8 L$.

Factor Erosionabilidad (K)

Expresa el conjunto de factores intrínsecos de cada suelo que influyen sobre la erosión, es decir, indica la vulnerabilidad específica de cada tipo de suelo. Representa la pérdida anual de suelo por unidad de factor R. Cuando la USLE se emplea para estimar las pérdidas potenciales de suelo en función de distintos manejos o prácticas de conservación, se suele determinar el factor K mediante figuras que dan un valor aproximado en función del contenido de limo y arena muy fina, porcentaje de arena gruesa y contenido de materia orgánica del suelo. El siguiente ábaco es para la determinación gráfica del índice de erosionabilidad K:

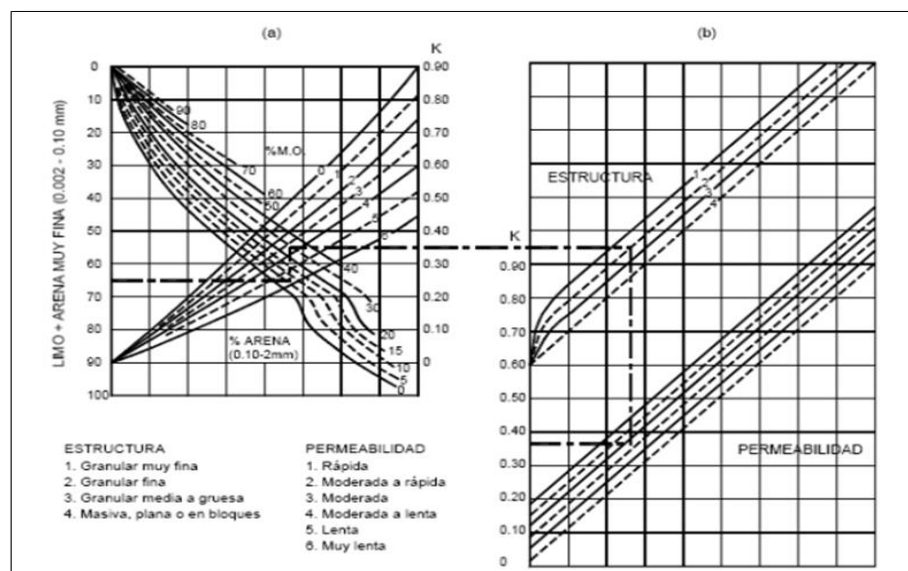


Figura 3. 10 Determinación gráfica del índice de erosionabilidad K.

Fuente: Suárez, (2001).

El método más completo para estimar K es el Nomograma de Wischmeier y Smith, (1978), el cual requiere datos sobre porcentaje de limo, porcentaje de arena muy fina, porcentaje de arena, porcentaje de contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad. En el caso de no contar con información tan detallada se pueden usar valores tabulados por Kirkby y Morgan, (1980), en el cual se utilizan valores obtenidos asociando la textura del suelo y contenido de materia orgánica. Estos valores tabulados pueden observarse en la Tabla 3.8.

Tabla 3. 8 Valores de K asociados a la textura y al contenido de materia orgánica.

Textura del suelo	% de materia orgánica		
	< 0,5%	2%	>4%
Arcilla	0,017	0,038	-----
Arcilla arenosa	0,018	0,017	0,016
Arcilla limosa	0,033	0,030	0,025
Arena	0,007	0,004	0,003
Arena fina	0,0021	0,018	0,013
Arena fina franca	0,032	0,026	0,021
Arena franca	0,016	0,013	0,011
Arena muy fina	0,055	0,047	0,037
Arena muy fina franca	0,058	0,050	0,040
Franco (grada)	0,050	0,045	0,038
Franco arcillolimoso	0,049	0,042	0,034
Franco arcilloso	0,037	0,033	0,028
Franco arenoarcilloso	0,036	0,033	0,028
Franco arenoso	0,036	0,032	0,025
Franco arenoso fino	0,046	0,040	0,032
Franco arenoso fino	0,062	0,054	0,043
Limo	0,079	0,068	0,055
Limo franco	0,063	0,055	0,043

Fuente: Kirkby y Morgan, (1980).

Factores Topográficos (S, L)

Expresan las pérdidas de suelo en función de la inclinación de la ladera y del recorrido máximo del agua de escorrentía a lo largo de una vertiente, siguiendo la línea de máxima pendiente. El factor L viene definido por el número de unidades de longitud de la parcela USLE estándar:

$$L = \left(\frac{l}{22,13} \right)^m \quad (8)$$

Dónde:

L = Valor del factor

l = Longitud de la ladera considerada en m

m = Exponente que depende del tipo de pendiente:

m = 0,6 para pendientes > 10%

m = 0,5 para pendientes 10-3%

m = 0,3 para pendientes <3 y de mucha longitud

El factor S depende de la pendiente de la ladera, talud o parcela:

$$S = \frac{0,43+0,30s+0,043s^2}{6,613} \quad (9)$$

Dónde:

S = pendiente en %

Muchas veces, se calculan de forma combinada los factores LS y se emplean nomogramas para su determinación gráfica aproximada. No se consideran la rugosidad ni la forma de la pendiente, por lo que en laderas irregulares puede dar resultados alejados de los reales.

Tabla 3. 9 Valores del Factor topográfico (LS) para distintos grados y longitudes de pendiente.

%	Longitud de la pendiente (m)									
	15	25	50	75	100	150	200	250	300	350
0,5	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15
1	0,10	0,12	0,15	0,17	0,18	0,21	0,23	0,24	0,25	0,25
2	0,16	0,19	0,23	0,26	0,29	0,32	0,35	0,37	0,40	0,40
3	0,23	0,27	0,33	0,37	0,41	0,45	0,50	0,54	0,57	0,60
4	0,30	0,37	0,48	0,57	0,64	0,75	0,84	0,92	0,99	1,00
5	0,37	0,48	0,68	0,84	0,96	1,18	1,36	1,52	1,67	1,80
6	0,47	0,60	0,86	1,05	1,21	1,48	1,71	1,91	2,10	2,20
8	0,69	0,89	1,26	1,55	1,79	2,19	2,53	2,83	3,10	3,30
10	0,96	1,24	1,75	2,15	2,48	3,04	3,50	3,92	4,29	4,60

Fuente: Wischmeier y Smith, (1977).

Factor Cubierta del Suelo (C)

El factor C de cobertura vegetal y uso del suelo incluye los efectos interrelacionados del tipo de cubierta vegetal, la secuencia de la misma en el caso de cultivos, la distribución de la precipitación, etc. En los terrenos recuperados en minería, cuando los suelos son depositados sobre los estériles, no existe inicialmente ninguna protección vegetal y el factor C=1. Sin embargo, con la aplicación de un mulch se puede reducir inmediatamente su valor hasta niveles aceptables. Los valores de C obtenidos con el mulch se encuentran tabulados en un gráfico y una tabla que muestra los diferentes tipos de cubierta existentes.

Tabla 3. 10 Valores de C para cobertura vegetal.

Tipo y altura de la cobertura	Porcentaje de cubrimiento de suelo					
	Coeficiente C					
	0 %	20 %	40 %	60 %	80 %	95 – 100 %
Cobertura de pastos bajos	0.45	0.20	0.10	0.042	0.013	0.003
Cobertura de pastos y hierbas (0,5m)	0.36	0.17	0.09	0.038	0.012	0.003
Arbustos (2m)	0.40	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
Arboles (4m)	0.42	0.19	0.10	0.041	0.013	0.003

Fuente: Suárez, (2001).

Tabla 3. 11 Valores de C para bosques.

% de área cubierta	Tipo de ordenación	
	Coeficiente C	
	Sin pastoreo	Con pastoreo
100 - 75	0.001	0.003 – 0.0011
75 - 40	0.002 – 0.003	0.01 – 0.03
40 - 20	0.003 – 0.009	0.03 – 0.09

Fuente: Suárez, (2001).

Factor Prácticas de Protección del Suelo (P)

Representa la reducción de las pérdidas de suelo cuando se emplean técnicas de conservación, en comparación con las que ocurrirían si no se aplicaran. Permite evaluar la eficacia de diversas técnicas de conservación de suelos en la reducción de la erosión y ser utilizado como instrumento de gestión, tales como el establecimiento de terrazas o bermas, diques o canales para la desviación de las aguas, entre otros. Este factor toma el valor 1 en la peor de las situaciones, es decir si tales obras no se realizan, y su valor disminuye cuanto más eficiente sea la medida tomada. La siguiente tabla recoge los valores de este factor en función de la pendiente de los taludes cuando se dispone de terrazas o diques de desvío.

Tabla 3. 12 Valores del factor P en función de la pendiente.

Pendiente de talud %	Valor de P
1 - 2	0,12
3 – 8	0,10
9 – 12	0,12
13 – 16	0,14
17 – 20	0,16
21 – 25	0,18

Fuente. Rodríguez y Ayala, (1990).

3.6 Criterios Hidrológicos (Caudal de la Cuenca Hidrográfica)

Un sistema de drenaje debe ser capaz de funcionar satisfactoriamente todo el año, particularmente durante lluvias intensas. Se debe conocer cuál es el índice pluviométrico a utilizarse en el dimensionamiento, los climatólogos y los hidrólogos

desarrollaron métodos de cálculo de las máximas lluvias probables para diversos intervalos de tiempo, denominados períodos de retorno o períodos de recurrencia.

Las lluvias se distribuyen desigualmente en el espacio y en el tiempo. Las lluvias también varían significativamente en el curso del tiempo. De un año a otro la variación puede ser grande. Sin embargo, lo que más preocupa son las lluvias intensas y concentradas en un corto período y son evidentemente estos valores máximos que deben ser empleados como criterio de proyecto. En climas tropicales es común medirse lluvias concentradas, la cantidad de lluvia por unidad de tiempo (mm/h) es llamada intensidad pluviométrica y es el parámetro empleado en el dimensionamiento.

Existen otros factores que influyen en el dimensionamiento de un sistema de drenaje. La relación entre la cantidad de agua que se escurre superficialmente y la cantidad de lluvia es llamada coeficiente de escorrentía (C) (Tabla 3.13) y naturalmente depende de las condiciones de la superficie, tales como el material, la cobertura vegetal y la inclinación de las laderas.

Para el dimensionamiento del sistema es necesario conocer el caudal afluente, particularmente en el caso de las cuencas de decantación. Ese caudal puede ser calculado a través de la fórmula racional, multiplicándose el total de agua precipitada en la cuenca de drenaje por el coeficiente de descarga; la cantidad de agua precipitada, a su vez, puede ser asumida como el producto de la intensidad pluviométrica (milímetros de lluvia por unidad de tiempo) por el área de drenaje. De esta forma, la expresión de la fórmula racional será:

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{3,6} \quad (10)$$

Dónde:

Q: Caudal (m³/s)

C: Coeficiente de escorrentía (no dimensional)

i: Intensidad de precipitación pluviométrica (mm/h)

A: Área de la cuenca de drenaje (km²)

El caudal obtenido dependerá del tipo de precipitación adoptada. Es necesario recordar, que presentan interés en el dimensionamiento de sistemas de drenaje los caudales pico o más altos. El período de retorno deberá adoptarse en función del tipo de obra.

La fórmula racional está basada en algunas hipótesis:

- ❖ El escurrimiento resultante de cualquier intensidad de lluvia es un máximo cuando esa intensidad de lluvia persiste, al menos, tanto como el tiempo de concentración.
- ❖ El escurrimiento resultante de una intensidad de lluvia, con duración igual o mayor que el tiempo de concentración, es una fracción de la precipitación.
- ❖ La frecuencia de la máxima descarga es la misma que la de la intensidad de lluvia para el tiempo de concentración dado.
- ❖ La relación entre máxima descarga y tamaño del área de drenaje es la misma que la relación entre duración e intensidad de precipitación.
- ❖ El coeficiente de escorrentía es el mismo para lluvias de diversas frecuencias.
- ❖ El coeficiente de escorrentía es el mismo para todas las lluvias de una cuenca dada.

El método es confiable para cuencas menores de 500 hectáreas. Una de las hipótesis básicas de la fórmula racional es la de suponer que la lluvia será de suficiente duración, para permitir la llegada del agua que cae sobre toda la superficie de la cuenca a la boca de la estructura de drenaje. Este tiempo se ha denominado tiempo de concentración. Numerosas fórmulas empíricas se han establecido para la determinación del tiempo de concentración, entre ellas se tiene la siguiente:

$$T_c = 0,0195 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385} \quad (11)$$

Tabla 3. 13 Coeficiente de escorrentía.

Coeficiente de escorrentía (C)						
Cobertura vegetal	Tipo de suelo	Pendiente del terreno				
		Pronunciada	Alta	Media	Suave	Despreciable
		50%	20%	5%	1%	
Sin Vegetación	Impermeable	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60
	Semipermeable	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
	Permeable	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
Cultivos	Impermeable	0,70	0,65	0,60	0,55	0,55
	Semipermeable	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40
	Permeable	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20
Pasto: Vegetación ligera	Impermeable	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45
	Semipermeable	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35
	Permeable	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15
Hierba, Grama	Impermeable	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40
	Semipermeable	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
	Permeable	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10
Bosque: Densa Vegetación	Impermeable	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35
	Semipermeable	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25
	Permeable	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05

Fuente: Jacob Carciente, (1977).

- **Intensidad de Precipitación**

Según Chow *et al* (1994), se define como la tasa temporal de precipitación, o sea, la profundidad por unidad de tiempo (mm/hr) y ésta se expresa como:

$$I = \frac{P}{Td} \quad (12)$$

Dónde:

P: Profundidad de lluvia (mm o pul).

Td: Duración del evento (hr).

Es importante, señalar que cuando solo se dispone de un pluviómetro, en una estación, es evidente que, en general, sólo se podrá conocer la intensidad media en 24

horas. Como se comprenderá, esta información puede inducir a grandes errores por defecto, por cuanto las lluvias de corta duración son, en general, las más intensas.

Es natural entonces que las determinaciones de intensidades de lluvias se hagan a partir de los registros proporcionados por los pluviógrafos (Aros, 1997).

- **Período de Retorno**

El periodo de retorno se define como el intervalo de recurrencia (T), al lapso promedio en años entre la ocurrencia de un evento igual o mayor a una magnitud dada. Este periodo se considera como el inverso de la probabilidad, del m-ésimo evento de los n registros.

El valor del periodo de retorno se determina en función de la posición de la variable aleatoria ($P_{m\acute{a}x}$ o $Q_{m\acute{a}x}$ en su caso) en una tabla de valores, ordenados de mayor a menor. Con base en las siguientes relaciones:

$$T = \frac{n+1}{m} \quad y \quad P = \frac{m}{n+1} \quad (13) \quad (14)$$

Dónde:

T = Período de retorno (años).

n = Número de años de registro.

m = Número de orden.

P = Probabilidad.

Tabla 3. 14 Ejemplo de cálculo de Períodos de Retorno para eventos máximos anuales de lluvia.

Fecha	Lluvia (mm)	Lluvia ordenado (mm)	Número de orden (m)	Período de retorno T (años)	Probabilidad P (%)
1992	51.0	80	1	17	5.88
1993	40.0	54	2	8.5	11.76
1994	29.0	51	3	5.7	17.65
1995	40.0	50	4	4.3	23.53
1996	40.0	50	5	3.4	29.41
1997	50.0	45	6	2.8	35.29
1998	54.0	44.5	7	2.4	41.18
1999	40.0	40	8	2.1	47.06
2000	40.0	40	9	1.9	52.94
2001	40.0	40	10	1.7	58.82
2002	44.5	40	11	1.5	64.71
2003	50.0	40	12	1.4	70.59
2004	45.0	40	13	1.3	76.47
2005	33.0	35	14	1.2	82.35
2006	80.0	33	15	1.1	88.24
2007	35.0	29	16	1.1	94.12

Fuente: Hidrología aplicada a las pequeñas obras hidráulicas.

De esta manera, conociéndose el caudal máximo a drenar por los canales (obteniéndose a partir de la fórmula racional), la fórmula de Manning permite el cálculo de la sección transversal del canal y la determinación de la necesidad o no de revestimiento. Entre algunos tipos de revestimiento tenemos: mezcla con piedra común, cemento (hormigón) y tuberías. Teniéndose en mente la recuperación del área degradada y su uso futuro, los canales sin revestimiento son mejores, pues representan una menor interferencia paisajística, dependiendo del uso futuro previsto y del lugar de la mina en que éstas serán instaladas.

- **Curvas IDF**

Las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) son curvas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno (Témez, 1978). Es decir se trata de una representación gráfica de cómo de intensa es una precipitación en función de cuánto dura el episodio de lluvias y con qué probabilidad puede excederse ese episodio de lluvias.

3.7 Sistemas de Drenaje y Tipos de Estructuras

El objetivo del drenaje superficial es mejorar la estabilidad del talud reduciendo la infiltración y evitando la erosión. El sistema de recolección de aguas superficiales debe captar las aguas de escorrentía, tanto del talud, como de la cuenca de drenaje arriba del talud y llevar el agua a un sitio adecuado, lejos de las estructuras susceptibles al deslizamiento.

Para Villón Béjar (2006), el drenaje tiene como finalidad la remoción del exceso de agua sobre la superficie del terreno a causa de lluvias muy intensas y frecuentes; consiste en una serie de canales poco profundos que recogen las correntía superficial y la descargan a drenes colectores.

De tal manera Sánchez, (1995), menciona que un sistema de drenaje tiene por objetivo proporcionar la recolección, transporte y lanzamiento final de aguas de escurrimiento superficial de modo que la integridad de los terrenos y las características de los cuerpos de agua receptores sean preservadas. De esta forma, el drenaje tiene por objeto el control de la erosión, la minimización de la colmatación y la manutención de la calidad física y química de los cuerpos receptores.

- **Tipos de Estructuras de Drenaje**

Las estructuras de drenaje van en función de la magnitud del caudal, régimen de fluido (crítico, sub-crítico o súper crítico), pendiente del talud y sedimentos. Pueden ser longitudinales o transversales.

- **Longitudinales**

Son las cunetas y canales; la principal diferencia entre ambas es la capacidad y la sección, las cunetas son de sección triangular y menor capacidad y los canales son de sección rectangular o trapezoidal y de mayor capacidad.

- **Transversales**

Entre estas tenemos las alcantarillas, torrenteras, caídas, bateas, drenaje francés, pontones, puentes y enrocados.

○ **Canales o Zanjas de Coronación**

Las zanjas en la corona o en la parte alta de un talud son utilizadas para interceptar y conducir adecuadamente las aguas de lluvia evitando su paso por el talud. La zanja de coronación no debe construirse muy cerca del borde superior del talud, para evitar que se conviertan en el comienzo y guía de un deslizamiento en cortes recientes o de una nueva superficie de falla (movimiento regresivo) en deslizamientos ya producidos; o que se produzca una falla en la corona del talud o escarpe.

El control y canalización de las aguas de escorrentía en las operaciones mineras es un problema resuelto, particularmente, mediante diques y canales excavados. Algunas de las funciones de estas obras son:

- ❖ Evitar el paso de las aguas a áreas fuertemente erosionables, o en operación y conducir las de forma adecuada.
- ❖ Reducir la longitud de los taludes para complementar la resistencia a la erosión aportada por la vegetación.
- ❖ Impedir las acumulaciones de agua en superficies irregulares y/o cóncavas.
- ❖ Eliminar la llegada de las aguas a zonas con edificaciones o instalaciones mineras.
- ❖ Proteger las tierras bajas frente a la depositación de sedimentos.

Previo al estudio hidráulico de estas obras, es preciso establecer su naturaleza, es decir los materiales de las paredes y techo, así como su sección o forma geométrica en sentido perpendicular al flujo.

En cuanto a su naturaleza, los canales pueden ser construidos sobre los propios estériles, en tierra, encespedados, en piedra, hormigón, entre otros. El canal debe ser económico en su construcción y requerir poco mantenimiento, además de ser estéticamente agradable. En función de las características de estos materiales, uno de los primeros pasos a seguir consiste en estimar el volumen de agua y la velocidad máxima de circulación que garantiza por un lado, la inexistencia de problemas de

erosión y por otro, evita la depositación de sedimentos que llegará a ella en un determinado instante. Dicho volumen de agua se llama Descarga de Diseño y la velocidad mínima aconsejable es de 0,25 m/s y las máximas admisibles se indican en la Tabla 3.15.

Si la pendiente de los canales da lugar a velocidades de circulación mayores que las admitidas, se recomienda el revestimiento vegetal de dichas obras con el fin de que ésta actúe como retardador. Además del criterio hidráulico, en la elección de las especies vegetales intervendrán otros criterios de tipo ecológico, climático y edáfico de la zona.

Tabla 3. 15 Velocidad máxima admisible para canales no revestidos.

Material de la caja del canal	"n" Manning	Velocidad máxima (m/s)		
		Agua limpia	Agua con partículas coloidales	Agua transportando arena, grava o fragmentos
Arena fina coloidal	0,020	1,45	0,75	0,45
Franco arenoso no coloidal	0,020	0,53	0,75	0,60
Franco limoso no coloidal	0,020	0,60	0,90	0,60
Limos aluviales no coloidales	0,020	0,60	1,05	0,60
Franco consistente normal	0,020	0,75	1,05	0,68
Ceniza volcánica	0,020	0,75	1,05	0,60
Arcilla consistente muy coloidal	0,025	1,13	1,50	0,90
Limo aluvial coloidal	0,025	1,13	1,50	0,90
Pizarra y capas duras	0,025	1,80	1,80	1,50
Grava fina	0,020	0,75	1,50	1,13
Suelo franco clasificado no coloidal	0,030	1,13	1,50	0,90
Suelo franco clasificado coloidal	0,030	1,20	1,65	1,50
Grava gruesa no coloidal	0,025	1,20	1,80	1,95
Gravas y guijarros	0,035	1,80	1,80	1,50

Fuente: Krochin Sviatoslav, (1978).

Las pendientes de los canales colectores, en casi todas las ocasiones, vendrán condicionadas por la propia topografía de la zona restaurada. La Tabla 3.16 muestra las pautas recomendadas a seguir para terrazas de desagüe.

Tabla 3. 16 Pautas recomendadas para terrazas de desagüe.

Longitud de terraza (m)	Pendiente máxima (%)
30 o menos	2
31 a 60	1,2
61 a 150	0,5
151 a 365	0,35
366 o más	0,3

Fuente: Rodríguez y Ayala, (1990).

Las pendientes mínimas para canales de desagüe general serán las siguientes:

- ❖ Canales revestidos: 0,2 % \approx 0,002 ‰
- ❖ Canales sin revestir: 0,5 % \approx 0,005 ‰
- ❖ Siempre que se pueda, se procurará llegar al 1 % \approx 0,01 ‰ de pendiente.

En lo referente a los tipos de sección transversal la elección dependerá del caudal, la velocidad máxima de circulación de agua para que los sedimentos no se depositen en ellas, e indirectamente de la maquinaria minera disponible para la construcción de los mismos. Las secciones más empleadas son:

- Rectangulares.
- Triangulares.
- Trapezoidales.
- Parabólicas.

El caudal proporcionado por un canal es dado por la siguiente expresión:

$$Q = V * A \quad (15)$$

Dónde:

Q: Caudal (m³/s).

V: Velocidad del agua (m/s).

A: área de la sección mojada (m²).

La velocidad del agua es dada por la fórmula de Manning:

$$V = \frac{1,49}{n} * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

Dónde:

V: Velocidad del agua (m/s).

n: Coeficiente de rugosidad del canal (no dimensional).

R: Radio hidráulico (m). (Área de la sección transversal / perímetro mojado).

S: Gradiente de la sección longitudinal del canal (% ó ‰).

Existen cuadros que contienen los valores tabulados de los coeficientes de rugosidad y de valores máximos de velocidad del flujo que deben ser considerados para evitar la erosión de los canales que no poseen revestimiento, como se muestran en las Tablas 3.15, y otro como Sánchez (Tabla 3.17) que solo muestran los valores de velocidad máxima.

Tabla 3. 17 Valores máximos de velocidad de flujo para evitar erosión.

Tipo de fondo	Velocidad máxima (m/s)	Inclinación (%)
Arcillo – arenoso	0,75	0,5
Arcillo – limoso	0,90	1,0
Arcilloso	1,20	2,0
Mezcla de arcilla y pedrisco	1,50	2,5
Roca	2,40	4,0

Fuente: Sánchez, (1995).

La pendiente o gradiente longitudinal del fondo de los canales de tierra se determina atendiendo las condiciones topográficas:

- ❖ En las zonas muy llanas, la pendiente de fondo puede ser nula (canal horizontal) o al máximo presentar un valor mínimo de 0,05 por cien, es decir de 5 cm por 100 m.
- ❖ En las zonas más inclinadas, la pendiente de fondo no debería pasar del 0,1 – 0,2 por cien (entre 10 y 20 cm por 100 m) para evitar que el agua corra demasiado deprisa por el canal y lo desgaste.

El radio hidráulico de un canal o dique es la relación existente entre el área mojada y el perímetro mojado. El perímetro mojado es el perímetro de la sección transversal del canal que estará en contacto con el agua en el caso de flujo máximo.

El número de Manning, según el tipo de revestimiento se indica en la siguiente tabla:

Tabla 3. 18 Valores básicos del coeficiente de Manning en canales no recubiertos.

Coefficiente de rugosidad en canales no recubiertos	n
CANALES EXCAVADOS	
En tierra, secciones uniforme:	
Limpios, sin vegetación	0,022
Hierba corta, algunas malezas	0,027
En tierra, sección aproximadamente uniforme:	
Sin vegetación	0.025
Hierba corta, algunas malezas	0,030
Plantas acuáticas, enea, etc.	0,035
Fondo de cantos rodados y taludes sin vegetación	0,040
DRAGADOS	
Sin vegetación	0,028
Vegetación ligera en los taludes	0,050
SIN MANTENIMIENTO	
Gran cantidad de malezas	0,080
Gran cantidad de malezas, arbustos y vegetación en los márgenes	0,100
EN ROCAS	
Sección uniforme y lisa	0,035
Sección irregular y escabrosa	0,040

Fuente: Jacob Carciente, (1977).

Tabla 3. 19 Valores básicos del coeficiente de Manning en canales recubiertos.

Coeficiente de rugosidad en canales recubiertos	n
CANALES RECUBIERTOS	
De hierba, sin podar:	
Gramma, bermuda o similar	0,07
Hierbas 0,30 m altura	0,11
Hierbas muy altas	0,14
De concretos, según los diferentes acabados:	
Acabado liso	0,013
Acabado con cepillo	0,015
Acabado con cepillo con algo de grava en el fondo	0,017
Acabado rústico	0,017
“Gunite” sección bien acabada	0,019
“Gunite” sección ondulada	0,022
De asfalto:	
Liso	0,013
Rugoso	0,016
Fondo de grava y lados según se especifican:	
De concreto	0,020
Zampeado	0,023
Gaviones	0,033

Fuente: Jacob Carciente, (1977).

Independientemente de que debe efectuarse un cálculo hidráulico riguroso, algunos criterios generales que pueden seguirse en la construcción de los canales son los siguientes:

- ❖ Su localización debe determinarse considerando las condiciones de descarga, la topografía, los usos del terreno, los tipos de suelos, los taludes y las áreas de drenaje.
- ❖ Según la zona que se pretenda proteger, se utilizarán para el diseño períodos de recurrencia de 10 a 50 años.
- ❖ Los aliviaderos laterales se construirán situándolos al menos 15 cm por encima.

- ❖ Las anchuras de los canales para el diseño máximo serán como mínimo de 1,2 m.
- ❖ Los taludes no serán inferiores de 2H : 1V1
- ❖ Tanto el cordón de material situado aguas abajo como el propio canal se está excavado en el terreno podrá revegetarse 15 días antes de la instalación.
- ❖ Periódicamente se revisarán y si fuese necesario, se retirarán los sedimentos depositados.

3.8 Dimensiones, Ubicación y Tamaño de las Cuencas de Sedimentación

Las cuencas de sedimentación son necesarias aunque un buen sistema de drenaje se haya implementado en la mina. Durante la vida útil de la empresa siempre habrá superficies expuestas a la acción de las aguas y del viento y por ende suministrando material transportado aguas abajo. Una mina puede tener varias cuencas de sedimentación de diversas capacidades. Por ejemplo, se puede disponer de una cuenca al pie de cada escombrera y de pequeñas cuencas distribuidas en puntos convenientes a lo largo de las vías de circulación. Cuando el área de la mina ocupa más de una microcuenca hidrográfica es usualmente necesario disponer de por lo menos una cuenca de sedimentación en cada cuenca hidrográfica.

La función de una cuenca de sedimentación es promover la sedimentación de las partículas sólidas transportadas por las aguas de drenaje antes de verterlas al cuerpo receptor. Las partículas más gruesas decantarán más rápidamente que las partículas finas, de modo que la cuenca puede ser dimensionada en función de la granulometría del material transportado. La velocidad de decantación de una partícula en el agua se estudia por la mecánica de fluidos y puede ser expresada por la ley de Stokes:

$$V_{sed} = \frac{g}{18*\mu} * (S - 1) * D^2 \quad (17)$$

Dónde:

V_{sed} : Velocidad de sedimentación (cm/s)

g : Aceleración de gravedad (981 cm/s²)

μ : Viscosidad de fluido (cm²/s)

S : Densidad de la partícula (2,65 para cuarzo)

D : Diámetro de la partícula, supuesta esférica (cm)

La viscosidad del agua, depende de la temperatura y está tabulada en el siguiente cuadro. Los diámetros adoptados dependerán de la granulometría del material transportado, al igual estos están tabulados de acuerdo a las dimensiones de las principales fajas granulométricas.

Tabla 3. 20 Viscosidad Cinemática del Agua.

Temperatura (°C)	Viscosidad (cm ² /s)
0	0.01792
5	0.01519
10	0.01308
15	0.01141
20	0.01007
25	0.00897
30	0.00804

Fuente: Sánchez, (1995).

Se producirá sedimentación en la cuenca cuando el tiempo de residencia de las partículas fuere suficiente para permitirla. El tiempo de residencia, depende del caudal afluyente y del volumen de la cuenca, es decir:

$$t_r = \frac{vol}{Q} \quad (18)$$

Tabla 3. 21 Intervalos granulométricos.

Granulometría	Diámetro (cm)
Arena gruesa	0.02 a 0.2
Arena fina	0.002 a 0.02
Limo	0.0002 a 0.002
Arcilla	< 0.0002

Fuente: Sánchez, (1.995).

La velocidad de sedimentación, suponiendo que no hay movimiento horizontal de las partículas (aproximación razonable para superficies suficientemente grandes) será el coeficiente entre la profundidad de la cuenca p y el tiempo de residencia t_r :

$$V_{sed} = \frac{p}{t_r} \quad (19)$$

Sustituyendo el tiempo de residencia y llamando A_{sed} al área de la cuenca de decantación:

$$V_{sed} = \frac{p}{t_r} = \frac{p}{vol/Q} = \frac{p}{(A*p)/Q} = \frac{Q}{A} \quad (20)$$

Y por lo tanto:

$$A_{sed} = \frac{Q}{V_{sed}} \quad (21)$$

De manera que, el área de la cuenca de decantación es el cociente del caudal afluente por la velocidad de sedimentación y no dependen de la profundidad de la cuenca.

A través del procedimiento anterior se puede dimensionar una cuenca de sedimentación. Sin embargo, si las partículas fueren muy finas, el tiempo de sedimentación será tan grande que las áreas serán enormes, lo que es no sólo impracticable en términos económicos sino que causaría también un impacto ambiental mayor que el simple lanzamiento de los sedimentos en las vías hídricas. Para estos casos se hace necesario promover la precipitación de las partículas con ayuda de un agregante, el cual es un compuesto químico que tiene la función de promover la agregación de partículas finas.

Los agregantes pueden ser de distintos tipos, como los coagulantes, los floculantes y los aglomerantes. Los coagulantes son electrolitos como el sulfato de aluminio, el sulfato de cobre y la cal hidratada. Los floculantes son polímeros de cadenas largas que también atraen eléctricamente las partículas y sedimentan. Los coagulantes son sustancias formadas por cadenas hidrocarbonadas (grasas).

Algunas recomendaciones de orden práctico deben ser seguidas para una sedimentación eficiente:

- ❖ Se necesita conocer las características del material a remover: contenido de arenas y arcillas, porcentaje de cada componente del material.
- ❖ Temperatura del ambiente en el cual se trabaja, para determinar la viscosidad cinética.
- ❖ Topografía de la zona donde se realizará la obra y el régimen hidráulico.
- ❖ Se debe evitar que se produzca alta velocidad del afluente, que puede volver a colocar en suspensión partículas ya sedimentadas; en este caso, es necesaria la instalación de disipadores de energía en la alimentación de la cuenca.
- ❖ Tiempo máximo de residencia de las aguas en la laguna, para ello se necesita conocer las características de los materiales, con la finalidad de determinar la velocidad de decantación.
- ❖ Tiempo de residencia, de las aguas no debe ser menor de 24 horas.

- ❖ Caudal de material: agua y sedimentos, que van a ingresar en la laguna diariamente, semanalmente o mensualmente, para diseñar una laguna o secuencia de lagunas.
- ❖ Factor de seguridad, debe ser al menos de 1,5.
- ❖ Diseño que permita albergar los sedimentos que se produzcan en al menos tres años, con el caudal calculado anteriormente.

- **Ubicación y Tamaño de las Cuencas de Sedimentación**

Las cuencas o balsas de sedimentación son las últimas estructuras que se disponen en la cadena de la erosión. Sus funciones son: retener las aguas durante un período de tiempo suficiente que permita clarificarlas al decantarse los sólidos que arrastran en suspensión y posibilitar el almacenamiento de esos materiales hasta que se realice la limpieza de dichas estructuras.

Las balsas que más se utilizan son de dos tipos: las excavadas en el propio terreno, con o sin revestimiento y las construidas como pequeñas presas de tierra.

La ubicación de estas estructuras suele elegirse aguas abajo y en las proximidades del área donde se realizan las actividades extractivas o el vertido de los estériles. Se debe procurar que la interferencia con esos trabajos sea mínima y que exista un buen acceso a las balsas para realizarlas labores de mantenimiento y limpieza.

En cuanto a la capacidad de las balsas, ésta debe ser tal que permita retener un determinado porcentaje de los sólidos en suspensión y simultáneamente, un volumen suficiente para su almacenamiento durante cierto período de tiempo. Rodríguez y Ayala (1990), recomienda un volumen de diseño capaz de albergar los sedimentos producidos durante 3 años, estimándose estos a partir de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (citada en el apartado anterior) o cualquier otro método empírico; o 300 m³ por cada hectárea de terreno afectada que se drena y un volumen mínimo de 100 m³, si se demuestra que la eliminación de sedimentos por otros sistemas de control es igual al volumen de almacenamiento reducido. Pueden emplearse mayores

capacidades de almacenamiento cuando se desee reducir la frecuencia de las labores de limpieza.

- **Proceso de Cálculo de la Capacidad de las Balsas o Lagunas de Sedimentación**

El procedimiento a seguir en el cálculo detallado de la capacidad de las balsas es el siguiente:

- ❖ Se obtiene la distribución granulométrica de las partículas de sólidos en suspensión que pueden afluir a las balsas. La siguiente tabla muestra una clasificación granulométrica que puede considerarse:

Tabla 3. 22 Distribución granulométrica de sólidos en suspensión.

Partícula de suelo	Intervalos de diámetros (mm)
Arena muy gruesa	2 - 1
Arena gruesa	1 - 0,5
Arena media	0,5 - 0,25
Arena fina	0,25 - 0,10
Arena muy fina	0,10 - 0,05
Limo	0,05 - 0,002
Arcilla	< 0,002

Fuente: Rodríguez y Ayala, (1990).

- ❖ Se determina el tamaño medio de las partículas que han de depositarse en las balsas hasta alcanzar concentración en sólidos permitida para el vertido del efluente en un cauce exterior.
- ❖ Se calcula la velocidad de sedimentación de las partículas, en función del diámetro de estas. De acuerdo con la Ley de Stokes esta se determina con la expresión:

$$V_{sed} = \frac{g}{18 * \mu} * (S - 1) * D^2 \quad (22)$$

Dónde:

V_{sed} : Velocidad de la caída de la partícula (cm/s)

g : Aceleración de gravedad (981 cm/s²)

μ : Viscosidad cinemática del fluido (cm²/s)

S : Peso específico de la partícula

D : Diámetro de la partícula, supuesta esférica (cm)

Las partículas más pequeñas que pueden decantarse en la práctica son las de limo (0,002 mm), que descienden unos 17 cm en 24 horas cuando el agua se encuentra a 0°C. Las partículas de arcilla pueden tardar en decantarse desde 30 horas incluso años.

Se determina el caudal que llegaría a la balsa conociendo la superficie a drenar y la precipitación máxima esperada para un tiempo de retorno dado. Normalmente, se considera el caudal generado por la precipitación máxima en 24 horas para un período de retorno de 10 años.

Se calcula el área de la balsa:

$$A = \frac{Q}{V_s} \quad (23)$$

Dónde:

A : Área de la balsa requerida (m²)

Q : Caudal máximo que llega a la balsa (m³/s)

V : Velocidad crítica de sedimentación (m/s)

En la práctica, es frecuente la construcción de diferentes balsas en serie, mejor que una sola de mayor tamaño. Las razones por las que se utiliza esta disposición son las siguientes:

- ❖ El paso de agua de una balsa a otra mejora el tiempo de retención y consecuentemente, la eliminación de los sólidos de suspensión.
- ❖ La construcción de balsas pequeñas suele ser más fácil que la de una estructura grande.
- ❖ En caso de ser necesaria la limpieza de los lodos de una balsa, ésta se realiza con medios más convencionales cuando tienen dimensiones más reducidas.
- ❖ Los problemas de estabilidad son menores en las balsas pequeñas.

CAPITULO IV MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se detallan aspectos, en relación con el método seleccionado para desarrollar este proyecto de investigación, cuyo objetivo es proponer un diseño del sistema de control de sólidos en suspensión hídrica para la mina de División Níquel, en Tiara, estado Aragua. Se describe el conjunto de acciones destinadas al análisis del problema planteado, a través de procedimientos específicos que incluyen las técnicas de observación, recolección y análisis de datos de campo y oficina.

4.1 Tipo de Investigación

La modalidad adoptada en esta investigación es de tipo Cuantitativo, al relacionar los valores medidos de pérdida de suelo con variables físicas del área. Por tal motivo, se realizó la recolección y el análisis de datos para responder preguntas y probar hipótesis establecidas previamente, que permitan la confianza en las mediciones realizadas en campo. Se aplicaron dos tipos de investigación adicionales, los cuales son:

- Investigación de Campo, la cual consistió en identificación y recolección de datos directos de zonas críticas con riesgo de afectación erosiva, tales como: taludes, vías de acarreo, drenajes y lagunas de sedimentación, presentes en las áreas de explotación. Posteriormente, se requirió una campaña de muestreo, para la obtención de muestras de los materiales, tanto in situ, como removidos, para luego ser llevados al laboratorio a sus respectivos análisis.
- Investigación Descriptiva - Analítica, con la cual se busca describir las situaciones o eventos de cómo son y cómo se comportan los sedimentos e infraestructura para el control de las aguas, en el lugar de interés, para la estimación de erosión del suelo se utilizó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE), con la finalidad de obtener la estimación de la erosión laminar.

4.2 Diseño de la Investigación

Según Palella (2010), el diseño experimental es aquel donde el investigador manipula una variable experimental no comprobada, bajo condiciones estrictamente controladas. Su objetivo es describir de qué modo y porque causa se produce o puede producirse un fenómeno.

Para el desarrollo de la investigación, el cual se trata de la propuesta de un sistema de control de sólidos en suspensión hídrica, se realizaron la instalación de Parcelas de Erosión con Clavos, en cada sector correspondiente de la mina, donde se colocaron 90 a 100 clavos de erosión, en un área de 25 m², que fueron medidos luego de cada evento de lluvia erosiva, durante el período de septiembre a diciembre del año 2016 y se efectuaron ensayos físicos y químicos en los laboratorios, con las muestras de suelos tomadas dentro de la empresa C.V.M. S.A. División-Níquel, estas actividades establecen el carácter experimental, ya que se manipularon un número finito de variables independientes de un ambiente controlado.

Se obtuvieron resultados precisos de cantidades de suelo transportado producidos en los meses lluviosos, así como también los volúmenes de aguas que circulan por la zona de producción mineral. En la Figura 4.1, se presenta un esquema de las actividades involucradas en cada etapa del diseño de la investigación.



Figura 4. 1. Etapas de la Investigación.

Fuente: Elaboración propia.

4.3 Población y Muestra

La población de la presente investigación está constituida por todas las áreas de la mina que han sido afectadas de manera significativa por el efecto de la erosión, sin importar el material que las constituyera, así como el sistema de drenaje construido para la captación de los sedimentos y materias que son arrastrados.

En la Figura 4.2, se presenta una vista en planta del área general de explotación. En la misma se denotan tres (3) sectores de importancia para la explotación mineral por sus características singulares (descritas en el Capítulo II). En cada uno de ellos fue seleccionada al menos dos (2) parcela donde fueron colocados los dispositivos para medición de la erosión (clavos), tanto en los taludes, como en las lagunas de sedimentación.

La muestra de esta investigación, está conformada por los tres (3) sectores que conforman el complejo minero, en donde fueron colocados los dispositivos de medición de erosión, con la finalidad de realizar la cuantificación promedio de material arrastrado y depositado por el evento de lluvioso y, a su vez, efectuar la recuperación de muestras de material remoldeado para su correspondiente ensayo de laboratorio.

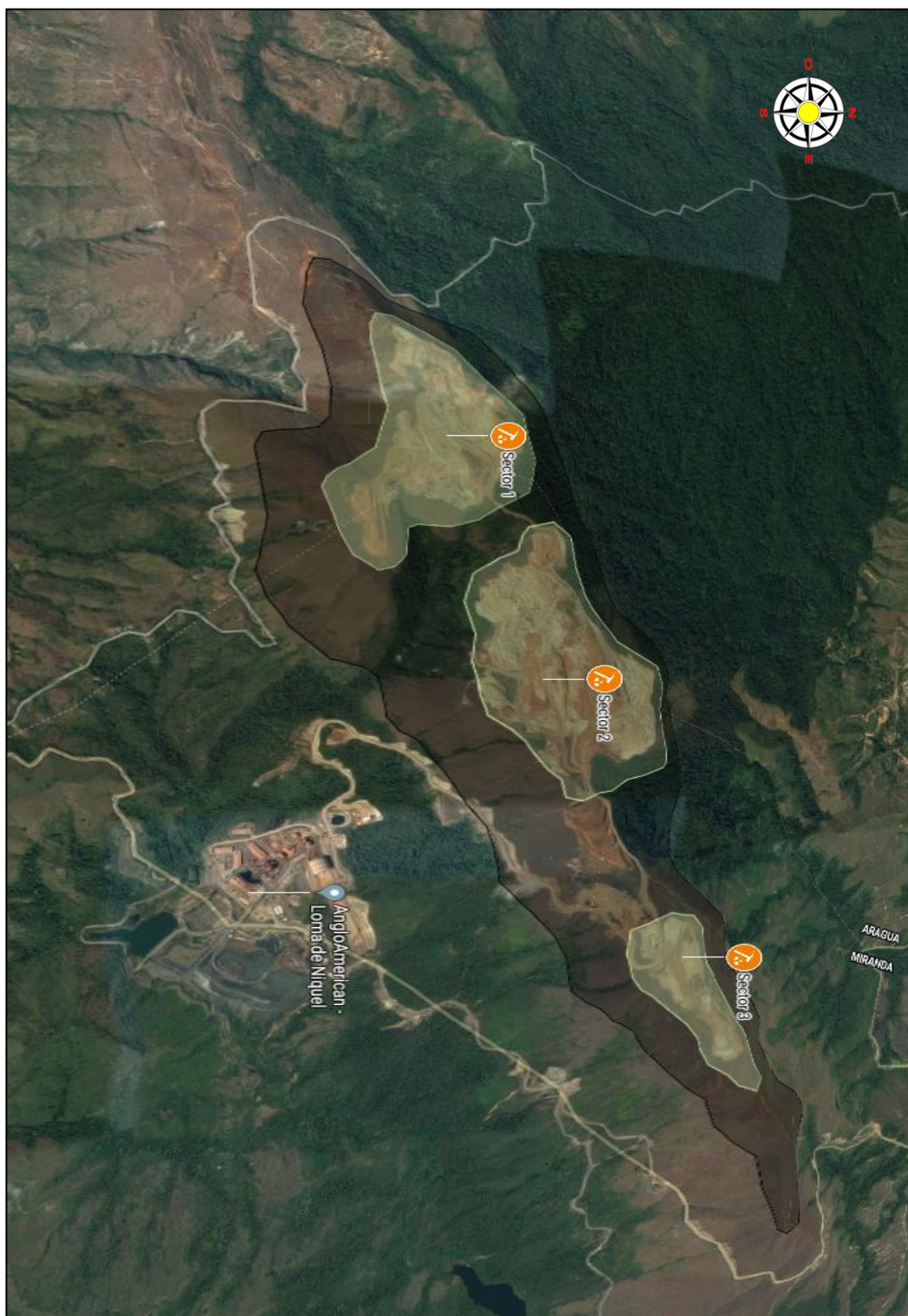


Figura 4. 2 Áreas de Explotación en Minera Loma de Níquel.
Fuente: Google Maps (2016).

4.4 Recoleccion de Datos

Para obtener un desempeño óptimo la investigación se dividió en cuatro (4) etapas: recopilación de material técnico, actividades de campo, ensayos de laboratorio y diseño. Para cada una de ellas, variaran las técnicas e instrumentos a utilizar según las necesidades que se identificaron en el avance de la investigación.

4.4.1 Tecnicas Utilizadas

En primer lugar, se realizó una recopilación de información climatologica, para establecer el comportamiento meteorológico del área de la mina y proyectar su comportamiento, con ayuda de herramientas de cálculo, contenidas en el programa Excel de Microsoft ®. Además se tomaron datos referentes a las características del terreno y del sistema de manejo de las aguas de mina.

Los datos obtenidos en esta fase fueron analizados mediante parametros de sistema de balance hídrico, en donde se cuantificaron la perdida de suelo (generación de partículas sólidas) y los sedimentos arrastrados (transporte o arrastre). Los datos fueron tabulados mediante el formulario presentado en la Figura 4.3 el cual ordena los datos en 10 columnas y 11 filas por parcela, según el sector en estudio.

En la etapa de campo, se realizó un reconocimiento geológicos/geotécnicos de las áreas, tomando en consideracion las zonas criticas que pudieran sufrir los efecto de la erosion y a su vez realizando la recolección de muestras.

Posteriormente en la etapa de laboratorio, las técnicas fueron experimental rigiendo las normas ASTM D-422 Método de análisis granulométrico de suelos, ASTM D-4318 Método de ensayo para la determinación de los Límites líquido y plástico; y del índice de plasticidad de los suelos. Adicionalmente se efectuó el ensayo de Difracción de Rayos X para identificar la mineralogía que conforman el suelo.

Medición de Erosión de Suelo	
Fecha	
Sector	
Observación	

Parcela N° 1											Parcela N° 2										
Clavos											Clavos										
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1											1										
2											2										
3											3										
4											4										
5											5										
6											6										
7											7										
8											8										
9											9										
10											10										

Figura 4. 3 Formulario para el registro de los datos.
Fuente: Elaboración propia.

4.4.2 Instrumentos

Para llevar a cabo las etapas anteriores (campo y laboratorio) se requirió el uso de unas series de instrumentos, para realizar los ensayos de caracterización de suelos, las cuales se mencionan a continuación:

- **Instrumentos de Campo:**
 - Piqueta de punta cortante metálica: Permitió la extracción de muestras de roca y suelo.
 - Varillas para la medición de la erosión: Éstas deben ser de hierro preferiblemente y tener una longitud entre 30 a 40 centímetros, dependiendo de las características del suelo, de manera que, al clavarlas, se puedan percibir los cambios en el nivel de la superficie del terreno, en su parte superior.

- Mandarina: De utilidad para romper rocas y clavar las varillas al suelo.
- Guantes de lona: Utilizados para evitar el contacto directo de la piel con rocas y/o elementos cortantes.
- Cinta métrica: Utilizada para medir las dimensiones de las parcelas.
- Bolsas plásticas de muestreo: El uso correcto de la misma permitió la preservación de la humedad en las muestras recolectadas.
- **Instrumentos de Laboratorio:**
 - Contenedores de aluminio: Utilizados para secar los especímenes en el horno.
 - Horno Memmert: Utilizado para el secado de muestras y/o especímenes (Figura 4.4).



Figura 4. 4 Horno Memmert para secado de muestras.
Fotografía tomada por José Cova.

- Tres (3) Picnómetros Humboldt MFG. Co: De capacidades de 49,94 ml y Tres (3) de 100,00 ml, dichos elementos fueron usados en los ensayos para calcular el peso específico de las muestras de suelo.
- Difracción de RX: Este ensayo permite determinar la composición mineralógica de los compuestos principales de un material, a través de la incidencia de un haz de Rayos X. Para este ensayo se utiliza el difractor

Philips PW 1840 (Figura 4.5) con cátodo de Cu y capacidad de barrido de 4° a 110° (2θ).



Figura 4. 5 Difractómetro Philips PW 1840.
Fotografía tomada por José Cova.

- Hidrómetro 152H, SoilTest Inc.: Se utilizó para estimar la sedimentación los tamaños aproximados de las partículas de suelo en una suspensión dada.
- Batería de tamices-ASTM: Necesarios para la clasificación de la parte gruesa del suelo.
- Ohaus Balanza Portátil Scout Pro: Con capacidad máxima de 2.000 gr y apreciación de 0,01 gr. La misma fue utilizada para determinar la masa de las muestras en todos los ensayos realizados (Figura 4.6).



Figura 4. 6 Horno Memmert para secado de muestras.
Fotografía tomada por José Cova.

- Copa de Casagrande Humboldt MFG Co, modelo H-4226, ASTM 4318: Este ensayo permite obtener los límites del rango de humedad dentro del cual el suelo se mantiene en estado plástico.

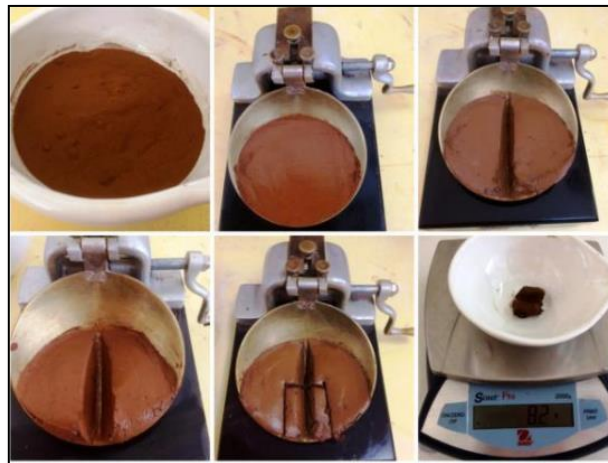


Figura 4. 7 Ensayo de Casagrande.
Fotografía tomada por José Cova.

- Granulometría Laser: Este ensayo permite determinar el tamaño de partícula, mediante la técnica de difracción de rayos láser. Permite medir la distribución granulométrica de partículas en polvo en un rango de 0.02 a

2.000 micras (μm). El equipo utilizado es Mastersizer 2.000 de Marvel Instrument (Figura 4.8).



Figura 4. 8 Mastersizer 2.000 de Marvel Instrument.
Fotografía tomada por José Cova.

- **Software:**
 - Microsoft Office® 2013: Necesaria para la compilación de información, procesamiento de texto y generación de gráficas que permitan la comprensión de la información resultante.
 - Programa Datamine Studio® 3.0: Para la evaluación geológico-minera. Se generaron vistas del yacimiento y topografía para la planificación de las labores de campo, así como para el replanteo de los puntos de muestreo.

4.5 Procedimiento Experimental

Se presenta a continuación la Figura 4.9, donde se expresan las actividades vinculadas a las cuatro etapas en la que consistió la investigación (Recopilación, Campo, Laboratorio y Diseño). La realización de las diversas tareas proporcionó que el cumplimiento del objetivo planteado.

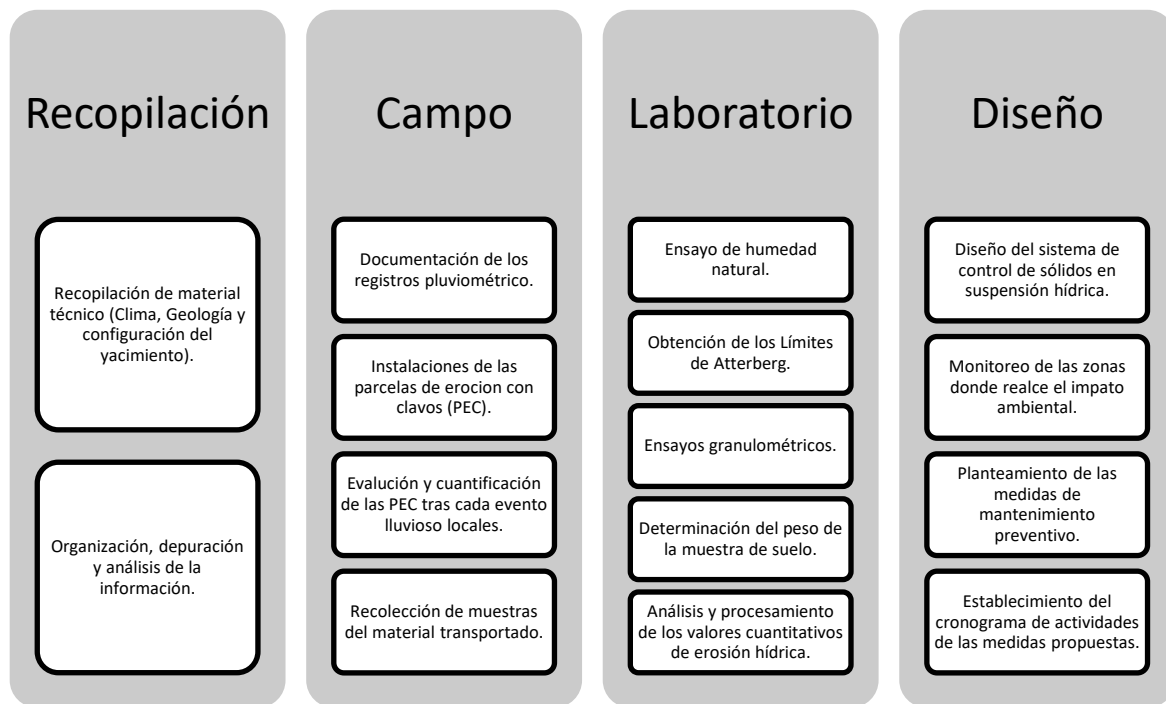


Figura 4. 9 Etapas del Procedimiento Experimental.

4.5.1 Etapa de Recopilación de Material Técnico

Antes de iniciar cualquier estudio en el campo, fue necesario la recopilación de material técnico relacionado con la climatología, geología y configuración del área de explotación, por tal motivo se recurrió a los archivos de la Empresa y así como también a la información digital cargada en tiempo real en el software Datamine Studio® 3.0. Este último contiene información pertinente a la topografía del área, a los tenores de níquel y a las concentraciones de otros metales, según una configuración en bloques del yacimiento.

4.5.2 Etapa de Actividades de Campo

En esta etapa se realizó adquisición datos y muestras, las cuales son necesarias para el desarrollo de la investigación. Se ejecutaron varias salidas de campo a los distintos sectores de estudio donde se efectuaron las siguientes actividades:

- Documentación de la medición de las precipitaciones locales, registrado en el pluviómetro de la Empresa.

- Instalación y evaluación de las Parcelas de Erosión con Clavos, por medio de dichas parcelas experimentales se realizará la cuantificación y análisis de las distintas variables que corresponden a la erosión hídrica.
- Recolección de muestras del material, para los distintos ensayos de laboratorio. Las muestras recolectadas se envolvieron con papel de plástico para preservar su humedad natural.

4.5.3 Etapa de Ensayos de Laboratorio

En la de etapa de ensayos de laboratorio, se realizaron varias actividades tales como:

- Ensayos de humedad natural.
- Obtención de los límites de Atterberg.
- Ensayo granulométrico por vías seca, para determinar cuantitativamente la distribución de tamaños de partículas de suelo.
- Obtención del peso de las muestras de suelo.
- Difracción de RX, para conocer la composición mineralógica presente en la muestra de suelo.
- Análisis y procesamiento de datos, de los valores cuantitativos de erosión hídrica, sedimentación, erosión neta, y suelo movilizado, obtenidos en la etapa de campo, para evaluando los procesos erosivos locales.

4.5.4 Etapa de Diseño

Tomándose en cuenta la información y resultados, obtenidas en las etapas anteriores, se diseñó el sistema de control de sólidos en suspensión hídrica de la Empresa minera C.V.M. S.A. División-Níquel, poniendo en consideración las siguientes actividades:

- Diseño de canal y estructuras hidráulicas para el sistema del control integral de sólidos en suspensión hídrica de la mina actual, mediante el software libre HCANALES, el cual permite realizar cálculos de manera sencilla.
- Monitoreo de zonas críticas, donde el impacto ambiental sea resaltante.

- Planteamiento de medidas de mantenimiento preventivo, velando que el sistema de drenaje cumpla su función principal en aquellas zonas donde la erosión hídrica realiza estragos.
- Establecimiento del cronograma de actividades de las medidas propuestas anteriormente.

CAPITULO V

DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN HÍDRICA

En este capítulo se presentan los resultados de las mediciones realizadas en campo y, los procedimientos empíricos y analíticos, tanto hidrometeorológicos como edafológicos. Se demuestran y discuten los resultados de los cálculos con fines de diseño para el control de sólidos en suspensión hídrica.

5.1 Perspectiva del Diseño para el Control de Sólidos en Suspensión Hídrica

La perspectiva del diseño del sistema de control integral de sólidos en suspensión hídrica, propuesto en esta investigación, consiste en planificar, mejorar y mantener el desempeño y rendimiento del sistema de drenaje actual. Éste permitirá mejorar la captación y conducción de aguas de escorrentía, ayudando a optimizar la retención y disposición de sedimentos, en suspensión, en la infraestructura prevista para estas funciones.

Cabe destacar que la media anual de precipitación en el período pre-minería es de 1.405 mm/año y la media anual durante las operaciones mineras resulta en 1.609 mm/año, teniendo una variación de 204 mm/año, esto se debe a los distintos cambios climáticos que se ha presentado en los últimos años a nivel regional.

Actualmente, las lagunas de captación de sedimentos y el sistema de canales de control de drenajes, existentes en el desarrollo minero de la C.V.M. S.A. División-Níquel, cuentan con 3 años sin haberles realizado un mantenimiento adecuado y no se encuentran en condiciones para mitigar la fuerza erosiva generada por las aguas de lluvia al arrastra sedimentos; ocasionando un daño adicional en las vías de mina y generando cárcavas en taludes previamente estabilizados.

Por esto fue necesario obtener información cuantitativa del balance hídrico de la mina y del transporte de los sedimentos que son arrastrados por los eventos de lluvias en la zona. Estratégicamente, se evita un mayor grado de erosión del suelo durante el

uso minero y se proponen recomendaciones para la expansión del desarrollo minero, contemplados en el Plan de Vida de la Mina.

5.2 Construcción de la Lluvia de Diseño

Para la evaluación de la erosión hídrica, primero se debe de realizar una recolección de los datos pluviométricos, donde obtendrán una estimación de cuál es la cantidad de agua que precipita en la zona o en el mejor de los caso obtener un registros de las precipitaciones diarias.

En la Tabla 5.1 se presentan los registros de las precipitaciones máximas diarias, las cuales son de suma importancia para la construcción de la lluvia de diseño, las cuales fueron registradas por el pluviómetro instalado en el campamento de la mina, durante la serie de años 1999 a 2016, con rango de percepción de cada lectura de 1 milímetro (mm), las variaciones presente en dicha tabla se debe que durante el siglo veinte se presentaron cambios climáticos en el país tales como: Aumento de temperaturas nocturnas, disminución de la precipitación anual entre 3% y 20%, generando como consecuencia agudización de las sequías en algunas zonas del país, influidas por el fenómeno de El Niño, entre otros.

En la tabla también se observa que las precipitaciones máximas tienen lugar en los meses de agosto y octubre, siendo este último donde se ocurre la mayor descarga, repitiendo el mismo patrón cada cinco (5) años, realizando una variación entre ambos meses.

Tabla 5. 1 Datos de precipitaciones máximas diarias, en la C.V.M. S.A. División-Níquel durante los años 1999-2016.

DATOS DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS DIARIAS (mm)													
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Máximo
1999	60,10	24,39	0,00	63,00	20,56	21,10	66,11	76,90	35,80	40,40	27,40	30,15	76,90 (Ago)
2000	37,45	5,68	8,40	22,68	85,00	36,15	34,20	40,65	31,00	25,10	29,40	19,00	85,00 (May)
2001	6,15	40,12	0,00	27,45	25,11	35,20	19,00	49,10	11,15	25,80	53,00	33,10	53,00 (Nov)
2002	62,21	19,15	9,10	66,30	44,22	31,18	52,10	26,80	31,60	16,20	34,90	74,00	74,00 (Dic)
2003	0,00	12,00	0,00	63,11	36,80	45,15	32,40	28,90	17,80	25,30	54,00	51,15	63,11 (Abr)
2004	14,35	22,00	4,25	25,30	56,30	35,40	17,25	31,40	45,00	20,15	34,25	17,20	56,30 (May)
2005	39,18	76,05	0,00	18,45	60,20	39,18	29,60	60,15	50,10	35,18	40,65	45,00	76,05 (Feb)
2006	54,13	5,82	5,07	17,59	29,77	66,31	42,30	42,96	53,80	40,60	32,10	23,63	66,31 (Jun)
2007	16,58	4,18	44,95	9,30	26,74	22,00	23,00	34,17	23,60	33,80	11,84	24,35	44,95 (Mar)
2008	20,64	8,46	19,50	79,50	18,94	30,45	34,17	20,64	30,45	95,40	18,61	15,56	95,40 (Oct)
2009	13,53	11,84	8,46	10,15	38,90	15,22	40,60	54,13	37,20	18,61	16,90	11,85	54,13 (Ago)
2010	16,91	10,20	15,22	41,27	30,45	33,83	20,00	35,00	28,00	67,65	37,20	12,25	67,65 (Oct)
2011	12,18	3,72	2,37	60,89	58,53	17,76	35,65	61,90	39,00	50,00	36,95	15,00	61,90 (Ago)
2012	35,00	22,45	6,15	22,35	25,00	38,25	42,00	35,50	42,00	62,14	33,25	18,00	62,14 (Oct)
2013	27,80	52,35	18,00	10,00	33,45	45,00	34,95	60,00	44,35	76,65	40,25	20,15	76,65 (Oct)
2014	11,84	15,00	23,00	23,56	28,35	65,00	33,25	48,95	46,35	39,16	52,00	24,20	65,00 (Jun)
2015	14,00	8,10	0,00	41,35	56,45	45,68	35,00	40,00	37,00	19,10	19,15	15,25	56,45 (May)
2016	16,50	18,45	9,00	0,00	37,18	34,00	27,65	76,35	23,68	65,00	38,90	33,15	76,35 (Ago)
MAX	62,21	76,05	44,95	79,50	85,00	66,31	66,11	76,90	53,80	95,40	54,00	74,00	95,40

Fuente: Tomado de los registros pluviométricos del Departamento de Geología, Loma de Níquel.

Como se explicó anteriormente, se midieron los eventos pluviométricos durante un período limitado de tiempo, en la estación lluviosa de los meses de septiembre a diciembre 2016. Lo subsiguiente, con fines de diseño, consiste en determinar los datos a la función de Distribución de Probabilidad, propuesta por E.J. Gumbel (1941), la cual modeliza máximos y mínimos estadísticos y probabilísticos, para la distribución de valores extremos en el análisis de frecuencia de datos hidrológicos.

5.2.1 Ajuste de los Datos a la Función de Distribución de Probabilidad de Gumbel

Con la finalidad de determinar las curvas de Intensidad-Frecuencia-Duración (IDF) y obtener los Tiempos de Retorno (TR) de las precipitaciones, se consideró la distribución de Gumbel, que es utilizada para modelar la distribución del máximo (o el mínimo) y calcular valores extremos. Esta función se expresa con la siguiente ecuación:

$$F(x) = e^{-e^{-\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)}} \quad (24)$$

Para obtener la distribución de probabilidades pluviométrica, mediante Gumbel, se utilizaron los valores de precipitaciones máximas diarias que se registraron mensualmente, asumiendo que es cuando ocurre el más significativo desprendimiento de la capa de suelo (Tabla 5.2). Estos eventos lluviosos ocurren en meses distintos, siendo agosto el de mayor frecuencia, seguido por octubre.

Tabla 5. 2 Distribución de probabilidades pluviométricas según los parámetros de Gumbel.

N°	Año	Mes	Precipitación (mm)	
		Max. Precip.	x_i	$(x_i - \bar{x})^2$
1	1999	(Ago)	76,90	92,28
2	2000	(May)	85,00	313,51
3	2001	(Nov)	53,00	204,32
4	2002	(Dic)	74,00	44,97
5	2003	(Abr)	63,11	17,50
6	2004	(May)	56,30	120,87
7	2005	(Feb)	76,05	76,67
8	2006	(Jun)	66,31	0,97
9	2007	(Mar)	44,95	499,25
10	2008	(Oct)	95,40	789,95
11	2009	(Ago)	54,13	173,29
12	2010	(Oct)	67,65	0,13
13	2011	(Ago)	61,90	29,09
14	2012	(Oct)	62,14	26,56
15	2013	(Oct)	76,65	87,54
16	2014	(Jun)	65,00	5,26
17	2015	(May)	56,45	117,59
18	2016	(Ago)	76,35	82,01
18		Suma	1.211,3	2.681,8

Fuente: Elaboración propia.

Con los registros de las precipitaciones y el programa Microsoft® Excel 2013, se calcularon valores de: sumatoria de los datos, la media de la muestra y la desviación estándar. Seguidamente, se obtuvieron los parámetros de Gumbel, α y u , mediante las formulas mostradas en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Cálculo de las variables probabilísticas mediante Gumbel.

Cálculo variables probabilísticas	
$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} =$	67, 29 mm
$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$	= 12, 56 mm
$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * s =$	9, 79 mm
$u = \bar{x} - 0.5772 * \alpha =$	61, 64 mm

Fuente: Elaboración propia.

Dónde:

\bar{x} : Media de la muestra.

S : Desviación típica de la muestra.

Los resultados obtenidos fueron:

- Valores de probabilidad:
 - Sumatoria = 1.211,3 mm.
 - Media de la muestra = 67,29 mm.
 - Desviación estándar = 12,56 mm.

- Los parámetros de Gumbel que resultaron fueron:
 - $\alpha = 9,79$ mm.
 - $u = 61,64$ mm. (Ver Tabla 5.3).

Con la finalidad de obtener el ajuste de las curvas IDF, para los datos calculados anteriormente, la Tabla 5.4 muestra: los valores de periodo de retorno, variables reducidas, probabilidad de ocurrencia y corrección del intervalo fijo de precipitaciones.

Las precipitaciones obtenidas (XT') se multiplicaron por 1,13 para así obtener la corrección por el intervalo fijo de observación, para así obtener las magnitudes más aproximadas a las obtenidas con las lluvias máximas verdaderas.

Tabla 5. 4 Cálculo de las Precipitaciones Diarias Máximas Probables para distintas frecuencias.

Periodo Retorno	Variable Reducida	Precip. (mm)	Prob. de ocurrencia	Corrección intervalo fijo
Años	YT	XT'(mm)	F(xT)	XT (mm)
2	0,3665	65,2307	0,5000	73,7106
5	1,4999	76,3302	0,8000	86,2531
10	2,2504	83,6790	0,9000	94,5573
25	3,1985	92,9643	0,9600	105,0497
50	3,9019	99,8527	0,9800	112,8335
100	4,6001	106,6902	0,9900	120,5599

Fuente: Elaboración propia.

Se puede deducir de la Tabla 5.4, que existe un 1% de probabilidad, de que sean superados los 120.55 mm, en 24 horas de precipitación, y lo cual corresponde a un evento centenario; en otras palabras, existe un 99% de probabilidades de que el año 2018, la precipitación en 24 horas sea menor o igual a 120.55 mm.

Similar análisis, puede ser realizado para todos los períodos de retorno restantes, asumiendo que la vida útil de la mina con las reservas mineras actualmente certificadas está por el orden de las tres (3) décadas, aproximadamente. Adicionalmente, División Níquel cuenta con recursos indicados e inferidos que podrían hacer extender la vida útil por unas cuantas décadas al ritmo de producción que se tiene en el presente.

Por lo antes mencionado, las estructuras de conducción, control y retención de sólido, en este diseño se dimensionaran teniendo en considerando una precipitación de 90 mm, debido que tales evento presentan en un periodo de retorno de cinco (5) años y su intensidad dependerá de su tiempo de concentración o duración.

Seguidamente al obtener los valores de corrección del intervalo fijo, se calcularon las precipitaciones máximas diaria para distintos tiempos de duración, teniendo en cuenta el coeficiente para la relación de lluvia de duración 24 horas.

Tabla 5. 5 Precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración de lluvias.

Tiempo de Duración	Cociente	Precipitación máxima Pd (mm) por tiempos de duración					
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
24 hr	X24 = 100%	73,7106	86,2531	94,5573	105,0497	112,8335	120,5599
18 hr	X18 = 91%	67,0767	78,4903	86,0471	84,0397	102,6785	109,7095
12 hr	X12 = 80%	58,9685	69,0025	75,6458	84,0397	90,2668	96,4479
8 hr	X8 = 68%	50,1232	58,6521	64,2990	71,4338	76,7268	81,9807
6 hr	X6 = 61%	44,9635	52,6144	57,6800	64,0803	68,8285	73,5415
5 hr	X5 = 57%	42,0151	49,1643	53,8977	59,8783	64,3151	68,7191
4 hr	X4 = 52%	38,3295	44,8516	49,1698	54,6258	58,6734	62,6912
3 hr	X3 = 46%	33,9069	39,6764	43,4964	48,3229	51,9034	55,4576
2 hr	X2 = 39%	28,7471	33,6387	36,8773	40,9694	44,0051	47,0184
1 hr	X1 = 30%	22,1132	25,8759	28,3672	31,5149	33,8501	36,1680

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente con los resultados obtenidos anteriormente en la Tabla 5.5, de precipitación máxima y los tiempos de duración, se utilizaron para calcular la intensidad de la lluvia según el periodo de retorno, teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$I = \frac{P \text{ [mm]}}{t_{\text{duración}} \text{ [hr.]}} \quad (25)$$

Dando como resultado los valores expresado en la Tabla 5.6.

Tabla 5. 6 Intensidades de lluvia a partir de Pd, según su Duración de precipitación y Frecuencia.

Tiempo de duración		Intensidad de la lluvia (mm /hr) según el Periodo de Retorno					
Hr	min	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
24 hr	1440	3,0713	3,5939	3,9399	4,3771	4,7014	5,0233
18 hr	1080	3,7265	4,3606	4,7804	4,6689	5,7044	6,0950
12 hr	720	4,9140	5,7502	6,3038	7,0033	7,5222	8,0373
8 hr	480	6,2654	7,3315	8,0374	8,9292	9,5909	10,2476
6 hr	360	7,4939	8,7691	9,6133	10,6801	11,4714	12,2569
5 hr	300	8,4030	9,8329	10,7795	11,9757	12,8630	13,7438
4 hr	240	9,5824	11,2129	12,2924	13,6565	14,6684	15,6728
3 hr	180	11,3023	13,2255	14,4988	16,1076	17,3011	18,4859
2 hr	120	14,3736	16,8194	18,4387	20,4847	22,0025	23,5092
1 hr	60	22,1132	25,8759	28,3672	31,5149	33,8501	36,1680

Fuente: Elaboración propia.

5.2.2 Diseño de las Curvas IDF para la C.V.M. S.A. División-Níquel.

Para la construcción de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), se obtuvo mediante el método propuesto por Aparicio (1997), que es analizar el comportamiento de las variables involucradas, relacionándolas simultáneamente en una familia de curvas, para lo cual utiliza la siguiente ecuación:

$$I = \frac{K * T^m}{t^n} \quad (26)$$

Dónde:

I = Intensidad (mm/hr).

t = Duración de la lluvia (min u hr).

T = Período de retorno (años).

K, m, n = Parámetros de ajuste lineal.

Con el fin de mostrar gráficamente las curvas IDF, se calcularon los parámetros K, m y n para la fórmula de la Intensidad, mediante regresiones potenciales, dando como resultado los valores en la Tabla 5.7. Los cálculos de estos parámetros matemáticos de las curvas Intensidad-Duración-Período de retorno se detallan en el Anexo II.

Tabla 5. 7 Resumen de los valores de regresión lineal para distintos años.

Resumen de los valores de regresión lineal		
Constante de regresión (K)	Coefficiente de regresión (m)	Coefficiente de regresión (n)
273,4020	0,112130	-0,61925924085

Fuente: Elaboración propia.

Después de obtener los valores anteriores, la ecuación de intensidad válida para la cuenca hidrográfica donde se encuentra el Complejo minero es presentada de la siguiente manera:

$$I = \frac{273,4020 * T^{0,112130}}{t^{0,61925}} \quad (27)$$

Se sustituyeron las variables (periodos de retornos y los tiempos de duración) para así obtener los distintos valores de intensidades respecto a la duración y la frecuencia como se muestran en la Tabla 5.8, los cuales se utilizaran para graficar las curvas IDF de dicha zona de estudio.

Tabla 5. 8 Intensidades - Tiempo de duración - Frecuencia.

Intensidades - Tiempo de duración												
Frecuencia años	Duración en minutos											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	109,14	71,07	55,30	46,28	40,31	36,01	32,73	30,14	28,02	26,25	24,75	23,45
5	120,95	78,76	61,29	51,29	44,67	39,91	36,28	33,40	31,05	29,09	27,43	25,99
10	130,73	85,13	66,24	55,44	48,29	43,13	39,21	36,10	33,56	31,44	29,64	28,09
25	144,88	94,34	73,41	61,43	53,51	47,80	43,45	40,01	37,19	34,85	32,85	31,13
50	156,59	101,97	79,34	66,40	57,84	51,66	46,96	43,24	40,20	37,66	35,50	33,64
100	169,24	110,21	85,75	71,77	62,51	55,84	50,76	46,73	43,45	40,71	38,37	36,36

Fuente: Elaboración propia.

Los valores obtenidos para las diferentes intensidades, varían entre 2 años y 100 años. Sin embargo, basados en la vida útil del proyecto en estudio, aproximadamente 30 años, sólo se analizaron las curvas IDF para períodos de retorno de hasta 50 años.

La Figura 5.1 muestra la familia de rectas IDF generadas por el método del pluviómetro. En general, existe una recta para cada periodo de retorno (T). A medida que se incrementa la duración de la tormenta (t), disminuye la intensidad (I). Y a medida que se incrementa el periodo de retorno de la misma forma crece el valor de intensidad máxima establecida para la C.V.M. S.A. División-Níquel de 90 mm/hr.

Concretamente este análisis, se utilizará para calcular los caudales generados en los cauces superficiales a partir de las precipitaciones, para el diseño de las estructura de conducción, control y retención de solido relacionadas con la escorrentía superficial.

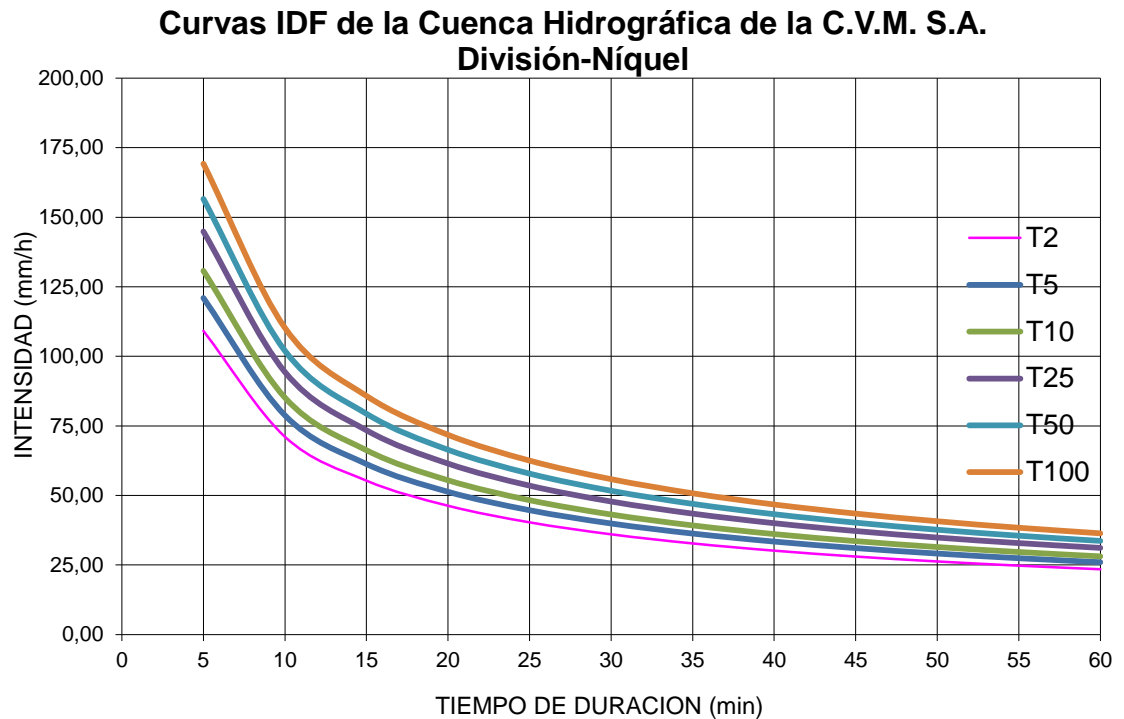


Figura 5. 1 Familia de rectas IDF generadas por el método del pluviómetro.

5.3 Evaluación de la Erosión Hídrica

La evaluación de la erosión hídrica se obtuvo a partir de la instalación y medición de la altura en la columna de sólidos, perdida o acumulada, en la Parcela de Erosión con Clavos (PEC). Antes de las instalaciones de las parcelas experimentales, se ejecutó un reconocimiento de campo en los (3) tres sectores que conforman la C.V.M. S.A. División-Níquel, para ubicar las zonas con mayor índice de erosividad. Se instalaron dos (2) parcelas de 25 m² en cada sector, la cuales constaban con:

- Cantidad de clavos: 90 a 100, promedio, por área asignada.
 - Longitud de clavos = 30 cm.
 - Profundidad de penetración en el suelo = 15 y 20 cm.

Esto implica que cada medición involucra la medida de aproximadamente 540 clavos, para el total del estudio. Los mismos fueron pintados para marcar el nivel inicial del suelo. La instalación de las parcelas se realizó entre los meses de septiembre y octubre del 2016 por el personal involucrado en el proyecto. Las mediciones se efectuaron con una cinta métrica al costado de cada clavo, expresando su magnitud en milímetros, como se muestra en la Figura 5.2.

El volumen de datos fue recibido de manera periódica tras cada evento de lluvia. Las mediciones se realizaron al menos dos (2) días después de ocurrida la precipitación, para evitar errores por efecto de la humedad presente en el suelo. Durante la evaluación se observó que el proceso de erosión hídrica que destacaba fue el de salpicadura, donde se enmarcaba de manera significativa cuando la precipitación superaba los 20 mm, valor que incidía a la descomposición de la estructura del suelo para luego aparecer las escorrentías y realizar el desprendimiento y transporte del suelo (ver Anexo III).



Figura 5. 2 Medición de los clavos de erosión.
Fotografía tomada por José Cova.



Figura 5. 3 Personal involucrado.
Fotografía tomada por José Cova.

Para el traspaso de la información a digital, se procedió a registrar todas las mediciones realizadas en las diferentes parcelas, tarea que resultó indispensable en la cuantificación y análisis de las distintas variables y procesos ocurridos. Los datos fueron tabulados en el formulario mostrado el en Capítulo IV, Figura 4.3.

5.3.1 Recolección de Muestras del Material

Durante el reconocimiento geológico-geotécnico de campo, se examinaron de forma visual los taludes, el sistema de drenaje y las parcelas experimentales instaladas en el complejo minero, puntualizando sus características más resaltantes. Se tomaron tres (3) muestras remoldeadas de suelo, que fueron contenidas en bolsas plásticas para realizar la caracterización física, química y mineralógica de las mismas.



Figura 5. 4 a) Apertura inicial en el talud de la escombrera; b) Apertura profunda; c) Extracción de muestra puntual; d) Muestra puntual en bolsa plástica.



Figura 5. 5 Recolección de muestras.
Fotografía tomada por José Cova.

5.3.2 Ensayos de Laboratorio

En los laboratorios de la Fundación para el Desarrollo y Asesoría en Tecnología Centro de Asistencia a la Industria Cerámica (FUNDATEC-CAIC), a las muestras recolectadas en campo, se realizaron los siguientes ensayos de caracterización física:

- **Humedad Natural**

La cantidad de agua libre que está presente en el suelo cuando se extraen de la mina, producto de las condiciones atmosféricas y del clima al que están sometidas arrojó un valor de: $35,15 \pm 0,20$ %, como se esperaba, debido a que es un suelo que acumula mucha agua.

- **Obtención de los Límites de Atterberg**

Siguiendo el procedimiento descrito en la Norma ASTM D-4318, en la Tabla 5.10 se pueden observar los resultados obtenidos para los límites, líquido y plástico, sobre una de las muestras. El Diagrama de Casagrande (Figura 5.6) permite visualizar que la muestra se sitúa en la zona correspondiente a mediana plasticidad ($30 < LL < 50$ y $5 < LP < 25$). El IP indica poco porcentaje de arcilla en el suelo.

Tabla 5. 9 Determinación de los límites de Atterberg en materias primas.

Límites de Atterberg	(% H)
Límite Líquido LL	37,7
Límite Plástico LP	22,5
Índice de Plasticidad IP	15,2

Fuente: Elaboración propia.

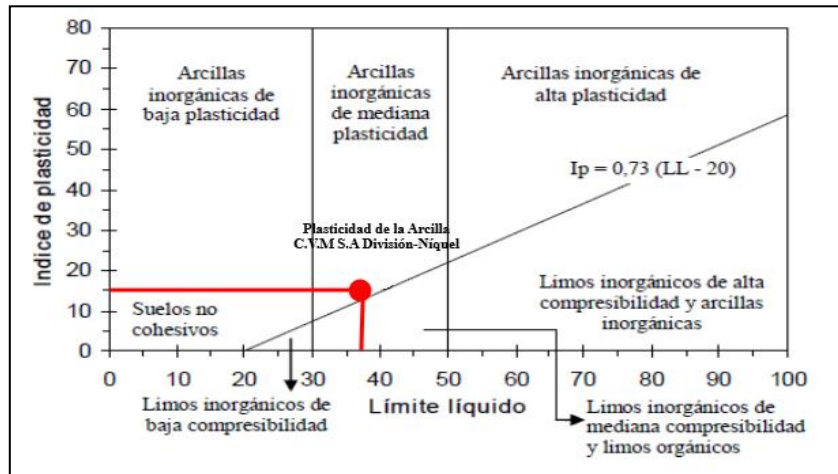


Figura 5. 6 Diagrama de Casagrande para la muestra de arcilla de la C.V.M S.A División-Níquel.

- **Ensayo Granulométrico por Vía Seca**

Se realizó la clasificación granulométrica por malla para el material grueso y granulometría laser para las arcillas. Para realizar la granulometría por malla se tomó una muestra representativa de 1.600 gr y se utilizó una serie de tamices regular de mallado 3/8", 4, 6, 10, 12, 25, 35, 50, 60, 70 y 100, como lo estipula la norma ASTM D-422. Se efectuó una categorización previa en húmedo para separar todo el pasante de la malla 200, al instante se determinó la distribución granulométrica del material restante. Dicho procedimiento se aplicó a las muestras alteradas de suelo. La Tabla 5.10, muestra los valores obtenidos en el ensayo granulométrico.

Tabla 5. 10 Determinación de Análisis Granulométrico.

Malla	Abertura (mm)	W. ret (gr)	W. ret (%)	Ret. Acu (%)	Pasa (%)
$\frac{3}{8}$	9,53	0	0	0	100,00
# 4	4,76	1223,68	77,10	77,10	22,90
# 6	3,35	108,96	6,86	83,96	16,04
#10	2,00	125,28	7,89	91,85	8,15
# 12	1,68	21,76	1,37	93,23	6,77
# 25	0,71	83,36	5,25	98,48	1,52
# 35	0,50	24,160	1,52	100,00	0,00
# 50	0,30	0	0,00	100,00	0,00
# 60	0,25	0	0,00	100,00	0,00
# 70	0,21	0	0,00	100,00	0,00
# 100	0,15	0	0,00	100,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

Tomando en consideración los porcentajes de muestra que pasa cada uno de los tamices, se presenta la Figura 5.7, la cual es la representación gráfica de la curva granulométrica, teniendo como resultado una muestra monogranular, clasificándola en un tipo de arena gruesa, debido que el mayor peso retenido quedó en el tamiz # 4 (4,76 mm), estos materiales se encuentra presenten en una matriz limos arcillosos, que es disgregada por la fuerza hidráulica del agua y depositada en las distintas lagunas de sedimentación, la escorrentías al disminuir su energía la fracción gruesa queda en el recorrido.

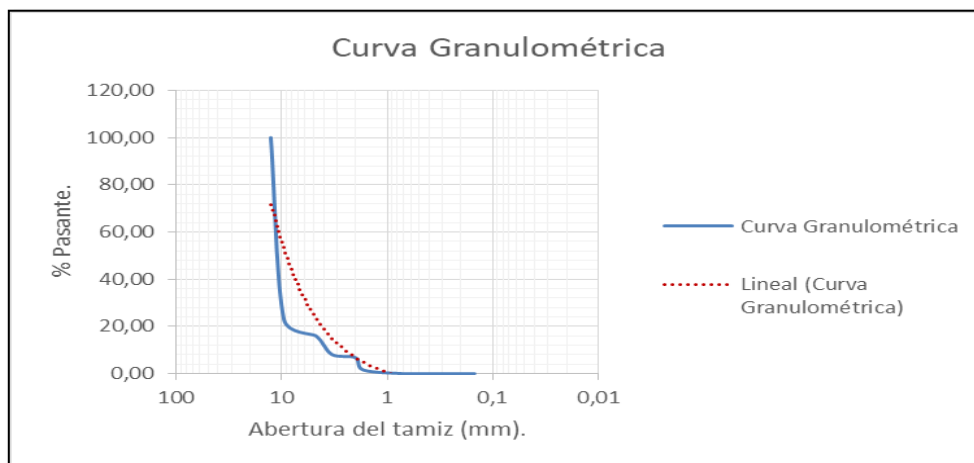


Figura 5. 7 Curva granulométrica para distintos tamaños de partículas.

Con respecto a la granulometría laser, este ensayo consistió en determinar la distribución granulométrica en las arcillas, representando los principales tamaños de granos menores. Las partículas fueron atravesadas por un haz láser, produciéndose una dispersión de luz cuya intensidad y ángulo son dependientes de su tamaño.

En la Tabla 5.12 y la Figura 5.8, se presentan los resultados obtenidos de esta fracción fina, donde se observa que 81,86 % corresponde a la fracción de partículas mayores de 2 micras y, el resto del porcentaje menor a 2 micras, clasificando a la muestra de suelo como limo-arcilloso, con una plasticidad media de 15%.

Tabla 5. 11 Análisis granulométrico por difracción láser de materias primas.

Proporción Granulométrica	Diámetro (μm)
	Muestra ($\phi < 45 \mu\text{m}$)
	Muestra de arcilla
d (0.9)	42,051 μm
d (0.5)	10,416 μm
d (0.1)	1,026 μm
% de partículas con $\Theta < 2 \mu\text{m}$ (Arcilla)	18,14 %
% de partículas con $\Theta > 2 \mu\text{m}$ (Limos)	81,86 %
S.E (m^2/g)	0,7 m^2/g

Fuente: Elaboración propia.

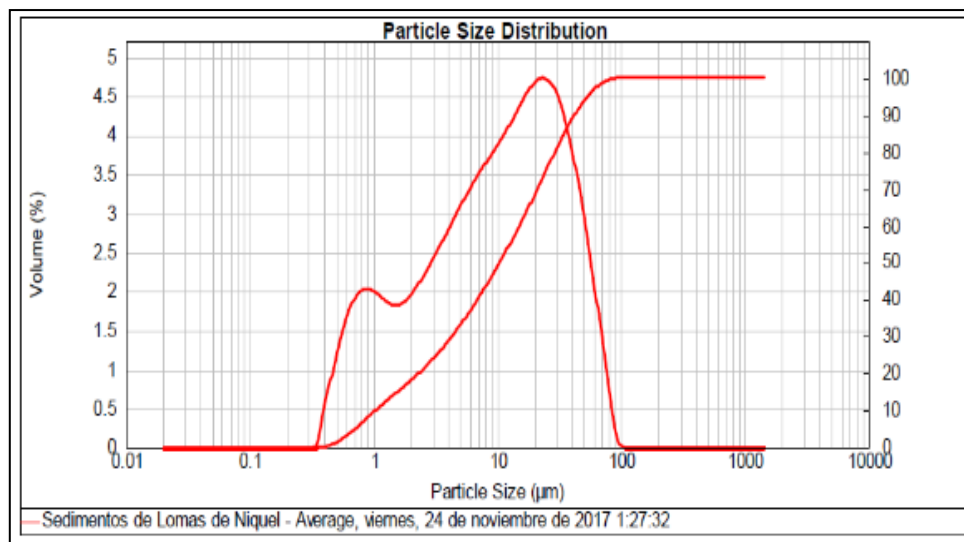


Figura 5. 8 Gráfica de análisis granulométrico por difracción láser de materias primas.

- **Densidad Aparente del Suelo**

Para el análisis de la densidad aparente, se obtuvieron muestras de suelo en distintos lugares de la zona de estudio. Se utilizó un cilindro metálico de 10,16 cm de diámetro y 10 cm de altura. Una vez extraído la muestra de suelo se preservó en una bolsa plástica para conservar sus propiedades y fueron llevadas al laboratorio para la realización del ensayo. En la Tabla 5.12, se presentan los valores de densidad existentes en las muestras de suelo.

Tabla 5. 12 Densidades aparentes del suelo de la C.V.M. S.A. División-Níquel.

Densidades aparentes del suelo de la C.V.M. S.A. División-Níquel	
Tipo de suelo	Densidad (gr/m³)
Laterita Húmeda	1,60
Saprolita Húmeda	1,86
Saprolita Seca	1,48
Roca Fresca	1,75

Fuente: Elaboración propia.

Vale señalar que la densidad aparente, es un indicador de la compactación de suelo. La densidad del suelo afecta la infiltración de agua, el desarrollo radicular, la disponibilidad de agua, la porosidad (macro y micro poros), la disponibilidad de nutrientes e incluso la actividad de microorganismos en el suelo.

- **Identificación Mineralógica**

Adicionalmente se efectuó el ensayo de identificación mineralógica (Difracción de Rayos X). Éste estudio permite determinar la composición mineralógica de los compuestos principales del suelo, a través de la incidencia de un haz de Rayos X. En la Tabla 5.13, se reportan las fases mineralógicas que se encuentran en las arcillas de la C.V.M. S.A. División-Níquel, y la Figura 5.9 muestra el difractograma que se generó en dicho ensayo.

Tabla 5. 13 Minerales presentes en las distintas fases de la muestra de arcilla.

Fases	Fase Principal	Fase Secundaria	Fase Secundaria	Fase Secundaria
Minerales	NiFe ₂ O ₄	Hematita	Caolinita	Cuarzo

Fuente: Elaboración propia.

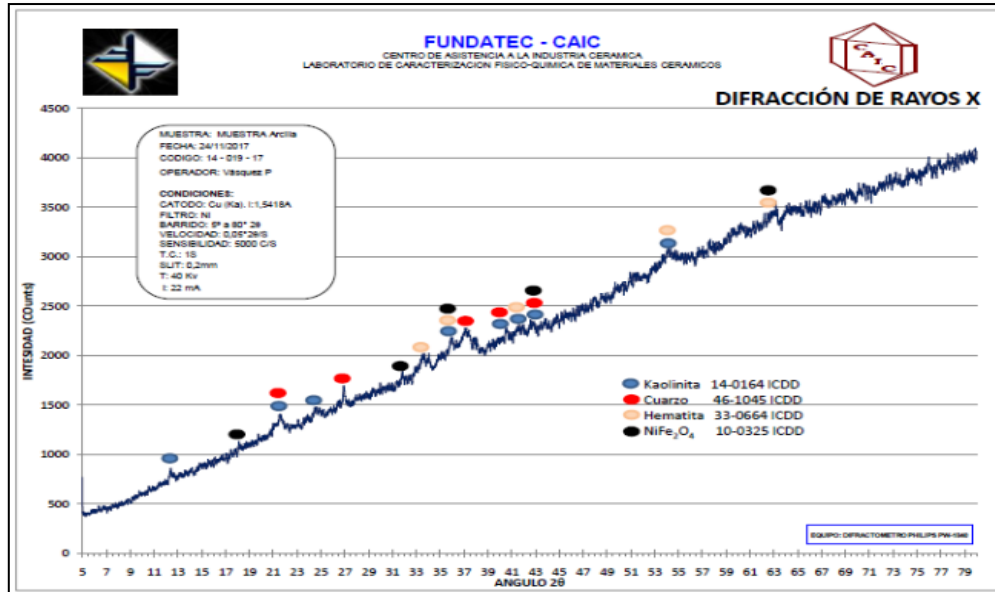


Figura 5. 9 Difractograma de las distintas fases de la arcilla.

En el difractograma, se puede observar que la muestra de arcilla analizada, presenta como fase principal, con muy baja cristalización, el Ferroníquel (NiFe₂O₄) y como fases secundarias, igual con baja cristalización: Hematita, Caolinita y Cuarzo. En esta muestra la presencia del Ion Fe, es la que genera la elevación de la línea base de la difracción.

5.3.3 Evaluación Local de los Procesos Erosivos

La C.V.M. S.A. División-Níquel, como se mencionó anteriormente, se encuentra dividida en tres (3), los cuales presentan un perfil de suelo residual, con una topografía natural pronunciada (hasta 70°) y una cuenca tributaria que presenta alteraciones por el ritmo producción minera, en este estudio se dividió dicha cuenca en

subcuencas según el número de sectores, para obtener un aproximado del balance hídrico que circula por cada uno de ellos.

En los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, en la zona presentaron precipitación que pasa los 214,77 mm, tal como se muestra en la Tabla 5.14.

Tabla 5. 14 Promedio de precipitaciones mensuales obtenidas durante el desarrollo de esta investigación.

Promedio de precipitaciones mensuales					
Mes	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
Precipitación (mm)	214,77	341,92	350,98	255,45	1.163,12

Fuente: Elaboración propia.

La medición de las PEC, como se mencionó al inicio de este capítulo, se realizó en un periodo variable, debido a que se procuró realizar las mismas dos (2) días después de cada lluvia, para evitar errores por efecto de la humedad presente en el suelo. Se realizó de esta manera ya que se utilizaron los conceptos propuestos por (Cuitiño & Pizarro, 2002), donde explican los procesos y aplicación de este método.

Los resultados obtenidos de erosión hídrica, sedimentación, erosión neta y suelo movilizado, se muestran en la Tabla 5.15. La canalización del terreno orientaron las aguas de escurrimientos que transportan los sólidos hacia las PEC, el cual contribuyó al momento de registrar las magnitudes de suelo movilizado debido que se obtiene una mayor aproximación.

Cabe destacar que los valores de suelo movilizado corresponden adición de la erosión y sedimentación por los valores de la densidad aparente en seco, en cambio la erosión neta es la diferencia entre ellos, según las formulas (1), (2) y (3) presentadas en el capítulo III. Esto permite establecer un balance entre pérdidas y entradas de suelo en un sector determinado, permitiendo realizar estimaciones más reales de las pérdidas de suelo producidas en el lugar.

Tabla 5. 15 Suelo movilizado.

Suelo Movilizado								
Meses	Erosión (mm)	Erosión (m ³ /ha)	Erosión (ton/ha)	Sedimentación (mm)	Sedimentación (m ³ /ha)	Sedimentación (ton/ha)	Erosión neta (ton/ha)	Suelo movilizado (ton/ha)
Septiembre	85	850	1.360	66	660	1.056	304	2.416
Octubre	111	1.110	1.776	87	870	1.392	384	3.168
Noviembre	94	940	1.504	76	760	1.216	288	2720
Diciembre	89	890	1.424	70	700	1.120	304	2.544
Total	379	3.790	6.064	299	2.990	4.784	1.280	10.848

Fuente: Elaboración propia.

Los valores presentados evidencian que el mes de septiembre presentó una erosión neta del suelo (EN) de 304 ton/ha, en tanto que el suelo movilizado (SM) alcanzó las 2.416 ton/ha. La erosión media tuvo valor de 1.360 ton/ha, pero al mismo tiempo la sedimentación obtuvo una cantidad de 1.056 ton/ha. Estas cifras indican que el proceso dominante fue la erosión (Figura 5.10).

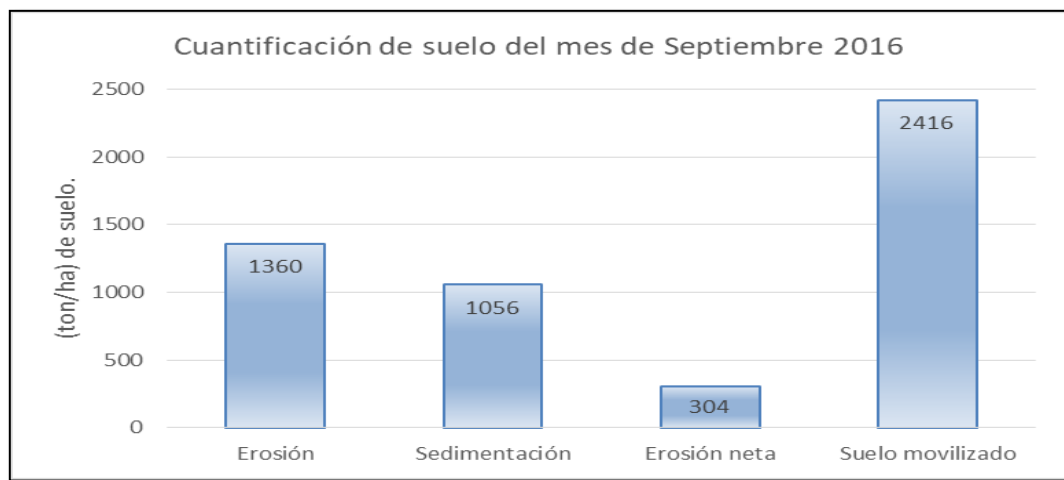


Figura 5. 10 Cuantificación de suelo del mes de Septiembre 2016.

Seguidamente en el mes de octubre, presentó una erosión neta del suelo (EN), de 384 ton/ha, en tanto que el suelo movilizado (SM) alcanzó los 3.168 ton/ha. Donde la erosión media tuvo un valor de 1.776 ton/ha, y la sedimentación fue de 1.392 ton/ha. Estas cifras indican que el proceso dominante siguió siendo la erosión (Figura 5.11).

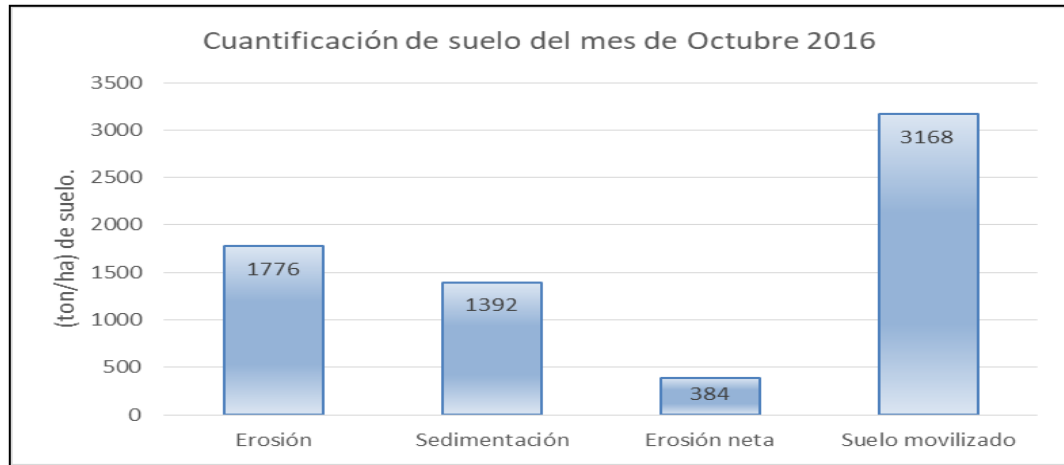


Figura 5. 11 Cuantificación de suelo del mes de Octubre 2016.

De igual manera la cuantificación de suelo para los meses de noviembre, presentó una erosión neta del suelo (EN), de 288 ton/ha, el suelo movilizado (SM) alcanzó un valor 2.720 ton/ha. Con respecto a la erosión media la cual tuvo un valor de 1.504 ton/ha, y la sedimentación fue de 1.216 ton/ha. Estas cifras indican que el proceso dominante siguió siendo la erosión (Figura 5.12).

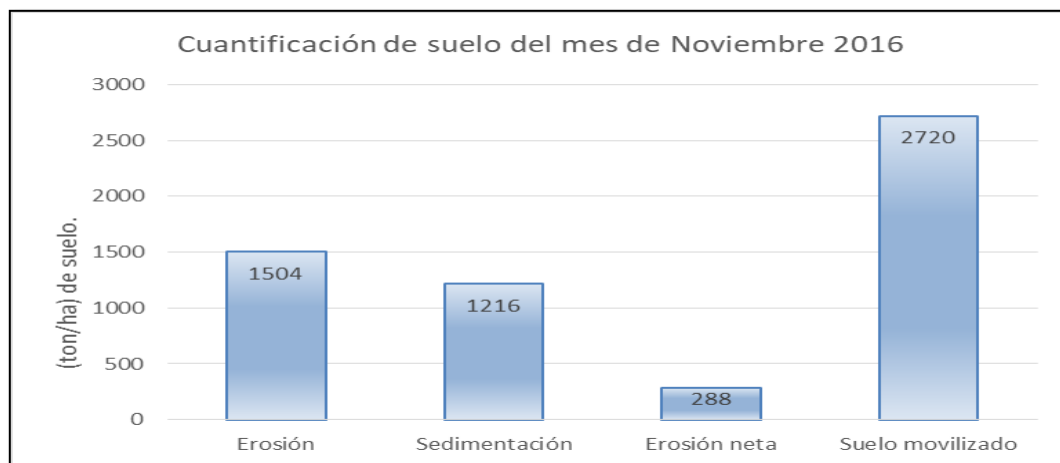


Figura 5. 12 Cuantificación de suelo del mes de Noviembre 2016.

Con respecto al mes de diciembre no tuvo tantas diferencias con relación a noviembre, arrojando como resultados, para la erosión neta (EN) la cantidad 304 ton/ha, en el suelo movilizado 2.544 ton/ha, teniendo erosión media de 1.424 ton/ha, con una sedimentación de 1.120 ton/ha (Figura 5.13). Como en los meses anteriores el proceso que dominó fue la erosión.

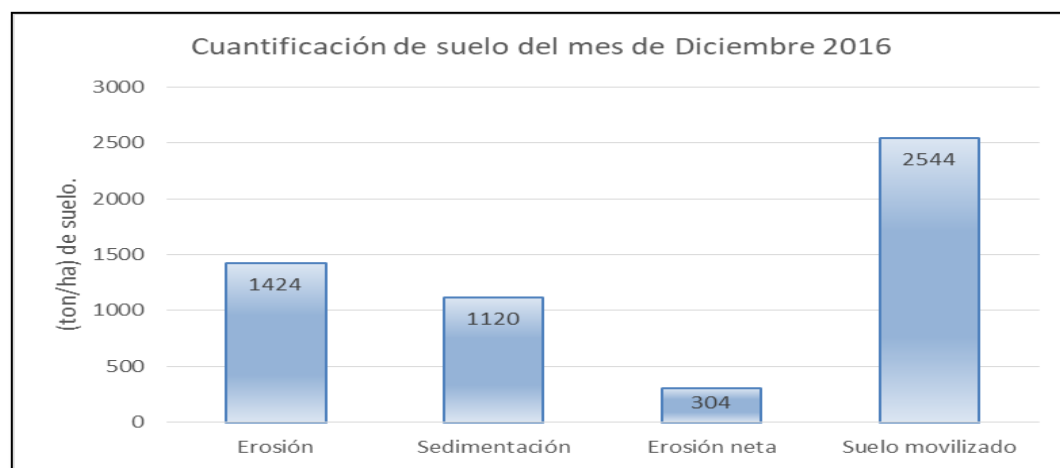


Figura 5. 13 Cuantificación de suelo del mes de Diciembre 2016.

Los resultados señalan que la erosión neta en la C.V.M. S.A. División-Níquel, para los periodos antes mencionados alcanzó una cantidad total de 1.280 ton/ha, siendo el mes de octubre el de mayor influencia con 384 ton/ha, como se muestra en la Figura 5.14. Pero se tendría en observación debido que el máximo de precipitación se registró en el mes de agosto, mes en el cual no se había iniciado las mediciones de la tasa de erosión.

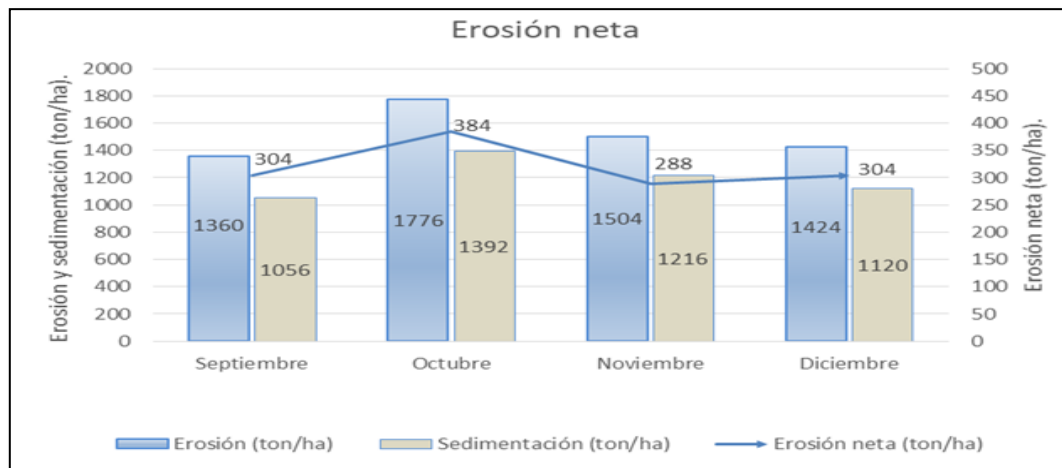


Figura 5. 14 Grafica de erosión neta aproximada en la C.V.M. S.A. División-Níquel.

Para tener una consolidación de los valares obtenidos, se realizó la estimación de las pérdidas de suelo, utilizando la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Revisada (RUSLE) , para tener una mayor complejidad y claridad en los resultados ya que con ambos métodos y modelo se puede hacer una correlación a la hora de realizar los cálculos. En la Tabla 5.16 y 5.17 se muestran los resultados obtenidos por medio del uso de PEC y RUSLE.

Tabla 5. 16 Estimación de pérdida de suelo por clavos de erosión.

Mes	Precipitación (mm)	Cuantificación de suelo por clavos de erosión (ton/ha)			
		Erosión	Sedimentación	Erosión neta	Suelo movilizado
Septiembre	214,77	1.360	1.056	304	2.416
Octubre	341,92	1.776	1.392	384	3.168
Noviembre	350,98	1.504	1.216	288	2.720
Diciembre	255,45	1.424	1.120	304	2.544

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. 17 Estimación de pérdida de suelo por RUSLE.

Cuantificación de suelo por medio de RUSLE (ton/ha)								
Mes	Precipitación (mm)	R	K	LS	C	P	A	Erosión potencial
Septiembre	214,77	1.699,48	0,033	4,328	1	1	242,773	242,773
Octubre	341,92	2.818,40	0,033	4,328	1	1	402,613	402,613
Noviembre	350,98	2.898,12	0,033	4,328	1	1	414,002	414,002
Diciembre	255,45	2.057,46	0,033	4,328	1	1	293,912	293,912

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en las tablas anteriores, haciendo la correlación entre el método y el modelo, existe una similitud entre los valores de erosión neta y erosión potencial. A pesar que son dos (2) metodologías diferentes los resultados no tuvieron mucha discrepancia, de tal modo que sería posible estudiar las distintas alternativas al momento de realizar un estudio y conocer cuánto es el impacto de esta actividad minera en este sector.

En la Figura 5.15, se puede apreciar el comportamiento de ambos, nótese que en octubre fue donde se generó mayor tasa de erosión neta 384 ton/ha (calculada por PEC) y la erosión potencial se presenta en el mes de noviembre con un valor aproximado de 414,002 ton/ha (calculada por RUSLE). Esto es debido a que noviembre fue el mes donde se registraron los mayores índices de precipitación por día, parte de la capa del suelo se encontraban desprendidas por las precipitaciones del mes anterior y al volver a precipitar las partículas son transportadas y depositadas en la parte baja de la cuenca.

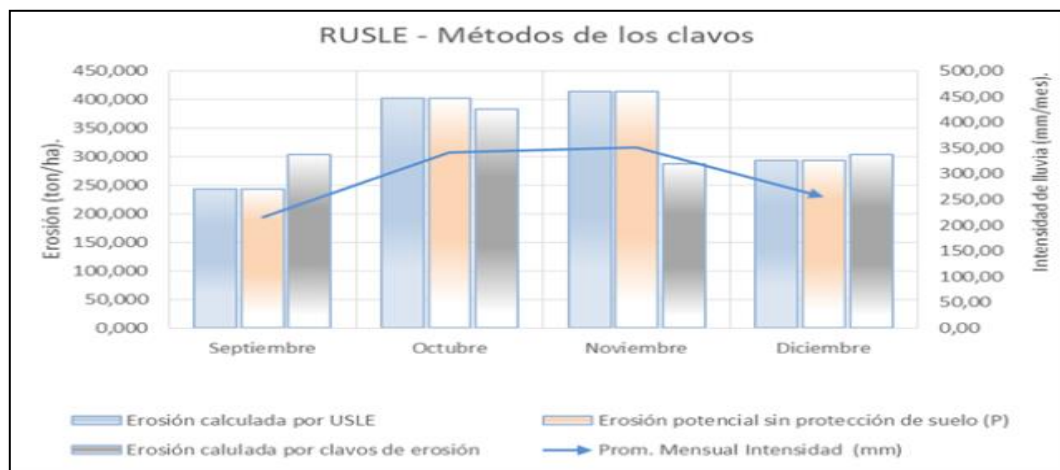


Figura 5. 15 Cuantificación de suelo por los metodos de los clavos de erosión y RUSLE.

Debemos recordar que al realizar la cuantificación de la erosión hídrica por el modelo PEC, solo se consideran las pérdidas de suelo que se producen en la superficie de las parcelas, que son transportados por efecto de las aguas de escorrentías, sedimentando en las partes más bajas debido a cambios de velocidad o a cambios en la pendiente

En cambio por el método RUSLE, se debe tener en cuenta una serie de elementos como los son: factor de erosividad de la lluvia (R), factor de erosionabilidad (K), factores topográficos (S, L), los factores de cubierta (C) y protección de suelo (P) estos dos (2) últimos, son de gran importancia para la preservación de los suelos, ya que si en el terreno existe bosque con buena cobertura vegetal, entonces la protección (C) tomaría un valor de 0,001 y la erosión disminuiría en 1000%, la pérdida total de suelos sería mínima, ya que para la FAO, estos resultados de pérdida de suelos superiores a 200 t/ha/año se situarían en un nivel de erosión muy alto, para lo cual habría que disminuir en lo posible los factores de riesgo.

5.4 Conducción de Aguas de Escorrentía

Como se mencionó en el Capítulo III, el sistema de drenaje tiene la finalidad de realizar la conducción y recolección del exceso de agua de escorrentía (agua que escurre sobre la superficie del terreno) que son proporcionadas por cuenca hidrográfica

a causa de las intensas y frecuentes lluvias. Cabe destacar que la tasa de infiltración no ha sido medida a la fecha, razón por la cual los cálculos que se presentan en esta investigación pueden ser considerados conservadores al no sustraer los volúmenes de agua infiltrada en el subsuelo.

5.4.1 Criterio Hidrológico (Caudal de Diseño)

Mediante mapas topográficos y fotografías aéreas, se evidenció el área de la cuenca tributaria que aporta agua al terreno intervenido. Por lo cual se efectuó previamente una delimitación de las tres (3) subcuencas donde se ubica el yacimiento mineral, que fueron denominadas 1, 2 y 3, en el sentido suroeste-noreste, como se muestra en la Figura 5.16.

Una vez obtenida el área y los valores de los registros de las precipitaciones diarias de la zona (presentados en la Tabla 5.1), se calculó el caudal de la cuenca hidrográfica (Q), mediante la ecuación (10) (presentada en la sección 3.6), utilizando el coeficiente de esorrentía para pendiente pronunciada (presentada en la Tabla 3.13).

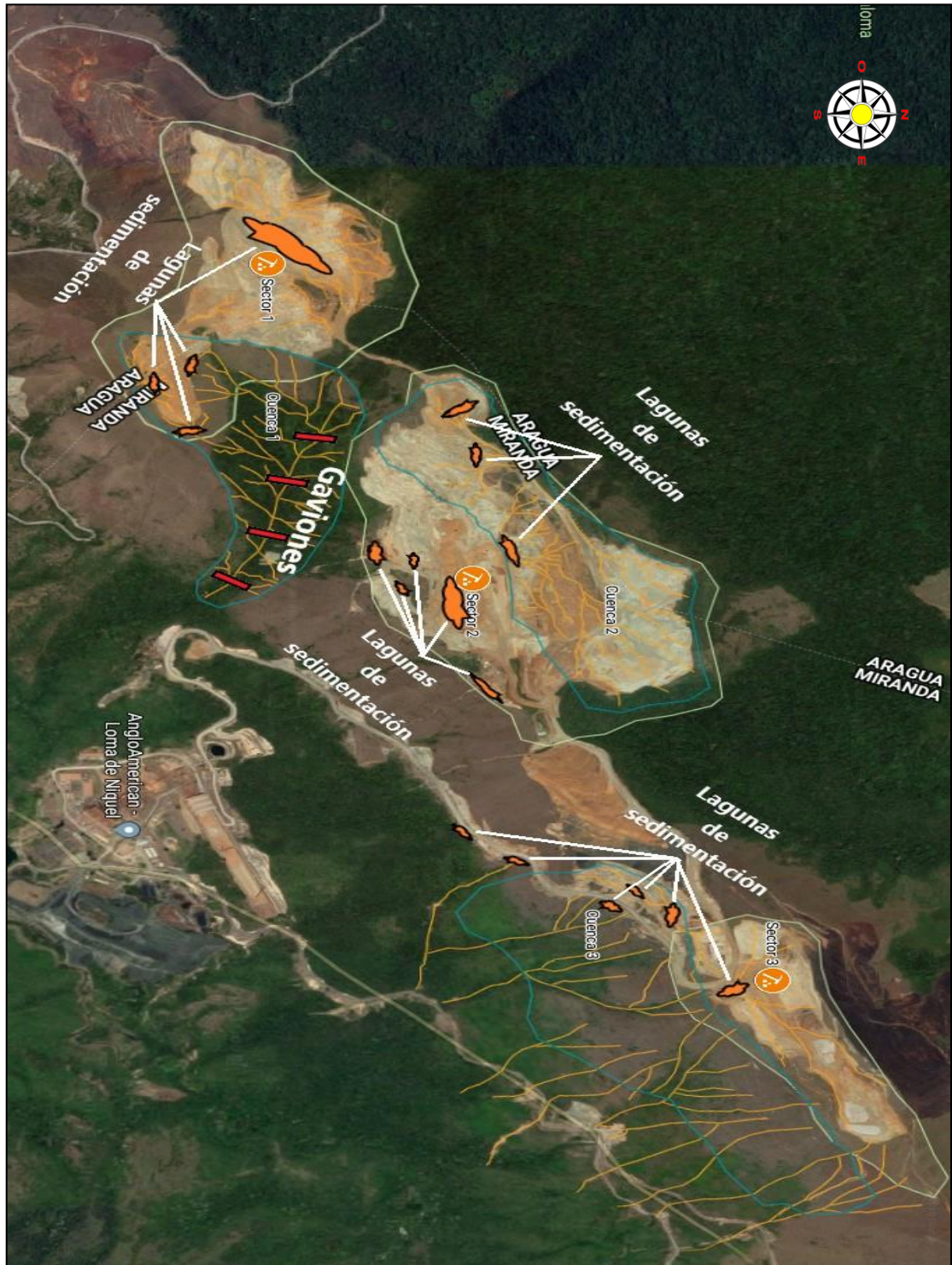


Figura 5. 16 Vista satelital de las subcuencas hidrográficas donde se ubica la C.V.M. S.A. División-Níquel.

Fuente: Google Maps (2016).

En la Figura 5.17, se puede apreciar el límite del Sector 1, el cual tiene un área aproximada de 0,647 km² y se encuentra demarcado por divisorias de agua que corresponde a la cima del yacimiento, pero solo 0,421 km² (65%) de esa superficie recoge las escorrentías que van hacia los drenajes naturales, sin pasar a través del Complejo Minero. La subcuenca 1 carga el agua restante (35%) que entra a este sector, siendo la que arrastra la mayor parte de los sedimentos al cauce del río Mesía. Estos sedimentos son controlados por un sistema constituido por: cuatro (4) lagunas de sedimentación, cuatro (4) diques, utilizando la técnica de gaviones, los cuales se encuentran en condiciones deplorables, bien por la falta del mantenimiento general y/o de supervisión permanente.

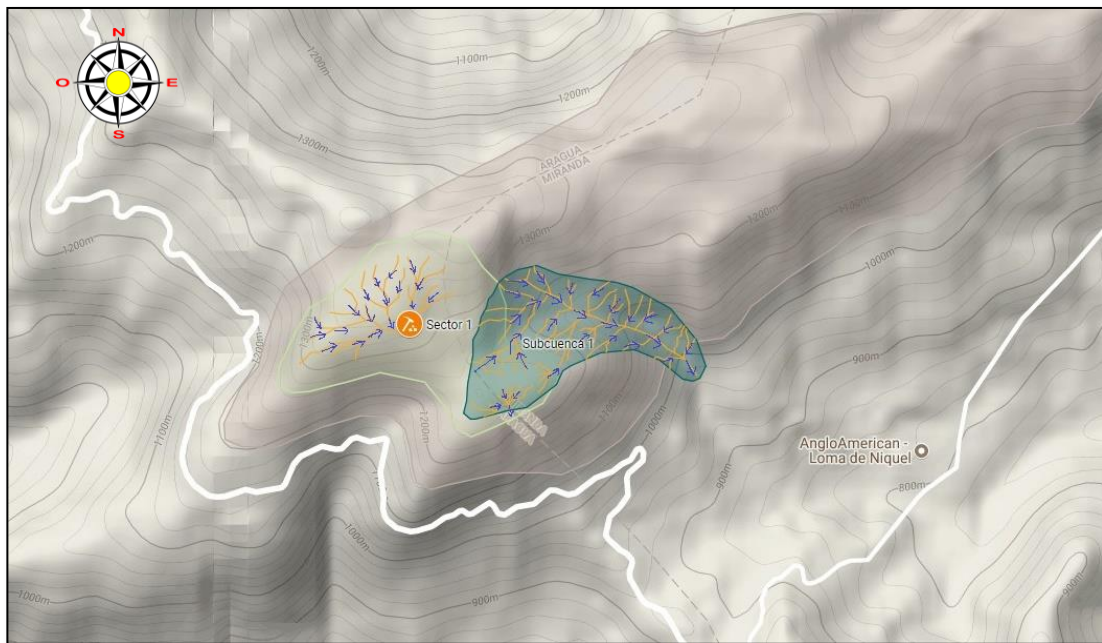


Figura 5. 17 Relieve de la subcuenca que distribuye la carga de agua en el Sector 1.
Fuente: Google Maps (2016).



Figura 5. 18 Vista satelital de la ubicación geográfica de la subcuenca que distribuye la carga de agua en el Sector 1.

Fuente: Google Maps (2016).

Teniendo en cuenta que el terreno tiene una pendiente pronunciada y sin vegetación, el coeficiente de escorrentía es de 0,70 (Ver Tabla 3.13). Se pudo calcular un caudal aproximado del afluente, durante los meses en esta investigación, tomando en consideración la mayor precipitación, debido a que las concentraciones de lluvias varían significativamente, para así tener un criterio acerca de cuál es el volumen de sedimentos movilizados y a qué velocidad son arrastrados.

Con los cálculos realizados mediante la ecuación (10) (la fórmula racional, mencionada en el Capítulo III), los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 5.18.

Tabla 5. 18 Caudal aproximado de la subcuenca del Sector 1.

Cálculo de caudal (Q) para la subcuenca del Sector 1				
Suelo laterítico				
Meses Evaluados	Coef. C	I (mm/hr)	A (Km²)	Q (m³/s)
Septiembre	0,70	23,68	0,421	1,938471111
Octubre	0,70	65,00	0,421	5,320972222
Noviembre	0,70	38,90	0,421	3,184397222
Diciembre	0,70	33,15	0,421	2,713695833

Fuente: Elaboración propia.

El Sector 2, como se muestra en la Figura 5.19, cuenta con un área aproximada de 0,930 km², con una subcuenca hidrográfica que abarca alrededor de 0,472 km², debido a que las divisoras de aguas están orientadas al Noroeste (NO). Los sedimentos arrastrados por esta cuenca son captados por lagunas de sedimentación ubicadas en los niveles 1.190-1.240 msnm.

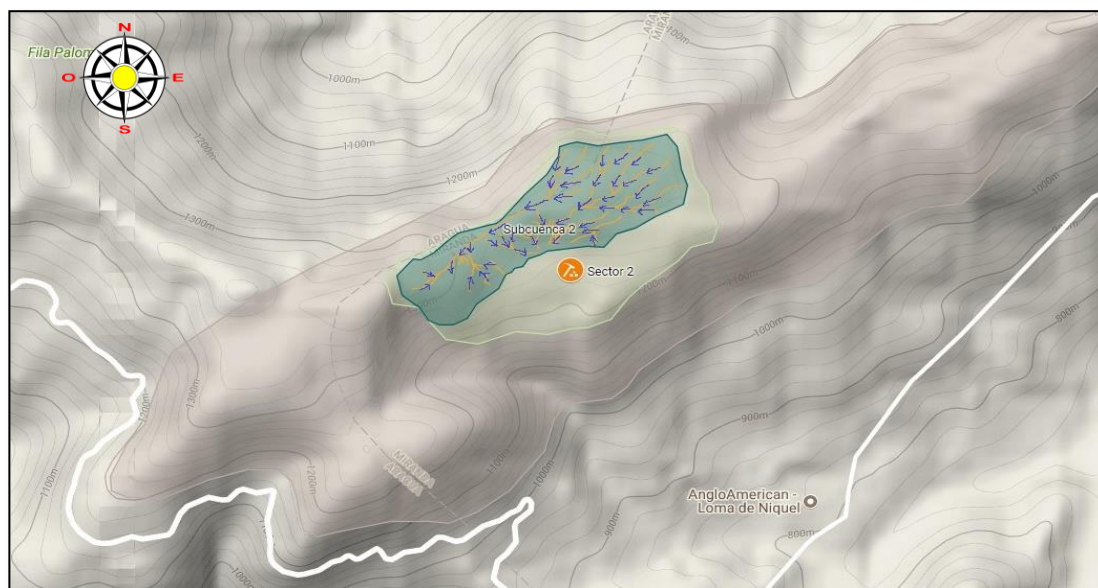


Figura 5. 19 Relieve de la subcuenca que distribuye la carga de agua en el Sector 2.

Fuente: Google Maps (2016).



Figura 5. 20 Vista satelital de la ubicación geográfica de la subcuenca que distribuye la carga de agua en el Sector 2.

Fuente: Google Maps (2016).

Como se trata del mismo yacimiento, se tienen condiciones morfológicas similares a las del Sector 1, una pendiente pronunciada y sin vegetación con igual coeficiente de escorrentía. Se procedió a realizar el cálculo del caudal afluente, tomando en cuenta la máxima precipitación de los meses evaluados. Obteniendo como resultaos los valores que se muestran en la Tabla 5.19.

Tabla 5. 19 Caudal aproximado de la subcuenca del Sector 2.

Cálculo de caudal (Q) para la subcuenca del Sector 2				
Suelo laterítico				
Meses Evaluados	Coef. C	I (mm/hr)	A (Km²)	Q (m³/s)
Septiembre	0,70	23,68	0,472	2,173297778
Octubre	0,70	65,00	0,472	5,965555556
Noviembre	0,70	38,90	0,472	3,570155556
Diciembre	0,70	33,15	0,472	3,042433333

Fuente: Elaboración propia.

En el Sector 3, que tiene un área aproximada de 0,361 km², similar a los otros dos (2) sectores, cuenta con una subcuenca hidrográfica, cuya superficie abarca 0,712 km². Su afluente se encuentra orientado en sentido NO, como muestra la Figura 5.21. La mayoría de los sedimentos arrastrados por el efecto de las lluvias, en esta subcuenca, son recibidos por una laguna de sedimentación que se encuentra en la cota 1.240 msnm. La otra parte del material es transportado por las escorrentías, aguas abajo, y captados por las lagunas que se ubican al lado de la vía principal de acarreo.

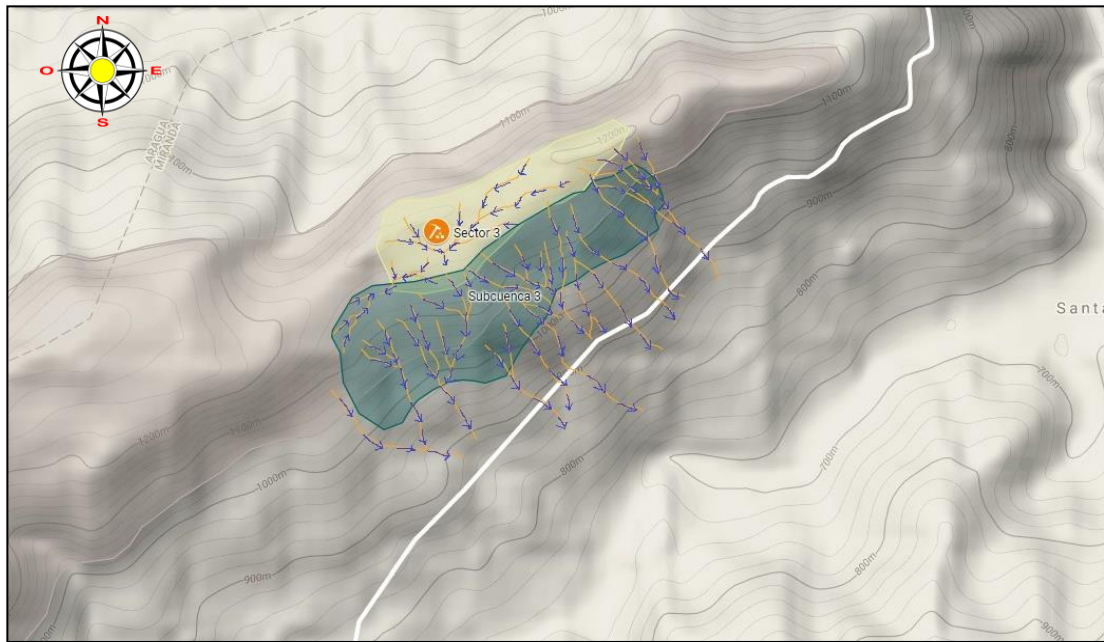


Figura 5. 21 Relieve de la cuenca que distribuye la carga de agua en el Sector 3.
Fuente: Google Maps (2016).

En la misma figura también se observa que los drenajes naturales orientados en sentido noroeste-sureste escurren hacia la carretera principal que conecta a la Autopista Regional del Centro con el Complejo Minero. Estas aguas son conducidas por debajo de la misma hacia el drenaje principal que lleva a la laguna Santa Elena, al este de CVM División Níquel, por lo cual una porción de los sedimentos movilizados en la cresta del Sector 3 son descargados hacia estos drenajes.

Recientemente, han sido observados algunos deslizamientos a lo largo de esta carretera, cuya evaluación no es objetivo de esta investigación.

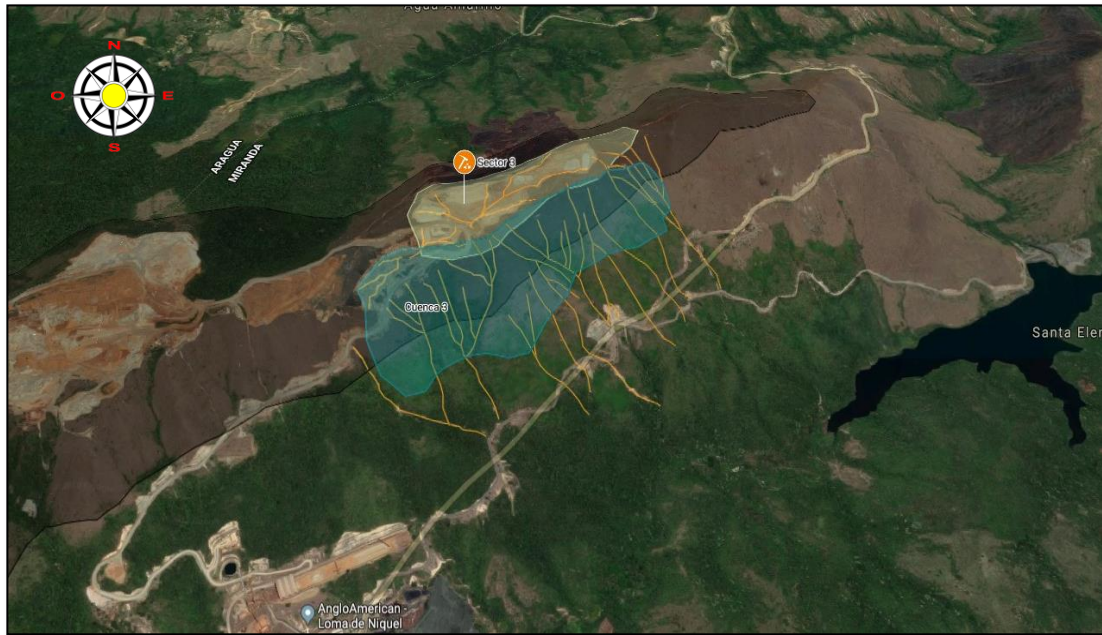


Figura 5. 22 Vista satelital de la ubicación geográfica de la cuenca que distribuye la carga de agua en el Sector 3.

Fuente: Google Maps (2016).

Tabla 5. 20 Caudal aproximado de la subcuenca del Sector 3.

Cálculo de caudal (Q) para la subcuenca del Sector 3				
Suelo laterítico				
Meses Evaluados	Coef. C	I (mm/hr)	A (Km²)	Q (m³/s)
Septiembre	0,70	23,68	0,712	3,278364444
Octubre	0,70	65,00	0,712	8,998888889
Noviembre	0,70	38,90	0,712	5,385488889
Diciembre	0,70	33,15	0,712	4,589433333

Fuente: Elaboración propia.

Analizando los valores de los caudales que escurren por las distintas subcuencas, que aun drenan a la cuenca del rio Mesia, donde se ubica la C.V.M. S.A. División-Níquel, se puede apreciar que el volumen de agua se concentra en la subcuenca del Sector 3, aportando un aproximado de 8,998888889 m³/s. Esto es motivado a la extensión de dicha cuenca, ya que los otros dos (2) parámetros (Cobertura e Intensidad de Precipitación) no sufren modificaciones, por la uniformidad del yacimiento.

Es necesario debe tener presente que las precipitaciones varían en tiempo y espacio y que la elevación del terreno incide frecuentemente en un aumento local de las mismas, al provocar la ascensión de las masas de aire saturadas de vapor de agua. Por otra parte, considerando que solo una parte de la precipitación sobre una cuenca hidrológica alcanza los cauces naturales de agua, debido a que cantidades de agua son retenidas, evaporadas, o infiltradas.

Por tal motivo en este estudio se toma esa fracción que no escurre hacia el cauce natural, dado que es la responsable en los volúmenes de escorrentías, cuyo valor máximo será utilizado para el diseño de las diferentes estructuras de control de aguas, aplicando 0,542 m³/s.

Esto se puede corroborar en el trabajo realizado por Pinilla (1999), en el estado Bolívar, específicamente en el Cuadrilátero Ferrífero de San Isidro, zona que presenta una altitud de 700 msnm, con una precipitación anual de 1.309 mm, donde el caudal empleado para el cálculo de la sección de los canales colectores fue de 0,26738 m³/s. Por otra parte, Van Zanten (2004), en la Mina Paso Diablo, en el estado Zulia, consideró un caudal de diseño de 1,726 m³/s, para esta zona de estudio que cuenta con una elevación de 200 msnm y una precipitación anual de aproximadamente 1.012 mm. En contraste, en la Cantera Carayaca, del estado Vargas, Gavidia (2017) realizó su investigación en la zona que presenta una altitud de 800 msnm y precipitación anual aproximada de 900 mm, calculando un caudal aportado por la cuenca hidrográfica de 60,03 m³/s.

Con lo antes mencionado, se debe observar que son situaciones y lugares diferentes, que a eso se debe la variación de los resultados de los caudales de las distintas cuencas hidrográficas en esta investigación.

Tabla 5. 21 Afectación de la altitud sobre la precipitación.

Autor	Año	Ubicación		Altitud	Precipitación	Caudal de diseño
Pinilla	1999	Venezuela	Edo. Bolívar	700 msnm	1.309 mm/año	0,267 m ³ /s
Van Zanten	2004	Venezuela	Edo. Zulia	200 msnm	1.012 mm/año	1,726 m ³ /s
Cova	2016	Venezuela	Edo. Aragua	1.300 msnm	1.405 mm/año	0,542 m ³ /s
Gavidia	2017	Venezuela	Edo. Vargas	800 msnm	900 mm/año	60,03 m ³ /s

Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se ha obtenido el caudal de diseño, se procede al dimensionamiento del canal, basados en las fórmulas expresadas en la sección 3.7.

5.4.2 Elementos Geométricos del Canal

Para el control es necesario cumplir con las funciones de: conducción de agua, retención de sólidos y disposición temporal y/o final de las aguas clarificadas en los cuerpos naturales receptores. Los elementos diseñados en esta propuesta consisten canales, gaviones y lagunas de sedimentación.

- **Canal de Conducción de Agua**

Una vez determinado el caudal de las cuencas y teniendo en consideración la topografía del yacimiento, con ayuda del programa informático HCANALES (software libre), fue posible diseñar canales y estructuras hidráulicas, de una manera muy sencilla, permitiendo distintas opciones con respecto a la geometría del diseño.

Finalmente, se decidió por un diseño de geometría rectangular, debido a que es la estructura que se alcanzara a realizar con los equipos disponibles en la Empresa, ya que debe ser económico de construir y requerir poco mantenimiento para minimizar los costos.

Después de obtener las proyecciones de las precipitaciones, se calcularon los tamaños de las canalizaciones y de las diferentes estructuras para la retención de sedimentos tomando en consideración un caudal de diseño de 0,542 m³/s, debido que una parte de las aguas se dirigen a los drenajes naturales de la cuenca. Se propone un sistema de drenaje que constará de nueve (9) tramos de canales, en los cuales varía el caudal, debido a que cada subcuenca aporta una cantidad de agua distinta y, por tal razón, las dimensiones consideradas para dicho canal fueron de 0,70 m de ancho por 0,60 m de alto.

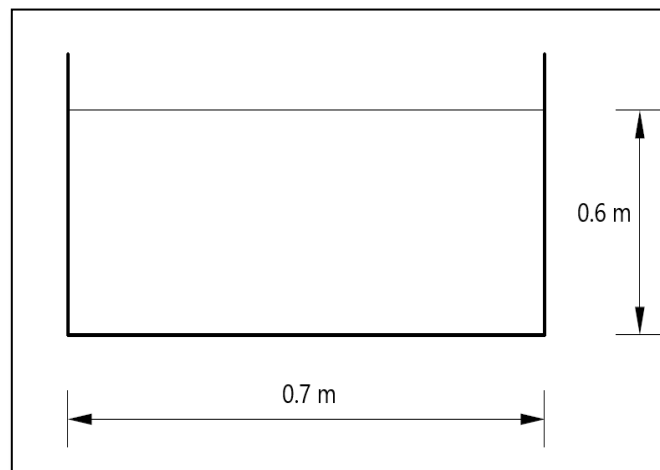


Figura 5. 23 Canal de geometría rectangular.

Utilizando el software mencionado y partiendo de los parámetros de la fórmula de Manning:

Coficiente de rugosidad (n) = 0,020;

Tirante de agua (D) = 0,6 m

Ancho de solera (T) = 0,7 m

Gradiente longitudinal (S) = 0,5 % \approx 0,005 ‰ para toda la zona

La Figura 5.24, se puede observar los resultados arrojados por el software, resaltando un valor de velocidad máxima de 1,29 m/s, debido que se trata de un canal

excavado que carece de vegetación y según el tipo de suelo movilizado (limo arcilloso), cuyo coeficiente de rugosidad (n) es 0,020.

Un valor de velocidad considerado en el rango, ya que autores como Krochin Sviatoslav y Sánchez (ver Capítulo III, sección 3.7), para este tipo de suelo movilizado manejaron valores de velocidad máxima de 0,90 a 1,50 m/s.

En Tabla 5.22, se pueden apreciar los valores de los elementos geométricos de las secciones que conforman los distintos canales: área hidráulica (A), perímetro mojado (P), radio hidráulico (R), ancho total (T), profundidad hidráulica (D), factor de sección (Z). Estos cálculos se realizaron con el fin de hacer una comparación entre los distintos tipos de secciones de canal y justificar la selección realizada.

Tabla 5. 22 Resultados de la determinación de los elementos geométricos para las distintas secciones de canales.

Elementos geométrico de la sección de canales										
Sección del canal	n	S (‰)	A (m ²)	P (m)	R (m)	T (m)	D (m)	Z	Q (m ³ /s)	V (m/s)
Rectangular	0,020	0,005	0,4200	1,9000	0,2211	0,70	0,6	0	0,5429	1,2926
Trapezoidal	0,020	0,005	0,6600	2,1971	0,3004	1,70		1	1,0466	1,5858
Triangular	0,020	0,005	0,3600	1,6971	0,2121	1,20	0,3	1	0,4527	1,2576
Parabólica	0,020	0,005	0,2800	1,4486	0,1933	0,70			0,3309	1,1819
Circular	0,020	0,005	0,3511	1,6565	0,2120	0,48			0,4413	1,2569

Fuente: Elaboración propia.

The screenshot shows the Hcanales software interface with the following data:

Inputs:

- Lugar: CVM-División Níquel
- Proyecto: TEG - SCSSH
- Tramo: Zonas erosionadas
- Revestimiento: Sin vegetación
- Datos:
 - Tirante (y): 0.60 m
 - Ancho de solera (b): 0.70 m
 - Talud (Z): 0
 - Coefficiente de rugosidad (n): 0.020
 - Pendiente (S): 0.005 m/m

Diagram: A schematic of a rectangular channel cross-section with width 'b' and water depth 'y'. The total width of the channel is labeled 'T'.

Results:

- Caudal (Q): 0.5429 m³/s
- Velocidad (v): 1.2926 m/s
- Area hidráulica (A): 0.4200 m²
- Perímetro (p): 1.9000 m
- Radio hidráulico (R): 0.2211 m
- Espejo de agua (T): 0.7000 m
- Número de Froude (F): 0.5328
- Energía específica (E): 0.6852 m-Kg/Kg
- Tipo de flujo: Subcrítico

Figura 5. 24 Elementos de canal de geometría rectangular elaborado en Hcanales.

Teniendo en cuenta que el personal de Planificación de Mina toma las decisiones acerca de cuáles son las funciones que deben ser cumplidas por las estructuras de drenaje, con el uso de este software se realizó un replanteo para el dimensionamiento de los elementos del canal, dando como resultado los valores obtenidos en la Tabla 5.23.

Resultaron dos (2) nuevas configuraciones, para el canal de geometría rectangular, aplicando los criterios siguientes:

- Canal para una máxima eficiencia de conducción de agua.
- Canal para una mínima infiltración del agua en el subsuelo.

Tabla 5. 23 Resultados de la comparación entre criterios del canal (tirante normal, máxima eficiencia y mínima infiltración).

Elementos geométrico de la sección de canal										
Canal Rectangular	n	S (‰)	A (m ²)	P (m)	R (m)	T (m)	D (m)	Z	Q (m ³ /s)	V (m/s)
Tirante normal	0,020	0,005	0,4200	1,9000	0,2211	0,70	0,6	0	0,5429	1,2926
Máxima eficiencia	0,020	0,005	0,4125	1,8167	0,2271	0,90	0,45	0	0,5429	1,3160
Mínima infiltración	0,020	0,005	0,4249	1,9555	0,2173	1,30	0,32	0	0,5429	1,2778

Fuente: Elaboración propia.

Al realizar la comparación de las dos (2) nuevas propuestas, se aprecia la variación de las velocidades, esto se debe a que el tirante de agua y el ancho de la solera sufren modificaciones. Pero como se mencionó anteriormente, todas estas modificaciones se realizarían dependiendo con cuál criterio se diseña el canal y de la carga de sólidos limo arcilloso que es transportada.

5.4.3 Elementos de Retención de Sólidos

Son estructuras que sirven para captar, almacenar los sedimentos provenientes de zonas perturbadas, al mismo tiempo reducir la velocidad de la escorrentía y la energía del agua, evitando el transporte de dichos sedimentos.

- **Gaviones**

Sobre la cuenca alta del río Mesía en el Sector 1; se disponen cuatro (4) gaviones, ubicados al Norte del botadero del S1-1270 al Sur de la vía sobre el paso del bosque, para la retención de los sedimentos transportados por el drenaje natural, como se muestra en la Figura 5.25.

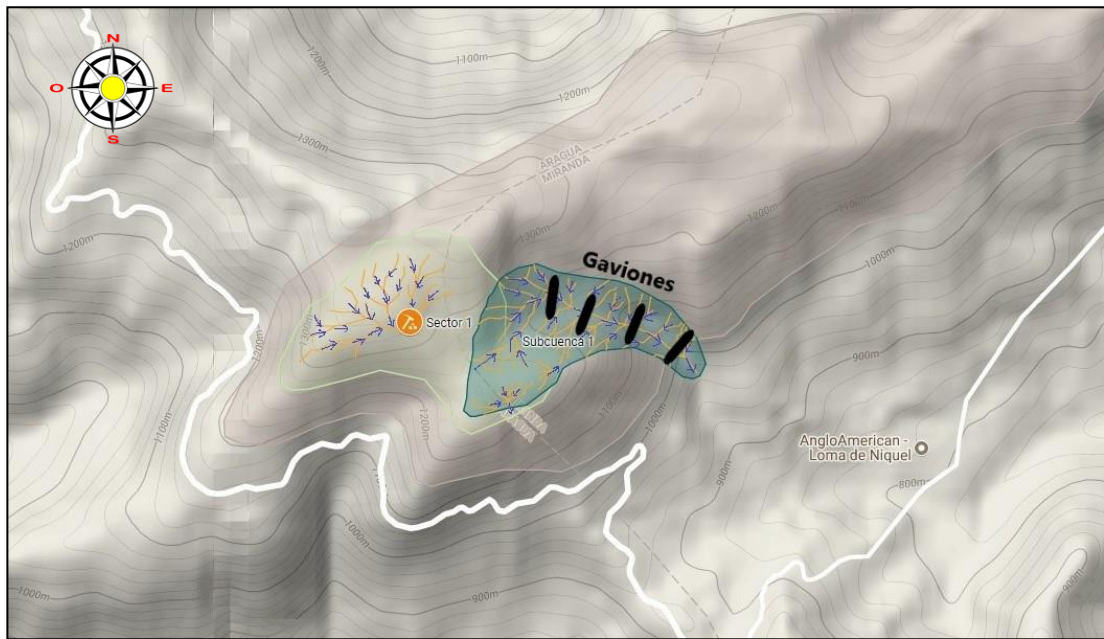


Figura 5. 25 Ubicación geográfica de los gaviones que se encargan de la retención de los sedimentos transportados por las aguas de escorrentías en el Sector 1.
Fuente: Google Maps (2016).

Estos muros de contención, está conformado por 24 jaulas con las siguientes dimensiones:

- 1,5 x 1 x 1 m³ en la base del dique
- 1,5 x 1 x 0,5 m³ (2 jaulas). Estas jaulas han sido colocadas en los bordes, para ajustar el gavión al relieve circundante, correspondiendo en su totalidad a 34,5 m³, lineales. En la Figura 5.26 se muestra un esquema de la distribución de los gaviones.

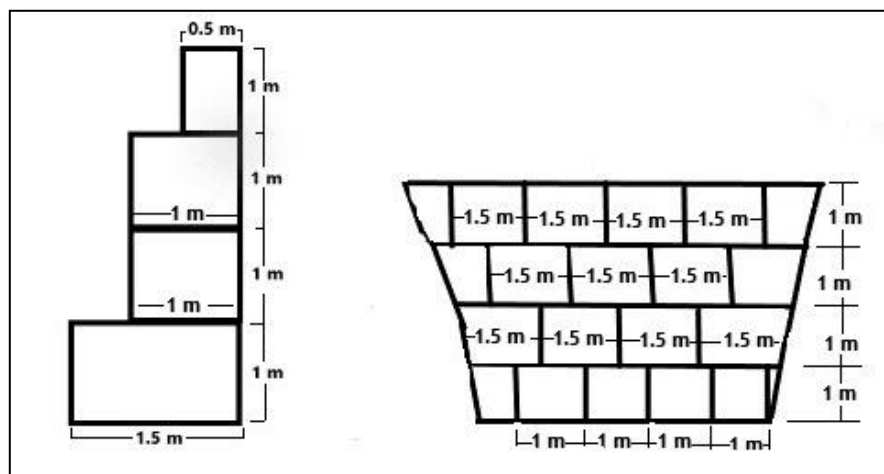


Figura 5. 26 Diagrama de la sección de los gaviones.

La disposición de las jaulas a lo largo de todo el bloque se conforma de la siguiente manera:

- Siete (7) jaulas en la parte inferior, colocadas a lo ancho, para ofrecer mayor resistencia en esta zona, la cual corresponde a la zona donde se concentran los mayores esfuerzos del fluido.
- Once (11) jaulas colocadas a lo largo, en la parte superior del muro.
- Dos (2) jaulas de menores dimensiones, colocadas a los lados de la tercera fila, para nivelar con el terreno.

Estos gaviones estaban modelados para recolectar un volumen máximo 576 toneladas de material granular, calculado a partir del mayor nivel pluviométrico registrado en la zona desde el 2003.



Figura 5. 27 Comparación de altura del gavión.

Fuente: Tomado de Informe Técnico del Departamento de Geología, Loma de Níquel.

Al pasar el tiempo no se les realizaron su respectivo mantenimiento, el cual tuvo como consecuencia que los dos primeros gaviones aguas abajo colapsaran, las bases sufrió desplazamiento por la fuerza de empuje, impidiendo cumplir con la función de disminución de la energía hidráulica del caudal y retención de sedimentos transportados, como se muestra en la Figura 5.28.

Los gaviones restantes presentan una estructura y diseño original en buenas condiciones como se muestra en la Figura 5.28, sin embargo se encuentran cien por ciento (100 %) colmatados de sedimentos, por tanto la corriente de agua fluye libremente por la parte de coronamiento, debido a esto la única función que cumplen es la acción de minimizar la energía del caudal facilitando la sedimentación y minimizando la erosión.



Figura 5. 28 Estructura colapsada por la fuerza de empuje.
Fotografía tomada por José Cova.



Figura 5. 29 Gavión colmatado de sedimentos, se observa la estructura firme.
Fotografía tomada por José Cova.

Teniendo en consideración lo ante expuesto se proponen labores de reparación y mantenimiento de los cuatros (4) gaviones que retienen los sedimentos que van dirigidos al cauce del río Mesia y otros dos (2) que se encuentran al Norte del sector 3, cerca de la quebrada Agua Amarilla, ya que se pondría en riesgo la calidad de agua de la zona.

- **Lagunas de Sedimentación**

En el área de explotación de la C.V.M. S.A. División-Níquel, cuentan la disposición de dieciocho (18) lagunas o cuencas de sedimentación de diferentes volúmenes, ellas son las encargadas de la retención del material que es transportado por las correntías. Como se mencionó al inicio del Capítulo V, las lagunas de captación de sedimentos cuentan con 3 años sin realizarle un mantenimiento adecuado y una restauración de las capacidades volumétricas que permita contener los sedimentos arrastrados por las aguas de lluvia. En la Figura 5.30, se muestra la condición de una de las lagunas perteneciente al complejo minero.



Figura 5. 30 Laguna de retención de sedimentos.
Fotografía tomada por José Cova.

En función de lo antes expuesto, es necesario que los sedimentos depositados en las lagunas sean dragados, retirado y transportados a los depósitos autorizados (escombreras) cuando estén ocupando el 50% de la capacidad, para así evitar el rebose de las mismas en función del buen control de drenajes en la mina y poder garantizar su óptimo desempeño.

Del mismo modo es preciso realizar un replanteo en las dimensiones de las lagunas tal que pueda abarcar una cantidad aproximada a los 5.000 m³, teniendo en

cuenta que el volumen de suelo sedimentado en un mes con una precipitación de 341,92 mm es de 870 m³/ha, meses donde las lluvias son más intensas. Con esto se pueden realizar las labores de limpieza y mantenimiento en el periodo que corresponde a los meses de febrero-marzo.

5.5 Programa de Control y Mantenimiento

Debido que la construcción del sistema de drenajes tiene un costo elevado en el mercado, se estudian las posibilidades de economizar la inversión, a través de la Gerencia de Planificación de Mina desarrollando la acción de Planificación del Control Integral de Sólidos y la Programación del Uso de Equipos (en principio, trabajando con los disponibles). A su vez, designando un Grupo de Control de Sedimentos, encargado de ejecutar los movimientos de tierras, conectar los elementos geométricos del diseño, garantizar el funcionamiento del sistema, sin que afecten las operaciones mineras.

Con la intención de hacer posible que el sistema de drenaje cumpla su función principal, es necesario un mantenimiento preventivo desde el mismo momento que se proyecta su construcción, de manera que su mantenimiento se pueda efectuar en una forma eficiente y económica.

Para ello, es preciso describir las funciones, actividades e instrumentos específicos para realizar el mantenimiento preventivo, como Guía de Buenas Prácticas (o Manual de Procedimiento), tal como se describe:

- Instalación de Pluviómetro con Telemetría (opcionalmente Anemómetro para particulado atmosférico): Mediciones horarias y mensuales transmitidas a la base de datos en la Gerencia de Planificación.
- Supervisión de drenajes y elementos de control: Detección oportuna de las fallas presentes y potenciales y predicción de fallas futuras de los elementos del sistema de control de sedimentos. Adicionalmente, constatar que el pluviómetro se encuentre operativo.
- Técnicas de mantenimiento y construcción de elementos de control: Priorización y captación de financiamiento para procesos requeridos de

limpieza, corrección de fallas, reparaciones y construcción de nuevos elementos.

- Frecuencia de la supervisión: Trimestral. Como mínimo dos (2) al año en caso de no ser posible las cuatro (4) recomendadas por año. Una de éstas debe ser realizada con la anticipación suficiente que permita la limpieza y reparación antes de las temporadas de lluvia (antes de mayo, preferiblemente en febrero). y aquellas supervisiones necesarias ante anuncios por eventos climatológicos extremos en la región caribeña, de alcance escala regional o nacional.
- Informe de Supervisión: al término de la actividad se elabora el instrumento con los resultados obtenidos, señalando:
 - Alcance de los trabajos de supervisión efectuados.
 - Descripción de fallas o defectos de los elementos del sistema de drenaje y control de sedimentos, con indicación de las posibles causas y el grado de urgencia de la reparación.
 - Necesidad de efectuar labores de mantenimiento, con indicación de los sitios supervisados y con la magnitud de los trabajos que se requieren.
 - Durante la supervisión se debe determinar las posibles existencias de:
 - Depósito de materiales sólidos en canales.
 - Derrumbes que obstruyan el libre escurrimiento de las aguas. Estas fallas deben ser ubicadas en los planos elaborados por la Gerencia de Planificación.
 - Erosión de taludes.
 - Grietas.
 - Pérdida del alineamiento original de los canales.
 - Asentamiento en las estructuras de drenaje.
 - Fotografías de las zonas donde se hayan producido fallas, especialmente las de mayor dimensión y/o urgencia.
- Frecuencia del mantenimiento y/o reparación: Trimestral, con especial énfasis en el tercer y cuarto trimestres del año. También las tareas que deriven de los resultados de la supervisión, descritas en el Informe respectivo.

- Memoria Descriptiva: Procedimientos de mantenimiento, reparación y/o construcción de elementos de control de sedimentos, con recomendaciones para el uso de materiales más perdurables en el tiempo, así como necesidades constructivas y de ampliación de capacidades de conducción de aguas y retención de sólidos.
- Modelo de elevación digital: Recepción de datos telemétricos con variables pluviométricas que permitan ampliar la base de datos recopilada a la fecha, en el marco de los cambios climáticos locales y globales.
 - Visualización temporo-espacial de las áreas intervenidas y con necesidades de control de sedimentos, con módulo informático con licencia privada (tipo Siberia®, Caesar®, o equivalente), o bien desarrollado por el Grupo de Tarea.
 - Propuestas para la disposición de residuos en frentes de arranque agotados y previstos para el cierre de mina, planificados para cada sector 1 al 3, que implique costos operativos dentro de los estándares presupuestarios.

Otras actividades del Grupo de Tarea son:

- Planificar y ejecutar un programa de limpieza que consiste en la remoción y desalojo de materiales extraños acumulados, que impida el funcionamiento eficaz en la capacidad prevista de la estructura de drenajes, tales como:
 - En los canales se debe tomar precauciones para mantener limpia la sección transversal y una pendiente longitudinal que garantice el libre escurrimiento del agua (como las ramas, arbustos, etc.)
 - El material removido debe ser transportado y depositados en sitios o lugares donde no pueda ser arrastrado por las aguas hacia la plataforma de la vía o nuevamente hacia los canales del drenaje.
 - Se debe impedir la existencia de aguas no controladas, debido a los efectos indeseables que ellas puedan producir, tales como: erosión de taludes, derrumbes, etc.

CONCLUSIONES

Se presentó la Propuesta de un Sistema de Control Integral de Sólidos en Suspensión Hídrica, en la mina a cielo abierto C.V.M. S.A. División-Níquel, en Tiara, estado Aragua.

Relativo a las Mediciones de Erosión:

El tipo de proceso erosivo observado durante el proceso del estudio fue el de salpique, o dispersión de agregados por efecto del impacto de la lluvia en la superficie del suelo laterítico.

El grado más alto de erosión se presenta en las caras de los taludes, a través de la formación de cárcavas de distintos tamaños.

Fueron medidas las tasas de erosión y las cantidades de suelo movilizado, mensuales, entre septiembre y diciembre 2016, mediante experimentos en campo, con el uso de clavos de erosión (PEC), encontrándose que el proceso dominante fue la erosión:

- En septiembre, se midió una erosión neta (EN) de 304 ton/ha, en tanto que el suelo movilizado (SM) alcanzó las 2.416 ton/ha. La cantidad de erosión media 1.360 ton/ha, y al mismo tiempo la sedimentación fue de 1.056 ton/ha.
- En octubre, se midió una erosión neta (EN) de 384 ton/ha, en tanto que el suelo movilizado (SM) alcanzó los 3.168 ton/ha. La cantidad de erosión media alcanzó 1.776 ton/ha, y la sedimentación fue de 1.392 ton/ha.
- En noviembre, se midió una erosión neta (EN) de 288 ton/ha, en tanto que el suelo movilizado (SM) alcanzó un valor 2.720 ton/ha. La cantidad de erosión media alcanzó 1.504 ton/ha, y la sedimentación fue de 1.216 ton/ha.
- En diciembre no tuvo tantas diferencias con relación a noviembre, arrojando para la erosión neta (EN) 304 ton/ha, en el suelo movilizado 2.544 ton/ha, la erosión media 1.424 ton/ha, con una sedimentación de 1.120 ton/ha.

Un terreno sin vegetación, con una pendiente de 35° puede perder aproximadamente 0,08 m³ de suelo, con solo alcanzar un mínimo de intensidad precipitación de 20 mm.

Los factores que influyen directamente en la erosión son: el grado de la pendiente y su longitud, ya que influye de forma directamente proporcional en la velocidad y en el volumen de agua de escorrentía, así como en su poder erosivo.

Relativo a la Clasificación de Suelos:

La fracción gruesa del suelo fue ensayada por vía seca; dando como resultado un tipo arena gruesa, monogranular.

La fracción fina fue ensayada con equipo laser, donde el 81,86 % de la muestra representa un suelo limo-arcilloso, con una plasticidad media de 15%.

El análisis de los resultados del ensayo de difracción de Rayos X (DRX) arrojó como minerales principales, con muy baja cristalización: Ferroníquel (NiFe₂O₄), Cuarzo, Hematita y Caolinita (en mayor proporción).

La presencia de óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, como son los casos de la Goethita y la Gibbsita, son típicos en suelos lateríticos, confirmando la clasificación obtenida por los ensayos de laboratorio.

La fracción arcillosa influye en la absorción de cantidades elevadas de agua, esta acumulación hace que aparezca la presión hidrostática, que es la causante de desplomes en las caras libres de los taludes.

Las humedades naturales de las muestras estudiadas, expresadas como porcentaje en peso, oscilan entre 35,15 ± 0,20 %. Dicho valor tan elevado corresponde al almacenamiento de agua principalmente como agua de hidratación y capilar, sobre todo en los niveles correspondientes a laterita ferruginosa, que se hidrata con facilidad.

Las densidades aparentes de los suelos, en gr/m³, son las siguientes: 1,60 para Laterita Húmeda; 1,86 para Saproлита Húmeda; 1,48 para Saproлита Seca y 1,75 Roca Fresca.

Relativo a las Estimaciones de Pérdida de Suelos:

Por el método de Ecuación Revisada de Pérdida de Suelo (RUSLE), tomando el valor de protección (C) de 0,001, la erosión potencial se presenta en el mes de noviembre con un valor aproximado de 0,414 ton/ha.

Relativo a la Lluvia de Diseño:

Fueron calculados los caudales de las cuencas hidrográficas a partir de registros de precipitación en estaciones climatológicas:

- Para las precipitaciones medias anuales, se utilizaron las series de 11 estaciones climatológicas con mediciones entre 1940 y 1992, previo al periodo minero.
- Para las precipitaciones horarias, se utilizaron los registros de la estación Tiara, entre 1999 y 2016, durante el uso minero.
- Existe un 1% de probabilidad de que sean superados los 120,55 mm, en 24 horas de precipitación, lo cual corresponde a un evento centenario; en otras palabras, existe un 99% de probabilidades de que el año 2018, la precipitación en 24 horas sea menor o igual a 120,55 mm.
- Considerando una precipitación para el diseño de 90 mm, debido a que tales eventos se presentan en un periodo de retorno de cinco (5) años, se dimensionaron las estructuras de conducción y retención de sólidos.

Referente al Diseño:

Se diseñó un canal de geometría rectangular, debido a que se trata de una labor que se efectuará a bajo costo, con una facilidad de conservación y mantenimiento.

Se propuso las dimensiones del canal y su ajuste quedará a juicio de la Gerencia de Planificación, siendo importante que no se produzca de erosión de fondo, ni en las paredes del canal de descarga.

El dimensionamiento de las lagunas o cuencas de sedimentación deben retener 5.000 m³ de los sólidos en suspensión capaz de sedimentar los sólidos durante el año, tomando en cuenta una tasa de sedimentación de 1.392 ton/ha.

RECOMENDACIONES

Relativo a la Protección Erosiva:

Retirar cubierta vegetal (horizonte A), selectivamente y acumulen por separado en pequeño volumen con un máximo dos metros de altura, para conservar sus características. Para luego emplear este material en la restauración de revegetación de escombreras y taludes finales, para así logra una disminución el efecto de la erosión. En el caso de que esta reserva no asegure la creación de una capa de, al menos, 15 cm de espesor en la restauración final, deberá preverse una aportación exterior de suelos fértiles.

Establecer prioridades de dragado dependiendo del volumen de sedimentación que poseen las lagunas, ya que las lagunas pequeñas se le puede realizar el mantenimiento utilizando la retroexcavadora, este material o escombros se puede emplear como refuerzo en la base del pie de la presa creando bermas que reduzcan la pendiente del talud.

En las lagunas de sedimentación que sea necesario acarrear el material dragado puede ser utilizado para el relleno de los frentes donde no se efectúen la extracción de mineral, estudiando la viabilidad de reforestación con la finalidad de realizar paralelamente el cierre de mina.

Emplear como medida preventiva, un ángulo de 70° para los taludes finales de mina, con bermas de 5 metros de longitud (que pueden variar hasta 10 m en los casos que se requiera) y 5 metros de altura, para así minimizar los deslizamientos de material producido por las presiones hidrostáticas, recomendación propuesta también por Ochoa y Reyes (2011).

Relativo a los Ensayos de Laboratorios:

Dotar el laboratorio de equipo y reactivos necesarios para la realización de los distintos ensayos que se le practican a las muestras.

Relativo al Diseño:

Los resultados de la pérdida de suelo, arrojado por el modelo y el método manejado en este estudio, se utilizaron para hacer una correlación entre ellos y tener una aproximación del valor de la tasa de erosión que sufre la zona, dichos valores se pueden utilizar como soporte al momento de crear una base de datos que permita el almacenamientos de los distintos factores que ayudan a la degradación de la superficies de explotación, en futuros proyectos.

Los modelos de susceptibilidad para la erosión del suelo, son obligatorios para evaluar las habilidades dirigidas a corregir el manejo de la tierra, en especial para el uso minero, para reducir la magnitud de los problemas de la erosión del suelo.

La construcción de gaviones aguas abajo de las estructuras anteriores, garantizando la retención de sólidos y la calidad de agua que llegan al cauce del río Mesia y quebradas Agua amarilla.

Crear un Grupo de Control de Sedimentos destinado a la labores de supervisión, mantenimiento y construcción de los elementos de control de retención de sedimentos. Este grupo realizará como mínimo dos (2) supervisiones al año de todo el sistema de drenaje en caso de no ser posible las cuatro (4) recomendadas por año, realizando un informe donde detalle lo ocurrido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM Standard D-2487, (2006) Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).DOI:10.1520/D2487-06E01, ASTM International, West Conshohocken,PA,USA.
- ASTM Standard D-421, (2007) Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle Size Analysis and Determination of Soils Constants.DOI:10.1520/D0421-8R07, ASTM International, West Conshohocken,PA,USA.
- ASTM Standard D-422, (2007) Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.DOI:10.1520/D0422-63R07, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM Standard D-4318, (2007) Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.DOI:10.1520/D4318-05, ASTM International, West Conshohocken,PA,USA.
- Ayala F. y Vadillo L. (1999). “Manual de Restauración de Terrenos y Evaluación de Impactos Ambientales en Minería”. Cuarta Edición. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid, España. 323 p.
- Barrientos, J. (2007). “Evaluación de vías y drenajes con fines de mejoramiento del rendimiento de operaciones mineras para las canteras de arcilla y caliza en holcim (Venezuela) c.a., planta cumarebo, estado falcón”. Tesis, U.C.V. Escuela de Geología, Minas y Geofísica.
- Brea, J. y Balocchi, F: (2010). “Procesos de erosión – sedimentación en cauces y cuencas”. Documento Técnico N° 22. Programa Hidrológico Internacional.
- Carciente, J. (1980). “Carreteras, estudio y proyecto”. Segunda edición. Caracas. Pp 259-274.
- Castillo, A. (2003). “Curso de Control de Sedimentos en Minería a Cielo Abierto”. Instituto Tecnológico de la Facultad de Ingeniería UCV.
- Constantinesco, I. (1976). “Conservación de suelos para los países en desarrollo”. Boletín de suelos de la FAO. Roma. 91p.

- Cuitiño, H. (1999). “Evaluación cuantitativa de la erosión hídrica superficial en suelos desnudos de la precordillera andina y valle central de la VII región”. Tesis, Universidad de Talca. Facultad de Ciencias Forestales. Talca, Chile.
- FAO, (1994). “Erosión de Suelos en América Latina. Suelos y Agua”. Santiago, Chile. 219p.
- FAO, (1997). “Manejo integrado de cuencas: Documento de referencia para los países de América Latina”. Santiago, Chile. 542p.
- Farfán, J. (2002). “Determinación del índice de erosividad pluvial (R) de la ecuación universal de pérdidas de suelo, para dos estaciones pluviográficas de la VII región del Maule”. Tesis, Universidad de Talca. Facultad de Ciencias Forestales. Talca, Chile.
- González de Juana, Iturralde de Arozena y X. Picard. (1.980). “Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas”. Caracas, Ed. Foninves, 2 tomos. 1.021 p.
- Hudson, N. (1997). “Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía”. Boletín de suelos de la FAO. Roma. 147p.
- Morgan, R. (1997). “Erosión y conservación del suelo”. Tercera edición. Madrid. Ediciones Mundi-Prensa. 342p.
- Ochoa, K. “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. Tesis, U.C.V. Escuela de Geología, Minas y Geofísica.
- Pando, M. y Otros. (2003). “Comparación de métodos en la estimación de la erosión hídrica”. En: Investigaciones geográficas. Boletín del instituto de geografía, UNAM. N°51. México. pp. 23-36.
- Peralta, M. (1976). “Uso, clasificación y conservación de suelos”. Servicio Agrícola y Ganadero. 340p.
- Pino, S. (2008). “Estimación de pérdidas de suelo en tres situaciones de manejo de residuos post-cosecha, usando el modelo RUSLE, en el predio pantanillos, VII región”. Tesis, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Santiago, Chile.

- Sánchez, L. (1995). “Drenaje de minas a cielo abierto”. II Curso internacional de aspecto geológico de protección ambiental. Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de São Paulo. Brasil.
- Suárez, J. (2001). “Deslizamientos: Análisis Geotécnico” Volumen I. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia
- Terzagui, P. (1976) “Mecánica de suelos en Ingeniería Práctica”. Editorial El Ateneo. España.
- Ugas, C y Otros. (1977). “Ensayos de Laboratorio en Mecánica de Suelos, discusión, Evaluación Crítica y Procedimiento”. Inédito. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Central de Venezuela. Ciudad. Caracas, Venezuela.
- Van Zanten, J. (2004). “Diseño de manejo de aguas de mina, en el pit baqueta de la mina paso diablo, Edo. Zulia, como aporte al desarrollo sustentable de la región”. Tesis, U.C.V. Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

ANEXOS I

RESUMEN DE PRECIPITACIONES C.V.M. S.A. DIVISIÓN-NÍQUEL

Históricos de Lluvias de la C.V.M. S.A. División-Níquel 1999-2016.

Tabla I. 1 Precipitaciones totales mensuales de la C.V.M. S.A. División-Níquel 1999-2016.

RESUMEN DE PRECIPITACIONES MENSUALES 1999 HASTA 2016 (mm)																			
MES	AÑO 1999	AÑO 2000	AÑO 2001	AÑO 2002	AÑO 2003	AÑO 2004	AÑO 2005	AÑO 2006	AÑO 2007	AÑO 2008	AÑO 2009	AÑO 2010	AÑO 2011	AÑO 2012	AÑO 2013	AÑO 2014	AÑO 2015	AÑO 2016	Prom. Mensual
ENE	88,95	47,00	36,00	62,00	0,00	43,12	39,00	112,00	44,00	45,00	48,38	23,68	34,51	38,23	37,25	41,84	42,96	43,00	45,94
FEB	24,00	15,00	40,00	19,00	32,20	22,00	36,00	17,00	0,00	26,00	37,89	0,00	19,32	28,94	0,00	15,22	28,00	36,00	22,03
MAR	0,00	41,00	0,00	9,00	0,00	4,00	0,00	10,00	70,00	0,00	8,80	21,99	5,07	25,29	5,41	0,00	0,00	10,00	11,70
ABR	63,00	75,00	62,00	66,00	63,00	134,00	128,00	27,00	13,00	102,00	13,87	253,04	153,92	75,65	88,64	93,68	68,00	0,00	82,21
MAY	20,00	85,00	102,00	310,00	165,00	295,35	310,00	97,00	78,00	84,00	109,61	255,07	211,74	139,95	132,27	108,42	86,42	84,00	148,55
JUN	151,00	306,00	359,00	311,00	276,00	312,00	378,00	237,00	143,00	189,00	65,97	253,72	153,08	159,46	176,93	189,45	93,71	205,00	219,96
JUL	485,00	138,00	190,00	214,00	323,00	175,00	269,00	282,00	120,00	255,00	145,47	120,09	328,15	175,91	214,99	105,89	111,98	210,26	214,65
AGO	446,00	252,00	354,25	268,00	288,00	256,00	312,00	272,00	247,00	116,00	343,71	245,77	110,62	182,92	153,25	222,94	77,81	352,12	250,02
SEP	358,00	313,00	116,00	316,00	175,00	147,00	122,00	145,00	199,00	104,00	69,35	190,97	189,45	196,89	148,51	116,04	129,25	214,77	180,57
OCT	404,00	254,00	258,00	162,00	217,00	219,00	151,00	160,00	148,51	275,37	21,99	209,07	98,11	193,50	107,92	334,57	73,41	341,92	201,63
NOV	274,00	249,00	53,00	155,00	95,00	126,00	162,00	125,00	55,48	88,29	16,91	249,83	78,15	108,80	141,75	98,11	0,00	350,98	134,85
DIC	246,00	79,00	115,00	74,00	80,00	80,15	97,00	32,00	108,59	57,25	48,02	44,05	116,04	94,51	70,70	152,44	0,00	255,45	97,23
Max. Precip.	485,00	313,00	359,00	316,00	323,00	312,00	378,00	282,00	247,00	275,37	343,71	255,07	328,15	196,89	214,99	334,57	129,25	352,12	
ΣTotal anual	2559,95	1854,00	1685,25	1966,00	1714,20	1813,62	2004,00	1516,00	1226,58	1341,92	929,97	1867,28	1498,16	1420,05	1277,62	1478,58	711,53	2103,50	

Tabla I. 2 Precipitaciones máximas mensuales de la C.V.M. S.A. División-Níquel 1999-2016.

RESUMEN DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS MENSUALES 1999 HASTA 2016 (mm)																			
MES	AÑO 1999	AÑO 2000	AÑO 2001	AÑO 2002	AÑO 2003	AÑO 2004	AÑO 2005	AÑO 2006	AÑO 2007	AÑO 2008	AÑO 2009	AÑO 2010	AÑO 2011	AÑO 2012	AÑO 2013	AÑO 2014	AÑO 2015	AÑO 2016	Prom. Mensual
ENE	60,10	37,45	6,15	12,00	0,00	14,35	13,20	54,13	16,58	20,64	13,53	16,91	12,18	25,15	27,80	11,84	14,00	16,50	20,70
FEB	24,39	5,68	8,12	7,00	12,00	6,00	16,30	5,82	0,00	8,46	11,84	0,00	3,72	7,45	0,00	8,00	8,10	18,45	8,41
MAR	0,00	8,40	0,00	5,21	0,00	4,25	0,00	5,07	44,95	0,00	8,46	15,22	2,37	6,15	18,00	0,00	0,00	6,00	6,89
ABR	63,00	22,68	27,45	23,42	22,10	25,30	18,45	17,59	9,30	79,50	10,15	41,27	60,89	22,35	10,00	23,56	41,35	0,00	28,80
MAY	20,56	28,00	25,11	44,22	36,80	56,30	60,20	29,77	26,74	18,94	38,90	30,45	58,53	25,00	33,45	28,35	56,45	37,18	36,39
JUN	21,10	36,15	35,20	31,18	45,15	35,40	39,18	66,31	22,00	30,45	15,22	33,83	17,76	38,25	45,00	65,00	45,68	34,00	36,49
JUL	66,11	34,20	19,00	52,10	32,40	17,25	29,60	42,30	23,00	34,17	40,60	20,00	35,65	42,00	34,95	33,25	35,00	27,65	34,40
AGO	76,90	40,65	49,10	26,80	28,90	31,40	60,15	42,96	34,17	20,64	54,13	35,00	61,90	35,50	60,00	48,95	40,00	76,35	45,75
SEP	35,80	31,00	11,15	31,60	17,80	45,00	50,10	53,80	23,60	30,45	37,20	28,00	39,00	42,00	44,35	46,35	37,00	23,68	34,88
OCT	40,40	25,10	25,80	16,20	25,30	20,15	35,18	40,60	33,80	95,40	18,61	67,65	50,00	62,14	76,65	39,16	19,10	65,00	42,01
NOV	27,40	29,40	35,00	34,90	54,00	34,25	40,65	32,10	11,84	18,61	16,90	37,20	36,95	33,25	40,25	52,00	0,00	38,90	31,87
DIC	30,15	19,00	33,10	25,25	51,15	17,20	45,00	23,63	24,35	15,56	11,85	12,25	15,00	18,00	20,15	24,20	0,00	33,15	23,28
Max. Precip	76,90	40,65	49,10	52,10	54,00	56,30	60,20	66,31	44,95	95,40	54,13	67,65	61,90	62,14	76,65	65,00	56,45	76,35	
Σ Total anual	465,91	317,71	275,18	309,88	325,60	306,85	408,01	414,08	270,33	372,82	277,39	337,78	393,95	357,24	410,60	380,66	296,68	376,86	

ANEXOS II

REPRESENTACIÓN MATEMÁTICA DE LAS CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-PERÍODO DE RETORNO

Tabla II. 1 Periodo de retorno para T = 2 años.

Periodo de retorno para T = 2 años						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	1440	3,0713	7,2724	1,1221	8,1603	52,8878
2	1080	3,7265	6,9847	1,3155	9,1881	48,7863
3	720	4,9140	6,5793	1,5921	10,4748	43,2865
4	480	6,2654	6,1738	1,8350	11,3292	38,1156
5	360	7,4939	5,8861	2,0141	11,8552	34,6462
6	300	8,4030	5,7038	2,1286	12,1410	32,5331
7	240	9,5824	5,4806	2,2599	12,3858	30,0374
8	180	11,3023	5,1930	2,4250	12,5930	26,9668
9	120	14,3736	4,7875	2,6654	12,7605	22,9201
10	60	22,1132	4,0943	3,0962	12,6768	16,7637
	4980	91,2456	58,1555	20,4539	113,5647	346,9435
$Ln(d) = 5,6300$		$d = 278,6649$		$n = -0,6164$		

Fuente: Elaboración propia.

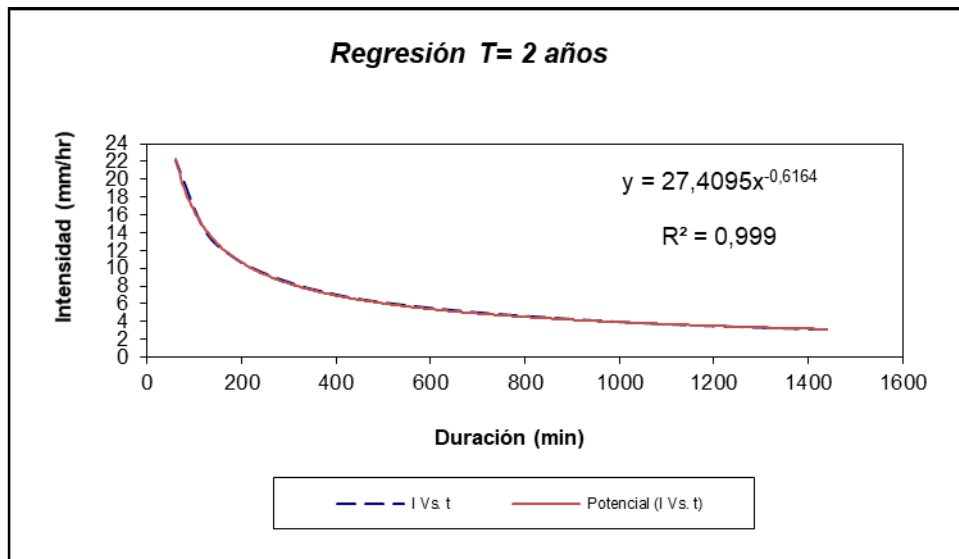


Figura II. 1 Grafica de periodo de retorno para 2 años.

Tabla II. 2 Periodo de retorno para T = 5 años.

Periodo de retorno para T = 5 años						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	1440	3,5939	7,2724	1,2792	9,3031	52,8878
2	1080	4,3606	6,9847	1,4726	10,2857	48,7863
3	720	5,7502	6,5793	1,7492	11,5087	43,2865
4	480	7,3315	6,1738	1,9922	12,2993	38,1156
5	360	8,7691	5,8861	2,1712	12,7801	34,6462
6	300	9,8329	5,7038	2,2857	13,0373	32,5331
7	240	11,2129	5,4806	2,4171	13,2471	30,0374
8	180	13,2255	5,1930	2,5821	13,4090	26,9668
9	120	16,8194	4,7875	2,8225	13,5128	22,9201
10	60	25,8759	4,0943	3,2533	13,3202	16,7637
	4980	106,7718	58,1555	22,0253	122,7032	346,9435
Ln (d) = 5,7871		d = 326,0820		n = -0,6164		

Fuente: Elaboración propia.

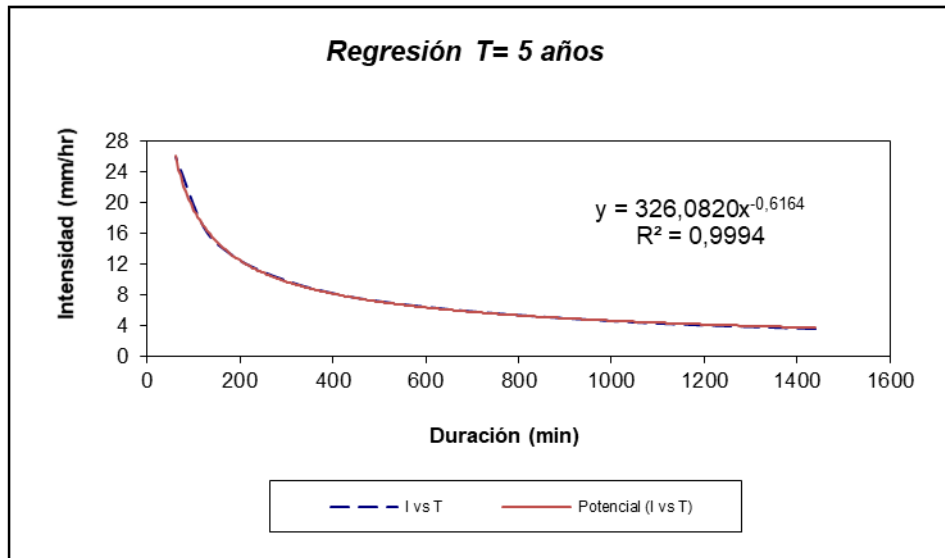


Figura II. 2 Grafica de periodo de retorno para 5 años.

Tabla II. 3 Periodo de retorno para T = 10 años.

Periodo de retorno para T = 10 años						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	1440	3,9399	7,2724	1,3712	9,9716	52,8878
2	1080	4,7804	6,9847	1,5645	10,9278	48,7863
3	720	6,3038	6,5793	1,8412	12,1134	43,2865
4	480	8,0374	6,1738	2,0841	12,8668	38,1156
5	360	9,6133	5,8861	2,2632	13,3211	34,6462
6	300	10,7795	5,7038	2,3776	13,5616	32,5331
7	240	12,2924	5,4806	2,5090	13,7508	30,0374
8	180	14,4988	5,1930	2,6741	13,8863	26,9668
9	120	18,4387	4,7875	2,9145	13,9529	22,9201
10	60	28,3672	4,0943	3,3452	13,6965	16,7637
	4980	117,0514	58,1555	22,9445	128,0489	346,9435
$Ln(d) = 5,8791$		$d = 357,4763$		$n = -0,6164$		

Fuente: Elaboración propia.

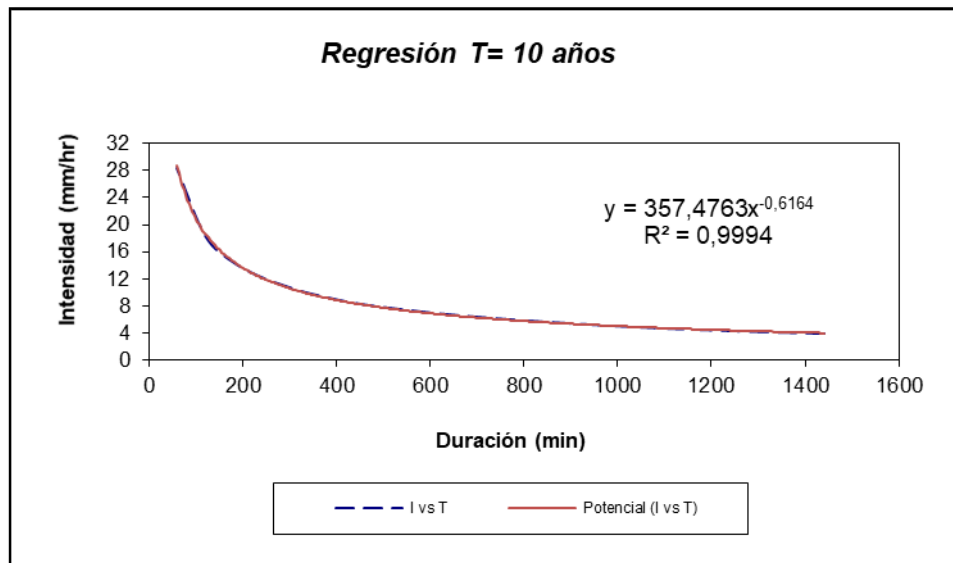


Figura II. 3 Grafica de periodo de retorno para 10 años.

Tabla II. 4 Periodo de retorno para T = 25 años.

Periodo de retorno para T = 25 años						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	1440	4,3771	7,2724	1,4764	10,7368	52,8878
2	1080	4,6689	6,9847	1,5409	10,7629	48,7863
3	720	7,0033	6,5793	1,9464	12,8057	43,2865
4	480	8,9292	6,1738	2,1893	13,5165	38,1156
5	360	10,6801	5,8861	2,3684	13,9405	34,6462
6	300	11,9757	5,7038	2,4829	14,1618	32,5331
7	240	13,6565	5,4806	2,6142	14,3276	30,0374
8	180	16,1076	5,1930	2,7793	14,4327	26,9668
9	120	20,4847	4,7875	3,0197	14,4567	22,9201
10	60	31,5149	4,0943	3,4505	14,1274	16,7637
	4980	129,3979	58,1555	23,8679	133,2686	346,9435
Ln (d) = 6,0717		d = 433,4025		n = -0,6336		

Fuente: Elaboración propia.

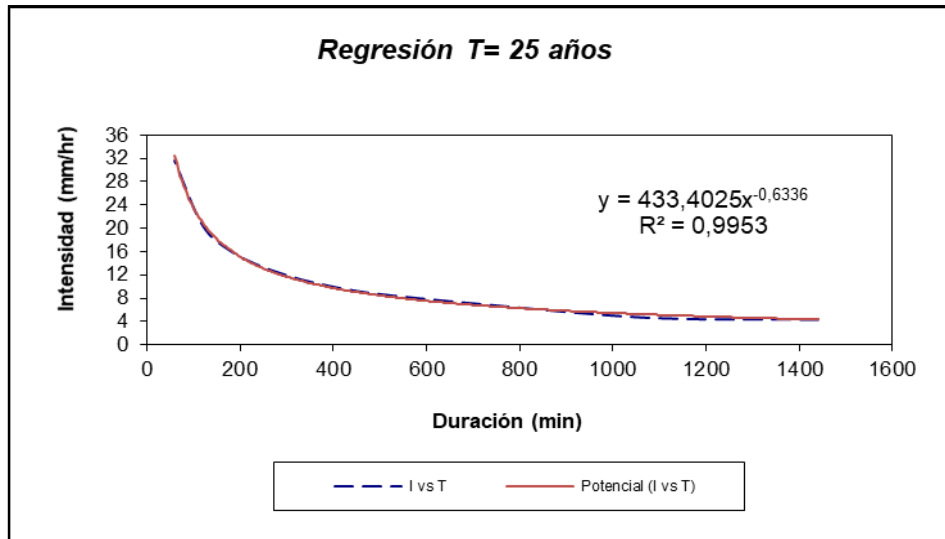


Figura II. 4 Grafica de periodo de retorno para 25 años.

Tabla II. 5 Periodo de retorno para T = 50 años.

Periodo de retorno para T = 50 años						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	1440	4,7014	7,2724	1,5479	11,2567	52,8878
2	1080	5,7044	6,9847	1,7412	12,1620	48,7863
3	720	7,5222	6,5793	2,0179	13,2760	43,2865
4	480	9,5909	6,1738	2,2608	13,9578	38,1156
5	360	11,4714	5,8861	2,4399	14,3613	34,6462
6	300	12,8630	5,7038	2,5544	14,5695	32,5331
7	240	14,6684	5,4806	2,6857	14,7193	30,0374
8	180	17,3011	5,1930	2,8508	14,8039	26,9668
9	120	22,0025	4,7875	3,0912	14,7989	22,9201
10	60	33,8501	4,0943	3,5219	14,4200	16,7637
	4980	139,6754	58,1555	24,7115	138,3254	346,9435
Ln (d) = 6,0558		d = 426,5700		n = -0,6164		

Fuente: Elaboración propia.

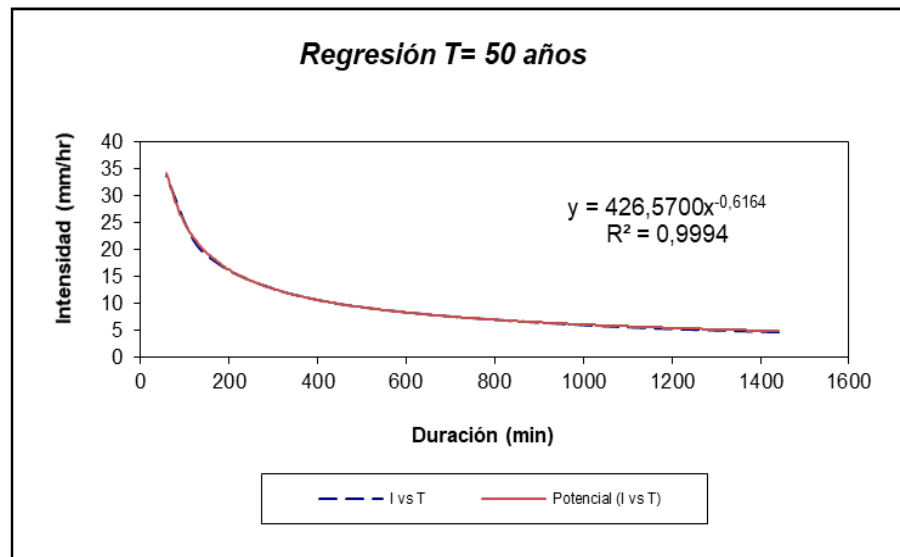


Figura II. 5 Grafica de periodo de retorno para 50 años.

Tabla II. 6 Periodo de retorno para T = 100 años.

Periodo de retorno para T = 100 años						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	1440	5,0233	7,2724	1,6141	11,7383	52,8878
2	1080	6,0950	6,9847	1,8075	12,6246	48,7863
3	720	8,0373	6,5793	2,0841	13,7118	43,2865
4	480	10,2476	6,1738	2,3270	14,3667	38,1156
5	360	12,2569	5,8861	2,5061	14,7511	34,6462
6	300	13,7438	5,7038	2,6206	14,9473	32,5331
7	240	15,6728	5,4806	2,7519	15,0823	30,0374
8	180	18,4859	5,1930	2,9170	15,1479	26,9668
9	120	23,5092	4,7875	3,1574	15,1160	22,9201
10	60	36,1680	4,0943	3,5882	14,6912	16,7637
	4980	149,2398	58,1555	25,3739	142,1772	346,9435
Ln (d) = 6,1220		d = 455,7798		n = -0,6164		

Fuente: Elaboración propia.

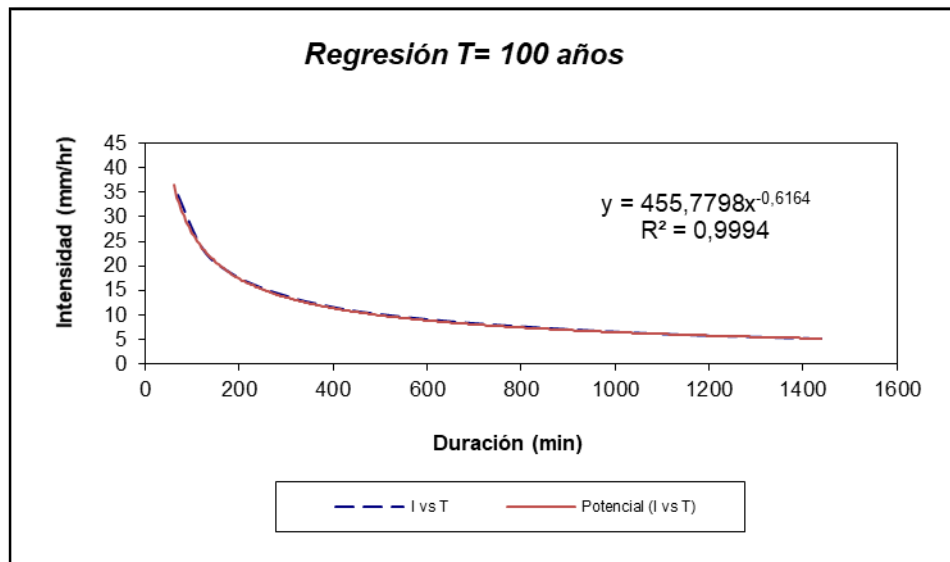


Figura II. 6 Grafica de periodo de retorno para 100 años.

Tabla II. 7 Resumen de aplicación de regresión potencial para distintos años.

Resumen de aplicación de regresión potencial		
Periodo de Retorno (años)	Término ctte. de regresión (d)	Coef. de regresión [n]
2	278,66492879931	-0,61638608809
5	326,08203070975	-0,61638608809
10	357,47627807265	-0,61638608809
25	433,40249355774	-0,63362500463
50	426,57002784573	-0,61638608809
100	455,77977824399	-0,61638608809
Promedio =	379,66258953820	-0,61925924085

Fuente: Elaboración propia.

Tabla II. 8 Regresión potencial.

Regresión potencial						
Nº	x	y	ln x	ln y	ln x*ln y	(lnx)^2
1	2	278,6649	0,6931	5,6300	3,9024	0,4805
2	5	326,0820	1,6094	5,7871	9,3141	2,5903
3	10	357,4763	2,3026	5,8791	13,5371	5,3019
4	25	433,4025	3,2189	6,0717	19,5439	10,3612
5	50	426,5700	3,9120	6,0558	23,6903	15,3039
6	100	455,7798	4,6052	6,1220	28,1929	21,2076
	192	2277,9755	16,3412	35,5457	98,1807	55,2454
Ln (K) = 5,6109		K = 273,4020		m = 0,1121		

Fuente: Elaboración propia.

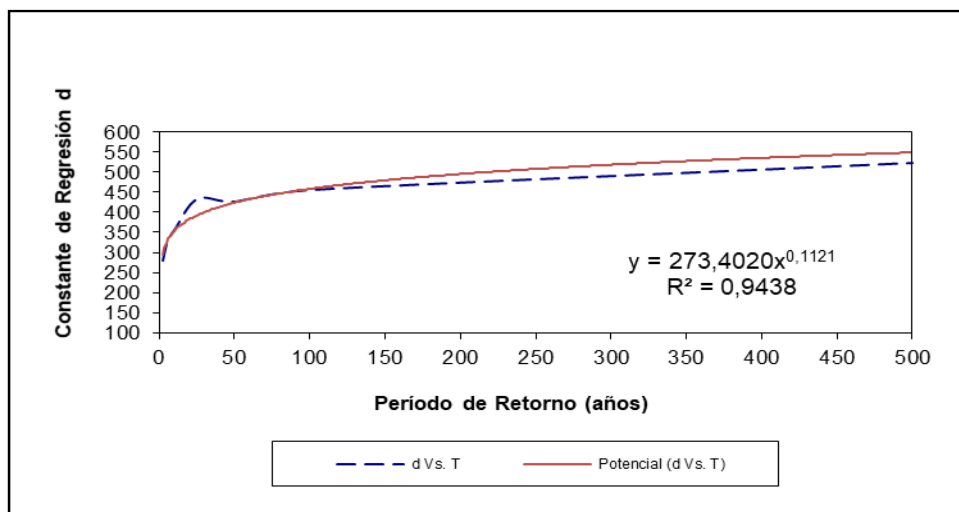


Figura II. 7 Grafica de retorno potencial.

ANEXOS III

EVALUACIÓN LOCAL DE LOS PROCESOS EROSIVOS

Tabla III. 1 Determinación de alturas medias por métodos de los clavos

Arrastre de Sedimentos en CVM Lomas de Níquel para el mes de Septiembre 2016.			
Días	Intensidad de lluvias (mm/hr).	Perd. Suelo (mm).	Acum. Sedimentos (mm).
1	4,40	0,00	0,00
2	5,41	0,00	0,00
3	8,46	0,00	0,00
4	9,13	0,00	0,00
5	5,75	5,00	3,00
6	0,00	0,00	0,00
7	10,53	0,00	0,00
8	13,53	10,00	8,00
9	7,10	5,00	6,00
10	0,00	0,00	0,00
11	4,74	0,00	0,00
12	0,34	2,00	0,00
13	0,00	3,00	2,00
14	23,68	0,00	0,00
15	16,58	0,00	0,00
16	0,00	13,00	10,00
17	15,90	0,00	0,00
18	5,35	10,00	9,00
19	4,68	0,00	0,00
20	8,65	2,00	0,00
21	0,00	0,00	0,00
22	14,88	0,00	0,00
23	1,01	12,00	9,00
24	0,00	0,00	0,00
25	21,14	0,00	0,00
26	20,30	10,00	7,00
27	1,69	8,00	5,00
28	0,00	0,00	0,00
29	11,50	0,00	0,00
30	0,00	5,00	7,00
Σ Total	214,77	85,00	66,00
Prom	9,76	7,08	6,60
Max	23,68		

D.A = 1,6 ton/m³
Erosión (mm) del mes = 85,00
Erosión (m³/ha) = 850,00
Erosión (ton/ha) = 1360,00
Sedimentación (mm) del mes = 66,00
Sedimentación (m³/ha) = 660,00
Sedimentación (ton/ha) = 1056,00
Erosión neta (ton/ha) = 304,00
Suelo movilizado (ton/ha) = 2416,00

Tabla III. 2 Cuantificación de alturas de la altura de las PEC - Septiembre 2016.

Sector 1		Erosión (mm)										Sedimentación (mm)									
Parcela N° 1											Parcela N° 2										
Clavos											Clavos										
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	4	6	4	5	5	3	3	4	5	5	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
2	6	3	6	5	6	4	6	5	5	4	2	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
3	4	5	4	2	6	3	4	5	2	4	3	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4
4	5	6	6	6	4	3	4	4	4	5	4	5	5	4	4	4	4	4	3	3	3
5	5	6	5	5	5	5	6	5	5	5	5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
6	5	5	4	5	4	3	4	5	5	6	6	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
7	4	4	4	4	3	3	3	5	2	5	7	2	2	2	2	2	2	3	3	3	2
8	3	5	5	5	3	4	4	6	4	5	8	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
9	5	5	4	6	5	6	3	5	4	5	9	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1
10	6	6	5	3	6	4	5	5	6	5	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla III. 3 Cuantificación de alturas de la altura de las PEC – Septiembre 2016.

Sector 2		Erosión (mm)										Sedimentación (mm)									
Parcela N° 1											Parcela N° 2										
Clavos											Clavos										
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	6	6	4	5	5	3	3	4	5	5	1	6	6	6	6	5	5	5	5	5	5
2	6	4	6	5	6	5	6	5	5	4	2	6	6	6	6	5	5	5	5	5	5
3	5	5	4	5	6	5	4	5	2	3	3	6	6	6	6	4	4	4	4	4	4
4	5	6	6	6	4	4	4	4	4	5	4	6	6	6	5	4	4	4	3	3	3
5	5	6	5	5	5	5	5	4	5	4	5	6	6	5	4	4	3	3	3	3	3
6	5	5	5	4	4	4	4	4	5	6	6	5	5	4	4	3	3	3	3	3	3
7	4	4	5	4	3	3	6	4	2	5	7	5	5	4	3	2	2	3	3	3	2
8	6	6	6	6	3	4	4	6	4	5	8	4	4	3	3	2	2	2	2	2	2
9	5	5	4	6	5	6	3	5	6	5	9	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
10	4	5	3	6	6	6	4	4	6	6	10	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla III. 4 Cuantificación de alturas de la altura de las PEC – Septiembre 2016.

Sector 3		Erosión (mm)										Sedimentación (mm)									
Parcela N° 1											Parcela N° 2										
Clavos											Clavos										
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	6	4	4	5	5	5	6	3	5	4	1	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5
2	5	3	6	5	6	4	6	5	5	5	2	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5
3	4	5	3	3	6	3	5	5	4	6	3	4	4	4	5	5	4	4	4	4	4
4	6	6	5	6	4	3	5	6	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	4	4	4
5	3	6	4	6	4	4	5	6	5	4	5	4	5	4	5	5	5	5	4	4	4
6	5	5	6	5	4	3	4	6	5	5	6	4	5	4	5	5	5	5	6	4	4
7	4	4	4	4	4	4	4	6	4	5	7	4	5	5	5	4	4	5	6	6	6
8	6	6	6	5	4	4	4	6	4	6	8	5	5	5	5	5	5	6	6	6	6
9	4	5	4	6	5	6	5	5	4	6	9	5	5	5	5	5	5	5	4	4	5
10	3	5	4	5	6	3	5	5	4	4	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Tabla III. 5 Determinación de alturas medias por métodos de los clavos

Arrastre de Sedimentos en CVM Lomas de Níquel para el mes de Octubre 2016.			
Días	Intensidad de lluvias (mm/hr).	Perd. Suelo (mm).	Acum. Sedimentos (mm).
1	0,68	0,00	0,00
2	2,14	0,00	0,00
3	5,24	0,00	0,00
4	65,00	0,00	0,00
5	11,50	20,00	24,00
6	11,84	7,00	4,00
7	10,49	6,00	5,00
8	31,12	0,00	0,00
9	13,53	13,00	10,00
10	15,90	9,00	6,00
11	13,53	0,00	0,00
12	24,36	12,00	8,00
13	8,80	0,00	0,00
14	0,00	0,00	0,00
15	14,74	0,00	0,00
16	0,00	6,00	2,00
17	23,38	0,00	0,00
18	4,40	9,00	11,00
19	17,59	5,00	0,00
20	0,00	0,00	0,00
21	6,14	9,00	7,00
22	8,15	0,00	0,00
23	11,00	0,00	0,00
24	8,00	8,00	5,00
25	16,00	0,00	0,00
26	4,00	4,00	3,00
27	0,00	0,00	0,00
28	10,51	0,00	0,00
29	0,85	3,00	2,00
30	3,04	0,00	0,00
31	0,00	0,00	0,00
Σ Total	341,92	111,00	87,00
Prom	13,15	8,54	7,25
Max	65,00		

D.A = 1;6 ton/m³
Erosión (mm) del mes = 111,00
Erosión (m³/ha) = 1110,00
Erosión (ton/ha) = 1776,00
Sedimentación (mm) del mes = 87,00
Sedimentación (m³/ha) = 870,00
Sedimentación (ton/ha) = 1392,00
Erosión neta (ton/ha) = 384,00
Suelo movilizado (ton/ha) = 3168,00

Tabla III. 6 Cuantificación de alturas de la altura de las PEC – Octubre 2016.

Sector 1		Erosión (mm)										Sedimentación (mm)										
Parcela N° 1											Parcela N° 2											
Clavos											Clavos											
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	19	19	19	20	20	20	19	19	19	19	1	20	20	20	20	20	20	20	20	19	19	
2	19	19	19	20	20	20	19	19	19	20	2	20	20	20	20	20	20	20	20	20	21	21
3	19	19	19	20	20	20	20	20	20	20	3	20	21	21	20	20	20	21	20	22	22	
4	19	19	19	20	20	20	20	20	19	19	4	20	22	22	22	24	24	24	25	25	25	
5	19	19	19	20	20	20	20	20	19	19	5	22	22	22	22	24	24	25	25	25	25	
6	20	20	20	20	20	20	20	20	19	19	6	23	24	24	24	24	24	24	24	25	25	
7	20	20	20	20	20	20	20	20	20	19	7	24	25	25	25	25	25	25	25	25	25	
8	20	20	19	20	19	20	20	19	20	19	8	25	25	25	25	25	25	27	27	27	27	
9	20	20	20	20	20	20	20	19	20	19	9	26	26	26	26	26	26	27	27	27	27	
10	20	20	20	20	19	20	20	19	20	19	10	27	27	27	27	27	28	28	28	28	28	

Tabla III. 7 Cuantificación de alturas de la altura de las PEC – Octubre 2016.

Sector 2		Erosión (mm)									Sedimentación (mm)										
Parcela N° 1											Parcela N° 2										
Clavos											Clavos										
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	20	19	19	19	19	19	19	19	19	19	1	21	21	21	22	22	22	21	21	23	22
2	20	19	19	19	19	19	19	19	19	20	2	21	21	22	22	22	22	22	22	22	22
3	20	19	19	19	19	19	19	20	20	20	3	20	21	22	22	22	22	22	24	22	22
4	19	19	20	19	20	20	20	20	19	20	4	20	22	22	22	24	24	24	25	25	25
5	20	19	19	19	20	20	20	20	19	20	5	22	22	22	22	24	24	25	25	25	25
6	20	20	20	20	20	20	20	20	19	19	6	23	24	24	24	24	24	24	24	25	25
7	18	18	20	20	20	20	20	20	20	19	7	24	25	25	25	24	24	24	25	25	25
8	19	20	19	20	19	20	20	19	20	19	8	25	25	25	25	25	25	27	25	27	27
9	19	20	20	20	20	20	20	19	20	20	9	26	26	26	26	26	26	27	27	25	25
10	19	20	20	20	19	20	20	20	20	20	10	27	27	27	27	27	28	28	28	28	26

Tabla III. 8 Cuantificación de alturas de la altura de las PEC – Octubre 2016.

Sector 3		Erosión (mm)										Sedimentación (mm)									
Parcela N° 1											Parcela N° 2										
Clavos											Clavos										
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	21	21	21	21	20	20	19	19	19	19	1	24	24	24	24	24	24	24	23	23	23
2	21	21	21	21	20	20	20	20	20	20	2	24	24	24	24	24	23	23	23	23	23
3	21	21	21	21	21	20	20	20	20	20	3	24	24	24	24	24	23	22	22	22	22
4	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	4	24	24	24	24	24	23	22	22	22	22
5	21	21	21	21	21	20	21	21	21	21	5	22	22	22	22	23	23	23	23	23	23
6	20	20	20	20	20	20	20	21	21	21	6	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
7	20	20	20	20	20	20	20	20	21	21	7	21	21	21	20	21	21	20	20	20	20
8	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	8	20	20	20	17	19	18	17	20	20	19
9	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	9	20	20	17	16	17	18	16	18	19	16
10	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	10	16	15	17	17	17	16	17	18	17	16

Tabla III. 9 Determinación de alturas medias por métodos de los clavos

Arrastre de Sedimentos en CVM Lomas de Níquel para el mes de Noviembre 2016.

Días	Intensidad de lluvias (mm/hr).	Perd. Suelo (mm).	Acum. Sedimentos (mm).
1	22,67	5,00	3,00
2	0,00	0,00	0,00
3	27,40	6,00	4,00
4	5,41	0,00	0,00
5	6,77	5,00	3,00
6	0,00	0,00	0,00
7	38,90	0,00	0,00
8	26,39	15,00	12,00
9	13,53	5,00	4,00
10	2,03	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,00
12	9,81	0,00	0,00
13	11,84	3,00	3,00
14	37,21	0,00	0,00
15	17,59	12,00	18,00
16	0,68	0,00	0,00
17	0,00	6,00	5,00
18	18,94	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00
20	10,15	10,00	6,00
21	10,15	3,00	0,00
22	7,44	2,00	3,00
23	0,00	0,00	0,00
24	10,15	0,00	0,00
25	22,67	6,00	3,00
26	2,03	4,00	5,00
27	12,86	0,00	0,00
28	18,44	9,00	4,00
29	1,01	3,00	3,00
30	16,91	0,00	0,00
∑ Total	350,98	94,00	76,00
Prom	14,62	6,27	5,43
Max	38,90		

D.A = 1;6 ton/m³
Erosión (mm) del mes = 94,00
Erosión (m³/ha) = 940,00
Erosión (ton/ha) = 1504,00
Sedimentación (mm) del mes = 76,00
Sedimentación (m³/ha) = 760,00
Sedimentación (ton/ha) = 1216,00
Erosión neta (ton/ha) = 288,00
Suelo movilizado (ton/ha) = 2720,00

Tabla III. 10 Cuantificación de alturas de la altura de las PEC – Noviembre 2016.

Sector 1		Erosión (mm)										Sedimentación (mm)									
Parcela N° 1											Parcela N° 2										
Clavos											Clavos										
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5	6	6	6	6	5	5	4	5	5	1	3	3	3	3	3	3	4	3	3	4
2	4	5	6	6	6	5	5	5	5	5	2	3	2	2	2	2	3	3	3	2	4
3	5	4	6	4	5	5	5	5	4	5	3	3	4	4	4	4	4	4	3	2	4
4	5	6	6	6	6	4	5	5	5	5	4	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4
5	5	5	5	6	6	6	5	6	5	6	5	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4
6	5	4	6	4	4	6	6	5	4	5	6	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3
7	3	4	4	4	4	6	6	6	5	5	7	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3
8	5	3	4	4	5	4	4	6	6	4	8	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3
9	3	5	5	5	5	5	6	6	6	4	9	4	3	3	3	3	3	3	3	4	2
10	5	5	5	6	5	5	5	5	5	5	10	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2

Tabla III. 11 Cuantificación de alturas de la altura de las PEC – Noviembre 2016.

Sector 2		Erosión (mm)										Sedimentación (mm)									
Parcela N° 1											Parcela N° 2										
Clavos											Clavos										
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5	6	5	5	6	5	5	4	5	5	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3
2	4	5	5	6	6	5	5	6	5	4	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3
3	6	6	5	4	5	5	5	6	4	4	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3
4	6	6	6	6	5	4	5	6	3	4	4	2	2	8	2	2	2	3	3	4	4
5	6	6	5	6	5	6	5	6	5	5	5	3	2	2	2	3	3	3	3	4	4
6	6	6	6	4	4	6	6	5	6	6	6	3	3	2	2	3	3	3	3	3	4
7	5	6	4	4	4	6	6	5	6	3	7	2	2	2	2	2	2	3	3	3	4
8	5	3	4	4	5	4	4	5	5	3	8	2	2	2	2	2	3	4	4	4	4
9	5	5	5	4	5	5	6	5	5	6	9	2	2	2	2	2	3	3	4	4	4
10	5	5	5	6	5	5	6	5	6	4	10	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4

Tabla III. 12 Cuantificación de alturas de la altura de las PEC – Noviembre 2016.

Sector 3		Erosión (mm)										Sedimentación (mm)									
Parcela N° 1											Parcela N° 2										
Clavos											Clavos										
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5	6	5	5	6	5	5	6	5	5	1	3	3	3	4	4	4	3	3	3	2
2	4	5	5	6	6	5	5	6	5	5	2	3	3	3	4	4	4	3	3	2	2
3	3	5	5	4	5	5	5	5	4	5	3	3	3	3	4	4	4	3	3	2	2
4	6	6	5	5	5	4	5	6	3	5	4	3	3	3	4	4	4	3	3	2	2
5	6	6	5	6	5	6	5	4	5	5	5	4	4	4	4	4	4	3	3	2	2
6	6	6	5	4	4	6	6	5	6	6	6	4	4	4	4	4	4	3	2	2	2
7	5	5	4	4	5	6	6	5	6	6	7	4	4	4	4	4	4	3	2	2	2
8	5	3	4	3	5	4	4	5	5	5	8	4	4	4	4	4	4	3	2	2	2
9	5	5	5	3	5	5	5	5	5	5	9	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2
10	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	10	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2

Tabla III. 13 Determinación de alturas medias por métodos de los clavos

Arrastre de Sedimentos en CVM Lomas de Niquel para el mes de Diciembre 2016.			
Días	Intensidad de lluvias (mm/hr).	Perd. Suelo (mm).	Acum. Sedimentos (mm).
1	23,68	0,00	0,00
2	3,04	10,00	8,00
3	0,00	0,00	0,00
4	14,58	0,00	0,00
5	7,16	0,00	0,00
6	6,77	8,00	6,00
7	3,04	0,00	0,00
8	5,07	4,00	4,00
9	2,71	2,00	0,00
10	27,06	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,00
12	5,07	10,00	7,00
13	0,00	0,00	3,00
14	18,00	0,00	0,00
15	4,00	6,00	4,00
16	12,00	0,00	0,00
17	6,09	9,00	5,00
18	4,71	3,00	3,00
19	13,68	6,00	3,00
20	0,00	0,00	0,00
21	0,00	0,00	0,00
22	5,75	0,00	0,00
23	13,53	0,00	0,00
24	0,00	0,00	0,00
25	4,06	0,00	0,00
26	7,10	8,00	7,00
27	0,00	0,00	0,00
28	33,15	0,00	0,00
29	24,36	13,00	11,00
30	10,83	10,00	9,00
31	0,00	0,00	0,00
Σ Total	255,45	89,00	70,00
Prom	11,11	7,42	5,83
Max	33,15		

D.A = 1;6 ton/m³
Erosión (mm) del mes = 89,00
Erosión (m³/ha) = 890,00
Erosión (ton/ha) = 1424,00
Sedimentación (mm) del mes = 70,00
Sedimentación (m³/ha) = 700,00
Sedimentación (ton/ha) = 1120,00
Erosión neta (ton/ha) = 304,00
Suelo movilizado (ton/ha) = 2544,00

Tabla III. 14 Cuantificación de alturas de la altura de las PEC – Diciembre 2016.

Sector 1		Erosión (mm)										Sedimentación (mm)									
Parcela N° 1											Parcela N° 2										
Clavos											Clavos										
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	10	11	10	12	10	11	9	8	10	12	1	10	10	10	10	10	10	9	10	9	10
2	11	10	12	9	10	8	9	10	11	10	2	10	9	9	9	9	10	10	10	9	10
3	11	9	11	10	10	8	9	10	10	11	3	10	8	10	10	10	9	9	10	9	11
4	10	11	10	12	10	10	10	10	11	10	4	8	8	10	10	10	10	10	11	8	10
5	10	10	9	10	12	11	10	10	10	11	5	8	8	9	8	9	9	8	10	8	10
6	10	10	10	9	11	10	10	9	8	10	6	8	8	8	8	9	9	10	10	9	10
7	10	11	10	10	10	11	10	10	10	10	7	8	8	8	8	9	9	10	10	9	10
8	10	10	9	10	11	10	10	10	10	10	8	9	8	8	8	9	9	10	10	11	11
9	9	11	10	11	10	10	10	10	10	10	9	9	11	10	10	10	9	10	10	10	11
10	11	10	10	10	9	9	9	9	9	9	10	9	10	10	11	10	10	10	9	9	9

Tabla III. 15 Cuantificación de alturas de la altura de las PEC – Diciembre 2016.

Sector 2		Erosión (mm)										Sedimentación (mm)									
Parcela N° 1											Parcela N° 2										
Clavos											Clavos										
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	12	10	11	12	10	11	9	8	10	12	1	8	8	8	8	8	8	9	9	10	10
2	10	10	11	11	10	8	9	10	11	10	2	8	8	8	8	8	8	8	9	10	10
3	11	10	11	11	10	8	9	10	10	11	3	8	8	8	8	8	8	8	9	10	10
4	10	11	10	10	10	10	10	10	11	10	4	8	8	8	8	8	8	8	9	10	11
5	11	10	10	10	12	11	10	10	10	11	5	9	8	8	8	8	8	8	9	10	11
6	10	10	10	10	11	10	10	9	8	10	6	9	9	8	8	8	10	10	10	10	11
7	11	11	10	10	10	11	10	10	10	9	7	9	9	9	9	9	10	10	10	10	11
8	10	10	9	10	11	10	10	11	10	9	8	9	9	9	9	9	10	11	11	11	11
9	9	11	10	11	10	10	10	11	10	9	9	9	9	9	9	9	10	10	11	11	11
10	11	10	10	10	9	10	10	10	10	9	10	10	10	10	10	10	10	11	11	11	11

Tabla III. 16 Cuantificación de alturas de la altura de las PEC – Diciembre 2016.

Sector 3		Erosión (mm)										Sedimentación (mm)									
Parcela N° 1											Parcela N° 2										
Clavos											Clavos										
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	8	9	10	12	10	10	9	8	10	11	1	7	7	7	8	8	8	7	7	7	6
2	10	10	10	11	10	9	9	10	11	10	2	7	7	7	8	8	8	7	7	6	6
3	11	10	11	11	10	9	10	10	10	11	3	7	7	7	8	8	8	7	7	6	6
4	10	11	11	11	10	9	10	10	11	10	4	7	7	7	8	8	8	7	7	6	6
5	11	10	10	10	11	11	10	10	10	11	5	8	8	8	8	8	8	7	7	7	6
6	10	10	10	10	11	10	10	9	8	10	6	8	8	8	8	8	8	7	6	6	6
7	11	11	10	10	10	11	10	10	10	9	7	8	8	8	8	8	8	7	6	6	6
8	10	10	9	10	10	10	10	11	10	11	8	8	8	8	8	8	8	7	6	6	6
9	9	11	10	11	10	10	10	11	10	10	9	7	7	7	7	7	7	7	6	6	6
10	11	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6

Determinación de los Factores RUSLE

Factor K

Se obtuvo de la Tabla 3. 8, donde observamos valores tabulados presentado por Kirkby y Morgan, (1980), la cual están asociados la textura y el contenido de materia orgánica del suelo.

Factor LS

Para este factor se tomó en consideración la ecuación propuesta por Wischmeier y Smith (1978), adaptándolo a la situación que se presentaba.

$$l = 650 \text{ (m)}$$

$$m = 0,5 \text{ pendiente } 3 - 10\%$$

$$S = 7,70 \%$$

Tabla III. 17 Valores de los factores topográficos.

L	S	LS
5,41958424	0,79874051	4,328841492

Factor R

Se utilizó la ecuación de regresión propuesta por Páez *et al.*, (1989), para determinar la erosividad de las lluvias mensualmente en bosque seco tropical: $R = -190,5 + 8,8 L$, en función de la lámina promedio mensual (L (mm)).

Tabla III. 18 Valores del factor erosividad.

R Según su lámina promedio mensual de lluvia (mm)				
Lluvias mensuales	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	214,77	341,92	350,98	255,45
R	1699,48	2818,40	2898,12	2057,46

Los valores de los factores C y P, por tratarse de un terreno que cumple una función minera y no tiene ninguna protección, los factores tienden a un valor = 1.

ANEXOS IV INFORME TÉCNICO REPORTE DE RESULTADOS

CAIC Centro de Asistencia a la Industria Cerámica REPORTE DE RESULTADOS

Muestra: Sedimentos de Lomas de Niquel - Average

SOP Utilizado: Arcilla Illítica

Fecha: viernes, 24 de noviembre de 2017 1:27:32

Origen y Tipo de Muestra: Empresa = Lomas de Niquel

Operador: Andrés Marichal

Fecha de Analisis: viernes, 24 de noviembre de 2017 1:27:32

Lote de referencia de la Muestra:

Resultados Obtenidos por: Averaged

Observaciones: *Muestra diluida, 70% ultrasonido.*

Tipo de Partículas: ARCILLA ILLITICA Densidad de la muestra: 2.600 g/cc Accesorio: Hydro 2000G (A)
 Ind. Ref. Partículas: 1.565 Modelo de Analisis: General purpose Obscuracion: 15,80 %
 Absorción: 0.1 Rango de Medicion: 0.020 Hasta 1478.000 um
 Dispersante Utilizado: Water Emulacion de Resultados: Off RESIDUAL: 3.270 %
 Ind. Ref. del Dispersante: 1.330
 Concentracion: 0.0086 %Vol D[4,3] = 16.641 um Area de Superficie Especifica: 0.7 m²/g
 Amplitud: 3.939 D[3,2] = 3.295 um Uniformidad: 1.22 um
 Unidad de Resultados: Volume Modal: 23.316 um

d (0.1) : 1.026 um				d (0.5) : 10.416 um				d (0.9) : 42.051 um	
Size (um)	Vol% Index%	Size (um)	Vol% Index%	Size (um)	Vol% Index%	Size (um)	Volume in %	Size (um)	Volume in %
0.010	0.00	0.363	0.01	13.153	56.24	478.630	100.00	0.010	0.00
0.011	0.00	0.417	0.38	15.136	60.10	540.541	100.00	0.011	0.00
0.013	0.00	0.479	1.14	17.378	64.13	630.957	100.00	0.013	0.00
0.015	0.00	0.550	2.27	19.953	68.30	724.436	100.00	0.015	0.00
0.017	0.00	0.631	3.73	22.909	72.56	831.764	100.00	0.017	0.00
0.020	0.00	0.724	5.40	26.303	76.83	954.993	100.00	0.020	0.00
0.023	0.00	0.832	7.21	30.200	81.01	1096.478	100.00	0.023	0.00
0.026	0.00	0.955	9.05	34.674	84.99	1259.925	100.00	0.026	0.00
0.030	0.00	1.096	10.85	39.811	88.66	1445.440	100.00	0.030	0.00
0.035	0.00	1.259	12.58	45.709	91.91	1659.587	100.00	0.035	0.00
0.040	0.00	1.445	14.25	52.481	94.68	1905.461	100.00	0.040	0.00
0.046	0.00	1.660	15.90	60.256	96.90	2197.762	100.00	0.046	0.00
0.052	0.00	1.905	17.59	69.183	98.53	2511.886	100.00	0.052	0.00
0.060	0.00	2.188	19.38	79.433	99.55	2884.032	100.00	0.060	0.00
0.069	0.00	2.512	21.09	91.201	99.96	3311.311	100.00	0.069	0.00
0.079	0.00	2.884	23.34	104.713	100.00	3801.894	100.00	0.079	0.00
0.091	0.00	3.311	25.55	120.226	100.00	4365.158	100.00	0.091	0.00
0.105	0.00	3.802	27.92	138.038	100.00	5011.872	100.00	0.105	0.00
0.120	0.00	4.365	30.46	158.489	100.00	5754.399	100.00	0.120	0.00
0.138	0.00	5.012	33.16	181.970	100.00	6606.934	100.00	0.138	0.00
0.158	0.00	5.754	36.03	209.930	100.00	7565.776	100.00	0.158	0.00
0.182	0.00	6.607	39.06	239.883	100.00	8709.636	100.00	0.182	0.00
0.209	0.00	7.586	42.23	275.423	100.00	10000.000	100.00	0.209	0.00
0.240	0.00	8.710	45.53	316.228	100.00			0.240	0.00
0.275	0.00	10.000	48.96	363.078	100.00			0.275	0.00
0.316	0.00	11.482	52.53	416.869	100.00			0.316	0.01
								0.363	0.01
								13.153	3.71
								478.630	0.00

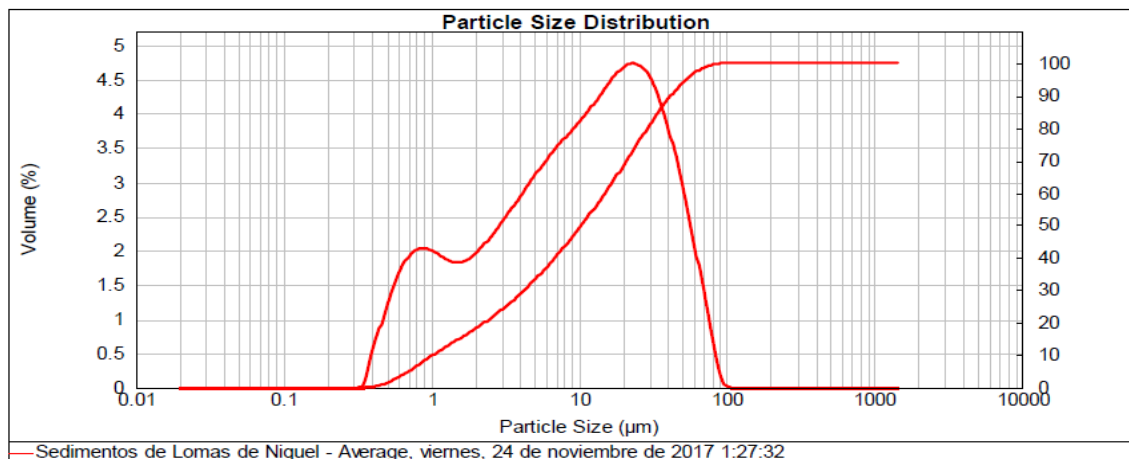


Figura IV. 1 Informe Técnico

ANEXOS V

ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DE LAS SECCIONES DE LOS CANALES


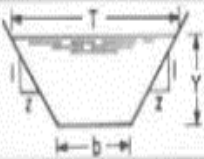
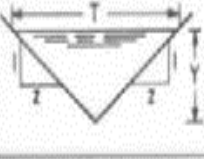
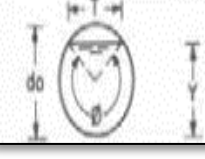
SECCION	AREA A	PERIMETRO MOJADO P	RA. HIDRAULICO R	ANCHO TOTAL T	PROF. HIDR. D	FACTOR DE SECCION Z
	by	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	b	y	$by^{1.48}$
	$(b+zy)y$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$b+2zy$	$\frac{[(b+zy)\cdot y]}{b+2zy}$	$\frac{[(b+zy)y]^{1.48}}{\sqrt{b+2zy}}$
	zy^2	$2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$	$2zy$	$1/2y$	$\frac{\sqrt{2}}{2} zy^{2.48}$
	$1/8(\theta - \text{sen}\theta)do^2$	$1/2\theta do$	$1/4\left(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta}\right)do$	$\frac{(\text{sen}^{1/2}\theta)do}{2\sqrt{y(do-y)}}$	$\frac{1}{8}\left(\frac{\theta - \text{sen}\theta}{\text{sen}^{1/2}\theta}\right)do$	$\frac{\sqrt{2}}{32} \frac{(\theta - \text{sen}\theta)^{1.48}}{(\text{sen}^{1/2}\theta)^{0.48}} do^{2.48}$

Figura V. 1 Elementos geométricos de las secciones de los canales.

Fuente: Jacob Carciente, 1977.