

TRABAJO DE ASCENSO

**CONTROL DE SEDIMENTOS EN MINERÍA
VENEZOLANA A CIELO ABIERTO**

**Presentado ante la Ilustre
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
por la Profesora Alba J. Castillo P.
para optar a la Categoría Agregado**

Caracas, Julio de 2017.

DEDICATORIA

**Al Principio Femenino
Yara**

AGRADECIMIENTOS

Si fuera posible agrupar muchos nombres en esta primera línea, estarían aquí...

A mi Hijo Alejandro Daniel, quien se estaba creyendo que este trabajo de ascenso lo había terminado y consignado apenas partió para Santiago de Chile, en 2010.

A mis familiares y amistades por auparme permanentemente con el afecto y la confianza que depositan en mi capacidad para cumplir con mis compromisos.

A las y los investigadores que alimentaron esta investigación, con sus trabajos especiales de grado y sus pasantías industriales, en el conjunto de minas a cielo abierto, en el territorio nacional: Ana, Aurora, Janet, José, Karla, María Angélica, María Teresa, Nirby, Ysaida, Yosmary, Gerardo, Hildemaro, Javier, Johan, Karlo, Kenneth, Ronald, Salvatore, Sixto y Teobaldo.

Al personal de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, especialmente a quienes con su respeto y consideración asumieron el prolongado periodo de desarrollo de este trabajo, especialmente a mis Jefas de Departamento, Profesoras Aurora Piña y Katherine Silva.

A mi querido colega y amigo, Profesor José Cavada, quien ha sobrellevado pacientemente mis interminables conversaciones sobre el tema, e incluso mis dislates, asesorándome y proveyéndome de numerosas fuentes bibliográficas y hemerográficas para esta investigación.

A mi querido Profesor Oscar Andrés López, por su disposición a revisar el documento y aportar valiosas observaciones para mejorar el mismo.

Al personal de la Biblioteca de Geología, Minas y Geofísica, por su atención y amabilidad al facilitarme los documentos necesarios para dar soporte a esta investigación, especialmente a la Licenciada Morella Mikatti.

A la Ingeniera Sasha Cazal, por su especializada ayuda en la edición final del texto y, por darme la enorme satisfacción de asumir plenamente la investigación en minería y ambiente, particularmente al aportar sus extraordinarias capacidades cognitivas para la planificación de cierre de mina.

A los Ingenieros de Minas Ángel Soubllette y Yonder Melo, por su ayuda en la edición del material.

CONTENIDO
CONTROL DE SEDIMENTOS EN MINERÍA VENEZOLANA A CIELO ABIERTO

RESUMEN	8
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	
1.1 Planteamiento del problema	9
1.2 Investigaciones previas	10
1.3 Justificación de la investigación.....	15
1.4 Objetivos	
1.4.1 General	17
1.4.2 Específicos	17
1.5 Metodología, alcance y limitaciones	18
1.6 Organización del contenido del documento	18
 CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DE PROYECTOS MINEROS A CIELO ABIERTO EN VENEZUELA	
2.1 Introducción	19
2.2 Características geoambientales en áreas de proyectos mineros.	20
2.2.1 Estado Aragua, Ferroníquel, mina Loma de Níquel.....	22
2.2.2 Estado Bolívar	
2.2.2.1 Bauxita, mina Los Pijigüaos.	26
2.2.2.2 Mena ferrífera, minas del Cuadrilátero San Isidro.	29
2.2.2.3 Mena aurífera, minas Hoja de Lata, Bizkaitarra y Playa Blanca.	31
2.2.3 Distrito Capital	
2.2.3.1 Piedra picada (mármol), cantera Nacional.....	36
2.2.3.2 Arena, arenera Tacagua Vieja.....	37
2.2.4 Estado Falcón	
2.2.4.1 Caliza, cantera El Mampostal.	39
2.2.4.2 Arcilla, cantera El Veral.	40
2.2.5 Estado Miranda.	
2.2.5.1 Caliza: cantera El Melero	40
2.2.5.2 Arena: areneras del río Grande o Caucagua	42
2.2.6 Estado Zulia, Carbón, mina Paso Diablo.....	43
2.3 Características de diseño minero.	46
2.3.1 Estado Aragua, Ferroníquel, mina Loma de Níquel.....	47
2.3.2 Estado Bolívar	
2.3.2.1 Bauxita, mina Los Pijigüaos.	48
2.3.2.2 Mena ferrífera, minas del Cuadrilátero de San Isidro.....	49
2.3.2.3 Mena aurífera, sectores Hoja de Lata, Bizkaitarra y Playa Blanca.....	51
2.3.3 Distrito Capital	
2.3.3.1 Piedra picada (mármol), cantera Nacional.....	53
2.3.3.2 Arena, arenera Tacagua Vieja.	53
2.3.4 Estado Falcón	
2.3.4.1 Caliza, cantera El Mampostal.	54
2.3.4.2 Arcilla, cantera El Veral.....	54
2.3.5 Estado Miranda	
2.3.5.1 Caliza cantera El Melero:	56

2.3.5.2 Arena: areneras del río Grande o Cauçagua	57
2.3.6. Estado Zulia	58
2.4 Análisis comparativo de variables entre proyectos mineros	60
2.5 Incidencia de variables en producción de sedimentos	62
 CAPÍTULO 3: APROXIMACIÓN DISCIPLINARIA EN EL PROCESO EROSIÓN-SEDIMENTACIÓN	
3.1 Erosión-sedimentación desde lo ambiental	64
3.2 Erosión-Sedimentación en lo Litosférico	65
3.2.1 Desde la geocronología y la geodinámica.....	66
3.2.2 Desde la geodinámica y la geomorfología.....	68
3.2.3 Desde la sedimentología y la dinámica de fluidos.....	72
3.3 Erosión-Sedimentación en lo Biológico.....	80
3.3.1 Desde la Ciencia del Suelo.....	80
3.3.2 Desde lo Hidrológico	89
3.4 Erosión-Sedimentación en lo Social	97
3.4.1. Desde los Sistemas de Información Geográfica	102
3.5 Estado actual de los cálculos en minería	103
3.6 Otros métodos alternativos: geoestadísticos y estocásticos	104
 CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS DE INVESTIGACIONES APLICADAS	
4.1 Resultados de investigación y análisis	106
4.1.1 Estudios entre 1997 y 2002	107
4.1.2 Estudios entre 2002 y 2017	109
4.2 Prácticas y técnicas para el control de sedimentos.....	117
4.2.1 Estabilización de taludes en suelos y rocas.....	118
4.2.2 Conducción de aguas de mina.....	119
4.2.3 Contención y retención de sólidos en suspensión.....	120
 CAPÍTULO 5: PROPUESTA METODOLÓGICA PARA ANÁLISIS, PLANIFICACIÓN Y DISEÑO.	
5.1 Integración de herramientas de cálculo y diseño.....	125
5.2 Premisas para modelación conceptual y matemática	127
5.2.1 Proceso de generación-difusión-disposición (Sgdd).....	127
5.2.2 Escenarios de difusión de sedimentos.....	129
5.2.3 Acoplamiento de métodos de análisis	131
5.3 Estrategias de control de sedimentos, por escenarios.....	132
 CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
6.1 Conclusiones Generales	135
6.2 Recomendaciones	138
6.2.1 Generales.....	138
6.2.2 Específicas	139
 REFERENCIAS BIBLIOHEMEROGRÁFICAS	 141

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Ubicación relativa de proyectos mineros a cielo abierto en Venezuela	21
Figura 2.2. Ubicación del proyecto Loma de Níquel en el estado Aragua.	22
Figura 2.3. Corte vertical litológico del yacimiento Loma de Hierro.	24
Figura 2.4. Ubicación relativa de proyectos mineros en el estado Bolívar, en: bauxita, mineral de hierro y mineral aurífero.	25
Figura 2.5. Vista aérea de bloque minero en mina Los Pijigüaos.	26
Figura 2.6. Perfil geológico del yacimiento laterítico de cerro Páez, mina Los Pijigüaos.	28
Figura 2.7. Fotografía del cerro San Isidro, Cuadrilátero Ferrífero de San Isidro.	30
Figura 2.8. a) Sección geológica vertical del cerro San Isidro.	32
Figura 2.8. b) Sección geológica vertical del cerro Los Barrancos.	32
Figura 2.9. Mapa de provincias geológicas y Cinturón de Rocas Verdes (CRV), estado Bolívar ...	35
Figura 2.10. Fotografía del cauce de la quebrada Tacagua, arenera Minataca, C.A.	38
Figura 2.11. Ubicación relativa del municipio Zamora, estado Falcón.	39
Figura 2.12. Ubicación relativa de cantera El Melero y areneras de Caucagua, estado Miranda.	41
Figura 2.13. Ubicación relativa mina Paso Diablo, cuenca carbonífera de Guasare, estado Zulia.	43
Figura 2.14. Diagrama de columna litoestratigráfica Fm. Marcelina, mina Paso Diablo.	45
Figura 2.15. Representación gráfica para cálculo de probabilidad de falla del talud.	47
Figura 2.16. Diseño geométrico de fosa abierta en Cuadrilátero Ferrífero de San Isidro.	50
Figura 2.17. Fotografías con método de arranque y beneficio mineral en proyecto Bizkaitarra.	52
Figura 2.18. Fotografía aérea de extracción en cerro Mampostal.	55
Figura 2.19. Fotografía con extracción de arcilla en el cerro El Veral.	56
Figura 2.20. Diseño geométrico de talud en cantera El Melero.	57
Figura 2.21. Fotografía con contacto entre litologías, caliza y esquistos en frente minero.	57
Figura 2.22. Fotografías aéreas de areneras en cauce del río Grande o Caucagua.	59
Figura 2.23. Mapa con sectores de mina Paso Diablo, Carbones de Guasare.	60
Figura 3.1 Esquema con visión de interdisciplinaridad de las ciencias.	64
Figura 3.2 Bloques esquemáticos de modelos de erosión en remodelado de cinturón montañoso	70
Figura 3.3. Diagrama de Hjulström para estimación de velocidades de inicio de movimiento de partículas de suelo	77
Figura 3.4 a) Representación descriptiva del ciclo hidrológico.	81
Figura 3.4 b) Representación conceptual del ciclo hidrológico.	82
Figura 3.5 Esquema con factores de erosionabilidad de suelos.	83
Figura 3.6. Ábaco para el cálculo del factor K.	87
Figura 3.7 Esquemas representativos de cuenca hidrográfica.	91
Figura 3.8 Mapa (sin escala) con la variabilidad pluviométrica en Venezuela.	94
Figura 3.9 Metodología seguida para la obtención de los factores C, K, R y LS.	103
Figura 3.10 Esquema de un píxel del raster de la topografía y mapa de erosión hídrica.	104
Figura 5.1 Conceptualización y diagramación del proceso de generación-difusión-disposición (Pgdd) de sedimentos en suspensión hídrica.	129
Figura 5.2 Aproximación a diseños geométricos de excavaciones mineras, indicando direcciones del escurrimiento de las aguas en áreas.	131

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Energía cinética de la lluvia natural (Kg-m/Ha-mm) (Wischmeier, 1958)	86
Tabla 3.2 Valores absolutos y relativos para número de aguaceros, lámina total acumulada, lámina escurrida, EI30 y pérdida de suelo venezolano para lluvias de julio a diciembre	88
Tabla 3.3 Escalas y funciones en Sistemas de Información Geográfica (SIG) aplicado al modelado ambiental en la conservación de la biodiversidad.	99
Tabla 3.4 Extracto de tabla con atributos topográficos primarios cuyos datos pueden ser calculados en modelos de elevación digital (DEM).	100
Tabla 4.1 Síntesis de las estimaciones obtenidas	116
Tabla 4.2. Comparación en diseño geométrico de minas, para control de movimientos de masa..	119
Tabla 4.3. Comparación entre recomendaciones de diseño de obras hidráulicas en minas.....	120
Tabla 4.4. Resumen prácticas de control de sedimentos.....	121

RESUMEN

Este trabajo presenta, de manera resumida, investigaciones en minería y ambiente, específicamente acerca del transporte de sedimentos en suspensión hídrica, en minas a cielo abierto en el territorio nacional. Fueron seleccionados seis (6) estados: Aragua, Bolívar, Distrito Capital, Falcón, Miranda y Zulia, donde son operadas 14 minas a cielo abierto: Agua Blanca, Bizkaitarra, Cantera Nacional, Caucagua, Cuadrilátero Ferrífero de San Isidro, El Melero, El Veral, Hoja de Lata, Loma de Níquel, Los Barrancos, Mampostal, Paso Diablo, Pijigüaos y Tacagua, de metálicos y no metálicos: arcilla, bauxita, caliza, carbón, mineral de hierro, mineral de níquel, oro y piedra picada. Se presenta la discusión detallada de factores que intervienen en la dinámica erosión-sedimentación, desde el punto de vista de la energía para el rompimiento de fuerzas de enlace en los suelos. Se presentan estimaciones de volúmenes de sedimentos en suspensión hídrica y ejemplos de propuestas de diseño de minas, con recomendaciones para estabilidad de taludes, obras de conducción y, elementos de retención y contención de sólidos transportados.

Se destaca la extracción de placeres auríferos, con la aplicación del barrido hidráulico, como el método que genera la mayor cantidad de sedimentos en suspensión hídrica, seguido por la extracción de mineral de hierro en laderas con diversas litologías muy densas y fricciones, que actúan como limaduras de hierro, descendiendo y produciendo abrasión ladera abajo. Continúan las lateritas, en orden decreciente en generación de sólidos en suspensión, seguido por el carbón. Se observaron volúmenes menores en extracción de rocas no metálicas, carbonáticas, y en arcillas y arenas. No obstante, es necesario exhortar a operadores mineros en areneras en cauces de ríos, para evitar que las arcillas se pierdan aguas abajo, en cauces de ríos y quebradas.

Se propone, una conceptualización del proceso de generación-difusión-disposición de partículas sólidas; además, seis (6) escenarios de minas, un procedimiento de integración de herramientas analíticas e informáticas, incluyendo las fórmulas fundamentales de la hidráulica y de la edafología, como aquellas en: Método Racional, Manning, Ley de Stokes, Diagrama de Hjülstrom y Ecuación Universal de Pérdida de Suelos, en un programa con un modelo de elevación digital que integre las variables relevantes para el control de sedimentos.

Finalmente, se presentan diversas prácticas en el diseño de mina a partir del análisis a los fines de garantizar la reducción de riesgos en la inducción de procesos erosivos, la consecuente formación de surcos y cárcavas e inestabilidad de masas de suelos y rocas en equilibrio. También se presentan obras civiles para el drenaje de mina y la conducción de aguas de mina, así como técnicas de retención de sólidos, con elementos sintéticos u orgánicos.

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Las comunidades, locales por la geografía y científicas por el manejo del conocimiento, cada vez más conscientes acerca de las necesidades de protección de ecosistemas naturales, conciben a las operaciones de aprovechamiento mineral como actividades económicas caracterizadas por desempeño negativo en materia de equilibrio ecológico y social. El desequilibrio está expresado en procesos de pérdida de cobertura vegetal, de activación de movimientos en masa, erosión y arrastre de sedimentos, de emisión de partículas sólidas en suspensión atmosférica, entre otros procesos de afectación que causan el deterioro de la calidad ambiental.

La minería en Venezuela se caracteriza por el desarrollo de un reducido número de proyectos mineros, pero casi todos ellos a cielo abierto, resultando obvia la deforestación, los cambios del relieve, el arrastre de sedimentos y la consecuente descarga de sólidos en cuerpos de agua en superficie. Esto produce efectos caracterizados por la alteración de flujos naturales de agua y limitación en la productividad biológica de ecosistemas acuáticos. Durante años, la producción de sedimentos no fue considerada relevante en la afectación a la salud ambiental ni humana, pero actualmente se reconoce a la erosión inducida con potencial de colmatación de cauces naturales y la liberación de elementos químicos hidrosolubles, potencialmente nocivos a la salud.

El proceso erosión y sedimentación resulta potenciado por las operaciones mineras de arranque y manejo de mineral. Es de por ello que una minería en la cual se responda a las comunidades y a la calidad de atributos ecológicos, en el entorno de áreas minadas, particularmente aguas abajo de la generación de sedimentos, debe asumir los riesgos debidos a los cambios que se producen en las condiciones originales del territorio intervenido por la minería. Estos cambios responden a factores de naturaleza económica, en lo social y a factores morfológicos e hídricos, en lo físico natural.

El control de sedimentos implica buenas prácticas en el diseño de controles de sedimentación en las fuentes, con estimación de volumen y caracterización de sólidos, trayectorias de sedimentación en receptores finales como cauces naturales de agua. En minería, se han estado usando las ecuaciones de Gumbel, el Método Racional y de Manning para caudales y lluvia de diseño de obras hidráulicas, y la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE, por sus siglas en inglés), con la intención de dar

respuesta a los requerimientos de estimación en la generación de sedimentos en minería y de diseño de obras hidráulicas para la conducción, retención, y disposición de sedimentos finos a gruesos. Más recientemente, se han incorporado los sistemas de información geográfica al estudio de la pérdida de suelos,

1.2 Investigaciones previas

La necesidad de controlar sedimentos viene siendo asumida por operadores de proyectos mineros venezolanos, con minería a cielo abierto, por lo cual vienen solicitando la ampliación de conocimientos. Con el curso: “Control de sedimentos en minería a cielo abierto” y algunos trabajos especiales de grado, el Departamento de Minas de la UCV inició la investigación y extensión en esta materia, recopilando datos y experiencias de campo que estimularon el desarrollo de este trabajo. Entre otros casos de aprovechamientos, mencionamos, en orden alfabético, los siguientes:

- cantera de arcillas, con fines de elaboración de cemento en el cerro El Veral, próximo a Puerto Cumarebo, en el estado Falcón.
- areneras, en el río Tacagua, que fluye en el Distrito Capital, y en la cuenca del río Grande, subcuenca del río Tuy, que fluye en el estado Miranda.
- canteras de calizas, en el cerro El Mampostal del estado Falcón, con fines de elaboración de cemento, y en El Melero, en el estado Miranda, también como árido para concreto.
- carbones, ubicados en la cuenca hídrica del río San Rafael de Guasare, en el piedemonte de la serranía de Perijá, estado Zulia.
- lateritas, bauxítica y niquelífera, en la meseta de la serranía Los Pijigüaos, cuenca del río Parguaza, en el estado Bolívar, y en el cerro Loma de Hierro, próximo a la población de Tiara, en el estado Aragua, respectivamente.
- minerales de hierro, en los cerros ubicados en el Cuadrilátero Ferrífero de San Isidro (desde ahora CFSI), próximos a Ciudad Piar, en el estado Bolívar.
- placeres auríferos, en aluviones y saprolitas, en los municipios Sifontes y Botanamo, en el estado Bolívar.

Cada uno de los casos anteriores se caracteriza por una dinámica particular en el proceso erosión-sedimentación, debido a características físico-naturales propias del sistema ambiental específico de la provincia geológica y del diseño de la extracción. Con el manejo de minerales (operaciones de

arranque, carga y acarreo), usando perforación y voladura o excavación mecanizada, se generan fragmentos sueltos y desplazamiento de materiales sólidos. Adicionalmente, se tiene el arrastre desde los sitios de disposición de escombros minerales, o estériles de mina, en estructuras de tierra, conocidas como escombreras, cuando aún no han sido revegetadas.

En cuanto a las variaciones hidrometeorológicas, estos proyectos mineros se enmarcan en regímenes de precipitación, todas en subcuencas tropicales, pero, en cuencas distintivas, orinoquense y caribeña, presentando diferencias en la capacidad de erosión (erosividad) de la lluvia. En lo relativo a las provincias geológicas, los proyectos se desarrollan dentro de diferencias significativas, en el tipo de rocas y en la composición litológica y mineralógica. Y en el diseño de la extracción: la geometría de las excavaciones mineras, las diferencias en los niveles topográficos, las pendientes de diseño y las tecnologías de extracción mineral, introducen características particulares al proceso de erosión inducida y posterior sedimentación.

Como ejemplo de esto, resultan significativamente distintos los procesos de erosión en extracción de: finos negros ferruginosos (limaduras de hierro), cuya densidad relativa es $5,2 \text{ gr/cm}^3$, deslizándose hacia quebradas en pie de cerro, por laderas con taludes de trabajo de 45° , comparado con el de la extracción de carbón en fosa abierta, con disposición en escombreras externas de materiales finos arcillosos calcáreos, cuya densidad relativa es $2,5 \text{ gr/cm}^3$ o con el proceso de la extracción mecanizada de lateritas, en banco único, de baja altura de talud y pendientes suaves, en topes de mesetas, que descargan aguas desde elevaciones significativas.

Los diversos factores que inciden en los procesos de erosión y sedimentación han sido recopilados y descritos por Castillejo (1996) en una guía de estudio titulada “Movimiento de masas y su mitigación”. Ésta fue preparada para el curso de cálculos geomineros en el Departamento de Minas debido a la temprana conciencia de la necesidad de controlar los sedimentos producidos en las operaciones mineras. Incluye contenidos en mecanismos de erosión y la importancia de los diversos factores que determinan los procesos de erosión, aborda las necesidades de conocimiento en geotecnia, mecánica de suelos y de rocas; incluye los mecanismos de erosión que comprenden: separación entre partículas, desprendimiento, transporte, arrastre y deposición de materiales, suelos o fragmentos rocosos, por acción de la fuerza del agua en movimiento.

Una vez aprobado el curso de formación en Ingeniería de Minas: *Minería y Ambiente*, código 3224 (en 1995), y habiendo desarrollado la Línea de Investigación sobre indicadores de sustentabilidad en la minería, en 2002, emergió la oportunidad de elaborar los contenidos del curso de extensión

“Control de sedimentos en minería a cielo abierto” por solicitud de la operadora CVG Ferrominera Orinoco, en Ciudad Piar, para apoyar a la Superintendencia de Minas en el Cinturón Ferrífero de San Isidro. Desde el Departamento de Minas se respondió con el referido curso (Castillo y Piña, 2002) revisando los fundamentos teóricos de los procesos de generación y transporte de sedimentos en suspensión hídrica, mecanismos de separación y arrastre, composición química de sedimentos y prácticas de control en minería a cielo abierto, apoyando la evaluación de procesos extractivos a los fines de identificar causas y estrategias para minimizar la erosión y diseñar sistemas de manejo de agua en escorrentía superficial y de sedimentos. Vale la pena destacar que este curso se ha continuado impartiendo a otros grupos de trabajo en otras minas y ha permitido realizar investigación aplicada en otras operaciones mineras.

Al recopilar la información para impartir cada curso con conocimiento de las operaciones mineras a ser apoyadas, se reconoció el valor del trabajo de Lisena (2002), en el informe técnico: “Compatibilidad entre técnicas de aprovechamiento minero y el entorno ambiental en la mina Los Pijigüaos”, en ocasión de dictar el curso en CVG Bauxilum, operadora de bauxita, en Los Pijigüaos, en el estado Bolívar. En este informe el autor presenta prácticas de protección de recursos naturales, como parte del sistema de gestión ambiental que desarrolla la Gerencia de Protección de Recursos Naturales en coordinación con las gerencias técnicas de operaciones mineras, destacando estrategias específicas de obras de infraestructura para drenajes y contención de taludes, así como de revegetación de áreas minadas para la extracción de bauxita. El informe contiene estrategias de recuperación de áreas minadas, con la filosofía de una compañía minera que debe dedicar especial atención a la conservación del equilibrio ambiental, respetando a las comunidades donde operan.

El curso en CVG Bauxilum creó la oportunidad para realizar una investigación aplicada que posteriormente fue descrita en el trabajo especial de grado de Méndez (2008), y que permitió explorar el trabajo de Fernández (2001) en su tesis doctoral: “Propuesta metodológica para determinar grados de susceptibilidad a la erosión hídrica en microcuencas tropicales”. En este trabajo se realiza un análisis para la optimización de variables usadas en la ecuación de pérdida de suelos para casos de cuencas en ecosistemas tropicales, evaluando cada uno de los factores, determinando áreas homogéneas con la metodología de categorización de paisajes de Elizalde (1983). En las áreas homogéneas, se evalúan los componentes: lluvia erosiva (erosividad), fragilidad geológica (delezabilidad), susceptibilidad del suelo (separabilidad), gradiente y longitud de la pendiente (declividad) y uso de la tierra (intervención).

Una vez establecida la línea de investigación de control de sedimentos en minería a cielo abierto, se realizaron varias investigaciones aplicadas con estimaciones de volúmenes de sedimentos generados por las operaciones mineras. Es así que como entre los objetivos del trabajo de Piña (2002), además de promover la coexistencia entre la actividad minera metálica y los recursos socio-biológicos a ser protegidos, se incluyó estimaciones de sedimentos en pequeña minería aurífera y en extracción de mineral de hierro a gran escala. Asimismo, en el trabajo de Jaspe (2002) se evaluó la sustentabilidad de las operaciones mineras a los fines de promover la coexistencia entre la actividad minera carbonífera y la protección del ambiente. También incluyó una estimación actual y potencial de sedimentos sólidos aportados a la cuenca del río San Rafael de Guasare, a partir del incremento en la extracción de carbón hacia el año 2015, demostrando la importancia del control de sedimentos como criterio de conservación ambiental.

Posteriormente, Matheus (2004) hizo seguimiento a los trabajos mencionados, a raíz de su pasantía minera en la pequeña minería aurífera en Las Claritas, estado Bolívar, en donde cuantificó la producción de sedimentos por el uso del monitor hidráulico en placeres y saprolitas auríferas. Esta experiencia, aun cuando no fue publicada formalmente, ha sido muy importante para determinar la obsolescencia de esta tecnología desde el punto de vista del impacto ambiental negativo, debido a la excesiva producción de sedimentos y la dificultad del ecosistema para absorber esas cantidades en suspensión hídrica.

De igual modo puede considerarse el trabajo de Van Zanten. (2004), en torno al diseño de manejo de agua de mina en el pit Baqueta de la mina Paso Diablo, estado Zulia, como aporte al desarrollo sustentable de la región. En este orden de ideas, la operadora minera Carbones del Guasare, responsable de la referida mina, tuvo como objetivo determinar los caudales de agua de precipitación y escurrimiento hacia el interior de la fosa minera, y ofrecer medidas de control de inundaciones. Adicionalmente calculó los parámetros de diseño de un dique para la retención de sedimentos antes del vertido en la quebrada natural.

Por su parte La Barbera (2005), sí estableció, en trabajo ad hoc, el control de sedimentos en la pequeña minería aurífera a través de una investigación realizada con visión de desarrollo sustentable, en una zona autorizada en el borde de la Reserva Forestal de Imataca; el trabajo lo realizó en vetas auríferas del estado Bolívar. Allí se evaluó las características del proyecto en ejecución en la cuenca del río Botanamo, tributario del río Cuyuní, a los fines de aportar recomendaciones de diseño para el control de sedimentos potenciales generados desde las pilas de almacenamiento y las colas del

tratamiento mineral. Este procesamiento consiste en las operaciones de ripado, molienda, amalgamación, almacenamiento de arenas tratadas y descarga de sólidos en suspensión a quebradas naturales.

Por su parte Blanco (2007), elaboró un trabajo de grado en torno al plan de cierre progresivo en una mina del Cuadrilátero Ferrífero de San Isidro, en Ciudad Piar, estado Bolívar. Esta investigación fue solicitada por CVG Ferrominera del Orinoco. En dicho trabajo se planteó la planificación del cambio de uso del territorio al evaluar la progresividad del agotamiento de las reservas en los cerros del mencionado cuadrilátero. A tal efecto, se determinó el tiempo de vida útil de la mina, y como metas de cierre, propuso el control de movimientos de masa, control de sedimentos, revegetación y rehabilitación laboral de comunidad, dando especial importancia el control de sedimentos a los fines de conservar el equilibrio ecológico.

En el caso de la extracción de arenas en un trecho de río, Falcón (2007) desarrolló una tesis de maestría vinculada al estudio sedimentológico y evaluación de impacto ambiental acumulado en areneras activas, en la zona Caucagua, estado Miranda”. Este trabajo tuvo como objetivo integrar la visión y comprensión de la dinámica de sedimentación y de los impactos ambientales acumulados, en una sección de río con reservas significativas de materiales granulares, para la industria de la construcción. El tramo de río estudiado recibe aportes de sedimentos de movimientos de tierra para urbanismo y construcción de infraestructura básica, aguas arriba del área de estudio sobre el río Grande.

Por su parte, Méndez. (2008), realizó un trabajo vinculado al diseño y aplicación de herramientas para control de sedimentos como indicador de sustentabilidad. CVG Bauxilum. Mina Pijigüaos, estado Bolívar. En esta investigación, desarrolló un programa informático minero en el cual utilizó la ecuación universal de pérdida de suelos, corregida con los aportes de la tesis doctoral de Fernández (2001) para ecosistemas tropicales, con la finalidad de ofrecer una herramienta para la estimación de los volúmenes de sedimentos y las variables de diseño de las obras civiles para drenaje y retención de sólidos.

Hasta 2009, el curso de control de sedimentos aun es impartido a solicitud de operadores mineros y aplicado en pasantías industriales en minería. También incluye aspectos de control de sedimentos en mina como en el caso del informe de pasantía minera de Escalante (2009) para la mina Cantera Nacional, ubicada en el Distrito Capital.

A propósito de otro trabajo especial de grado en cierre parcial y progresivo de mina, Delgado (2011) investigó en una cantera de caliza para elaboración de cemento y como árido para concreto, en el estado Miranda, específicamente en el talud lado sur de la cantera El Melero. Aplicó técnicas de análisis para el: equilibrio límite, control de sedimentos y revegetación, de áreas intervenidas por minería a cielo abierto con el método de bancos múltiples, arranque discontinuo con perforación y voladura y sistema pala-camión roquero, en colinas con pendientes pronunciadas.

Más recientemente, la Pasantía Industrial desarrollada por Frías (2017), aporta un caso de diseño de laguna de sedimentación en el frente 1 en la Cantera Tacarigua C.A, con extracción de dolomita en Puerto Cabello, estado Carabobo, para lo cual aplicó la metodología de análisis con el método racional y coeficiente de Gumbel, complementando con criterios espaciales y operativos mineros para el dimensionamiento de la estructura de control.

1.3 Justificación de la investigación

Es bien conocido que la energía del agua de precipitación y de escurrimiento en la superficie del terreno es capaz de separar y disgregar los sólidos minerales. Esta energía puede aumentar y causar la formación de estructuras de erosión, como: grietas de tracción, surcos, cárcavas y hasta movimientos de masa y deslaves, desde las cuales ocurren pérdidas significativas de materiales granulares y finos. También es conocido que, mientras más pequeños, estos sólidos permanecen mayor tiempo en suspensión en cuerpos de agua, reduciendo la luminosidad natural y las capacidades fotosintéticas que mantienen en equilibrio los procesos metabólicos de entes biológicos, con intercambio de nutrientes.

Naturalmente, la energía cinética de las gotas de lluvia, disipada en el salpique y separación de granos, se incrementa nuevamente en el terreno y se propaga por efecto del caudal que se acumula pendiente abajo. Desde los frentes de arranque mineral se suma la energía potencial del agua, en función de la altura del talud minero, de taludes viales y de las obras de tierra construidas. Esta energía se disipa con la formación de las referidas estructuras, movimientos de masas y flujos, acumulando mayor carga de sólidos desde las estructuras de erosión hídrica y por movimientos potenciales de masas de suelos, en lo cual incide el tipo de rasante, en términos edafológicos y litológicos.

No obstante, la energía se incrementa y arrastra más sólidos en el recorrido, en función de las características granulométricas de los sedimentos y morfológicas del terreno. Las partículas de suelos

friccionantes y cohesivas, esféricas o laminares, livianas o pesadas, que ingresan al medio líquido, según la densidad del agua, decantarán o sedimentarán en menor o mayor tiempo hasta el fondo del cuerpo receptor, manteniendo la turbidez y colmatando la sección del cauce o altura del recipiente, con mayor o menor rapidez.

Por otra parte, la sobretrituración y pulverización de minerales en rasantes de rampas y vías de acarreo, con equipos móviles muy pesados, se restringe la infiltración del agua de precipitación y aumenta el escurrimiento en superficie, con energías crecientes en función de la pendiente topográfica del terreno. El arrastre de sólidos se produce adicionalmente desde las superficies expuestas y selladas por el encostramiento. Una vez iniciada la precipitación, la infiltración restringida en el subsuelo y la saturación de los suelos más superficiales inducen el aumento del tirante de agua en superficie, transformando el régimen, de flujo laminar a turbulento, influido por la gradiente topográfica.

La recepción de sólidos en los cuerpos naturales de agua en superficie, como quebradas, ríos, lagunas y embalses, se incrementa con la vida útil de extracción mineral y con la gestión en controles de sedimentos. En función de la distancia entre las fuentes de emisión de sedimentos y los cuerpos receptores de sólidos en suspensión hídrica se acumulan los volúmenes de material. Finalmente, algunas partículas minerales suelen servir como vehículos de sustancias potencialmente dañinas, como metales pesados fitotóxicos.

Tradicionalmente, la ingeniería de minas había sido definida como ciencia y arte del aprovechamiento mineral. Sin embargo, la afectación ambiental debida a los proyectos mineros demanda el reconocimiento de la ética ambiental. De allí que recientemente la definición haya sido ampliada, incorporando la nueva conciencia ambiental, al proponer que la minería consista en la práctica de aplicar principios de la planificación, desarrollo, operación y cierre de minas, como se puede revisar en la literatura técnica reciente.

El sistema de control de sedimentos, para minería a cielo abierto, requiere el cálculo de las dimensiones y la distribución en planta de elementos de control, en función del plan de aprovechamiento mineral. Por ejemplo, las funciones de elementos:

- a) conducción de aguas pluviales, que puede ser cumplida mediante la planificación y diseño de obras para la distribución y construcción de: canales, cunetas, torrenteras o bajantes, disipadores, etc.

- b) retención de sólidos, que puede ser cumplida mediante la planificación y diseño e obras para la distribución y colocación de: barreras u obstáculos, en general, con elementos prefabricados o con vegetación, etc.
- c) decantación y sedimentación de sólidos, que pueden ser cumplidas mediante la planificación y diseño para la construcción de sumideros, embalses y lagunas, o cuencas artificiales.

1.4 Objetivos

En este trabajo de ascenso se tiene un objetivo general y cinco objetivos (5) específicos, con los cuales se persigue promover un cambio en la actitud de personal en las gerencias técnicas de operadoras mineras, públicas y privadas. Este cambio actitudinal se requiere en gestión ambiental en minería, especialmente en la protección de cuerpos naturales de agua con la aplicación de herramientas para la estimación de volúmenes de sedimentos generados por la minería a cielo abierto, con la finalidad de planificar y diseñar medidas de control.

1.4.1 General

Proponer una aproximación analítica y metodológica para la estimación de la pérdida de suelos, por la minería a cielo abierto, con el fin de promover el mejoramiento en la planificación y diseño de medidas de control de sedimentos, en casos de proyectos mineros venezolanos.

1.4.2 Específicos

- Describir casos de operaciones mineras que producen sedimentos susceptibles de ser transportados en suspensión hídrica.
- Identificar variables físicas, geométricas y dinámicas de extracción mineral que inducen pérdida de suelos por disgregación y arrastre de partículas.
- Presentar una visión de conjunto transdisciplinaria y sistémica del proceso erosión-sedimentación en minería a cielo abierto.
- Proponer una aproximación analítica y metodológica para la estimación de la pérdida de suelos por la minería a cielo abierto.
- Presentar técnicas e implementos para el control de sedimentos

Como telón de fondo, se intenta hacer más relevante la transdisciplinaridad de las ciencias, sensibilizando en las relaciones entre los conocimientos geocientíficos y ambientales, esto es geoambientales, a los fines de incrementar la sustentabilidad y sostenibilidad de la extracción mineral, al promover el mejoramiento de las técnicas de protección ambiental en la práctica de la ingeniería de minas.

1.5 Metodología, alcance y limitaciones

En este trabajo los estudios de campo se desarrollan sobre la base de investigaciones independientes realizadas en proyectos de investigación aplicada. Los ensayos realizados y los valores de parámetros técnicos obtenidos en las tesis consultadas han sido tomados y analizados para discutir y contextualizar los hallazgos en las diversas explotaciones mineras venezolanas, en casos de minas a cielo abierto.

Se presentan aportes de conceptos físicos, tomados de disciplinas complementarias en el conocimiento de entes físicos de la Tierra, como hidrometeorología, hidrogeología, geomorfología, edafología, geotecnia, entre otras, pero no pretende profundizar exhaustivamente en estas disciplinas del conocimiento geocientífico, más bien ofrecer las herramientas metodológicas que han sido desarrolladas por profesionales estudiosos y estudiosas de estas disciplinas.

Se compilan y analizan los aportes teóricos y prácticos, se discuten las similitudes y diferencias en situaciones diversas de rubros minerales, litologías, densidades específicas, granulometría, métodos de explotación, diseño de minas, entre otras variables mineras. También se integran a la ecuación universal de pérdida de suelos, proveniente de la actividad agronómica, para adecuar a las circunstancias específicas de la actividad minera. Se presentan conclusiones y recomendaciones para el control de sedimentos en minería a cielo abierto, en el caso de las minas venezolanas.

1.6 Organización del contenido en el documento

El documento ha sido dividido en cinco (5) capítulos con los fines de:

- introducción a la temática a investigar,
- caracterización de una muestra seleccionada de la población de proyectos mineros activos en territorio venezolano,
- documentación de las bases teóricas del proceso de erosión-sedimentación desde disciplinas distintas,
- presentación de resultados de investigaciones previas y propuesta de profundización en la línea de investigación en minería general, en el Departamento de Minas de la UCV,
- recopilación del estado del arte en el control de sedimentos en minería.

De esta manera se optó por explorar algunos aspectos necesarios en la atención a la problemática de control de sedimentos en las actividades extractivas en territorio venezolano, tanto en rubros metálicos como en no metálicos, para un total de doce proyectos mineros, en seis (6) estados del país.

CAPÍTULO 2.

DESCRIPCIÓN DE PROYECTOS MINEROS A CIELO ABIERTO EN VENEZUELA

En este capítulo, se presenta la recopilación de información acerca de las características físicas naturales de las localidades donde se emplazan los proyectos mineros seleccionados para esta investigación y de las variables técnicas en planificación y diseño de mina, con métodos de explotación diversos: canteras, areneras, contornos, terrazas, en sistemas a cielo abierto.

2.1 Introducción

En las secciones siguientes se caracteriza una muestra de la población de proyectos mineros a cielo abierto en Venezuela, con rubros minerales diversos, y métodos y sistemas de explotación también diversos. Las ubicaciones geográficas y las producciones anuales de los proyectos mineros considerados son los siguientes:

✧ **Aragua:**

- mina Loma de Níquel, con capacidad instalada de 17.500 toneladas por año (ton/año) de ferroníquel y tasa de producción mineral de 1,3 millones de ton secas/año.

✧ **Bolívar:**

- mina Los Pijigüaos, con capacidad instalada de 6 millones de ton/año (MMT/año) de bauxita;
- cuadrilátero ferrífero de San Isidro, con capacidad instalada de 20 millones de ton/año de mineral de hierro;
- proyectos de pequeña minería en Bizkaitarra y Hoja de Lata, no se tiene producción estimada con exactitud (en el orden de decenas de kilogramos/año).

✧ **Distrito Capital:**

- Cantera Nacional, en parroquia Antemano, con capacidad instalada de 225.000 metros cúbicos por año (m³/año) de piedra picada y 65.000 m³/año de arena lavada;
- operadora Minataca C.A. en parroquia Sucre, con capacidad instalada de 31.900m³/año de arena proveniente de esquistos.

✧ **Falcón:**

- cantera de caliza en cerro Mampostal con capacidad instalada de 1,2 MMT/año
- cantera de arcilla en cerro El Veral, con capacidad instalada de 400.000 ton/año, ambas trituradas para fabricación de cemento.

▲ **Miranda:**

- tres (3) areneras activas en río Cauagua con capacidad instalada de 200.000 m³/año de áridos para industria de la construcción: grava, gravilla, arena y arcilla;
- cantera El Melero, con capacidad instalada de 120.000 ton/año de caliza para cemento y áridos para construcción.

▲ **Zulia:**

- mina Paso Diablo, con capacidad instalada de 7 MMT/año de carbón mineral en zona protectora de la cuenca del río San Rafael de Guasare.

Las secciones siguientes describen las características geoambientales de proyectos mineros venezolanos a cielo abierto, en sus componentes físico naturales y características socio-económicas técnico-mineras y poblacionales. Esto es, por una parte, variables climatológicas, hidrológicas, geológicas y biológicas, que caracterizan cada una de las regiones donde se encuentran los diez (10) proyectos referidos, ubicados en seis (6) estados venezolanos. Y, por otra parte, se presentan las variables características espaciales y geométricas de las operaciones extractivas planificadas y diseñadas en estos proyectos mineros.

En este trabajo, se hace mención a un caso reciente de estimación de volumen de sedimentos y diseño de laguna de sedimentación en una cantera de piedra picada, en Puerto Cabello, estado Carabobo, la cual fue realizada durante una pasantía industrial, demostrando el avance en el proceso de sensibilización alcanzado en el sector operativo minero, a la fecha.

2.2 Características geoambientales en áreas de proyectos mineros.

Para los efectos de este trabajo, es importante destacar las características físicas naturales relativas al clima, el relieve, la geología y la vegetación, en los territorios donde se encuentran emplazados los yacimientos minerales. Estas características distintivas serán reseñadas por región para cada uno de los yacimientos minerales en explotación. Resulta de utilidad conocer el modelo geológico del yacimiento mineral para conocer la rasante (piso) que quedará expuesta a los agentes de erosión, una vez excavadas las áreas mineralizadas.

Las características son presentadas en el orden siguiente: Aragua, Bolívar, Distrito Capital, Falcón, Miranda y Zulia. Solo en el caso del estado Bolívar se presentan tres escenarios físico-naturales distintos, debido a las distancias geográficamente significativas entre las minas de bauxita, mineral

de hierro y los placeres auríferos, los cuales ocupan territorios con variaciones topográficas y litológicas de consideración.

Los factores de mayor interés en este trabajo están relacionados con:

- clima, debido particularmente a la pluviosidad, frecuencia e intensidad de lluvia;
- relieve, debido a la diferencia en los niveles topográficos y las pendientes promedio,
- geología, particularmente litología y densidad específica promedio de minerales
- vegetación, por la cobertura original y el tiempo de recuperación necesario en el proceso de revegetación del área.

La Figura 2.1 muestra las ubicaciones relativas, en el territorio nacional, de los diez (10) proyectos referidos de canteras, minas y areneras, para las cuales se resumen variables relevantes, tanto naturales como de diseño minero, relevantes en el proceso erosión-sedimentación y desde el enfoque minero-ambiental.

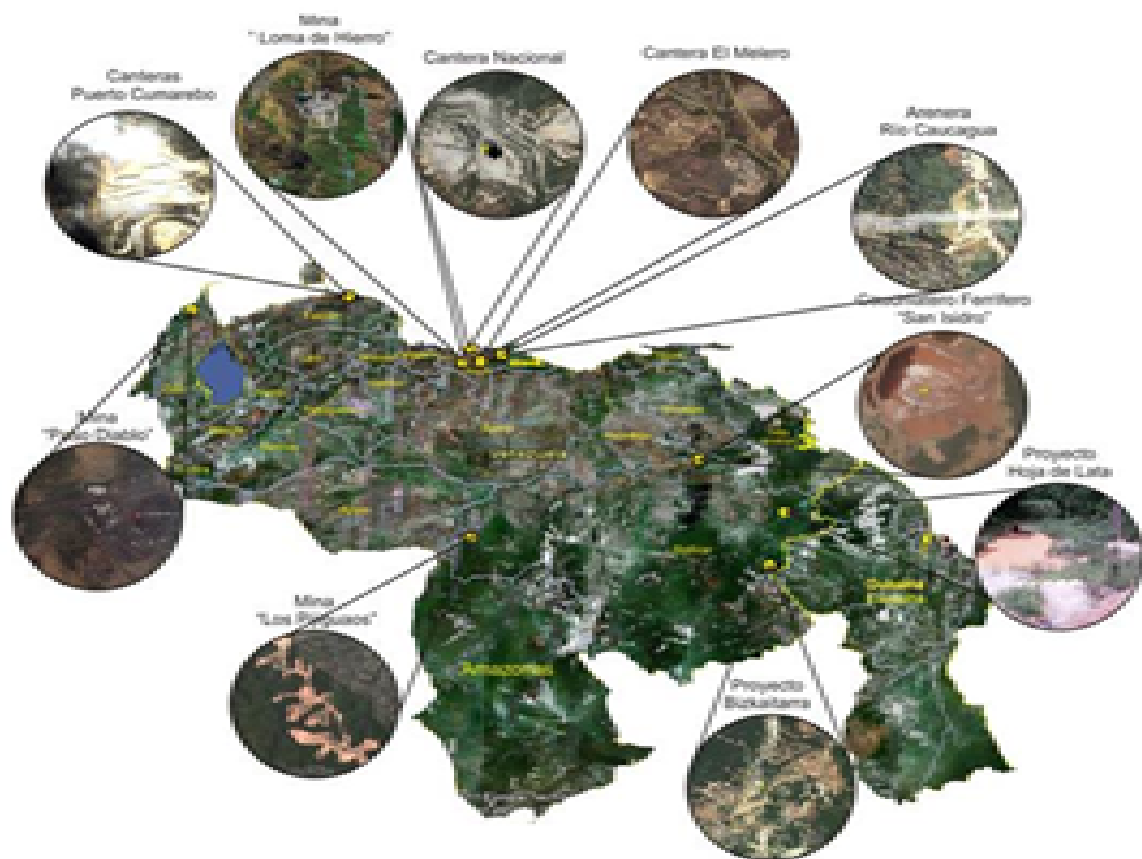


Figura 2.1. Ubicación relativa de proyectos mineros a cielo abierto en Venezuela.
Fuente: Diagramación de Melo y Castillo (2011), con base en imagen de Image (2011) *Terra Metrics*, Google, Europa Technologies.

2.2.1 Estado Aragua: Ferroníquel, mina Loma de Níquel.

Los datos de la extracción de mineral de níquel (garnierita) y la obtención de ferroníquel, operados por Minera Loma de Níquel (MLdN) han sido tomados de estudios e investigaciones realizadas por Caminero (1999), Álvarez (2008), Birbe (2009), Melo (2011), Ochoa (2010) y, Ochoa y Reyes (2011) y Nóbregas (suspendida) y Cova (en desarrollo, 2016-2017). Estos estudios atienden aspectos diversos en explotación de minas y en minería general, como en el caso del estudio más reciente en parámetros para el diseño de estabilidad de taludes mineros y de los depósitos finales.

La Figura 2.2 muestra la ubicación del yacimiento Loma de Hierro en el estado Aragua, el cual se encuentra a una altura variable, de oeste a este, entre 1.300 y 1.100 metros sobre el nivel del mar (msnm), a 5 kilómetros (km) de la población Tiara y a 25 km de la ciudad Tejerías, en el límite entre los estados Aragua y Miranda, sobre la serranía del Interior de la cordillera de La Costa, entre las coordenadas *Universal Translator Mercator* (UTM, por sus siglas en inglés) N1.123.000-1.125.000 y E 703.500-707.000.



Figura 2.2. Ubicación del proyecto Loma de Níquel en el estado Aragua.

Fuente: Birbe (2009). Diagramación de Melo (2011).

La zona presenta un clima predominante tropical de altura (según registros meteorológicos en diversas estaciones próximas) y húmedo. En la estación Tiara, a 750 msnm, se calculan 1.405 mm como máximo promedio anual. Sin embargo, en 1995, en el estudio de confiabilidad del proyecto Loma de Hierro reporta un registro anual de 2.377 mm (Ochoa y Reyes, 2011). Se reportan valores

de precipitación media mensual (de ahora en adelante, pma) de 117 mm, con intensidades anuales promedio (para distintas duraciones): 65 mm (1hr), 79 mm (12hr) y 99 mm (24hr), respectivamente. Se estiman 168 días de lluvia al año. En estudios de ciclos de acarreo mineral con camiones roqueros, se reporta presencia frecuente de neblina y humedad ambiental, tan significativa que los taludes mineros amanecen húmedos (Escalante, 2009).

El relieve es montañoso con laderas suaves y se presenta en forma de filas con orientación preferencial N65° E. Las líneas de cresta son agudas, y en ocasiones estrechas. Las laderas poseen pendientes moderadas a abruptas y se encuentran recubiertas por un espeso manto laterítico, con un delgado horizonte de vegetación herbácea de sabana abierta (entre 1.100 y 1.200 m) y de vegetación arbórea de bosque tropical húmedo (1.200 msnm). La red de drenaje presenta un patrón reticulado, controlado por sistemas de diaclasas.

La geología local se caracteriza por minerales de alteración de intrusiones ultramáficas de olivinos (ol) y de piroxenos (px). Donde $ol > 90 \%$, se producen dunitas serpentinizadas y donde $ol < 40 \%$, se producen piroxenitas serpentinizadas, con magnetita como mineral accesorio más común. Adicionalmente ocurren peridotitas serpentinizadas, originando minerales de tenor inferior y menor espesor. En sectores metamorfizados por movimientos tectónicos ocurren procesos de silicificación que alcanzan hasta 40 % de SiO_2 . En zonas de cizallamiento, ol y px fueron talcificados y la saprofitita generalmente presenta tenores inferiores a 0,9%. Algunas zonas de fracturas y fallas albergan pegmatitas gabroicas y diques de gabro. La densidad mineral promedio en el yacimiento es 1,48 gramos por centímetro cúbico (gr/cm^3).

La Figura 2.3 muestra el corte vertical, según Birbe (2009), modificado de MLdN (2007), en el cual el perfil de alteración se caracteriza por 3 zonas:

- **Nivel 1**, Laterita ferruginosa: Constituye la cobertura de la zona de mena níquelífera. Es un suelo arcilloso, poroso, de color ocre rojizo a rojo oscuro, con peso específico relativamente elevado, bajo grado de humedad (15-20 %), alto contenido de oxihidróxidos de hierro (40-45 %) y bajo contenido de níquel (0,4-0,8 %); los oxihidróxidos de hierro presentes son limonita-goethita, y hematita hacia las zonas más superficiales (moco de hierro). Se ubica una zona de transición entre la laterita ferruginosa y la laterita níquelífera, caracterizada por presentar un menor peso específico, elevada humedad (30-55 %), un menor porcentaje de oxihidróxidos de hierro (35-40 %) y un mayor contenido de níquel (0,8-1 %); dicha zona se encuentra enriquecida con oxihidróxidos de manganeso-cobalto.

- **Nivel 2, Laterita niquelífera (saprolita):** Es un manto arenoso con facies arcillosas, poroso, de color pardo amarillento, con bajo peso específico, grado medio de humedad (20-30 %) y un contenido medio de oxihidróxidos de hierro (25-35 %). Se caracteriza por el desarrollo de sistemas de grietas y fracturas, lo cual le otorga una alta permeabilidad, permitiendo la concentración de la mena niquelífera (garnierita) en forma de laminaciones y vetas, con un tenor de níquel elevado (1-2 %). Se encuentra una zona de transición entre la laterita niquelífera y la roca basal, la cual presenta menores porcentajes de oxihidróxidos de hierro (20-25 %) y de níquel (0,5-0,8 %), así como un bajo grado de humedad (10-15 %); dicha zona se encuentra conformada por abundantes nódulos de roca no digerida (*boulders*).
- **Nivel 3, Roca basal:** Este nivel infrayace a la zona de mena niquelífera. Presenta un peso específico elevado, baja porosidad y muy bajo grado de humedad (inferior al 10 %), estando conformado por una masa de roca ultramáfica, fracturada, color verdoso a negro, la cual presenta bajo contenido de oxihidróxidos de hierro (menos del 20 %) y porcentajes muy bajos de níquel (0,25-0,5 %).

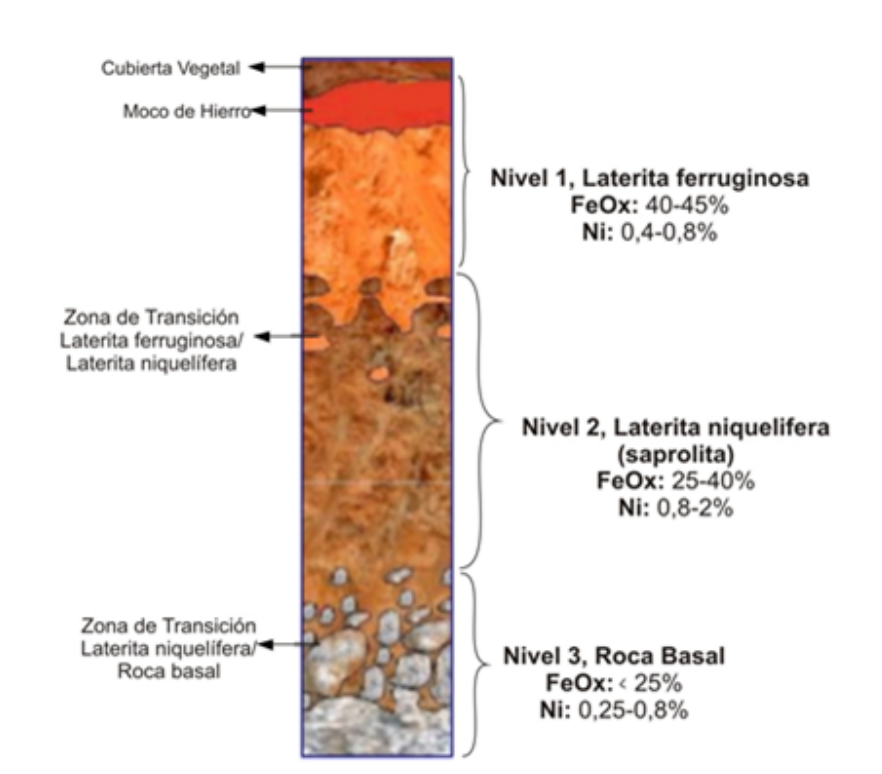


Figura 2.3. Corte vertical litológico del yacimiento Loma de Hierro.
Fuente: Birbe (2009), modificado de MLdN (2007).

2.2.2 Estado Bolívar.

En esta sección se presentan los casos de los proyectos: bauxita en Los Pijiguaos, minerales de hierro en Cinturón Ferrífero San Isidro y proyectos en aluvión-saprolita y veta, auríferas: Bizkaitarra (Matheus, 2004) y Hoja de Lata (La Barbera, 2005). La Figura 2.4 muestra la ubicación relativa entre estos, los cuales se desarrollan en las provincias geológicas Cuchivero, Imataca y Pastora.

El estado Bolívar con un área de 240.000 Km² (24 millones de Ha), lo cual representa 22 % del territorio nacional, presenta un sistema de colinas piedemontanas que cubre la franja noroccidental del escudo guayanés y la cuenca del río Orinoco, desde la desembocadura del río Sipapo (estado Amazonas) hasta la desembocadura del río Caura. Incluye la sierra de Imataca y la altiplanicie de Nuria en la divisoria entre los estados Bolívar y Delta Amacuro.

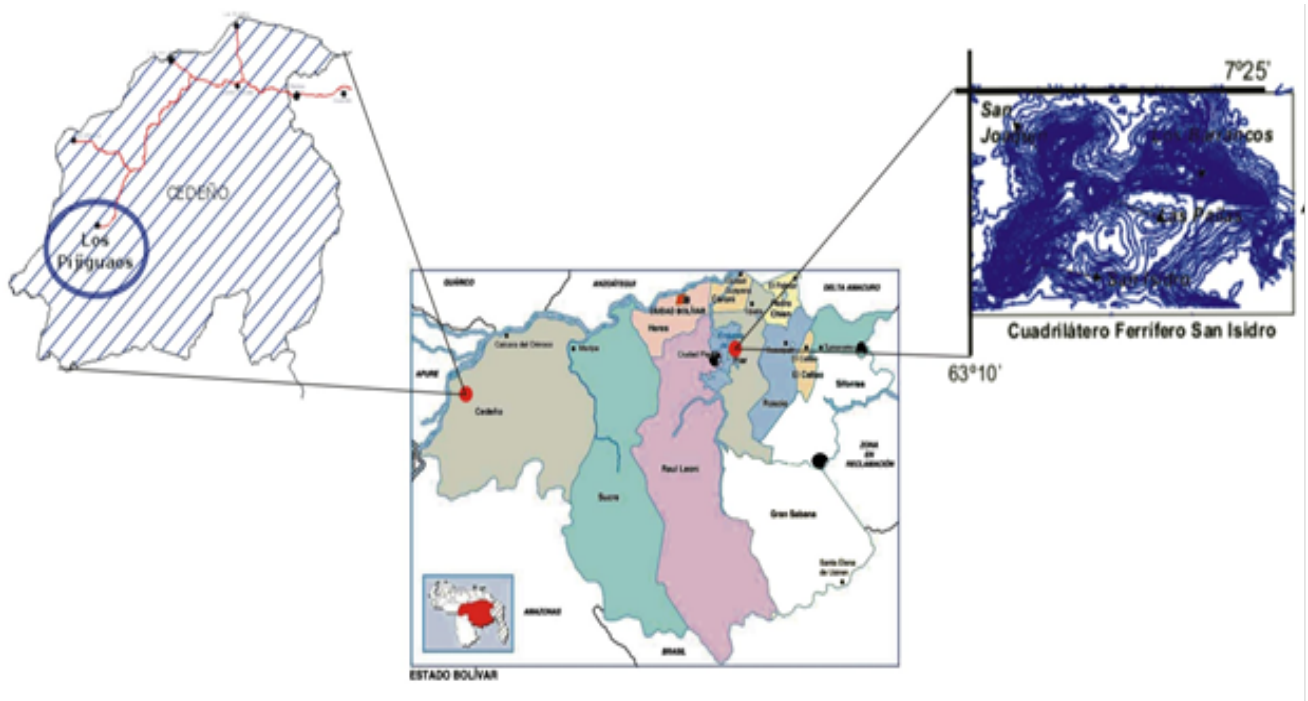


Figura 2.4. Ubicación relativa de cuatro (4) proyectos mineros en el estado Bolívar: bauxita, mineral de hierro y mineral aurífero.

Fuente: Modificado por Melo (2011) y tomado de Méndez (2008), Blanco (2007), La Barbera (2005) y Matheus (2004).

Con relación al mineral aurífero, es importante acotar que el caso del proyecto Hoja de Lata se considera en este trabajo por la producción de sedimentos durante las operaciones de reducción de tamaño (ripeado y molienda) y del apilamiento de arenas finas, por parte de la pequeña minería. Estas actividades de preparación de mena para la concentración con amalgamación aportan sedimentos que descargan al río Botanamo (La Barbera, 2005).

También resulta necesario dejar por sentado desde el inicio de esta sección, la obligatoriedad de dar cumplimiento a las medidas de prohibición de la extracción mineral en las cuencas de los ríos Caura, Caroní y La Paragua, como ya ha sido establecido por el Gobierno Nacional, en este trabajo se enfatiza en los casos de mineral aurífero en la cuenca del río Cuyuní. Solo por la necesidad de enfocar la atención en la cuenca del río Caroní se reportan estimaciones de pérdida de suelos realizadas por Piña (2002), a partir de minería hidráulica con dragado.

2.2.2.1 Bauxita, mina Los Pijigüaos.

Para evaluar el caso de extracción de bauxita en el estado Bolívar se consideran los trabajos de Hernández (2003) y de Méndez (2008). También se consultó el estudio sobre “Compatibilidad entre las Técnicas de Aprovechamiento Minero y el Entorno Ambiental en CVG Bauxilum – Los Pijigüaos”. La Figura 2.5 presenta una vista aérea del bloque de explotación B3S4 tomada del trabajo de Méndez (2008).

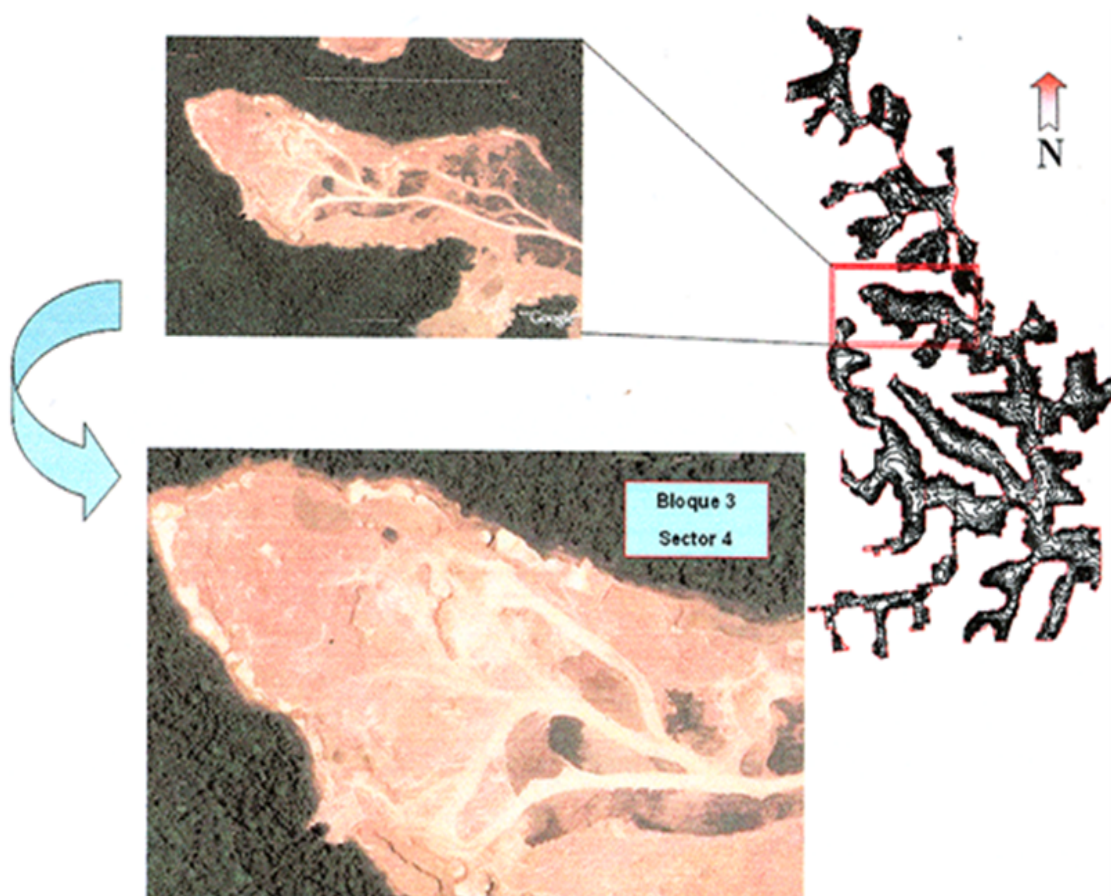


Figura 2.5. Vista aérea de bloque minero en mina Los Pijigüaos.
Fuente: Méndez (2008).

La meseta de la serranía Los Pijigüaos, también conocida como cerro Páez, se ubica en el municipio Cedeño, a 54 km al sureste del río Orinoco, entre los ríos Suapure y Parguaza. De Ciudad Guayana se encuentra a 520 km, al suroeste, y dista 500km de Caracas. Es una altiplanicie entre 600 y 700 msnm, con temperatura promedio anual de 30,5 °C, humedad relativa promedio anual de 79%, intensidad de precipitación de 17,3 mm/hr para un período de retorno de 5 años y una lluvia máxima de 5 horas.

La red de drenaje dendrítico controlado en la meseta por un patrón de fracturamiento local y regional es muy densa y se presentan la quebrada La Guacamaya y los caños Trapichote, La Tigra, Guaratarito, Negra Botella, El Secreto, La Batea, Las Pinas, Pijigüaos, todos drenando en la cuenca del río Suapure.

Geomorfológicamente la meseta está asociada a un ciclo de erosión joven, probablemente relacionado con una tectónica vertical de bloques. La presencia de terrazas escalonadas en los valles sugiere el registro de intervalos de tranquilidad y pulsos tectónicos sufridos por la región. La fisiografía del cerro Páez presenta laderas muy pronunciadas con altitudes superiores a los 100 m, de fuerte verticalidad y con cambios bruscos de nivel, lo cual genera perfiles que corresponden a una topografía bien accidentada con declives significativos desde el punto de vista de la erosión.

El término bauxita se ha generalizado para describir productos meteorizados ricos en aluminio, pobres en sílice y elementos alcalinos y alcalinotérreos. Esta última tendencia liga a los procesos de laterización que ocurren en el clima tropical húmedo. La composición laterítica fue producida por la meteorización del granito tipo rapakivi, con enriquecimiento supergénico de gibbsita que es mena de alúmina y debe contener no menos de 45 % de Al_2O_3 , no más de 20 % de Fe_2O_3 y entre 3 y 5 % de sílice reactiva y combinada (Mariño y otros, 1997; Hernández, 2003).

Como se muestra en la Figura 2.6, el perfil laterítico consiste de tres (3) zonas:

- Zona de acumulación: la capa orgánica es de 0,3 a 0,5 m de espesor e inmediatamente aparece la bauxita como una costra rica en alúmina de 2 a 3 m, seguido de una zona pseudo-pisolítica de 3 a 5 m, donde aparecen capas duras ricas en gibbsita y bolsones de material arcilloso
- Zona de lavado: moteada con presencia de sílice reactiva y cuarzo, con textura pseudo-rapakivi. Infrayace una zona saprolítica donde el grado de meteorización varía en concordancia con la profundidad
- Zona de roca: granito rapakivi fresco, roca madre.

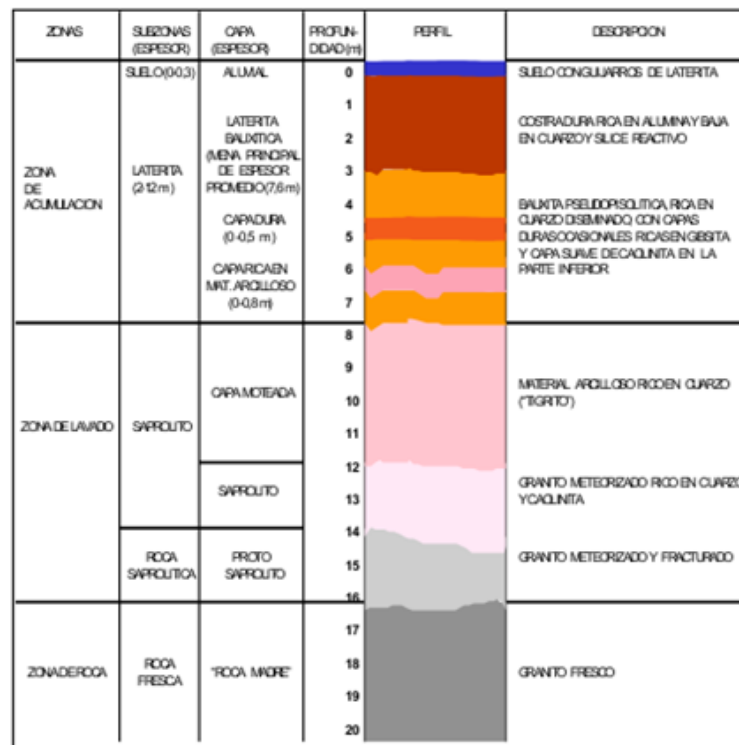


Figura 2.6. Perfil geológico del yacimiento laterítico de cerro Páez, mina Los Pijigüaos.
Fuente: Mariño y otros (1997).

Méndez (2008) evaluó el bloque minero de explotación B3S4 donde el escurrimiento anual es de $4,7 \times 10^9 \text{ m}^3$ y la permeabilidad del suelo es de $0,00528 \text{ cm/s}$ debido a la textura de los suelos que resultó en arena franco-arcillosa, SC, cuyos porcentajes corresponden a 6,8 % (grava), 72,5 % (limo más arena muy fina) y 20,6 % (arcillas).

La vegetación de la zona es medianamente abundante formada por pastos y arbustos diseminados; algunas zonas presentan vegetación boscosa principalmente a lo largo de los morichales. Los suelos lateríticos se caracterizan por albergar hierbas sabaneras y otras especies tropicales, causando un contraste en la cubierta vegetal sobre el yacimiento mineral y que marca los contactos del depósito geológico (Méndez, 2008). Según Hernández (2003) el espesor de la capa orgánica presenta un promedio de 50 cm en todo el yacimiento.

Méndez (2008) evaluó el bloque minero de explotación B3S4 donde el escurrimiento anual es de $4,7 \times 10^9 \text{ m}^3$ y la permeabilidad del suelo es de $0,00528 \text{ cm/s}$ debido a la textura de los suelos que resultó en arena franco-arcillosa, SC, cuyos porcentajes corresponden a 6,8 % (grava), 72,5 % (limo más arena muy fina) y 20,6 % (arcillas).

La vegetación de la zona es medianamente abundante formada por pastos y arbustos diseminados; algunas zonas presentan vegetación boscosa principalmente a lo largo de los morichales. Los suelos lateríticos se caracterizan por albergar hierbas sabaneras y otras especies tropicales, causando un contraste en la cubierta vegetal sobre el yacimiento mineral y que marca los contactos del depósito geológico (Méndez, 2008). Según Hernández (2003) el espesor de la capa orgánica presenta un promedio de 50 cm en todo el yacimiento. Méndez (2008) evaluó el bloque minero de explotación B3S4 donde el escurrimiento anual es de $4,7 \times 10^9 \text{ m}^3$ y la permeabilidad del suelo es de 0,00528 cm/s debido a la textura de los suelos que resultó en arena franco-arcillosa, SC, cuyos porcentajes corresponden a 6,8 % (grava), 72,5 % (limo más arena muy fina) y 20,6 % (arcillas).

La vegetación de la zona es medianamente abundante formada por pastos y arbustos diseminados; algunas zonas presentan vegetación boscosa principalmente a lo largo de los morichales. Los suelos lateríticos se caracterizan por albergar hierbas sabaneras y otras especies tropicales, causando un contraste en la cubierta vegetal sobre el yacimiento mineral y que marca los contactos del depósito geológico (Méndez, 2008). Según Hernández (2003) el espesor de la capa orgánica presenta un promedio de 50 cm en todo el yacimiento.

Méndez (2008) evaluó el bloque minero de explotación B3S4 donde el escurrimiento anual es de $4,7 \times 10^9 \text{ m}^3$ y la permeabilidad del suelo es de 0,00528 cm/s debido a la textura de los suelos que resultó en arena franco-arcillosa, SC, cuyos porcentajes corresponden a 6,8 % (grava), 72,5 % (limo más arena muy fina) y 20,6 % (arcillas).

La vegetación de la zona es medianamente abundante formada por pastos y arbustos diseminados; algunas zonas presentan vegetación boscosa principalmente a lo largo de los morichales. Los suelos lateríticos se caracterizan por albergar hierbas sabaneras y otras especies tropicales, causando un contraste en la cubierta vegetal sobre el yacimiento mineral y que marca los contactos del depósito geológico (Méndez, 2008). Según Hernández (2003) el espesor de la capa orgánica presenta un promedio de 50 cm en todo el yacimiento.

2.2.2.2 Mena ferrífera, minas del Cuadrilátero San Isidro.

La Figura 2.7 presenta una fotografía del cerro San Isidro en el Cuadrilátero Ferrífero de San Isidro (CFSI), en la provincia geológica de Imataca, donde se explotan los enriquecimientos supergénicos de cuarcitas ferruginosas, emplazadas en la cuenca del río Caroní. CFSI se ubica en el municipio

Raúl Leoni, al sureste de Ciudad Piar y 140km de Puerto Ordaz. Está conformado por cuatro (4) cerros, tres (3) de los cuales se encuentran en explotación: San Isidro, Las Pailas y Los Barrancos.

Cazabonne (1998) indica que el distrito ferrífero puede enmarcarse en una faja de 80km de ancho y 500 km de largo cuyo límite norte va desde la confluencia de los ríos Apure y Orinoco, siguiendo el curso de este último hasta los comienzos del delta. El límite sur, de oeste a este, alcanza el paralelo 7° 22', 10 km al sur del cerro Bolívar y continua en dirección noreste a 45° de la ciudad de Upata, hasta el cruce del paralelo 61° con el meridiano 8°. El clima de la zona es tropical húmedo, con temperatura media de 28,6 °C y pluviosidad media de 1.905 mm/año. La humedad relativa promedio es de 74 % y la evaporación promedio es de 2.238,3 mm/año.



Figura 2.7. Fotografía del cerro San Isidro, Cuadrilátero Ferrífero de San Isidro.
Fuente: Jefatura de Planificación y Desarrollo de Mina (2006), Blanco (2007).

El relieve es algunas veces suave; más del 70 % está constituido por sabanas cruzadas por morichales y con una elevación promedio de 350 msnm. Las elevaciones formadas por cuarcitas ferruginosas son alargadas y tienen un rumbo general de N60°E, con elevaciones variables entre 100 y 500 m sobre el nivel de dichas sabanas; en el tope de algunos de ellos se encuentra el mineral de hierro.

La mayoría de los drenajes en los cerros son intermitentes, de tipo dendrítico, aunque las quebradas La Puertica, San Isidro, El Cañito y Aguas Calientes son de régimen permanente Blanco (2007). También destaca que las cabeceras de los cursos de agua se encuentran por lo regular por debajo de

la formación de hierro, generalmente en el contacto de la roca mineralizada: gneis, esquistos y lateritas. Ubica cada cerro en su respectiva subcuenca, así:

- San Isidro se ubica en la subcuenca de la quebrada La Puertica, afluente por la margen izquierda de la quebrada Santa Bárbara que desemboca por la margen izquierda al río Caroní bajo.
- Las Pailas tiene la característica especial de su potencial hidráulico, tomando en cuenta la diversidad de manantiales de sus cercanías, los cuales alimentan al río Tocomá, el que a su vez desemboca en el río Caroní; en la conexión con el cerro San Isidro presenta un manantial con aguas termales cuya temperatura alcanza 38°.
- Los Barrancos está en la subcuenca de la quebrada Arasiama, que fluye en sentido oeste-este, hasta su confluencia con el río Arasiama aguas abajo, desembocando en el embalse de Guri.

De acuerdo con estudios de CVG TECMIN (1991), en la zona predominan dos unidades de vegetación: bosques y sabanas. Los bosques se definen por formaciones semi deciduas, de altura media y cobertura rala, con dos estratos arbóreos y predominio de especies nativas de gramíneas y leguminosas. Las sabanas se caracterizan por formaciones herbáceas de tipo llanero, dominado por un estrato herbáceo denso a ralo.

Acerca del origen de las menas, Cazabonne, (1998) indica que los depósitos son sedimentarios, epigenéticos y la mayoría ha sufrido intenso metamorfismo dinamotérmico y que la mineralización del hierro ocurre por la circulación de aguas meteóricas y cambios de pH. Las imágenes en la figura 2.5 muestran los modelos geológicos de los depósitos ferríferos en tres (3) de los cerros del CFSI.

Cabe destacar la diversidad litológica, que alcanza hasta más de 12 materiales, en todos los cerros: como blandos de alto tenor se encuentran finos negros, finos marrones, y limonita; duros de alto tenor se encuentran distintos tipos de costras: silíceas, bandeadas, hematíticas, gohetíticas, limoníticas, masivas y silícico-alumínicas (canga); las de bajo tenor como la cuarcita ferruginosa, tanto fresca como friable. Las Figuras 2.8 a y b, muestran los perfiles geológicos modelizados para los cerros San Isidro y Los Barrancos.

2.2.2.3 Mena aurífera: minas Hoja de Lata, Bizkaitarra y Playa Blanca.

La información está basada en recopilaciones de los trabajos de Matheus (2004) en el km 88 y La Barbera (2007), en el municipio Sifontes, a 77 km al sureste Tumeremo, en la vía que conduce a isla de Anacoco y a San Martín de Turumbán, ambos en la cuenca del río Cuyuní con longitud aproximada de 233 km, en territorio venezolano. Solo se reporta el trabajo de Piña (2002), en la cuenca del bajo Caroní a efecto de presentar las estimaciones de pérdida de suelos inducidos por los

métodos hidráulicos. No obstante, las características geoambientales en esta cuenca han sido reportadas en el caso del proyecto de mineral de hierro en el CFSI.

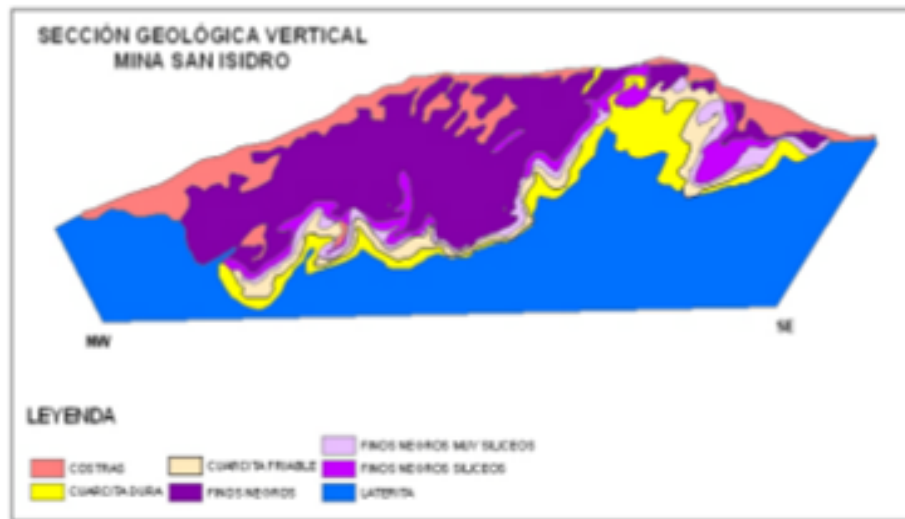


Figura 2.8. a) Sección geológica vertical del cerro San Isidro.
Fuente: CVG-FMO. Jefatura de Geología (1998).

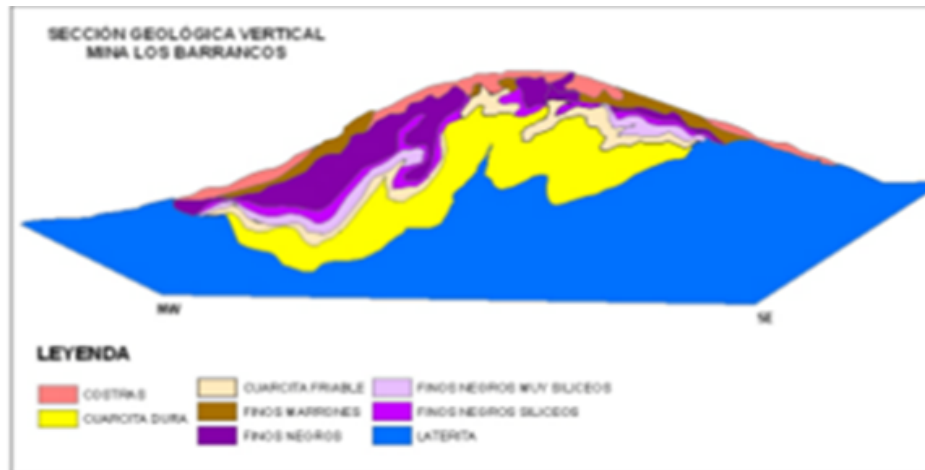


Figura 2.8. b) Sección geológica vertical del cerro Los Barrancos.
Fuente: CVG-FMO. Jefatura de Geología (1998).

Para la información del clima, relieve, suelos e hidrología, Matheus (2004) resume el estudio de MARN-UCV (2003). Con los registros de estaciones meteorológicas, Anacoco y Km 88, han sido caracterizadas las áreas con los proyectos auríferos Hoja de Lata y Bizkaitarra, respectivamente. Para 2004, se reportan regionalmente 1.578 mm y 2.903 mm, como promedios anuales (pma) y, 1.325

mm y 1.665 mm, como promedios de la relación evaporación-transpiración, resultando la cuenca de clima húmedo con gran proporción de bosque tropical basal. Las precipitaciones ocurren todo el año, aun cuando disminuye de enero a marzo y máximas en junio y julio. La temperatura promedio es característica de paisajes bajos, 26 ° C.

Con relación al área de Hoja de Lata, la subcuenca del río Botanamo tiene una longitud aproximada de 93km formada en la altiplanicie de Nuria, que desciende hacia el sur hasta confluir en el río Corumo, afluente del río Cuyuní y que tributa al río Esequibo, en la Zona en Reclamación de la Guayana Esequiba.

A partir de los datos de Anacoco, en la Reserva Forestal Imataca, se caracteriza clima tipo Aw, bimodal y pma entre 800 y 1.500 mm, con dos (2) máximos de precipitación, el principal de abril a octubre y el secundario en diciembre. Durante la sequía la precipitación media mensual es mayor a 50 mm. Por el sistema de Köpen, resulta Clima Tropical Lluvioso Monzónico (Amvi) y, por la de Holdridge en Zona de Vida de Bosque Seco Tropical (Bs-T). La evaporación media anual es 1.800 mm y presenta dos (2) máximos; septiembre-octubre y marzo. La humedad relativa media anual es de 80,5 % y las variaciones espaciales son mínimas.

En cuanto al relieve, la cuenca presenta peniplanos y lomas del río Cuyuní, conformada por peniplanicies y lomeríos. Las primeras, presentan desniveles alternando colinas y vegas. Las segundas, relieves de lomas subdivididas en cuatro (4) regiones conformados por abanicos coluviales, granitos con inclusiones de metaladas, montañas muy altas o colinas muy bajas asociadas a diabasas y metaladas y recubrimiento de materiales coluvio-aluviales arcillosos.

En el contexto subregional, geomorfológicamente está representado por un conjunto bastante homogéneo, con alturas variables entre 100 y 140 msnm, presentando pendientes entre 2 % y 30 %. Con relación a los suelos, son predominantemente residuales, generalmente profundos y ácidos de baja fertilidad. Desde la superficie y hasta una profundidad aproximada de 4 a 6 m, el suelo de color marrón rojizo es altamente meteorizado debido al proceso de descomposición por agentes físicos naturales. Se presentan los órdenes oxisoles, entisoles y ultisoles.

En cuanto a la hidrología, el drenaje es bueno, con buena estructuración y consecuentemente buena aireación, a excepción de los inundables. El río Cuyuní funciona como un gran colector común de muchos ríos que drenan hacia el norte formando una especie de amplio abanico abierto. A escala local, el patrón de drenaje es fundamentalmente dendrítico, aunque su distribución espacial se

asemeja a un patrón de drenaje radial, mostrando una alta interrelación con las características litoestructurales del área.

En el caso Hoja de Lata, los tributarios del río Botanamo drenan al suroeste y desembocan en la subcuenca para drenar hacia el sur y cambiar rumbo al este, desembocando en el río Cuyuní. En época de verano, el régimen es intermitente. En el caso Bizkaitarra, el sector está surcado por quebrada Manaca, tributaria de quebrada Sofia y a su vez de quebrada Amarillo, afluente del río Cuyuní.

La vegetación está representada en el área por un bosque veranero de carácter semidecídúo el cual presenta un desarrollo en altura de 25 m aproximadamente, con una estratificación vertical de tres (3) pisos arbóreos. Una baja proporción de los individuos pierde las hojas y el sotobosque es moderadamente denso. Las lianas y los bejucos son moderadamente abundantes, al igual que las epífitas.

Geológicamente, la cuenca del río Cuyuní y la subcuenca del Botanamo forman parte del Cinturón de Rocas Verdes (CRV). Las mineralizaciones auríferas se presentan bajo las formas: 1) vetas de cuarzo auríferas, de origen primario o secundario como producto de eventos hidrotermales en asociación con sulfuros metálicos de hierro y 2) depósitos de placer de oro, conformados por sedimentos aluvionales y coluviales recientes, originados por la erosión de las formaciones geológicas adyacentes (MARN-UCV, 2003).

La Figura 2.9 describe la ubicación relativa de la provincia geológica Pastora, de edad Precámbrico, específicamente de la era Proterozoica (Arqueozoico Superior-Proterozoico), la cual presenta la mayor potencialidad aurífera asociada al CRV. Se considera a esta provincia formada por una secuencia supracortical de rocas verdes, ubicadas preferentemente en zonas sinclinoides entre domos graníticos y cuyas edades se han estimado entre los 2.700 y 2.000 millones de años (Ma). Mendoza (2000) considera que esta provincia fue un basamento oceánico de composición máfica con extremos continentales actualmente aflorantes.

En Guayana se localiza un potencial total de 8.000 ton de oro, distribuido en una Zona de Oxidación, con 5.000 ton actualmente en explotación a cielo abierto y una Zona de Sulfuros, con 3.000 ton explotables con métodos subterráneos. La mineralización en la zona de oxidación se distribuye a su vez en los conglomerados Pre-Roraima (2.000 ton) y Roraima (2.000 ton), en las vetas de cuarzo aurífero (650 ton) y en los aluviones y eluviones (350 ton), según Mendoza (1988).

Con relación a los placeres, las áreas que contienen las 350ton de aluviones y eluviones ocupan diferentes territorios distribuidas en las siguientes regiones descritas por Mendoza (1988): Tumeremo (10.000 km²), El Callao (9.000 km²), El Dorado (9.000 km²), El Manteco (23.000 km²) y La Paragua (20.000 km²). Los yacimientos singénéticos, aluviales y eluviales, son los que más predominan en la región de El Dorado. Los eluviales ocurren, por lo general, en cerrillos y lomas en las inmediaciones de las vetas. Los depósitos de placer se encuentran principalmente al sur del río Cuyuní, con una superficie aproximada de 167.604,2 Ha.



Figura 2.9. Mapa de provincias geológicas y Cinturón de Rocas Verdes (CRV), estado Bolívar.
Fuente: Mendoza (2000).

Los depósitos aluvionales con oro en el municipio Sifontes, ocupan un área aproximada de 997.906,98 Ha, específicamente al sur de la Reserva Forestal Imataca (RFI). López (1981) argumenta que estos constituyen la principal riqueza minera de la región, encontrándose a lo largo de los principales ríos con sus afluentes, prácticamente desde las cabeceras de las Sierras de Lema y Supamo. Además, Benaim (2003) destaca las características geológicas favorables del área entre el río Cuyuní (margen derecha) y la carretera El Dorado-Santa Elena de Uairén (entre los paralelos 6°05' y 6°25').

Los depósitos de oro están en Provincia Pastora, Grupo Botanamo, principalmente en Formación Caballape (parte media), la cual se encuentra caracterizada litológicamente por presentar metabasaltos, meta-andesitas-tobáceas, meta-tobas cristalinas de cenizas volcánicas de composición cuarzo-andesíticas, además de rocas graníticas de Supamo e intrusivas básicas. Se estima un potencial aurífero mayor a 100 TM. Los yacimientos eluviales, aluviales y los *stockworks* son los más conocidos y productivos (Mendoza, 1988).

Finalmente, como ya se mencionó, para efectos de la estimación de sedimentos en suspensión hídrica en otras secciones de este trabajo se menciona la cuenca del bajo Caroní, por el laboreo minero para extracción de oro aluvional, en el sector Playa Blanca, específicamente en la zona de Caruachi. Las características climatológicas y geológicas fueron reportadas a lo largo de las consideraciones generales de la cuenca del río Caroní (Piña, 2002).

2.2.3 Distrito Capital.

En el municipio Libertador se destacan dos proyectos mineros, la Cantera Nacional y la empresa Minataca, C.A. La primera en la parroquia Antímamo y la segunda en la quebrada Tacagua Arriba, parroquia Sucre. La cantera para extraer caliza y esquistos y la arenera para extraer arena lavada, ambas con fines de obtención de arena para construcción. Esta sección se apoya en los informes técnicos de pasantía industrial de Escalante (2009) e inéditos de la operadora Minataca, C.A.

2.2.3.1 Piedra picada (mármol), cantera Nacional.

Se localiza en el lindero sur de la quebrada Mamera, a 3,5 km de la población Mamera, Hacienda Mamera, carretera nacional Antímamo-Los Teques, vía Las Adjuntas, sobre una topografía abrupta de áreas montañosas, con vegetación típica de regiones boscosas tropicales, donde predominan gramíneas, gamelotes y hierbas. Está entre las cotas 1.060 a 1.080 msnm en el suroeste de la mina, al lado de la vía de acceso, se encuentra un depósito antiguo de aluvión de notable dimensión y hacia la parte norte central sobre la terraza de la cota 1.040 msnm existen aluviones y bloques, producto de derrumbes recientes.

Por la quebrada Mamera los sedimentos susceptibles de ser transportados en suspensión hídrica, a partir de la fuente de extracción mineral, están caracterizados por limos con tamaño promedio de 0,05 mm, con densidad baja de 1,05 gr/cm³. A este aporte se adicionan los sólidos desagregados de masas minerales de derrumbes ocasionados por las precipitaciones.

La geología regional describe la localidad tipo de la Formación Antímamo caracterizado por un mármol masivo de grano medio, color gris claro, con cristales de pirita, alternando con capas de esquistos cuarzo-micáceos y asociadas con cuerpos concordantes de rocas anfibólicas. El mármol está formado por un 85-95 % de calcita, con cantidades menores de cuarzo detrítico, moscovita (2,5 %), grafito (2,5 %) y pirita (2 %).

La geología local se caracteriza por una secuencia estratigráfica transicional de intercalaciones de esquistos cuarzo-muscovíticos oscuros, mármoles lenticulares piritosos grises, mármoles cuarcíticos, anfibolitas granatíferas y/o piritosas de tonos negros y verdosos y cuarcitas de grano fino gris claro también lenticulares, conformando en conjunto un sinclinal asimétrico fallado y diaclasado, hacia la parte norte de la mina, cuyo eje tiene un rumbo general noroeste-sureste y buzando al sureste. Los flancos del sinclinal se presentan suavemente plegados en ambos costados del eje conformando secuencias de pequeños anticlinales y sinclinales.

2.2.3.2 Arena, arenera Tacagua Vieja.

La información en este estudio está basada en el Informe de Inspección realizado en Tacagua Vieja por el Instituto de Gestión de Riesgos y Administración de Desastres de la Alcaldía del Municipio Bolivariano Libertador, realizado en 2008. La Figura 2.10 muestra una fotografía de la arenera ubicada entre las progresivas 11,6 y 14 km de la autopista en sentido Caracas-La Guaira, en el margen izquierdo de la quebrada Tacagua, en las coordenadas geográficas UTM: N1.164.400 – 1.164.800 y E720.500 – 721.825. La elevación de la sección de la quebrada donde se desarrolla la arenera está entre 540 y 640 msnm.

La quebrada Tacagua presenta 26 km de longitud de cauce principal y pendiente media de 0,23 % que colecta un 61 % en volumen de aguas servidas. En el sector Caujaro, se registran precipitaciones con intensidad de 21 mm/h (duración mayor a 6 hr) y caudal máximo de 100 m³/s (25 años, período de retorno). La altura de lámina de agua para esta lluvia puede alcanzar 4 m, desde el lecho, pudiendo superar la altura de seguridad contra inundaciones, en el valor del caudal máximo referido. Más aun, se presenta una vulnerabilidad hidrometeorológica elevada, con 150 m³/s y 5 m de lámina de agua, para 500 años de retorno.

La parte alta de la cuenca, así como los cauces tributarios son alargados, bastante anchos en las partes superior y central, con pendientes fuertes que disminuyen a medida que se acercan a las zonas

de descarga. En la cuenca alta el drenaje es dendrítico, aunque los cauces de orden 3 y 4 tienden a orientarse paralelos en las zonas de pendiente fuerte y moderada.



Figura 2.10. Fotografía del cauce de la quebrada Tacagua, arenera Minataca, C.A.
Fuente: INGEOMIN-UCV (2009).

Las cuencas medias se caracterizan por pendientes más suaves, con secciones de cauces más amplios y con grandes rocas situadas en los sitios de transición de pendiente, donde se desarrollan los diferentes asentamientos en Tacagua Vieja. En la cuenca media es típica la acción erosivo-regresiva de los torrentes destacándose en muchos casos cauces modificados por erosión en una margen y deposición en la otra.

En esta sección la vegetación es poco densa y de tamaño pequeño y se encuentran estrangulamientos del cauce con disminución hidráulicamente significativa de la sección hidráulica de drenaje.

Las pendientes en los sectores de Tacagua Vieja son bastante fuertes e induce flujos en época de lluvia que aceleran y aumentan su capacidad de transporte y arrastre de material, aumentando la socavación regresiva en la parte baja e induciendo asentamientos del terreno.

El yacimiento forma parte del Grupo Geológico Caracas, específicamente de la Formación Las Brisas y el Grupo Tacagua. Está constituido por esquistos cuarzo-albítico-micáceo-calcáreo-grafitosos, de color gris, intercalados con esquistos cuarzo-albítico-epidóticos, de color verde.

miembro Cumarebo. El yacimiento consiste de una gran bioherma estratificada de coral y algas (cuerpo lenticular de origen orgánico dentro de estratos de diferentes litologías), con espesores que varían entre 0 y 120 m. Se encuentra cubierto por una serie de lutitas margosas y biostromas calcáreos (capas de caliza paralelas a la estratificación general).

2.2.4.2 Arcilla: cantera El Veral.

La cantera está en el fundo “Monte Oscuro” en el cerro El Veral, con coordenadas geográficas UTM E 465.200 y N 1.270.300, respectivamente. La geología corresponde a la Formación El Veral, la cual yace aparentemente discordante (según algunos autores) sobre el Miembro Turupia de la Formación Caujarao. Esta formación se compone de sedimentos netamente marinos, los que se pueden dividir en las siguientes tres (3) unidades:

- Unidad A (inferior): intercalación de más de 110 m de lutitas arcillosas de color oscuro, lutitas arenosas ligeramente calcáreas, con algunos bancos arenosos, arcillas y bancos de ostreidos.
- Unidad B (media): conformada por un banco potente de aproximadamente 20 metros de lutitas oscuras, con capas y lentes delgados areno - margosos.
- Unidad C (superior): constituida por aproximadamente 35 m de lutitas arcillosas, arenosas y margosas de colores gris oscuro y amarillo con algunos niveles fosilíferos. La calcificación ha sido intensa en toda la unidad, siendo más aguda hacia el suroeste.

2.2.5 Estado Miranda.

De este Estado, se han seleccionado dos (2) casos de extracción de minerales para la industria de la construcción: calizas, para cemento y como árido, y un grupo de areneras. La caliza proviene de cantera El Melero, en los valles del río Tuy, operada por la Fábrica Nacional de Cemento (FNC). La arena lavada proviene areneras en la cuenca del bajo río Tuy, subcuenca del río Grande o Caucagua, región de Barlovento oriental. Por una parte, Delgado (2011) aportó datos de recuperación integral de talud en la cantera y por la otra, Falcón (2007) estudió el impacto ambiental acumulado por las areneras. La Figura 2.12 muestra la ubicación relativa de los dos (2) proyectos mineros.

2.2.5.1 Caliza: cantera El Melero

La cantera El Melero, desarrollada entre 550 y 700 msnm, en el lado norte del valle con dirección general este-oeste, en el municipio Cristóbal Rojas. La temperatura media anual es de 29° C y la

pluviosidad es de clima tropical de sabana (seco en verano y lluvioso en invierno), con máximas de junio a agosto y 800mm de precipitación media anual.



Figura 2.12. Ubicación relativa de cantera El Melero y areneras de Caucagua, estado Miranda.
Fuente: Delgado (2011) y Falcón (2007).

La quebrada Caiza es el curso más importante en el sector; recoge cursos de agua menores que drenan principalmente del norte, dentro de los límites de la cuenca media del río Tuy. En general, la ladera está cubierta por una vegetación de poca a mediana altura; sin embargo, en las partes altas de la cuenca se desarrolla una vegetación boscosa más densa. Entre las especies arbóreas del bosque caducifolio se reconoce samán, yagrumo, jabillo, aceite, algunos robles, dividive, entre otras. Y entre los arbustos predominantes: el alcornoque, cují y guayaba sabanera. Debido a la intervención antrópica a que ha estado sometida el área, durante el desarrollo de la explotación minera, es muy difícil encontrar especies nativas de fauna.

En cuanto a los suelos, se consiguen residuales por el alto grado de alteración in situ del esquisto micáceo calcáreo, originando un suelo limo-arcilloso calcáreo, color amarillo claro hasta blanco oscuro. También se consiguen coluviales caracterizados por la presencia de bloques de caliza de hasta 3 m de diámetro, embebidos en el suelo residual de la alteración de esquistos, con aristas angulares a subangulares, mezcladas con el limo areno arcilloso, color marrón claro y tonos rojizos.

En cuanto a la geología local, principalmente afloran rocas metamórficas como filitas, esquistos calcáreo-micáceos, esquistos calcáreo-grafitosos y mármoles, correspondientes a la Faja de Paracotos, en la Formación Las Mercedes. Se observan abundantes vetas de calcita translúcida, blanca o amarillo claro, de hasta 5 cm de espesor y presencia de vetas de cuarzo. Las vetas tienen buena esquistosidad y por lo general se presentan plegadas. Se encuentran en contacto con las filitas al norte, los esquistos calcáreos grafitosos al suroeste y hacia el sur con la unidad de mármoles.

2.2.5.2 Arena: areneras de río Grande o Caucagua

Las areneras se desarrollan en el tramo entre el puente a Aragüita y puente Mendoza, sobre el río Caucagua, con ancho promedio de 40 m, en el piedemonte de las estribaciones montañosas que bordean la llanura de Barlovento, al norte. La temperatura media anual es superior a 18° y precipitación media anual entre 1.500 y 2.000 mm, con régimen climático de tipo monzónico, período corto de sequía de 2 a 3 meses. La humedad relativa media anual es de 80 %, que permite bosques perennifolios. La topografía es plana porque el río Grande ha depositado un volumen significativo de sedimentos.

En el área regional del Tuy se presentan varios patrones básicos de drenaje: dendrítico, subdendrítico, subparalelo, radial, errático y combinaciones. En los valles del río, medio y bajo, las corrientes en su mayoría son insecuentes, con naturaleza centrípeta a subparalela en algunas zonas, debida al carácter semiendorréico y superficie semiondulada de la cuenca.

Estudios hidráulicos han indicado abundantes curvas del cauce y erosión del lecho al pie del margen exterior de la curva, lo cual impide soportar alturas verticales mayores a 3,5 m debido a la ocurrencia de deslizamientos y retroceso del río. Ha sido observada fragilidad dentro del cauce debida a la intensa movilidad del río, dentro de su cinturón de meandreo, y por continuos derrumbes. El tramo estudiado no tiene capacidad de conducción hidráulica para el caudal máximo de 100 años de período de retorno, estimado en 688 m² porque se inunda su ribera derecha en extensiones mayores a 1.000 m. La ribera izquierda se inunda y las aguas son contenidas por el terraplén de la carretera actual (tronal 9).

Por otra parte, las crecidas del río Grande hasta Caucagua se deben a la presencia de múltiples obstáculos al flujo, como siembras y vegetación de pastos abundantes en la zona de inundación de la margen izquierda del río, así como a la existencia de un bosque tupido sobre la zona de inundación derecha.

2.2.6 Estado Zulia

Los trabajos consultados fueron los de Jaspe (2002), van Zanten (2004), Angola (2005) y Ávila (2008) sobre la extracción de carbón mineral en la cuenca del río San Rafael de Guasare, de 150km² aproximadamente, en el flanco nororiental de la sierra de Perijá. Esta cuenca se extiende de norte a sur, desde la falla de Oca hasta el Alto de El Totumo-Inciarte y está protegida jurídicamente como zona protectora de reserva hídrica.

En cuanto al clima, la temperatura media anual es de 32,8°C. El promedio de precipitación anual es 1.438mm y el promedio de evaporación anual es 1.958mm (estación El Carbón). La evaporación es mayor que la precipitación lo que implica que la zona es propensa a la sequía. La humedad relativa oscila entre 71 y 89%. La Figura 2.13 muestra la ubicación relativa del proyecto minero, mina Paso Diablo.

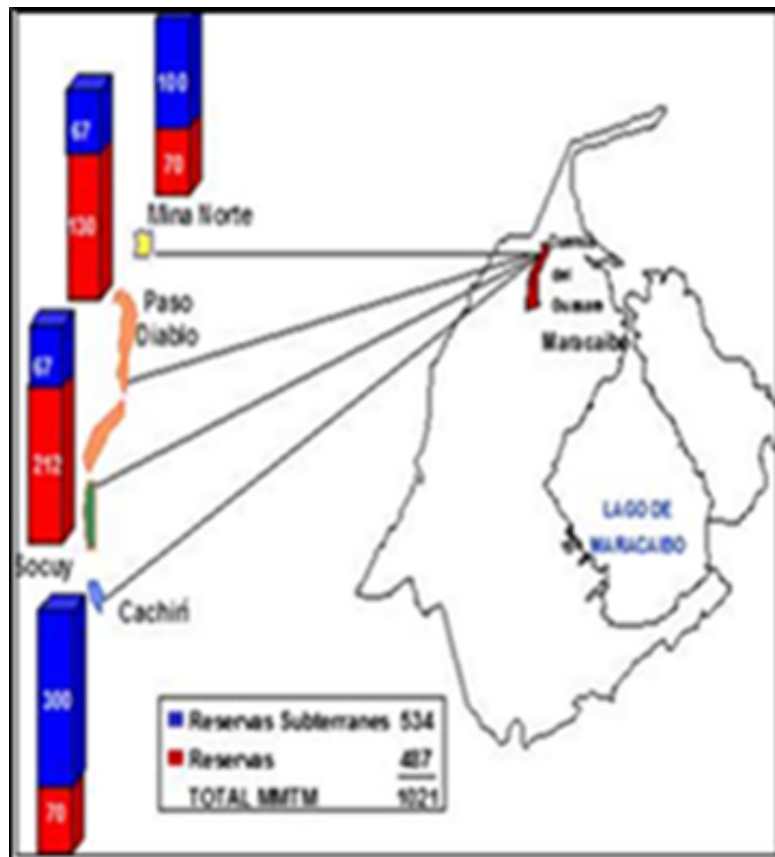


Figura 2.13. Ubicación relativa de mina Paso Diablo, cuenca carbonífera de Guasare, estado Zulia.
Fuente: Tomado de Van Zanten (2004).

El extremo oeste de sierra es de topografía montañosa, con alturas de hasta 3.700 msnm. Según análisis hipsométrico, el relieve de la cuenca del río Guasare es de piedemonte con altitudes entre 80 y 200 msnm y pendiente media de 52% caracterizada por:

- Zona plana y suavemente inclinada con pendientes menores a 7%
- Zona de montañas aladaña a caños constituyendo la más accidentada con pendientes superiores a 20%
- Zona de colinas y valles (donde se encuentra la mina) con cota media de 150 msnm.

En zonas aladañas, de influencia en los aportes considerables de agua, el promedio anual se eleva a 2.000 mm. No obstante, en el área minera, son muy variables las precipitaciones promedio anuales registradas en las estaciones meteorológicas: El Carbón: 1.192 mm (1995); 633 mm (1996) y 99 mm (1998); Carichuano 1.012 mm promedio (1994-2002). En el área correspondiente al sur de la mina Paso Diablo fluyen los principales ríos: Paso Diablo, Carichuano, Tigre y Norte. Las cuencas de Paso Diablo, Carichuano y Tigre constituyen un factor limitante para la ejecución del desarrollo de la mina, debido a que los cauces de sus ríos principales convergen en dirección este-oeste hacia el área de explotación (449 Ha) y la zona destinada para la construcción de la escombrera suroeste.

La cuenca del río Paso Diablo tiene una extensión de 1.853 Ha (18,53 km²); longitud de cauce de 7,5 km y alcanza una magnitud máxima de 215 m³/s, con trayecto en dirección noreste y pendiente promedio de 66 m/km. Presentan alineamientos depresivos coincidentes con trazas de fallas por donde drenan caños, formando segmentos de cauce recto y cruces ortogonales. Aproximadamente, el 60 % del área tiene drenaje dendrítico, como consecuencia de la unidad litológica; incluyendo tanto la roca quemada como la roca no afectada por la calcinación.

Los caños son intermitentes, presentándose en los principales (Planeta, Colorado y Baqueta) un notable flujo. Existen depósitos de travertino o tufas calcáreas, dispuestas escalonadamente, que permiten la formación de lagunas. El drenaje está correlacionado principalmente con la resistencia, la permeabilidad y la erosión de la roca existente, siendo de moderada densidad y en su mayor parte de tipo estacional

La litología consiste principalmente en areniscas y algunas calizas. Los suelos derivados de areniscas son de poco espesor por ser muy susceptibles a ser erosionados; son poco fértiles y bien drenados. Los suelos derivados de calizas poseen partículas de limos finos y arcillas; tienen textura fina, pero la estructura del suelo permite alta permeabilidad y buen drenaje, excepto cuando existe mucha

humedad natural. Los suelos presentan un horizonte ocreo con textura franca y un horizonte argílico, entre 20 y 80 cm, con textura franco-arcillosa, con permeabilidad moderada.

En la cuenca carbonífera afloran las formaciones: Guasare, Marcelina y Misoa-Mostrenco, todas de edad Paleoceno. La mina Paso Diablo ha sido desarrollada en Fm. Marcelina con mantos económicamente explotables, de mayor interés económico. Geológicamente, consiste en una secuencia de ambiente paludal, con capas de carbón suprayacentes a Fm. Guasare, en un contacto concordante y transicional en el norte de la sierra. La sección tipo, en el río Guasare, presenta una secuencia interestratificada de lutitas oscuras y carbonáceas que localmente presentan porcelanitas, areniscas de grano fino a medio, micáceas y varios mantos de carbón. Se caracteriza por capas de carbón, desde medio metro (a 45 m por encima de la base de la formación) hasta el manto más grueso de 13 m de espesor. En sentido vertical ascendente, las capas de carbón aumentan en frecuencia y espesor, hasta alcanzar su máximo desarrollo cerca de la mitad de la formación. La Figura 2.14 muestra el corte vertical geológico con la disposición de los mantos de carbón.

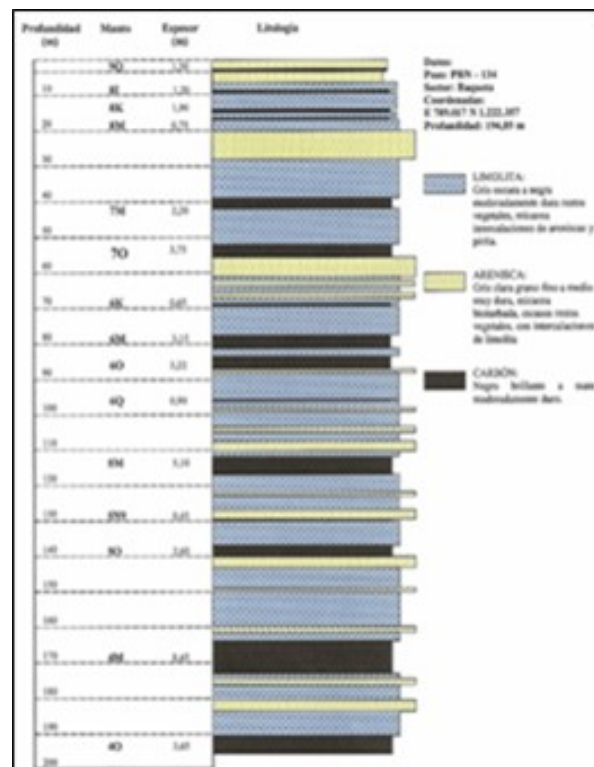


Figura 2.14. Diagrama de columna litoestratigráfica Fm. Marcelina, mina Paso Diablo.
Fuente: Carbones del Guasare (sin fecha).

La vegetación natural está constituida por especies deciduas (que pierden por completo las hojas), de capas redondas a semiplanas, de moderada densidad y con un dosel relativamente poco compacto. Está caracterizada por especies de porte mediano, bajo o rastrero, dado el alto grado de intervención cuando fueron extraídas grandes cantidades de material comercial para surtir el aserradero de la zona. La cobertura vegetal presenta una combinación de comunidades leñosas y arbustivas; se encuentran pastizales que denotan la intervención antrópica por actividades agropecuarias, así como zonas denudadas por la actividad minera. Algunas colinas tampoco presentan vegetación o muy poca; estas zonas han sufrido procesos erosivos con el consiguiente arrastre de suelo.

2.3 Características de diseño minero.

Esta sección con características de diseño de proyectos mineros se presenta en el mismo orden que en la sección anterior, según la secuencia regional. Se destacan los métodos de explotación y los diseños geométricos y de equilibrio límite de cada proyecto minero seleccionado, con énfasis en las alturas de: taludes, de trabajo y final de banco, de terraza, o de berma en cauces de ríos. En cuanto a los métodos de explotación se tienen bermas en placeres aluvionales con metales auríferos y no metálicos como áridos para construcción, bancos para no metálicos como calizas y carbón, y terrazas para lateritas bauxíticas y niquelíferas.

El arranque mineral en estos proyectos es realizado con distintas modalidades de entrega de energía, según la compacidad o la resistencia a la compresión simple de los materiales. Puede ser por disgregación de sólidos sueltos o sub-consolidados usando minería hidráulica, o con técnicas de excavación mecanizada en estratos consolidados. La aplicación de mayor energía ocurre mediante voladuras con explosivos, tanto para arrancar calizas y minerales de hierro con método de banco múltiple, como carbón con voladuras bajo manto y en fosa abierta con escombreras externas. El único caso de excepción con minería subterránea en veta aurífera se reporta por el apilamiento de material granular para el procesamiento mineral.

Como elemento del diseño de las minas, todas son desarrolladas con frentes de arranque, pistas y rampas para el acarreo mineral, patios para almacenamiento temporal y remanejo y escombreras con estériles. En algunos casos se diseñan depósitos para mineral no conforme, o no cumple las especificaciones de calidad del mineral.

Las sub-rasantes de las vías y las bases de terraplenes están constituidas por materiales granulares *in situ*, a veces mejorados con materiales de préstamo necesarios para las operaciones básicas de

producción, pero que terminan siendo sobre-triturados con el paso de la maquinaria pesada y aportan al volumen total de sedimentos producidos desde los taludes mineros.

En los casos donde ha sido posible obtener la información se dan variables de producción mineral: reservas minerales, ritmo de producción y vida útil de la mina a los fines de evaluar los lapsos de explotación mineral y el potencial de acumulación de sedimentos en cursos naturales de agua. Asimismo, se describen características de concentración mineral como el tenor en el caso de metálicos y la relación estéril/mena en el caso de los no metálicos.

2.3.1 Estado Aragua: Ferroníquel, mina Loma de Níquel.

Según Ochoa y Reyes (2011) y Melo (2011), los bancos son diseñados y excavados con 5m de altura, bermas de 16m, ángulo de trabajo de 65°, ángulo general de mina de 16° y 10 % de pendiente general. La Figura 2.15 muestra el talud total analizado por probabilidad de falla.

La distancia de acarreo a la planta de procesamiento mineral, aguas abajo, es de 4,5 km. En las escombreras la altura de banco y el ancho de berma son de 10 m, respectivamente. El ángulo de talud corresponde con el ángulo de fricción promedio (ϕ) de 35° y, el ángulo general de talud de 23°. Las operaciones unitarias se caracterizan por un sistema discontinuo con equipos de excavación de cargador frontal y camión roquero.

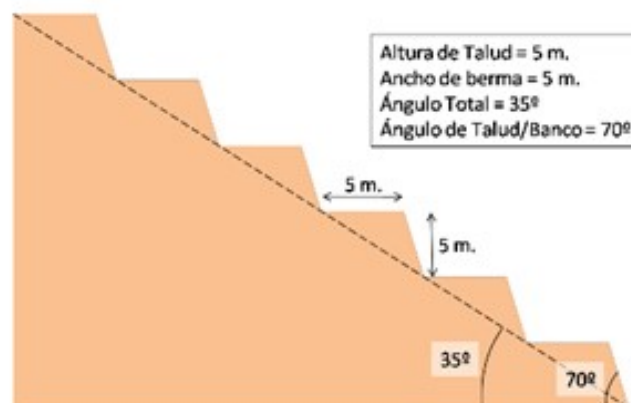


Figura 2.15. Representación gráfica para cálculo de probabilidad de falla de talud.
Fuente: Ochoa y Reyes (2011).

Para el proyecto minero se tienen reportadas:

- 14.150.000 ton en reservas medidas, con tenor de 1,59 % de Ni
- 27.875.000 ton en reservas indicadas, con tenor de 1,52 % de Ni
- 5.755.000 ton en reservas inferidas, con tenor de 1,43 % de Ni

Se estima la recuperación mineral en un 86 % y la tasa de producción en 1,3 MMT secas por año, durante 30 años, iniciados en 1999. Las áreas deforestadas y afectadas por minería representan 6,78 Ha y los planes de reforestación se han venido adelantando, siendo que en el 2010 fueron reforestadas 0,25 Ha.

Según Ochoa y Reyes (2011) la geometría de diseño de los bancos es estable, ya que fueron evaluados y resultaron factores de seguridad mayores a 1,732, con valores de cohesión y ángulo de fricción obtenidos en pruebas de laboratorio. Cambios en la cohesión del material por efecto de la meteorización se traducen en factores de seguridad muy bajos, es decir la probabilidad de falla es muy alta. Aumentar la altura de banco, representaría comprometer la estabilidad de los taludes; esto se deduce del análisis hecho sobre la muestra de laterita ferruginosa proveniente del sector 3 de la mina, ya que bajo cualquier geometría de talud con ángulo superior o igual a 65° y altura de 10 m presenta un factor de seguridad inferior a 1,2.

Acerca de la influencia del ángulo de talud sobre el diseño y economía de la minería a cielo abierto, la necesidad de aumentar la inclinación del ángulo de talud final, a fin de extraer la mayor cantidad de mineral, está limitada por factores adicionales que determinan esta inclinación, como las características de los equipos, las vías de acarreo y las legislaciones vigentes. A pesar de que las características finales de talud puedan ser de importancia económica, la estabilidad de los bancos individuales se convierte en un tema de atención inmediata.

De acuerdo con los factores de seguridad obtenidos, se considera que la geometría recomendable para los taludes finales de mina, consta de bancos y bermas de 5 m de altura, con una inclinación de 70°, y con un ángulo de talud total igual a 35° (Ochoa y Reyes, 2011).

2.3.2 Estado Bolívar

Nuevamente, en esta sección se presentan los casos de los proyectos: Bauxita en mina Los Pijigüaos, menas de hierro en el Cinturón Ferrífero San Isidro y los proyectos en aluvión-saprolita y veta, auríferas: Bizkaitarra (Matheus, 2004) y Hoja de Lata (La Barbera, 2005).

2.3.2.1 Bauxita, mina Los Pijigüaos.

Aunque no se cuenta con el diseño geométrico de la excavación se tienen datos reportados por Méndez (2008). El método de explotación con técnicas convencionales, en descubierta (*stripping mine*), aplica arranque mecánico de manera selectiva, con tractores o palas hidráulicas. Se remueve o desmonta el suelo orgánico (capa vegetal) de recubrimiento para exponer la mineralización en el sentido del tenor de corte.

Donde el espesor es menor de 10m se usan tractores para escarificación y donde supera este espesor se emplean palas hidráulicas. La carga se realiza con cargadores frontales en combinación con tractores y el acarreo se realiza con camiones roqueros. La pendiente promedio de la excavación, al igual que el gradiente longitudinal de los elementos de conducción de agua y retención de sólidos, es de 8 %.

Como ya fue descrito, la bauxita se presenta en superficie como costra o coraza, localmente recubierta por suelo rico en materia orgánica que puede alcanzar, excepcionalmente, un (1) m de espesor. Además, el yacimiento laterítico presenta forma de manto sobre topes planos y mesetas (*plateaus*), en alturas entre 620 y 690 msnm y con pendientes naturales variables entre 0 y 10°. En áreas con pendientes superiores a 15°, los procesos erosivos destruyen o eliminan los mantos y costras bauxíticas. Los espesores de bauxita varían entre 3 y 18 m, el valor promedio es de 8 m y los mayores espesores se localizan hacia el noreste del yacimiento.

Desde 1983, el ritmo de producción ha sido incrementado por encima de 6 MMT/año, en años recientes. Las reservas probadas por 134 MMT fueron reconocidas en mallas de 25x25 m y caracterizadas químicamente sobre la base de bauxita seca, con densidad de 1,625 t/m³ y con un factor de pérdida de 15%, distribuidas en 6.041.410 m². Las reservas probables en 89,9 MMT (reconocidas en mallas de 100x 100 m). En consecuencia, la vida útil se podría extenderse al menos por 20 años adicionales.

2.3.2.2 Mena ferrífera, minas del Cuadrilátero San Isidro.

Asumiendo como ejemplo específico los cerros San Isidro y Los Barrancos, el método de explotación es con bancos múltiples, con avance hacia el centro hasta los límites de la excavación. La extracción inicia en la cota superior del yacimiento y desciende en forma de fosa. La Figura 2.16 muestra el diseño geométrico cuyas principales características geométricas son:

- Altura de banco, 15 m
- Ancho mínimo de berma, 10 m
- Ángulo de talud, 70°
- Ángulo de fosa (por litología)
 - Mena, 45° (talud 1:1)
 - Cuarcita, 45° (talud 1:1)
 - Laterita, 38° (talud 1:1,25)
- Pendiente máxima de rampa, 10 %
- Pendiente de piso de trabajo, 2 %

En las rampas, el ancho mínimo operativo, de 30 m, incluye 3 m de cuneta y 3 m de muro de protección. Los depósitos de materiales no conformes (en espera de adecuación tecnológica) consisten de cuarcitas duras y friables y minerales de alto tenor con alta sílice.

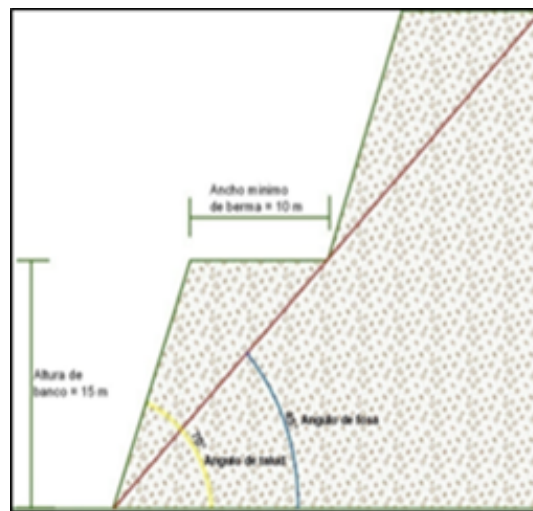


Figura 2.16. Diseño geométrico de fosa abierta en Cuadrilátero Ferrífero de San Isidro.
Fuente: Blanco (2007).

Con relación a las escombreras, con materiales con alto contenido de fósforo y alto contenido de alúmina, se tienen las siguientes características de diseño:

- Altura de terraza, 10 m para la primera y 5 m para las restantes, superiores
- Inclinación de talud, 33°
- Inclinación general de talud, 20°
- Ancho de berma, 10 m
- Ancho de terraza, 15 m
- Pendiente de piso, 1%
- Pendiente máxima de rampas y vías, 10%

- Ancho de rampas de acceso, 30 m
- Ancho mínimo de vías, 10 m.

2.3.2.3 Mena aurífera: Minas Hoja de Lata, Bizkaitarra y Playa Blanca.

En el proyecto Hoja de Lata, La Barbera (2005) reporta las características de la veta principal mineralizada de 700 m de largo aproximadamente, con espesor de 1,40 m, límite de profundidad de 120 m (en una primera etapa) y un tenor promedio estimado de 22 gr/ton. Desde hace unos años han sido excavados 16 pozos (barrancos) con diámetro de 1,20 m distribuidos longitudinalmente, con profundidades entre 30 y 100 m. Se excavan cámaras según el buzamiento de la veta aplicando voladura de roca para el arranque, con cordón detonante, pistón eléctrico y ANFO granulado. Además de martillo eléctrico, realizan otras operaciones manuales con mandarria, cincel y barras, completando el arranque mineral.

El mineral es cargado con pala en balde (tina) e izado a superficie con *winches* (izadoras o clásica “*machina*” o torno manual). El balde se desliza por un tobogán (corredera) construida con madera. En superficie se vacía el contenido del balde en sacos, de aproximadamente 70 a 80 kg, que son apilados y almacenados para luego ser cargados en camiones y transportados a 1km área de procesamiento mineral.

En el área de reducción de tamaño, están instaladas dos (2) trituradoras de mandíbulas y cinco (5) molinos de martillos, accionados por motores diesel. La tolva de la trituradora de mandíbulas, con capacidad de 20 ton/día, es alimentada manualmente para reducir desde 4” (máx.) a ¾” ó ½” (mín.). A continuación, pasa a un molino de martillo, en húmedo, reduciendo a tamaño de arena fina. El material pasa por una serie de planchas barnizadas con mercurio, formando la amalgama con oro, que luego precipita con la refinación.

La descarga del molino pasa por una serie de tanquillas (lagunas) donde depositan las arenas hasta llegar a una laguna de sedimentación final, donde el agua es recirculada hasta los molinos. A medida que las lagunas se van llenando de arena, éstas son vaciadas o dragadas con palas; las colas producto del proceso de beneficio son apiladas cerca de los molinos (ver figura 2.19), permaneciendo a la intemperie por tiempo prolongado.

Según proyecto para Pequeña Minería Hoja de Lata (PPMHL, 2004), las reservas permiten explotar por un período de 15 años, a un ritmo de producción de 16.476,67 Ton/año. Las reservas geológicas representan 353.071 Ton y las minables fueron estimadas en 247.150 Ton, considerando el valor

mínimo de recuperación de 70 % y descontando el mineral abandonado en los pilares de soporte de la excavación.

En el proyecto Bizkaitarra, Matheus (2004) describe el método de explotación con barrido hidráulico y tame barnizado con mercurio líquido. La Figura 2.17 muestra fotografías del método de explotación y beneficio mineral, con barrido hidráulico, bomba de succión y tame barnizado con mercurio líquido para amalgamación.



Figura 2.17. Fotografías de método de arranque y beneficio mineral, proyecto Bizkaitarra.
Fuente: Matheus (2004).

Según Piña (2002), en el sitio Agua Blanca, bajo Caroní, se aplica minería hidráulica con balsas, disgregando previamente los sedimentos del fondo del río con un elemento rotatorio. El mineral es succionado hasta la cubierta, bajo un tirante de agua entre 7 y 40 m, con bombas de 6 y 8" de diámetro ($\emptyset$), para alimentar a un primer trómel desenlodador y clasificador, seleccionando la granulometría superior e inferior a $\emptyset 3/8"$. El material retenido en la malla de $3/8"$ cae en un colector de colas y devuelto al cauce del río.

El material pasante va directamente a una lavadora (*jig*) con malla de 4 mm. El material retenido es tratado por amalgamación con mercurio. El aluvión inferior a $\emptyset 4$ mm constituye los minerales pesados y cae en un trómel pequeño que selecciona en el rango superior e inferior a $\emptyset 2$ mm. También en este rango granulométrico se encuentran diamantes, los cuales recuperan con la utilización de surucas.

Los materiales disgregados y devueltos al fondo están expuestos a la erosión fluvial a causa de la velocidad del flujo turbulento que arrastra los sedimentos desestabilizando los taludes dentro del cauce.

2.3.3 Distrito Capital

Se destacan los dos (2) proyectos mineros, la Cantera Nacional y la empresa Minataca, C.A., en Antímano y en quebrada Tacagua Arriba, municipio Libertador. Las descripciones técnicas se basan en informes técnicos, de pasantías industriales e inéditos, de las operadoras mineras.

2.3.3.1 Piedra picada (mármol), cantera Nacional.

Según Escalante (2009), la cantera de arena se encuentra dividida en seis (6) bancos con altura de 14m e inclinación de 70°. El arranque a cielo abierto se realiza con perforación y voladura con equipo neumático y explosivo tipo Anfo (acrónimo por nitrato de amonio y fuel oil), longitud de barreno de 14,5 m, patrón de voladura en tresbolillo, de 4x4, y barreno con Φ 4”.

El material es acarreado con camiones roqueros por vías con pendiente máxima de 10% y ancho promedio de 12 m, hasta la planta de reducción de tamaño. Los materiales son preparados en dos (2) áreas de la planta. En un área se obtiene piedra picada #1, piedra #3/4. arrocillo y polvillo, y en la otra área se obtiene arena lavada.

La cantera tiene reservas probadas de gneis y esquistos de 1.900.000 m³ (2005). El cálculo de las reservas probables de arena, en 3,6 Ha, ha sido limitado entre las cotas 1.020 a 1.200 msnm, para un volumen total de 9.074.250 m³. La producción anual es de 225.000 m³ de piedra picada y 65.000 m³ de arena lavada.

2.3.3.2 Arena, arenera Tacagua Vieja.

La información técnica reportada proviene del Estudio Minero Ambiental (Quebrada Tacagua) (2004) del Informe de Inspección realizado por el Cuerpo de Bomberos del Distrito Capital en Tacagua Vieja. Desde 1993, la arenera aumentó la longitud de cauce con capacidad de sedimentación desde 215 m hasta 600 m, con ancho variable entre 20 y 36 m, para extracciones anuales desde 2.365 m³ hasta 6.000 m³, respectivamente. Las reservas globales han sido estimadas en 117.000 m³ (1997), a partir de los datos de producción entre 1993-1996.

La extracción se realiza con uso de cargador sobre ruedas (*payload*) de 1,15 m³ de capacidad de cucharón y con una retroexcavadora en cada uno de tres (3) sitios de saque de 20 m de ancho y un

(1) m de espesor de sedimentos. El acarreo se realiza con camiones volteo con rendimientos de 100 m³/día por camión, en distancias respectivas desde cada sitio de saque de: 800 m, 700 m y 500 m (640 m promedio), hasta la planta de tratamiento. El material es vertido en una tolva receptora y otra tolva pulmón, cribado por dos (2) cribas vibratorias (de 2 y 3 pisos), triturado en un (1) cono triturador, y molido en dos (2) molinos (2 y 3 rodillos).

2.3.4 Estado Falcón.

La información se extrae de los trabajos de Artigas (2009), Barrientos (2007) y Maiolino (2004). La Unidad de Procesos (UDP) de Materias Primas Planta Cumarebo (ahora Cementos Venezuela), localizada a 7 km y a 1,5 km, aproximadamente, de ambas canteras de caliza y arcilla, respectivamente. Estuvieron siendo transportadas 1.200.000 ton de caliza y 400.000 ton de arcillas trituradas al año.

2.3.4.1 Caliza, cantera El Mampostal.

En el cerro Mampostal, la extracción se hace según el método de bancos múltiples y arranque con perforación y voladura, carga con cargador frontal y retroexcavadora y acarreo con camiones roqueros. Se realiza la trituración en mina y el transporte a planta mediante cinta transportadora de 7 km de longitud. La diferencia topográfica en distintos trazados de tramos de vía ocurre entre las cotas 289,4 y 403,8 msnm, para un total de 114,4 m de desnivel. La Figura 2.18 contiene una fotografía aérea de la extracción de caliza en el cerro Mampostal.

En cerro Mampostal, a partir del estudio para el diseño de las vías de acarreo se tienen los siguientes datos de longitudes y pendientes de vías de acarreo:

- 1,6km en la vía perimetral principal
- 1,7 km en la vía interna
- ancho de vía, variable entre 12 y 16,5 m
- ancho de vía, 18,5 m (recomendable)
- dos (2) canales de circulación de camiones
- pendiente longitudinal variable entre 12,5 y 15%
- pendiente transversal de 2%.

- **2.3.4.2 Arcilla, cantera El Veral.**

En el cerro El Veral, la extracción de arcillas se realiza aplicando el método de terrazas, con el uso de retroexcavadora para el arranque mecánico y camiones roqueros hasta la cinta transportadora, conectada con la planta en Puerto Cumarebo. La diferencia topográfica en distintos trazados de tramos de vía ocurre entre las cotas 40 y 115 msnm, para un total de 75 m de desnivel. La Figura 2.19 contiene la fotografía de la extracción de arcilla en cerro El Veral.



Figura 2.18. Fotografía aérea de extracción en cerro Mampostal.
Fuente: Barrientos (2007).

A partir del estudio en cerro El Veral, para el diseño de las vías de acarreo se tienen los siguientes datos de longitudes y pendientes de vías de acarreo:

- vía de 1,9km
- vía alterna de 1,9 km (propuesta)
- ancho de vía es variable entre 6 y 14 m (ancho recomendable, 12 m)
- pendiente longitudinal varía entre 9 y 17,5 % (frecuente 12,5 % en varios tramos)
- máxima pendiente, 8 %
- pendiente transversal, 2 %.



Figura 2.19. Fotografía con extracción de arcilla en el cerro El Veral.
Fuente: Artigas (2009).

2.3.5 Estado Miranda

Los datos de los proyectos mineros han sido tomados de los trabajos de Delgado (2011), para la cantera El Melero, y de Falcón (2007) para las tres (3) areneras en el río Grande o Cauçagua. Ambos estudios han sido desarrollados en la temática de conservación ambiental en minería, en la cantera consiste en la recuperación parcial de un talud minero y en las areneras del estudio sedimentológico y de impacto ambiental acumulado.

2.3.6.1 Caliza: Cantera El Melero

En cantera El Melero, el plan de explotación se realiza con un sistema de bancos descendentes, con una meta de producción anual de 360.000 Ton de caliza, entre 2011 y 2014. Esto permite la revegetación inmediata de taludes finales. Como presenta el diagrama de la Figura 2.20, el diseño general de la cantera establece:

- ángulo de talud final (β), 76°, puede variar según el contacto litológico.
- ángulo de trabajo (α), 45°.
- ancho de berma de estabilización y seguridad, 7,5m.
- altura del banco de trabajo, 10m.

La litología más importante la constituye la roca caliza, la cual se presenta como una roca densa, cristalina, a veces con ligera textura arenosa. La caliza tiene condición física de roca sana y dura de color predominante gris medio a oscuro. Generalmente, cercana al contacto con esquistos, la caliza desarrolla una estructura esquistosa, o cierta laminación e intercalación de capas delgadas de caliza y esquistos de semejante espesor, en un espacio de 10 a 20 m, aproximadamente. La Figura 2.21 muestra el contacto entre las litologías en el frente minero.

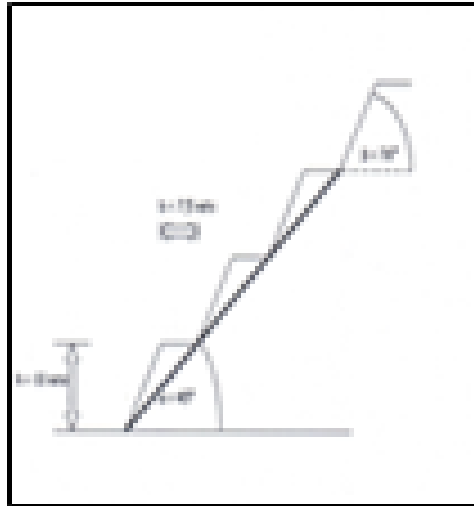


Figura 2.20. Diseño geométrico de talud en cantera El Melero.
Fuente: Delgado (2011), del plan de explotación de Lafarge (2006).

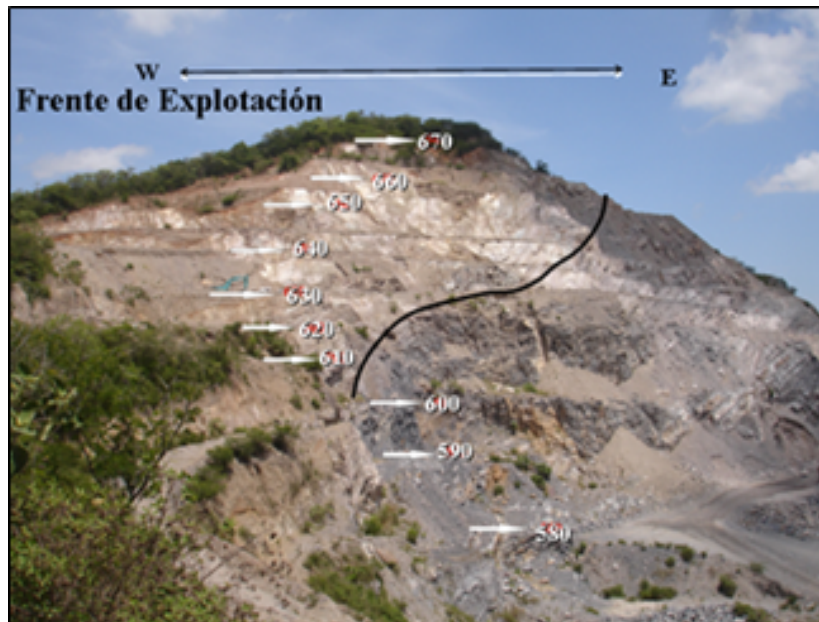


Figura 2.21. Fotografía con contacto entre litologías, caliza y esquistos en frente minero.
Fuente: Delgado (2011).

2.3.5.2 Arena: areneras del río Grande o Caucagua

En el río Caucagua, subcuenca del Tuy medio, según Falcón (2007) cuatro (4) extracciones independientes, areneras 1 al 4, están localizadas a lo largo de 12,7 km. La Figura 2.22 presenta un conjunto de fotografías aéreas de las areneras en el cauce del río Caucagua.

Todas utilizan cargadores frontales y camiones roqueros para los procesos de arranque, carga y acarreo de material granular. Tres (3) de éstas combinan con retroexcavadoras; otras dos (2) utilizan palas mecánicas y una tercera utiliza tractor. En cuanto a procesamiento mineral, una arenera dispone de equipo de recuperación de finos y otra tiene una planta de clasificación y lavado.

Los volúmenes de arena incluyen contenidos de gravilla y grava, representando un total de reservas de arena de 1.196.520 m³ (incluidas cantidades de otros materiales gravosos). La producción anual total alcanza un estimado de 62.471 m³. Las reservas minerales y la producción anual de cada una de éstas son las siguientes:

- Arenera 1 con 775.000 m³ y 25.770 m³.
- Arenera 2 con 394.240 m³ y 71.356 m³; 50% del material es tamaño de arcilla.
- Arenera 3 con 134.400 m³ y 438 m³.
- Arenera 4 con 90.000 m³ y 750 m³; 165 m³ del material es tamaño de limo.

2.3.6. Estado Zulia

Según Jaspe (2002), Van Zanten (2004), Angola (2005) y Ávila (2008), en la mina Paso Diablo el método de explotación es en corta (fosa abierta) con escombrera externa y retrolleado progresivo, con arranque de carbón con perforación y voladura.

Las operaciones de carga y acarreo, con cargador frontal y camiones roqueros para carbón y, con pala eléctrica e hidráulica y camiones roqueros para estéril, previa escarificación. El apilamiento de carbón, con tractores. Los paneles de extracción son de 120m de ancho y áreas de trabajo con siete (7) paneles, para ancho total de 840 m: Baqueta Sur, Baqueta Centro y Baqueta Norte.

La altura de banco es 15 m, en frentes de arranque por encima de 60 msnm, y de 12 m por debajo de esa cota. El ancho mínimo de vías es 27 m. La pendiente de pisos en terrazas y bancos (pie a cresta) es 2 %. El gradiente de rampas es 8 %. La pendiente del frente del banco es 2:1. La secuencia de explotación de los bloques es de pared alta a pared baja (de este a oeste). La

Las excavaciones se realizan a favor del buzamiento de los planos de estratificación. El talud de trabajo, paralelo al rumbo, es 10° y, perpendicular al rumbo es 12° . Los ángulos de excavación en taludes son variables:

- Pared de avance este y norte, 12°
- Pared oeste (*low wall*), 30°
- Pared sur, 35°
- Pared final (*high wall*), 34°



Figura 2.22. Fotografías aéreas de areneras en cauce del río Cauca.

Fuente: Falcón (2007).

En las escombreras externas el ángulo general de talud es 17° y, en las internas el ángulo de talud es 24° . Todas las escombreras son levantadas en terrazas con 20 m de altura y ancho de 40m. La pendiente de piso en terrazas y bancos (pie a cresta) es 2%. El esponjamiento de estéril en escombreras es 40 %. La Figura 2.23 muestra la vista en planta de sectores de la mina, particularmente las escombreras.

El perfil de acarreo para el año 2001 se estimó en 3.200 m aproximadamente, distribuidos así: 1.614 m en ascenso, 1.386 m en plano y 200 m bajando, con una velocidad promedio de acarreo de 19 km/hora y retorno de 42 km/h, con una resistencia al rodamiento de 3 %.

La producción de carbón para el año 2001 se estableció en 6.800.000 t/año y 37.413.000 m³ en bancos (en adelante, mcb) de estéril. La relación de remoción o relación estéril/mena es de 5,5:1, es decir, 5,5 mcb de estéril por ton de carbón.

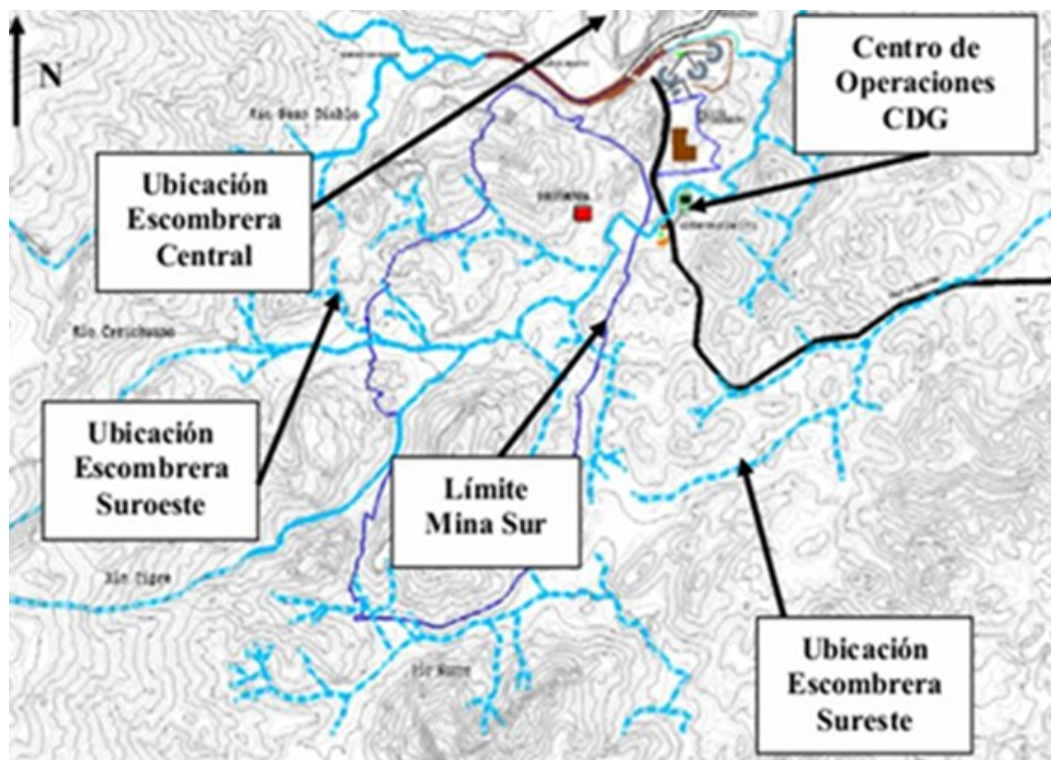


Figura 2.24. Mapa con sectores de mina Paso Diablo (Carbones de Guasare; CDG).
Fuente: Ávila (2008).

2.4 Análisis comparativo de variables entre proyectos mineros

En esta investigación, se tiene la visión de conjunto de una muestra de proyectos mineros a cielo abierto en el territorio nacional. Esta muestra presenta una diversidad de rubros minerales emplazados en regiones con diversas características geoambientales y extraídos según proyectos planificados y diseñados en función de metas de producción, pero con fuertes limitaciones para gestionar la complejidad de los sistemas ambientales, particularmente la dinámica de generación de sedimentos que son transportados en suspensión hídrica.

Por ejemplo, en los proyectos mineros descritos, se tienen rangos variables de precipitación media anual, entre las regiones hidrometeorológicas más septentrionales y más meridionales, como en los estados Falcón y Bolívar, en los cuales se tienen 800 y más de 2.000 mm/año, con lo cual las estrategias en la ingeniería de control de sedimentos deben ser distintas. La lluvia constituye el campo de fuerzas (energía) que desagrega las partículas en los pisos mineros y, por esto, la frecuencia, duración e intensidad de la misma incide directamente en la producción de sedimentos. La cantidad de precipitaciones y/o el número de días lluviosos son datos para la toma de decisiones. En regiones más lluviosas, la distribución de los puntos de control debe ser distinta que en regiones más secas donde los eventos pueden ser más intensos.

Otras variables que inciden en la producción de sedimentos son la altitud (altura en la cuenca hidrográfica) y el relieve, sobre todo el declive (sea natural o modificado), como en los casos de areneras, tales en Distrito Capital y estado Miranda, comparadas con las extracciones de bauxita y mineral de hierro en el estado Bolívar. Cada una de estas situaciones deben ser valoradas según el recorrido del agua de escurrimiento, tanto dentro de los cauces como en las laderas. En el primero de los casos, la arenera en Distrito Capital está en cuenca alta (1.020 a 1.200 msnm, de desnivel) y la de en cuenca baja Miranda (40 a 70 msnm, de desnivel). En el estado Bolívar, la mena de hierro está en un cerro (330 a 800 msnm, de desnivel) y la laterita bauxítica está en una meseta (*plateau*) con una pendiente suave (620 a 690 msnm, de desnivel).

Otra variable de incidencia relevante es la granulometría, aquella que se consigue una vez deforestado el sitio del proyecto, así como los tamaños que son producidos durante el proceso operativo. Esto es, principalmente en los frentes de arranque, en las vías de acarreo mineral, en pilas de remanejo y /o almacenamiento, en la admisión del todo en uno (todouno), en las áreas de reducción de tamaño (procesamiento mineral) y/o en las estaciones para la comercialización del material a granel. En esta variable, se tienen materiales detríticos como gravas, arenas y arcillas. Y entre los productos a granel, el tamaño arrocillo.

Del análisis integrado de variables medibles a partir de la situación presentadas en la muestra de proyectos mineros referidos, en minerales metálicos y no metálicos, se tienen:

- doce (12) proyectos mineros, en seis (6) estados venezolanos
- ocho (8) rubros minerales, con nueve (9) usos industriales
 - cuatro (4) metálicos

- bauxita, hierro, níquel y oro
- cuatro (4) no metálicos
 - arcilla, arena, caliza y carbón.
- cinco (5) tipos de yacimientos
 - placeres aluvionales, macizo rocoso, laterita, manto y veta.
- seis (6) métodos de explotación
 - banco, barrido hidráulico, cámara, dragado, fosa y terraza.
- seis (6) patrones de escurrimiento, con potencial de erosión.

Esta revisión del conjunto ofrece la variabilidad de datos, tanto geoambientales como mineros, a efecto de visualización de condicionantes diversas en el proceso erosión-sedimentación. El énfasis está puesto en las variables condicionantes para la erosionabilidad de la lluvia y la erosividad del sustrato geológico, tanto por efecto de la litología y el declive (pendiente) del talud. Esto permite realizar análisis de escenarios con incidencia de variables y, tipificar y ponderar aquellas incidencias en los distintos proyectos mineros a cielo abierto.

Cada uno de los proyectos puede ser modelado con todas las variables medibles directamente: i) en cuanto a lo territorial, a partir de los diseños de mina, patrones de drenaje, longitud y pendiente de declives, desnivel y curvatura del terreno; ii) en cuanto a lo ambiental, por la intensidad de pluviosidad, tamaño y densidad de partícula, así como por la viscosidad del fluido. Esto genera los productos combinados, susceptibilidad del suelo y agresividad de la lluvia, o bien variables medibles indirectamente por sus efectos.

2.5 Incidencia de variables en producción de sedimentos

A partir de la diversidad de extracciones a cielo abierto, comparadas en las tablas 2.1 y 2.2, es posible destacar la importancia de las variables físicas naturales y antrópicas en la producción de sedimentos. Con relación a las primeras, ésta se hace evidente en los significativos desniveles topográficos donde afloran los yacimientos minerales y la conjugación con las densidades y texturas de los materiales minables. Con relación a las variables antrópicas, la importancia se aprecia a partir de los requerimientos de energía para el arranque mineral lo que permite inferir las fuerzas cohesivas existentes entre partículas minerales y a partir también de la geometría de las excavaciones y rellenos

granulares -frentes de arranque, vías y rampas de acarreo y escombreras en etapas previas a procesos de recuperación ambiental.

En cuanto a la tipificación de incidencias de las variables, se tienen los siguientes criterios:

Por la relación entre variables físicas:

- i. Intensidad de lluvia y cohesividad del material en rasante
- ii. Duración de la lluvia y permeabilidad y/o grado de saturación del material en rasante
- iii. Cohesividad del material *in situ* y energía para arranque mineral
- iv. Densidad relativa de materiales in situ y disgregados y pendiente del declive
- v. Densidad relativa de materiales in situ y disgregados y longitud del declive

Por la intensidad de la variable:

- i. Desnivel topográfico en el yacimiento
- ii. Ángulo de talud de trabajo
- iii. Ángulo de talud final
- iv. Ángulo de pendiente de berma en escombrera
- v. Textura de materiales en la cara del frente y en la rasante de vías y pistas de acarreo

Por amplitudes en el rango de la variable física:

- i. Heterogeneidad en la textura de materiales disgregados

Por la extensión de la distribución de sedimentos según el método de explotación

- i. En terrazas o bancos sobre yacimientos en meseta y laderas
- ii. En terrazas o bancos formando fosas (*open pit*)
- iii. En laderas o cauces de ríos

En el caso de la arenera en la sub cuenca del río Caucagua se presentan datos globales de cuatro (4) areneras, como si es posible un valor medio por cada variable característica. En el caso del mineral de hierro se hace un promedio de los cuatro (4) cerros del Cuadrilátero de San Isidro.

Con base en la teoría sobre erosión-sedimentación, en el capítulo 3, se conjugan los procesos de pérdida de sustrato, por causa del tipo de uso, con los procesos geodinámicos-geomorfológicos (formación de corteza terrestre) con la dinámica de fluidos, en el arranque y arrastre de sedimentos.

En el capítulo 4, se presentan las aproximaciones en las estimaciones de pérdida de suelos en algunos de los proyectos mineros destacados. Con esto se pretende el cambio de actitud en la gestión ambiental en minería, al proponer la modificación de la relación para la estimación de volúmenes de sedimentos en suspensión hídrica, a los fines de mejorar los diseños de control de sedimentos en la minería a cielo abierto de proyectos mineros en territorio venezolano.

CAPÍTULO 3.

APROXIMACIÓN DISCIPLINARIA EN EL PROCESO EROSIÓN-SEDIMENTACIÓN

3.1 Erosión-sedimentación desde lo ambiental

El proceso erosión-sedimentación inducido por la minería representa una oportunidad de estudio interdisciplinario en la cual los enfoques científico e ingenieril se combinan para diagnosticar y ofrecer soluciones a la problemática de la producción de sedimentos durante la extracción mineral. Innumerables disciplinas del conocimiento integran el enfoque ambiental en el control de los efectos del transporte de sedimentos: geológica, climatológica, hidrometeorológica, edafológica, entre otras. La ingeniería ambiental requiere dar cuenta de las variables y criterios que aportan a la ingeniería de minas en la necesidad de control en el proceso erosión-sedimentación.

El esquema en la Figura 3.1 ubica al estudio de impacto ambiental en la intersección entre las disciplinas recogidas en las ciencias de la Tierra, las ciencias biológicas y las ciencias sociales (O’Riordan, 1995). La aproximación biológica, incluyendo la biocéntrica, es de principal interés en los estudios ambientales porque el aprovechamiento de los recursos naturales responde a la naturaleza de los estudios inter y trans disciplinarios.

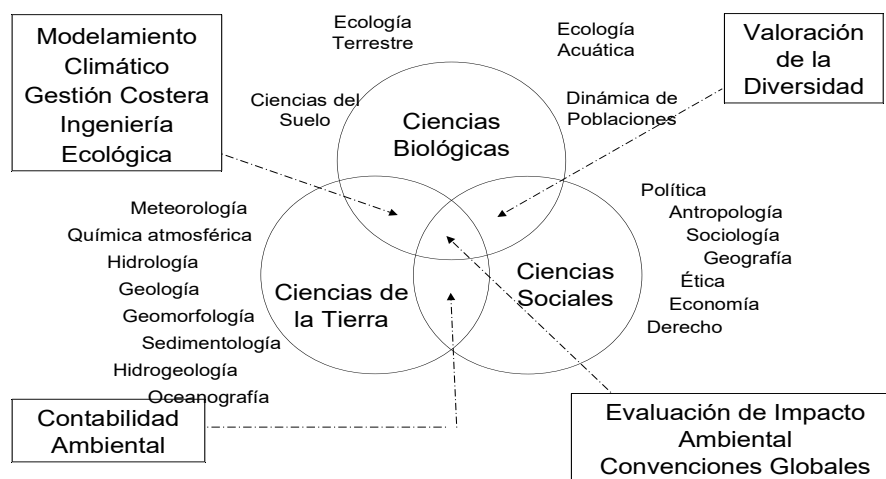


Figura 3.1 Esquema con visión de interdisciplinariedad de las ciencias.

Fuente: Traducido de O’ Riordan (1995).

En este capítulo se describen los enfoques de erosión-sedimentación desde tres (3) especialidades científicas: primero, a partir de aportes, teorías y modelos para el análisis de la corteza terrestre (lo litosférico e hidrosférico), esto es, desde las ciencias de la Tierra. Segundo, desde las ciencias biológicas (suelo e hidrología), específicamente edafológicas, evaluativa de procesos naturales y antrópicos que inducen la erosión-sedimentación y cuyos estudios iniciales fueron desarrollados por necesidades en las actividades agronómicas. Tercero, desde las ciencias sociales, específicamente la geografía, lo territorial, o la necesidad de planificar, ordenar y gestionar los usos del territorio, como en el caso del uso minero, que induce y acelera los procesos naturales de erosión-sedimentación.

La minería, caracterizada por la excavación de materiales de la corteza terrestre con fines socioeconómicos, se estuvo desarrollando por milenios con procesos cognitivos de ensayo y error. Con la aplicación de técnicas empíricas, se fueron aumentando las capacidades de producción mineral, la productividad, la calidad del producto mineral y la eficiencia económica. Más recientemente se viene progresando en requerimientos de conservación ambiental, de sustentabilidad ecológica y por ende de integración de los conocimientos disciplinarios.

Por ello, urge la necesidad de progresar en términos de sustentabilidad de la minería, incrementando la conciencia de los efectos negativos y de su grado de recuperabilidad del medio natural. Con el apoyo de modelos físicos y ecuaciones analíticas, tomadas principalmente de otras disciplinas científico-tecnológicas, es posible continuar avanzando en la planificación y diseño de acciones orientadas al control de sedimentos en la actividad minera como ya una vez lo fue en los estudios del equilibrio límite para la estabilidad de taludes.

3.2 Erosión-Sedimentación en lo Litosférico

En esta sección se presenta a la erosión-sedimentación desde las ciencias geológicas, como un medio de producción de conocimiento geológico, a través de algunas herramientas analíticas usadas en la estimación de sedimentos producidos en el espacio-tiempo. Se presenta una retrospectiva de estudios: geológicos (geocronológicos, geodinámicos), edafológicos (ecuación universal de pérdida de suelos) e hidráulicos (manejo del drenaje de aguas de escorrentía). Se incluyen descripciones detalladas de las herramientas analíticas desarrolladas.

Los estudios acerca del proceso erosión-sedimentación en general tienen distintas aristas en función de las necesidades que han reconocido distintos investigadores científicos en siglos anteriores y más

recientemente técnicos en la ingeniería; tales los casos de los estudios geológicos para conocer la edad de la Tierra (o edad de la litosfera) y también en el caso de las velocidades de los fluidos en los requerimientos de la hidráulica y más recientemente, en el reconocimiento de la pérdida de suelos desde el punto de vista de la ciencia del suelo.

3.2.1 Desde la geocronología y la geodinámica

En lo relativo a la historia de la Tierra, Segord J., editó en 1997, el libro: *Principles of Geology*, el cual había sido publicado, en 1868, por Charles Lyell quien formuló, entre 1830 y 1833, la teoría del “Equilibrio Dinámico en el Contexto Geológico”, distinguiendo dos (2) procesos básicos de la morfogénesis geológica; dos (2) procesos que se habrían producido periódicamente, compensándose el uno al otro: los fenómenos acuosos: erosión y sedimentación, y los fenómenos ígneos: volcánicos y sísmicos

En la edición (en castellano) del “Origen de las Especies por Medio de la Selección Natural”, en 1921, fueron publicados los textos de Charles Darwin (cuya publicación original, en inglés, ocurrió en 1859), presenta la teoría donde se consideraba la necesidad de datación de la Tierra, con fines de explicación de la evolución de las especies. Darwin pudo encontrar un recurso analítico en la medición sobre los sedimentos acumulados en cuencas sedimentarias:

“Podemos conseguir mejor formarnos alguna idea del tiempo pasado conociendo los agentes que han trabajado y dándonos cuenta de lo profundamente que ha sido denudada la superficie de la tierra y de la cantidad de sedimentos que han sido depositados. Como Lyell ha hecho muy bien observar, la extensión y grueso de las formaciones sedimentarias son el resultado y la medida de la denudación que ha experimentado la corteza terrestre. Por consiguiente, tendría uno que examinar por si mismo los enormes cúmulos de estratos superpuestos y observar los arroyuelos que van arrastrando barro y las olas desgastando los acantilados, para comprender algo acerca de la duración del tiempo pasado, cuyos monumentos vemos por todas partes a nuestro alrededor” (Darwin, 1921; p. 164).

“Nada produce en la imaginación una impresión más enérgica de la inmensa duración del tiempo –según nuestras ideas de tiempo- como la convicción, de este modo conseguida, de que han producido grandes resultados los agentes atmosféricos, que aparentemente tienen tan poca fuerza (...) Una vez impuestos así de la lentitud con que la tierra es desgastada por la acción atmosférica y litoral, es conveniente a fin de apreciar la duración del tiempo

pasado, considerar, de una parte, las masas de rocas que han sido eliminadas de muchos territorios extenso, y, de otra parte, el grosor de nuestras formaciones sedimentarias (Darwin, 1921; p. 165).

“Por otro lado, en todas las partes del mundo las masas de estratos sedimentarios tienen un grosor asombroso. En la cordillera de los Andes he calculado en 10.000 pies una masa de conglomerados, y aun cuando es probable que los conglomerados se hayan acumulado más de prisa que los sedimentos finos, sin embargo, como están formados de guijarros pulimentados y redondeados, cada uno de los cuales lleva el sello del tiempo, sirven para mostrar con qué lentitud tuvo la masa que acumularse” (Darwin, 1921; p. 166).

Davies (1999) presenta en “Tierra Dinámica” (*Dynamic Earth*) el proceso de convección del manto de la Tierra, como proceso que subyace en la tectónica de placas, en los puntos calientes volcánicos y, en consecuencia, en todos los procesos geológicos. Las preguntas “clásicas” acerca de la Tierra han sido: su edad, su calor interno y cómo las rocas se deforman. Con relación a la edad, Davies establece que uno de los principales cambios en la historia del pensamiento humano se inició hace unos 200 años cuando científicos en la geología comenzaron a visualizar la expansión del tiempo registrado en la corteza terrestre (p. 8) (...) Casi siempre el paisaje es estático en la percepción humana (p. 9).

En efecto, en este periodo se comenzó a realizar una conexión seria y sistemática. Durante la visita a la localidad Punto Siccar, en Bretaña, los geólogos Hutton y Hall, junto con el matemático Playfair, para observar una famosa discordancia entre areniscas devónicas sub horizontales yaciendo sobre pizarras silúricas casi verticales (a la cual denominó esquistos), no tenían una medida clara de los intervalos de tiempo que estaban contemplando, pero sabían que estaban tratando con periodos ampliamente mayores a miles de años, comúnmente considerados en aquel tiempo (p. 9).

Según Davies, el trabajo y enfoque de Lyell, en la primera mitad del siglo XIX, aportó una base para la estimación cuantitativa del lapso de tiempo registrado en la corteza terrestre, haciéndose famoso en la exposición y aplicación sistemática de la idea de que las estructuras geológicas pueden ser explicadas solamente por la acción lenta de procesos observables en el presente. Él y muchos otros consecuentemente hicieron uso de observaciones que podían ser vinculados a registros históricos, tanto de tasas de erosión y depositación, como de relaciones estratigráficas, a los fines de demostrar que un largo periodo de tiempo había sido requerido (p. 10).

Estos dos pasajes en la historia de las geociencias han sido descritos para destacar que el estudio del proceso de erosión-sedimentación y, en particular, las tasas de sedimentación que indicaron que los tiempos transcurridos fueron suficientes para la evolución de la especie humana. Por otra parte, la búsqueda de comprensión de las cuencas y rocas sedimentarias ha permitido el aumento de la comprensión de la dinámica de la Tierra, a través de los mecanismos de tectónica de placas.

3.2.2 Desde la geodinámica y la geomorfología

Precisamente la dinámica de la corteza terrestre ha producido las rocas sedimentarias como producto final del proceso cíclico de erosión-sedimentación-litificación. De acuerdo con Stuwe (2007; páginas 1, 6 y 179 al 186), las estructuras de amplia escala del planeta Tierra son causadas por procesos geodinámicos, los cuales son explicados usando descripciones: energéticas, cinéticas y dinámicas. Aunque estos procesos incluyen una significativa variedad de mecanismos, los métodos para describirlos involucran áreas del conocimiento muy diversas. Las consecuencias geológicas son documentadas a partir de observaciones de campo, pero las causas son más difíciles de reconocer directamente. Como los procesos buscados para describir las causas cambian en el espacio y con el tiempo, las descripciones pueden ser realizadas con diversas ecuaciones diferenciales.

Con relación a la dimensión espacial de problemas geológicos, aun para un modelo simple es necesario preguntarse acerca del número de variables espaciales que deben ser consideradas. Esta decisión dependerá del grado de fiabilidad necesaria en el modelo en cuestión; el menor número de variables dimensionales como sea posible es lo más recomendable. Es necesario resaltar que estas variables no necesariamente son espaciales, es posible considerar el tiempo o alguna otra variable independiente para establecer un eje dentro de un diagrama en particular.

A escala orogénica, es necesario considerar los procesos de erosión como parte integral de modelos geodinámicos. En los procesos que dan forma a la corteza terrestre (geomórficos) se distinguen las formaciones resultantes de procesos tectónicos (o endogénicos) de las formaciones creadas por procesos de erosión-sedimentación (o exogénicos).

El transporte de calor dentro de la roca o suelo es principalmente conductivo. La superficie de la tierra genera calor. Aunque los procesos geomórficos pueden ser descritos con modelos de transporte de energía, en lugar de masa, algunos casos de transporte de material en el sistema exogénico pueden ser descritos con los principios del transporte de calor, mediante mecanismos de:

- difusión, por movimiento de partículas en una masa (análogo a conducción de calor)

- advección, por movimiento de carga sólida en un fluido (convección, en termodinámica)
- producción, por intercambio de calor en sistemas atmosféricos.

Los procesos de difusión más característicos, o únicos, en la formación de paisajes son: hidrológicos, mediante redes de drenaje o, por los mecanismos tipo límite, los cuales controlan los deslizamientos. Los procesos de erosión-sedimentación están controlados por una gran variedad de movimientos: fluencia de suelos, solución, salpicado de lluvia, meteorización química y eólica, corte lateral y descendente de drenajes, flujos de detritos, al igual que procesos como deslizamientos y otros (Carson y Kirby, 1972).

Cualquiera de los siguientes tres (3) grupos de modelos, que se muestran esquemáticamente, pueden ser usados para la variedad de movimientos descritos:

- Continuo de corta distancia, redistribución local de masa de suelos (a escala de declives de taludes)
- Continuo de larga distancia, en cauces de ríos
- Discontinuo, episódicos como en deslizamientos de masas rocosas o de suelos.

Como se esquematiza en la Figura 3.2, con relación al transporte a escala orogénica, uno de los siguientes tres (3) modelos de erosión son usados con frecuencia:

- Con tasa de erosión constante en el tiempo y el espacio
- Con tasa de erosión como una función de la elevación
- Con tasas de erosión como una función de la pendiente

En el segundo caso, asumir que la tasa de erosión de un cinturón montañoso es proporcional a su elevación es una aproximación más cercana a lo natural, donde:

$$v_{er} = -\frac{dH}{dt} = -\frac{H}{t_E}$$

donde,

v_{er}	tasa de erosión
H	elevación
t_E	tiempo que transcurre para erosionar una montaña de elevación H.

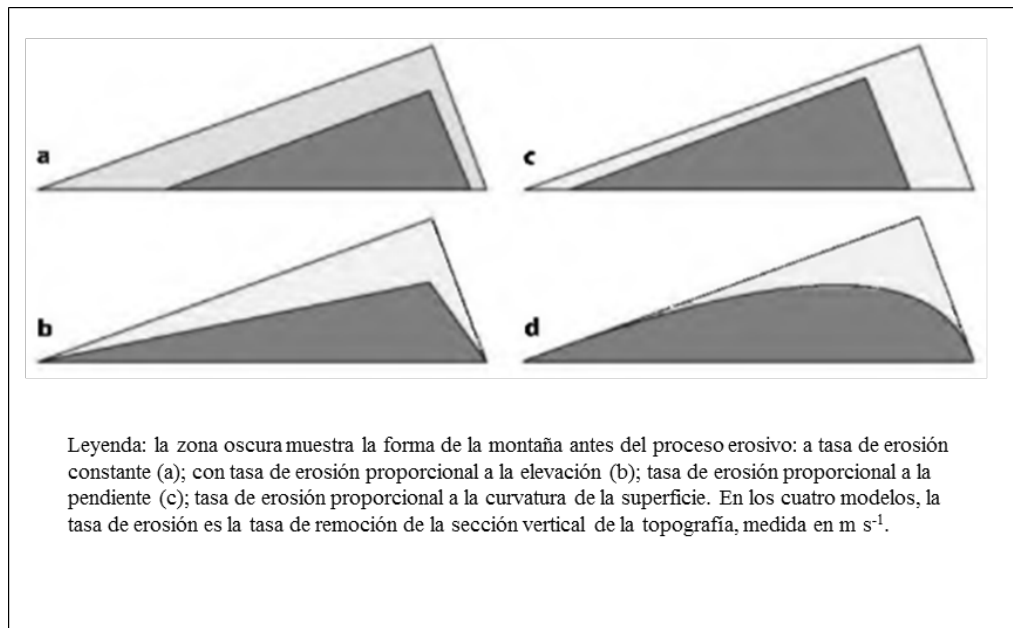


Figura 3.2 Bloques esquemáticos de modelos de erosión en remodelado de cinturón montañoso. Fuente: Traducido de Stuwe, 2007).

Una proporcionalidad entre la tasa de erosión y la pendiente del terreno (como se explica más adelante con el mecanismo de difusión) puede ser descrita por:

$$v_{er} = -\frac{dH}{dt} = -u \frac{dH}{dx}$$

donde,

x	coordenada espacial horizontal
dH / dx	gradiente topográfico, o pendiente
u	constante de proporcionalidad, o la tasa de desplazamiento horizontal de la pendiente.

Con relación a los modelos de transporte de corta distancia, el modelo de erosión como una función de la curvatura del terreno representa la descripción más refinada de erosión, en particular en taludes de colinas. El mecanismo de difusión describe una proporcionalidad entre cambio temporal y curvatura espacial. Entre los modelos de difusión se tienen:

- difusión lineal
- difusión no lineal

La difusión lineal está basada en la presunción que la tasa de transporte de masa (v) pendiente abajo (descrita como flujo de masa, q) es proporcional a la pendiente o al declive de la colina:

$$q = -D \frac{dH}{dx}$$

donde,

q masa de flujo

dH / dx gradiente topográfico, o pendiente

D constante de proporcionalidad, o la tasa de desplazamiento horizontal de la pendiente.

Nótese que el flujo de masa q tiene unidades que pueden ser interpretadas como flujo volumétrico normalizado al ancho del perfil del terreno. La difusividad D puede ser interpretada como el producto entre de la tasa de transporte de masa (v) y el espesor de un estrato de la superficie erosionable (h_s) (Beaumont et al. 1992; Carson y Kirby 1972).

$$D = v h_s$$

De la ecuación anterior se reconoce la variabilidad de D ; h es dependiente del tipo de roca pero v no lo es. Como en la teoría de transferencia de calor, la ecuación de flujo puede ser combinada con un balance unidimensional de masa de la forma:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial x}$$

Insertando una ecuación en otra se obtiene la ecuación de difusión de masa, en una dimensión:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = D \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}$$

Con relación a la conservación general de masa, la ecuación de difusión describe la escala local. En la escala regional, que está fuera del alcance teórico de este trabajo, la combinación de los mecanismos de transporte de calor: conducción, advección y producción, permite obtener el balance energético termal completo con la ecuación más general de la conservación de masa, en dos dimensiones.

La difusión lineal modela el transporte de masa directamente proporcional a la pendiente, pero esto no es necesariamente cierto. Pero, la difusión no lineal es la que permite describir el cambio en la difusividad erosional D pendiente abajo (Pierce y Coleman, 1986). En muchos taludes, el material es más y más suelto en la medida en que el talud se hace más inclinado y en consecuencia la erosión se hace allí más rápida. En consecuencia, una formulación más general que puede dar cuenta de esta condición resulta:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = D \frac{\partial H}{\partial x} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^n$$

Cuando $n = 3$ la ecuación describe la difusión cúbica. Otras consideraciones de mayor complejidad pueden ser revisadas en el capítulo 4 sobre Cinemática: morfología y deformación, en el libro de Stuwe (2007), titulado “Geodinámica de la Litosfera”.

La base teórica presentada hasta aquí reconoce que las geociencias, particularmente en la geofísica, iniciaron la búsqueda de respuestas mediante la modelación matemática de procesos físicos, incluidos los de erosión-sedimentación. En la sección siguiente, la base teórica destaca el conocimiento geológico a partir de los modelos de transporte de fluidos con sedimentos en suspensión hídrica, considerando los principios de la mecánica de fluidos. Más adelante, las ciencias del suelo y la ingeniería de minas son incluidas para dar soporte al análisis metodológico.

3.2.3 Desde la sedimentología y la dinámica de fluidos

Boggs (1995), en el capítulo 3 sobre “Transporte y deposición de sedimentos siliciclásticos”, en el libro “Principios de sedimentología y estratigrafía”, entre las páginas 33 al 46, explica que en la geología se busca identificar la relación de propiedades físicas de rocas sedimentarias, como estructuras sedimentarias y textura, con parámetros de flujo de fluidos, como velocidad y profundidad del agua, los cuales ofrecen visión en mecanismos y ambientes deposicionales. Este inmenso esfuerzo ha demandado estudios de transporte de sedimentos y de procesos deposicionales en ambientes actuales. El agua que contiene cantidades diversas de sedimentos suspendidos es, entre otros fluidos, el de mayor importancia en el interés geológico.

Desafortunadamente, muchos de los principios de la dinámica de fluidos aun no son aplicables al problema más pragmático de la compresión del transporte de sedimentos. Por ello, el énfasis se hace

en procesos de flujo en la relación con el transporte de sedimentos y estos procesos de transporte requieren la comprensión de los conceptos básicos del flujo de fluidos, incluyendo las propiedades básicas y definiendo los fluidos como sustancias que cambian fácilmente de forma y de manera continua, en la medida en que fuerzas externas son aplicadas (como ocurre en el caso de la erosividad de la lluvia).

Como los fluidos tienen resistencia negativa a las fuerzas de corte, crean condiciones dentro de un cuerpo que inducen a que las partes del cuerpo deslicen sobre otras partes a lo largo de una serie de planos paralelos. En procesos que guardan relación con el transporte de sedimentos es importante resaltar los tipos de flujos: laminar y turbulento, que son los dos (2) modos de fluir dependiendo de la velocidad y la viscosidad de los fluidos.

Por una parte, el flujo laminar se establece en un movimiento lento, unidireccional y persistentemente recto, dentro de un cauce de ancho constante. Pero éste puede cambiar a flujo turbulento si la velocidad se incrementa o la densidad decrece, hasta moverse como un conjunto de masas deformantes, que cambian constantemente, en el cual ocurre transporte perpendicular a la dirección principal de flujo y puede ser medido. El flujo turbulento tiene tendencia a incrementar la efectividad de la masa fluida para erosionar y hacer chocar las partículas con los sedimentos del fondo; por eso la importancia del flujo turbulento en el transporte de sedimentos.

El movimiento ascendente de las partículas de agua en masas turbulentas de agua ralentiza la caída en el asentamiento de partículas y decrece la velocidad de sedimentación. La turbulencia es un componente irregular o aleatorio del movimiento del fluido y debido al significado de este flujo en transporte de sedimentos es importante detenerse en el mismo.

Con relación a las propiedades básicas de los fluidos, estos son: densidad (ρ) y viscosidad (μ). Las diferencias en estas propiedades afectan marcadamente la habilidad de los fluidos para erosionar y transportar sedimentos. Por una parte, la densidad, definida como masa por unidad de volumen de fluido, afecta la magnitud de las fuerzas que actúan dentro de un fluido y sobre el fondo. También afecta la tasa de caída o asentamiento de partículas a través del fluido e influencia el movimiento del fluido talud abajo debido a la influencia de la gravedad.

Por la otra, la viscosidad del fluido es una medida de la habilidad de los fluidos para entrar en movimiento. Los fluidos con baja viscosidad fluyen más rápidamente, y viceversa. Se puede pensar en el fluido como en dos láminas paralelas entre placas. En la medida que en que la lámina superior

se mueve sobre la inferior, el fluido entre éstas se pone en movimiento con una velocidad que varía linealmente desde cero en la placa inferior hasta la velocidad (v) en la placa superior.

Finalmente, la viscosidad dinámica (μ) es la medida de la resistencia de una sustancia a cambiar en la forma que toma lugar a velocidades finitas durante el flujo. Debido a que ambas propiedades básicas afectan fuertemente el comportamiento del fluido, en la investigación en este campo se combinan comúnmente las dos propiedades en un parámetro único conocido como la viscosidad cinemática (ν) como en la expresión siguiente:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Con relación a los esfuerzos de corte en flujo turbulento, la velocidad medida en un punto varía e un instante a otro con relación a un valor promedio que se establece en un período prolongado de tiempo. Un fluido en régimen turbulento parece tener una viscosidad más alta que el mismo fluido en régimen laminar. Los esfuerzos de corte en flujo turbulento vienen definidos por:

$$\tau = \frac{(\mu + \eta)}{\frac{du}{dx}}$$

donde,

τ	esfuerzo de corte
η	viscosidad “eddy” (varios ordenes de magnitud más altos que la viscosidad dinámica)
du/dx	tasa de deformación

Un fluido extremadamente cargado de sedimentos se comporta plásticamente:

- si presenta viscosidad constante es llamado plástico de Bingham
- si presenta viscosidad variable es llamado pseudoplástico.

El flujo turbulento surge de la diferencia con el flujo laminar en la relación de fuerzas inerciales que tienden a causar turbulencia en el fluido y fuerzas viscosas que tienden a suprimirla. La relación entre fuerzas viscosas a inerciales se identifica con una relación matemática sin dimensiones, el Número de Reynolds (Re), el cual es expresado como:

$$Re = \frac{UL\rho}{\mu} = \frac{UL}{\nu}$$

donde,

U	velocidad media de flujo
L	profundidad del agua
ρ	densidad
ν	viscosidad cinemática (factor importante para determinar la extensión en la cual el fluido exhibe flujo turbulento).

Cuando las fuerzas viscosas dominan, en un flujo de lodo altamente concentrado, Re es pequeño y el flujo es laminar. La velocidad de flujo muy baja o la profundidad pequeña producen Re bajo y flujo laminar. Cuando las fuerzas inerciales dominan y la velocidad de flujo se incrementa, Re son grandes y el flujo es turbulento. En consecuencia, la mayoría de los flujos en condiciones naturales son turbulentos.

La transición entre flujo laminar y turbulento toma lugar por encima de un valor crítico de Re , el cual se establece comúnmente entre 500 y 2.000 y el cual depende de las condiciones de borde tales como profundidad y geometría del canal. En resumen, Re es un parámetro importante para la evaluación de procesos erosión-sedimentación y en la interacción de estos con el fondo.

En la interacción del flujo de fluido con el fondo, la tensión que se opone al movimiento del líquido existe solo en la superficie del fondo. Esta tensión es llamada “límite de tensión de cizalla (τ_0)”, definida como fuerza por unidad de área paralela al fondo, que es la fuerza por unidad de área de superficie. τ_0 es una función de la densidad del fluido, del ángulo de inclinación del fondo y de la altura de la columna de agua. Debido a que τ_0 está determinada por la fuerza que el flujo ejerce sobre los sedimentos del fondo y es relativo a la velocidad del flujo, se convierte en una variable extremadamente importante en la erosión y el transporte de sedimentos sobre el fondo del flujo.

El transporte de partículas por fluidos involucra dos etapas fundamentales:

1. erosión y transporte de sedimentos del fondo
2. en movimiento descendente, los sedimentos se desplazan a lo largo y por encima del fondo.

En lo relativo a las partículas en movimiento, mayor energía es requerida para poner en movimiento partículas pesadas y de mayor granulometría del fondo. En el movimiento por corrientes, el umbral crítico para el movimiento de partículas es función directa de las variables: τ y ν del fluido, además

d, ρ y forma de las partículas; e indirecta de: la velocidad del flujo, el cual puede variar en función del logaritmo de la distancia sobre la parte inferior (fondo).

Para entender el problema que involucra remover las partículas del fondo e iniciar el movimiento, deben ser consideradas las fuerzas que se oponen al movimiento en la medida en que el flujo ocurre en el fondo.

- ✧ Las fuerzas de gravedad resultan del peso de las partículas y contrarrestan la resistencia al movimiento de los granos debida a la resistencia friccional entre las partículas. En el caso de partículas arcillosas, finas, éstas añaden resistencia al movimiento debido a la cohesión que surge de los enlaces electroquímicos entre estos granos pequeños.
- ✧ Las fuerzas motrices que deben ser generadas para que el flujo del fluido supere la resistencia al movimiento impuesto por factores retardadores incluyen:
 - una fuerza de arrastre que actúa en paralelo al fondo (sustrato) y está relacionado con los esfuerzos de corte en la frontera
 - una fuerza de levantamiento debida al efecto Bernoulli del flujo de fluido sobre los granos sobresalientes.

La fuerza de arrastre (F_D) depende de los esfuerzos de corte en el borde o frontera (τ_0) y el arrastre ejercido sobre cada grano expuesto a este esfuerzo. Entonces:

$$F_D = \frac{\tau_0}{N}$$

donde,

N número de granos expuestos a por unidad de área.

La discusión anterior ha sido simplificada y generalizada significativamente y un número de factores complican los cálculos de umbrales críticos de movimientos de granos bajo condiciones naturales. Estos factores incluyen variaciones en la forma, tamaño y distribución de los granos, rugosidad del sustrato, los cuales controlan la presencia o ausencia de un sustrato viscoso y la cohesión de partículas finas. Debido a estas complicaciones, las estimaciones son realizadas de manera experimental.

Como resultado de la experimentación realizada por el geógrafo sueco Henning Filip Hjulström (Lungsund, 1902 – Uppsala, 1982), en estudios en el campo de la hidrología, el investigador creó la

curva de Hjulström, que describe empíricamente el área de erosión, de transporte y de depositación de clastos en función de la dimensión y de la velocidad de la corriente. El ábaco ampliamente usado que muestra el gráfico de umbrales derivados por el inicio del movimiento de los granos es conocido como el Diagrama de Hjulström (Figura 3.3). Éste muestra la velocidad a la cual se inicia el movimiento del grano; a medida que la velocidad se incrementa sobre el sustrato es graficada contra el tamaño medio del grano (diámetro de partícula).

Este diagrama permite determinar los procesos geológicos (erosión, transporte, sedimentación) que realiza una corriente de agua en función de su velocidad y del tamaño de las partículas. Se puede apreciar que limos y arcillas (más pequeños) requieren velocidades mayores para el transporte que las arenas. Esta circunstancia conocida como efecto Hjulström, se debe a que arcillas y limos son sedimentos más cohesivos y ofrecen mayor resistencia a la corriente. Dependiendo del tamaño y la solubilidad de los materiales, el transporte puede ser realizado como carga de fondo (por arrastre, rodadura o saltación), como carga en disolución, o como carga en suspensión.

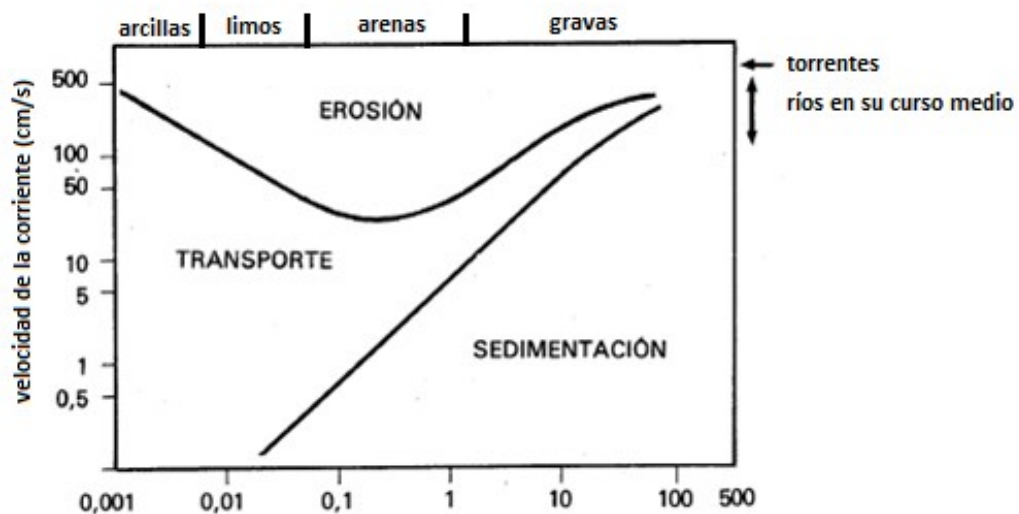


Figura 3.3. Diagrama de Hjulström, para estimación de velocidad de inicio de movimiento de partículas de suelo.

Fuente: Tomado de http://www.bioygeo.info/pdf/05_Dinamica_de_la_Hidrosfera.pdf

El diagrama muestra la velocidad crítica por el movimiento de los granos de cuarzo sobre un sustrato plano de 1 m de profundidad. La curva separa el gráfico en dos áreas: los puntos por encima del área

sombreada indican las condiciones bajo las cuales los granos están en movimiento y los puntos por debajo indican que no hay movimiento.

Para granos mayores que 0,5 mm, las velocidades de arrastre son mayores con el incremento en el tamaño de grano. Por el contrario, en granos menores que 0,5 mm, las velocidades de arrastre son mayores con el decrecimiento en el tamaño de los granos. Este último comportamiento es debido principalmente a las fuerzas cohesivas, haciéndoles más difícil de erosionar que los tamaños de partículas más grandes y sin cohesión.

Con relación a la función de la velocidad de asentamiento en el transporte de granos, tan pronto como los granos son levantados por encima del fondo durante el proceso de entremezclado, estos comienzan a caer nuevamente al fondo. La distancia que estos viajan corriente abajo antes de que se depositen y permanezcan en reposo en el fondo depende de la fuerza de arrastre ejercida por la corriente y de la velocidad de asentamiento de las partículas.

La partícula inicialmente acelera en la medida que cae a través del fluido, pero la aceleración desciende gradualmente hasta alcanzar una tasa estacionaria de caída, llamada velocidad terminal de caída. En partículas pequeñas, esta velocidad terminal se alcanza rápidamente. La tasa a la cual asientan después de alcanzar la velocidad de caída es función de la viscosidad del fluido y del tamaño, forma y densidad de las partículas. La fuerza de arrastre ejercida por el fluido sobre la superficie de un grano esférico es proporcional a la densidad del fluido (ρ_f), el diámetro (d) de los granos y de la velocidad de caída (V), como viene dado en la relación:

$$C_D \pi \frac{d^2}{4} \frac{\rho_f V^2}{2}$$

donde,

C_D coeficiente de arrastre que depende del número de Reynolds y de la forma de partícula.

La fuerza ascendente resulta de la flotación del fluido y viene dada por:

$$\frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2} \right)^3 \rho_f g$$

donde, ρ_f es la densidad del fluido y g es la aceleración de gravedad.

La fuerza descendente debida a la gravedad viene dada por:

$$\frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2} \right)^3 \rho_s g$$

donde,

ρ_s densidad de la partícula.

Cuando la partícula cesa de acelerar y alcanza la velocidad de caída, la fuerza de arrastre del líquido sobre la partícula descendente es igual a la fuerza descendente debida a la gravedad menos la fuerza ascendente resultante de la flotación del líquido. Entonces:

$$C_D \pi \frac{d^2 \rho_f V^2}{4} = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2} \right)^3 \rho_s g - \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2} \right)^3 \rho_f g$$

Arreglando los términos, la relación queda expresada en términos de la velocidad de caída (V) como:

$$V^2 = \frac{4 g d (\rho_s - \rho_f)}{3 C_D \rho_f}$$

Para flujo laminar con bajas concentraciones de partículas y número de Reynolds bajo (Re_g), C_D ha sido determinado igual a $24/Re_g$ (Rouse y Howe, 1953). Sustituyendo este valor ($24/U*d/\mu/\rho_f$) para C_D resulta:

$$V = \frac{1}{18} \frac{(\rho_s - \rho_f) g d}{\mu}$$

La cual es conocida como la Ley de Stokes del asentamiento, (propuesta por el físico británico George Gabriel Stokes, en 1845, a partir de los trabajos correspondientes al período 1842-1850, que tuvieron por objeto el movimiento de los fluidos viscosos y la elasticidad de los cuerpos sólidos, y le llevaron a la solución matemática de muchos problemas de gran importancia práctica y científica). Esta fórmula ha sido luego simplificada como:

$$V = C D^2 \left(\frac{cm}{s} \right)$$

donde,

- | | |
|---|--|
| C | constante equivalente a $(\rho_s - \rho_f) g / 18\mu$ |
| D | diámetro de las partículas consideradas esféricas, expresado en centímetros. |

Los valores de C han sido calculados para un rango amplio de temperaturas en el laboratorio y en consecuencia la velocidad de sedimentación (V) puede ser determinada rápidamente para cualquier valor de diámetro de partícula (D).

Cabe destacar que la determinación experimental la velocidad de caída de partícula muestra que la Ley de Stokes predice con precisión la velocidad de partículas en agua solamente para aquellas entre 0,1 y 0,2 mm de diámetro. Partículas mayores presentan velocidades menores que aquellas determinadas por la Ley de Stokes, esto aparentemente debido al efecto de inercia (turbulento) causado por las aumentadas tasas de caída de estos granos más grandes.

Con relación a los cambios globales en el planeta Tierra, J. P. M. Syvitski y otros (2003) explican que, aun siendo tan importante el impacto del quehacer humano en el flujo de sedimentos terrestres a los océanos, menos del 10 % de los ríos del mundo han sido monitoreados por su descarga de sedimentos a zonas costeras, o tienen registros disponibles para la investigación científica.

3.3 Erosión-Sedimentación en lo Biológico

Al observar el proceso desde lo ambiental y por ende transdisciplinario, se hace insuficiente la comprensión desde lo estrictamente litosférico, también deben ser incluidos los conocimientos de lo hidrosférico y lo atmosférico, como parte de las ciencias de la Tierra. Se hacen necesarias las ciencias biológicas, específicamente las ciencias del suelo, que garanticen la conservación de los componentes ecológicos de la corteza terrestre. Por ello es importante destacar la función principal del ciclo hidrológico en este enfoque del proceso erosión-sedimentación, como será descrito en detalles en las secciones siguientes. Las representaciones del ciclo hidrológico, descriptivo y conceptual son mostradas en las figuras 3.4a y 3.4b.

3.3.1 Desde la Ciencia del Suelo

A diferencia de la pedología que estudia el suelo como un producto natural proveniente de la degradación de las rocas por la acción del clima y los microorganismos, la edafología considera al suelo con relación a su uso como medio para el crecimiento de las plantas (Casanova, 1996 p.13). Desde que se tiene conciencia del agotamiento de los recursos naturales, incluido el suelo como

sustrato orgánico, o materia orgánica, la pérdida de suelos ha sido un tema de investigación y estudio en las disciplinas del agro y del resto de las actividades extractivas. Con mayor conciencia de los daños ambientales, ahora se estudia la ecología, dadas las necesidades de mejorar los procesos que degradan la calidad del suelo.

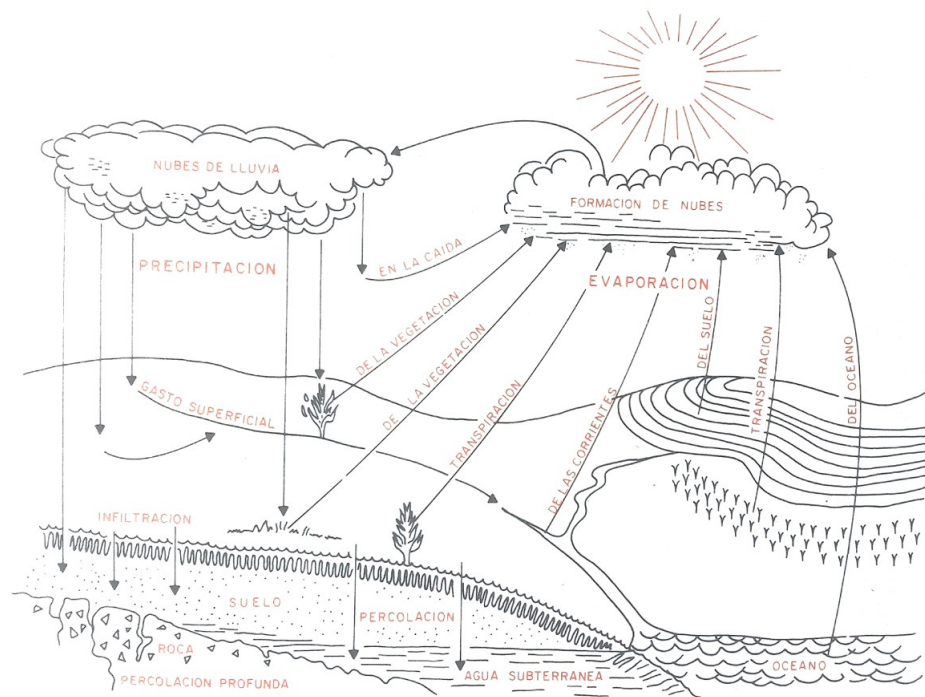


Figura 3.4. a) Representación descriptiva del ciclo hidrológico.

Fuente: Tomado de Carciente (1985).

De acuerdo con Ayala Carcedo y otros (1995), en el caso de la minería se reconoce a la erosión hídrica como la más importante y la de efectos más perjudiciales. Según la forma de manifestarse, la erosión hídrica puede clasificarse en: laminar, en regueros o surcos, y en barrancos o cárcava. Para ello habrá de tenerse en cuenta una serie de factores que van a influir en la erosionabilidad de los suelos como muestra la Figura 3.5.

Los científicos han sabido que los suelos responden a las distintas velocidades de caída de las lluvias con degradación de su estructura. Para tratar de definir la estabilidad estructural con respecto al agua ha sido desarrollada una serie completa de ensayos de campo y laboratorio, por ejemplo:

- ♣ Ensayo de Dispersión de Middleton, en 1930, que busca comparar el contenido de partículas naturalmente dispersas en aguas y sin uso de dispersante.

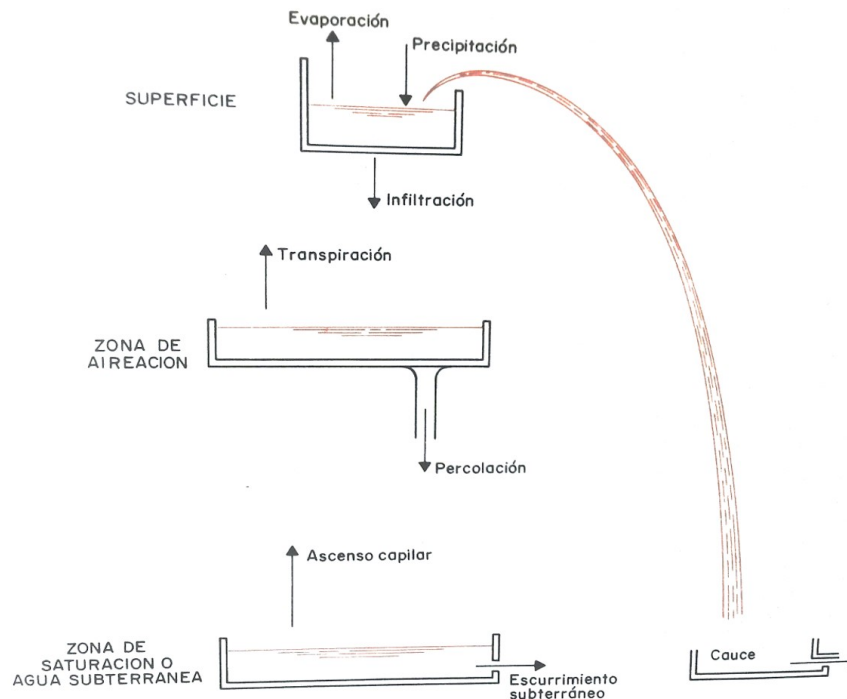


Figura 3.4. b) Representación conceptual del ciclo hidrológico

Fuente: Tomado de Carciente (1985).

- ✦ Cápsula de Ellison (1944) en la cual los agregados de partículas son expuestos a la energía del goteo de la lluvia.
- ✦ Ensayo de Caída de Gota de Agua, diseñado por McCalla, en 1944, en el cual grumos gradados (30gr) son expuestos a gotas de agua cayendo desde una altura específica.
- ✦ Ensayo de Estabilidad Estructural de Hénin, diseñado por Hénin y Monnier, en 1956, donde los agregados están sumergidos y separados bajo agua.

Recientemente, modelos de erosión de suelos y movimiento químico han sido basados en procesos más importantes de erosión de suelos y movimiento de agua, tales como el desprendimiento y transporte de partículas causados por la lluvia y el escurrimiento (Beasley, 1977).

En el libro *Land Degradation: Creation and Destruction*, Jonson & Lewis (1995), en las páginas 2 y 3, explican que: “La degradación de suelos es la disminución, tanto de productividad biológica como del uso de un área territorial, debido a la interferencia humana (...) y que cualquier área, independientemente de su clima, topografía, u otras características ambientales, puede sobrellevar

degradación”. Para propósitos prácticos, este tipo de degradación severa es un cambio permanente desde el punto de vista humano, aunque sea un periodo relativamente insignificante desde el punto de vista geológico.



Figura 3.5 Esquema con factores de erosionalidad de suelos.
Fuente: Tomado de Ayala y otros (1995).

Según la cita en documento publicado por la Agencia Mundial de Alimentación (FAO, por sus siglas en inglés), consultado en [www.fao.org /docrep/T2351S/T2351S00.HTM](http://www.fao.org/docrep/T2351S/T2351S00.HTM), en agosto 2007, Blaikie y Brookfield (1987) explican que “los procesos ambientales como erosión y lavado ocurren sin la acción humana, pero para que estos procesos sean interpretados como degradación, implican un criterio social que relaciona la tierra con su uso actual o potencial. La palabra degradación de suelos implica, por definición, un problema social”.

Jones y otros (1992), presentaron el documento: “Erosión de suelos en América Latina”, en el cual explican que: “En el pasado, las estimaciones de la erosión del suelo se predecían utilizando ecuaciones obtenidas empíricamente, como la Ecuación Universal de Pérdida del Suelo (USLE, por sus siglas en inglés). En efecto, a consecuencia de lo que está documentado en la literatura ambiental como “Tazón de Polvo” (*Dust Bowl*), los efectos de sobretrituración y pérdida de fertilidad del suelo, debido a la agricultura intensiva en el oeste medio estadounidense, en 1929 Hugh H. Bennett inició una campaña intensa en investigación científica, recolectando datos de campo y compilados en una gran base referida como base de datos USLE. Ésta es una colección de 11.000 registros de 47 sitios en 24 estados, medidos entre las décadas: 1930, 1940 y 1950. Éstos fueron analizados en computador con datos específicos de sitios, precipitaciones y pérdida de suelos y escurrimiento de agua en superficie.

Con relación a la aproximación de la USLE para extracción mineral, Ayala Carcedo (1995) y otros autores, en el área de ingeniería geoambiental del Instituto Tecnológico Geominero de España y de la empresa Estudios y Proyectos Mineros, S.A., abordan la pérdida de suelos por erosión en el “Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería”. Los autores aportan un capítulo sobre el control de la erosión y sedimentación y obras estructurales (pp.149-176), explicando que: “En el caso de las actividades mineras es la erosión hídrica la más importante y la de efectos más perjudiciales, se produce cuando se disgregan las partículas de los materiales superficiales y son arrastrados de dichas superficies por la acción del agua” (p.149).

El tema de la erosión es enfocado, en el referido material, desde dos puntos de vista diferentes: “La estimación de la cantidad de erosión originada y las distintas maneras de controlar dicha erosión; el objetivo final es la búsqueda de medidas o soluciones que disminuyan el riesgo de erosión, y la erosión en sí, en las áreas afectadas y la integración de las obras realizadas en el entorno”. Concluyen que: “Se deben tomar en cuenta una serie de factores que van a influir en la erosionabilidad de los suelos y por tanto en los procesos de restauración” (p.149).

Este modelo es de utilidad porque plantea el proceso de erosión basándose en factores de erosividad de la lluvia, erosionabilidad del suelo, topografía del terreno, cobertura vegetal y tipo de prácticas de cultivo, en el caso de la actividad agronómica.

De allí que, asumiendo la ecuación que presenta el trabajo de Ayala Carcedo y otros (1995), haciendo referencia a Wischmeier y Smith (1978), la predicción, estimación y cuantificación de la pérdida anual de suelo, A en toneladas por hectárea, vienen dadas por la siguiente expresión:

$$A = 2,24 R * K * L * S * C * P$$

donde,

A	pérdida media anual de suelo (ton/ha).
R	factor de lluvia
K	factor de erosionabilidad del suelo
L	factor de longitud de declive de talud
S	factor de pendiente de talud
C	factor de cubierta vegetal y uso del suelo
P	factor de control de la erosión

Con relación al factor de lluvia R, el cual se define como el producto de la energía cinética (E) y la intensidad máxima durante 30 minutos (I_{30}) de erosión por lluvia (erosividad pluvial), se aplica la ecuación para un “chubasco”:

$$R = \frac{\left[\sum_{j=1}^n (1,213 + 0,890 \cdot \log_{10}) \cdot (I_j T_j) \right] \cdot I_{30}}{173,6}$$

donde,

I_j	intensidad de precipitación para un incremento de intensidad (mm/h)
T_j	periodo de 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 la Tabla 3.1 conociendo la intensidad de precipitación en una hora. A partir de la precipitación máxima del mes en 24 horas, es posible calcular la intensidad de lluvia en una hora. La distribución de la intensidad de lluvia durante el día es irregular, por lo que, dependiendo de la región geográfica con diferencias en el régimen de lluvias, se dividirá el valor resultante entre 2, 4 ó 6, según si es menos o más lluviosa, o si es una región con régimen intermedio.

Con relación al factor de erosionabilidad del suelo, K (también conocido como separabilidad), éste varía entre 0,3 y 0,7 y depende de las propiedades del suelo, especialmente del contenido en materia orgánica, la textura, la estructura y la permeabilidad. El cálculo de K puede hacerse a partir del nomograma de Wischmeier, que se muestra en la Figura 3.6.

La permeabilidad va de rápida a muy lenta y la estructura del suelo aparece tabulada de 1 a 4, desde granular muy fino, granular, granular mediano o burdo o en bloques, en placas o masivo.

Para proceder a utilizar este ábaco es necesario disponer de los datos adecuado, se inicia en la escala de la izquierda y se procede a marcar los puntos, representando el porcentaje de arena del suelo (0,1

a 2,0 mm), porcentaje de materia orgánica, estructura y permeabilidad, en esa secuencia. Se interpola entre las curvas de la gráfica. La línea punteada ilustra el procedimiento para un suelo que tenga 65 % de arena; 2,8 % de materia orgánica, estructura tipo 2 y permeabilidad tipo 4; para resultar $K=0,31$ en el ejercicio que aparece en la gráfica.

Tabla 3.1. Energía cinética de la lluvia natural (Kg-m/Ha-mm), de Wischmeier (1958).
Fuente: Tomado de Ayala Carcedo y otros (1995).

INTENSIDAD (mmh)	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	0,000	3,265	9,937	7,499	8,606	9,470	10,171	10,765	11,281	11,734
1	12,142	12,845	12,845	13,253	13,439	13,705	13,945	14,188	14,488	14,616
2	14,814	15,182	15,182	15,353	15,717	15,674	15,826	15,971	16,111	16,247
3	16,377	16,626	16,626	16,745	16,860	16,972	17,080	17,196	17,289	17,389
4	17,486	17,582	17,614	17,765	17,854	17,940	18,025	18,108	18,189	18,269
5	18,347	18,425	18,498	18,571	18,643	18,714	18,852	18,852	18,919	18,958
6	19,050	19,113	19,176	19,238	19,298	19,385	19,417	19,475	19,532	19,588
7	19,644	19,699	19,752	19,806	19,858	19,920	19,961	20,011	20,061	20,110
8	20,159	20,207	20,554	20,301	20,347	20,392	20,437	20,482	20,526	20,570
9	20,613	20,654	20,694	20,435	20,775	20,816	20,857	20,897	20,938	20,978
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	21,029	21,386	21,722	22,030	22,316	22,582	22,830	23,065	23,285	23,493
20	23,642	23,879	24,059	24,230	24,294	24,551	24,703	23,065	24,988	25,194
30	25,254	25,321	25,503	25,622	25,737	25,894	25,957	26,063	26,116	26,265
40	25,363	26,459	26,551	26,642	26,732	26,817	26,902	26,965	27,066	27,146
50	27,224	27,300	27,375	27,443	27,520	27,591	27,651	27,723	27,796	27,862

También la erodibilidad de cada material es estimada para flujos concentrados, no concentrados y erosión eólica, en cinco (5) niveles de erosividad: muy baja, baja, media, alta y muy alta. Actualmente existe el programa de computación SOILOSS, aplicable para la predicción de erodibilidad del suelo, en flujos no concentrados y asistir en la selección de prácticas de manejo de tierras (Rosewell, 1993).

Fernández (2001) discute que, debido a que Wischmeier (1958) desarrolló un índice de erosividad de la lluvia denominado EI_{30} , el cual es utilizado como factor en USLE y que Wischmeier y Smith (1978) han señalado valores probables extremos y mapas isoerosivos para diferentes regiones de los Estados Unidos, otros autores han desarrollado este mismo enfoque en otras regiones, tanto tropicales como templadas.

Es por esto que ha sido desarrollada investigación climatológica en cuencas tropicales venezolanas, en las zonas altas andinas y de la cordillera central de Venezuela donde se “reconocen problemas de deterioro del recurso suelo por efecto de la erosión hídrica, proceso favorecido por las altas

pendientes donde se desarrollan los sistemas de cultivo y la poca cobertura que estos ofrecen, así como la casi total ausencia de prácticas de soporte conservacionistas”.

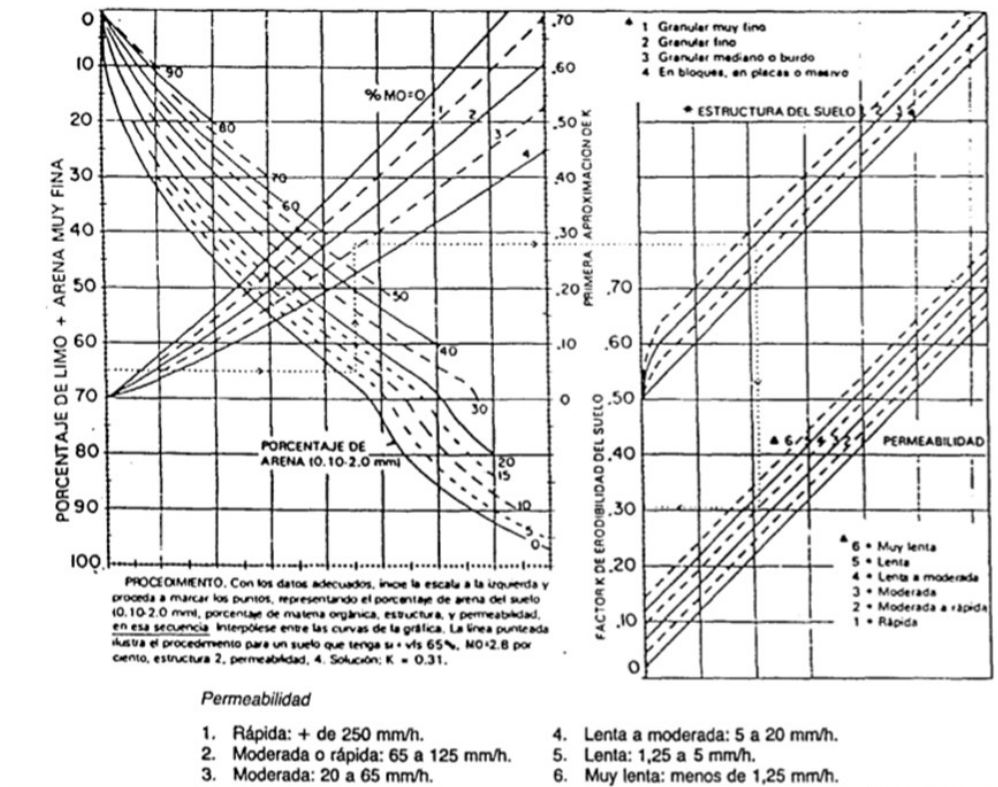


Figura 3.6. Ábaco para el cálculo del factor K.
Fuente: Tomado de Ayala Carcedo y otros (1995).

Fernández destaca el trabajo de otros autores, quienes realizaron un análisis del potencial erosivo de la precipitación en tierras agrícolas de Venezuela utilizando el EI_{30} como índice erosivo en la zona de bosque seco tropical. Éstos propusieron utilizar:

$$EI_{30} = -190,5 + 8,8 (p)$$

donde,

p lámina de precipitación mensual en mm

EI_{30} índice de erosividad de la lluvia, en $Mj \times mm/ha \times h$

La misma autora, Fernández señalaba en estudios precedentes que, para la localidad de la Estación Experimental Bajo Seco y basado en registros obtenidos durante un período de ocho años, la erosividad de las lluvias es baja, obteniendo un valor promedio del índice EI_{30} de 2613 unidades

concentrada en dos picos: abril-mayo y septiembre-octubre. Encuentra un modelo lineal para predecir el EI₃₀ con base en la lámina mensual que se expresa así:

$$EI_{30} = -61,7 + 6,0 (p)$$

quedando el factor de lluvia, como se expresa:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{\sum_{i=1}^{12} P_i}$$

donde,

R Índice de erosividad pluvial (adimensional).
P Precipitación media anual (mm/h).

Fernández aporta los valores en la Tabla 3.2 que indica los valores absolutos y relativos para número de aguaceros, lámina total acumulada, lámina escurrida, EI₃₀ y pérdida de suelo en la parcela desnuda para tres clases de eventos (julio-diciembre, 1988).

Por otra parte, el factor de erodibilidad (K) está basado en una serie de ensayos de laboratorio, incluyendo análisis de tamaño de partículas y ensayo de contenido de materia orgánica, así como evaluaciones en campo y determinación de la estructura del suelo y la permeabilidad. Este factor puede ser calculado primero en laboratorio usando el programa SOILOSS, asumiendo valores particulares para cada material.

Tabla 3.2 Valores absolutos y relativos para número de aguaceros, lámina total acumulada, lámina escurrida, EI₃₀ y pérdida de suelo venezolano para lluvias de julio a diciembre (Fernández, 2001).

Aguaceros			Lluvia Acumulada		Escorrentamiento		EI ₃₀		Pérdida de Suelo	
Clases (mm)	Nº	%	mm	%	mm	%	Unid	%	Mg/ha	%
00-10	52	70	228	31	33	8	42	11	8	8
10-30	16	22	280	38	183	43	99	27	32	34
30-50	6	8	238	32	202	49	230	62	55	58
TOTAL	74	100	746	100	418	100	371	100	95	100

La erodibilidad para flujos concentrados toma en consideración...el análisis granulométrico, la cohesión entre partículas, la dispersibilidad de la fracción fina y la cantidad de arcillas presentes. En suelos inestables el sodio (Na) intercambiable puede ser alto (i.e. suelos sódicos) y son

frecuentemente altamente dispersivos. Estos suelos son sensibles frente a los flujos concentrados y se producen grietas de erosión y cárcavas.

Para complementar el análisis desde la ciencia del suelo es necesario revisar la climatología porque son las precipitaciones las que ofrecen el campo de fuerzas que desprenden las partículas del suelo expuesto, bien sea por desprendimiento, desgaste, abrasión o disolución del cementante entre partículas.

Los apartes a continuación presentan los principios básicos para la determinación del caudal de diseño mediante el Método Racional y el cálculo de la lluvia de diseño, aplicando el Método de Gumbel. Con esto es posible el diseño de obras civiles hidráulicas para la conducción de las aguas de escurrimiento. Finalmente, se repite la ecuación de Stokes para el diseño de las lagunas o cuencas de decantación y sedimentación de partículas decantables y suspendidas, respectivamente.

3.3.2 Desde lo Hidrológico

Revisando un poco de historia, a la hidrología la han ubicado dentro de las ciencias geográficas y ha sido definida como la ciencia que trata las propiedades, la distribución y la circulación del agua; especialmente, el estudio del agua sobre la superficie del terreno, en el subsuelo y las rocas subyacentes y en la atmósfera (...) Aunque existen evidencias de algunos trabajos realizados en la antigüedad, la hidrología es una ciencia relativamente nueva y lo que le dio un enorme impulso a la investigación en esta disciplina ocurrió en Estados Unidos en 1930, motivado por las necesidades de control de las crecientes, los sistemas de riego, la protección de tierras y otros campos afines (Ruíz, 2001), como en las investigaciones en suelos, durante la década de los treinta, del siglo XX.

Según Ruíz (2001), el naturalista francés Pierre Perrault, quien entre 1608 y 1680, midió la escorrentía y encontró que solamente era una fracción de la lluvia, llegando a la conclusión de que la lluvia era una fuente para la escorrentía y concluyó en forma correcta que el resto de la precipitación se perdía por transpiración, evaporación y desviación. Durante el siglo XVIII florecieron los estudios hidráulicos; siendo ejemplos notables el piezómetro de Bernoulli, el tubo Pitot, el correntímetro de Woltman, los modelos en escala de Smeaton, el Teorema de Bernoulli y la fórmula de Chezy.

Entre 1800 y 1900 la hidrología avanzó en forma más rápida (...) la mayoría de las contribuciones fueron en la hidrología del agua subterránea (hidrogeología) y en las mediciones del agua superficial (escorrentía o escurrimiento). En el campo de las mediciones hidrométricas se hicieron muchos avances, incluyendo el desarrollo de fórmulas de caudales, como fue el caso del desarrollo del

método racional, para determinar las crecientes máximas, propuesto por Mulvaney (1850). Cabe recordar que la ley de Stokes fue desarrollada en este tiempo, en 1845. Asimismo, en el campo de la hidráulica, la fórmula de Manning (1889), conocida así en reconocimiento al ingeniero irlandés Robert Manning (1816-1897) quien propuso su ecuación empírica para el flujo en canales abiertos.

Según Ruiz (2001), en el Período de Racionalización (1930-1950), Sherman, en 1932, demostró el uso del hidrograma unitario de escurrimiento y en 1933, Horton inició el enfoque más exitoso hasta hoy al problema de la determinación del excedente de lluvia con base en la teoría de infiltración, así como al estudio de la forma de la cuenca y su influencia en el drenaje de la misma. En 1941 Gumbel propuso el uso de la distribución de valores extremos para el análisis de la frecuencia de los datos hidrológicos. Por otro lado, Einstein desarrolló la función de carga de fondo, lo cual introdujo el análisis teórico a los estudios de sedimentación.

En lo relativo al sistema hidrológico general, los fenómenos hidrológicos son sumamente complejos y es probable que aún no se les entienda completamente, pero, el análisis hidrológico está relacionado con principios bien establecidos de la hidrodinámica y la termodinámica. El concepto de sistema permite representar de manera simplificada las conexiones y relaciones hidroclimáticas, como en la visión del ciclo hidrológico, que da lugar a la comprensión de los procesos hidrológicos y a la medición de los datos hidrometeorológicos.

Cuando interesa estudiar una zona bien definida, subcuenca o porción de una cuenca, se tiene un sistema hidrológico regional, que incluye aspectos sociales, económicos y políticos, dentro de los límites de la divisoria de aguas (parteaguas), donde existen ríos que atraviesan la porción de cuenca, donde concurren escurrimientos afluentes y de donde salen escurrimientos efluentes, como muestran los esquemas en las figuras 3.7, a y b.

Desafortunadamente, las variables asociadas a procesos de: escurrimiento, interceptación, infiltración y otros en el subsuelo tan solo pueden ser estimadas. Los procesos para los cuales se tienen generalmente registros continuos de datos son: la precipitación, la evaporación y escurrimiento en algunos puntos de ríos. Guevara y Cartaya (1991) han propuesto un modelo conceptual del ciclo del escurrimiento propuesto por, en el cual se destaca el flujo superficial Q_s , en la zona superficial de la columna litológica, a partir de la relación excedentaria entre precipitación, evaporación e infiltración.

La respuesta de la cuenca a la lluvia varía de acuerdo con la intensidad y duración de las tormentas; aun para tormentas iguales la respuesta difiere en función de las condiciones previas de la cuenca a la

lluvia. Guevara y Cartaya et al (1991) y, Chow y otros (1993) estudiaron la operación del sistema para predecir su las entradas y salidas, como función del tiempo $I(t)$ y $Q(t)$, respectivamente.

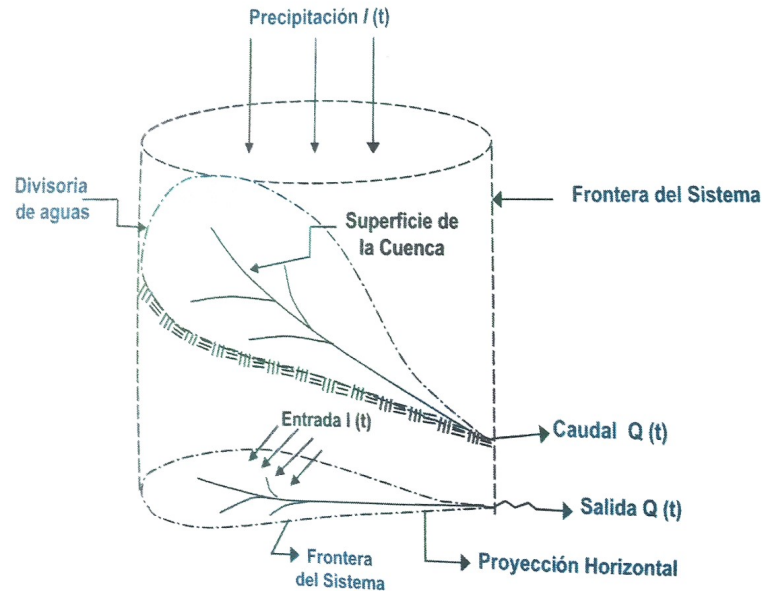


Figura 3.7. a) Esquema representativo de cuenca hidrográfica como sistema hidrológico regional
Fuente: Tomado de Ruiz (2001).

La función Ω actúa sobre las entradas $[I(t)]$ y opera sobre ella produciendo una salida $[Q(t)]$, originando una función de transferencia o transformación del sistema como sigue:

$$Q(t) = \Omega I(t)$$

donde,

Ω operador de la función de transferencia entre la entrada y la salida.

Si esta relación puede representarse mediante una ecuación algebraica, entonces Ω es un operador algebraico y si:

$$Q(t) = C I(t)$$

donde,

C constante

Como C es una constante, entonces la función de transferencia es el operador Ω convertido en C y:

$$\Omega = C = \frac{Q(t)}{I(t)}$$



Figura 3.7. b) Esquema representativo de cuenca hidrográfica, ejemplo de un sistema de drenaje
Fuente: Tomado de Ruiz (2001).

La ecuación precedente se encuentra en el modelo racional el cual explica el caudal de salida de una cuenca pequeña, donde la variable que opera la entrada es el coeficiente de escurrimiento y la superficie de la cuenca, modelando la salida de un caudal máximo, funcionando como sigue:

$$Q = K I A$$

donde,

- | | |
|---|---|
| Q | caudal de diseño, en función de un periodo de retorno, que saldría de un sistema residual hidrológico del cual se conoce su operador C: (K) |
| K | coeficiente de escurrimiento |
| A | área de la cuenca, o superficie comprendida dentro de la divisoria de agua hasta un punto de una corriente. Se determina sobre mapas topográficos hechos a escalas convenientes y se expresa en km ² o ha. |
| I | intensidad de lluvia, como entrada al modelo para un periodo de retorno determinado |

$$Q = \Omega I$$

Y, como:

$$\Omega = C = K \times A$$

conduce al modelo conocido como Método Racional:

$$Q = K I A$$

el cual permite plantear el balance hidrológico de una cuenca para definir, con cierto grado de seguridad, sus características y su comportamiento frente a los factores incidentes principales: precipitación, escurrimiento, evapotranspiración, infiltración, etc. Esta ecuación es ampliamente usada en los cálculos para el manejo de aguas de mina.

A efectos de este trabajo interesa también determinar las variaciones en las intensidades de lluvia en el territorio venezolano puesto que la muestra caracterizada de minas en el país está distribuida en seis (6) estados: Aragua, Distrito Capital y Miranda, en la región centro norte costera; Falcón y Zulia, en la región occidental costera y Bolívar en la región suroccidental del país. La figura 3.8 muestra la variabilidad pluviométrica en el territorio nacional y en consecuencia las lluvias de diseño son distintas por regiones, desde semi-seco hasta muy lluvioso.

Según Carciente (1985) para determinar la lluvia de diseño de estructuras de drenaje, se realizan las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (curvas IDF). El diseño debe ser capaz de conducir las máximas descargas que se producen, las cuales son un resultado de la relación duración-intensidad de las lluvias. La duración es el tiempo que tarda ésta en precipitarse sobre la superficie terrestre y la intensidad es la mayor o menor cantidad de agua que cae en un lapso determinado. En hidrología, la frecuencia de una lluvia es el número de veces que una precipitación de cierta magnitud es igualada, o excedida, en un determinado número de años.

Para medir la intensidad y duración de las lluvias se utilizan pluviógrafos que registran sobre un papel coordenado la intensidad de lluvia sobre cualquier instante durante el tiempo en que se produce la misma. Los detalles acerca de cómo se procede para resolver las limitaciones técnicas en los resultados del uso de los pluviógrafos pueden ser leídos en la literatura técnica especializada.

Cabe destacar que los registros de lluvias tomados en estaciones medidoras aisladas se denominan lluvias puntuales y constituyen los datos básicos fundamentales para todos los estudios de precipitación, no obstante, se requiere información acerca de la precipitación caída sobre un área, cuyo tamaño puede variar desde unos pocos metros cuadrados hasta miles de hectáreas.

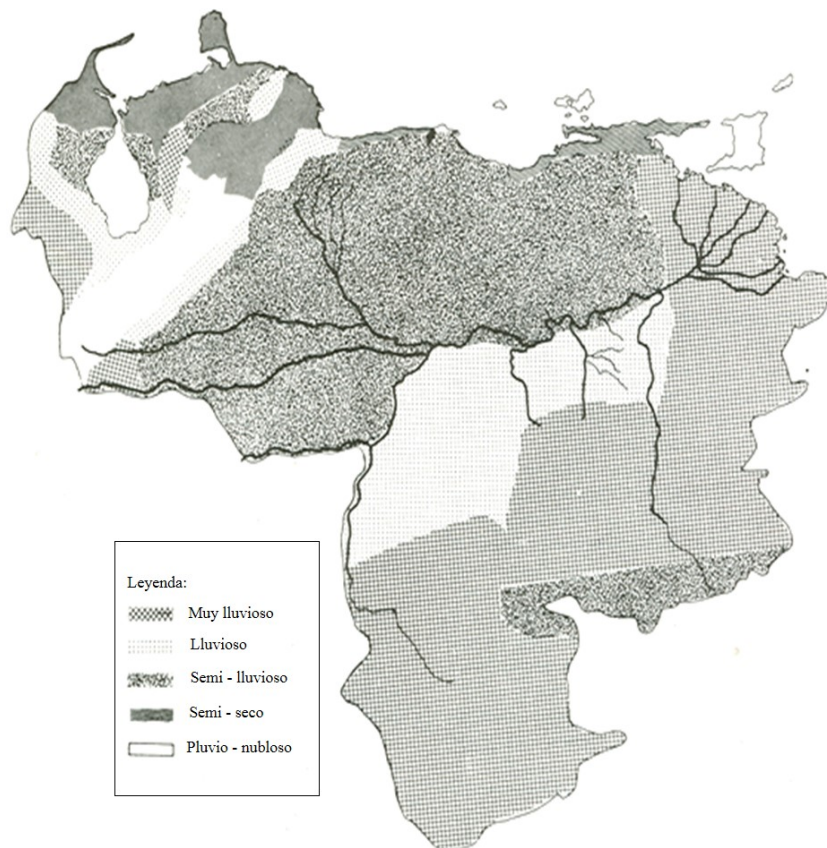


Figura 3.8 Mapa (sin escala y sin zona en reclamación) con variabilidad pluviométrica en Venezuela
Fuente: Tomado de Carciente (1985).

Para transformar valores puntuales a valores representativos del área se destacan los métodos siguientes:

- de valor promedio
- de los polígonos de Thiessen
- de las isoyetas

No obstante, las prácticas de manejo de aguas de mina y de control de sedimentos en suspensión, está basado en la estadística de valores extremos, al aplicar el Método de Gumbel (en honor al matemático estadístico de origen alemán Emil Julius Gumbel, 1891-1966), basando en la distribución doble exponencial los valores extremos de las lluvias. Esto permite obtener, en una estación meteorológica, la magnitud de la precipitación correspondiente a una frecuencia y duración de lluvia determinadas.

El punto de partida de la aplicación de este método es la selección de los máximos anuales de precipitación para las diferentes duraciones de la lluvia que se desea analizar.

Para cada estación analizada se dan tablas para duraciones distintas, que pueden ser de: ½, 1, 3, 6, 9, 12 y 24 horas. En cada hilera de las tablas aparecen los máximos mensuales registrados correspondientes al año indicado. El último valor anotado es el extremo de la serie de doce (12) valores mensuales, el extremo anual. Escogiendo el valor máximo para una cierta duración se tendría la mayor precipitación anual para esa duración y para ese año de registro.

Repitiendo el procedimiento para los distintos años reportados, se tendrá la serie de máximos valores de lluvia para esa duración. Si una vez aplicada esta metodología para diversas duraciones, se calculan las intensidades de lluvias equivalentes y se representan gráficamente los valores resultantes, se obtienen las curvas intensidad-duración-frecuencia para esa estación.

Gumbel (1954) estableció que si $X_1, X_2, \dots, X_n$ son los valores extremos observados en n muestras de igual tamaño N , la probabilidad de ocurrencia (valor inverso a la frecuencia) de un valor igual o mayor que cualquier valor X en cualquier año, cuando n y N tienden a infinito, se aproxima a la expresión:

$$P = 1 - e^{-e^{-b}}$$

Siendo,

e la base de los logaritmos neperianos y b la llamada variable reducida.

El valor de b se expresa como:

$$b = a (X - X_f)$$

siendo,

$$a = \frac{1,28255}{\sigma_x}$$

y

$$X_f = \bar{X} - 0,45 \sigma_x$$

lo que permite escribir:

$$b = \frac{1}{0,7797\sigma_x}(X - \bar{X} + 0,45\sigma_x)$$

donde,

X	magnitud de la precipitación con probabilidad P
$\bar{X}$	promedio de la serie de valores extremos
σ_x	desviación estándar calculada como

$$\sqrt{\frac{\sum (x - \bar{X})^2}{N}}$$

siendo x los valores de la serie y N el número de años del registro. Por aplicación de mínimos cuadrados, Gumbel establece que:

$$X_f = \bar{X} - \sigma_x \frac{\bar{y}_N}{\sigma_N}$$

y

$$a = \frac{\sigma_N}{\sigma_x}$$

donde,

X	magnitud de un evento de frecuencia dada
$\bar{X}$	promedio de los valores de la muestra
σ_x	desviación estándar, calculada en la forma

$$\sqrt{\frac{\sum (x - \bar{X})^2}{N - 1}} = \sqrt{\frac{\sum x^2 - \bar{X} \sum x}{N - 1}}$$

Según Carciente (1985) en esta fundamentación teórica se atiende una consideración adicional acerca del tamaño de la muestra, que no será desarrollada aquí por razones de espacio y de pertinencia, dado que en los registros hidrometeorológicos en territorio venezolano presentan limitantes en la amplitud y de continuidad de la ventana de tiempo de observación. De hecho, cuando se dispone de suficiente

número de datos, se ordenan los registros de todas las lluvias importantes de una estación en orden decreciente, asignando a cada valor un número de orden creciente. Así al valor más alto se le asigna $m = 1$, al segundo valor $m = 2$, y así sucesivamente.

El primer valor habrá ocurrido una sola vez en el número de años del registro; el segundo, dos veces, etc. El período de recurrencia puede obtenerse mediante la aplicación de fórmulas de la forma:

$$T_r = \frac{n + 1}{m} \quad \text{o} \quad T_r = \frac{n}{m}$$

donde,

T_r	período de retorno, en años
n	número de años del registro
m	número de orden de la lluvia en la serie ($m = 1$ para un suceso máximo y $m = n$ para uno mínimo).

Hasta aquí se consideró al componente hidrológico en el proceso de erosión-sedimentación, como medio de transporte del particulado en suspensión esto es, desde las ciencias de la Tierra. La sección siguiente presenta el enfoque desde las ciencias sociales, siguiendo a O' Riordan (1995).

3.4 Erosión-Sedimentación en lo Social

En este trabajo se pretende continuar profundizando en el estudio de la erosión-sedimentación desde el control del proceso natural, e inducido por las acciones operativas, como parte de la gestión ambiental responsable en el aprovechamiento de los recursos naturales de la corteza terrestre. Desde las ciencias sociales, la geografía, particularmente la ordenación de usos del territorio aplica los sistemas de información geográfica, apoyados en el análisis.

En décadas recientes con la incorporación de los avances en la adquisición de información satelital y en el desarrollo de programas manejadores de información por vía electrónica, ha sido posible contar con herramientas que permiten tanto la observación a distancia como la transmisión de datos geográficos que, junto con los programas de diseño gráfico, hacen posible la visualización y el análisis de las representaciones del terreno. En esta sección se exploran las herramientas aplicables en el estudio del proceso erosión-sedimentación a escala regional y las potencialidades de su uso a escala local, como lo demandan los proyectos mineros.

Según Wilson y Gallant (2000) en el libro “*Terrain Analysis: Principles and Applications*”, el desarrollo y aplicación de programas para el análisis de terrenos (territorios) desde las ciencias ambientales (*Terrain Analysis Programs for the Environmental Sciences*, TAPES por sus siglas en inglés), permiten observar al planeta desde un estadio donde una serie de procesos biofísicos son jerárquicamente escalados y desplegados, como se explica en la Tabla 3.3. Cita a otros autores, quienes han establecido que esta aproximación es útil porque hace posible tanto el manejo de la complejidad de procesos y patrones individuales del paisaje, como algunas dificultades que se encuentran al delinear apropiadamente las escalas temporales y espaciales (op. cit. Wilson y Gallant, 2000).

Diversos autores, establecen que muchos de los importantes procesos biofísicos que operan en o cerca de la superficie del terreno están influenciados por los eventos pasados y por los controles, interacciones y umbrales contemporáneos. Por su parte, Kirby y otros (1996) concluyó que en la aplicación de modelos de erosión, diferentes procesos e interacciones son susceptibles de emerger en la medida en que se avanza desde las escalas del plano de detalle hasta la de cuenca hidrográfica y la regional (topo) (ambas citas, op. cit. Wilson y Gallant, 2000).

Según Moore y Hutchinson (1991), las escalas meso y topo han recibido menor atención aun cuando estas escalas son importantes porque muchas de las soluciones a problemas ambientales, como la aceleración acelerada de suelos y la contaminación dispersa (no puntual), van a requerir cambios en las estrategias de manejo en estas escalas del paisaje. Según otros autores, se ha incrementado la popularidad del trabajo en estas escalas intermedias (meso y topo) durante la década de los noventa; esto ha permitido la disponibilidad creciente de datos, continuos y de alta resolución, de elevación digital (*Digital Elevation Model*, DEM por sus siglas en inglés) y, el desarrollo de nuevas herramientas de análisis computarizado de terrenos (op. cit. Wilson y Gallant, 2000).

Según Moore y otros (1993), numerosos atributos topográficos entre los más utilizados, como la pendiente, área tributaria específica, aspecto y, planta y perfil de la curvatura, pueden ser derivados de los tres (3) tipos de datos de elevación para cada uno de los elementos como una función de sus alrededores. Primero se distinguen los atributos primarios que son calculados directamente de los DEM y atributos secundarios o compuestos, los cuales involucran la combinación de atributos primarios y constituyen índices basados en lo físico, o derivados empíricamente, que pueden caracterizar la variabilidad espacial de procesos específicos que ocurren en el paisaje (op. cit. Wilson y Gallant, 2000).

Tabla 3.3 Escalas y funciones en Sistemas de Información Geográfica (SIG) aplicado al modelado ambiental en la conservación de la biodiversidad.

Fuente: Tomado de Wilson y Gallant (2000).

Escala	Función del modelo digital de elevación
Global	Control de ingreso de energía primaria, cobertura de nubes y niveles de dióxido de carbono (CO ₂) en el clima y patrones atmosféricos.
Meso	Control en sistemas hidrometeorológicos prevalecientes de condiciones medias a largo plazo; control en tasas de cambio mensual del clima en función de la altitud; control del sustrato geológico en la química del suelo.
Topo	Control de la hidrología en cuencas por la morfología en superficie; controles de insolación en superficie sobre taludes, estética y cuenca visual, y contraste topográfico.
Micro	Controles de cobertura vegetal por luz, calor y agua para vegetación baja; controles de uso de nutrientes en estructura vegetal y fisiografía de plantas.
Nano	Controles de reciclaje de nutrientes en microorganismos del suelo.

La Tabla 3.4 presenta un extracto de los atributos primarios asumidos por Wilson y Gallant (2000) que incluyen: pendiente, aspecto de curvatura, planta y perfil de curvatura, longitud de trayectoria de flujo y área tributaria aguas arriba. Diferentes autores opinan que, la mayoría de estos atributos topográficos pueden ser calculados directamente con un esquema de diferencias finitas de segundo orden, o ajustando al DEM una función de interpolación de dos variables: $z = f(x, y)$, para entonces calcular la derivada de esa función (op. cit. Wilson y Gallant, 2000).

Los atributos secundarios que son calculados a partir de dos o tres atributos primarios son importantes porque ofrecen una oportunidad para describir patrones como una función del proceso. Estos atributos pueden afectar características de los suelos (...) distribución y abundancia de agua en el suelo, susceptibilidad de los terrenos a la erosión hídrica y la distribución y abundancia de flora y fauna. Diversos índices de poder de corriente y de capacidad de transporte de sedimentos han sido propuestos. Según Moore y otros (1993), el poder de la corriente es la tasa de tiempo del gasto de energía y ha sido usado de manera extensiva en estudios de erosión, transporte de sedimentos y geomorfología como una medida de la capacidad erosiva del agua fluyendo y es calculada como sigue:

$$\Omega = \rho g q \tan\beta$$

donde,

ρ	g	unidad de peso del agua
q		descarga por ancho unitario
β		gradiente de talud (en grados)

El índice topográfico compuesto $A_s \tan\beta$ es, por lo tanto, una medida del poder de corriente, dado

Tabla 3.4 Extracto de tabla con atributos topográficos primarios cuyos datos pueden ser calculados en modelos de elevación digital (DEM). Tomado de Wilson y Gallant (2000).

Atributo	Definición	Importancia en...
Talud (pendiente)	Gradiente	Velocidad de flujo superficial y subsuperficial y tasa de escurrimiento, precipitación, vegetación, geomorfología, contenido de agua en el suelo, clase de capacidad de tierras.
Talud ascendente	Pendiente promedio del área de talud ascendente	Velocidad de escurrimiento
Pendiente de zona de captación	Pendiente promedio en la captación	Tiempo de concentración
Área de captación	Drenaje de área a la salida de captación	Volumen de escurrimiento
Área de zona de captación específica	Área de talud ascendente por ancho unitario de contorno	Volumen de escurrimiento, tasa estacionaria de escurrimiento, características de suelos, contenido suelo-agua, geomorfología
Longitud de captación	Distancia desde el punto más elevado a la salida	Atenuación del flujo de desborde
Longitud de trayectoria de flujo	Distancia máxima del flujo de agua a un punto en la captación	Tasas de erosión, producción de sedimentos, tiempo de concentración
Longitud de talud ascendente	Longitud promedio de trayectorias de flujo a un punto de captación	Aceleración del flujo, tasas de erosión
Curvatura del perfil	Curvatura del perfil de talud	Aceleración de flujo, tasa de erosión/sedimentación, geomorfología
Curvatura de planta	Curvatura de contorno	Flujo convergente/divergente, contenido suelo-agua, características de suelos
Curvatura tangencial	Curvatura en planta multiplicada por pendiente	Provee medidas alternativas de convergencia y divergencia de flujo local

que P_g es esencialmente constante y q es asumido frecuentemente como proporcional a A_s . En algunas investigaciones se han usado variaciones de este índice para predecir la localización de surcos ocasionales (op. cit. Wilson y Gallant, 2000).

Un segundo índice compuesto fue derivado por Moore y Burch (1986), a partir de la teoría de la capacidad de corriente unitaria y una variante usada en lugar del factor longitud-pendiente en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE, por sus siglas en inglés) para longitudes de pendiente menores que 100m y ángulos de talud menores a 14° como sigue:

$$LS = (m + 1) \left(\frac{As}{22,13} \right)^m (\text{sen}\beta / 0,0896)^n$$

donde,

$$\begin{array}{lcl} m & = & 0,4 \\ n & = & 1,3 \end{array}$$

Autores opinan que, ambas ecuaciones son funciones no lineales de la pendiente y la descarga específica. Este nuevo índice calcula una capacidad de transporte de sedimentos espacialmente distribuida y puede ser ajustada más adecuadamente a las evaluaciones de erosión en el paisaje que la ecuación empírica original debido a que ésta da cuenta explícitamente por el flujo convergente y divergente (op. cit. Wilson y Gallant, 2000).

Otro índice de la capacidad de transporte de sedimentos basado en el terreno puede ser usado para erosión neta y áreas netas de sedimentación (deposición):

$$\Delta T_{cj} = \phi A_{sj}^m (\text{sen}\beta_{j^-})^n - A_{sj}^m (\text{sen}\beta_j)^n$$

donde,

$$\begin{array}{lcl} \phi & & \text{constante} \\ j & & \text{salida de celda } j \\ j^- & & \text{entrada de celda } j \end{array}$$

El índice predecirá la erosión en áreas con un incremento en la capacidad de transporte de sedimentos y sedimentación en áreas con una reducción en la capacidad de transporte de sedimentos.

3.4.1. Desde los Sistemas de Información Geográfica

Una experiencia interesante de aplicación, partiendo de un Modelo Digital del Terreno (DEM) y empleando como soporte un Sistema de Información Geográfica (SIG), fue presentado en el caso de la “Metodología para la Cartografía Digital de la Erosión Hídrica del suelo en un sector del Municipio Moa”, por Vallejo y Martínez (2000). En este municipio se encuentra el área industrial de la explotación de los yacimientos lateríticos de níquel de la región y zonas aledañas. El estudio hace referencia a la erosión laminar, empleando unidades geométricas de 25 x 25 metros.

Los autores utilizaron la USLE ($A = R K L S C P$) pero, debido a la escasez de datos pluviométricos para la estimación de la intensidad de precipitación, utilizaron el índice de torrencialidad calculado por ICONA-Intecsa (1988) que establece la correlación entre el índice de erosión pluvial (R) y el índice de agresividad del clima, de Fournier.

Con relación al factor de erosionabilidad, que depende de las propiedades del suelo, especialmente del contenido de materia orgánica (MO), la textura, la estructura y la permeabilidad, fue establecido entre 0,3 y 0,7. Los suelos quedaron clasificados en seis (6) clases, en zona urbana, en suelos pardos (con mayor contenido de materia orgánica) y de tipo ferralítico.

Con relación a las variables L y S, partiendo del MDT, calcularon el valor de la pendiente y su orientación, y a partir de éstos, la longitud del talud en cada píxel.

Por último, los factores C y P, el de cubierta vegetal y uso del uso y el de la práctica de conservación o de cultivo, respectivamente; de C tomaron de las tablas específicas el valor más bajo y el más alto: $C=0,07$ para malezas y arbustos y $C=1$ en suelos removidos por áreas minadas y zonas de cárcavas; de P tomaron el valor más alto ($P=1$), porque no se realizan prácticas de conservación de cultivos en el municipio.

Calcularon la erosión de forma automatizada con el soporte del SIG, usando datos: matriciales (*raster*), que constituyen una red regular de puntos (píxeles), donde cada uno tiene un valor correspondiente a una variable, y vectoriales, que pueden ser representados en forma de puntos, líneas o áreas. Como presentan en la Figura 3.9, aplicaron álgebra de mapas, operadores de distancia y operadores de contexto, para hacer el análisis de capas raster. Y como muestra la Figura 3.11, obtuvieron los mapas de erosión hídrica, producto de la superposición lógica de mapas originales, con un conjunto de categorías específicas.

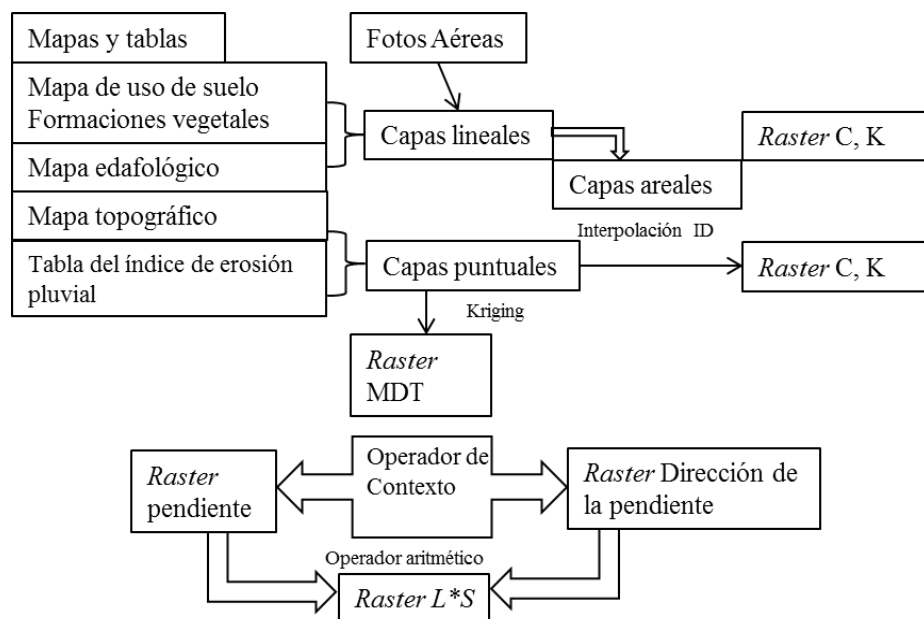


Figura 3.9 Metodología seguida para la obtención de los raster de los factores C, K, R y LS.
Fuente: Tomado de (Vallejo y Martínez (2000)).

3.5. Estado actual de los cálculos en minería

Hasta ahora, en diversos proyectos mineros, para el control de sedimentos se ha aplicado la ecuación referida como USLE (del inglés, *Universal Soil Loss Equation*) elaborada en un principio por Wischmeier (1958) como método cuantitativo para estimar pérdidas de suelo por erosión hídrica. Esto se justifica porque parece ser bastante útil y de fácil comprensión.

No obstante, como será presentado en el capítulo siguiente, en los proyectos mineros a cielo abierto en territorio venezolano se han aplicado éste y otros enfoques en la identificación de las áreas fuente y en la estimación de los aportes de sedimentos para planificar y diseñar las medidas de control.

Es importante profundizar en las estrategias de prevención del arrastre de sedimentos por suspensión hídrica para garantizar la calidad ambiental, coadyuvar en la recuperación del área intervenida por minería, disminuir labores de reperfilamiento de terrenos, mejorar las condiciones para revegetación de áreas denudadas y mantener la calidad de aguas y suelos.

De allí que, es necesario estimular el proceso de concienciación en los operadores mineros, acerca de la necesidad de controlar los sedimentos generados y susceptibles de ser transportados en suspensión hídrica, a lo largo de la trayectoria entre los frentes de extracción mineral hasta los cuerpos naturales de agua, receptores de las cargas de sólidos.

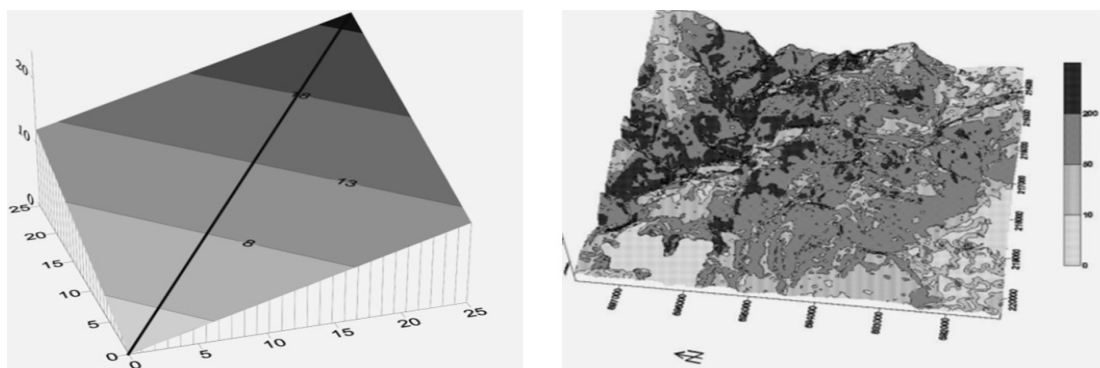


Figura 3.10 Esquema de un píxel del *raster* de la topografía y mapa de erosión hídrica.
Fuente: Tomado de Vallejo y Martínez (2000).

3.6 Otros métodos alternativos: geoestadísticos y estocásticos

Por ser dos (2) campos de variables aleatorias e independientes entre sí, la erosividad de los suelos y la erosionabilidad de las precipitaciones (lluvias), el efecto de la combinación de ambos debería ser analizado con metodologías de análisis más sofisticados, como geoestadísticos y estocásticos. Los primeros se aplican en la evaluación de yacimientos minerales, desde los años sesenta, debido a la combinación de las naturalezas aleatorias de lo geológico y de la concentración mineralógica del mineral de interés económico (ley mineral, también tenor).

En consulta a www.monografias.com/trabajos14/geoestadistica/geoestadistica2.shtml, Cuador Gil (2011) explica que: “En el campo de las geociencias es común encontrar variables distribuidas espacialmente. Para el estudio de estas variables son usados diversos procedimientos geoestadísticos de estimación y/o simulación. Esto es, a partir de un conjunto de muestras tomadas en localizaciones del dominio en que se manifiesta un fenómeno a estudiar y consideradas representativas de su realidad, que por lo general es siempre desconocida, estos procedimientos permiten la descripción o caracterización de las variables con dos fines diferentes, primero, proporcionar valores estimados en localizaciones de interés y segundo, generar valores que en conjunto presenten iguales características de dispersión que los datos originales”.

Con relación a los métodos estocásticos, Artigas y otros (2006) en el artículo “Metodología para estimar el acarreo total de sedimentos en cuencas montañosas”, presentan el desarrollo de una “metodología para estimar la producción total de sedimentos (arrastre suspendido y arrastre de fondo) en cuencas de montaña. Calculan por separado la erosión laminar en las laderas empleando el modelo MUSLE para el acarreo en suspensión, y las ecuaciones de Schoklitsh (determinística) y

Meyer-Peter/Müller (fórmula empírica) para el acarreo de fondo. Aplican estos modelos a hidrogramas de eventos extraordinarios de 10, 25, 50 100 y 500 años de periodo de retorno, para así obtener una relación funcional entre producción de sedimentos por erosión laminar y producción por arrastre de fondo, que permite mediante un modelo continuo lluvia-escorrentía estimar la producción media mensual y anual de sedimentos”.

Artigas y otros (2006), describen que fue Williams (1975), quien fundamentó el desarrollo de los modelos estocásticos, al obtener la distribución de probabilidades de producción de sedimentos; otra contribución fue la distribución de probabilidades de la producción anual de sedimento, partiendo de Mills et al. (1981).

Finalmente, cuando no se tienen registrados los datos de eventos pluviométricos o los estudios de erosividad de los suelos, los modelos estocásticos pueden permitir la simulación de escenarios probables de escurrimiento, erosión y arrastre de sedimentos en suspensión hídrica, aplicando la teoría de probabilidades de ocurrencia.

CAPÍTULO 4.

ANÁLISIS DE RESULTADOS DE INVESTIGACIONES APLICADAS

En este capítulo, se presenta el análisis de resultados de trabajos de investigación aplicada, en atención a la necesidad de estabilizar taludes y controlar sedimentos, desarrollada en minas venezolanas. Se reportan los resultados de aproximaciones metodológicas aplicadas, en cada uno de los casos referidos de proyectos mineros en el país. Como se ha indicado en secciones precedentes, en el territorio nacional han sido realizadas algunas investigaciones aplicadas en la temática de erosión-sedimentación, a través de pasantías industriales y trabajos especiales de grado, en laboreo a cielo abierto. Así los casos, en orden cronológico, de extracción de minerales de hierro, carbón, oro, bauxita, calizas y arenas. Más recientemente, la metodología de investigación está siendo desarrollada en la minería de níquel, aplicando en campo las experiencias alcanzadas a partir de las investigaciones precedentes.

Más adelante, en este trabajo se propone enfocar la atención en las necesidades de modelación conceptual y matemática aplicada a la minería venezolana a cielo abierto. Esta orientación es la resultante de criterios formados en la docencia e investigación en minería general y, en particular, en el ámbito de la protección ambiental en minería. Esto se apoya en los aportes metodológicos de Cruz (2006), como se propone en el capítulo siguiente, que intenta la discusión sobre la relación entre formar en la ingeniería tradicional, con la matemática aplicada como herramienta para resolver los problemas de la ingeniería.

4.1 Resultados de investigación y análisis

En este capítulo, los resultados de investigaciones en proyectos mineros venezolanos se presentan en orden cronológico de los estudios base para este trabajo. En aquella sección, se utilizó la secuencia territorial, en orden alfabético por estado, iniciando con Aragua y terminando con Zulia, sin otra consideración adicional que caracterizar distintas situaciones en los cuales se aplican métodos a cielo abierto para la extracción mineral. Los resultados de investigaciones, en la temática del control de sedimentos, o en temas afines como los de estudios de equilibrio límite, de planificación de cierre de mina y de impacto ambiental, todas en la dimensión geoambiental, que aportan información de utilidad en el proceso físico que ocupa en este trabajo.

Entre 1997 y 2002, los aportes de sedimentos en suspensión hídrica fueron evaluados en el ámbito de la mitigación de impactos ambientales y el diseño de indicadores de gestión en extracción mineral.

2002 resulta un referente cronológico porque ese año fue realizado por la autora el diseño instruccional del curso de control de sedimentos en minería a cielo abierto y se incorporaron contenidos y herramientas analíticas en la línea de investigación en minería y ambiente.

4.1.1 Estudios entre 1997 y 2002

En el Departamento de Minas, los diseños para el manejo de aguas de mina y control de erosión estuvieron fundamentalmente inspirados en la producción mineral. A partir de la aprobación de la asignatura Minería y Ambiente, en 1995, en la unidad docente de Minería General, estos estudios responden además a la conservación ambiental en minería. Los trabajos especiales de grado se iniciaron con el de L. Bolívar (1997) titulado: “Medidas de prevención/mitigación del impacto ambiental producido por: drenaje ácido, emisión de polvo y ruido, en la explotación de carbón, Mina Paso Diablo, estado Zulia”. Esta tesis fue enfocada en la susceptibilidad de alteración de la calidad del agua de los ríos y caños intervenidos, a partir de la formación de sulfatos y disminución del pH (drenaje ácido de mina) por el contenido significativo de sulfuros en el yacimiento carbonífero.

Sin embargo, es con el trabajo de K. Pinilla (1999), “Alternativas para el Manejo y Disposición de Minerales No Conformes en el Cuadrilátero Ferrífero de San Isidro, estado Bolívar” cuando se inician los trabajos con atención en el manejo de aguas de mina y su relación con la disposición de sólidos susceptibles de ser transportados en suspensión hídrica hacia cuerpos naturales receptores. En la tesis se evaluó la estabilidad de masas, desde el punto de vista del equilibrio límite (de ahora en adelante, MEL por Método del Equilibrio Límite) estableciendo 45 m como altura máxima y desniveles de 15 m para el depósito, con ángulos de talud de trabajo de 40° y de talud final de 34°, con factor de seguridad de 1,3.

La configuración geométrica demandó un sistema de drenaje para conducción de aguas con un canal colector principal de 1,34 m² como área de sección (A), ancho (b) de 4,46 m y profundidad (h) de 0,72 m, con una estimación de caudal de 267,38 L/s para una intensidad de lluvia de diseño de 175 mm/hr en período de retorno de 10 años. También, el sistema quedó constituido por canales para bermas, con b=1,0 m y h=0,3 m, canales para terrazas con b=2,0 m y h=0,5 m y canales para pie de talud con b=0,7 m y h=0,5 m. Se recomendó revestir los canales contra la erosión con el uso de grava gruesa para garantizar el mantenimiento en buenas condiciones de operatividad.

Con relación a la sedimentación de sólidos se recomendó una laguna de sedimentación (unidad decantadora), con una capacidad de almacenamiento (V) de 964,8 m³ y área de embalse (A) de 1.072

m², estimados con una velocidad de sedimentación de 0,25 cm/s. El diseño del embalse debería cumplir con un requisito de eficiencia de sedimentación de 50 %. Las dimensiones fueron recomendadas con a=10 m, l=52 m y p=3 m.

La metodología de investigación fue fundamentalmente analítica y consistió en aplicar la Fórmula Racional, también conocido como el Método Racional (en adelante MR) y la Ley de Distribución de Gumbel (en adelante Método de Gumbel, MG) para el cálculo de caudales y velocidades para el diseño. Adicionalmente, la Ley de Stokes (en adelante, LS) para la velocidad de caída de sedimentos y el dimensionamiento de la obra de decantación y sedimentación.

En el caso del estudio de N. Valdivieso (2001), también se trató del proceso físico de erosión pero esta vez sobre un talud vial con dimensiones y exposición muy restringidas en espacio y tiempo. En espacio, por ser el límite de instalaciones civiles a resguardar, no así los taludes del eje vial. En tiempo, porque fueron recomendadas cubiertas rígidas para recubrimiento, como pantallas y membranas, geotextiles y biomembranas, junto con torrenteras y canales de conducción de aguas, en corona y pie de talud, tanto para estabilización como para protección contra erosión por agentes climáticos. En esta tesis la metodología aplicada fue principalmente la inspección y medición en campo con métodos geofísicos y sondeos exploratorios, el análisis de estabilidad por MEL para el dimensionamiento del ángulo de talud definitivo y la aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelos (en adelante, EUPS) para la estimación del aporte de sólidos en suspensión hídrica.

Como se hizo referencia, en 2002, CVG-Ferrominera del Orinoco solicitó un curso de control de sedimentos en minería a cielo abierto, el cual fue preparado e impartido por la autora en las instalaciones de la empresa en Ciudad Piar. A partir de la preparación e instrucción del curso, en el Departamento de Minas se tomó la decisión de adelantar investigaciones de campo, de laboratorio y en oficina para apoyar en las necesidades del sector extractivo en materia de control de sedimentos como estrategia de conservación ambiental en minería. Ese mismo año, se aprovechó la oportunidad de la investigación sobre indicadores de sustentabilidad en minería aurífera, para que A. Piña (2002) y S. Jaspe (2002) estimaran las pérdidas de suelos en actividades extractivas de pequeña minería aurífera y en extracciones de carbón, respectivamente.

Piña (2002), en el caso de la tesis en metal aurífero, aunque en el área no autorizada de la cuenca baja del río Caroní, mediante extracción hidráulica, obtuvo resultados mediante inspección del laboreo en campo, la estimación de datos de variables y la aplicación de EUPS. Con datos numéricos de 1991 estimó entre 38,2 y 44,2 Tm/Ha-año, por lo que en 2.000 Ha intervenidas el aporte fue de

71.000 Tm/año. Esta estimación la comparó con una investigación de referencia, realizada por Marrero (1996), que reporta entre 76.360 y 88.300 Tm/Ha-año. Además, en la tesis se aplica regresión logarítmica para graficar la curva de concentración de Hg en sedimentos como vehículo para la contaminación. Este resultado representa

En el caso de la tesis de S. Jaspe (2002), la investigación se enfocó en la concentración de sólidos disueltos totales (en adelante, SDT) en los cuerpos de agua de la zona de influencia de la mina de carbón Paso Diablo, en la cuenca del río San Rafael de Guasare, en el estado Zulia. Para ello utilizó datos físicoquímicos de puntos de aforo, monitoreados en el período 1989-1994. El análisis consistió en proyectar la línea de tendencia por el método de mínimos cuadrados, resultando que en 2010, para 7 MT de carbón/año los SDT sería 7.000 mg/l. Asimismo, la proyección de concentración de sulfatos (SO_4^{2-}) sería de 3.500 mg/l para ese año.

Con las investigaciones precedentes fue posible fomentar en la unidad docente de Minería General la incorporación de contenidos, que habiendo sido desarrollados en otras disciplinas científico-técnicas, requerían la valoración necesaria y la aplicación en problemas de erosión y transporte de sedimentos inducidos por la minería. Entre las herramientas fueron incorporadas las observaciones y mediciones directas en campo, las analíticas con datos estadísticos, las analíticas con aproximaciones empíricas de otras áreas del conocimiento y quedaban pendientes las experimentales en campo y laboratorio y los modelos analíticos y gráficos digitales con modelos de elevación.

4.1.2 Estudios entre 2002 y 2017

En 2004, Van Zanten presentó la primera investigación formal en “Diseño de manejo de agua de mina, en el pit Baqueta de la mina Paso Diablo, estado Zulia, como aporte al desarrollo sustentable de la región”. En tesis se enfocó en herramientas clásicas de la ingeniería hidráulica y aplicó los métodos de análisis, como MR y MG, para el diseño de obras hidráulicas para la conducción de agua y la Fórmula de Manning (en adelante, FM) para un dique de sedimentación. También realizó observaciones directas en campo y mediciones en sitio a través de ensayos de permeabilidad tipo Lefranc de flujo variable de descenso en suelos.

Estimó un caudal de $1.726 \text{ m}^3/\text{s}$, para una intensidad de lluvia para diseño de 80 mm/hr, equivalente a $1,55 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$, considerando entre 25 y 30 % de pérdidas por infiltración. Entre las recomendaciones de diseño, propuso cinco (5) canales, con 8 % de pendiente, distribuidos de la siguiente manera:

- ♣ uno (1) en rampa o vía de acarreo Este, con sección trapezoidal de $A=0,9 \text{ m}^2$ y $l=2.545 \text{ m}$
- ♣ dos (2) en rampa de ascenso (vía de acarreo Sur), con sección trapezoidal, en las cotas -90 y -85 msnm, respectivamente, $A_{90}=0,6 \text{ m}^2$ y $l_{90}=2.457 \text{ m}$ y $A_{85}=0,27 \text{ m}^2$ y $l_{85}=2.352 \text{ m}$
- ♣ uno (1) en rampa de descenso (vía de acarreo Sur), cotas 90 a -85 msnm $A=0,27 \text{ m}^2$ y $l_{90}=2.352 \text{ m}$
- ♣ uno (1) en el canal interno de la pared Este, en cota + 48 msnm, $A_{48}=0,9 \text{ m}^2$ y $l_{48}=933 \text{ m}$
- ♣ uno (1) en las paredes Este y Sur, en cota -24 msnm, $A_{24}=1,3 \text{ m}^2$ y $l_{24}=1.583 \text{ m}$

El dique de sedimentación era necesario para drenar una superficie de 598.630 m^2 , con núcleo compactado, impermeable y laderas con material de escollera, con pendientes 2H: 1V. La capacidad de la cubeta de sedimentación es de 337.000 m^3 para un caudal de $9,28 \text{ m}^3/\text{s}$.

Combinando los resultados de los estudios en minería de carbón, en calidad de agua de mina (Jaspe, 2002) y en caudal para diseño de manejo de agua de mina (Van Zanten, 2004), ambas en mina Paso Diablo, se tienen los resultados 7.000 mg/l de SDT y $9,28 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente. Suponiendo todos los sólidos como carbón para una densidad de $1,2 \text{ ton/m}^3$ se realizan los cálculos y se obtienen $2.338 \text{ m}^3/\text{mes}$ de aportes de sedimentos de carbón a cauces naturales, de no ser retenidos con el dique.

En 2004, se obtuvo financiamiento por el Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CDCH) para proyectos individuales que permitieron estimar los aportes de sedimentos por minería en casos de pequeña minería aurífera a cielo abierto. Se plantearon los casos de los proyectos mineros Bizkaitarra, (km 88 de la Troncal 10) y Hoja de Lata (próximo a San José de Anacoco), en el estado Bolívar.

Uno de los trabajos con mayor desafío metodológico para obtener datos de extracción mineral, debido a la aplicación del método de barrido hidráulico y la posibilidad de establecer la relación con la generación de sedimentos, consistió en la pasantía industrial de J. Matheus (2004). Durante dos (2) meses continuos, los miembros de la Cooperativa de Pequeña Minería en la Parcela 21, de la concesión Bizkaitarra, sector Las Claritas, le permitieron la creación de conocimientos técnicos mineros y ambientales en una extensión autorizada de 10 Ha, al margen de la quebrada Manaca, tributaria de quebrada Sofía, tributaria del río Amarillo, afluente del río Cuyuní.

Entre septiembre y octubre de 2004, con el apoyo administrativo y técnico de la Inspectoría Técnica Regional Minera en Las Claritas, adscrita al Ministerio del Poder Popular para Energía y Minas (hoy

Petróleo y Minería), el Instituto Nacional de Geología y Minería (INGEOMIN), la operadora minera Brisas del Cuyuní, Matheus (2004) levantó en campo información topográfica, cartográfica, hidrológica, de producción mineral y de calidad de aguas. A partir de estos datos volumétricos de suelos excavados y de oro, en un período determinado de tiempo, estableció las relaciones de producción horaria de sedimentos y la producción de oro. Aplicó el análisis directo de balance de masa para llegar a la conclusión siguiente: “El aporte de sedimentos por la Parcela IC-20 (T12 – T11) corresponde a 0,8 mg/l de sólidos suspendidos totales (SST) y de 0,4 mg/l de sólidos disueltos totales (SDT), valores que se encuentran dentro de los parámetros de descarga permitidos por la legislación ambiental (Decreto 883)”.

Más adelante, “El aporte de sedimentos de la concesión de Bizkaitarra está cerca del límite permitido de descarga (80 mg/l) según los resultados obtenidos para la muestra tomada en la quebrada Sofía (T13), esto se debe principalmente al factor de acumulación y de concentración de las actividades mineras de todas las parcelas en explotación; y principalmente a que algunos mineros descargan el “Tame” en los cuerpos de agua con el objeto de represar o desviar el curso natural de las quebradas, ocasionando algunas veces que las quebradas desaparezcan o se sequen”. (...) “Los valores de SDT, tanto para la quebrada Amarilla como para el río Cuyuní, se mantuvieron dentro de la tasa de descarga aceptable, con excepción del año 1997 cuando se eleva a 84mg/l para la quebrada Amarilla”.

Finalmente, “Es necesario destacar que la concesión Bizkaitarra no ha presentado, hasta el momento de este estudio, aportes significativos a las variaciones de SDT, pH o Hg en las fuentes hídricas del río Cuyuní, ya que las afectaciones generadas por las actividades de pequeña minería se mantienen dentro de zonas aledañas a Bizkaitarra, aun así el desarrollo de actividades sin control podría incrementar el área de influencia de estas actividades hasta llegar a afectar la cuenca”.

Por otra parte, la distribución granulométrica de las partículas es 80, % de gruesos, 13,5 % de finos y 5,8 % de coloide. En un mes de extracción de oro se produjeron 2.602,3 m³ de suelos, con lo cual se descargaron 2.099,6 m³ de gruesos, 350,8 m³ de finos y 151,7 m³ de coloides.

El otro trabajo en pequeña minería aurífera fue desarrollado en la tesis de S. La Barbera (2005), quien realizó observaciones directas en campo del laboreo subterráneo y del procesamiento mineral en superficie, de la recolección de muestras con tamaño de arena fina de las pilas de almacenamiento. En laboratorio y oficina, realizó análisis granulométricos, determinación de pH, SDT y contenido de Hg. Es importante señalar que, la descarga de sedimentos del molino en las

tanquillas o “lagunas de sedimentación” son cargadas manualmente con el uso de palas, permaneciendo expuestas durante prolongados períodos de tiempo, permitiendo el transporte de los sólidos desde las pilas de almacenamiento a las quebradas.

En minería de veta aurífera, los resultados granulométricos mostraron marcada homogeneidad de las partículas y bajo contenido de mercurio, el volumen de sedimentos fue significativamente menor, con 141,6 ton/mes, equivalente a 53,2 m³/mes, suponiendo 2,65 gr/cm³ como densidad del mineral y ley o tenor de Au poco significativo. En cuatro (4) muestras analizadas, resultaron distribuciones de 10 % de arena media, 72% de arena fina y 18% de finos. Para ocho (8) muestras se obtuvieron resultados de pH entre 4,2 y 6,5; de SDT entre 50 y 167 mg/l y, de Hg entre 0,43 y 3,6 mcg/l, con dos muestras sin valores detectables. El peso específico fue de 2,65 y los finos no presentaron plasticidad alguna. Por otra parte, la arena fina presentó ángulo de fricción interna de 39°, a partir de un ensayo de corte directo realizado en una muestra de suelo perturbada.

Comparativamente, la pequeña minería aurífera evaluada en los trabajos de Piña (2002), Matheus (2004) y La Barbera (2005) muestran valores de aportes de sedimentos en 5.916, 2.602,3 y 53,2 m³/mes, respectivamente, atendiendo a los métodos mineros de barrido hidráulico-molienda-tame con amalgamación, en los dos primeros casos y arranque en veta-ripado-molienda-plancha amalgamadora, en el último caso. Todas las técnicas terminan en la separación de la amalgama con el calor de una flama en una retorta o con soplete.

En las canteras de calizas y arcillas de Puerto Cumarebo, Maiolino (2004), aplicó el MR y LS para el dimensionamiento de obras hidráulicas y control de sedimentos. Los resultados obtenidos en su investigación, aplicando la Fórmula Racional y la Ley de Gumbel para el diseño, muestran que para intensidad de lluvia de 3,75 mm/h, coeficiente de escorrentía de 0,58 y caudal de diseño de 0,17 m³/s (170 lps) la velocidad de flujo es 1,2 m/s. Con este valor de velocidad, se seleccionó una sección triangular, con altura de 0,2 m y 1,5 m de ancho, para cunetas de drenaje en ambas minas.

En 2007, Méndez aplica una combinación de métodos analíticos y de modelo digital de terreno, para desarrollar un Programa Informático Minero (PIM). En lo analítico, utilizó USLE para pérdida de suelos, MR y MG para estimaciones de intensidad de lluvia y caudal de diseño y LS para el dimensionamiento de las obras hidráulicas. Por otra parte, aplicó *Autodesk Land Desktop®*, el manejador de base de datos conocido como *Microsoft Excel®* y el lenguaje de programación conocido como *Delphi 7.0®*, con el fin de simplificar los modelos matemáticos y alcanzar el Modelo Digital del Terreno (MDT). Entre las características más importantes de este MDT se encuentra la

actualización automática de la línea base de sección, el trazado de secciones de superficies diversas y la utilización de cartografía temática para crear mapas de pendientes e hipsométricos.

En la metodología, digitalizó el mapa resultante del levantamiento topográfico del área de estudio, Bloque “Minero” 3 Sector 4 (B3S4), en mina Los Pijigüaos, muestreó los suelos y realizó los análisis físicos y químicos en laboratorio de la Universidad de Oriente (UDO): granulometría, densidad, permeabilidad, plasticidad, pH, temperatura, turbidez, dureza total y sólidos totales. Los datos climatológicos los ponderó de tres (3) estaciones de medición: caño Pijigüao, Mina y Aeropuerto. Los resultados obtenidos indican suelos de moderada a rápida permeabilidad, con contenidos entre 63,4 y 72,6% de arena, 6,5 y 11,3% de limo y 20,8 a 25,2% de arcilla, para resultar en suelos con textura de arena franco-arcillosa.

En lo climatológico, para un período de retorno de cinco (5) años, la intensidad de lluvia fue de 17,3 mm/hr, obteniendo un caudal de diseño de 36.456,6 m³/s. Los aportes de sedimentos a lagunas de sedimentación resultaron en 1.470 ton/Ha*año, 896 m³/Ha*año, lo cual en 40,3 Ha de superficie del B3S4, resulta en 3.009 m³/mes, valor éste intermedio entre los aportados en la pequeña minería aurífera con barrido hidráulico y superior al aporte de carbón en mina Paso Diablo, de 2.338 m³/mes.

Continuando, con otro caso de mineral no metálico de la Formación Antímamo, en la cantera Nacional, se analizó la extracción de mármoles (85-95 % CaCO₃) y cantidades menores de cuarzo detrítico, muscovita (2,5 %), grafito (2,5 %) y pirita (90 %), también con presencia de anfibolita. En ésta se comercializa piedra picada # 1 y ¾, arrocillo y polvillo de la planta de trituración N°2. En esta misma cantera, Delgado (2007), durante la pasantía industrial, realizó el diseño de un sistema de drenaje de aguas de escorrentía superficial y un sistema de bombeo de aguas de la laguna del sector mina N°1, aplicando los métodos MG y MR, con valores en el período 1989-1999 (10 años) y determinando un caudal de 0,61 m³/s, para una intensidad de precipitación de 28,4 mm/hr, sobre una extensión de 0,12 Km² y coeficiente de escorrentía de 0,65. Para la canalización con sección en V, determinó una velocidad de 3,58 m/s, considerando una velocidad máxima en roca de 2,40 m/s, para el diseño de las secciones de los canales triangulares.

Por su parte, en la misma cantera Nacional, en Antímamo, Escalante (2009) durante la pasantía industrial en planta de lavado N° 3, aplicó una metodología de investigación con análisis de laboratorio, de mucha utilidad para el control de sedimentos, aportando el rango granulométrico, primordialmente con 22,7 % de sólidos en suspensión con tamaño limo (0,05mm) y 1,05 gr/cm³ de densidad del mineral. Determinó la viscosidad del fluido en 0,00897 (baja), a 25°C y densidad 1,01

gr/cm³. Del análisis mediante LS, obtuvo 0,023 m/s² de velocidad de sedimentación, con número de Reynolds de 0,127774921. Aun cuando no determinó volúmenes de sólidos suspendidos a la quebrada Mamera, los resultados le permitieron recomendar el uso de agentes floculantes para acelerar la decantación de las partículas en el proceso de lavado de la arena que se comercializa, a partir de esquisto cuarzo-muscovítico-grafitoso, también presente en la Formación Antímamo.

Ambos estudios permiten establecer que, si el caudal es 0,61 m³/s de escorrentía, con 22,7 % de limo en suspensión, sobre una producción anual de arena de 65.000 m³, resulta una estimación de 5.981,9 m³/mes de limo en suspensión hídrica.

Recapitulando, se han estimado a *grosso modo* valores de aportes de sedimentos, en extracción a cielo abierto para minerales metálicos: bauxita con 3.000 m³/mes, y oro por pequeña minería, desde 50 hasta 5.900 m³/mes, variabilidad que resulta de las metodologías de extracción mineral; en no metálicos, carbón con 2.300 m³/mes y en arena lavada 5.981,9 m³/mes de limo en suspensión hídrica.

En cuanto al mineral de hierro, es posible integrar los resultados respectivos y estimar aportes de sedimentos a las quebradas Arasiama y Mereicito combinando los trabajos de Pinilla (1999), Piña (2002) y Blanco (2007) en las operaciones de CVG FMO, C.A., en el CFSI (Cuadrilátero Ferrífero de San Isidro). La aproximación a la pérdida de suelos se obtiene de la aplicación de la metodología EUPS realizada por Piña (2002) quien aplicó los resultados del estudio de Pinilla (1999), en cuanto a lluvia de diseño, Idiseño = 175 mm/hr, y estimó:

I30 = 59 mm/hr	E = 27,8 Kg.m/Ha-mm	R=9,37 Kg.m/Ha-mm
K= 0,35	LS = 2,6	C = 1
P = 0,16		

Se obtuvieron pérdidas en A = 3,09 toneladas métricas por hectárea por año (Ton-m/Ha-año). Tomando la extensión de 11 Ha en el sector noreste del cerro Los Barrancos II (medido en plano de mina por Pinilla) se tiene una pérdida de 34 Ton-m/año en ese sector de la mina. Considerando la extensión del CFSI en 1.560 Ha (Ministerio de Minas e Hidrocarburos, 1962) y el peso específico promedio de 3,5 Ton/m³ (materiales de bajo tenor, 3 Ton/m³ y materiales de alto tenor, 4 Ton/m³) reportados por la operadora minera, se estiman 113,5 m³/mes, advirtiendo que este valor representa un potencial estimado toda vez que el cerro San Joaquín aun no se encuentra en operación dentro del CFSI.

Es importante señalar que aun cuando el valor de 113,5 m³/mes resulta particularmente bajo con relación a los rubros minerales estimados en párrafos precedentes, no obstante, el predominio del

tamaño limo arenoso y arena fina limosa, a partir de los ensayos granulométricos reportados en los cerros (Blanco, 2007), implica un potencial de mayor velocidad de arrastre de partículas por las laderas de estos cerros del CFSI, según el Diagrama de Hjulström (DH), particularmente porque son minerales altamente friccionantes, como son las limaduras de hierro.

En el caso de la cantera de caliza El Melero, estado Miranda, Delgado (2011), como plan de cierre progresivo de mina, se adoptó el diseño de estabilidad de taludes establecido en el plan de explotación (Lafarge, 2006), el cual consistió en: ángulo de talud final (β) de 76° ; ángulo de trabajo (α) de 45° ; banco de 10 m y 7,5 m como ancho de berma de estabilización y seguridad. Esa altura del banco fue determinada por el alcance de los equipos de carga y por condiciones de seguridad en la explotación. Para la conducción de aguas de mina, se aplicó la Fórmula Racional y la Ley de Gumbel para el diseño, resultando en cunetas triangulares con 0,5 m de profundidad y 1m de ancho promedio, además de canales (zanjas) rectangulares de 0,5 m, ancho por profundidad.

En el caso de la mina Loma de Níquel, la investigación con parcelas de experimentación para medir en sitio la pérdida de suelo, fue iniciada aplicando el “Método de las Chapas” pero, ésta no fue culminada. Más recientemente, la Jefatura de Planificación retomó las mediciones con un nuevo diseño experimental, con el “Método de Clavos”, mediante un nuevo Trabajo Especial de Grado (Cova, J., en desarrollo desde diciembre 2016). Este cambio fue necesario, debido a que son muy elevadas las tasas de desprendimiento y arrastre de partículas, en cada evento lluvioso.

En este estudio más reciente, fue determinada en sitio pérdida de suelo en el orden de 0,5cm cuando la intensidad de lluvia es mayor a 20 mm. “Se puede decir que es la cantidad mínima necesaria de precipitación para transportar $0,08\text{m}^3$ de sedimento de un área de 16m^2 (Bolívar y Cova, comunicación personal)”.

Diversas circunstancias limitan la obtención de producción de sedimentos suspendidos en el resto de las minas referidas en este trabajo, tal como se resume en la Tabla 4.1, debido a que aun teniendo el enfoque en minería y ambiente, las variables determinantes en los cálculos de pérdida de suelos no pueden ser extraídas para el análisis específico de esta investigación.

La Tabla 4.1 presenta la síntesis de las estimaciones obtenidas. En los casos de los estudios técnicos mineros realizados en las canteras de arcillas y caliza, para la elaboración de cemento, El Veral y Mampostal, y El Melero, respectivamente, los resultados obtenidos por los autores permitieron diseñar el drenaje de la mina, como complemento del diseño de vías de acarreo, desde las cintas

transportadoras de mineral hasta la planta de tratamiento minera. Pero, en estos casos, la estimación cuantitativa de las tasas de sedimentos aportados por erosión es muy limitada, por lo cual no se ofrece una cantidad en la tabla 4.1. Sin embargo, es posible inferir que existe inhibición en el desprendimiento en exceso de partículas debido al impacto de las gotas de lluvia en las canteras para extracción de arcillas, por ser la lutita una roca sedimentaria cuya cohesividad es muy alta, como propiedad geomecánica. De la misma manera, en el caso de las rocas calcáreas (calizas), la tasa de desprendimiento de partículas podría estar resultando muy baja a nula, por efecto de la cohesividad muy alta, en este caso como consecuencia de la litología de tipo carbonáticas.

Tabla 4.1. Resultados de las estimaciones realizadas en investigaciones citadas en esta investigación.

Rubro mineral (mina)	Autor(a) de investigación técnica en minería	Volumen estimado de sedimentos (m ³ /mes)
Mineral de hierro, (CFSI)	Pinilla (1999)	965
Mineral aurífero, balsa (bajo Caroní)	Piña (2002)	5.916
Mineral aurífero, barrido hidráulico (Bizkaitarra)	Matheus (2004)	2.602
Mineral aurífero, veta (Hoja de Lata)	La Barbera (2005)	53
Bauxita (Los Pijigüaos)	Méndez (2008)	3.009
Carbón, Paso Diablo	Jaspe (2002), van Zanten (2004)	2.338
Piedra picada (Cantera Nacional)	Delgado (2007); Escalante (2009)	5.982
Mineral de hierro, cerro Los Barrancos	Pinilla (1999); Piña (2002); Blanco (2007)	114
Mineral de níquel (Loma de Níquel)	Nobregas (2012); Cova (2017)	en desarrollo
Cantera de caliza (Mampostal)	Caminero (2001); Maiolino (2004); Barrientos (2007)	n.s.i
Cantera de arcilla (El Veral)	Maiolino (2004); Barrientos (2007)	n.s.i
Cantera de caliza (El Melero)	Delgado (2011)	n.s.i
Arenera Cauagua	Falcón (2007)	n.s.i
Arenera (Nueva Tacagua)	INGEOMIN y otros (2009)	n.s.i

n.s.i.: no se tiene información suficiente.

En el caso del estudio técnico sedimentológico minero, realizado en la arenera en Nueva Tacagua, la producción de sedimentos es de alto volumen para la venta, por ser una operación minera de tipo comercial. Cabe destacar que, en algunas de estas areneras, el aprovechamiento se realiza sobre los tamaños de grava a arena y el sedimento tamaño arcilla no es comercializado, en consecuencia, acumulándose aguas abajo, en el curso fluvial, hasta los explayamientos en las riberas de los cauces. Esto puede dar origen a áreas inundables por presentar bajas pendientes hidráulicas, en áreas de cuenca baja y por tener fondos con espesores de sedimentos impermeables, que restringen la infiltración. Los datos de producción mineral fueron presentados en el capítulo precedente, en la descripción de las operaciones mineras en la arenera sobre el río Tacagua, en el Distrito Capital.

Aunque algunas investigaciones técnicas mineras, recopiladas y presentadas en este trabajo, que han sido realizadas entre 2002 y 2011 en el Departamento de Minas, no tuvieron como objetivo específico la estimación de la producción de sedimentos, no obstante ha sido posible obtener información suficiente para aportar elementos de análisis, con el propósito de modelizar conceptualmente los escenarios para la planificación, diseño y gestión operativa minera, en extracciones a cielo abierto, de diversos rubros minerales, en territorio venezolano.

En el estudio realizado en la mina Loma de Níquel, Cova (2016) midió en campo 10 cm de pérdida de suelos saprolíticos durante el mes de diciembre, en nueve (9) eventos de lluvia, con intensidades entre 3 y 27mm/día. Las mediciones las realizó en terreno sin vegetación y con una inclinación entre 5° y 35°, debido que en lugares donde la pendiente es menor de 5°, la pérdida de suelo se genera muy lentamente o es despreciable. Pudo observar que la pérdida de suelo (0,5cm) se genera cuando la intensidad de lluvia es mayor a 20 mm, pudiendo deducir que es ésta la cantidad mínima necesaria de precipitación para transportar 0,08m³ de sedimento de un área de 16m².

Finalmente, es conveniente referir el caso de la pasantía industrial realizada por la Bachiller Ana Frías (agosto, 2016) en la cantera de dolomita, Puerto Cabello, estado Carabobo, en cuya fase de investigación estimó una producción de sedimentos en el orden de

En la sección siguiente, se describen las recomendaciones de diseño de obras hidráulicas y aplicaciones de materiales como insumos, tanto minerales como orgánicos, para la estabilización de masas granulares, conducción de aguas de mina y retención de sólidos en suspensión, respectivamente.

4.2 Prácticas y técnicas para el control de sedimentos

En la minería a cielo abierto, son numerosas y diversas las prácticas y técnicas aplicadas con fines de control de sedimentos en suspensión hídrica, partiendo con prácticas de estabilización de masas granulares, de conducción hidráulica de aguas de escorrentía, con instalación de dispositivos y materiales para retención de sólidos y con prácticas agroecológicas, para la recuperación de áreas intervenidas, que garanticen la recreación del sustrato edafológico para la revegetación.

La práctica inicial, que en la Ingeniería de Minas ha sido condición necesaria, es el análisis de la estabilidad de los taludes en suelos y rocas, con metodologías de análisis comprobados, durante años, de aplicaciones en numerosos y diversos proyectos mineros y viales, desarrollados en el territorio nacional y en muchos países, en general.

Otra práctica sencilla consiste en la canalización de las aguas de escurrimiento (escorrentía), a ambos lados de las vías de acarreo, para garantizar que los neumáticos de equipos mineros puedan rodar y no deslizarse sobre las rasantes, bien sea éstas friccionantes o cohesivas, o mixtas. Asimismo, es práctica común la conducción de aguas en ambos extremos laterales de los taludes, con la finalidad de evitar que los frentes de arranque sean erosionados, perdiendo materiales de utilidad, y produciendo surcos y cárcavas que pudieran inducir movimientos de masas.

4.2.1 Estabilización de taludes en suelos y rocas

Desde el punto de vista estrictamente geotécnico, se requiere que tanto en las masas granulares resultantes in situ como en aquellas dispuestas en escombreras, se garantice el equilibrio límite y en consecuencia se prevengan las grietas de tracción y el subsiguiente deslizamiento por falla circular, planar o en cuña. Ya esta aplicación geotécnica se considera de naturaleza geoambiental porque inhibe el aporte de materiales granulares, gruesos a finos, susceptibles de ser transportados por el agua, al tiempo de los eventos pluviométricos.

Como se presenta en la literatura geotécnica y, más recientemente, en la de recuperación de áreas intervenidas por minería, las obras de estabilización deben ser diseñadas con el análisis adecuado y excavación posterior de frentes mineros, pilas de almacenamiento y escombreras, en el ángulo de talud de trabajo y talud final. Profundizando en la complejidad de la solución geotécnica, en función del nuevo uso que se le dará al sitio de extracción mineral, durante y antes que cesen las operaciones mineras, la estabilidad podrá ser garantizada con la instalación de elementos, que aumentan el factor de seguridad, tales como, fajas, geo y bio textiles, retentores y prefabricados; estos últimos incluyen los muros de gravedad conocidos como sacocretos y sacos con arena. Otros elementos estructurales como: gaviones y muros en pie de talud pueden ser evaluados en función de los costos.

Comparativamente, en el caso de diseño de taludes, en frentes de arranque mineral, se tienen los casos del Cuadrilátero Ferrífero de San Isidro, donde Pinilla (1999) ofrece el diseño geométrico y, en mina Loma de Níquel, Ochoa y Reyes (2012) recomiendan una optimización en el diseño original, como se presenta en la Tabla 4.2. Cabe destacar que, en la minería en ladera en estas menas metálicas, se tiene la variación importante en altura de banco entre la mena de hierro y la mena de níquel, siendo mayor en la primera mina. No obstante, el talud de trabajo en hierro es mucho menor que en níquel, debido a las litologías deleznales y disgregables que producen importantes volúmenes de sedimentos.

Tabla 4.2. Comparación en diseño geométrico de minas, para control de movimientos de masa.

Mineral	Altura de banco (m)	Talud de trabajo (°)	Talud final (°)	Factor de Seguridad
Mena de hierro	15	40°	34°	1,3
Mena de níquel	10	70°	35°	1,2
Caliza (El Melero)	10	76°	45°	Nsd

A diferencia de los taludes finales en las minas con menas metálicas, los cuales son más bajos, en el caso de la cantera con roca caliza (no metálica), en El Melero, para la cual la altura de banco es de 10m, con mayores ángulos de talud de trabajo y final, porque la roca es masiva, no deleznable que permite, combinar las necesidades desde el análisis del equilibrio límite con las del proceso de erosión-sedimentación.

Estas variaciones geométricas, tienen implicaciones sensibles en la producción de sedimentos, por lo que el diseño responde a densidades de rocas y minerales y a los ángulos de fricción interna.

4.2.2 Conducción de aguas de mina

Las secciones de los conductores de agua de escurrimiento vienen siendo calculadas con las formulaciones matemáticas descritas en la sección teórica, el Método Racional y el de Gumbel. También, la ley de Stokes aporta en la estimación de las dimensiones de cuencas o lagunas de sedimentación, en función de la granulometría y densidad de las partículas minerales en suspensión hídrica, así como las variables dinámicas, densidad y viscosidad del fluido, como vehículo para el transporte de las partículas.

Las secciones de las obras hidráulicas son variadas, en su forma y recubrimiento, en lo que se refiere a estructuras lineales y en estanques. Éstas pueden ser de sección triangular, trapezoidal o rectangular, en los casos de cunetas, canaletas y canales. También deben garantizar el alojamiento del caudal e inhibir la erosión en el fondo y paredes, evitando el consiguiente arrastre de materiales granulares dentro de la propia obra hidráulica.

En lagunas de sedimentación, pueden ser de sección circular, cuadrada, rectangular o con formas irregulares siguiendo la curvatura y topografía del sitio. Pueden o no tener revestimiento, en caso de tenerlos éste puede consistir de áridos para construcción, como grava gruesa o cantos rodados gruesos, también puede ser materia vegetal como gramíneas, o el concreto pobre que es un poco más. Incluso se dan soluciones con materiales de reciclaje como trozos de caucho embutidos con mortero

de cemento. Las torrenteras o bajantes deben ser recubiertas con el revestimiento de mejor calidad y resistencia.

Como se detalló en la sección anterior, se tiene el caso del Cuadrilátero Ferrífero de San Isidro, para el cual Pinilla (1999) recomendó la excavación de un canal colector principal, canales para bermas, canales para terrazas y canales para pie de talud.

En el caso de la mina de carbón Paso Diablo, en Zulia, Van Zanten (2004) propuso un sistema integral de canalización constituido por cinco (5) canales con sección trapezoidal, en la rampa o vía de acarreo Este, dos (2) en rampa de ascenso (vía de acarreo Sur), uno (1) en rampa de descenso (vía de acarreo Sur), uno (1) en el canal interno de la pared Este y uno (1) en las paredes Este y Sur.

Maiolino (2004) y Barrientos (2004), diseñaron la sección triangular para canales de drenaje de las canteras de caliza y arcilla, en Puerto Cumarebo, como muestra la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Comparación entre recomendaciones de diseño de obras hidráulicas en minas.

Mina	Rubro mineral	Obra hidráulica	Área de sección (m ²)
El Veral	Arcilla	Canal, en vía de acarreo	As=0,52
Los Pijigüaos	Bauxita	Canal, Bloque B3S4	As=15,99
Mampostal	Caliza	Canal, en vía de acarreo	As=0,35
Paso Diablo	Carbón	Canal interno, en pared Este	As=0,90
CFSI	Mena de hierro	Canal, en pie de talud	As=3,20

Se observa que el valor en la mina Los Pijigüaos es muy distante del resto de los casos de minas metálicas y no metálicas, por lo cual no se usa esta información para efectos de comparación de valores estimados. Más bien, en las minas con extracción de mineral de hierro, en el CFSI, se requieren mayores dimensiones de las obras hidráulicas, de lo cual se deduce que el potencial de transporte de sólidos es superior en la extracción de mineral de hierro, que en la de carbón y que en la minería no metálica, de arcillas y calizas. Es importante aclarar que, en estos últimos casos de minerales arcillosos y carbonáticos, para caudales similares, $Q=0,31 \text{ m}^3/\text{s}$ (caliza) y $Q=0,33 \text{ m}^3/\text{s}$ (arcilla) resultan áreas de sección distintas, $As=0,13 \text{ m}^2$ y $As=0,27 \text{ m}^2$, respectivamente.

4.2.3 Contención y retención de sólidos en suspensión

Las medidas que permiten contener sólidos están relacionadas con recipientes excavados en suelos y rocas, revestidos con materiales impermeables para evitar la erosión interna y un aporte adicional de sedimentos, tales como los casos de sumideros, cuencas de decantación (desarenadores) y lagunas de

sedimentación (sedimentadores), también conocidas como “balsas”, en función de la granulometría de los sólidos transportados. Las medidas de retención están relacionadas con: drenes, subdrenes, textiles geotécnicos, biomallas, fajinas y revegetación con gramíneas. En los casos de las minas evaluadas en este estudio, se reconocen propuestas que incluyen ambas medidas, de contención y de retención de sólidos.

Blanco (2007) ofrece un resumen con las prácticas más usuales, como se muestra en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Resumen prácticas de control de sedimentos (Blanco, 2007).

Material	Tipo	Características
Los geosintéticos (son fabricados con polímeros y se colocan en contacto con el suelo)	Geomembranas	Capas delgadas de caucho o materiales plásticos, utilizados principalmente como impermeabilizantes.
	Geotextiles	Textiles permeables o redes de plásticos, utilizados como separadores de capas de suelo, como refuerzo o como filtro. Son poco resistente al sol. Su durabilidad a largo plazo es desconocida.
	Geomallas	Son mallas con orificios de gran tamaño, utilizados como refuerzo de suelo, pero, también se les usa como separadores entre capas de materiales gruesos.
	Geocompuestos	Son combinaciones de geomembranas, geotextiles y geomallas.
	Mantos (<i>Synthetic erosion control blankets</i>)	Textiles fabricados con fibras y filamentos sintéticos estabilizados contra la acción de los rayos ultravioleta.
	Esterillas tridimensionales (<i>Turf reinforcement mats</i>)	Son esterillas de alta resistencia, flexibles, con una matriz dimensional de nylon, polietileno, polipropileno o PVC. Son resistentes a altas velocidades y están recomendadas para recubrimiento de canales.
	Matriz de hilos	Material de alta resistencia permeable y flexible que se utiliza para construir muros de contención y revestimientos.
Los textiles orgánicos (son fabricados con fibras como fique, yute o coco)	Fibras sintéticas sostenidas por un pegante	Es una capa de fibras sintéticas, colocadas con aire comprimido y después de extendidas se les coloca pegante. El resultado es una capa sobre la cual luego se puede establecer vegetación.
	Tejidos orgánicos	Son de fibra gruesa. Su principal ventaja es la capacidad de absorción de agua. Se pueden utilizar solos, para proteger semillas y facilitar el establecimiento de la vegetación.
Fajinas prefabricadas (son rollos atados de fibras generalmente orgánicas, amarradas con fibras sintéticas u orgánicas)	Mantos orgánicos (<i>Blankets</i>)	Son delgados, fabricados con máquina, utilizando compuestos orgánicos biodegradables (paja, viruta de madera, fique, fibra de coco o combinación de ellas)
	Rollos de paja (<i>Straw rolls</i>)	Son de paja empacada en redes de tejidos plásticos. Se colocan por medio de estacas en los taludes. Su función es capturar y retener los sedimentos y son útiles para estabilización temporal, reduciendo la erosión laminar y en surcos.
	Rollos de fibra de coco (<i>Coir rolls</i>)	Se utilizan para controlar la erosión en surcos y cárcavas, en taludes y para la formación de raíces en obras de bioingeniería. Su alta resistencia permite en algunos casos reemplazar los enrocados.

Material	Tipo	Características
Barreras de sedimentos	Bolsas de arena	Son bolsas de geotextil rellenas con arena. Se utilizan para retener sedimentos o para la contención de agua.
	Barreras de geotextil (<i>silt fences</i>)	Son barreras temporales de sedimentos construidas con barreras permeables. Se colocan interceptando los flujos concentrados efímeros de agua.
	Otras barreras prefabricadas	Tubos sintéticos, camisas porosas, bolsas de filtros, tanques sedimentadores o filtrantes.
Los filtros granulares	El material de filtro es un material natural o sintético que debe cumplir con la condición de prevenir la migración de las partículas de un suelo que se debe proteger y al mismo tiempo permitir el paso de agua.	
<i>Mulching</i> y protectores de la vegetación	El <i>mulching</i> es un material o capa de paja u otro material que se utiliza para proteger las semillas o la vegetación durante el proceso de germinación. No es recomendado en suelos arenosos de erosividad alta, en pendientes muy altas (superior a 2, 5H:1V) en áreas de intensidad muy fuerte de las lluvias.	
Barreras vivas Sistemas vetiver u otro	El sistema se basa en el uso de plantas vivas de vetiver (<i>Chrysopogon zizanioides</i>), gramínea perenne de la Poaceae, nativa de la India, que puede crecer hasta 1,5 m de altura y forma mazos. Las raíces pueden profundizar entre 2 y 4 m. En la bioingeniería ha resultado una alternativa a las obras civiles convencionales para la protección de taludes en carreteras, lagunas, terraplenes y canales, tanto por su alta eficiencia, como por sus costos reducidos en comparación con otras prácticas.	

En la mina Paso Diablo, Van Zanten (2004) recomienda un dique de sedimentación para generar una cubeta de sedimentación de 337.000 m³ y drenar una superficie de 598.630 m². El dique tiene núcleo compactado, impermeable y, laderas con material de escollera, con pendientes 2H: 1V. Por otra parte, el dimensionamiento de la balsa es mayor que en el caso del mineral de hierro, a diferencia del resultado en el caso de las secciones de canales. Esto es debido al tamaño de la cuenca hídrica que aporta volúmenes de agua de escurrimiento.

En el caso del Cuadrilátero Ferrífero de San Isidro, Pinilla (1999) recomienda una laguna de sedimentación (llamada unidad decantadora), con una capacidad de almacenamiento (V) de 964,8 m³ y área de embalse (A) de 1.072 m² que permita el almacenamiento de los residuos sólidos en suspensión hídrica, para cada uno de los cerros en estado operativo.

En el caso de la bauxita, para mina Los Pijigüaos, Méndez (2008) recomendó dos (2) propuestas para la laguna de sedimentación; en el primer caso, dimensionó dos (2) de 18.810 y 6.079 m² de área, respectivamente y, una laguna de 36.737 m², cambiando la ubicación de éstas.

Al respecto de esta práctica de retención de sólidos suspendidos, en el caso de extracción de placeres con mena aurífera, con uso de barrido hidráulico y tame concentrador con mercurio, es muy interesante el estudio experimental de Matheus (2004) y desafiante el control de sedimentos mercuriales. Las dimensiones de los canales son como sigue:

- profundidad entre 50 cm (mínima) y 80 cm (máxima)

- ancho entre 45 cm (mínimo) y 135 cm (máximo), respectivamente.

Los elementos filtrantes en el interior de los canales, constituidos por ocho (8) sacos de fibra vegetal, de 50 cm de largo, dispuestos en tres (3) hileras, en forma de drenes de tipo francés, como ductos cilíndricos de 0,45 m de diámetro, con longitud total variable, por la distancia entre la descarga de lodos hasta el receptor final de la descarga.

Los drenes, rellenos con mezclas de minerales (canto rodado) y materia orgánica (hojas y fibras de la zona de estudio) deben ser instalados a partir del sumidero, excavado al pie del tame concentrador, para que a la vez que conducen el agua vertida retengan los sólidos en el interior del geodren.

Cabe resaltar que, en un trabajo reciente, en el estado Carabobo, Frías (2017) siguió la metodología presentada en este trabajo. Para esto, desarrolló el procedimiento siguiente:

- delimitó la poligonal del derecho minero dentro de la cuenca, con cobertura de 14,47 hectáreas;
- estimó una precipitación máxima para 24 horas, con un período de retorno de 10 años, de 117,7484 mm según mapa del Instituto Nacional de Hidrología e Hidrometeorología (INAMEH);
- determinó las pendientes de las principales vías de acarreo, el estado actual de la cubierta vegetal, la textura del suelo y las prácticas de conservación de la zona (en campo y analíticamente), extrapoló valores y obtuvo un coeficiente de escorrentía igual a 0,38;
- asumió la clasificación del suelo como grava mal graduada, con diámetro de partícula aproximada de 4,76 mm, con peso específico 2,77;
- calculó la velocidad constante alcanzada, cuando la partícula logra equilibrar la fuerza de gravedad y la fuerza de empuje del agua, en 0,196 cm/s;
- determinó un volumen de agua de 6.433,362 m³ y un caudal de 0,241 m³/s;
- calculó el requerimiento de una laguna de sedimentación con área de 122, 95 m² y una profundidad teórica 52,32 m;
- estableció la profundidad óptima, acorde con las capacidades de equipos mineros, hasta 6 m (asumiendo retroexcavadoras CAT 330L y CAT 350);
- recalculó el área teórica de la laguna y obtuvo un valor práctico de 1.072,22 m².

En el capítulo siguiente, se presenta una propuesta de conceptualización del proceso de generación-difusión-disposición de sedimentos en suspensión hídrica, o partículas suspendidas en medio hídrico, y escenarios de difusión de sedimentos en función de la configuración geométrica de las minas evaluadas.

CAPÍTULO 5.

PROPUESTA METODOLÓGICA

PARA ANÁLISIS, PLANIFICACIÓN Y DISEÑO

En la primera sección de este capítulo, se propone la integración de los métodos de experimentación, en campo y laboratorio, con los métodos de estimación analítica, numérica y gráfica y con los de posicionamiento terrestre, desarrollados en los campos de estudio geofísico, hidráulico, edafológico y geográfico. En minería a cielo abierto, no se cuenta con un desarrollo analítico original, pero, puede resultar suficiente integrar las herramientas desarrolladas en otras ramas de la ingeniería, dentro del modelo de elevación digital del terreno, permitiendo asignar los atributos: propiedades geofísicas de rocas y suelos y diseño geométrico minero, del terreno intervenido por la minería, bajo las condiciones climatológicas del lugar caracterizado por las precipitaciones y el consecuente escurrimiento.

En la segunda sección, se propone una conceptualización del proceso erosión-sedimentación, con escenarios de generación-difusión-disposición, aplicada al control de sedimentos en minería a cielo abierto. Este enfoque parte de la necesidad de progresar hacia la planificación estratégica, de largo plazo, a partir de la planificación operativa, de corto plazo, con la finalidad de facilitar el desarrollo de un procedimiento para el análisis y estimación de sedimentos en suspensión hídrica, con el objeto de planificar y diseñar las medidas de prevención, mitigación y corrección de impactos ambientales, ocasionados durante la gestión operativa minera.

5.1 Integración de herramientas de cálculo y diseño

En cuanto al desarrollo experimental, pueden ser usados en sitio los equipos de medición de sedimentos en transporte, como los equipos nucleares con aplicaciones de isótopos y la inmersión de sensores en corrientes naturales, así como las determinaciones en la reducción de espesores de suelos en parcelas, con el uso de chapas y clavos metálicos. Es fundamental elaborar los planos topográficos del área minera, del relieve original y de las excavaciones progresivas. Con la planificación de largo plazo, aplicando programas de elevación digital es posible visualizar las modificaciones del relieve y los resultados de la dirección y desnivel del declive y por ende, del escurrimiento de las aguas de lluvia.

En cuanto a lo analítico, como fue explicado en las secciones teóricas (capítulo 3) y de análisis de resultados (capítulo 4), es importante aplicar los métodos desarrollados en otras ramas de la

ingeniería, de las ciencias básicas y de los sistemas informáticos, una vez que se tiene la información geológico-minera.

Se propone el procedimiento metodológico, a partir de las distintas áreas del conocimiento, según se indica en los pasos siguientes:

- ▲ Ingeniería Geológica-Geotécnica, Ingeniería Geofísica y Estudios Geoquímicos: Con los estudios exploratorios en escala de detalle, es posible elaborar el modelo geológico para la visualización tridimensional del yacimiento y el diseño estable de las masas de suelos y rocas.
- ▲ Ingeniería de Minas: Adopción de decisiones mineras, en las áreas de planificación y diseño de mina, que den respuesta al volumen de la demanda, en el mercado.
 - Planificación de Mina: definición de cambios en el relieve del terreno, de mediano a largo plazo, con la elaboración de planos topográficos.
 - Método de Extracción: Secuencia de avance, con seguridad industrial.
 - Ritmo de Extracción: Velocidad de agotamiento, en función del equipamiento minero.
 - Diseño de Mina: configuración espacial de elementos de mina, en función de los parámetros geotécnicos de suelos y rocas.
- ▲ Ingeniería Hidráulica: Determinación de las variables geográficas e hidrometeorológicas, para la aplicación en las ecuaciones fundamentales.
 - Método Racional y Ecuación de Gunbel, para dimensionar la lluvia de diseño y calcular el caudal de escurrimiento.
 - Ley de Stokes y Diagrama de Hjülstrom, para dimensionar obras de control de sedimentos; proteger paredes y fondo de estructuras con fines de conducción de aguas, y diseñar elementos de retención de sólidos.
- ▲ Ingeniería Agronómica:
 - Ecuación Universal de Pérdida de Suelos, para estimar el volumen de suelos que puede ser perdido, a través de los escurrimientos producidos a partir de las precipitaciones.
 - Planes de Revegetación, para coordinar con los profesionales del área biológica con fines de recuperación ambiental.
- ▲ Informática: Herramientas de Posicionamiento y Elevación Digital, para la visualización gráfica del terreno y las tendencias de los vectores de escurrimiento con los valores absolutos

y relativos de los volúmenes de sedimentos transportados, con información geográfica de detalle, con la cual se puedan distribuir las obras y elementos de control de sedimentos en las áreas intervenidas por la minería a cielo abierto. Con ello, es posible estimar el presupuesto y planificar las tareas de mantenimiento y reparación de las obras de conducción y elementos de retención.

- ▲ Planificación de Cierre de Mina y Cambio de Uso del Territorio.

5.2 Premisas para modelación conceptual y matemática

Esta sección se basa en las reflexiones de Cruz (2006), relativa a la discusión sobre la relación entre formar en la ingeniería tradicional, con la matemática aplicada como herramienta para resolver los problemas de la ingeniería. El autor plantea “la necesidad del desarrollo del pensamiento matemático y el pensamiento estratégico que deben estar presentes en el diseño de experiencias de enseñanza-aprendizaje dirigidas a la formación en la ingeniería”. El autor plantea “la necesidad del desarrollo del pensamiento matemático y el pensamiento estratégico que deben estar presentes en el diseño de experiencias de enseñanza-aprendizaje dirigidas a la formación en la ingeniería”.

Además, que “el diseño en ingeniería no es un producto acabado sino una metodología que se apoya en el conocimiento, la inventiva, la creatividad y la toma de conciencia del concepto de urgencia, para visualizar un problema real, formularlo en términos técnicos, explorar posibles soluciones, evaluar alternativas, proponer una o más formas o vías de solución, evaluar los procesos posibles que se necesite usar y sus correspondientes resultados, seleccionar una de las mejores soluciones con base en un conjunto de criterios, ejecutar las acciones necesarias para llevar a cabo una propuesta particular y evaluar el proceso y los resultados de todas y cada una de las acciones, realizando permanentemente ajustes y correctivos y emitiendo juicios y recomendaciones que se apoyen en hechos, preferentemente cuantificables”.

5.2.1 Proceso de generación-difusión-disposición (Sgdd)

En este trabajo se progresa con un interés en la modelación, al menos conceptual y en lo posible matemática, visualizando el proceso de generación-difusión-disposición (SGDD) de sedimentos en suspensión hídrica, como muestra la Figura 5.1, respondiendo a un modelo sencillo, aunque diverso, constituido por la interacción de componentes en procesos de emisión-propagación-recepción que se puede describir así:

- En la fuente de generación y/o emisión, se encuentra el sólido, masivo o disgregado, denudado por acciones antrópicas como la deforestación (a excepción de las areneras en cauce fluvial) y el arranque mineral, con medios químicos (explosivos) y/o mecanizados (incluidos los hidráulicos).
- En la difusión y/o propagación, ocurre una combinación de acciones como excavación de superficies inclinadas, con procesos físicos naturales como la precipitación hídrica (frecuente y, especialmente máxima), la disgregación de las partículas, friccionantes y/o cohesivas, y la resultante en flujo por escurrimiento y arrastre de particulado sólido, decantable y en suspensión.
- En la recepción y/o disposición, se obtienen los efectos de los dos procesos anteriores sobre los taludes y cursos hídricos en cuencas naturales, en quebradas y ríos que colectan y distribuyen el caudal con residuos sólidos, aguas abajo.

En el caso de generación en la fuente, se tienen tres (3) escenarios: única, múltiple y difusa. Con relación al frente de arranque mineral, es única cuando se tiene un solo frente y múltiple con más de un frente. Sin embargo, en el sistema minero se tienen múltiples fuentes de producción si se consideran, además de los frentes de arranque mineral, las pistas de acarreo, los patios de remanejo, las escombreras y las pilas de almacenamiento de materiales a granel.

La excavación en uno o más frentes de arranque mineral, depende de la demanda o producción mineral y en función de su número aumentarán las longitudes de pistas dentro del circuito de acarreo. El patio de remanejo depende de la necesidad de hacer mezclas de materiales, debido a variaciones en la concentración mineral, como en el caso de la escombrera, la cual es también función de la relación estéril/mena. Las múltiples fuentes pueden estar en elevaciones distintas sobre la misma subcuenca o a distancias relativamente distantes, pero sobre la misma cuenca hídrica.

Con relación a la difusión desde la fuente y a lo largo de la trayectoria de distribución, la concentración de los sedimentos decantables y suspendidos puede ocurrir de manera convergente (concurrente, o concentrada), lineal (a lo largo del cauce o curso de agua) y/o de manera radial, cuando los frentes de arranque se distribuyen en el contorno de la elevación montañosa. También pudiera ocurrir una distribución radial convergente como en el caso de la excavación en fosa (corta) abierta, con sumideros en el fondo de la misma.

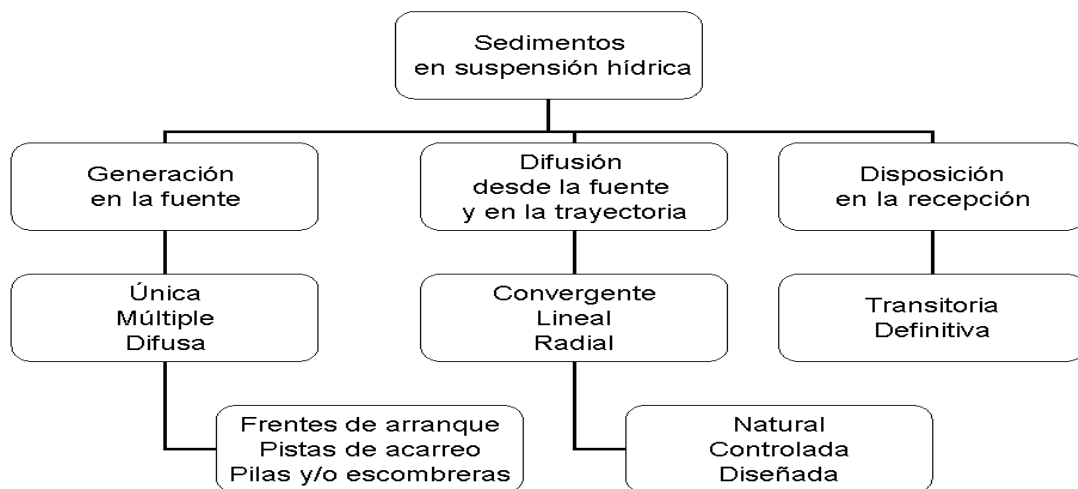


Figura 5.1 Conceptualización y diagramación del proceso de generación-difusión-disposición (Pgdd) de sedimentos en suspensión hídrica.

Fuente: Elaboración propia.

Por último, con relación a la recepción, se reconoce que espacialmente ocurre en el fondo (nivel topográfico inferior) de la cuenca hídrica y que en el mecanismo de difusión ya ha sido considerada la decantación a lo largo del curso natural (o artificial) de agua, entonces se asume la variable temporal, entre disposición transitoria o definitiva. Esto es, que los materiales granulares pueden quedar decantados o dispuestos, de manera definitiva, cuando la granulometría y/o densidad son mayores en magnitud a la fuerza de arrastre del agua. Por otra parte, los sedimentos pueden quedar dispuestos de manera transitoria (transiente) y pueden ser arrastrados en nuevos eventos de flujos con mayor intensidad en el arrastre de partículas sólidas.

5.2.2 Escenarios de difusión de sedimentos

Como muestra la Figura 5.2, en el laboreo a cielo abierto se dan distintos escenarios considerando la forma de la excavación, a partir del diseño de mina, según la morfología del yacimiento mineral. En el sistema de generación en la fuente, pueden ser identificados seis (6) escenarios:

1. Caso metálico y no metálico, excavado en aluvión dentro del cauce (o cauces).
2. a) Caso no metálico, granulares excavados en taludes únicos (cantera de arena).
b) Caso no metálico, excavado con banqueo múltiple en ladera (niveles topográficos).
3. Caso no metálico, excavado con banqueo múltiple en fosa abierta (sumidero).
4. Caso metálico, excavado con banqueo múltiple, en contorno de elevación montañosa.
5. Caso metálico, laterítico excavado en terraza.
6. Caso metálico en veta, con disposición de material molido en pilas de almacenamiento.

En los casos de las minas venezolanas a cielo abierto, consideradas en este trabajo de investigación, se pueden clasificar según los escenarios siguientes:

- Escenario 1: placeres constituidos por granulares y metálicos en bancos y lechos de quebradas y ríos; los bloques mineros son áreas de saque constituidos por la pendiente natural del fondo del río y por las bermas, en uno o ambos lados del cauce. La excavación es manual, mecanizada o hidráulica, en espesores entre decenas de centímetros y algunos metros, con vida útil prolongada siempre que se permita la sedimentación natural.
- Escenario 2a: canteras de arena (areneras) con taludes en rocas densas; los bloques mineros siguen el contorno de la mineralización, con taludes de trabajo sub verticales (65 a 80°) y de poca altura entre terrazas, 2 a 12 m; y con taludes finales según la pendiente natural del terreno.
- Escenario 2b: morros de calizas o dolomitas (macizo rocoso); la geometría de la excavación es menos natural, arrancando con explosivos en forma de bancos múltiples, de 8 a 12 m de altura, a todo lo largo del talud de trabajo y en el ancho determinado por el talud final, entre 70 y 85°, en superficie.
- Escenario 3: terrenos con mantos carboníferos; la geometría de la excavación con explosivos resulta en una fosa, con forma de pirámide invertida y truncada, bancos descendentes de 10 m de altura, talud final de 70° y 200 m de profundidad. La proyección en planta tiene ancho delimitado por estructuras geológicas existentes.
- Escenario 4: cerros con menas ferruginosas; la geometría de la excavación es en contorno, profundizando hacia la raíz del yacimiento hasta configurar una fosa (en algunos casos), con bancos descendentes de hasta 14m, a todo lo largo y ancho del cerro.
- Escenario 5: colinas con lateritas (bauxíticas y níquelíferas); los bloques mineros siguen el contorno de la mineralización, con taludes de trabajo sub verticales (65 a 75°) y con poca altura entre terrazas, con rango promedio de 4 a 6 m; los taludes finales según la pendiente natural del terreno.
- Escenario 6: vetas auríferas, en barrancos con profundidades de hasta 100 m, por el canto longitudinal de las vetas principales y secundarias, con procesamiento mineral (ripeo, molienda y amalgamación a cielo abierto), sin control de vertidos de las pilas de almacenamiento de las arenas residuales.

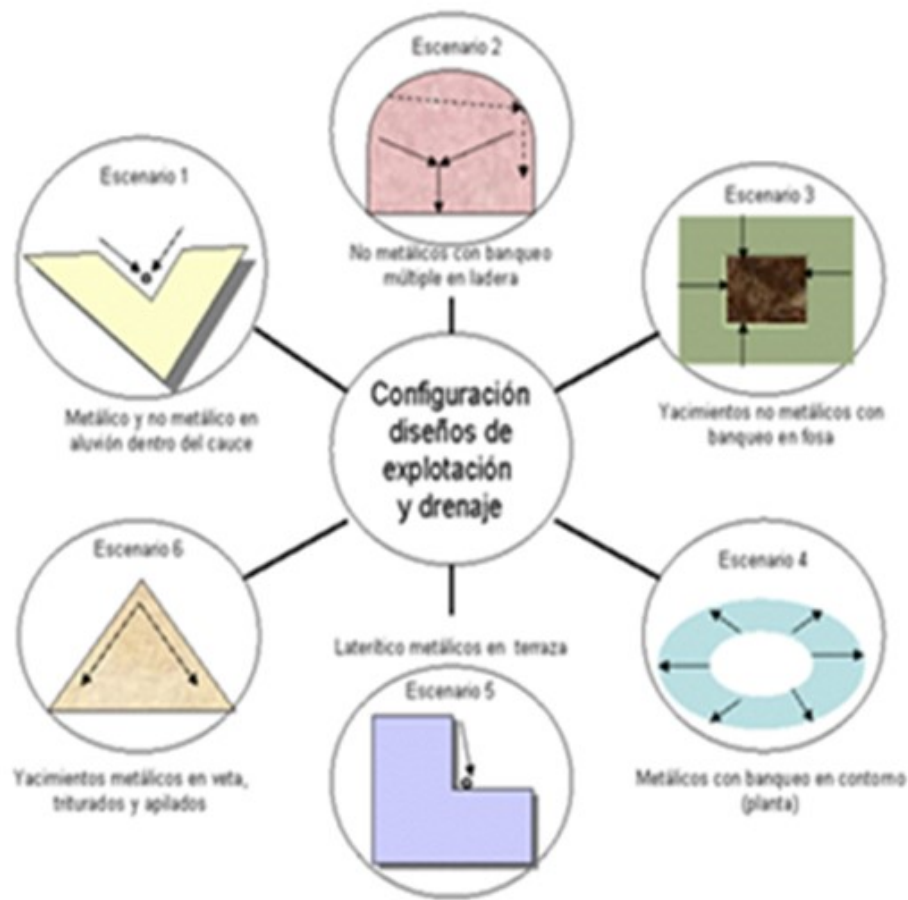


Figura 5.2 Aproximación a diseños geométricos de excavaciones mineras, indicando direcciones del escurrimiento de las aguas en áreas.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.3 Acoplamiento de métodos de análisis

Desde la perspectiva geoambiental, se impone la visión integrada de las herramientas de análisis desarrolladas en las distintas disciplinas del conocimiento, como en los campos referidos: edafológico, hidrológico y geográfico. Por ello, se propone que el caso del estudio de Méndez (2005), en mina Los Pijigüaos, se tome como base metodológica para el control de sedimentos en minería a cielo abierto, a través de la aplicación del programa de computación con el modelo de elevación topográfica, desarrollado con la integración de los métodos analíticos: Racional, Manning, Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (incluyendo también: Stokes, Hjülstrom y modelos dinámicos que puedan ser desarrollados). Este planteamiento puede ser mejorado, partiendo del uso que el autor dio al manejador gráfico *Autodesk Land Desktop®*, al manejador de base de datos *Microsoft Excel®* y al lenguaje de programación *Delphi 7.0®*, con el fin de aplicar sobre los

modelos geológicos, los diseños mineros, las herramientas matemáticas analíticas con los atributos físicos, sobre el Modelo Digital del Terreno (MDT), aplicado a cada caso de mina a cielo abierto.

También, es necesario desarrollar la investigación en sistemas dinámicos. Para el caso de la minería a cielo abierto se hace necesario acoplar las metodologías de estimaciones de sedimentos en suspensión hídrica, descritos en algunos y reseñados en otros, en el capítulo 3 con las bases teóricas, desde las formulaciones determinísticas empíricas, con los modelos estocásticos y de elevación digital, en plataformas informáticas como los sistemas de información geográfica,

La necesidad expresada en el párrafo precedente no puede ser satisfecha con los recursos cognitivos de la ingeniería de minas, ni de la maestría en ciencias ambientales, debido a la diversidad de campos del conocimiento y a la profundidad y complejidad de los algoritmos matemáticos involucrados. Queda el aporte de la visión de mayor alcance y amplitud, lo cual se requiere para mejorar los resultados en la estimación del volumen de sedimentos suspendidos, en proyectos mineros a cielo abierto.

5.3 Estrategias de control de sedimentos, por escenarios

En esta propuesta, los casos de minería a cielo abierto considerados en este estudio, quedan visualizados en los escenarios precedentes, con los cuales es posible visualizar las medidas de control que deben ser integradas en el terreno. De esta manera:

- **Escenario 1:** con minerales distribuidos en placeres, constituidos por materiales granulares y minerales metálicos, que yacen en bancos y lechos de quebradas y ríos. Las medidas que se proponen son de protección de bermas, con diseño de taludes y materiales prefabricados, como sacos con mezcla de concreto pobre (sacocretos) y/o sacos de arena, colocados como muros de gravedad y protección contra erosión. El arranque con equipos de excavación debe ser desarrollada a una distancia suficiente de las bermas para que no sean desestabilizadas. Adicionalmente, se propone aprovechar todas las fracciones granulares, de gravas a arcillas, gestionando las prácticas comerciales de manera eficiente, económica y respectivas del ambiente.
- **Escenario 2a:** canteras de arena, conformando banco único y talud con roca disgregable, para lo cual se proponen en los taludes de trabajo, la construcción de cunetas y bajantes (torreteras) para conducción de agua, que descargan a lagunas de decantación, las cuales puedan ser dragadas con alta frecuencia, en función de aprovechar la arena y evitar la

descarga a cauces naturales, las cuales puedan inducir inundaciones y crecientes en cortes de carretera, con riesgos consecuentes a la seguridad personal y ambiental. Los bajantes deben ser protegidos para evitar la socavación de las paredes y fondo, con la consecuente formación de surcos y cárcavas. En las coronas de taludes definitivos deben ser construidos canales en corona para evitar la formación de grietas de tracción y consecuentes movimientos de masa.

- **Escenario 2b:** canteras de rocas no metálicas, con banco múltiple, para lo cual se requieren cunetas en pie de talud, bombeo hacia los extremos de taludes, conectados a bajantes (torreteras) y canales en el banco de menor elevación topográfica, que descargue el mayor caudal recogido de los bancos de trabajo respectivos. Es importante drenar la mina en todo el ancho, hasta completar en sentido radial, en caso de minería en contorno, parcial a total.
- **Escenario 3:** fosas abiertas con extracción de mantos de carbón, para lo cual se requieren drenajes en el perímetro interno de la excavación, en coronas y pie de taludes de trabajo, conectados a bajantes y a sumideros, desde el cual debe ser bombeada el agua con equipos de manejo de sólidos en suspensión y decantación en lagunas, externas a la fosa, previa descarga a cauces naturales. Se proponen bajas velocidades de flujo, en estructuras de control, a los fines de evitar que auto detonen los carbones debido a la fricción del agua en las paredes de las excavaciones. Es importante la construcción de diques de retención de sólidos y elementos de protección de las caras de taludes.
- **Escenario 4:** cerros con menas ferruginosas, constituidas por la alternancia de litologías muy duras, como cuarcitas y, muy deleznales, como las lateritas de finos negros y marrones, además de arcillas limoníticas. Se propone un diseño geométrico de taludes que no solo garanticen la estabilidad de los taludes, sino más importante aun, el control de los sedimentos en suspensión hídrica, debido al efecto de la densidad de las partículas y el efecto abrasivo de las limaduras de hierro, materiales muy friccionantes que socavan el terreno a lo largo de todo el declive del terreno. Por esto, es imprescindible un extenso y complejo sistema de drenaje de mina, con las obras de conducción y los elementos de retención, calculados en detalle por la ubicación geográfica en el sur de Venezuela, con alta precipitación durante el año. La descarga de sólidos en suspensión es importante y los cauces deben ser protegidos, con elementos prefabricados para evitar el impacto de las

gotas de lluvia, en la fase operativa de la mina; protegiendo con elementos definitivos y revegetación posterior en los taludes finales, a partir del agotamiento de la reserva mineral. De allí que, la planificación de cierre de mina sea tan importantes para este tipo de escenario de minería a cielo abierto.

- **Escenario 5:** *plateaus* con suelos lateríticos, en el caso de la bauxita, y colinas suaves, en el caso de las menas níquelíferas, como consecuencia de la meteorización de las rocas ígneas, tanto graníticas tipo rapakivi, en el primer caso, y de rocas ultramáficas (dunitas y peridotitas), en el segundo. En ambas situaciones, se recomienda la excavación de los taludes de trabajo, con métodos mecanizados en suelos densos, a medianamente densos, sobre los cuales los equipos de acarreo ruedan y sobretrituran los materiales en la superficie de las pistas y rampas, con lo cual se aumenta la producción de sedimentos. Se propone el avance de la excavación completa, en sentido del agotamiento rápido de la reserva mineral en cada bloque minero, con la respectiva construcción de las obras de conducción de las aguas de mina y, la instalación de elementos de retención y de contención de sólidos en suspensión hídrica, con lo cual puedan ser revegetados los taludes finales, de manera inmediata.
- **Escenario 6:** sitios con inventarios de minerales, para alimentación del proceso de preparación y concentración (también las escombreras con mineral no útil) son apilados en terraplenes con formas diversas y dimensionamiento diseñado a las necesidades de cada proceso operativo, requieren diseños de drenaje, con obras de control de sedimentos, aun cuando el método de extracción fuera subterráneo, porque los materiales son traídos a la superficie y reducidos de tamaño, con fines de liberación del elemento químico o el ión de utilidad económica.

La sección siguiente, presenta las conclusiones y recomendaciones de este trabajo de investigación que propone aspectos para el control de sedimentos en minería a cielo abierto, a partir de diversos trabajos desarrollados por la autora en la línea de investigación en minería y ambiente, en el Departamento de Minas, UCV.

CAPÍTULO 6.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones son solo generales y las recomendaciones han sido clasificadas en: generales, si los aspectos resaltados, resultados o criterios de control de sedimentos aplican de forma generalizada o universal, y en específicas, si solo aplican a sistemas mineros particulares.

6.1 Conclusiones Generales

- ⤴ Ha sido presentada una recopilación de escenarios de minería a cielo abierto en el territorio nacional, con la finalidad de evaluar los potenciales de erosión-sedimentación, que entran en suspensión hídrica, lo que a juicio de la autora es la primera vez que se efectúa en el país.
- ⤴ Se recopiló y presentó información, tanto cualitativa, como cuantitativa, en minas a cielo abierto, en seis (6) estados regionales del territorio venezolano: Aragua, Bolívar, Distrito Capital, Falcón, Miranda y Zulia.
- ⤴ Fueron investigadas 14 minas: Agua Blanca, Bizkaitarra, Cantera Nacional, Caucagua, El Melero, El Veral, Hoja de Lata, Loma de Níquel, Los Barrancos, Mampostal, Paso Diablo, Pijigüaos y Tacagua, éstas en orden alfabético.
- ⤴ Se seleccionó un grupo representativo de situaciones con extracción de rubros minerales, metálicos y no metálicos: arcilla, arena, bauxita, caliza, carbón, mineral de hierro, mineral de níquel, oro y piedra picada, nueve (9) en total.
- ⤴ Fueron descritas y evaluadas las características físicas naturales de las áreas con minas, extrayendo parámetros: hidrometeorológicos (atmosféricos); hidráulicos (hidrosféricos); geodinámicos, geofísicos y sedimentológicos (litosféricos) y; edafológicos (biosféricos).
- ⤴ Fueron presentadas las características: espaciales (coordenadas geográficas, elevación); de diseño geométrico de minas (superficie, longitud de declive, pendiente); litológicas (mineralogía y petrología) y económicas (tenores, relación estéril/mena).
- ⤴ En ningún caso de mina, cantera o arenera se reportó el funcionamiento de una estación pluviométrica para medir magnitudes de variables requeridas en los cálculos y estimaciones de obras de ingeniería de control de sedimentos en suspensión hídrica, mejorando la gestión ambiental en minería.

- ⤴ Fueron compendiadas las bases teóricas para el análisis de los procesos de erosión-sedimentación, desde el punto de vista cronológico y de aproximación metodológica, por áreas del conocimiento disciplinario.
- ⤴ En lo hídrico, se describió el cálculo del caudal de precipitación con el Método Racional y la estimación estadística de las características pluviométricas relevantes: duración, intensidad, frecuencia de los eventos (precipitaciones) con el Método de Gunbel.
- ⤴ En lo sedimentológico, se describió la Ley de Stokes y el Diagrama de Hjulström, para determinar las velocidades de caída y de arrastre de los sedimentos.
- ⤴ En lo edafológico, se describió la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos, para estimar la producción de sólidos en suspensión hídrica, en áreas intervenidas por actividades que denudan la cobertura vegetal.
- ⤴ Fueron presentadas características de modelos de elevación digital y de estudios dinámicos para el flujo de sedimentos en cuencas hídricas regionales.
- ⤴ En el análisis de cada situación, fueron estimados los parámetros aplicables en las variables y fueron utilizadas las herramientas analíticas, para la estimación de los volúmenes de sedimentos en suspensión hídrica.
- ⤴ Fueron estimados diversos volúmenes de sedimentos generados: entre 114 m³/mes, como valor mínimo obtenido en mina de hierro Los Barrancos y, 5.982 m³/mes, como valor máximo obtenido en Bizkaitarra, mina de oro en pequeña escala de producción.
- ⤴ El valor de 53 m³/mes corresponde a las pilas de almacenamiento de mineral aurífero en mina Hoja de Lata, resultado que puede ser asumido en el procesamiento mineral, a diferencia de la generación de sedimentos en los frentes de arranque minero.
- ⤴ Se presentaron ejemplos concretos y comparaciones, entre diseños geométricos y geotécnicos de taludes, que garantizan el equilibrio límite, esto es, la estabilidad de las masas de suelos y rocas. Con ello, se inhiben los procesos de inducción de erosión y transporte de sedimentos en suspensión hídrica, destacándose los casos más relevantes: mina Paso Diablo, para extracción de carbón, con banqueo múltiple en fosa abierta y Cuadrilátero Ferrífero de San Isidro, para extracción de mena ferrífera, con banqueo múltiple en ladera, método de contorno y drenaje radial.

- ⤴ Se presentaron ejemplos concretos, a partir de investigaciones aplicadas, de obras de conducción de aguas, con el análisis respectivo, encontrándose que las áreas con mayor superficie intervenida y mayor número de bancos, que producen máximos desniveles y declives, además de litologías más disgregables y deleznales, como la bauxita y la mena de hierro, siendo las que demandan mayores inversiones en estas estructuras hidráulicas.
- ⤴ Se presentaron ejemplos de retención de sólidos en suspensión hídrica, destacándose los casos de: dique de retención de sólidos en mina Paso Diablo, lagunas de sedimentación en mina Los Pijigüaos y siendo el más emblemático, los geodrenes en los placeres con mena aurífera, bajo la modalidad de pequeña escala de extracción, con barrido hidráulico y tame concentrador con mercurio (método de amalgamación), en mina Bizkaitarra, ambas en minería a cielo abierto de menas metálicas, en el estado Bolívar.
- ⤴ En mina de níquel, la intensidad de erosión-sedimentación es muy alta, por lo cual fue necesario mejorar el método para las mediciones en sitio, parcelas con clavos en lugar de chapas. Es por esto que, en la gestión operativa se construye y da mantenimiento al sistema de canales de conducción y lagunas de sedimentación, en todos los bloques mineros de producción, en función de la pendiente del terreno.
- ⤴ Han sido conceptualizados tres (3) fases del proceso físico de erosión-sedimentación: generación-difusión-disposición (distribución), así como seis (6) escenarios de minas a cielo abierto, con especificidad en la configuración geométrica: placeres minerales en cauces y canteras de arena; macizos rocosos calcáreos; fosas abiertas para extracción de mantos de carbón, extracción de mena metálica ferrífera en banco múltiple; excavación de colinas con suelos lateríticos, bauxíticas y niquelíferos y; apilamientos de materiales para alimentación de plantas de procesamiento (e incluso escombreras), en los cuales se tiene que la generación de sedimentos puede ser de tipo: divergente, variando de puntual, a parcial, a total y/o a difusa, en el área intervenida por el laboreo minero; la difusión es siempre expansiva y varía de parcial a lineal y; la distribución o disposición es definitivamente lineal y convergente.
- ⤴ Ha sido posible explicar, en todos los casos de escenarios de minas a cielo abierto, requerimientos de medidas de control en la fuente, en el medio de propagación y en las áreas de disposición, alejados de los ingresos a los drenajes naturales (quebradas y ríos), mediante prácticas de conducción para el drenaje de mina, construidas en el área perimetral y lineal,

tanto en talud (canales y cunetas), como en declive (bajantes y torrenteras), y medidas de retención de sólidos, como drenes y sub drenes filtrantes, decantadores y sedimentadores.

- ⤴ Fue propuesta una metodología de evaluación, análisis, planificación y diseño de medidas de control de sedimentos en minería a cielo abierto, integrando las variables y herramientas de estudio, sobre una plataforma informática, con el modelo de elevación digital del terreno, partiendo del estudio en mina Los Pijigüaos, presentado en 2007.
- ⤴ Fue reportado un caso de dimensionamiento de laguna de sedimentación, como objetivo de una pasantía industrial en ingeniería de minas, para la cantera de dolomita en Puerto Cabello, estado Carabobo, en el cual se ajustó el método de estimación teórica del área y profundidad con criterios operativos mineros.

6.2 Recomendaciones

Como se explicó, esta sección ha sido dividida en dos subsecciones, generales y específicas.

6.2.1 Generales

- ⤴ Es un requisito indispensable, contar con la planificación de mina, preferiblemente con la de cierre de mina, junto con el método y diseño de extracción, el ritmo de producción, a largo plazo, necesaria para la visualización territorial, para el diseño del control de sedimentos.
- ⤴ Es imprescindible la instalación de estaciones pluviométricas para medir las magnitudes de variables requeridas para la planificación y diseño de obras de ingeniería de control de sedimentos en suspensión hídrica, en cada uno de los proyectos mineros.
- ⤴ Es importante para mejorar la certeza sobre la planificación de mina, la experimentación en sitio con la finalidad de determinar las direcciones del escurrimiento y el desarrollo del proceso de generación-propagación-difusión de los sedimentos en suspensión hídrica, a los fines de evitar la formación de surcos y cárcavas, que progresan para desestabilizar las masas de suelos e inducir los movimientos descendentes.
- ⤴ Es necesario aumentar los resultados de laboratorio, con análisis granulométricos y de velocidad de caída libre en medios densos, como los realizados en el laboratorio de preparación y concentración de menas, también los estudios geomecánicos para determinar parámetros elásticos que permiten precisar los diseños geométricos de taludes de trabajo y finales; así también, los estudios hidráulicos que permiten precisar los diseños de obras de drenaje, con estructuras de conducción y contención de sólidos suspendidos.

- ✦ Es necesaria la integración de las herramientas de análisis y diseño, de la ingeniería y la informática, para determinar las variables fundamentales del proceso y realizar los cálculos necesarios para el dimensionamiento de las obras de estabilización, de conducción de las aguas y de retención de los sólidos en suspensión hídrica.
- ✦ Es urgente, drenar adecuadamente las masas de rocas y suelos, las cuales deben contar con obras de control de sedimentos: cunetas en corona y pie de talud, canaletas, bajantes o torrenteras y canales receptores perimetrales, lagunas y cuencas de decantación y/o sedimentación; además de diques, subdrenes, membranas, mantos y mallas para retención y reforzamiento de suelos. También las obras de contención de sólidos como: sumideros, estanques, cuencas y sedimentadores.
- ✦ Es indispensable, continuar con los estudios en esta línea de investigación en minería y ambiente, específicamente en la protección de los cuerpos naturales de agua, que son desmejorados en su calidad fisicoquímica por procesos de sedimentación inducidos por la actividad minera, a cielo abierto.

6.2.2 Específicas

- ✦ En placeres con menas no metálicas, extraer los minerales con el equipamiento adecuado y alejados de las bermas, protegiendo los taludes de bancos que conforman los cauces de ríos.
- ✦ En placeres con menas metálicas, evitar la extracción con barrido hidráulico.
- ✦ En canteras de arena, realizar la planificación, diseño y construcción de un estricto sistema de drenaje de mina para el efectivo control de sedimentos.
- ✦ En canteras de rocas masivas no metálicas, determinar los contactos rocosos con materiales de menor calidad resistente como esquistos, típicos en esas formaciones geológicas, para evitar la generación de sedimentos, que resulta menos típico en los afloramientos calcáreos.
- ✦ En fosas a cielo abierto, para extracción de mantos de carbón, tomar ventaja del escurrimiento en sentido convergente hacia el sumidero principal en el fondo de la fosa, bombeando el agua con sedimentos y manejando los sólidos sin descargar directamente a los cauces de quebradas y ríos.
- ✦ En laderas con menas ferríferas, con distintas granulometrías y densidades, evaluar y diseñar los drenajes y las obras de control, considerando la litología más densa y friccionante, como

en el caso de las limaduras de hierro y, disminuyendo los ángulos de los taludes de trabajo y del talud final.

- ✧ En laderas con suelos lateríticos, planificar, diseñar y construir un sistema de drenaje de mina constituido por canales y cunetas en corona y pie de taludes, elementos de retención de sólidos y acciones de revegetación a corto plazo, una vez agotada la reserva mineral.
- ✧ En apilamientos de mineral para la alimentación de plantas de procesamiento y en escombreras, diseñar drenajes en pie de terraplenes.

REFERENCIAS BIBLIOHEMEROGRÁFICAS

- ALMOROX, A., F. LÓPEZ, S. RAFAELLI.** (2010). La degradación de los suelos por erosión hídrica: métodos de estimación. 1ª edición. Editum. Ediciones de la Universidad de Murcia. 384 p. ISBN 978-84-8371-626-7.
- ALVAREZ, Y.** (2008). Comparación de las productividades de los equipos de acarreo. Minera Loma de Níquel, C.A. Informe de Minería de Campo. Departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. Caracas. 66 p. Inédito.
- ANGOLA, K.** (2005). Evaluación de autocombustión de carbón en mina Paso Diablo con fines de mitigación de impacto ambiental. Carbones del Guasare, S.A., municipio Mara, estado Zulia. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. 194 p. Inédito.
- ARTIGAS J., J. L. LÓPEZ, J. R. CÓRDOVA.** (2006). *Methodology to estimate the total sediment transport in mountainous river basins*. Revista Técnica Ingeniería Universidad del Zulia. V.29. N°.3. 2011-2012. Maracaibo. Diciembre. ISSN 0254-0770. Versión impresa.
- ARTIGAS, M. T.** (2009). Evaluación de la eficiencia del reporte de disponibilidad en el área de materias primas en la empresa HOLCIM, Puerto Cumarebo, estado Falcón. Informe de Minería de Campo. Departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. 51 p. Inédito.
- ÁVILA, G.** (2008). Diseño y plan de desarrollo de escombreras para el área sur de la mina Paso Diablo, municipio Mara, estado Zulia. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. 167 p. Inédito.
- AYALA CARCEDO, F., L. VADILLO, C. LÓPEZ.** (1995). Manual de Restauración de Terrenos y Evaluación de Impactos Ambientales en Minería. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid. ISBN: 84-7840-019-2. 330 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. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. 163 p. Inédito.
- BEASLEY, D.B.** (1977). *Answers: A mathematical model for simulating the effects of land use and management on water quality*. Ph.D. Tesis. Purdue University. Lafayette. 266 p.
- BEAUMONT, C., P. FULLSACK, J., HAMILTON.** (1992). *Erosional control of active compressional orogens*. In: McClay K.R. (ed.) *Thrust tectonics*. Chapman and Hall. New York. Pp. 1-18.
- BENAIM, N.** (2003). Separata de informe técnico: Reconocimiento de campo en áreas con laboreo minero de pequeña minería aurífera, km 88 Troncal 10, municipio Sifontes, estado Bolívar. 3 p. Inédito.
- BIRBE, N.** (2009). Actualización geológica de la zona de explotación del yacimiento Loma de Hierro, estado Miranda. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Geología, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. 82 p. Inédito.
- BLAIKIE, P.M., H.C., BROOCKFIELD.** (1987). *Land degradation and society*. Methuen, Londres, New York. 296 p. ISBN 0416401406.
- BLANCO, Y.** (2007). Plan de cierre progresivo de mina en el Cuadrilátero Ferrífero de San Isidro, Ciudad Piar, estado Bolívar. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. 216 p. Inedita.
- BOGGS, S.** (1995). *Principles of Sedimentology and Stratigraphy. 2nd. edition. Chapter 3. Transport and Deposition of Siliciclastic Sediment*. Prentice Hall Inc. pp. 33-76.

- CAMINERO, A.** (1999). Informe de Minería de Campo. Minera Loma de Níquel, C.A. Departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. Caracas. 43 p. Inédito.
- CARCIENTE J.** (1985). Carreteras Estudio y Proyecto. Segunda edición. Ediciones Vega. Madrid. España. 580 p.
- CARSON, M.A., M.J. KIRBY.** (1972). *Hillslope form and processes*. Cambridge University Press. Cambridge. 475 p.
- CASANOVA, E.F.** (1996). Introducción a la ciencia del suelo. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Universidad Central de Venezuela. 379 p. ISBN; 980-00-044-X
- CASTILLEJO, M.** (1996). Guía de Estudio en Cálculos Geomineros. Departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. Caracas. 28 p. Inédito.
- CASTILLO, A., A. PIÑA** (2002). Control de Sedimentos en Minería a Cielo Abierto. Curso de Extensión. Departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. Caracas. 50 p. Inédito.
- CAZABONNE, C.** (1998). Nuestros Recursos Mineros. Ediciones ENEVA, C.A. Primera Edición. Caracas. Venezuela.
- COVA, J., BOLÍVAR, L.** (2016). Informe preliminar con resultados de mediciones de pérdida de suelos en campo durante el mes de diciembre (Comunicación personal).
- CRUZ, C.** (2010). La Enseñanza de la Modelación Matemática en Ingeniería. Revista de la Facultad de Ingeniería, UCV. Vol. 25, N° 3, pp.39-46.
- CUERPO DE BOMBEROS DEL DISTRITO CAPITAL.** (2004). Estudio Minero Ambiental (Quebrada Tacagua): Informe de Inspección.
- CVG-FERROMINERA DEL ORINOCO, C.A.** (1998). Jefatura de Geología. Informe técnico.
- CVG TECMIN** (1991). Problemática Minero – Ecológica de Guayana. Vicepresidencia Corporativa del Sector Minería. Subcomité Minería y Ambiente.
- CHOW, V., D. MAIDMENT, L. MAYS.** (1993). Hidrología Aplicada. Traducción de 1ra. Ed. Rev. Inglesa por Juan G. Saldarriaga. Santa Fé de Bogotá-Colombia. Pp.1-19 y pp.171-174.
- DARWIN, C.** (1921). El origen de las especies por medio de la selección natural. Tomo I., 161 p. Tomo II., 223 p. y Tomo II. 138 p.
- DAVIES, G. F.** (1999). *Dynamic Earth. Plates, Plumes and Mantle Convection*. Cambridge University Press. 455 p. ISBN 0 521 59067 1.
- DELGADO, R.** (2008). Diseño de un sistema de drenaje de aguas de escorrentía superficial y un sistema de bombeo de aguas de la laguna del sector Mina # 1 para ser inyectada a la planta de arena lavada de la empresa Cantera Nacional C.A., ubicada en la hacienda Mamera del Distrito Capital. Informe de Minería de Campo. Departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. 59p. Inédito.
- DELGADO, R.** (2011). Plan de recuperación integral del talud lado sur: alternativas de mitigación ambiental en la cantera El Melero, estado Miranda. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. 143 p. Inédito.
- ELIZALDE, G.** (1983). Ensayo de clasificación sistemática de categorías de paisaje Primera aproximación. Instituto de Edafología. Facultad de Agronomía. UCV. Maracay. 46 p. Inédito.
- ESCALANTE, K.** (2009). Cálculo de las variables para el control de sedimentos de los procesos industriales de la Planta 3 de Cantera Nacional. Minería de Campo. Departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. 59 p. Inédito.

- FALCÓN, M. A.** (2007). Estudio sedimentológico y evaluación de impacto ambiental acumulado en arenas activas de la subcuenca del río Grande (Caucagua), estado Miranda. Tesis de Maestría en Ciencias Geológicas. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. 144 p. Inédito.
- FERNÁNDEZ, L.** (2001). Propuesta metodológica para determinar grados de susceptibilidad a la erosión hídrica en microcuencas tropicales. Tesis Doctoral. Postgrado en Ciencia del Suelo, Facultad de Agronomía-UCV, Maracay. 286 pp.
- FLORES, F.** (2011). Análisis de la variabilidad de las concentraciones de hierro en los procesos de recuperación de las pilas de bauxita en la mina del cerro Páez, para el lapso 2007-2009, Los Pijigüaos, municipio Cedeño, estado Bolívar, Venezuela. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ciencias de la Tierra. Universidad de Oriente. 102 p. Inédito.
- FOTH, H.D.** (1990). *Fundamentals of Soil Science. Eight Edition.* John Wiley and Sons. 353 p.
- FRÍAS, A.** (2017). Informe de Pasantía Industrial de Ingeniería de Minas. UCV.
- GUEVARA, E., H. CARTAYA.** (1991). Hidrología, una introducción a la ciencia hidrológica aplicada. Gueca Ediciones. Valencia – Venezuela. Pp. 1-16 y pp. 301 -309.
- HARTMAN, H.** (2002). *Introductory Mining Engineering.* USA. 570 p.
- HERNÁNDEZ, T.** (2003). Análisis técnico-económico de sistemas de transporte de bauxita para la explotación de los bloques 5 al 10 del yacimiento de Los Pijigüaos, estado Bolívar. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. 181 p. Inédito.
- HOLLING, C.S.** (1973). *Resilience and Stability of Ecological Systems.* Annual Review of Ecology and Systematics. Vol. 4: 1-23.
- INGEOMIN-UCV** (2009). Reconocimiento geológico-geotécnico de superficie del sector La Pica, Tacagua Vieja, autopista Caracas – La Guaira. Coordinador J. Guerrero. Informe técnico. 7 p.
- JASPE, S.** (2002). Evaluación de la minería del carbón en los estados Zulia y Falcón para la creación de distritos mineros sustentables. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. 153 p. Inédito.
- JONES, C., R. GRIGGS, J. WILLIAMS, R. SRINIVASAN.** (1992). Predicción de la erosión hídrica de suelos en América Latina. En: Taller sobre la utilización de un SIG en la evaluación de la erosión actual de suelos y la predicción del riesgo de erosión potencial. Santiago de Chile.
- JONSON, D.L., L.A. LEWIS.** (1995). *Land Degradation: Creation and Destruction.* USA. Blackwell. Oxford & Cambridge. 335p.
- KIRKBY, M.J, R. P. MORGAN** (1984). Erosión de suelos. Editorial Limusa, México, 375 pp.
- KIRBY, M. J., A. C. IMESON, G. BERGKAMP, L. H. CAMMERAAT.** (1996). *Scaling up processes and models.* Journal of Soils and Water Conservation. 51: 391-396.
- KIRKBY, M.J.** (1998). *Modelling across scales. The MEDALUS family of models.* En: Boardman, J., Favis-Mortlock, D. T., Eds., Modelling soil erosion by water, Springer, Berlin pp. 161 - 174.
- LA BARBERA, S.** (2005). Control de sedimentos en pequeña minería aurífera, proyecto Hoja de Lata, estado Bolívar. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. 113 p. Inédito.
- LISENA, M.** (2002). Compatibilidad entre técnicas de aprovechamiento minero y el entorno ambiental en la mina Los Pijigüaos. Informe Técnico. CVG Bauxilum, Puerto Ordaz, estado Bolívar. 88 p. Inédito.
- LYELL, C.** (1997). *Principles of Geology.* Editor J. Segord. Penguin Books. 415 p.

- MAIOLINO, R.** (2004). Diseño de un sistema de manejo de aguas en escorrentía superficial, en las Canteras de Caliza y Arcilla, Empresa HOLCIM (Planta Puerto Cumarebo). Informe de Pasantía Industrial. Departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. 46 p. Inédito.
- MARIÑO, N., Z. RAMÍREZ, W. MELÉNDEZ.** (1997). Geología del yacimiento de bauxita de Los Pijigüaos y sus alrededores. Proposición para una Excursión Geológica. En: VIII Congreso Geológico Venezolano, t. 1. p. 33-40.
- MARN-UCV.** (2003). Reserva Forestal Imataca: Ecología y Bases Técnicas para el Ordenamiento Territorial. Informe Técnico. Editor José Berroterán. Caracas. Venezuela. 260 p.
- MARSH, W.M.** 1983. *Landscape Planning: Environmental Applications. Second Edition.* John Wiley and Sons, Inc. New York. 339 p. ISBN 0-471-52506-5.
- MATHEUS, J.** (2004). Control de sedimentos en pequeña minería aurífera de placer como indicador de sustentabilidad, zona Bizkaitarra, estado Bolívar. Minería de Campo 2003. Departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. 253 p. Inédito.
- MELO, Y.** (2011). Diagnóstico con fines de elaboración de propuesta de optimización minero ambiental de los circuitos de carga y acarreo de arena industrial. Minera Loma de Níquel (MLDN). Tiara, estado Aragua. Minería de Campo 2010. Departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. 55 p. Inédito.
- MÉNDEZ, H.** (2008). Diseño y aplicación de herramienta para control de sedimento como indicador de sustentabilidad. CVG Bauxilum, mina Pijigüao, estado Bolívar. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. 149 p. Inédito.
- MENDOZA, V.** (1988). Desarrollo Aurífero de Guayana”. CVG – Técnica Minera, C.A. Resumen Gerencial. Puerto Ordaz.
- MENDOZA, V.** (2000). Evolución geotectónica y recursos minerales del escudo de Guayana en Venezuela. HECLA. 184 p.
- MILLS, W. C., A. W. THOMAS, G. W. LANGDALE.** (1984). *Erosion probabilities in Southern Piedmont: Cropping tillage effects.* ASAE Paper No. 84-2546. 24 p.
- MOORE, I. D., G.J. BURCH.** (1986). *Sediment transport capacity of sheet and rill flow: Application of unit stream power theory.* Water Resources Research. 22(8): 1350-1360.
- MOORE, I. D., A. LEWIS, J. C. GALLANT.** (1993). *Terrain Attributes: Estimation Methods and Scale Effects*, In: Jakeman A. J. et al. (Editors) Modeling Change in Environmental Systems. John Wiley and Sons, New York.
- MOORE, I. D., M. F. HUTCHINSON.** (1991). *Spatial Extension of Hydrologic Process Modeling.* Proc. Int. Hydrologic and Water Resources Symposium. Institution of Engineers, Australia 91/22. pp 803-808.
- MULVANEY, T.J.** (1850). *On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations on the relations of rainfall and flood discharges in a given catchment.* Transactions of Institution of Civil Engineers. Ireland 4, 18-31.
- NÓBREGAS, R.** (2013). Estudio estadístico del aporte de sedimentos en la zona de impacto ambiental del desarrollo minero, Minera Loma de Níquel, C.A. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. (En desarrollo).
- OCHOA, K.** (2010). Determinación del impacto de la evaluación geológica en la planificación a corto plazo en la empresa minera Loma de Níquel, C.A. Informe de Pasantía Industrial. Departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. 49 p. Inédito.

- OCHOA, K., R. REYES.** (2011). Propuesta de los parámetros para el diseño de estabilidad de taludes y de los depósitos finales en Minera Loma de Níquel, C.A. municipio Guaicaipuro, estado Miranda. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. 223 p. Inédito.
- O'RIORDAN, T.** (1995). *Environmental Science for Environmental Management. Longman Scientific & Technical.* Longman Scientific & Technical. 369p. ISBN 0-582-21889-6.
- PIERCE, K.L., S.M. COLEMAN.** (1986). *Effect of height and orientation (microclimate) on geomorphic degradation rates and processes, late glacial terrace scarps in central Idaho.* Geological Society American Bulletin. 97: 869-885.
- PINILLA, K.** (1999), Alternativas para el manejo y disposición de minerales no conformes en el cuadrilátero ferrífero de San Isidro, Estado Bolívar C.V.G. Ferrominera del Orinoco, C.A". Trabajo Especial de Grado. Departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. 145 p. Inédito.
- PIÑA, A.** (2002). Indicadores de sustentabilidad en la toma de decisiones para la creación de distritos mineros, aplicados a minería metálica: Au y Fe en el estado Bolívar. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. 217 p. Inédito.
- RENARD, K.G., G.R. FOSTER, G.A. WEESIES, J.P. PORTER** (1991). *Revised Universal Soil Loss Equation.* Journal of Soil and Water Conservation, USA, 46: 30-33.
- ROSEWELL, C. J.** (1993). Department of Conservation and Land Management. New South Wales.
- ROUSE, H., J.W. HOWE.** (1953). *Basic Mechanics of Fluids.* John Wiley & Sons. 245 p.
- RUÍZ, J.D.** (2001). Hidrología: evolución y visión sistémica. La morfometría de cuencas como aplicación. Ediciones de la Universidad Ezequiel Zamora. Colección Ciencia y Tecnología. Fondo Editorial UNELLEZ. Barinas. Venezuela. 298 p.
- SYVITSKI, J.P.M, S.D. PECKHAM, R. HILBERMAN, T. MULDER.** (2003). *Predicting the terrestrial flux of sediment to the global ocean: A planetary perspective.* Sedimentary Geology 162. Elsevier. Pp. 5-24.
- SYVITSKI, J.P M.** (2003). *Global Planet.* Change 39,1.
- SUÁREZ, J.** (1998). Estabilidad de taludes en zonas tropicales. Ediciones Universidad Industrial de Santander. Colombia. 548 p.
- SUÁREZ, J.** (2001). Control de erosión en zonas tropicales. Ediciones Universidad Industrial de Santander. Colombia. 555 p.
- SUÁREZ V., L.** (1993). Presas de corrección de torrentes y retención de sedimentos. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. República de Venezuela. Mayo. ISBN 980-04-0953-X. 10-46 p.
- STÜWE, K.** (2007). *Geodynamics of the Lithosphere. An Introduction. Second Edition.* Springer. Berlín. ISBN 978-3-540-71236-7. 485 p.
- VADILLO, L., C. LÓPEZ.** (2000). Guía de Restauración de Graveras. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. 191 p.
- VALLEJO R., O., A. MARTÍNEZ V.** (2000). Metodología para la cartografía digital de la erosión hídrica del suelo en un sector del municipio de Moa. Revista Minería y Geología Vol. XVII, No.3-4. ISSN 0258 5979. pp 11-17.
- VAN ZANTEN, J.** (2004). Diseño de manejo de agua de mina, en el pit Baqueta de la mina Paso Diablo, estado Zulia, como aporte al desarrollo sustentable de la región. Carbones del Guasare. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. UCV. 169 p. Inédito.

- WILLIAMS, J. R.** (1975). *Sediment-yield prediction with the universal equation using runoff energy factor, present and prospective technology for predicting sediment yields and sources*. Ars-s-40. USDA. Agricultural Research Service. p. 244-252.
- WILSON, J. P., J. C. GALLANT.** (1996). *Eros: a grid-based program for estimating spatially-distributed erosion indices*. Computers & Geosciences. Volumen 22, Issue 7. pp. 707-712.
- WILSON, J.P., J.C. GALLANT.** (2000). *Terrain Analysis: Principles and Applications*. Editors. Chapter 1. *Digital Terrain Analysis*. pp. 1-14. ISBN 0-471-32188-5. John Willey and Sons, Inc. 469 p.
- WISCHMEIER, W.H.** (1958). *A rainfall erosion index for a universal soil loss equation*. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 32:246-249.
- WISCHMEIER, W.H.** (1962). *Rainfall erosion potential -geographic and locational differences of distribution*. in Ag. Eng., pp. 212-215.
- WISCHMEIER, W.H.** (1977). *Soil erodibility by rainfall and runoff*. in *Erosion: Research Techniques, Erodibility and Sediment Delivery*. Geo-Resumen Ltd., Norwich, pp. 45-56.
- WISCHMEIER, W.H., D. SMITH.** (1978). *Predicting Rainfall-Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountain. Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation*. Agronomic handbook 282, U.S. Department of Agriculture. Science and Education administration. USDA AH537. 58 p.

Internet:

- http://www.bioygeo.info/pdf/05_Dinámica_de_la_Hidrosfera.pdf, para consultar sobre Diagrama de Hjulström.
- <http://www.bing.com/videos/search?q=hunter+rouse+fluid+mechanics+1953&docid=4735700852279746&mid=650B2AC274DCB7F103AC650B2AC274DCB7F103AC&view=detail&FORM=VIRE6#view=detail&mid=097F93FCC4906B591552097F93FCC4906B591552>
- http://www.clas.ufl.edu/users/jmjaeger/GLY5558/Syvitski_et_al_2003_sedgeol.pdf
- http://books.google.co.ve/books?id=bSpiNY_nwOIC&pg=PA350&lpg=PA350&dq=Beasley,+D.+B.+1980&source=bl&ots=168CTHAHuH&sig=ZWgRXuqZ63RhLmlpXMH93zCuhDc&hl=es&sa=X&ei=XBKEUq-H4igkQfxzYD4CQ&ved=0CD8Q6AEwAg#v=onepage&q=Beasley%2C%20D.%20B.%201980&f=false
- <http://www.fao.org/docrep/T2351S/T2351S00.HTM>. Consultada: agosto 2007.
- http://www.agrometeorologia.it/documenti/rivista10_02/basso.pdf
- http://ks360352.kimsufi.com/redbooks/a192/iahs_192_0298.pdf
- <http://www.fao.org/docrep/t2351s/T2351S03.htm> (2003).

Comunicación personal con Ingeniero Luis Bolívar, Jefe de Planificación CVM División Níquel y con Bachiller José Cova, Estudiante de Ingeniería de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería UCV.