



Universidad Industrial de Santander
*Manual basado en SIG como herramienta de apoyo para la creación de mapas
espaciales con énfasis en estudios de erosión y remoción en masa.*

**MANUAL BASADO EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)
COMO HERRAMIENTA DE APOYO PARA LA CREACIÓN DE MAPAS
ESPACIALES CON ÉNFASIS EN ESTUDIOS DE EROSIÓN
Y REMOCIÓN EN MASA**

GERMAN HERNANDO ACEVEDO CALDERON

HERNÁN GUILLERMO VALCARCEL RUDA



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIRÍAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2014



Universidad Industrial de Santander
*Manual basado en SIG como herramienta de apoyo para la creación de mapas
espaciales con énfasis en estudios de erosión y remoción en masa.*

**MANUAL BASADO EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)
COMO HERRAMIENTA DE APOYO PARA LA CREACIÓN DE MAPAS
ESPACIALES CON ÉNFASIS EN ESTUDIOS DE EROSIÓN
Y REMOCIÓN EN MASA**

**GERMAN HERNANDO ACEVEDO CALDERON
HERNÁN GUILLERMO VALCARCEL RUDA**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Civil**

Director

**LUIS ALBERTO CAPACHO SILVA
Ingeniero Civil, M.Sc**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIRÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2014



AGRADECIMIENTOS

Un profundo agradecimiento y admiración a todos los profesionales que con su trabajo y esfuerzo, permitieron adelantar este proyecto. Sin sus estudios y libros, hubiese sido imposible la generación de este manual, como el de la aplicación. Si bien es cierto que el Manual no representa una innovación o la creación de una nueva metodología, permite generar estudios de erosión y remoción en masa.

Ha sido un largo camino lleno de dificultades que en su momento parecieron insuperables pero que hoy, aun paso de terminar nuestras carreras profesionales se ven opacadas por la sombra de un futuro que se asoma en nuestras vidas; triunfo, que en ocasiones asusta pero en otras emociona, ya que contamos con el conocimiento y el temperamento enseñado por nuestros maestros y por nuestras familias. Ellas son el pilar del presente y futuro éxito. Su apoyo ha sido clave para saber sortear, las pequeñas cosas como las grandes dificultades; y es por eso que no hay nadie que pueda sentir más propio este triunfo que estamos por realizar que nuestras familias.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).....	18
1.1 ¿QUÉ ES UN SIG?.....	18
1.2 HISTORIA DE LOS SIG	20
1.3 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS SIG.....	21
1.4 COMPONENTES DE UN SIG.....	24
1.4.1 Hardware	24
1.4.2 Software.....	24
1.4.3 Dato.....	25
1.4.4 Usuarios	25
1.4.5 Metodologías	26
1.5 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y SUS APLICACIONES	26
1.6 REPRESENTACIÓN DIGITAL DE LOS MODELOS RASTER Y VECTORIAL	29
1.6.1 MODELO RASTER.....	30
1.6.2 MODELO VECTORIAL.....	33
1.6.3 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA ESTRUCTURA VECTORIAL Y RASTER	36
1.6.4 FUENTES DE DATOS GEOGRÁFICOS.....	38
1.6.5 PASOS PARA CREAR DATOS DIGITALES MEDIANTE ENTRADA MANUAL	39
1.7 ALMACENAMIENTO DE DATOS ESPACIALES.....	39
1.7.1 TIPOS DE ALMACENAMIENTO DE LOS DATOS	40
1.7.2 FORMATOS DE ALMACENAMIENTO DE LA ESTRUCTURA VECTORIAL Y RÁSTER.	41
1.7.3 TIPOS DE ARCHIVOS DE ALMACENAMIENTO DE LOS DATOS NUMÉRICOS	42
1.7.4 TIPOS DE ALMACENAMIENTO EN SOFTWARE DE SIG.	44
2 ArcGIS 10.....	46
2.1 COMPONENTES CLAVE DE ArcGis:	47
2.2 REQUISITOS DEL SISTEMA	50
3 DESASTRE NATURAL.....	53

3.1 MANEJOS DE DESASTRES NATURALES	54
3.2 COMO MEDIR EL IMPACTO DE UN EVENTO	55
3.3 PROBABILIDAD	57
3.4 RIESGO	57
3.5 RIESGO Y DESASTRE	59
3.6 AMENAZA.....	61
3.7 VULNERABILIDAD	61
3.8 GRADO DE VULNERABILIDAD	62
4 MAPAS Y SIG	63
5 SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIÓN EN MASA	64
5.1 INTRODUCCIÓN MOVIMIENTO EN MASA	65
5.2 MARCO TEÓRICO REMOCIÓN EN MASA.....	66
5.2.1 NOMENCLATURA	66
5.2.2 TALUD.	67
5.2.3 DEFINICIÓN DE ESTABILIDAD	68
5.2.4 PARTES DE UN TALUD	69
5.2.5 PROCESOS EN LA ETAPA DE DETERIORO	71
5.2.6 FALLAS EN TALUDES	75
5.2.7 REMOCIÓN EN MASA O DESLIZAMIENTOS.....	76
5.2.8 DIMENSIONES DE DESPRENDIMIENTOS DE TIERRAS.....	77
5.2.9 ETAPAS EN EL PROCESO DE FALLA	78
5.2.10 CLASIFICACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS.....	79
5.2.10.1 CAÍDO	80
5.2.10.2 PROCESOS DEL MOVIMIENTO DE LOS CAÍDOS.....	81
5.2.10.3 INCLINACIÓN O VOLCAMIENTO	81
5.2.10.4 REPTACIÓN (“CREEP”)	83
5.2.10.5 DESLIZAMIENTOS EN MASA (TRASLACIONALES Y ROTACIONALES).....	84
5.2.10.6 ESPARCIMIENTO LATERAL	87
5.2.10.7 FLUJO	88
5.3 INFLUENCIA DE LA ESTRATIGRAFÍA Y LITOLOGÍA	93

5.4 INFLUENCIA DE LA VEGETACIÓN	93
5.4.1 EFECTOS HIDROLÓGICOS DE LA VEGETACIÓN.....	94
5.4.2 INTERCEPCIÓN DE LA LLUVIA	94
5.4.3 RETENCIÓN DE AGUA.....	94
5.4.4 ACUMULACIÓN DE AGUA.....	95
5.4.5 GOTEO O FLUJO POR EL FOLLAJE	95
5.4.6 EVAPOTRANSPIRACIÓN	96
5.5 CONDICIONES HIDROGEOLÓGICAS	96
6 METODOLOGÍAS APLICABLES PARA ESTUDIOS DE RM PARA LA IMPLEMENTACIÓN SIG	98
6.1 MÉTODOS HEURÍSTICOS	99
6.2 MÉTODOS ESTADÍSTICOS	100
6.3 MÉTODOS DETERMINISTAS.....	103
6.4 METODOLOGÍA APLICADA	103
7 MÉTODO MORA-VAHRSON	104
7.1 DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA METODOLOGÍA MVM PARÁMETRO DE LA PENDIENTE (S_p).....	108
7.1.1 IMPLEMENTACIÓN EN SIG (ArcGis).	109
7.2 PARÁMETRO DE SUSCEPTIBILIDAD LITOLÓGICA (S_i).....	125
7.2.1 IMPLEMENTACIÓN EN SIG (ArcGis).	126
7.3 PARÁMETRO DE HUMEDAD DEL TERRENO (S_h).....	131
7.3.1 IMPLEMENTACIÓN EN SIG (ArcGis).	132
7.4 PARÁMETRO DE DISPARO POR SISMICIDAD D_s	138
7.4.1 IMPLEMENTACIÓN EN SIG (ArcGis).	140
7.5 PARÁMETRO DE DISPARO POR LLUVIA D_{ll}	142
7.5.1 IMPLEMENTACIÓN EN SIG (ArcGis).	143
7.6 MAPA DE INDICE AMENAZA MÉTODO MORA-VAHRSON.....	146
7.7 APLICACIÓN METODOLOGÍA MORA VAHRSON	147
8 SUSCEPTIBILIDAD DE EROSIÓN	151
8.1 INTRODUCCIÓN A LA EROSIÓN	152

8.2 MARCO TEÓRICO EROSIÓN	152
8.2.1 EROSIÓN.....	152
8.2.2 AGENTES DE EROSIÓN DE ORIGEN NATURAL Y ANTRÓPICOS:	153
8.2.3 PRINCIPALES FORMAS DE EROSIÓN	153
8.2.3.1 EROSIÓN EÓLICA O DE VIENTO	153
8.2.3.2 EROSIÓN HÍDRICA	155
8.2.3.3 OTROS CAUSANTES DE EROSIÓN	160
8.2.4 CONCEPTOS HIDROLOGICOS PARA ANALISIS DE LA EROSIÓN.....	166
8.2.5 ANALISIS HIDROLOGICO	166
8.2.6 LLUVIAS	167
8.2.6.1 PRECIPITACIÓN.....	167
8.2.6.2 ESCORRENTÍA.....	171
8.2.6.3 INFILTRACIÓN.....	172
8.2.7 CUENCA HIDROGRÁFICA	173
8.2.7.1 Características de la cuenca hidrográfica	174
8.2.7.2 Partes de una cuenca	177
8.2.7.3 Tipos de cuencas	177
8.2.7.4 Características de la cuenca hidrográfica	178
8.2.7.5 Partes de una cuenca	181
8.2.7.6 Tipos de cuencas	181
8.2.7.7 Características geomorfológicas.....	181
9 METODOLOGÍAS APLICABLES PARA EROSIÓN.....	185
9.1 MODELOS CARGAS POR SUPERFICIE UNITARIA (PREDICCIÓN ESTADÍSTICA)	186
9.2 MODELOS DETERMINISTAS Y ESTOCÁSTICOS	186
9.2.1 MODELO SWRRB (Simulador de Recursos Hídricos en Cuencas Rurales).....	187
9.2.2 MODELO SWAT (Suelo y Herramienta de Evaluación del Agua).....	192
10 ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELOS REVISADO (RUSLE).	198
10.1 DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA METODOLOGÍA RUSLE	199
10.1.1 EROSIVIDAD DE LA LLUVIA (FACTOR R)	199
10.1.1.1 IMPLEMENTACIÓN EN SIG (ArcGis).	202



10.1.2 ERODABILIDAD DEL SUELO (FACTOR K).....	205
10.1.2.1 IMPLEMENTACIÓN EN SIG (ArcGis).....	208
10.1.3 FACTOR TOPOGRÁFICO (FACTOR LS).....	211
10.1.3.1 IMPLEMENTACIÓN EN SIG (ArcGis).....	217
10.1.4 FACTOR DE MANEJO DE COBERTURA (C).....	236
10.1.4.1 IMPLEMENTACIÓN EN SIG (ArcGis).....	243
10.1.5 PRÁCTICAS DE CONTROL DE LA EROSIÓN (FACTOR P).	248
10.1.5.1 IMPLEMENTACIÓN EN SIG (ArcGis).....	250
10.2 ELABORACIÓN DEL MAPA DE EROSIÓN (RUSLE).	254
10.3 APLICACIÓN METODOLOGÍA RUSLE	257
11 CONCLUSIONES	259
BIBLIOGRAFIA	260

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Daños Sufridos por laderas o Taludes (Erenas 1995).....	76
Tabla 2: Elementos de un Deslizamiento (Varnes 1978)	78
Tabla 3: Glosario para la caracterización de movimientos en masa. (Ampliado de Cruden y Varnes, 1996).....	92
Tabla 4: Clasificación de la susceptibilidad al deslizamiento (Mora, R. et al., 1992).	107
Tabla 5: Clases de pendientes, condiciones del terreno, colores sugeridos y valoración del parámetro Sp (Mora, R. et al., 1992).....	108
Tabla 6: Factor Sp en base al Relieve Relativo.	109
Tabla 7: Valoración del parámetro susceptibilidad litológica, Caso macizos rocosos según RMR (Bieniawski, 1989).....	125
Tabla 8: Valoración del parámetro susceptibilidad litológica, caso suelos (Mora, R. et al., 1992).....	126
Tabla 9 : Valores asignados a los promedios mensuales de lluvia (Mora, R. et al., 1992)	132
Tabla 10: Valoración del parámetro humedad del terreno (Sh) (Mora, R. et al., 1992).	132
Tabla 11: Valoración del parámetro de disparo por sismicidad Ds (Mora, R. et al., 1992).	139
Tabla 12: Valoración del parámetro de disparo por lluvias DII (Mora, R. et al., 1992).	143
Tabla 13: Coeficientes de permeabilidad y capacidad de infiltración	173
Tabla 14: Variación de m. (McCool et al. 1989).	214
Tabla 15: Factor C Relación de pérdida de suelo por vegetación y manejo de residuos de cultivo	237
Tabla 16. Valores de P mínimos para prácticas de contorno (RUSLE 1993)	249
Tabla 17. Valores de P para terrazas en función a su grado de pendiente (RUSLE 1993)	249

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Concepto de capas (ESRI).	19
Figura 2: Cambio del Formato Analógico al Digital	30
Figura 3 : Estructuras Vectoriales Principales	34
Figura 4: Esquema de la arquitectura de ArcGIS ORDUÑA, 2007	47
Figura 5: Nomenclatura de taludes, traducido de (Nicholson y Hencher ;1997) ...	69
Figura 6: Procesos de deterioro en macizos rocosos (Nicholson y Hencher; 1997)	72
Figura 7: Partes de un deslizamiento Varnes (1978)	77
Figura 8: Esquema de caídos de roca y residuos.	80
Figura 9: Procesos que conducen al Volcamiento o inclinación en materiales residuales	82
Figura 10 : Deslizamiento rotacional típico	85
Figura 11: Ejemplos de desplazamientos de traslación	86
Figura 12: Esquema de un esparcimiento lateral	87
Figura 13: Avalanchas por deslizamientos generalizados.....	91
Figura 14: Zonas de Amenaza Sísmica en función de Aa y Av.NSR-10	140
Figura 15: Mapa de Valores Aa NSR - 10.....	141
Figura 16: Erosión por golpe de una gota de lluvia Suarez J, 2001	161
Figura 17 : Distribución de las gotas en una lluvia Suarez J, 2001.	162
Figura 18: Ciclo hidrológico del agua (Dunne y Leopold, 1978).	167
Figura 19: Delimitación de una cuenca Suarez J, 2001	174
Figura 20: Orden de los ríos, en una cuenca de quinto orden.....	184
Figura 21: Nomograma de Erodabilidad del suelo (Wischmeier et al. 1971).	208

RESUMEN

TITULO **MANUAL BASADO EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) COMO HERRAMIENTA DE APOYO PARA LA CREACIÓN DE MAPAS ESPACIALES CON ÉNFASIS EN ESTUDIOS DE EROSIÓN Y REMOCIÓN EN MASA*.**

AUTORES: **Germán Hernando Acevedo Calderón***, gerace_@outlook.com.
Hernán Guillermo Valcarcel Ruda, hernanvalruda11_90@outlook.com.

PALABRAS CLAVE: Manual, Mora & Varhson (MVM), Ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE), Sistemas de Información Geográfica (SIG).

DESCRIPCIÓN

En este trabajo se presenta una metodología comprensible y corta acompañada de conceptos básicos, con el fin de que sirva como soporte en estudios de erosión y remoción en masa, permitiendo la estimación del nivel de susceptibilidad sujeta a fenómenos de erosión y remoción en masas por medio de la implementación de sistemas de información geográfica (SIG), sin entrar a estudiar las medidas de mitigación pertinentes. Para ello, se exponen las metodologías utilizadas en la actualidad tomando en cuenta sus ventajas y desventajas con el fin de determinar la metodología más apropiada para aplicar a las necesidades de planificación urbana, así como también para que sirva de guía a ingenieros civiles y profesionales afines.

Con este propósito, se propone la implementación del método Mora & Varhson y de RUSLE para los estudios de remoción en masa y erosión respectivamente. Estos métodos son abordados de un manera eficaz, permitiendo una explicación clara de cada una de las variables requeridas por los modelos, así como la construcción de los mapas bases utilizados en el geo-procesamiento mediante ArcGIS 10 para la zonificación del fenómeno de remoción en masa y erosión, en el manual se encontrara el procedimiento y las herramientas requeridas por el programa para generar los estudios a partir de información recolectada de campo.

* Proyecto de Grado

* Facultad de Ingenierías Fisicomécanicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: Luis Alberto Capacho Silva.

ABSTRACT

TITLE **MANUAL BASED ON GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS (GIS) SUPPORT AS A TOOL FOR CREATING SPACE MAPS WITH EMPHASIS ON STUDIES OF EROSION AND MASS REMOVAL*.**

AUTORES: **Germán Hernando Acevedo Calderón[†]** gerace_@outlook.com
Hernán Guillermo Varcancel Ruda, hernanvalruda11_90@outlook.com.

KEY WORDS: Manual, Mora & Varhson (MVM), Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), Geographic Information System (GIS).

DESCRIPTION

This paper introduces a short and simple methodology which comes along with some basic concepts. This, as a result, would be used in erosion and landslide studies. The methodology allows to estimate the level of susceptibility attached to erosion and landslide phenomenon by the use of geographical information systems (GIS) without taking into consideration the respective mitigation measures. To achieve the above, this paper exposes the different methodologies used in the present. It also take into consideration the advantages and disadvantages of each methodology in order to identify which of those is the most proper methodology, not only for applying it to the needs arising from the urban planning. But also it will serve as a guide for civil engineers and other professionals working in similar areas.

As a result of this, the paper proposes the use of the Mora & Varhson and the RUSLE methodologies in erosion and landslide studies respectively. Those methods are studied in a effective way, which provides clearer explanations for each of the variables requires by the methods for setting up the basis maps used in the geo-processing using ArcGIS 10 for zoning the erosion and landslide phenomenon, the procedure in the manual and the tools required for the program to generate studies from field data collected was found.

* Proyecto de Grado

[†] Facultad de Ingenierías Fisicomécanicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: Luis Alberto Capacho Silva.

INTRODUCCIÓN

El constante crecimiento de la población humana, el requerimiento de espacio próximo a grandes ciudades y la necesidad de terrenos productivos en las zonas rurales, han generado un aumento exponencial en la ocurrencia de eventos naturales, en los cuales, se ven involucradas pérdidas materiales y humanas. Por ello, es importante estimar las zonas en las cuales cualquier actividad humana pueda estar expuesta a fenómenos potencialmente destructivos o fenómenos en los cuales, pueda afectar el desarrollo urbano e industrial.

Este proyecto permitirá exponer las diferentes metodologías empleadas en la actualidad, utilizadas en la generación de un mapa de susceptibilidad para fenómenos de remoción en masa y erosión, ya que éstos son los problemas que usualmente se presentan en nuestro entorno regional. La selección de la metodología a aplicar para cada uno de los eventos anteriormente mencionados, se basará en las ventajas y desventajas que puedan ser obtenidas por su uso y los requerimientos de información para ser implementada, permitiendo generar una evaluación de la susceptibilidad de una zona o región con una buena aproximación.

Un mapa de zonación de susceptibilidad en SIG (Sistemas de Información Geográfico) permite la identificación y clasificación de áreas, donde en un presente o en un futuro se puedan generar fenómenos de movimientos en masa u erosión, y es una herramienta fundamental para zonificación en áreas urbanas y rurales según el grado de exposición, permitiendo así salvaguardar bienes materiales y vidas humanas, aunque la estimación de la susceptibilidad de estas zonas, no considera la probabilidad temporal ni la magnitud de los eventos esperados.

1 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

1.1 ¿QUÉ ES UN SIG?

Es difícil definir el término de Sistemas de información geográfica (SIG), debido a su complejidad, ya que abarca la integración de áreas muy diversas. Por esto no existe una única definición de SIG totalmente consensuada (de Mers, 1997). Una definición de SIG bastante aceptada es la redactada por el NCGIA (*National centre of Geographic Information and Analysis*):

Un sistema de información Geográfica (SIG) es un sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión. (NCGIA, 1990).

La tecnología de los sistemas de información geográfica puede ser utilizada para investigaciones científicas, la gestión de los recursos, gestión de activos, la arqueología, la evaluación del impacto ambiental, la planificación urbana, la cartografía, la sociología, la geografía histórica, el marketing, la logística por nombrar unos pocos. Por ejemplo, un SIG podría permitir a los grupos de emergencia calcular fácilmente los tiempos de respuesta en caso de un desastre natural o para encontrar los humedales que necesitan protección contra la contaminación, también pueden ser utilizados por una empresa para ubicar un nuevo negocio y aprovechar las ventajas de una zona de mercado con escasa competencia.

Hay muchos tipos de SIG, algunos más apropiados que otros, para estudios de planificación del desarrollo integrado y para el manejo de peligros naturales. En el nivel más elemental, hay muchas técnicas manuales sencillas para superponer transparencias de mapas, tal como la técnica propuesta por McHarg en *Design with Nature*, herramienta comprobadamente valiosa. Sin embargo, la cantidad de

información que se necesita para el manejo de los peligros y la planificación del desarrollo, puede ser tan abrumadora que es casi imposible manejarla manualmente. En el otro extremo se encuentran los sistemas computarizados, altamente sofisticados, que pueden analizar datos científicos de referencia tales como las imágenes de satélites y producir con graficadores, mapas a gran escala de excelente calidad cartográfica. Tales sistemas son costosos, difíciles de operar y pueden exceder las necesidades de muchas oficinas de planificación.

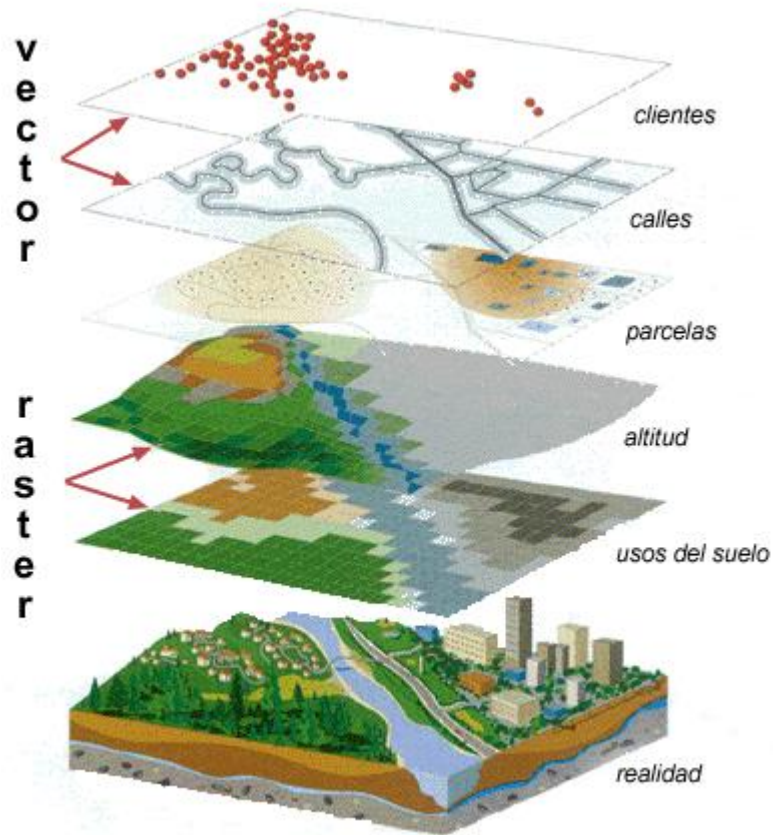


Figura 1: Concepto de capas (ESRI).

1.2 HISTORIA DE LOS SIG

La distribución espacial es inherente, tanto a los fenómenos propios de la corteza terrestre como a los fenómenos artificiales y naturales que sobre ella ocurren. Todas las sociedades que han gozado de un grado de civilización, han organizado de alguna manera la información espacial.

Los fenicios, por ejemplo, fueron navegantes, exploradores y estrategas militares que recopilaban información en un formato pictórico, y desarrollaron una cartografía "primitiva" que permitió la expansión y mezcla de razas y culturas. Los griegos adquirieron un desarrollo político, cultural y matemático, refinaron las técnicas de abstracción con sus descubrimientos geométricos y aportaron elementos para completar la cartografía, utilizando medición de distancias con un modelo matemático ($a^2 + b^2 = c^2$ Pitágoras, ecuación del círculo).

También fueron los griegos, enmarcados dentro de un hábitat insular, quienes se convirtieron en navegantes e hicieron observaciones astronómicas para medir distancias sobre la superficie de la tierra. La información de este tipo se guardó en mapas. Los romanos imitaron a los griegos y desarrollaron el Imperio, utilizando frecuentemente el banco de datos previamente adquirido y ahora heredado. La logística de infraestructura permitió un alto grado de organización política y económica, soportada principalmente por el manejo centralizado de recursos de información.

Se puede decir que las invasiones bárbaras disminuyeron el ritmo de desarrollo de la civilización en el continente europeo, durante la edad media, y sólo hacia el siglo XVIII los estados reconocieron la importancia de organizar y sistematizar de alguna manera la información espacial; se crearon organismos comisionados exclusivamente para ejecutar la recopilación de información y producir mapas

topográficos al nivel de países enteros, organismos que han subsistido hasta el día de hoy.

En el siglo XIX con su avance tecnológico basado en el conocimiento científico de la tierra, se produjo grandes volúmenes de información geomorfológica que se debía cartografiar. La orientación espacial de la información se conservó con la superposición de mapas temáticos especializados sobre un mapa topográfico base. Recientemente la fotografía aérea y particularmente las imágenes de satélite han permitido la observación periódica de los fenómenos sobre la superficie de la corteza terrestre. La información producida por este tipo de sensores ha exigido el desarrollo de herramientas, para lograr una representación cartográfica completa.

La teledetección, por ejemplo, fue el medio en el cual se desarrollaron estas herramientas tecnológicas como el análisis de imágenes, reconocimiento de patrones y procesamiento digital de información, en general estudiadas por físicos, matemáticos y científicos expertos en procesamiento espacial. Obviamente, éstos tenían un concepto diferente al de los cartógrafos, con respecto a la representación visual de la información. Con el transcurso del tiempo se ha logrado desarrollar un trabajo multidisciplinario y por ésta razón, ha sido posible pensar en utilizar la herramienta conocida como "Sistemas de Información Geográfica, SIG (GIS)" <http://www.geoinfo.cl/pdf/sig.pdf>.

1.3 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS SIG

Aunque se ha reivindicado la existencia de algunos SIG muy antiguos, como el *British Domesday Book* de finales del siglo XI, los SIG tal como nosotros los entendemos tienen su origen en el sistema de información geográfica canadiense de 1964, que encarnó el primer reconocimiento de las posibilidades que ofrecía el uso de computadoras para manipular datos numéricos y generar información útil y tempestiva. En los años 60 y principios de los 70 el desarrollo de los SIG fue escaso,

debido a las limitaciones técnicas y de costos, pero en ese mismo período se registró un importante avance en el campo de las minicomputadoras y se crearon algunos paquetes cartográficos originales, como el SYMAP, el GRID, el IMERID y el GEOMAP.

Durante los años setenta se produjo un rápido aumento de los campos paralelos o conexos. Se comprendieron las ventajas de enlazar los conjuntos de datos y de utilizar los datos espaciales de otras formas, y las universidades, organismos de investigación y empresas privadas pequeñas comenzaron a adquirir el equipo asociado con los SIG. Para finales del decenio de 1970 la cartografía informatizada había hecho rápidos progresos. Existían cientos de sistemas computarizados para numerosas aplicaciones. Se habían desarrollado las funciones interactivas y se fabricaron dispositivos de salida, capaces de generar representaciones visuales y productos gráficos impresos de alta resolución. También estaban comenzando a salir de las universidades muchos estudiantes de informática.

En los años 80 los SIG despegaron definitivamente, sobre todo en la última parte del decenio. Ahora constituyen una industria de desarrollo de grandes proporciones, permitiendo general grandes avances como:

- Avances en la búsqueda interactiva y el procesamiento de gráficos.
- Proliferación de software barato, muchos de ellos adecuados para computadoras personales. Las mejoras en las instrucciones, menús, manuales, etc. han puesto los SIG al alcance de personas no especializadas.
- Se ha instaurado la computación repartida a través de redes con objeto de compartir recursos y datos.
- En el comercio se encuentran SIG en existencia e incluso ya montados, “llave en mano”, a veces con inclusión de todo el hardware y software necesarios.

- Los importantes adelantos en los microprocesadores han permitido reducir los costos y concentrar enormes cantidades de memoria en minúsculas pastillas o “chips”.
- El uso o la digitalización de mapas específicos han ido cediendo el terreno al mantenimiento de ficheros de datos digitales en un banco de datos cartográficos que es posible manipular, analizar y visualizar de la forma que se desee.
- Se ha registrado un gran aumento en las actividades de apoyo a los SIG- revistas, cursos, educación, simposios, etc.
- Los gobiernos, empresas de servicio público y otras empresas están procurando aumentar la Eficiencia del tratamiento de los datos.

Durante todo el último período de desarrollo, los avances en específicas de los SIG se han ido superando mutuamente, impulsados por las aplicaciones o la tecnología. La mayoría de los adelantos se han generado en América del Norte, pero algunos han procedido de Europa. En casi todos los países el gobierno ha desempeñado un papel importante en los progresos de los SIG, pues ha producido grandes volúmenes de datos, impulsado el uso de SIG en departamentos tales como los de silvicultura, planificación del aprovechamiento de la tierra y desarrollo de los recursos naturales y ha ido asumiendo un papel cada vez más importante en relación con los problemas ambientales. El mercado mundial de sistemas y datos de información geográfica se estima actualmente (en 1990) en 4 000 millones de dólares, y su crecimiento se calcula en un 20 % anual (Tomlinson, 1989).

1.4 COMPONENTES DE UN SIG

Un SIG está formado por cinco componentes o elementos y cada uno de esos componentes cumplen con una función para que existan entre ellos una interacción. Es decir, éstos conforman la información para que sea procesada o se realice un tratamiento, los recursos técnicos, humanos y las metodologías que se adopten en la organización o la empresa.

A continuación se describen a esos componentes:

1.4.1 HARDWARE

Es el equipo de cómputo con el que opera un SIG. Actualmente el software de estos sistemas se ha adaptado a diversos tipos de hardware desde arquitecturas clientes-servidor hasta computadoras de escritorio aisladas. Para las consultas espaciales el hardware es útil para efectuar el procesamiento de las operaciones, que con base a algoritmos solucionan las relaciones entre geometrías.

1.4.2 SOFTWARE

Proporciona las herramientas y funciones necesarias para almacenar, analizar y desplegar la información geográfica, para ello se necesitan de elementos principales de software los cuales son:

- Herramientas para la entrada y manipulación de información geográfica.
- Un sistema de administración de base de datos (DBMS Data Base Management System).
- Herramientas que soportan consultas, análisis y visualización de elementos geográficos.

- Una interfaz gráfica de usuario (GUI Graphical User Interface) de manera que facilite el acceso a las herramientas anteriormente mencionadas.

En éste se implementan aplicaciones como las consultas espaciales, los lenguajes visuales para consultas espacio-temporales como lo refiere (Bonhomme, 1999) y en el caso de las consultas espaciales poder utilizar la tercera dimensión de los objetos según Grün (Grün, 1999).

1.4.3 DATO

Se refiere al elemento principal para lograr una correcta información. Es decir, una vez conocido el objeto del modelo del mundo real, se identifican las propiedades que lo forman, por ejemplo, sus atributos que se refieren a los elementos descriptivos y el tipo de geometría como el elemento espacial. En las consultas espaciales es necesario conocer el tipo de geometría entre los objetos del mundo real que se relacionan topológicamente.

1.4.4 USUARIOS

Son las personas que se encargan de administrar el sistema así como de desarrollar un proyecto basado en el mundo real, entre los que se involucran analistas, desarrolladores, administradores, programadores, y usuarios. Por ejemplo, para las consultas espaciales, esas personas se refieren a quienes proporcionan la información fuente, realizan la edición de la información, implementan los algoritmos útiles para resolver las consultas espaciales y los usuarios finales que se favorecen de la aplicación o proyecto elaborado.

1.4.5 METODOLOGÍAS

Son los planes de un buen diseño y las normas por parte de la empresa, las cuales son modelos y prácticas de operación de cada organización. (E.S.R.I., 2001).

Este último se basa en los estándares reconocidos para aspectos geográficos, que sugieren las medidas a adoptar para un determinado enfoque de aplicación y de esta manera respaldar su forma de trabajo. Por ejemplo, en las consultas espaciales en (OpenGis (99-049), 2001) refiere los modelos para implementar las relaciones topológicas entre objetos del modelo del mundo real basados en un modelo de objetos geométricos.

Los componentes mencionados tienen la finalidad para establecer la estructura de un SIG y en concordancia con ello, implementar aplicaciones que apoyen la toma de decisiones como por ejemplo, las consultas espaciales reiterando que esa aplicación por sí sola no refleja la solución, sino que es interpretada por la persona responsable de decidir.

1.5 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y SUS APLICACIONES

Algunos ejemplos de las aplicaciones que los SIG han mostrado beneficio y utilidad son las siguientes:

- **Aplicación Forestal:** para determinar la magnitud de la tala y conocer la vía o el acceso a esa tala.
- **Bases de datos ambientales:** con estos datos realizar planes convenientes a evitar deterioros naturales en una región.
- **Censos:** con los datos obtenidos conocer los usos de los servicios que se ofrecen en un área como la distribución de agua potable y transporte.

- **Grandes bases cartográficas:** con estas bases de datos se adquiere más fácilmente el mantenimiento de inventario con referencias espaciales de los bienes inmuebles así como de su valoración y para preparar una gestión contribuyente en la Administración Pública.
- **Planeación Urbana:** la elaboración de Planes Generales y Normas Subsidiarias, entre otros están los Planes Parciales, Proyectos de Urbanización, Proyectos de Compensación y Reparcelaciones, Evaluaciones de Impacto Ambiental, Planes Especiales y Catálogos
- **Sistemas de empresas de servicios:** para los servicios de transporte que controlan sus equipos con un rastreo satelital.
- **Sistemas para el control y modernización de cambios ambientales:** estos ofrecen una inspección para zonas de riesgos por factores naturales, y análisis para planes de conservación (Cesga, 2001).
- **Logística:** gestión de flotas de distribución de paquetería y seguimiento en tiempo de la situación de mercancías.
- **Catastro:** elaboración de catastro más precisos mediante el uso de imágenes de satélite de alta resolución de mercancías.
- **Administración regional:** asistencia a la planificación de políticas territoriales mediante el uso de información sobre la localización y distribución de las actividades económicas (industriales, explotaciones agropecuarias, empresas de servicios, etc), de los servicios públicos (asistencia sanitaria, educación,

servicios administrativos, etc), de las infraestructuras, y de los recursos naturales y culturales.

- **Agricultura:** gestión territorial mediante cobertura digital del parcelario rustico, aplicaciones precisa de fitosanitarios y fertilizantes mediante el uso conjunto de los SIG y los sistemas de posicionamiento global (GPS) en exploraciones agrarias.

Los organismos que se benefician son gobiernos federales, estatales así como municipales, empresas de servicio público y secretaría de la defensa. Los ejemplos anteriores nos explicaron cómo un SIG es adaptado a diversas disciplinas y en cada uno se propone un aprovechamiento de la información estudiada para ofrecer una eficaz toma de decisiones.

Una de las maneras para obtener satisfactoriamente la información es mediante las consultas espaciales, porque de este modo se analiza el ámbito que ayuda a determinar un desastre a los bosques, conociendo cuáles serían las áreas boscosas dañadas y de igual forma, los caminos para dirigirse a la zonas boscosas que sean afectadas tal como se indicaron en la aplicación forestal y en las bases de datos ambientales, en éste último para prever incidentes que pongan en riesgo a una comunidad.

Otro ejemplo del uso de estas consultas son los servicios que una población tiene, es decir, por medio de una adquisición de datos como en los censos, porque en estos se logran identificar por medio del municipio, distrito y entidad federativa a la que pertenece una población.

Para el caso de las bases cartográficas facilita la detección para acordar la cuota o el pago que un organismo catastral cobrará para un área territorial, y como

consecuencia establecer un orden sobre los bienes inmuebles que conforman a una región.

En la planeación urbana las consultas espaciales se emplean para analizar los límites entre los territorios y de esta manera adecuar una estructura administrativa lo que llevará consigo un desarrollo que vincule a esos territorios como lo define Roche (Roche, 1999). Según Al-Kodmany (Al-Kodmany, 2000) es importante que los residentes o pobladores identifiquen las relaciones espaciales en sus comunidades, además de basarse con otros medios como los planos, las representaciones en tres dimensiones y las imágenes fotográficas.

Las consultas espaciales para las empresas de servicios proporcionan la ubicación de los vehículos que transitan en alguna vía que cubre una ruta para efectuar una entrega y evitar algún contra tiempo, en caso de existir un tiempo desfavorable que les ocasione un retardo o accidente.

1.6 REPRESENTACIÓN DIGITAL DE LOS MODELOS RASTER Y VECTORIAL.

Al igual que ocurre en los planteamientos básicos y técnicos que llevan la realidad a una representación cartográfica convencional, la introducción de datos en un SIG plantea dos cuestiones fundamentales a resolver:

- a) Cómo ha de concebirse el mundo real.
- b) Cómo sintetizar los componentes de los datos geográficos.

La visión que un SIG tiene del mundo real está dividida en estratos, capas o coberturas. Según esta esquematización, el espacio está constituido por elementos cuya localización precisa es posible gracias a su referenciación mediante un sistema de coordenadas. Además, los elementos espaciales pueden tener atributos temáticos. De este modo se trabaja con dos tipos de datos: los espaciales y los temáticos. Los datos espaciales pueden, a su vez, desglosarse en otras dos componentes: geométrica (x,y) y topológica. Según sea la forma de organizar y

contener estos componentes (los elementos espaciales y sus atributos temáticos) se puede hablar de dos modelos de SIG, con ventajas e inconvenientes que determinarán el uso de uno u otro, dependiendo de la naturaleza de las investigaciones (métodos, escalas, objeto, objetivos...). Son los modelos "raster" y "vectorial".

1.6.1 MODELO RASTER

El modelo raster representa la realidad a través de superficies determinadas que quedan dispuestas en forma de matriz, en la que cada elemento está representado por un "pixel"¹ Star and Estes (1990). La representación cartográfica queda dividida en celdas a manera de las teselas de un mosaico, que agrupadas o en unidades, representan los objetos de la realidad. La representación queda simplificada en formas geométricas, predominando los cuadrados y los rectángulos. La resolución geométrica depende del tamaño de dichas celdas, que representan superficies de 10 y 100 m², y de 1 y 10 km², siendo más extendido el uso de celdas de 100 m². Estas celdas quedan identificadas en un diagrama cartesiano según las filas y columnas que van ocupando, tal y como muestra la Figura 2.

La identificación conforme a este sistema de coordenadas tiene su correspondencia en los sistemas vectoriales que veremos posteriormente.

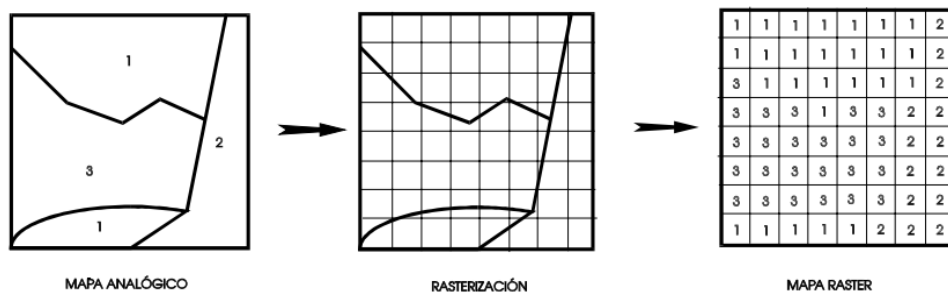


Figura 2: Cambio del Formato Analógico al Digital

El sistema raster lo que realmente hace es digitalizar el mundo real transformando los elementos a representar en píxeles. De este modo, cada celda tiene un valor que la identifica y/o agrupa entre las demás, lo que resulta especialmente útil para representar fenómenos que se manifiestan en el territorio, como por ejemplo:

- Variables físicas, como son la topografía (valor según altura o pendiente) y precipitaciones.
- Regiones, que estarían constituidas por píxeles agrupados con el mismo valor.
- Usos de suelo o cualquier tipo de información determinada por áreas, que tendrían valores
- Asignados según una clasificación adoptada previamente.
- Distancias entre objetos, ya que existe un sistema de coordenadas con una dimensión.
- Determinada para cada uno de los píxeles.
- Emisiones y reflexiones de energía, que son captadas por los sensores de los satélites, cuya información es digitalizada en función del valor de las emisiones.

Las celdas sólo pueden tener un valor, por lo que los objetos representados tienen que estar dispuestos en diferentes archivos según la variable que se esté tratando. Es decir, se debe separar el espacio en diferentes capas, según los aspectos de la realidad que se vayan a representar. Esta es una de las limitaciones del modelo

raster, ya que son necesarias muchas más capas o coberturas que en un modelo vectorial.

Así, por ejemplo, si se tiene que representar un bosque, se le dará homogéneamente un valor a todo el polígono que ocupa, pero si se debe representar el valor de emisiones de infrarrojos, se tiene que pasar a una nueva cobertura en la que representar este fenómeno.

En la codificación de los datos raster se deben de tener en cuenta dos factores:

- **Localización** , que viene determinado por el lugar que ocupa dentro de la matriz
- **Valor**, que viene representado por un número. Número que debe tener un significado establecido, esto es, el bosque vendría representado por un sector de números enteros iguales y agrupados dentro de la matriz, que desde ese momento se identifica como tal fenómeno que representa.

Si se manipulan diferentes coberturas de la misma zona, se debe tener en cuenta que los elementos representados en éstas están localizados por las mismas filas y las mismas columnas, quedando la diferencia sólo para los valores representados.

En el almacenamiento de los archivos raster no necesitan ser incluidas las coordenadas, sólo los valores. De todas formas la cantidad de celdas que son necesarias para obtener una resolución significativa es elevada. Una operación real suele tener en torno a las 200 coberturas por área, y si cada una tiene en torno a las 5.000 celdas, se traduce en un millón de píxeles (Bernhardsen, T., 1992). Como referencia, una imagen raster del satélite Landsat contiene en torno a los 35 millones de píxeles. Por supuesto el volumen de datos depende del tamaño de los píxeles, es decir, si se reduce la cantidad de territorio representado por una celda, aumentando la resolución de la imagen, estaremos a su vez aumentando el número de píxeles y, por lo tanto la extensión del archivo. Por lo general, el problema del

exceso de volumen de los archivos se intenta solventar renunciando a mejores resoluciones cuando se trata de representar grandes extensiones con valores homogéneos, o lo que es lo mismo, se aumentan las celdas a representar por cada pixel.

Como ha podido leerse, una gran ventaja del modelo raster es la fácil instrumentación de la recogida de los datos a tratar y su posterior conversión a información digitalizada. Ello lo hace sumamente útil en estudios de fenómenos con una manifestación perceptible, ya sea por sensores especiales o por la propia percepción sensorial humana. Los modelos raster resultan útiles para el tratamiento de imágenes satélites y escaneadas y para el dibujo automático por plotter e impresoras. Es especialmente útil en estudios de impacto ambiental, ya que es posible traducir la realidad a formato digital con "un antes" y "un después", sobre todo en aquellos fenómenos sólo perceptibles mediante sensores. La operatividad que le proporciona su fácil instrumentalización de cara a la recogida de datos hace también que el margen entre el antes y el después pueda reducirse y precisarse con gran exactitud.

1.6.2 MODELO VECTORIAL.

La representación espacial en un modelo vectorial se basa en la localización de puntos individuales según determinadas coordenadas, viniendo definida por funciones matemáticas, por lo que se pueden representar puntos, líneas parábolas, polígonos (Figura 3), En estos casos los datos incluidos en los SIG deben ser parámetros que se den en una ecuación, tales como radios de círculos, distancias en general, etc. Los puntos, las líneas y los polígonos son las unidades que contienen la información, de manera más compleja que en el modelo raster. Al tratarse de funciones tiene la ventaja de que su representación gráfica mantiene siempre el mismo tamaño del trazo, ya que este no tiene magnitud. Es decir, si se aumenta un cuadrante con un "zoom", las líneas se mantendrán del mismo grosor, mientras que en el raster se trataba de teselas que aumentarían de tamaño.

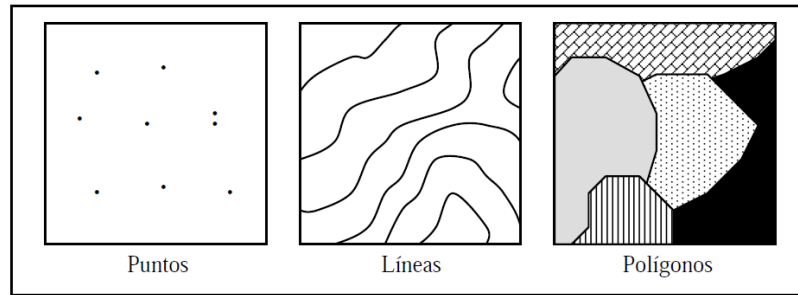


Figura 3 : Estructuras Vectoriales Principales

Los elementos están representados por una función matemática y a su vez mantienen un vínculo con una base de datos. En esta última, cada uno de los elementos tendrá asignado los parámetros identificativos para su función dentro de un registro. Estos parámetros suelen estar contenidos en campos, como por ejemplo "perímetro" en el caso de los polígonos, "longitud" en el caso de las líneas y, por supuesto, las coordenadas de los puntos que lo constituyen o configuran.

En este modelo la unidad básica de representación gráfica es el punto. Una línea estará determinada por un punto de origen y otro final, cada uno con sus respectivas coordenadas. A su vez un polígono estará determinado por varias líneas. En el argot de los SIG se denominan nodos, arcos y polígonos propiamente dichos. Estos elementos representados por registros pueden añadir a los campos contenidos otros atributos, tanto nominales como numéricos, aunque en algunos SIG vectoriales se mantienen los atributos en diferentes bases de datos. Cada elemento llevará una etiqueta que lo vincula a su correspondiente registro dentro de la base de datos y por lo tanto le asigna los atributos que se hayan incluido. De esta forma se consigue llevar hasta su máxima consecuencia la definición de un SIG como una herramienta que aplica la operatividad de una base de datos a la representación cartográfica de sus registros, pero que además toda modificación en su componente gráfica va a tener a su vez su efecto correspondiente en la base de datos. Así, por ejemplo, este modelo de SIG permite la edición de archivos DBF de manera gráfica y matemáticamente asociada a su lugar geográfico, esto es "georreferenciada"

incluyendo todas las posibilidades de reordenación, clasificación y condicionamientos que se pueden aplicar en la base de datos. La mayor ventaja estriba en la posibilidad de asignar varios atributos a un mismo elemento dentro de una misma cobertura, e incluso la posibilidad de asociar varios temas dentro de cada una. Dentro de los modelos vectoriales se distinguen los modelos "spaghetti" y los modelos topológicos. Los modelos "spaghetti" son los más simples y se limitan a identificar sus elementos según las coordenadas. Las fronteras comunes entre polígonos están duplicadas, es decir están digitalizadas dos veces, una por cada polígono que la comparte, siendo la única forma de mantenerlos como unidades independientes. El resultado es una trama de líneas que, en el caso de los polígonos adyacentes, da lugar a la representación de líneas dobles entrecruzadas, mostrando similitud al entramado de espaguetis, de ahí el nombre. Esta circunstancia aleja al sistema de la precisión necesaria para representar la realidad.

La inclusión de topología como factor de identificación de los elementos evita esos inconvenientes. El modelo topológico tiene en cuenta, además de su localización por coordenadas, las relaciones con los elementos adyacentes. Esta relación topológica se mantiene aunque se altere la forma y la extensión de los elementos, lo que significa una gran ventaja a la hora de manipular los datos. Estos modelos presentan ventajas sobre los raster a la hora de analizar redes y realizar análisis de contigüidad y conectividad. La superposición de coberturas vectoriales tiene también más posibilidades de análisis, ya que se mantienen las formas y los elementos de las coberturas, mientras que la superposición de coberturas en los modelos raster se limita a la operación de matrices que recrean nuevas coberturas. Sin embargo, como se apuntó anteriormente, los modelos raster se acoplan mejor al tratamiento de imágenes satélites. No parece clara la imposición de un modelo sobre otro, ya que como se ha venido indicando, las ventajas intrínsecas de cada uno lo hacen indispensables y favorables para determinadas áreas de estudio y sus correspondientes líneas metodológicas. De hecho los SIG, tanto vectoriales como raster, tienen herramientas de conversión para tratar las coberturas con las

diferentes posibilidades de cada uno de los modelos. En la vectorización, las áreas que contienen las mismas celdas son convertidas a polígonos con sus atributos. Del mismo modo, al rasterizar una imagen vectorial, cada celda contenida en un polígono estará representada por un mismo valor correspondiente a un atributo. Por supuesto, en esta conversión se debe tener en cuenta las limitaciones que presentan ambos sistemas y preparar previamente las coberturas. No se crea información al convertir, más bien se puede perder si no se tiene en cuenta esas limitaciones. La conversión, en esencia, sólo sirve para facilitar las labores de análisis de datos.

1.6.3 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA ESTRUCTURA VECTORIAL Y RASTER

Estructura Vectorial

Ventajas:

- Buena representación en los modelos de datos.
- Estructura de datos compacta.
- La topología puede ser descrita explícitamente, por tanto es favorable para un análisis de redes.
- La transformación sencilla de coordenadas (georreferenciación) y georrectificación.
- La representación gráfica es precisa a todas las escalas.
- La recuperación, actualización y generalización de los gráficos y atributos es posible.

Inconvenientes:

- Estructura de datos compleja.

- La combinación de varias redes de polígonos por intersección y solapamiento es difícil y requiere un ordenador potente.
- La representación y ploteado suele ser costosa y cara, particularmente a alta resolución.
- Los análisis espaciales con unidades básicas como polígonos son imposibles sin datos extra, porque éstos se consideran internamente homogéneos.
- Los procesos de interacciones espaciales son más complicados, porque cada entidad espacial dispone de un sistema y forma diferente.

Estructura Raster.

Ventajas:

- Estructura de datos simples.
- Manipulación sencilla mediante localización específica de los atributos de los datos.
- Muchos tipos de análisis espaciales y filtros pueden ser aplicados.
- Los modelos matemáticos son fáciles porque todas las entidades espaciales tienen una forma simple y regular
- La tecnología es barata.
- Muchas formas de datos están disponibles.

Inconvenientes:

- Gran volumen de datos (ocupan más capacidad de disco duro).
- Al utilizar píxeles de gran tamaño para reducir el tamaño de los ficheros, se reduce también la resolución, teniendo como resultado pérdida de información y estructura con poca definición.

- Los mapas Raster en crudo son poco elegantes, aunque esto no llegue a ser un problema.
- Las transformaciones de coordenadas son difíciles y en tiempo demora mucho, aunque se utilice algoritmos especiales resulta que pierda información o se distorsione.

1.6.4 FUENTES DE DATOS GEOGRÁFICOS.

La creación de una base de datos de SIG. Es una operación compleja que puede estar compuesta por la captura de datos, verificación y procesos de estructuración. Debido a que los datos geográficos están disponibles de muchas formas analógicas o digitales, como mapas, fotografías aéreas, imagen satélite, tablas,... Una base de datos espacial puede estar construida por varios modos distintos, que no tienen que ser mutuamente exclusivos. Estos son:

- Adquirir datos de forma digital desde un suministrador de datos.
- Digitalizar datos analógicos existentes.
- Interpolar desde observaciones puntuales a superficies continuas.

En todos estos casos, los datos deben ser registrados y codificados geoméricamente para un sistema de coordenadas generalmente aceptado, de este modo éstos pueden ser almacenados en la estructura de base de datos del SIG. El resultado deseado podrá ser una base de datos actual y completa que soporte los subsiguientes análisis de los datos y modelos.

Las fuentes de datos geográficos son el papel o mapas topográficos digitales o mapas temáticos, que son una representación gráfica de la distribución geográfica de la información espacial. Estos mapas están dibujados a una cierta escala y

muestran los atributos de las entidades en diferentes símbolos o colores. La localización de las entidades de la superficie del terreno se especifica mediante métodos de un sistema de coordenadas convenido.

La mayor importancia de los datos espaciales en un SIG radica en la localización, con respecto a una estructura común de referencia (georreferenciación). Para la mayoría de SIG, la estructura común de referencia está proporcionada por un sistema de coordenadas geográficas.

1.6.5 PASOS PARA CREAR DATOS DIGITALES MEDIANTE ENTRADA MANUAL

La introducción manual de los datos en un SIG requiere 4 etapas principales:

- Entrada de los datos espaciales.
- Entrada de los atributos de los datos.
- Verificación y edición de los datos espaciales y atributos.
- Conexión de los datos espaciales con los atributos (cuando sea necesario).

1.7 ALMACENAMIENTO DE DATOS ESPACIALES

De suma importancia es el almacenamiento de los datos en el ordenador, tanto para su manejo como para su recuperación posterior. Este apartado hace mención a los tipos de almacenamiento más comunes dependiendo del formato que se emplee.

1.7.1 TIPOS DE ALMACENAMIENTO DE LOS DATOS

La construcción de una base de datos digital es un proceso costoso y que consume mucho tiempo. Es esencial que los mapas de información digital sean transferidos de la memoria del disco duro local del ordenador a un medio de almacenamiento permanente, donde se pueda preservar con seguridad.

Los datos digitales quedan almacenados en soporte magnético u óptico, sin embargo su formato es variable, refleja el costo del soporte, dónde y con qué frecuencia estos datos van a ser usados.

El almacenamiento puede realizarse atendiendo a dos razones:

- **Almacenamiento extraíble:** Las formas de almacenamiento extraíbles o portátiles están en soporte magnético u óptico y pueden ser extraídas del dispositivo del ordenador y usadas en cualquier otro dispositivo del mismo tipo. Éstos se usan para copias de seguridad (backing up) de datos que se están utilizando actualmente, y para archivar aquellos que ya no se usan.
- **Almacenamiento no extraíble o fijo y redes:** Es el tipo de almacenamiento que se realiza en el soporte magnético del disco duro del ordenador. Con la caída de precios del megabyte de disco duro y las mayores capacidades de almacenamiento que se alcanzan (cientos de Gb), ya no es necesario almacenar los datos en otros medios por falta de espacio, y todos los datos se pueden almacenar en un único disco duro.

El principal problema radica en compartir los datos; los usuarios tendrán que utilizar sólo el ordenador en el que se hayan almacenado o hecho copias de sus datos para poder trabajar con ellos. Esto es obviamente un inconveniente y conduce a una gran duplicación en el almacenamiento de los datos, generando dificultades a la hora de conocer cuál es la versión más reciente de la base de datos. Para minimizar

estos problemas las organizaciones han optado por el trabajo en red, donde un número de usuarios puede acceder a los mismos datos y software sin necesidad de duplicarlos.

Hay dos tipos principales de redes: Local Area Network (LAN) y Wide Area Networks (WAN). Las LAN son ordenadores conectados entre sí, juntos en un mismo espacio. Las WAN son ordenadores que se conectan desde lugares geográficamente diferentes. La unión de los ordenadores se hace por medio de cable (cobre o fibra óptica) o sin cable (radio, microondas, láser e infrarrojos). Normalmente se emplean estos últimos en las WAN.

1.7.2 FORMATOS DE ALMACENAMIENTO DE LA ESTRUCTURA VECTORIAL Y RÁSTER.

El almacenamiento de la información geográfica depende del tipo de números (byte, entero o real) y del tipo de archivo (ASCII, binario o binario empaquetado) que se utilicen.

Los números de un mapa vectorial se presentan de forma entera o real y se archivan en formato ASCII o binario. En cambio, en un mapa raster pueden presentarse de forma byte, entera o real y se archivan en formato ASCII, binario o binario empaquetado.

Tipos de formatos numéricos:

- Los números de tipo byte son enteros positivos en el rango de 0 a 255. Este tipo de datos son un subrango dentro de los de tipo entero. Son usados en los casos donde el rango numérico es más limitado y sólo requieren para su almacenamiento 8 bits (1 byte), ocupando menor espacio en el disco duro (la mitad de espacio en el disco duro con respecto a los archivos enteros normales).

- Los números enteros son números sin parte fraccionaria o componente decimal (como 1, 2, 3, etc.), con un rango que oscila de -32768 a +32767. Estos se utilizan para su almacenamiento 16 bits (2 bytes), que es el doble que el tipo byte y la mitad que el formato real. Los enteros pueden utilizarse para representar números en sí o como códigos para representar atributos no numéricos o categorías de datos. Normalmente se utilizan los números enteros como estándar en la creación de mapas.
- Los números reales admiten parte fraccionaria y se utilizan cuando las variables son continuas y deben ser almacenados con gran precisión o cuando el rango de los datos sobrepasa los rangos de los números enteros (p.e. 6,2654). Los datos reales pueden almacenar un rango de $\pm 3.37 \cdot 10^{38}$ a $\pm 8.43 \cdot 10^{-37}$, con una precisión de siete cifras decimales significativas, ya que reservan algunos bits para la parte decimal y el resto para las cifras elevadas que utilizan potencias de 10. Por consiguiente, estos números no se codifican de forma exacta y éstos pueden tener errores de redondeo cuando se utilizan cifras más grandes que las que permiten. Los números reales se almacenan en formato de coma flotante, y requieren más memoria (32 bits, es decir, 4 bytes por número). Este tipo de datos se encuentra sobre todo en los Modelos Digitales de Elevación (M.D.E.).

1.7.3 TIPOS DE ARCHIVOS DE ALMACENAMIENTO DE LOS DATOS NUMÉRICOS

Archivos ASCII: ASCII es un acrónimo de American Standard Code for Information Interchange (Código Estándar Americano para Intercambio de Información). Se trata de un sistema de caracteres de codificación reconocido casi universalmente (letras del alfabeto, números, símbolos, etc.). Los archivos de datos que contienen

caracteres en este sistema de codificación se denominan a menudo archivos ASCII, aunque también se conocen comúnmente como archivos de "texto". Este sistema de codificación utiliza grupos de 8 dígitos binarios para representar los números de 0 a 255. Cada uno de estos números representa un carácter. Por ejemplo, el número 65 representa la letra A mayúscula. Así, cada carácter ASCII necesita sólo un byte (8 bits) de memoria para su almacenamiento. Hay claramente, más códigos que letras del alfabeto, números, etc. Debido a su reconocimiento universal, es el sistema de codificación más utilizado para intercambio entre sistemas informáticos. No obstante, no es el modo más eficiente de almacenar datos numéricos.

Archivos binarios: Es un formato de archivo de datos en que los números se almacenan en representación binaria. El sistema binario está fundamentado en base 2, donde los números se cuentan usando 1 y 0, y los datos se representan usando series de columnas donde el primer conteo tiene unidad 2^0 , el segundo conteo 2^1 , el tercero 2^2 , y así sucesivamente. Por ejemplo, la secuencia binaria 0010 representa el valor 2 del sistema decimal, la conversión se hace tal como aparece a continuación:

$$2^3 * 0 + 2^2 * 0 + 2^1 * 1 + 2^0 * 0 = 2(\text{en base } 10)$$

Los archivos binarios requieren 1 byte/número para los datos enteros, y 4 bytes/número para los datos reales. Los archivos binarios son más eficientes que los archivos ASCII para almacenar datos numéricos. Por ejemplo, el número entero 30.000 necesita 5 bytes para almacenarse en caracteres ASCII y solamente 2 bytes para almacenarse como un número entero codificado en sistema binario (111010100110000), en el que cada carácter binario requiere sólo un bit.

Archivos Binarios Empaquetados: Se trata de una Codificación por Grupos de Longitud Variable (Run-Length), que es una técnica de compresión de datos para

imágenes ráster, cuyas celdas contienen datos enteros. Supongamos una imagen que contiene una fila con los siguientes valores:
44444455555555666622222222222233333

Codificación por grupos de longitud variable para esta línea sería: 64854612253 que indica 6 cuatros, 8 cincos, 4 seises, 12 doses y 5 treses. Esta codificación indica la longitud de la secuencia de los códigos enteros de las celdas. La codificación por grupos de longitud variable se corresponde con la estructura de almacenamiento denominada binario empaquetado. Como el nombre sugiere, los códigos se almacenan en archivos binarios. (Chrisman, 1997).

1.7.4 TIPOS DE ALMACENAMIENTO EN SOFTWARE DE SIG.

La mayor parte del software SIG no suele almacenar la información de una sola imagen en un único archivo. Normalmente se encuentra dividida en archivos de datos y archivos de documentación como en Idrisi, por otra parte también se encuentra separada en archivos de bases de datos y archivos de referencias y características geométricas como en ArcGIS, de forma que en cada uno de ellos se tienen diferentes datos sobre una misma imagen. Al descomponer una imagen en distintos archivos más simples es una gran ventaja, ya que permite poder trabajar o modificar sobre el archivo en cuestión sin tener que manipular toda la imagen. La forma de almacenamiento de una imagen depende del formato (vectorial o en ráster). A continuación, se indican las características de estos dos formatos.

En formato vectorial se suelen encontrar normalmente tres tipos de vectores: puntos, líneas y polígonos, dependiendo del tipo de datos que tengamos que manejar se utilizará un tipo u otro. Cabe mencionar que dependiendo del software utilizado los datos pueden estar en archivos de documentación y datos espaciales,

o en archivos de bases de datos y de referencias geométricas. En el caso de tener almacenados los datos en un mismo par de archivos, compuestos por un archivo que contiene los datos espaciales y su correspondiente archivo de documentación, el archivo de datos se puede almacenar en distintos formatos (ASCII o binario). Esta forma de almacenamiento se lleva a cabo en Idrisi. Para tener una mejor idea se incluye un ejemplo de la representación de un archivo vectorial de puntos y sus respectivos archivos de documentación y de datos.

Si se almacenan los datos en archivos de bases de datos (archivos de referencia) y características geométricas, entonces los datos están estructurados de una forma muy versátil a la hora de introducir nuevas características para las zonas delimitadas.

En formato ráster se suele utilizar el primer modelo, en el que los datos se codifican en un archivo de datos y en otro de documentación que hace referencia a estos datos. Dependiendo del programa que se utilice se pueden tener diferentes tipos de categorización de los datos.

Este formato ráster se puede almacenar en archivos ASCII, binario y binario empaquetado, siguiendo el orden de mayor a menor capacidad. Aunque, comparando con el formato vectorial los documentos ráster suelen ocupar una cantidad muy superior.

Por último, existe una tercera forma de almacenamiento de los mapas en un formato propio que permite agrupar los mapas ráster y vectoriales en una composición. El sistema Idrisi, al igual que ArcGIS, permite realizar una composición de capas ráster y vectoriales en un mismo diseño y guardarlo en formato mapa, que se trata de un formato propio del programa, en el cual se guarda la ruta de los mapas que forman parte de la composición.

2 ArcGIS 10

ArcGIS es un “software” de Sistema de Información Geográfica diseñado por la empresa californiana Environmental Systems Research Institute (ESRI) para trabajar a nivel multiusuario. Representa la evolución constante de estos productos, incorporando los avances tecnológicos experimentados en la última década en el área de la informática y telecomunicaciones para capturar, editar, analizar, diseñar, publicar en la web e imprimir información geográfica. Bajo el nombre ArcGIS Desktop se comercializan tres licencias: ArcInfo, ArcEditor y ArcView, que comparten un mismo núcleo y un número de funciones que varía de la versión más completa (ArcInfo) hasta la más simple (ArcView). Cada una de ellas está compuesta por dos aplicaciones diferentes:

- ArcMap 10 (semejante a ArcView 3.x).
- ArcCatalog 10 (semejante al Explorador de Windows).

Por otra parte, integrado en éstos dos se encuentra ArcToolbox (conjunto de herramientas de conversión y análisis de datos). Empleando estas tres aplicaciones juntas se puede realizar cualquier tarea SIG: creación, edición, análisis y representación de información geográfica.

2.1 COMPONENTES CLAVE DE ArcGis:

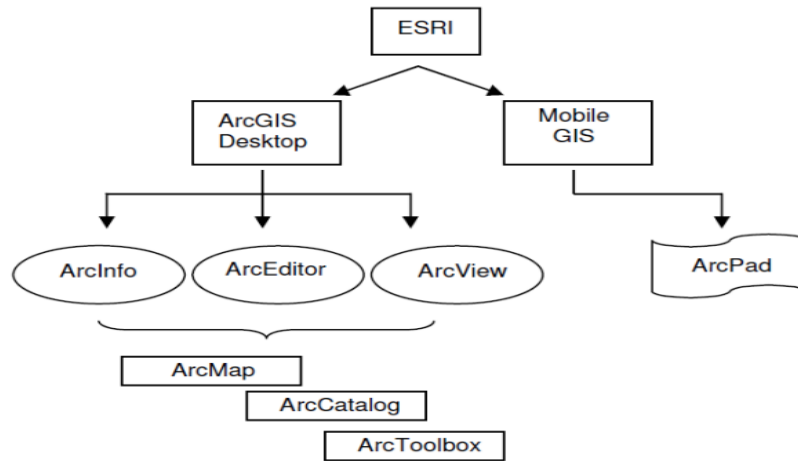


Figura 4: Esquema de la arquitectura de ArcGIS ORDUÑA, 2007

- **ArcGIS Desktop:** Es una arquitectura integrada de los productos SIG de la casa ESRI (Figura 4) que incluye ArcReader, ArcView, ArcEditor y ArcInfo. Estos cuatro productos comparten una misma interface, por lo tanto tienen el mismo aspecto y trabajan de la misma manera. La diferencia está en la funcionalidad de cada uno de estos productos, que va desde la más básica ArcReader hasta la de altas prestaciones de ArcInfo (ORDUÑA, 2007).
- **ArcInfo:** Es el producto funcionalmente más rico en la familia de ArcGIS. Incluye toda el potencial que puede dar ArcView y ArcEditor, de forma adicional ArcInfo añade el entorno de geoprocésamiento de ArcGIS Desktop, más de 100 herramientas nuevas válidas para trabajar con cualquier formato vectorial de los soportados por ArcGIS, y unas 50 herramientas específicas para formato cobertura. Dispone de funcionalidades de conversión de datos a otros formatos y sistemas de proyección, así como toda la funcionalidad aportada por el entorno de comandos de ArcInfo Workstation (ORDUÑA, 2007).

Las organizaciones utilizan el poder de ArcInfo todos los días para crear, editar y analizar sus datos con el fin de tomar mejores decisiones, más rápido. ArcInfo es el estándar de facto para el SIG.

Con ArcInfo, puede:

- Realizar operaciones avanzadas de datos de SIG de análisis y modelado.
- Disfruta de herramientas diseñadas para el análisis de superposición, análisis de proximidad, análisis de superficie, y el procesamiento de la trama y la conversión.
- Publicar y convertir los datos en muchos formatos.
- Crear y gestionar bases de datos geográficas personal, bases de datos geográficas multiusuario, y conjuntos de datos de características.
- El uso de alta gama herramientas de cartografía para generar calidad profesional, listos los mapas de la publicación.
Diseño personalizado y símbolos lugar sofisticado de anotación y las etiquetas en sus mapas.
- **ArcEditor:** Diseñado principalmente para crear y editar geodatabases. Se puede crear y modificar bases de datos y esquemas de bases de datos para ficheros shape, coberturas, geodatabases personales, y corporativas o multiusuario; así como la posibilidad de implementar topología basada en reglas. Sin embargo, el ArcEditor no va a ser utilizado durante la producción del nuevo mapa de cobertura (ORDUÑA, 2007).

- **ArcView:** Incorpora funciones avanzadas de visualización, análisis y consulta de datos, así como la capacidad de crear y editar datos geográficos y alfanuméricos. Asimismo, contiene ArcMap, ArcCatalog y ArcToolbox (ORDUÑA, 2007).
- **ArcMap:** Permite realizar mapas a partir de capas o datos espaciales, elegir colores y simbología, interrogar a las bases de datos, analizar relaciones espaciales y diseñar mapas o salidas impresas. La interfaz de ArcMap se compone de una tabla de contenidos donde se listan todas las capas que forman el mapa, una ventana donde se muestra el mapa, y una serie de menús y herramientas para trabajar con las capas y mapas (ORDUÑA, 2007).
- **ArcCatalog:** Permite manipular y acceder la información geográfica de un modo fácil. Se puede agregar las conexiones de la información geográfica con que se está trabajando al Catálogo; también, se pueden conectar los fólder con los discos locales y compartir fólderes y bases de datos que están disponibles en la red de trabajo. Después de construir el Catálogo, es posible observar diferentes vistas para ver las fuentes de información geográfica que están disponibles con su respectiva conexión y explorar los contenidos individuales de las fuentes de datos. Es permisible explorar toda la información del mismo modo en que fue guardada. Además, el programa posee herramientas para organizar y darle mantenimiento a la información. Los datos son presentados en una estructura de árbol y a la derecha de la pantalla se pueden observar los archivos espaciales en miniatura, por ejemplo se pueden previsualizar las capas de forma ampliada y obtener los datos relativos al origen y contenidos de ese archivo (ORDUÑA, 2007).
- **ArcToolbox:** Permite convertir los datos espaciales de un formato a otro, así como introducir un sistema de referencia o cambiar proyecciones de los datos.

Las herramientas se encuentran organizadas temáticamente y mediante el empleo de intuitivos asistentes, permiten realizar dichas funciones de forma sencilla e inmediata; su poder radica en funciones para análisis espacial (ORDUÑA, 2007).

2.2 REQUISITOS DEL SISTEMA

Los requisitos del sistema describen el entorno de pre-requisito y arquitectura de la computadora para ejecutar una versión particular del software de Esri, incluidos los sistemas operativos soportados y las limitaciones, requisitos de hardware como la memoria, potencia de procesamiento, y los requisitos de software, como los navegadores soportados, los controladores y los marcos de desarrollo.

Procesador:

- 32-bit: Intel® Pentium® 4 HT, Core™ Duo, Xeon® o 100% compatible
- 64-bit: Intel 64 (EM64T), AMD 64, o equivalente
- Procesadores multi-core son altamente recomendados.

Memoria (Ram): Mínimo de 2 GB, se recomienda una capacidad más alta

Espacio en el disco

- 4 GB para la instalación completa del software
- 7 GB para la instalación completa de los datos de ejemplo.

Sistemas Operativos:

ERDAS IMAGINE, ER Mapper y LPS 2011:

- Windows® 7 x32 y x64 o superior, Professional y Ultimate

- Windows Vista® x32 y x64 SP2 o superior, Business, Enterprise y Ultimate
- Windows XP Professional x323 y x64 SP3 o superior

ERDAS IMAGINE 2011:

- Windows Server®2008 x32 y x64 SP2 o superior

Software:

- OpenGL 1.1 o superior, es necesitado para IMAGINE VirtualGIS®, Image Drape, LPS Terrain Editor, LPS Stereo Point Measurement y Stereo Analyst para Erdas Imagine. Microsoft Windows ofrece un driver OpenGL genérico para soportar la tarjeta gráfica.
- Adobe®Reader® o superior.
- Internet Explorer®7 y superior con JavaScript habilitado.
- Firefox®3 y superior von JavaScript habilitado.
- Java Runtime 1.6.0.20 es instalado con ERDAS Foundation.
- Microsoft DirectX® 9c o superior.

Dispositivos Gráficos:

2D, perspectiva y anaglifo:

- Resolución de 1280 X 1024 X 32 o superior.
- Video de la memoria RAM 128 MB o superior.
- Últimos drivers de la tarjeta de video.

Tarjetas gráficas para visualización Stereo:

- NVIDIA® Quadro® 6000, 5000, 4000, 2000, 600.
- NVIDIA Quadro FX 5500, 5600, 5800.
- NVIDIA Quadro FX 4500, 4600, 4800.
- NVIDIA Quadro FX 3400/4400, 3450m 3500, 3800.
- AMD ATI FirePro™ V8800, V8750, V8700.
- AMD ATI FireGL™ V8600.

Monitores para visualización stereo:

- Planar SD 3D/Stereoscopic.
- Planar SA2311W 3D Vision™ Ready Monitor7.
- Monitor LCD de 120 Hz con NVIDIA® 3D Vision™ Kit7.
- Monitor True3Di Stereoscopic (19" versión tested).
- RealD (Stereographics) CrystalEyes.
- RealD Monitor ZScreen.

Periféricos:

- Unidad de DVD
- Mouse (Scroll Wheel)

Para la seguridad del software, requiere uno de los siguientes:

- Tarjeta Ethernet con TCP/IP configurada ó
- Un puerto USB para la llave ó
- Puerto paralelo standard (DB25) para la llave

Para la colección avanzada de datos con controladores manuales:

- TopoMouseTM o TopoMouse USBTM
- Mouse Immersion 3D
- MOUSE-TRAK
- Stealth 3D (Immersion), tipo S3D-E, puerto Serial
- Stealth Z, modelo S2-Z, version USB
- Stealth V, tipo S3-V (deberá ser agregado como un dispositivo serial)
- Mou7se 3Dconnexion SpaceExplorer
- EK2000 Hand Wheels
- EMSEN Hand Wheels

Interoperabilidad con ArcGIS:

- ERDAS IMAGINE, ER-Mapper y LPS puede ser instalado con seguridad en un computador que contenga ArcGIS® 9.3.1 o 10.
- ERDAS IMAGINE y LPS 2011 pueden interactuar con Personal Geodatabase (extensión .mdb ó .gdb)
- ERDAS IMAGINE y LPS 2011 pueden interactuar con Geodatabase de ArcGIS Server 10 (ArcSDE).

Para leer o interactuar con una Geodatabase, se debe:

- Instalar y licenciar la versión apropiada de ArcGIS 10.
- Instalar el IMAGINE Geodatabase Support (basado en ArcEngine 10), el cual no requiere licencia.

3 DESASTRE NATURAL

Un desastre natural es un evento súbito, calamitoso que conlleva daño, pérdida o destrucción y se presenta de manera inesperada, produciendo un profundo impacto

en el medio ambiente natural y en el sistema socio-económico, generando como resultado la pérdida de vidas humanas como de bienes materiales y daños a la infraestructura.

Los fenómenos naturales, como la lluvia, terremotos, huracanes o el viento, se convierten en desastre cuando superan un límite de normalidad medido generalmente, a través de un parámetro o escala que permite cuantificar la magnitud del evento.

Algunos desastres son causados por las actividades antrópicas, que alteran las condiciones y ciclos normales de un medio ambiente. Entre ellos tenemos la contaminación del medio ambiente, la explotación errónea e irracional de los recursos naturales renovables, como los bosques y el suelo y no renovables como los minerales; la construcción de viviendas y edificaciones en zonas de alto riesgo. Los efectos de un desastre pueden amplificarse debido a una mala planificación de los asentamientos humanos, falta de medidas de seguridad, planes de emergencia y sistemas de alerta ineficaces, elevando el nivel de pérdidas generado por el evento.

3.1 MANEJOS DE DESASTRES NATURALES

Se entiende por manejo de desastres o Plan de urgencias, la organización de diferentes cuerpos de emergencia acompañando de políticas administrativas, actividades de prevención y aprendizaje para la población civil en las diferentes etapas de un desastre.

Está sustentado en el conjunto de conocimientos, medidas, acciones y procedimientos que acompañado de uso racional de recursos humanos y materiales, se orientan hacia el planeamiento, organización, dirección, ejecución y control de las actividades, que permitan evitar o reducir los efectos de los desastres sobre las poblaciones y las infraestructuras de servicios y productivas.

3.2 COMO MEDIR EL IMPACTO DE UN EVENTO

El impacto de los desastres en las actividades humanas ha sido un tema tratado en los últimos años en un amplio número de publicaciones, desarrolladas por diversas disciplinas que han conceptualizado sus componentes en forma diferente, aunque en la mayoría de los casos de una manera similar a la propuesta por la UNDRO (Organización de las Naciones Unidas para el Socorro de Desastres) y la UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) en Natural Disasters and Vulnerability Analysis (UNDRO 1979) que permitió establecer las siguientes definiciones:

- **Amenaza, Peligro o Peligrosidad (Hazard - H).** Es la probabilidad de ocurrencia de un suceso potencialmente desastroso durante cierto período de tiempo en un sitio dado.
- **Vulnerabilidad (Vulnerability -V).** Es el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo resultado de la probable ocurrencia de un suceso desastroso, expresada en una escala desde 0 o sin daño a 1 o pérdida total.
- **Riesgo Específico (Specific Risk - Rs).** Es el grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un suceso particular y como una función de la amenaza y la vulnerabilidad.
- **Elementos en Riesgo (Elements at Risk - E).** Son la población, los edificios y obras civiles, las actividades económicas, los servicios públicos, las utilidades y la infraestructura expuesta en un área determinada.

- **Elementos Bajo Riesgo (E).** como la población, las edificaciones y obras civiles, las actividades económicas, los servicios públicos, las utilidades y la infraestructura expuesta en un área determinada.
- **Riesgo Total (Total Risk - Rt).** como el número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica debido a la ocurrencia de evento desastroso, es decir, el producto del Riesgo Específico (Rs) y los elementos bajo riesgo (E).

Y planteo la siguiente formula:

$$R_t = E * R_s = E * H * V$$

Conservando esta conceptualización propuesta por el grupo de expertos reunidos en 1979, Cardona (1985) propuso en el Instituto de Ingeniería Sísmica y Sismología - IZIIS, de Skopje Yugoslavia, eliminar la variable Exposición (E) por considerarla implícita en la Vulnerabilidad (V), Originalmente, esta formulación fue presentada por Fournier d'Albe (1985), Milutinovic y Petrovsky (1985) y más tarde, por Coburn y Spence (1992). La expresión de riesgo en función de la amenaza y la vulnerabilidad ahora ampliamente aceptada en los campos técnicos y científicos, cada vez más en las ciencias sociales, fue formulada por Cardona de la siguiente manera:

$$R_t = |f(A_i, V_e)|_t$$

Una vez conocida la amenaza o peligro A_i , entendida como la probabilidad de que se presente un evento con una intensidad mayor o igual a i durante un período de exposición t , y conocida la vulnerabilidad V_e , entendida como la predisposición intrínseca de un elemento expuesto e a ser afectado o de ser susceptible a sufrir una pérdida ante la ocurrencia de un evento con una intensidad i , el riesgo R_t puede entenderse como la probabilidad de que se presente una pérdida sobre el elemento como consecuencia de la ocurrencia de un evento con una intensidad mayor o igual a i .

3.3 PROBABILIDAD

La probabilidad se refiere al grado de certeza de ocurrencia de un evento en particular. Usualmente está basada en la frecuencia histórica; Sin embargo para el propósito de toma de decisiones, las probabilidades rara vez están basadas estrictamente sobre información histórica, generalmente son reajustadas tomando en consideración la información disponible en el momento, a lo cual se puede hacer referencia como probabilidad subjetiva. Por ejemplo, la observación de que hubieran ocurrido tempestades tropicales recientemente en otras partes del mundo, puede dar como resultado que se asigne una probabilidad subjetiva mayor a una tempestad local, en relación a lo que resultaría en base únicamente a frecuencias históricas (OEA, 1993).

3.4 RIESGO

La Real Academia Española en su diccionario de la lengua define riesgo como “contingencia (posibilidad de que algo suceda o no suceda) o proximidad (cualidad de cercano, que dista poco en el espacio o en el tiempo) de un daño (detrimento, perjuicio, menoscabo, dolor o molestia, pérdida, deterioro,..)” Esta definición hace hincapié en la incertidumbre y la cercanía o no del efecto del evento potencialmente dañino. Estas cualidades están impregnadas de variabilidad factorial en el orden espacial y sobre todo en el temporal. Por tanto, el concepto de riesgo por definición es imposible de cuantificar salvo que se utilicen escenarios determinados, términos relativos, órdenes de magnitud o probabilidades de ocurrencia.

Por ende se puede establecer el riesgo como el potencial de ocurrencia de consecuencias adversas, pérdida, daño o perjuicio, o como la posibilidad (suerte, azar) de pérdida y se puede reducir la susceptibilidad y amenazas. Pero existen dos visiones del concepto de riesgo con trayectorias un tanto paralelas, que son las de

la ciencia social y las ciencias naturales e ingenierías que hemos denominado sociológica y tecno-natural.

Desde un punto de vista sociológico Cardona A. (1997) define el riesgo como “posibilidad de ocurrencia de situaciones límites o de relaciones extremas entre fenómenos físicos, la estructura y organización social” (Thomas y Suavita, 1994, Cardona, 1993, Lavell, 1993). En esta definición se destaca que el riesgo no significa la ocurrencia de situaciones límite, es decir, de desastres y el estar en riesgo es una condición anterior a la ocurrencia de dichos eventos que pueden convertirse en desastres.

Desde el punto de vista tecno-natural se ha hecho un esfuerzo en la cuantificación del riesgo, por lo que se define también como las consecuencias negativas más probables (daños, pérdidas, etc.) que podrían resultar del impacto de un evento sobre la exposición, (valores en riesgo) cuyas vulnerabilidades están relacionadas con el evento específico. El riesgo se considera así, como una combinación de peligrosidad (hazard), vulnerabilidad (vulnerability) y exposición (exposure). Una clasificación clásica de los riesgos es ordenarlos según la génesis del peligro, en dos grupos principales (Cardona A, 1997):

- Riesgos naturales: cuyo origen son los procesos físico-químicos y biológicos que gobiernan la dinámica natural en la Tierra, que incluyen los geológicos (litosfera e hidrosfera) y biológicos (biosfera).
- Riesgos antrópicos: cuyo origen es el ser humano, que incluyen los Tecnológicos (accidentes industriales, nucleares, de tráfico,...), los Económico-financieros (una inversión o un crédito fallidos) y los Sociales, ligados a los hábitos de vida (tabaquismo) o a problemas y conflictos (guerra, delincuencia, terrorismo,...) (Spence 1990).

No obstante no existe un límite claro de clasificación, ya que muchos riesgos se interrelacionan entre sí como por ejemplo, los riesgos naturales inducidos o mal gestionados por el hombre y muchos riesgos tecnológicos que son en realidad sociales.

3.5 RIESGO Y DESASTRE

Un desastre natural no existe, lo que conocemos como desastre natural es el resultado de una amenaza como deslizamientos, terremoto u otro fenómeno que se encuentran con una población vulnerable modificando su calidad de vida además de provocar pérdidas humanas y materiales y se debe entender que muchos desastres ocurren por la forma en que nos relacionamos con el medio habiente sin tener en cuenta el riesgo que con lleva.

Una concepción más técnica se enuncia en García, J. (2005). Cuando un evento produce unas consecuencias socialmente inaceptables podemos hablar de un evento de alto riesgo, incluso si su probabilidad de ocurrencia es baja. Se puede evidenciar con un gran terremoto catastrófico será un evento de alto riesgo pese a que su frecuencia sea baja. De igual forma, un evento de impacto bajo y que se produce con frecuencia podría considerarse un riesgo alto si las consecuencias acumuladas son inaceptables.

Un desastre no puede confundirse con la ocurrencia de un fenómeno de origen natural o antrópico, es decir. El evento físico, es una condición necesaria más no suficiente para hablar de desastre. Tampoco se puede reducir a un hecho externo o aislado y mucho menos determinarlo por los daños económicos y sociales que ocasiona un desastre es “cualquier evento que tiene un mínimo de diez muertos, cien afectados o que conduce a la llamada de asistencia externa (internacional)” (Lavell, A. 1996). Estas definiciones provienen de una visión fiscalista y tecnocrática,

convirtiendo a los desastres en hechos totalmente anormales y dejando toda su responsabilidad a eventos físicos, que son impredecibles, inevitables, inmanejables o “de origen divino”; negándose así los procesos históricos y sociales que han tenido que ver en la construcción de las condiciones que permiten la ocurrencia de un desastre.

Para Dynes R (1994) “un desastre es una ocasión normativamente definida en una comunidad, cuando se hacen esfuerzos extraordinarios para proteger y beneficiar algún recurso social cuya existencia se considera amenazada”. Esta afirmación permite evitar la inclusión de parámetros matemáticos para definir un desastre y deja dicha consideración a las condiciones particulares del lugar o región, pero no tiene en cuenta explícitamente el proceso histórico de causalidad.

De otro lado para Molano et al. (1993) un desastre es un evento producto de “un desenlace nefasto de la trama socio-natural, de tal manera que se disloca la vida social y para enfrentarlo se hace necesaria la acción colectiva. Estas definiciones de desastre permiten superar las anteriores, situando el énfasis en las relaciones históricas de apropiación, transformación y adaptación Individuo - Sociedad – Naturaleza, en donde el desastre no es un hecho aislado sino “un momento concreto de lo normal” (Lavell, A. 1996). De esta manera podemos considerar un desastre como: “una ocasión de crisis o stress social, espacio-temporalmente definida, donde una sociedad o grupos de esta, sufren daños y/o pérdidas y alteraciones en su funcionamiento rutinario, con tal magnitud e intensidad que se exige la participación de agentes externos en su atención y resolución” En esta misma dirección la EIRD de la ONU define desastre como “lo que sucede cuando la ocurrencia de un fenómeno natural afecta a un sistema social vulnerable”. Los fenómenos naturales solo generan impactos por su interacción con la gente y su entorno; estos pueden llegar a tener dimensiones catastróficas, dependiendo de la coyuntura de las poblaciones del lugar. Según Olcina et al. (2002) “...riesgo natural es la posibilidad

de que un territorio y la sociedad que lo habita pueda verse afectado por un fenómeno natural de rango extraordinario. La catástrofe es el efecto perturbador que provoca sobre un territorio un episodio natural extraordinario y que a menudo supone la pérdida de vidas humanas. Si las consecuencias alcanzan tal magnitud que ese territorio necesita ayuda externa en alto grado se habla de desastre, concepto que alude al deterioro que sufre la economía de una región y al drama social provocado por la pérdida de numerosas vidas

3.6 AMENAZA

Es la probabilidad de que un fenómeno ocurra en un determinado tiempo o lugar, generando así pérdidas humanas, pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales; dicho esto la amenaza real de una zona es la sumatoria de la amenazas individuales, que puedan ser generadas por diferentes fenómenos naturales o antrópicos que concurren en un mismo lugar y así aumentar el riesgo de un desastre.

Pero es de entender que los fenómenos naturales no constituyen una amenaza en los lugares que no estén habitados, ya que hacen parte del proceso normal de desarrollo de un medio ambiente; por ello se debe considerar como una amenaza los fenómenos que de manera directa o indirecta, sean generados por acciones antrópicas en un ecosistema o en los diferentes ciclos que intervienen en un nicho de un ecosistema.

3.7 VULNERABILIDAD

Es la probabilidad que tiene una comunidad o área geográfica de ser afectada por una amenaza o riesgo potencial de desastre, la cual se establece a través de estudios técnico. Se considera que una comunidad es vulnerable cuando habita una zona inestable o cuando cuenta con una infraestructura insuficiente o mal diseñada, de tal manera que no cuenta con la capacidad de resistir, superar y recuperarse después de un desastre.

Los factores que componen la vulnerabilidad son la exposición, susceptibilidad y resiliencia, expresando su relación en la siguiente fórmula.

$$\text{Vulnerabilidad} = \text{Exposición} \times \text{Susceptibilidad} / \text{Resiliencia}$$

Exposición es la condición de desventaja debido a la ubicación, posición o localización de un sujeto, objeto o sistema expuesto al riesgo.

Susceptibilidad es el grado de fragilidad interna de un sujeto, objeto o sistema para enfrentar una amenaza y recibir un posible impacto debido a la ocurrencia de un evento adverso.

Resiliencia es la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas.

3.8 GRADO DE VULNERABILIDAD

Según lo define IFRC, (2010), el grado de vulnerabilidad de las personas o regiones y el alcance de su capacidad para resistir y hacer frente a los peligros y recuperarse de los desastres dependen de factores físicos, económicos, sociales y políticos. Desde luego, la pobreza contribuye de manera importante a la vulnerabilidad.

Es más probable que las personas pobres vivan y trabajen en zonas expuestas a peligros potenciales y menos probables que dispongan de los recursos necesarios para hacer frente a un desastre, normalmente, en los países más ricos, las personas poseen una capacidad mayor para resistir a los efectos de un peligro. Suelen estar

mejor protegidas frente a los peligros y disponer de sistemas de preparación. Además, la solidez de los medios de subsistencia y los ingresos mayores incrementan la resiliencia de las personas y les permiten recuperarse más rápidamente de un desastre.

4 MAPAS Y SIG

Un mapa es una representación gráfica y métrica de una porción de territorio generalmente sobre una superficie bidimensional. El que el mapa tenga propiedades métricas significa que ha de ser posible tomar medidas de distancias, ángulos o superficies sobre él y obtener un resultado que se puede relacionar con las mismas medidas realizadas en el mundo real.

Un sistema de información geográfica es una integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión geográfica.

Esto permite realizar acciones sencillas como medicar escalas, editar viñetas así como de crear nuevos mapas sin afectar los anteriores, también puede generar modelos de evento o suceso referido a un sistema de coordenadas terrestre y construido para satisfacer unas necesidades concretas de información permitiendo almacenar, editar, analizar, compartir y mostrar la información geográficamente referenciada.

Para concluir un SIG son herramienta que permiten a los usuarios modificar un mapa digital o llegado crear uno nuevo permitiendo realizar consultas interactivas, analizar la información espacial, editar datos, esquemas y presentar los resultados de todas estas operaciones.

5 SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIÓN EN MASA

De acuerdo con Cobos G. et al (2011), Se entiende como movimiento de ladera el movimiento de una masa de roca, suelo o derrubios, de una ladera en sentido descendente. Se incluye cualquier tipo de movimiento en masa (se excluye por tanto la erosión), excepto la subsidencia y el hundimiento kárstico (Fernández, 2001).

Otra definición que se manifiesta en términos análogos es la aportada por Corominas y García Yagüe (1997) definiendo movimientos de ladera como los movimientos del terreno o desplazamientos que afectan a los materiales en laderas o escarpes. Estos desplazamientos se producen hacia el exterior de las laderas y en sentido descendente como consecuencia de la fuerza de la gravedad. Los hundimientos de cavidades o de materiales están excluidos de estos movimientos (Varnes, 1978).

Según los estudios de Varnes (1958, 1978 y 1984), los movimientos de ladera se pueden clasificar en función del mecanismo de rotura y de la propagación del movimiento empleando criterios morfológicos. Estos movimientos de ladera dependerán del tipo de movimiento y de la naturaleza de los materiales inestables, es decir, en la clasificación suelo-roca de estos. Así, se diferencian cuatro tipos de movimientos de ladera potenciales: Deslizamientos, Flujos, Desprendimientos y Extensiones laterales

La distribución de estos movimientos no es regular, aunque suelen ser más frecuentes en zonas con relieves escarpados, influidas por las elevadas pendientes que se pueden observar en dichas zonas. Por tanto, otro factor a tener en cuenta a la hora de la realización de los mapas de susceptibilidad de riesgo por movimientos de ladera será el de la pendiente del terreno.

De igual manera que las causas desencadenantes de los movimientos de ladera son factores intrínsecos de la ladera tales como el tipo de material y la pendientes de la zona, otros factores influyentes son los externos como por ejemplo la

climatología. Por tanto, los factores que desencadenan los deslizamientos están relacionados con las variaciones que se producen de las propiedades intrínsecas del terreno. Por tanto, siguiendo lo recogido en Torrijo (2003), los factores que influyen en los deslizamientos y en su formación son:

- Litología y propiedades resistentes del material.
- Estructura geológica.
- Condiciones hidrogeológicas.
- Morfología de la zona.

5.1 INTRODUCCIÓN MOVIMIENTO EN MASA

Los fenómenos o movimientos en masa son un conjunto de procesos naturales activados por diversos detonantes como la pendiente de la zona, la lluvia, los sismos entre otros, los cuales van modificando la topografía del área en la que se producen, y son esencialmente movimientos gravitatorios, en los cuales una parte de la masa del terreno ya sea en un talud o ladera se desplaza a una cota inferior de la original, siendo tan solo necesario que las fuerzas que brindan la estabilidad sean superadas por aquellas que buscan desestabilizar. Pueden considerarse además como eventos potencialmente destructivos, puesto que pueden generar cuantiosas pérdidas materiales y humanas. Por ende es necesario establecer las zonas que están potencialmente expuestas con el fin de determinar las medidas de mitigación y de control, evitando así daños futuros.

La inestabilidad en taludes se puede manifestar de diferentes formas dependiendo del material que lo conforma, en caso del que el material comprometido sea macizos rocosos solo se podrá establecer una posible falla analizando los buzamientos y fallas presentes en la matriz del material afectado; por otro lado en materiales granulares o limosos se podrán presentar signos de inestabilidad con hundimientos o fallas leves, que no necesariamente comprometen el aplomo de la masa de tierra.

Existen, además, otros posibles mecanismos de rotura general del terreno a lo largo de superficies de forma diversa, según sea la geometría de sus zonas más débiles. Estos mecanismos de rotura y la metodología recomendable para su análisis son los que se consideran a continuación bajo el nombre genérico de “estabilidad de taludes”, las inestabilidades globales suelen ocurrir en aquellos casos en los que existe un desnivel importante en el terreno ya sea natural o artificialmente creado mediante excavación (taludes en (taludes en desmonte), mediante relleno (taludes en terraplén) o mediante procedimientos mixtos.

Dependiendo de las herramientas con las que se cuente, se pueden implementar diferentes metodologías que permiten obtener una buena aproximación de la susceptibilidad presente en una región. Sin embargo, dicha aproximación requiere información específica de las diferentes variables que puedan ser detonantes de un evento.

5.2 MARCO TEÓRICO REMOCIÓN EN MASA

5.2.1 NOMENCLATURA

Los taludes son procesos son de interés para diversas ramas de la ciencia, así como de áreas productivas y de desarrollo urbano, por ello es importante establecer criterios y definiciones que sean entendibles sin importar el idioma o región.

A nivel mundial se ha estandarizado la terminología, conceptos y metodologías referentes a estudios de estabilidad de taludes, así como la manera en las que se debe realizar su estudio. El esquema fue propuesto por Varnes (1958 y 1978), Sistema que fue actualizado por Cruden y Varnes en el “Special Report 247” del Transportation Research Board de los Estados Unidos (1996), Agregado algunos factores importantes, entre ellos la diferenciación entre los procesos de deterioro y los de deslizamiento, pero en términos generales se mantuvieron los principios básicos de la clasificación y es reconocido por las diferentes ramas que consideran de interés el estudio de estabilidad de taludes.

5.2.2 TALUD.

Un Talud o ladera es una masa de tierra que no es plana sino que presenta una pendiente o cambios significativos de altura. En la literatura técnica se define como Ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y Talud cuando se conformó artificialmente. Los taludes se pueden agrupar en tres categorías generales: los terraplenes, los cortes de laderas naturales y los muros de contención. Se pueden presentar combinaciones de los diversos tipos de taludes y laderas. Las laderas o taludes que han permanecido estables por muchos años, pueden fallar debido a cambios topográficos, sísmicos, a los flujos de agua subterránea, a los cambios en la resistencia del suelo, la meteorización o a factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad. Los taludes se pueden agrupar en tres categorías generales: Los terraplenes, los cortes de laderas naturales y los muros de contención. Además, se pueden presentar combinaciones de los diversos tipos de taludes y laderas. Suarez J.; (2009).

5.2.3 DEFINICIÓN DE ESTABILIDAD

Se entiende por estabilidad a la seguridad de una masa de tierra contra la falla o movimiento. Como primera medida es necesario definir criterios de estabilidad de taludes, la inestabilidad de un talud, se puede producir por un desnivel, que tiene lugar por diversas razones:

- Razones geológicas: laderas posiblemente inestables, orografía acusada, estratificación, meteorización, etc.
- Variación del nivel freático: situaciones estacionales, u obras realizadas por el hombre.
- Obras de ingeniería: rellenos o excavaciones tanto de obra civil, como de minería.

Los taludes además serán estables dependiendo de la resistencia del material del que estén compuestos, los empujes a los que son sometidos o las discontinuidades que presenten. Los taludes pueden ser de roca o de tierras. Ambos tienden a estudiarse de forma distinta.

5.2.4 PARTES DE UN TALUD

Existen algunos términos generales para definir las partes de un talud que se ilustran en la siguiente Figura: (Figura 5).

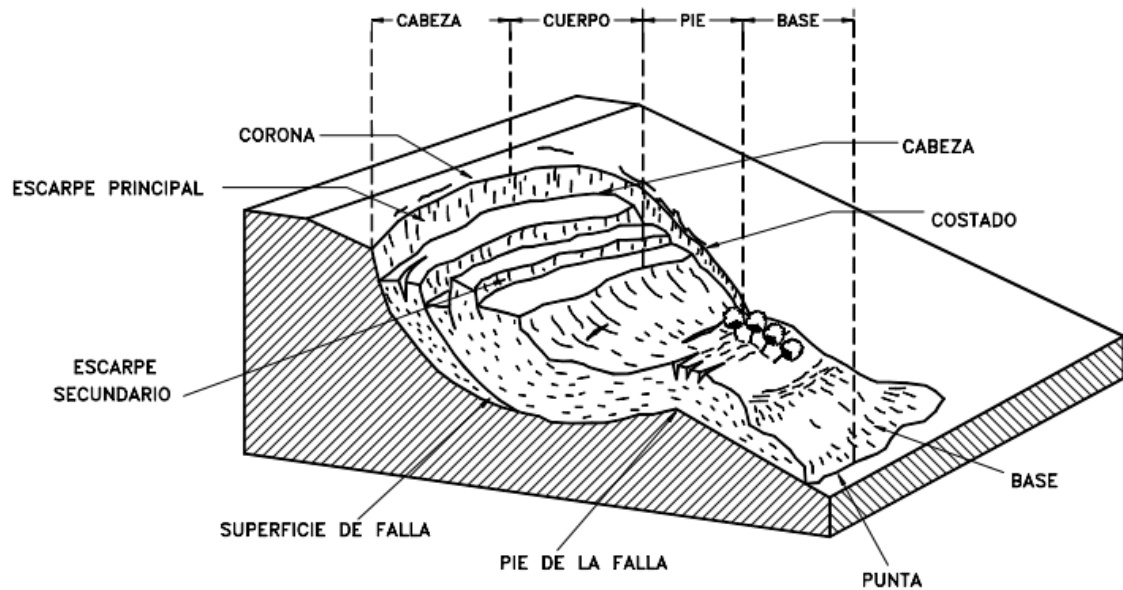


Figura 5: Nomenclatura de taludes, traducido de (Nicholson y Hencher ;1997)

Las partes de un talud pueden definirse de la siguiente manera:

- Cabeza: Parte superior de la masa de material que se mueve. La cabeza del deslizamiento no corresponde necesariamente a la cabeza del talud. Arriba de la cabeza está la corona.
- Cima: El punto más alto de la cabeza, en el contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
- Corona: El material que se encuentra en el sitio, (prácticamente inalterado), adyacente a la parte más alta del escarpe principal, por encima de la cabeza.

- **Escarpe principal:** Superficie muy inclinada a lo largo de la periferia posterior del área en movimiento, causado por el desplazamiento del material. La continuación de la superficie del escarpe dentro del material conforma la superficie de la falla.
- **Escarpe secundario:** Superficie muy inclinada producida por el desplazamiento diferencial dentro de la masa que se mueve. En un deslizamiento pueden formarse varios escarpes secundarios.
- **Superficie de falla:** Área por debajo del movimiento y que delimita el volumen del material desplazado. El suelo por debajo de la superficie de la falla no se mueve, mientras que el que se encuentra por encima de esta, se desplaza. En algunos movimientos no hay superficie de falla.
- **Pie de la superficie de falla:** La línea de interceptación (algunas veces tapada) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.
- **Base:** El área cubierta por el material perturbado abajo del pie de la superficie de falla.
- **Punta o uña:** El punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.
- **Cuerpo principal del deslizamiento:** El material desplazado que se encuentra por encima de la superficie de falla. Se pueden presentar varios cuerpos en movimiento.

- Superficie original del terreno: La superficie que existía antes de que se presentara el movimiento.
- Altura de nivel freático: Es la distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua (la presión en el agua es igual a la presión atmosférica). La altura del nivel freático se acostumbra medirla debajo de la cabeza del talud.
- Costado o flanco: Un lado (perfil lateral) del movimiento. Se debe diferenciar el flanco derecho y el izquierdo.
- Derecha e izquierda: Para describir un deslizamiento se recomienda utilizar la orientación geográfica (Norte, Sur, Este, Oeste); pero si se emplean las palabras derecha e izquierda, deben referirse al deslizamiento observado desde la corona hacia el pie.

5.2.5 PROCESOS EN LA ETAPA DE DETERIORO

El deterioro en un talud puede ser progresivo degradando la superficie y se manifiesta con el desprendimiento de sedimentos, también puede ser esporádico generado por un evento detonante, como un sismo o un aumento considerable en la infiltración en el talud generando un relajación de los esfuerzos de confinamiento y una sobre exposición al medio ambiente, cambiándose el equilibrio presente en el talud.

El deterioro comprende la alteración física y química de los materiales y su subsecuente desprendimiento o remoción. Este incluye la alteración mineral, los efectos de relajación y la abrasión. La iniciación y propagación de fracturas es de significancia particular en la destrucción de la superficie que puede conducir a caídos de roca o colapso del talud. La clasificación de los modos comunes de deterioro fue propuesta por Nicholson y Hencher (1997), pero en el presente texto se amplió con el objeto de incluir la mayoría de los procesos que ocurren previamente a la falla masiva.

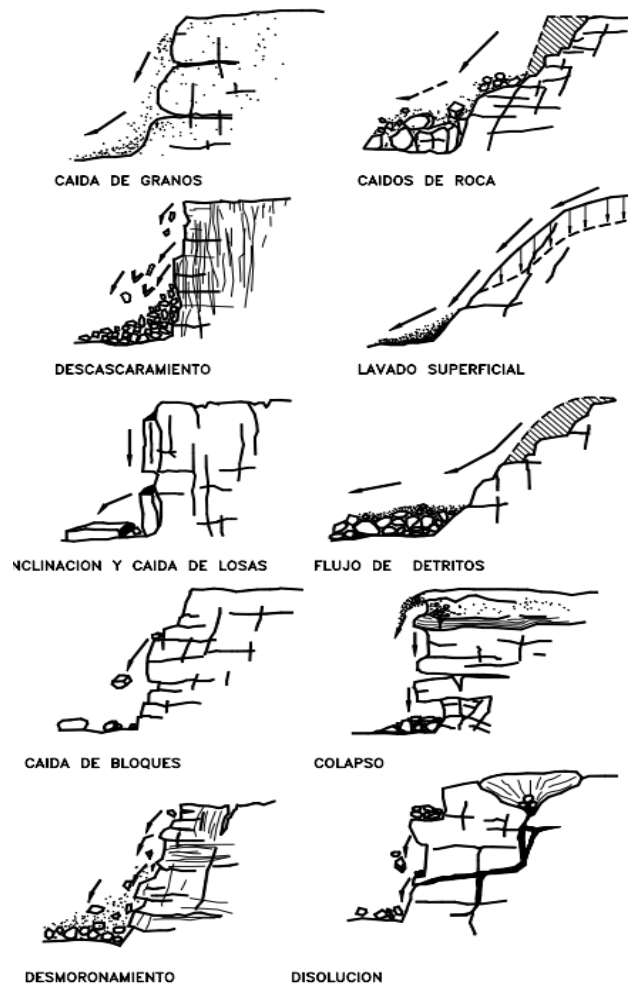


Figura 6: Procesos de deterioro en macizos rocosos (Nicholson y Hencher; 1997)

1. **Caída de granos:** Consiste en la caída de granos individuales de la masa de roca con desintegración física a granos como prerrequisito. Depende de la resistencia de las uniones intergranulares y las microgrietas relacionadas con los granos. Causa un debilitamiento general del material de roca. No representa una amenaza en sí misma pero puede conducir a la pérdida de soporte y subsecuente colapso en pequeña escala. Los finos pueden sedimentarse y producir depósitos dentro de las estructuras de drenaje.
2. **Descascaramiento:** Caída de cáscaras de material de la masa de roca. Las cáscaras tienen forma de láminas con una dimensión significativamente menor a las otras dos dimensiones. Puede reflejar la litología, fisilidad, o puede reflejar la penetración de la meteorización. Los fragmentos en forma de láminas no son grandes y no constituyen una amenaza significativa, sin embargo, se produce un depósito de sedimentos en el pie del talud.
3. **Formación, inclinación y caída de losas de roca:** Se forman prismas o pequeñas placas con dimensión mínima de 50 mm, pudiendo existir deslizamiento y rotación o pandeo. Generalmente, las fracturas a tensión paralelas a la superficie del talud son prerrequisito para su ocurrencia, seguidas por la pérdida de soporte.
Pueden caer grandes bloques de material y pueden significar una amenaza importante, causando daño a los canales de drenaje, cercas, pavimentos o puede crear taludes negativos. Las inclinaciones pueden considerarse como un proceso de deterioro o como un movimiento del talud.
4. **Caídos de bloques:** Pueden caer por gravedad, en forma ocasional bloques individuales de roca de cualquier dimensión, produciendo un deterioro en la estructura del talud.

La amenaza es difícil de predecir debido al gran rango de tamaños que pueden caer y especialmente los bloques grandes pueden causar daño estructural. En ocasiones bajan saltando y rodando y pueden caminar grandes distancias. Estos caídos corresponden a los caídos de roca en la clasificación general de movimientos en taludes.

5. Desmoronamiento del talud: El desmoronamiento general del talud produce la caída de bloques de diversas dimensiones en forma semicontinua. Puede causar una amenaza significativa y crear grandes acumulaciones de detritos en el pie del talud.
6. Caídos de roca: La caída de muchos bloques de roca “en un solo evento” requiere que haya ocurrido un debilitamiento de la masa de roca, debido a la fragmentación y a la ausencia de soporte lateral. El volumen de la falla depende de los diversos planos de discontinuidad y puede cubrir en un solo momento varios planos (falla en escalera).
7. Lavado superficial o erosión: La erosión es el desprendimiento, transporte y depositación de partículas o masas pequeñas de suelo o roca, por acción de las fuerzas generadas por el movimiento del agua. El flujo puede concentrarse en canales produciendo surcos y cárcavas.

Nota: Los Tipos de Factores se encuentran en el capítulo de Erosión.

8. Flujo de Detritos: El desprendimiento y transporte de partículas gruesas y finas en una matriz de agua y granos en forma de flujo seco o saturado. Los flujos de detritos son impredecibles, mueven grandes volúmenes de material y pueden crear una amenaza moderada a alta, generalmente no se les considera como procesos de deterioro sino como deslizamientos. Sin

embargo, pueden generar grandes deslizamientos del macizo al producir cambios topográficos importantes.

9. Colapso: Bloques independientes de gran tamaño colapsan debido a la falta de soporte vertical. El tamaño de los bloques es de más de 500 mm e incluyen los taludes negativos (overhangs). Representa una escala grande de amenaza, de acuerdo a su tamaño y potencial de colapso.
10. Disolución: La disolución de materiales solubles en agua que puede ser acelerado por las condiciones locales, especialmente la presencia de aguas agresivas. Puede producir cavidades internas que podrían colapsar o formar cárcavas karsticas.

5.2.6 FALLAS EN TALUDES

Aunque cada talud requiere un proceso minucioso de análisis, en el cual se estudie de manera detallada e individual cada uno de los factores que inciden en el nivel de inestabilidad, o factores externos en la topografía de la ladera o talud que puedan comprometer una sección del talud o la totalidad del mismo.

I. Causas de inestabilidad

Las causas principales de inestabilidad de laderas y taludes son entre otras: erosión de pie, acumulación de materia en cabeza, empuje hidrostático, heladas, variaciones rápidas de humedad y temperatura, arrastre de sólidos internos en rocas solubles, fenómenos de naturaleza química, fenómenos de naturaleza biológica, sismos, presión intersticial debida a filtraciones, etc Revelo, V. (2008).

Emplazamiento	Daño sufrido en la infraestructura	
Terraplén	Asientos (del terraplén o del cimiento)	Por deformación plástica. Por compactación creciente
	Deslizamientos (taludes del terraplén)	Superficiales Profundos
	Degradación por erosión	
Media ladera	Asientos (del terraplén o del cimiento)	Por deformación plástica Por compactación creciente
	Deslizamientos (taludes terraplén o ladera)	Superficiales Profundos
	Desprendimientos (taludes ladera)	
Trinchera y taludes naturales	Deslizamientos (taludes trinchera o ladera)	Superficiales Profundos
	Desprendimiento (taludes trinchera o ladera)	
	Degradación por erosión	

Tabla 1: Daños Sufridos por laderas o Taludes Erenas (1995)

II. Modificaciones en el entorno natural

Los daños que pueden sufrir la ladera o talud, pueden agruparse esquemáticamente como indica en la Tabla 1

5.2.7 REMOCIÓN EN MASA O DESLIZAMIENTOS

Remoción de masa, también conocido como movimiento de inclinación, desplazamiento de masa o movimiento de masa, es el proceso geomorfológico por el cual el suelo y la roca se mueven cuesta abajo por la fuerza de la gravedad. Los fenómenos de remoción de masa incluyen fluencia, deslizamientos, flujos y caídas, cada uno con sus propias características y que tiene lugar en escalas de tiempo de segundos a años. Por lo general son procesos naturales que se ven acelerados por la actuación de agentes externos, como lo son factores antrópicos o elementos que generen un desequilibrio en las fuerzas internas del material.

5.2.8 DIMENSIONES DE DESPRENDIMIENTOS DE TIERRAS

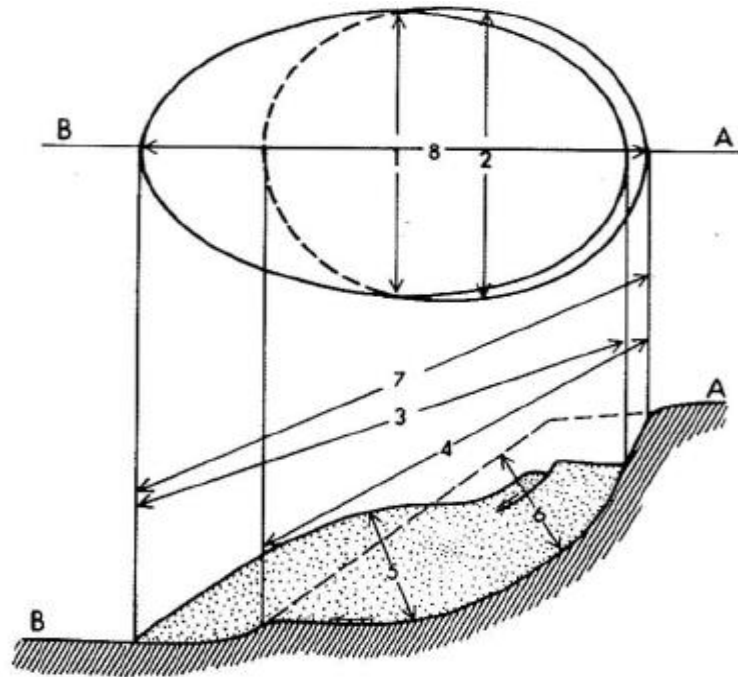


Figura 7: Partes de un deslizamiento Varnes (1978)

La Comisión IAEG sobre desprendimientos de tierras (1990) utilizó la nomenclatura descrita en Varnes (1958 y 1978), (Figura 7 y la Tabla 2) para proporcionar las definiciones de algunas dimensiones de un deslizamiento de tierra típico. El diagrama de Comisión IAEG se muestra aquí como la Figura 7. Una vez más, cada dimensión se identifica en el diagrama por un número, y estos números están relacionados con cuadros, en los que las definiciones se dan en varios idiomas. La Tabla 1 presenta las definiciones en inglés.

Número	Nombre	Definición
1	Ancho de la masa desplazada, W_d	Anchura máxima de la masa desplazada perpendicular a la longitud, L_d
2	Anchura de la superficie de ruptura, W_r	Ancho máximo entre flancos de deslizamiento de tierra perpendicular a la longitud, L_r
3	Longitud de masa desplazada, L_d	Distancia mínima desde la punta hasta la parte superior
4	Longitud de la superficie de ruptura, L_r	Distancia mínima desde los pies de la superficie de ruptura a la corona
5	Profundidad de la masa desplazada, D_d	La profundidad máxima de la masa desplazada medida perpendicularmente al plano que contiene W_d y L_d
6	Profundidad de la superficie de ruptura, D_r	La profundidad máxima de la superficie de ruptura por debajo de la superficie original del suelo medido perpendicularmente al plano que contiene W_r y L_r
7	Longitud total, L	Distancia mínima desde la punta de deslizamiento de tierra a la corona

Tabla 2: Elementos de un Deslizamiento Varnes (1978)

Dimensiones Deslizamiento: parte superior, el plan de deslizamiento de tierra típico en el que la línea discontinua es rastro de una superficie de ruptura en la superficie original del terreno; parte inferior de la sección en la que indica la eclosión del suelo no perturbado, punteado muestra el alcance de material desplazado, y la línea discontinua es superficie original del terreno. Los números se refieren a las dimensiones definidas en la Tabla 2 (Comisión IAEG sobre desprendimientos de tierras, 1990).

5.2.9 ETAPAS EN EL PROCESO DE FALLA

La clasificación de deslizamientos pretende describir e identificar los cuerpos que están en movimiento relativo. Las clasificaciones existentes son esencialmente geomorfológicas y solamente algunas de ellas introducen consideraciones mecánicas o propiamente geológicas Suarez J.; (2009). Las caracterizaciones geotécnicas son necesarias y por esta razón, las clasificaciones eminentemente topográficas y morfológicas, como las propuestas por Varnes (1978), Hutchinson

(1988), etc., deben adaptarse a las condiciones verdaderas del entorno en el que se encuentra el talud a estudiar. Por ello podemos considerar cuatro etapas diferentes en la clasificación de los movimientos:

- a) Etapa de deterioro o antes de la falla, donde el suelo es esencialmente intacto.
- b) Etapa de falla caracterizada por la formación de una superficie de falla o el movimiento de una masa importante de material.
- c) La etapa post-falla que incluye los movimientos de la masa involucrada, en un deslizamiento desde el momento de la falla y hasta el preciso instante en el cual se detiene totalmente.
- d) La etapa de posible reactivación en la cual pueden ocurrir movimientos que pueden considerarse como una nueva falla, e incluye las tres etapas anteriores.

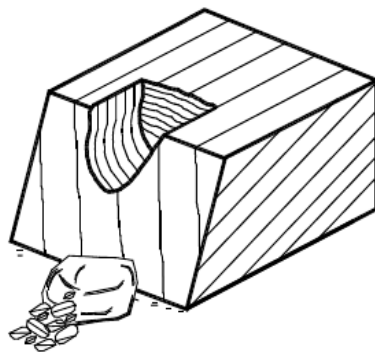
5.2.10 CLASIFICACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS

La correcta clasificación de un movimiento en masa dependerá del material que se desplace, así como el que constituya el talud, un ejemplo claro son los movimientos de material limoso que tienden a comportarse similar a líquido, dispersándose en forma de abanico hasta que la energía liberada en el desplazamiento sea liberada, un movimiento en un macizo rocoso por otra parte se genera en capas, ya que el proceso de degradación afecta la roca en las fisuras o buzamientos, debilitando las capas hasta que el efecto gravitatorio genere su caída.

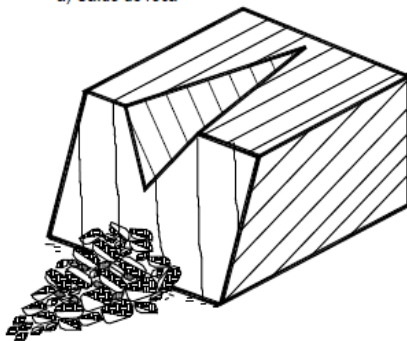
La clasificación más usual de los movimientos se basa en la descrita en Varnes (1978), planteando 12 modos en los cuales se puede clasificar en movimiento generado en un proceso de remoción en masa y serán explicados a continuación de acuerdo al planteamiento de Suarez J.; (2009).

5.2.10.1 CAÍDO

Caído es el desprendimiento y caída de materiales del talud. En los caídos se desprende una masa de cualquier tamaño desde un talud de pendiente fuerte a lo largo de una superficie en la cual el desplazamiento de corte es mínimo o no se da. Este desplazamiento se produce principalmente por caída libre, a saltos o rodando (Figura 4). Los caídos de suelo, en escarpes semi-verticales, representan un riesgo importante para los elementos que están debajo del talud (Figura 8).



a) Caído de roca



b) Caído de residuos

Figura 8: Esquema de caídos de roca y residuos.

Los caídos pueden incluir desde suelo y partículas relativamente pequeñas, hasta bloques de varios metros cúbicos. Los fragmentos son de diferentes tamaños y generalmente se rompen en el proceso de caído. Los “caídos de roca” corresponden a bloques de roca relativamente sana; los caídos de residuos o “detritos”, están compuestos por fragmentos de materiales pétreos

Los caídos pueden incluir desde suelo y partículas relativamente pequeñas, hasta bloques de varios metros cúbicos. Los fragmentos son de diferentes tamaños y generalmente se rompen en el proceso de

caído. Los “caídos de roca” corresponden a bloques de roca relativamente sana; los caídos de residuos o “detritos”, están compuestos por fragmentos de materiales pétreos y los caídos de tierra, corresponden a materiales compuestos de partículas pequeñas de suelo o masas blandas. Los caídos o desprendimientos de suelo ocurren en taludes de muy alta pendiente, especialmente en las terrazas producto de depósitos aluviales.

La activación de caídos, o “derrumbes” de suelo, es muy común en los suelos residuales con estructuras heredadas. Generalmente, van precedidos de agrietamientos en la cabeza del talud.

5.2.10.2 PROCESOS DEL MOVIMIENTO DE LOS CAÍDOS

Aunque se utiliza el término general “caído”, éste incluye un rango completo de movimientos rápidos tales como: saltos, brincos, rebotes, giros, caídas, etc. Todos estos movimientos pueden ocurrir en secuencias diferentes.

El movimiento de caído es muy rápido a extremadamente rápido y puede o no, estar precedido de movimientos menores que conduzcan a la separación progresiva o a la inclinación del bloque o masa de material. Comúnmente, los caídos ocurren sin evidencias previas de movimiento. Los factores que controlan el tipo preciso de movimiento, son la pendiente del talud, la morfología y la rugosidad de la superficie (incluyendo la cobertura vegetal).

5.2.10.3 INCLINACIÓN O VOLCAMIENTO

Este tipo de movimiento consiste en una rotación hacia adelante de una unidad o unidades de material térreo con centro de giro por debajo del centro de gravedad

de la unidad. Generalmente, los volcamientos ocurren en las formaciones rocosas, pero también, se presentan en suelos cohesivos secos y en suelos residuales (Figura 9). La inclinación puede abarcar zonas muy pequeñas o incluir volúmenes grandes hasta de varios millones de metros cúbicos.

Las características de la estructura de la formación geológica determinan la forma de ocurrencia de la inclinación. Las características de buzamiento y estratificación de los grupos de discontinuidades definen el proceso, la naturaleza del proceso, la altura y el tamaño del bloque inclinado.

Dependiendo de las características geométricas y de la estructura geológica, la inclinación puede o no terminar en caídos o en derrumbes. Las fuerzas que producen el volcamiento son generadas por las unidades adyacentes, el agua en las grietas o juntas, las expansiones y los movimientos sísmicos. Las inclinaciones pueden variar de extremadamente lentas a extremadamente rápidas.

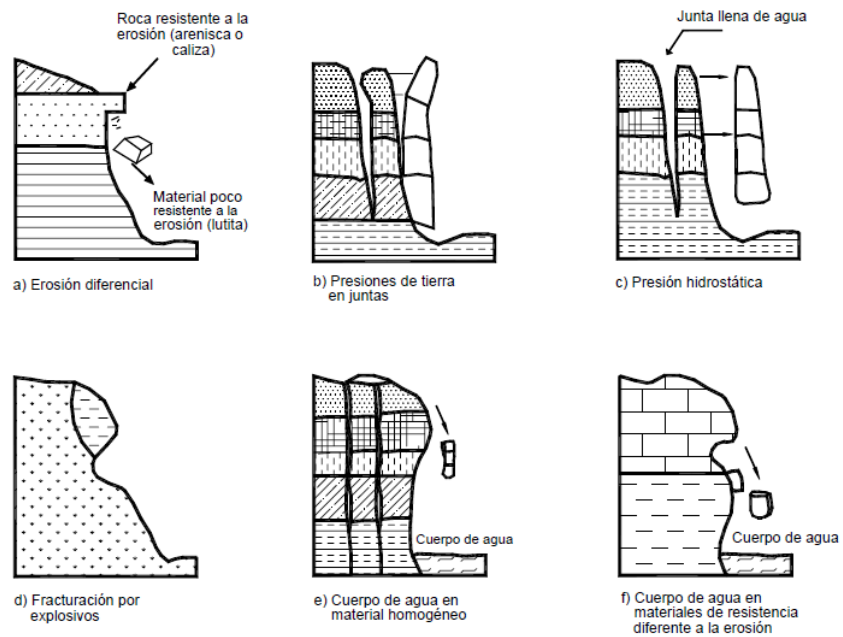


Figura 9: Procesos que conducen al Volcamiento o inclinación en materiales residuales

Por lo general, son lentas a extremadamente lentas al inicio y aumentan de velocidad con el tiempo. A menudo, terminan en caídos de roca o residuos, derrumbes (caídos de suelo) o flujos.

En los volcamientos de roca, las fracturas definen las características del movimiento. En las inclinaciones del suelo las grietas de tensión, la cohesión de los materiales, la altura y la pendiente de los taludes, determinan el volumen de la masa, la magnitud del movimiento y la posibilidad de desmoronamiento, caído o flujo

5.2.10.4 REPTACIÓN (“CREEP”)

La reptación o “creep” consiste en movimientos del suelo subsuperficial desde muy lentos a extremadamente lentos sin una superficie definida de falla. La profundidad del movimiento puede ser desde pocos centímetros hasta varios metros. Generalmente, el desplazamiento horizontal es de unos pocos centímetros al año y afecta a grandes áreas de terreno.

La reptación puede preceder a movimientos más rápidos como los flujos o deslizamientos traslacionales. La reptación comúnmente ocurre en las laderas con pendiente baja a media. Se le atribuye a las alteraciones climáticas relacionadas con los procesos de humedecimiento y secado en los suelos, usualmente arcillosos, muy blandos o alterados, con características expansivas.

Los procesos de expansión y contracción afectan la reptación, pero no son un requisito para que ocurra. Con frecuencia se presenta la reptación en los taludes de terraplenes, los cuales al saturarse, tratan de fluir generándose inicialmente la reptación del suelo subsuperficial. Esta reptación puede terminar en un flujo o en un deslizamiento de traslación. Las evidencias de reptación consisten en la inclinación de postes y cercas y/o la inclinación o curvatura de los troncos de los árboles y arbustos. Como los movimientos son muy lentos, la mejor forma de

analizar un proceso de “creep” es mediante el monitoreo y el uso de inclinómetros. En un inclinómetro el movimiento es mayor en la superficie del terreno y disminuye en magnitud al profundizarse. Igualmente, las estructuras de la mampostería se agrietan con fisuras verticales o diagonales.

5.2.10.5 DESLIZAMIENTOS EN MASA (TRASLACIONALES Y ROTACIONALES)

El deslizamiento en masa consiste en un desplazamiento de corte a lo largo de una o varias superficies, que pueden detectarse fácilmente o dentro de una zona relativamente delgada. Los deslizamientos en masa pueden ser de una sola masa coherente que se mueve, o pueden comprender varias unidades o masas semi-independientes. El movimiento puede ser progresivo, o sea, que no se inicia simultáneamente a lo largo de toda la que sería la superficie de falla, sino que se va generando en un proceso gradual. La superficie de falla es una zona de determinado espesor, en la cual se producen cambios volumétricos y desplazamientos relacionados con la falla o rotura, al cortante de los materiales. Los desplazamientos en masa se pueden subdividir en subtipos denominados deslizamientos rotacionales, deslizamientos traslacionales o planares y deslizamientos compuestos de rotación y traslación. Esta diferenciación es importante porque puede definir el sistema de análisis y el tipo de estabilización que se va a emplear.

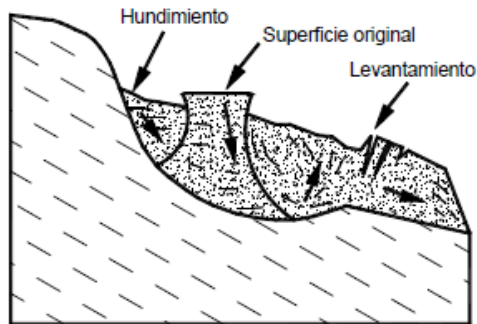
5.2.10.5.1.1 Deslizamiento Rotacional

En un desplazamiento rotacional, la superficie de falla es cóncava hacia arriba y el movimiento es rotacional con respecto al eje paralelo a la superficie y transversal al deslizamiento. El centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo del movimiento. Visto en planta, el deslizamiento de rotación, posee una serie de agrietamientos concéntricos y cóncavos en la dirección del movimiento. El

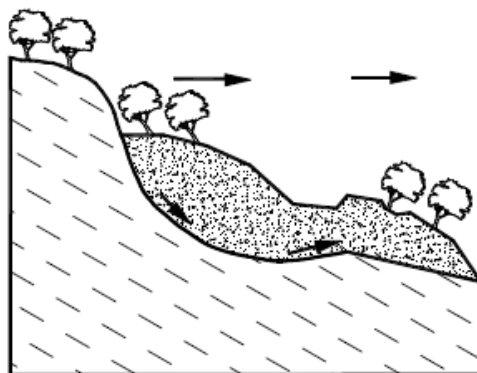
movimiento produce un área superior de hundimiento y otra inferior de deslizamiento, lo cual genera, comúnmente, flujos de materiales por debajo del pie del deslizamiento (Figura 6). La cabeza del movimiento bascula hacia atrás y los árboles se inclinan, de forma diferente, en la cabeza y en el pie del deslizamiento.

5.2.10.5.1.2 Deslizamiento de Traslación

En el desplazamiento de traslación la masa se desliza hacia afuera o hacia abajo, a lo largo de una superficie más o menos plana o ligeramente ondulada y tiene muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo. Los movimientos traslacionales generalmente, una relación D_r/L_r de menos de 0.1. En muchos desplazamientos de traslación, la masa se deforma y/o se rompe y puede convertirse en flujo, especialmente en las zonas de pendiente fuerte.



a) Movimiento de las masas de tierra



b) Orientación de los árboles

Figura 10 : Deslizamiento rotacional típico

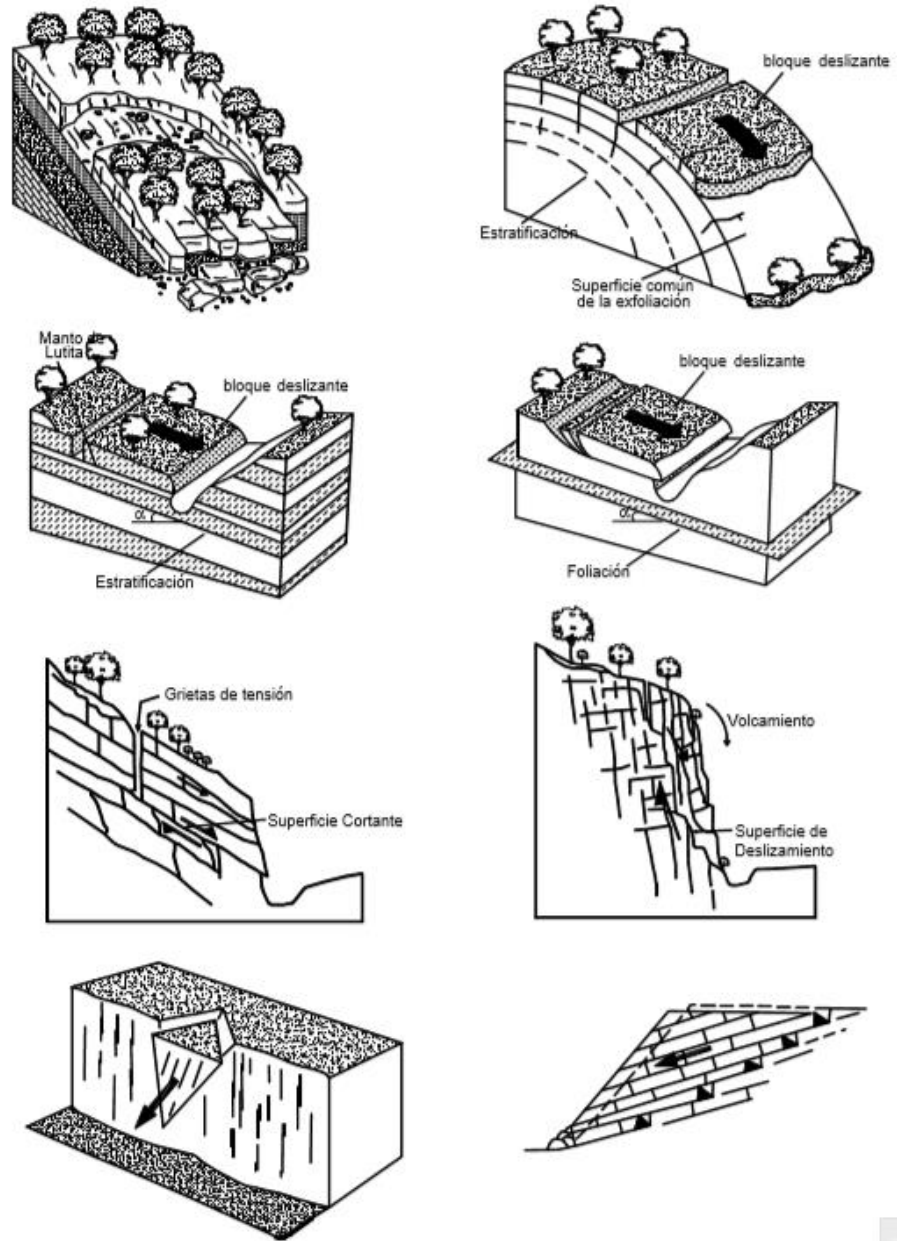


Figura 11: Ejemplos de desplazamientos de traslación

5.2.10.6 ESPARCIMIENTO LATERAL

En los esparcimientos laterales el modo de movimiento dominante es la extensión lateral acomodada por fracturas de corte y tensión. El mecanismo de falla puede incluir elementos no solo de rotación y translación sino también de flujo. (Figura 12). Generalmente, los movimientos son complejos y difíciles de caracterizar. La rata de movimiento es por lo general extremadamente lenta. Los esparcimientos laterales pueden ocurrir en masas de roca sobre suelos plásticos y también se forman en suelos finos, tales como arcillas y limos sensitivos que pierden gran parte de su resistencia al remodelarse.

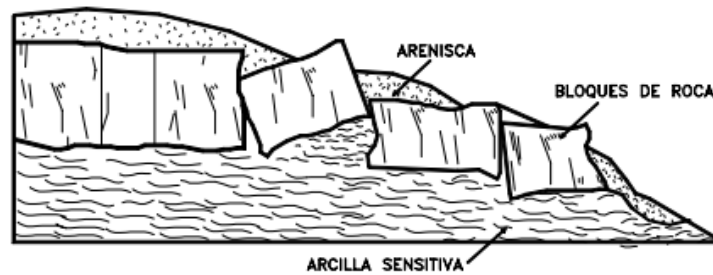


Figura 12: Esquema de un esparcimiento lateral

La falla es generalmente progresiva, o sea, que se inicia en un área local y se extiende. Los esparcimientos laterales son muy comunes en sedimentos glaciales y marinos pero no los son en zonas de suelos tropicales residuales. Se deben distinguir dos tipos así:

- I. Movimientos distribuidos en una extensión pero sin una superficie basal bien definida de corte o de flujo plástico. Esto ocurre predominantemente en rocas, especialmente en las crestas de serranías. La mecánica de este movimiento no es bien conocida.

- II. Movimientos que envuelven fracturas y extensión de roca o suelo, debido a licuación o flujo plástico del material subyacente. Las capas superiores pueden hundirse, trasladarse, rotarse, desintegrarse o pueden licuarse y fluir.

5.2.10.7 FLUJO

En un flujo existen movimientos relativos de las partículas o bloques pequeños dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla. Los flujos pueden ser lentos o rápidos, así como secos o húmedos y los puede haber de roca, de residuos, de suelo o tierra.

Los flujos muy lentos o extremadamente lentos pueden asimilarse en ocasiones, a los fenómenos de reptación y la diferencia consiste en que en los flujos existe una superficie fácilmente identificable de separación entre el material que se mueve y el subyacente, mientras en la reptación la velocidad del movimiento disminuye al profundizarse en el perfil, sin que exista una superficie definida de rotura.

La ocurrencia de flujos está generalmente, relacionada con la saturación de los materiales subsuperficiales. Algunos suelos absorben agua muy fácilmente cuando son alterados, fracturados o agrietados por un deslizamiento inicial y esta saturación conduce a la formación de un flujo. Algunos flujos pueden resultar de la alteración de suelos muy sensitivos tales como sedimentos no consolidados. Recientemente se han realizado estudios para cuantificar el nivel de lluvias que se requieren para producir flujos y es frecuente la ocurrencia de los flujos simultáneamente en sitios diferentes, dentro de una misma formación en el momento de una determinada lluvia de gran intensidad o de un evento sísmico.

1.1 Flujo en roca.

Los movimientos de flujo en roca comprenden las deformaciones que se distribuyen a lo largo de muchas fracturas grandes y pequeñas. La distribución de velocidades

puede simular la de líquidos viscosos. Este tipo de movimiento ocurre con mucha frecuencia en zonas tropicales de alta montaña y poca vegetación, especialmente en la cordillera de los Andes. Se observa la relación de estos flujos con perfiles de meteorización poco profundos en los cuales las fallas están generalmente, relacionadas con cambios de esfuerzos y lixiviación, ocasionados por la filtración momentánea del agua en las primeras horas después de una lluvia fuerte. Las pendientes de estos taludes son comúnmente muy empinadas (más de 45°).

Su ocurrencia es mayor en rocas ígneas y metamórficas muy fracturadas y pueden estar precedidos por fenómenos de inclinación. Estos flujos tienden a ser ligeramente húmedos y su velocidad tiende a ser rápida a muy rápida.

1.2 Flujo de residuos (Detritos).

Por lo general, un flujo de rocas termina en uno de residuos. Los materiales se van triturando por el mismo proceso de flujo y se puede observar una diferencia importante de tamaños entre la cabeza y el pie del movimiento. El movimiento de los flujos de detritos puede ser activado por las lluvias, debido a la pérdida de resistencia por la disminución de la succión al saturarse el material o por el desarrollo de fuerzas debidas al movimiento del agua subterránea (Collins y Znidarcic, 1997).

Los daños causados por los flujos de detritos abarcan áreas relativamente grandes. El flujo típico de detritos es una honda larga de materiales sólidos y líquidos entremezclados, que se mueve en forma constante a través de un canal con algunas ondas menores superpuestas que se mueven a velocidades superiores a aquellas del flujo mismo.

1.3 Flujos de lodo.

Dentro de los flujos de tierra están los “flujos de lodo”, en los cuales los materiales de suelo son muy finos y las humedades muy altas y ya se puede hablar de viscosidad propiamente dicha, llegándose al punto de suelos suspendidos en agua. Los flujos de lodo poseen fuerzas destructoras grandes que dependen de su caudal y velocidad.

Un flujo de lodo posee tres unidades morfológicas: un origen que generalmente es un deslizamiento, un camino o canal de flujo y finalmente una zona de acumulación. El origen consiste en una serie de escarpes de falla o deslizamientos de rotación o translación, el camino o canal es generalmente un área estrecha, recta o una serie de canales a través del cual fluye el material viscoso, el ancho, profundidad y pendiente del camino del flujo varía de acuerdo a las condiciones topográficas y morfológicas. La zona de acumulación es generalmente un área de menor pendiente, en la cual el flujo pierde velocidad y forma un abanico de deposición.

1.4. Avalanchas.

En las avalanchas la falla progresiva es muy rápida y el flujo desciende formando una especie de “ríos de roca y suelo” (Figura 10). Estos flujos comúnmente se relacionan con lluvias ocasionales de índices pluviométricos excepcionales muy altos, deshielo de nevados o movimientos sísmicos en zonas de alta montaña y la ausencia de vegetación, aunque es un factor influyente, no es un prerrequisito para que ocurran.

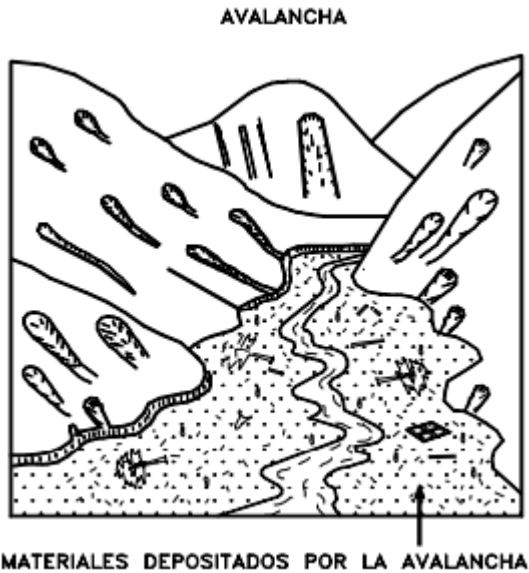


Figura 13: Avalanchas por deslizamientos generalizados.

Las avalanchas son generadas a partir de un gran aporte de materiales de uno o varios deslizamientos o flujos combinados con un volumen importante de agua, los cuales forman una masa de comportamiento de líquido viscoso que puede lograr velocidades muy altas con un gran poder destructivo y que corresponden generalmente, a fenómenos regionales dentro de una cuenca de drenaje. Las avalanchas pueden alcanzar velocidades de más de 50 metros por segundo en algunos casos.

El movimiento de las avalanchas se le puede relacionar con “flujo turbulento de granos”. Este mecanismo no requiere de la presencia de una fase líquida o gaseosa y el movimiento se produce por transferencia de momentum al colisionar las partículas o bloques que se mueven.

1.5. Movimientos complejos.

Con mucha frecuencia los movimientos de un talud incluyen una combinación de dos o más de los principales tipos de desplazamiento descritos anteriormente, este tipo de movimientos se les denomina como “Complejo”. Adicionalmente, un tipo de proceso activo puede convertirse en otro a medida que progresa el fenómeno de desintegración; es así como una inclinación puede terminar en caído o un deslizamiento en flujo.

Tabla 3: Glosario para la caracterización de movimientos en masa. (Ampliado de Cruden y Varnes, 1996).

SECUENCIAS	ESTADO DE ACTIVIDAD	ESTILO	VELOCIDAD	HUMEDAD	MATERIAL
PROGRESIVO	Activo	Complejo	Extremadamente Rápido	Seco	Roca
RETORSIVO	Reactivo	Compuesto	Muy Rápido	Húmedo	Tierra
AMPLIÁNDOSE	Suspendido	Múltiple	Rápido	Mojado	Residuos
ALARGÁNDOSE	Inactivo	Sucesivo	Moderado	Muy Mojado	
CONFINADO	Dormido	Sencillo	Lento		
DISMINUYENDO	Abandonado		Muy Lento		
MOVIÉNDOSE	Estabilizado		Extremadamente Lento		
	Relicto				

INFLUENCIA DE LA ACTIVIDAD ANTRÓPICA

El impacto ejercido por las actividades normales de desarrollo del ser humano, como lo es la expansión de las zonas urbanas, y la constante necesidad de tierras de explotación agrícola e industrial, impacta de forma directa a la geomorfología de los taludes cercanos o que se puedan ver afectados directamente por estos cambios. Los procesos de activación pueden ser sutiles como un leve aumento en las vibraciones, corte en el pie de talud o un proceso de deforestación del talud.

La modificación de las condiciones normales de un talud o ladera genera cambios en los ciclos hidrológicos como en las cargas soportadas por el terreno puede generar la activación de un talud o en su caso disminuir el nivel de ocurrencia de un posible deslizamiento, lo cierto es que no hay una manera específica para estimar el impacto que tenga la acción antrópica en un talud, por esta razón se hace indispensable la realización de estudios de susceptibilidad.

5.3 INFLUENCIA DE LA ESTRATIGRAFÍA Y LITOLOGÍA

La naturaleza del material que forma un talud está íntimamente relacionada con el tipo de inestabilidad que éste puede sufrir, presentando las diferentes litologías, distinto grado de susceptibilidad potencial ante la ocurrencia de deslizamientos o roturas. Las propiedades físicas y resistentes de cada tipo de material, junto con la presencia de agua, gobiernan su comportamiento tenso deformacional y, por tanto, su estabilidad.

Aspectos como la alternancia de materiales de diferente litología, competencia y grado de alteración, o la presencia de capas de material blando o de estratos duros, controlan los tipos y la deposición de las superficies de rotura. En los suelos, que generalmente se pueden considerar homogéneos en comparación con los materiales rocosos, las diferencias en el grado de compactación, cementación, granulometría predisponen zonas de debilidad y de circulación de agua, que pueden generar inestabilidades. En los macizos rocosos, la existencia de capas o estratos de diferente competencia implica también un diferente grado de fracturación en los materiales, lo que complica la caracterización y el análisis del comportamiento del talud Revelo, V. (2008).

5.4 INFLUENCIA DE LA VEGETACIÓN

El efecto de la vegetación sobre la estabilidad de los taludes ha sido muy debatida en los últimos años; el estado del arte actual deja muchas dudas e inquietudes y la cuantificación de los efectos de estabilización de las plantas sobre el suelo, no ha tenido una explicación universalmente aceptada. Sin embargo la experiencia ha demostrado el efecto positivo de la vegetación, para evitar problemas de erosión, reptación y fallas subsuperficiales Suarez J.; (2009)

5.4.1 EFECTOS HIDROLÓGICOS DE LA VEGETACIÓN

5.4.2 INTERCEPCIÓN DE LA LLUVIA

De acuerdo con Styczen, M. (1996), la lluvia se divide en dos partes, la lluvia que cae directamente sobre el suelo y la lluvia que es interceptada por el follaje de la vegetación.

$$\text{Lluvia Interceptada} = (\text{Lluvia}) \times (\% \text{ Área Follaje}).$$

Según Gregory, K. (1973) dependiendo de la intensidad de la lluvia y del cubrimiento y tipo de vegetación en un bosque tropical, puede interceptarse hasta un 60% del total de la lluvia anual. Parte de la lluvia interceptada es retenida y evaporada y parte alcanza finalmente, la tierra por goteo o por flujo sobre las hojas y troncos. Es importante determinar el tiempo entre la lluvia y el goteo para analizar el efecto hidrológico de cada tipo de vegetación.

5.4.3 RETENCIÓN DE AGUA

La retención de agua en el follaje demora o modifica el ciclo hidrológico en el momento de una lluvia. Este fenómeno disminuye la rata de agua de escorrentía disminuyendo su poder erosivo, pero puede aumentar la rata de infiltración. La retención de agua en el follaje depende del tipo de vegetación, sus características y la intensidad de la lluvia.

Los árboles de mayor volumen o densidad de follaje, demoran más el ciclo hidrológico en razón de que retienen por mayor tiempo las gotas de lluvia.

En el caso de lluvias muy intensas la retención de agua es mínima, pero en el caso de lluvias moderadas a ligeras, la retención puede ser hasta de un 30%, dependiendo de las características de la vegetación.

Rice y Krames (1970) sugirieron que el clima determina el efecto relativo de la vegetación para prevenir deslizamientos en los climas en los cuales la precipitación es muy grande, el efecto de la cobertura vegetal sobre la estabilidad es mínimo y en áreas de clima árido la cobertura vegetal puede afectar en forma significativa la ocurrencia de deslizamientos.

5.4.4 ACUMULACIÓN DE AGUA

Parte del agua retenida es acumulada en el follaje para luego ser evaporada. Algunas especies vegetales como el Maíz poseen espacios importantes para almacenamiento de agua.

En condiciones específicas la vegetación puede actuar como una capa contenedora de agua aumentando así el nivel freático y la humedad relativa presente, por ello cuando se aumenta la infiltración el talud o ladera puede sufrir un efecto de licuefacción,

5.4.5 GOTE O FLUJO POR EL FOLLAJE

El agua retenida no acumulada retorna a la tierra por goteo o flujo, por el follaje. La rapidez de flujo depende de la aspereza de las superficies de las hojas, tronco, los diámetros y ángulos de las hojas con la vertical.

Los procesos de revegetalización permiten aumentar el flujo de agua superficial sin que haya un incremento considerable de la infiltración en el talud, o procesos de erosión hidrológica producto del arrastre generado por la masa de agua.

5.4.6 EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evapotranspiración es un efecto combinado de evaporación y transpiración. Su efecto es una disminución de la humedad en el suelo. Cada tipo de vegetación en un determinado tipo de suelo, tiene un determinado potencial de evapotranspiración y se obtiene generalmente, una humedad de equilibrio dependiendo en la disponibilidad de agua lluvia y nivel freático.

Greenway (1987) reporta que la capacidad de una planta para consumir humedad del suelo depende del tipo y tamaño de la especie, clima, factores ambientales y características del suelo. La evapotranspiración puede medirse utilizando la relación entre la evapotranspiración de la superficie cubierta por plantas y la de un cuerpo de agua expuesto (E_t/E_o). Los valores de (E_t/E_o) dependen de las condiciones ambientales y de la variedad de planta, de acuerdo a la tabla. Estos valores corresponden al potencial de evapotranspiración en el momento en que la humedad del suelo es alta. A medida que disminuye la humedad del suelo, la evapotranspiración disminuye.

5.5 CONDICIONES HIDROGEOLÓGICAS

El agua es uno de los factores más desestabilizadores de un talud, ya que rompe y disgrega las conexiones entre las partículas del suelo, o erosiona progresivamente las fisuras que puedan existir en los macizos rocos. Este proceso se explica en Revelo, V. (2008). La mayor parte de las roturas se producen por los efectos del

agua en el terreno, como la generación de presiones intersticiales, o los arrastres y erosión, superficial o interna, de los materiales que forman el talud. En general, puede decirse que el agua es el mayor enemigo de la estabilidad de los taludes (además de las acciones antrópicas, cuando se realizan excavaciones inadecuadas sin criterios geotécnicos).

La presencia de agua en un talud reduce su estabilidad al disminuir la resistencia del terreno y aumentar las fuerzas tendientes a la inestabilidad. Sus efectos más importantes son:

- Reducción de la resistencia al corte de los planos de rotura al disminuir la tensión normal efectiva
- La presión ejercida sobre grietas de tracción aumenta las fuerzas que tienden al deslizamiento. Aumento del peso del material por saturación.
- Erosión interna por flujo subsuperficial o subterráneo.
- Meteorización y cambios en la composición mineralógica de los materiales.
- Apertura de discontinuidades por agua congelada.

La forma de la superficie freática en un talud depende de diferentes factores, entre los que se encuentran la permeabilidad de los materiales, la geometría o forma del talud y las condiciones de contorno. En macizos rocosos, la estructura geológica tiene una gran influencia en la disposición del nivel freático y, por tanto, en la distribución de las presiones intersticiales sobre cualquier superficie potencial de deslizamiento en el talud, así como la alternancia de materiales permeables e impermeables.

El nivel freático puede sufrir cambios estacionales o como consecuencia de dilatados periodos lluviosos o de sequía. Solo parte del agua de lluvia o escorrentía penetra en el terreno, y una mínima parte alcanza el nivel freático. Si bien la modificación del nivel freático obedece generalmente a cambios lentos o periodos largos, en caso de materiales muy permeables puede llegar a producirse un ascenso relativamente rápido como consecuencia de precipitaciones intensas.

Además del agua en el interior del terreno, hay que considerar el papel del agua superficial (por precipitación, escorrentía, etc.), que puede causar problemas importantes de estabilidad al crearse altas presiones en las discontinuidades y grietas por las que se introduce, y en la zona más superficial del terreno; de hecho, las roturas en taludes en suelos son más frecuentes en periodos de lluvias intensas, tras una fuerte tormenta o en épocas de deshielo. Los fenómenos de erosión y lavado en materiales blandos o poco consistentes aparecen asimismo asociados a la presencia de agua superficial.

6 METODOLOGÍAS APLICABLES PARA ESTUDIOS DE RM PARA LA IMPLEMENTACIÓN SIG

Aunque existen diferentes metodologías que permiten la generación de mapas de susceptibilidad en SIG, todas estas presentan un modelo en común que se puede resumir en: (1) Un mapeo del registro histórico de movimientos en masa en el área de estudio. (2) Un mapeo y estudio detallado de posibles factores geoambientales (litología, pendientes, aspecto, etc.) de inestabilidad directa o indirecta en un movimiento en masa. (3) Un esquema de asignación de valores de peso a los factores. (4) Establecer correlaciones entre los diferentes factores para generar una estimación. (5) Clasificación de zonas analizadas según su grado de susceptibilidad.

Aunque las metodologías tienen lo anteriormente expuesto en común, es de aclarar que existen grandes diferencias entre los distintos modelos que se implementan en la actualidad, debido al detalle y el manejo de la información. Adicionalmente se puede reconocer diferentes planteamientos como:

6.1 MÉTODOS HEURÍSTICOS

Según Van Westen, V (2000), en el método heurístico el criterio experto del geomorfólogo que realiza el estudio se utiliza para clasificar la susceptibilidad. La cartografía de los movimientos en masa y su contexto geomorfológico son el principal elemento de entrada para la determinación de la amenaza. Se distinguen dos tipos de análisis heurístico:

- Análisis geomorfológico o método de cartografía directa, que permite generar el grado de susceptibilidad del terreno y es determinado por el geólogo directamente en el campo. El proceso se basa en su experiencia. Los criterios aplicados son, por lo tanto, difíciles de definir, ya que varían según el sitio estudiado.
- Análisis por combinación cualitativa de mapas. Por medio del cual busca superar el problema de los “criterios ocultos” del análisis geomorfológico. En este método, el geocientífico usa su criterio experto para asignar pesos (valores que representan un determinado grado de importancia) a una serie de mapas parámetro (mapas de condiciones del terreno que se consideran relacionadas, en diferente grado, con la ocurrencia de deslizamientos). Las condiciones del terreno se suman de acuerdo con estos pesos, lo que lleva a valores de susceptibilidad que pueden ser agrupados en categorías o clases.

Para concluir este punto, se puede establecer que los métodos heurísticos son procesos de decisión subjetivos utilizados para solucionar problemas de una manera sencilla y directa, utilizando la experiencia previamente adquirida con situaciones similares a fin de establecer criterios en la manera en la cual se debe abordar el análisis del problema, partiendo del estudio profundo de los factores que puedan incidir en el suceso.

El análisis heurístico, permite generar mapas de amenaza de manera sencilla asignando valores de peso a cada uno de los parámetros que se tomaran, y la suposición o interpolación de información relevante con base en trabajos anteriores o mediante un valor persistente en una serie de datos, según los requerimientos del proyecto o de una zona a analizar; esto basado en trabajos de campo, estudios de la geomorfología de la región y la foto interpretación.

Por lo anterior estos métodos son susceptibles a generar una gran imprecisión en la estimación, si no se cuenta con un esquema crítico y objetivo al momento de asignar valores a las variables que se consideren para el análisis.

6.2 MÉTODOS ESTADÍSTICOS

Los métodos estadísticos y el análisis de frecuencia de deslizamientos, permiten obtener una estimación de manera formal, usando modelos matemáticos plenamente definidos y comprobados.

Son métodos indirectos cuyos resultados se pueden extrapolar a zonas distintas de las utilizadas para estimar la susceptibilidad, con condiciones geológicas y climáticas homogéneas. Estas aproximaciones permiten regionalizar los resultados como lo explica Chung, C. & Jibson, R.(2002):

- Los métodos estadísticos univariantes se dividen en 2 grupos: los que utilizan el análisis condicional y los que no lo utilizan. El análisis condicional trata de evaluar la relación probabilística entre diversos factores relevantes para las

condiciones de inestabilidad y las ocurrencias de deslizamientos. Se basan en la superposición de uno o más factores con el mapa de distribución de deslizamientos, para obtener una probabilidad condicionada de cada factor a la presencia o ausencia de deslizamientos. Como resultado de la combinación de todos los factores se obtiene un mapa de polígonos de características homogéneas conocidas como unidades de condición única.

Para integrar y combinar toda la información se utiliza la técnica de las funciones de favorabilidad (Chung y Fabbri, 1993; Chung y Leclerc, 1994). Con ellas se realiza una transformación de cada clase continua o discreta para cada factor estudiado asignándole un valor entre 0 y 1. Posteriormente, estos factores transformados se combinan entre ellos mediante reglas de integración y sus resultados se interpretan en términos de probabilidad según el teorema de Bayes (Morgan, 1968; Chung y Leclerc, 1994).

Otros modelos estadísticos no basados en las funciones de favorabilidad son el modelo basado en la combinación de factores que analiza la probabilidad individual de los factores.

- Los métodos estadísticos multivariantes estudian la interacción y dependencia de un conjunto de factores que actúan simultáneamente en la ocurrencia de deslizamientos, para establecer la implicación que tienen cada uno de ellos. Se trata de una aproximación más objetiva que otras técnicas situándose hoy como uno de los procedimientos con mejores resultados en la predicción espacial de los deslizamientos. Las técnicas estadísticas más utilizadas son la regresión múltiple y el análisis discriminante (Jones et al., 1961); (Neuland, 1976); (Carrara, 1983), (Mora y Vahrson, 1994).

El resultado de ambos métodos son funciones basadas en la combinación lineal de los factores de mayor significación estadística para definir las condiciones de inestabilidad, estando basadas en la presencia o ausencia de deslizamientos. El

análisis discriminante permite separar varias poblaciones de una misma muestra caracterizadas por las mismas variables a partir de la función discriminante.

Ésta es una combinación lineal de las variables independientes que refleja el distinto comportamiento de los individuos dentro de la muestra. La regresión múltiple, por su parte, considera una única población y varios grupos de variables, siendo útil cuando se buscan relaciones explicativas entre diversas variables. El método determina la influencia de un grupo de variables independientes sobre una o más variables dependientes (Baeza, 1994).

Según la obtención y localización de los datos a tratar existen dos métodos de análisis multivariantes (van Westen, 1993):

- a) Análisis estadístico utilizando una población de laderas cuyos atributos son recogidos y asociados a deslizamientos individuales (Neuland, 1976; Carrara et al., 1977b; Lessing et al 1983; Corominas et al., 1992; Othman et al 1992; Baeza, 1994).
- b) Análisis estadísticos realizados en unidades de terreno que cubren el área entera de estudio. Para cada unidad se recogen los datos de un número de factores geológicos, geomorfológicos, hidrológicos y morfométricos y se analizan utilizando regresión múltiple o análisis discriminante (Carrara et al., 1978, 1990, 1991; Carrara, 1983, 1988, 1992).

Por último, el análisis de frecuencia de deslizamientos van Westen, (1993) evalúa la peligrosidad a los deslizamientos, a diferencia de los comentados anteriormente, que suelen utilizarse para evaluar la susceptibilidad. La valoración de la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento en un cierto lugar y dentro de un periodo de tiempo sólo es posible cuando se puede hallar la relación entre la ocurrencia de deslizamientos y la frecuencia de factores desencadenantes como lluvias intensas

o terremotos (van Westen, 1993). Se han desarrollado diversas técnicas que determinan valores umbrales de lluvias históricas.

6.3 MÉTODOS DETERMINISTAS

Los modelos deterministas parten de la presunción de que no existen sucesos genuinamente aleatorios o azarosos, y que un evento es potencialmente predecible a partir del presente y pasado. Tendrán como base a los modelos hidrológicos y de estabilidad que consideran la información detallada de las pendientes basadas en la mecánica de suelos. Este método busca eliminar la subjetividad cuantificando los grados de riesgo en valores absolutos, como por ejemplo a través del factor de seguridad (Barredo et al. 2000).

Una gran ventaja de este método es el alto grado de simplificación, principalmente para mapeos de escala media y regional, debido a la gran variabilidad de los parámetros geotécnicos. Además permite generar una aproximación en el comportamiento que tendrá el talud. Sin embargo, este método es particularmente tedioso y complicado de realizar debido a los modelos hidrológicos y de estabilidad.

6.4 METODOLOGÍA APLICADA

Uno de objetivos de esta tesis es generar una metodología sencilla que permita la generación de un mapa espacial, con este fin se utilizará un Método Heurístico Cualitativo, con base en lo anterior se propone la Metodología Mora-Vahrson-Mora (MVM), Ésta permite obtener una zonificación de la susceptibilidad del terreno a deslizarse, mediante la combinación de la valoración y peso relativo de diversos indicadores morfodinámicos, la cual es sencilla de implementar en un sistema de información geográfica (SIG). Se pretende dividir el área estudiada en sectores de comportamiento similar y proveer una base para entender las características de cada uno de estos sectores.

La metodología es simple, fácilmente recordada y entendible; cada uno de sus factores es claro y la terminología utilizada es ampliamente aceptada, incluye los

factores más significativos desde el punto de vista de la inestabilidad de laderas; se basa en parámetros que pueden determinarse de manera rápida y con bajo costo en el campo y en la oficina, así como, en valoraciones que incluyen el peso relativo de los parámetros Mora R;(2004).

7 MÉTODO MORA-VAHRSON

El método Mora-Vahrson es de tipo heurístico, específicamente una combinación cualitativa de mapas. Se basa en la interacción entre los factores relacionados con la susceptibilidad: Relieve, litología y humedad así como dos elementos externos y dinámicos que actúan como factores de disparo, estos son: la sismicidad y las lluvias intensas. Estos factores se obtienen de la observación y medición de indicadores morfodinámicos y su distribución espacio-temporal.

La combinación de los factores y parámetros se realiza considerando que los deslizamientos ocurren cuando en una ladera, compuesta por una litología determinada, con cierto grado de humedad y con cierta pendiente, se alcanza un grado de susceptibilidad (elementos pasivos). Bajo estas condiciones, los factores externos y dinámicos, como son la sismicidad y las lluvias intensas (elementos activos) actúan como factores de disparo que perturban el equilibrio, la mayoría de las veces precario, que se mantiene en la ladera (Mora, R. et al., 1992).

El nivel de Amenaza relativa presente en la ladera será igual al producto de la susceptibilidad por la posibilidad de ocurrencia de cualquier evento adverso:

$$H = EP * D$$

Donde:

H: grado de susceptibilidad al deslizamiento.

EP: valor combinado de los elementos pasivos.

D: valor del factor de disparo.

Factores intrínsecos de la ladera o talud, determinan la predisposición a sufrir un movimiento en y se representa mediante:

$$EP = S_i * S_h * S_p$$

Donde:

S_i : Valor susceptibilidad litológica.

S_h : Valor del parámetro de humedad del terreno.

S_p : Valor del parámetro de la pendiente.

El factor de disparo se compone de los siguientes parámetros (Mora, R. et al., 1992):

$$D = D_s + D_l$$

Donde:

D_s : Parámetro de disparo por sismicidad.

D_l : Parámetro de disparo por lluvia.

Sustituyendo los parámetros apropiados, la ecuación original se puede expresar como (Mora, R. et al., 1992)

$$H = (S_i * S_h * S_p) * (D_s + D_l)$$

De esta ecuación se pueden derivar las relaciones (Mora, R. et al., 1992):

$$H_s = (S_i * S_h * S_p) * (D_s)$$

$$H_{ll} = (S_i * S_h * S_p) * (D_{ll})$$

Donde:

H_s : Susceptibilidad por Sismicidad.

H_{II} : Susceptibilidad por llluvias.

Para los resultados de la combinación de todos los factores no se puede establecer una escala de valores única, pues los mismos dependen de las condiciones de cada área estudiada. Por este motivo, se sugiere dividir el rango de valores obtenidos, para el área de estudio, en cinco clases de susceptibilidad y asignar los calificativos que se presentan en el Tabla 4.

El calificativo de susceptibilidad es una representación cuantitativa de los diferentes niveles de amenaza, que muestra solamente el rango de amenaza relativa en un sitio en particular y no la amenaza absoluta. Se sugiere que la asignación de rangos se efectúe con la utilización de un histograma de los resultados de la combinación de parámetros.

Se debe enfatizar el hecho de que esta clasificación relativa de la susceptibilidad, se basa en la influencia que tienen las diferentes condiciones examinadas en un área específica; es decir, las áreas de susceptibilidad determinadas para un sitio son válidas únicamente para este sitio. Condiciones similares, encontradas fuera del sitio, pueden producir un resultado diferente por una pequeña diferencia en alguno de los factores.

Tabla 4: Clasificación de la susceptibilidad al deslizamiento (Mora, R. et al., 1992).

Clase		Característica
I	Muy baja	Sectores estables, no se requieren medidas correctivas. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios indispensables como hospitales, centros educativos, estaciones de policía, bomberos.
II	Baja	Sectores estables que requieren medidas correctivas menores, solamente en caso de obras de Infraestructura de gran envergadura. Se debe considerar la influencia de los Sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios indispensables como hospitales, centros educativos, estaciones de policía, bomberos, etc. Los Sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado.
III	Moderada	No se debe permitir la construcción de infraestructura si no se realizan estudios geotécnicos y se mejora la condición del sitio. Las mejoras pueden incluir; movimientos de tierra, estructuras de retención, manejo de aguas superficiales y subterráneas. bioestabilización de terrenos. etc. Los Sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado. Recomendable para usos urbanos de baja densidad
IV	Alta	Probabilidad de deslizamiento alta (< 50%) en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Para su utilización se deben realizar estudios de estabilidad a detalle y la implementación de medidas correctivas que aseguren la estabilidad del sector, en caso contrario, deben mantenerse como áreas de protección.
V	Muy Alta	Probabilidad de deslizamiento muy alta (> 50%) en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Prohibido su uso con fines urbanos. se recomienda usarlos como áreas de protección

7.1 DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA METODOLOGÍA MVM PARÁMETRO DE LA PENDIENTE (S_p).

Este parámetro de susceptibilidad representa la geomorfología de la zona a estudiar y relaciona la incidencia de la gravedad en la inestabilidad de la zona debida a la pendiente de la misma. Este parámetro utiliza las clases de pendiente de Van Zuidam (1986), con las cuales se describen los procesos característicos y esperados, y las condiciones del terreno, así como una leyenda de colores sugerida por el mismo autor (Tabla 5). Las clases de pendientes pueden coincidir con los sectores críticos, donde los procesos de deslizamiento son dominantes. (Van Zuidam, 1986).

Tabla 5: Clases de pendientes, condiciones del terreno, colores sugeridos y valoración del parámetro S_p
 (Mora, R. et al., 1992).

Clase de pendiente		Condiciones del terreno	Color Sugerido	Valor del Parámetro S_p
Grados	Porcentaje			
0-2	0-2	Planicie, sin denudación apreciable	Verde oscuro	0
2-4	2-7	Pendiente muy baja, peligro de erosión	Verde claro	1
4-8	7-15	Pendiente baja peligro severo de erosión	Amarlo	2
8-16	15-30	Pendiente moderada deslizamientos ocasionales, peligro severo de erosión	Naranja	3
16-35	30-70	Pendiente fuerte, procesos denudacionales intensos (deslizamientos), peligro extremo de erosión de suelos	Rojo claro	4
35-55	70-140	Pendiente muy fuerte afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, reforestación posible	Rojo oscuro	5
>55	>140	Extremadamente fuerte afloramientos rocosos, procesos denudacionales severos (caída de rocas), cobertura vegetal limitada	Morado	6

Alternativamente para zonas con topografía homogénea, o proyectos de pequeña a mediana escala, se puede implementar el relieve relativo del terreno utilizando los rangos de clasificación de Mora y Vahrson como se muestra a continuación:

Tabla 6: Factor Sp en base al Relieve Relativo.

Valor de Pendiente (m/Km ^l)	Equivalente en Grados	Calificativo	Factor Sp
0-75	0-4,29	muy baja	0
76-175	4,30- 9,93	baja	1
176-300	9,94-16,70	moderada	2
301-500	16,71-26,57	media	3
501-800	26,33 - 33,66	alta	4
>800	>38,66	muy alta	5

7.1.1 IMPLEMENTACIÓN EN SIG (ARCGIS).

Este parámetro requiere información detallada del terreno o de la zona a estudiar. Para realizar la respectiva clasificación según el método, la información requerida se puede obtener mediante:

1. Levantamientos Topográficos del Terreno.
2. Extracción de fuentes Alternas (Google SketchUp).
3. Digitalización desde una Carta Topográfica.

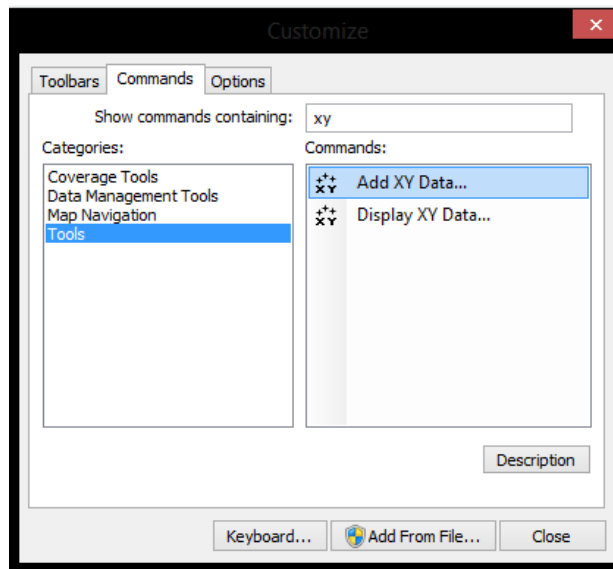
Con esta información se procederá a generar MDE (Modelo de Elevación Digital), que en ArcGis recibe el nombre de TIN (Triangular Irregular Network), que consiste en una red de elevación digital por triangulación, y el procedimiento de generación será expuesto a continuación:

1. **Mediante Levantamientos Topográficos:** Del estudio topográfico de deberán obtener la planimetría como la altimetría debidamente referenciadas a un mojón, en caso de que se deba referenciar a una carta cartográficas.

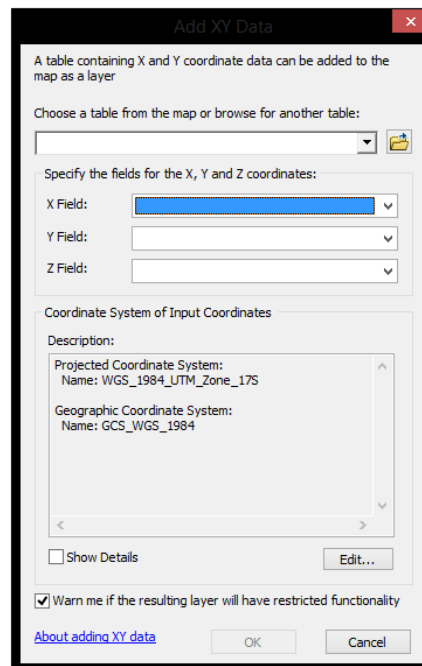
Se debe referenciar la ruta de acceso a la carpeta o al archivo que contiene el levantamiento topográfico previamente mediante ArcCatalog, la superficie TIN se generará a partir de datos cartográficos que contengan valores de altitud o elevación (curvas de nivel preexistentes, datos grabados manualmente con un dispositivo GPS, levantamientos topográficos, etc). Es necesario tener activada la extensión 3D Analyst. Se puede resumir en los siguientes pasos:

- Agregar los ficheros en formato XML.

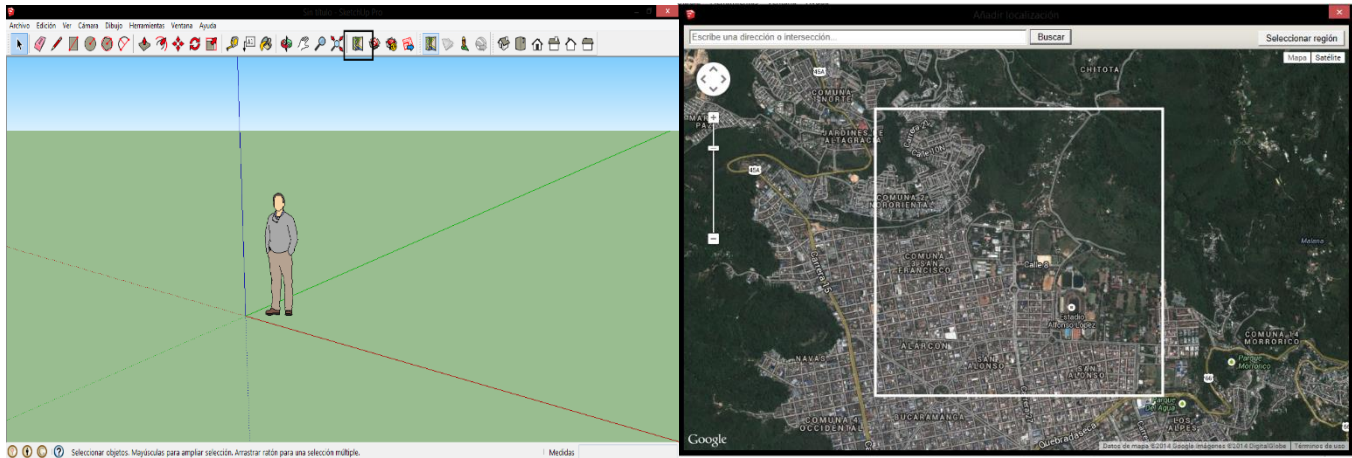
Para ello se utiliza Add XY en caso que no se encuentre disponible se agrega entrando a Customize – Commands – XY en barra de Búsqueda – Tools – Se arrastra hasta la barra de tareas.



Utilizando la herramienta Add XY Data se procede a realizar la importación de datos tipo XML a ArcGis, es simple solo se especifica en que columna se encuentra las coordenadas X,Y,Z y origen del archivo así como el sistema de coordenadas.



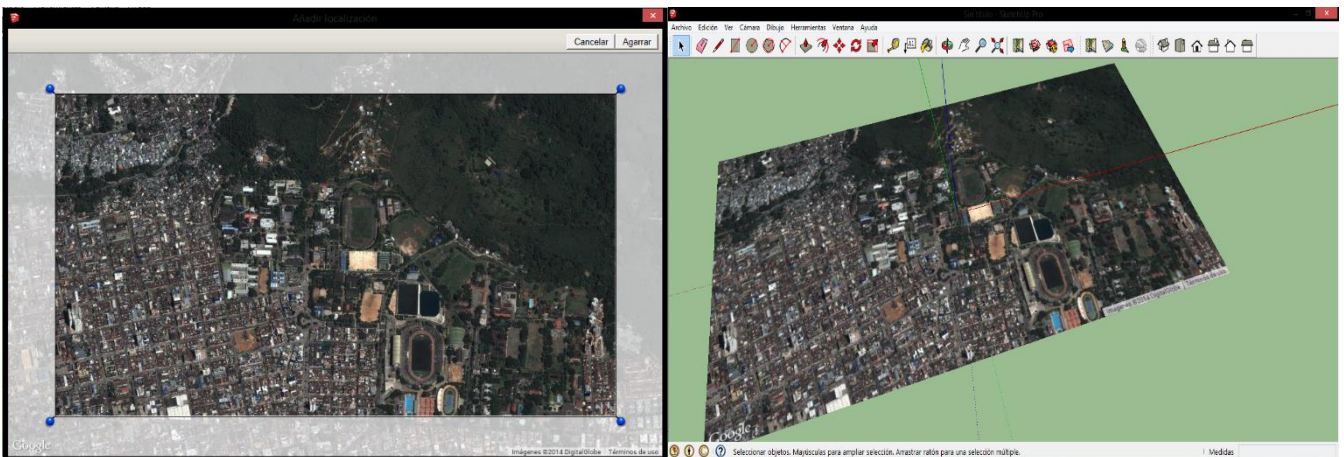
- Mediante el uso de Fuentes Alternas: Se puede extraer la topografía de una zona mediante la implementación de software alternos a ArcGis como Google SketchUp, que aunque no está diseñado para este fin permite extraer la topografía de diferentes zonas del mundo, con un manejo intuitivo ya que solo se selecciona las unidades en las que desee trabajar.



Una vez iniciado el programa se debe seguir Añadir Localización-Agarrar Región - Agarrar.



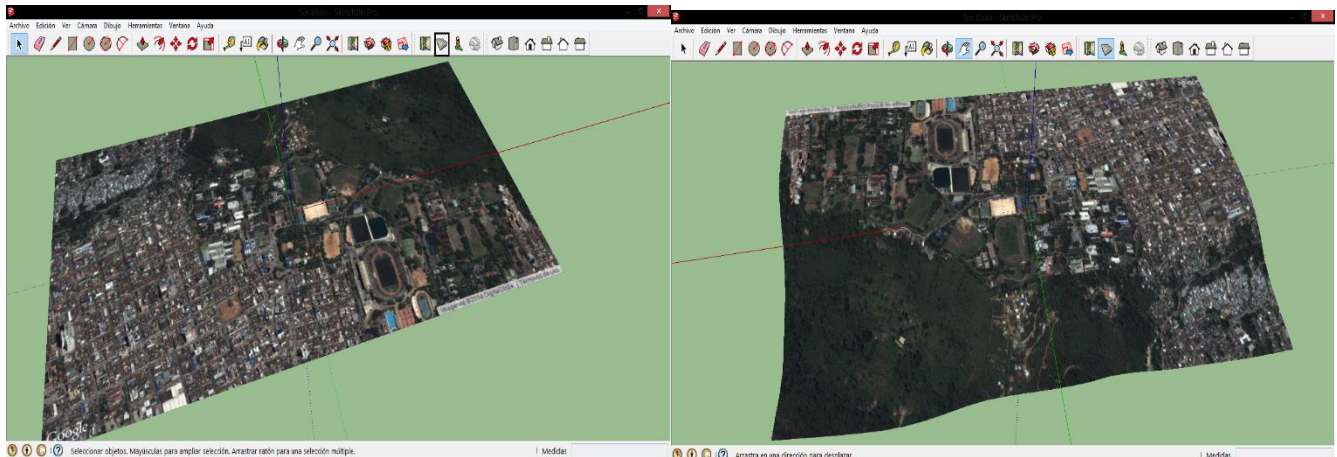
Boton Añadir Localización



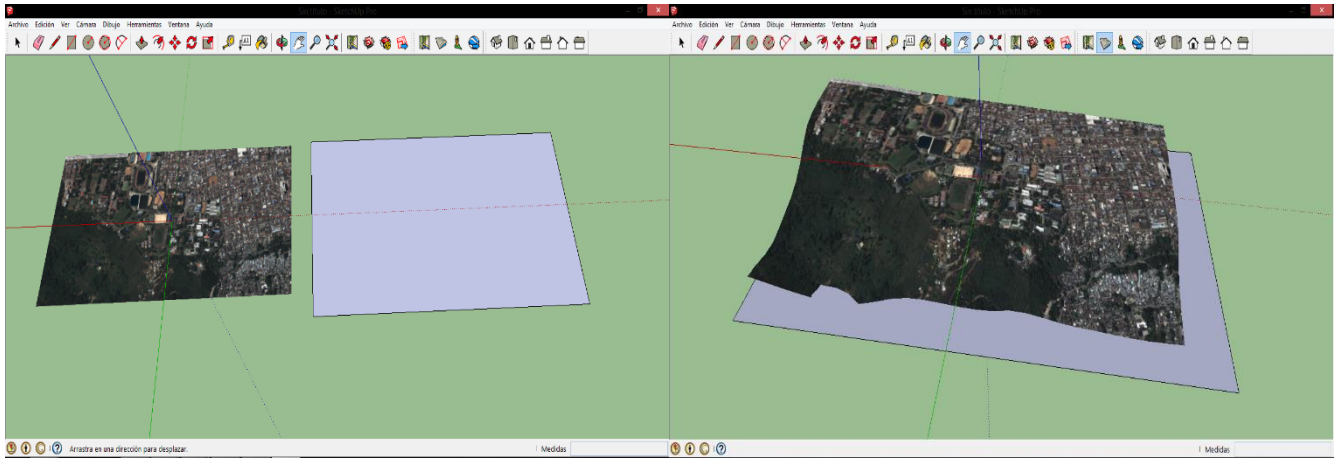
Una vez hecho esto se tendrá una imagen en 2D, para generar la superficie. Se debe oprimir Cambiar Terreno.

 Boton Cambiar Terreno.

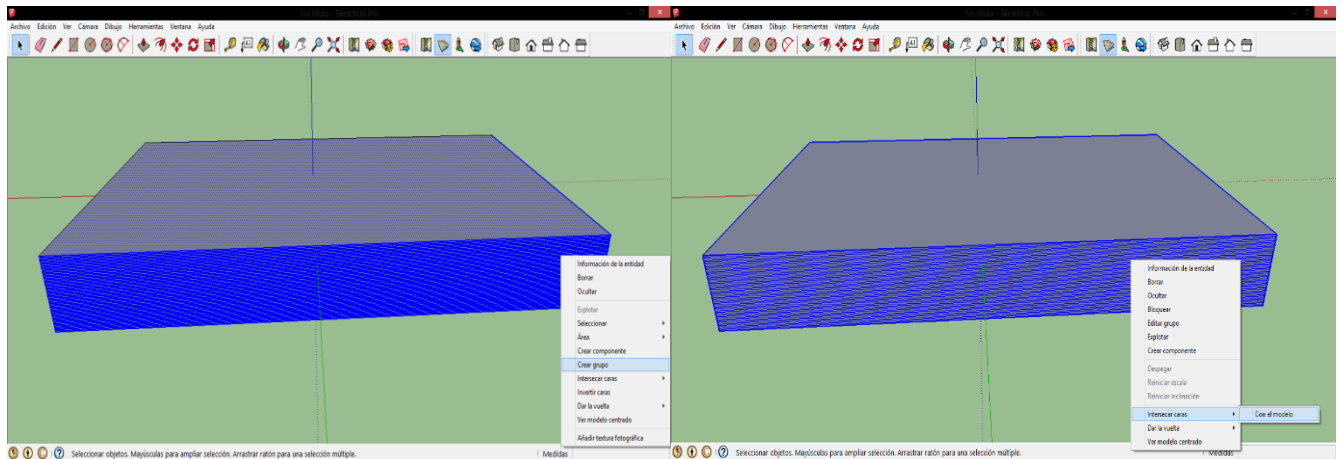
Es de resaltar que este software no está diseñado para extraer la topografía de una zona, pero su utilización permite tener acceso a geomorfología de zonas de difícil acceso o cuando no se cuenta con un estudio topográfico.



Posteriormente se genera un rectángulo en la base del modelo, este polígono servirá como bosquejo para delimitar el espaciamiento entre las curvas de nivel.

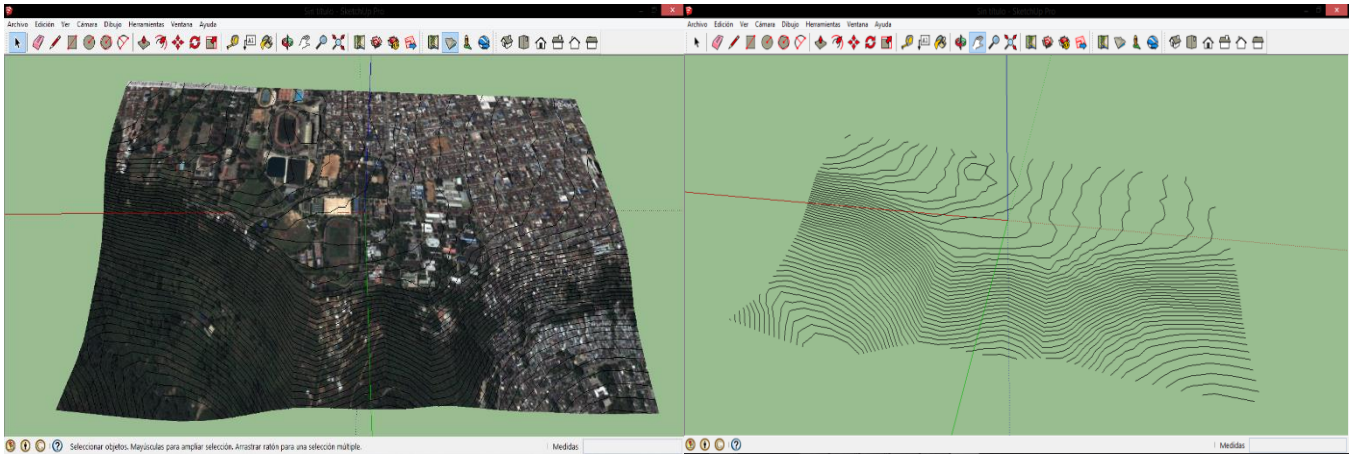


El polígono se copiará con el comando mover presionando la tecla CTRL, se copiará dependiendo la distancia a la cual se deseen las curvas de nivel es decir 5 o 10 m, hasta que cubra completamente el modelo digital generado a partir de Google Maps; se copiará múltiple veces el polígono ingresando la letra x seguida del número de veces que se desee copiar.



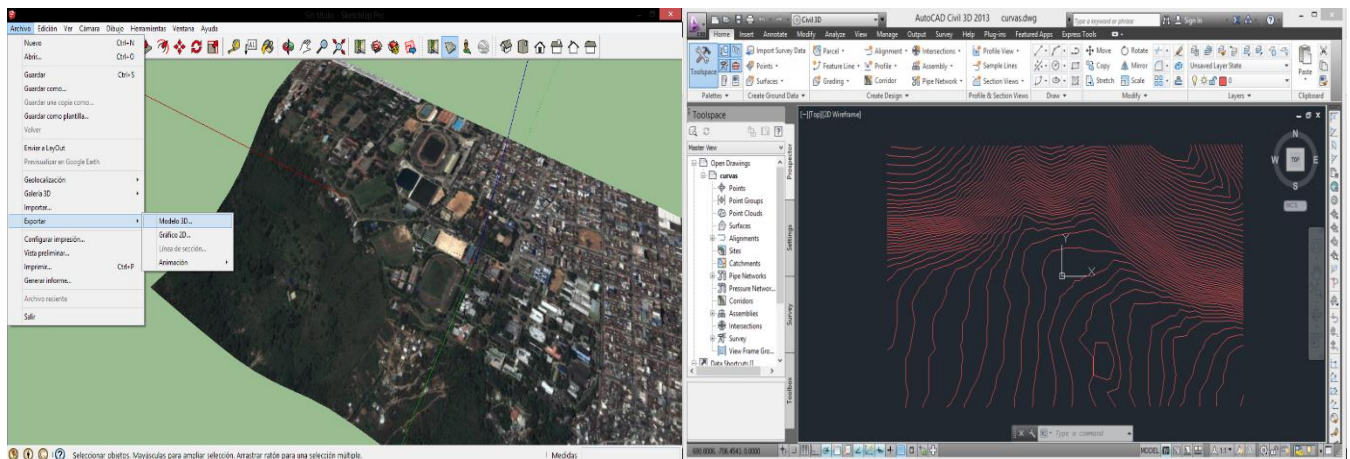
Después de realizar el anterior procedimiento se selecciona el grupo de objetos, Clic derecho - generar grupo, nuevamente Clic derecho - intercceptar con el modelo.

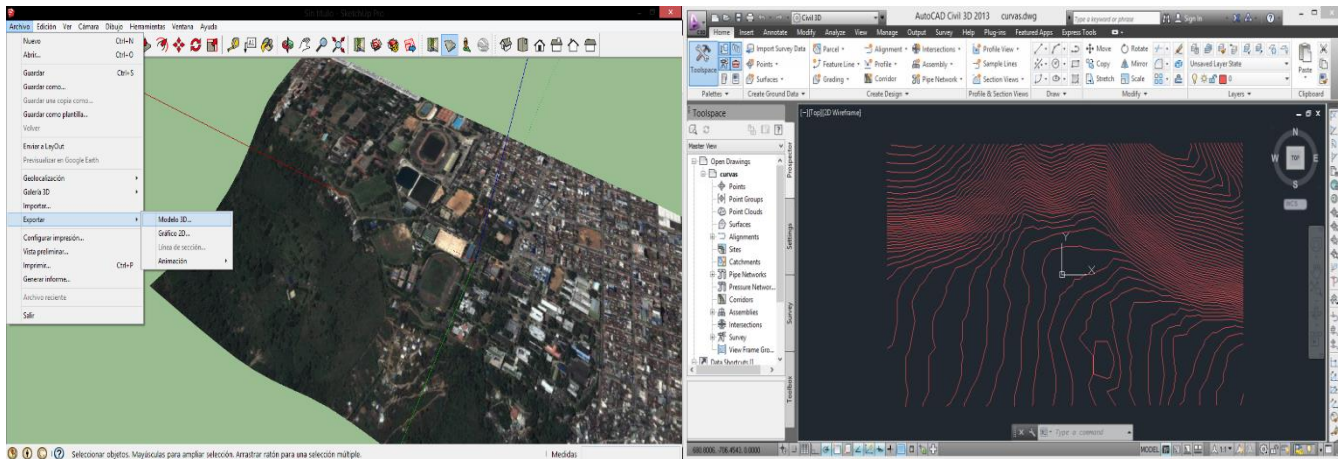
Al realizar este procedimiento se señalará la intersección entre el modelo y los polígonos. Para finalizar se podrá desactivar el modelo digital de Google Maps, Ventana-Capas y seleccionar el mismo.



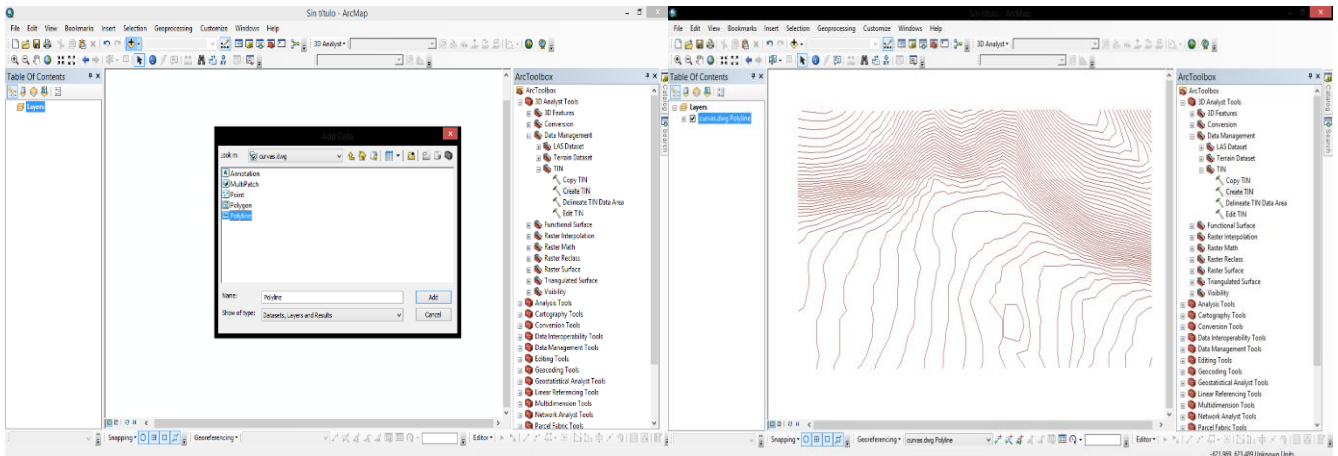
De esta manera se podrá obtener de manera sencilla la topografía de una zona o región de interés. Para poder generar nuestra superficie en ArcGis se deberá exportar el modelo en 3D de la siguiente manera:

Archivo-Exportar-Modelo 3D, que deberá ser modificado en AutoCad Civil, permitiendo así exportar los elementos





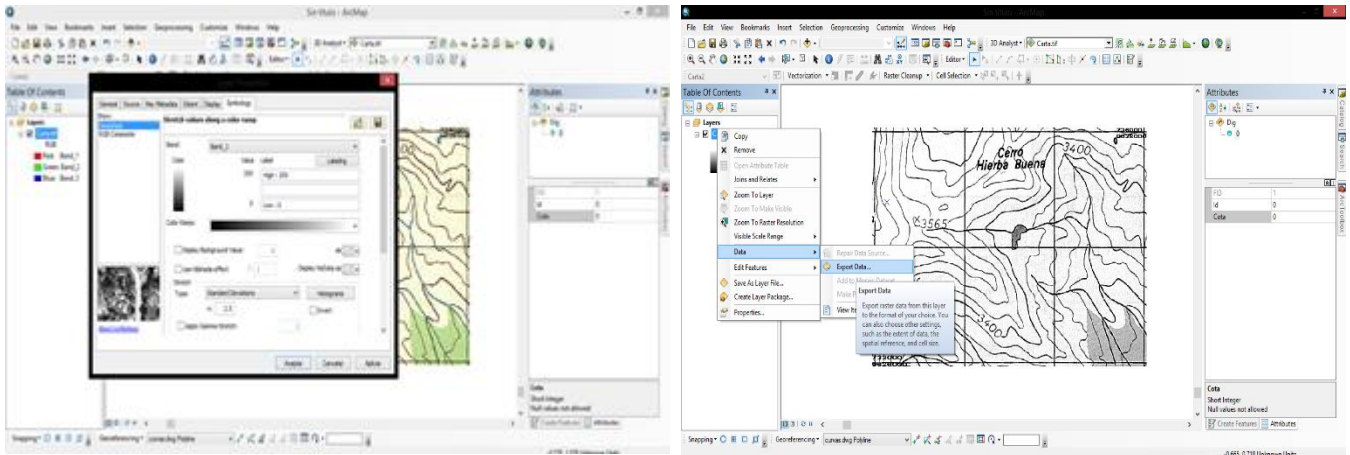
Para generar las curvas en argis, solo se necesita exportar las polineas del archivo Daw. Es de resaltar que antes de comenzar a utilizar las curvas, es necesario guardar el archivo en formato shape.

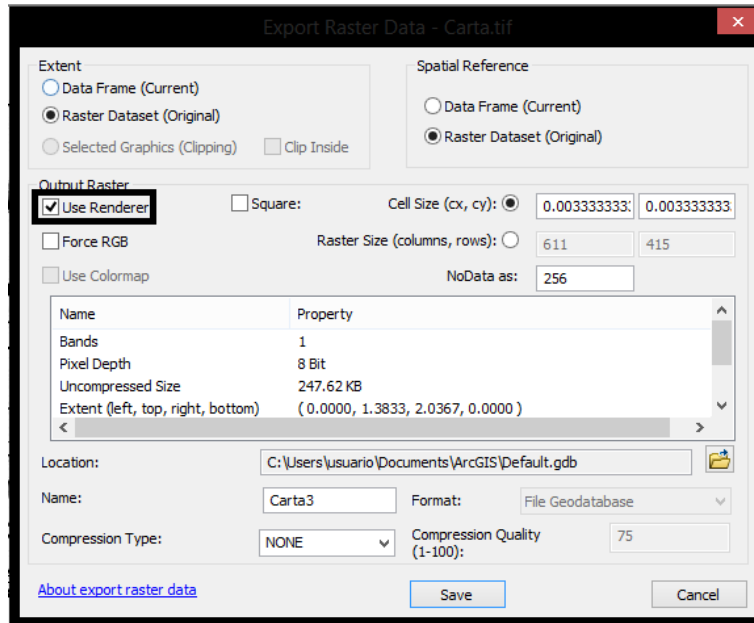


Nota: Se debe generar un surface en AutoCad para poder realizar la exportación, sino se realiza puede generar errores en la transición a ArcGis. Luego de realizar la importación se debe generar un Shapefile, que contenga las curvas para poder generar nuestra superficie TIN.

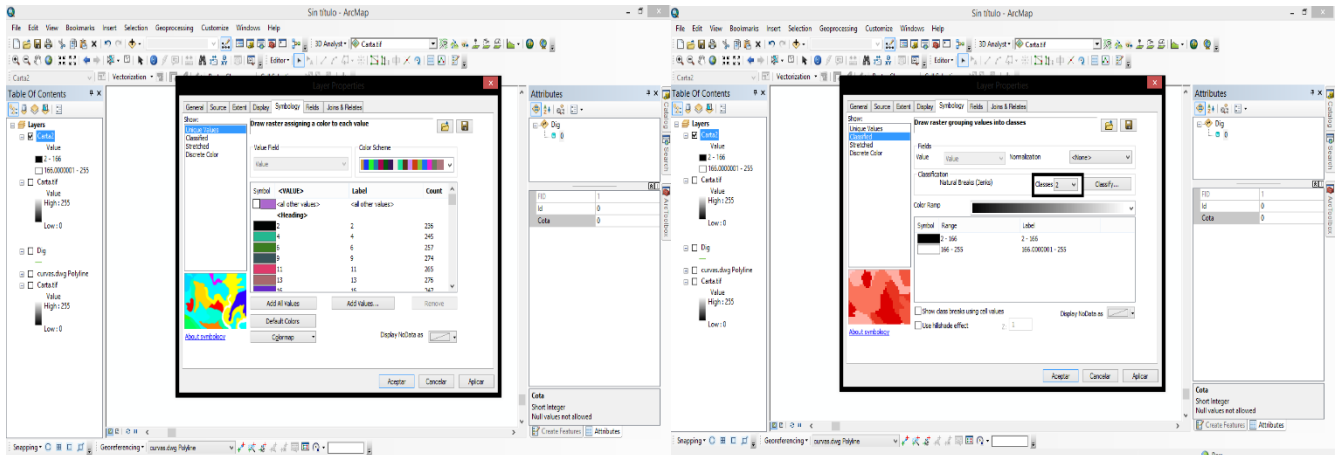
3. **Digitalización desde una Carta Topográfica:** El proceso de digitalización es tedioso debido al tiempo necesario para realizar esta tarea, mas no por su dificultad técnica. Para este proceso es necesario contar con una carta cartográfica con alguna georeferencia.

Debido a que las herramientas de auto digitalización solo reconocen imágenes en las cuales solo estén definido el blanco y negro, se procederá a modificar la imagen de ingreso, se deberá realiza Clic derecho-Propiedades-Symbology-Stretched; seguidamente se guardará la imagen en formato Tif Clic derecho-Data-Export Data y sólo de modificará folder de destino y la opción Use Render.







Realizando este proceso ArcGIS se agrega automáticamente una nueva capa que podrá ser modificada, para ello se repite la acción Propiedades-Symbology-Unique Values, donde se generará un escala de valores; luego esto se seleccionará Classified, donde se deberá seleccionar dos valores.



Ahora que se cuenta con las herramientas necesarias para realizar el proceso de digitalización se debe crear un shapefile tipo polylinea y agregar un campo dentro de sus atributos para la cota.

Una vez establecido los elementos que se digitalizarán, se puede utilizar la barra Raster Painting para mejorar la apariencia y comprensión de la imagen. Una vez establecida la imagen final se procede a comenzar la edición del shapefile creado Editor-Star Editing de la barra de edición, se deberá tener a mano la barra ArcScan que permitirá la digitalización automática mediante dos herramientas:

 Vectorización Automática: Permite generar trazado de líneas automáticas hasta donde Arcgis reconozca un elemento continuo, llegado el caso se debe oprimir “S” y seleccionar la nueva ruta de digitalización. Se finalizará pulzando la tecla F2.

 Vectorización entre dos puntos: Vectoriza entre dos puntos simples y cuando el elemento sea continuo, se finaliza pulzando la tecla F2.

Cabe resaltar que estas herramientas y la vectorización manual, se pueden intercalar de manera que el proceso sea más rápido y eficiente.

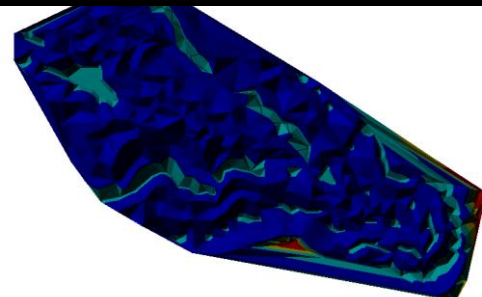
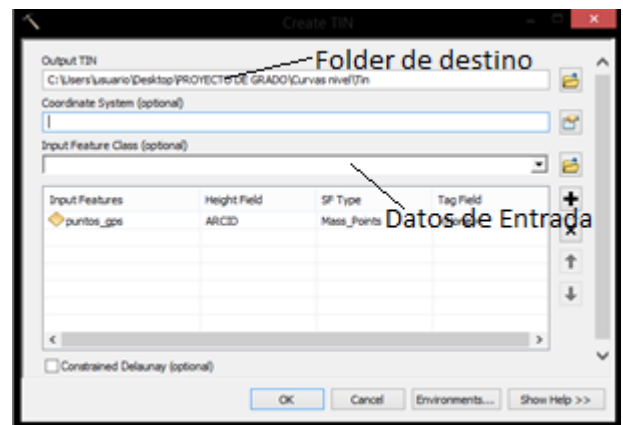
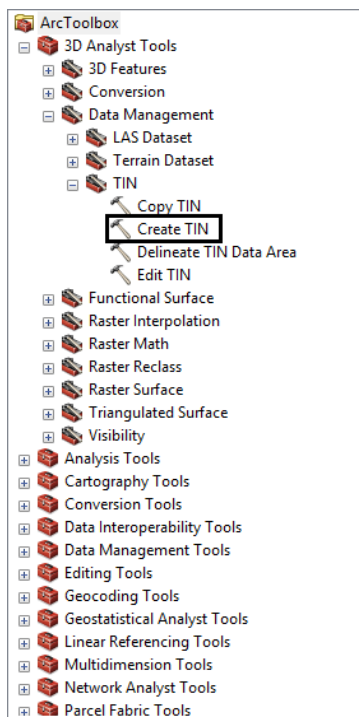
Al finalizar el proceso de digitalización se debe detener la edición; posteriormente agregar las cotas correspondientes a las curvas de nivel, para ello se selecciona la curva con el selector de la barra de Edición Clic derecho-Attributes y se ingresa el valor correspondiente.



Selector de Edición.

CREACIÓN DE SUPERFICIE TIN

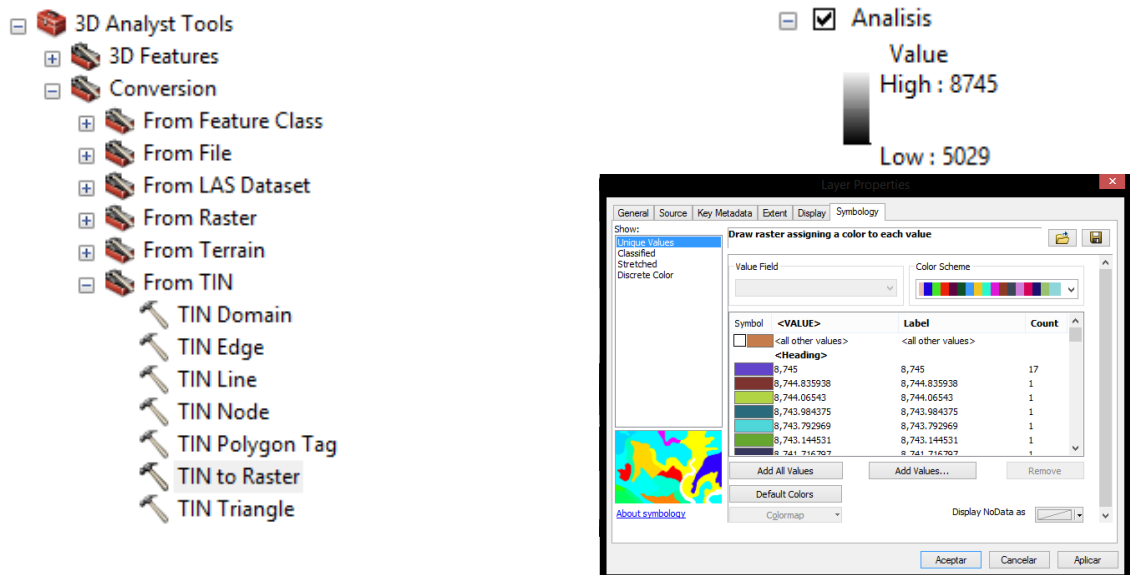
Un TIN es un medio digital para representar la morfología de la superficie. Las TIN son una forma de datos geográficos digitales basados en vectores y se construyen mediante la triangulación de un conjunto de vértices (puntos). Los vértices están conectados con una serie de aristas para formar una red de triángulos. Existen diversos métodos de interpolación para formar estos triángulos, como la triangulación de Delaunay o el orden de distancias. ArcGIS es compatible con el método de triangulación de Delaunay.



Crear un TIN desde 3D Analyst - Create TIN from Features (En Height source seleccionar el campo correspondiente a la altitud) y la ubicación donde se va a guardar la superficie TIN generada.

CREACION RASTER A PARTIR DE UN TIN

Una vez generado el TIN lo convertiremos a raster para permitir su estudio en ArcGis con la opción Tin to Raster del 3DAnalyst. Con esto conseguiremos una capa mucho más manejable, ya que no pesa tanto como el TIN. Es necesario guardarlo con el nombre TinRaster. Ahora pueden remover las curvas de nivel y el TIN.

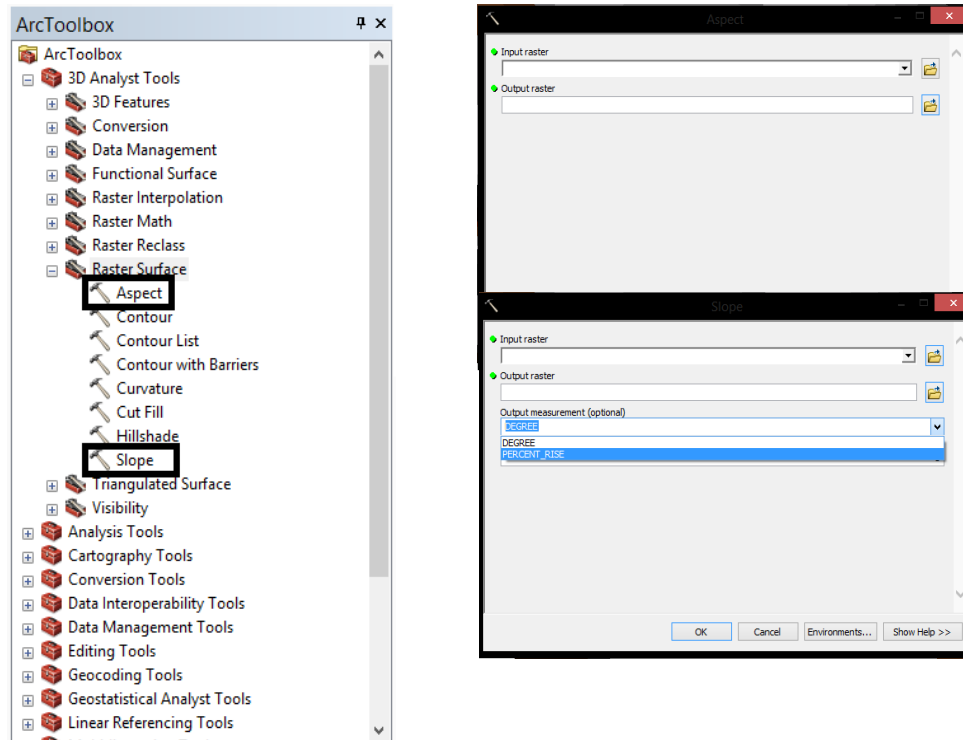


Esta acción permite generar una clasificación por altimétrica, permitiendo así tipificar las zonas dependiendo de la pendiente que posea.

CREACION DE MAPA DE PENDIENTES

A partir de la superficie TIN, se puede obtener el mapa de pendientes y de orientación de la zona de estudio, debido a que la función de la superficie TIN, es interpolar valores internos para generar una superficie de elevación homogénea. La extensión que permite realizar la creación de estos mapas es, "Spatial Analyst".

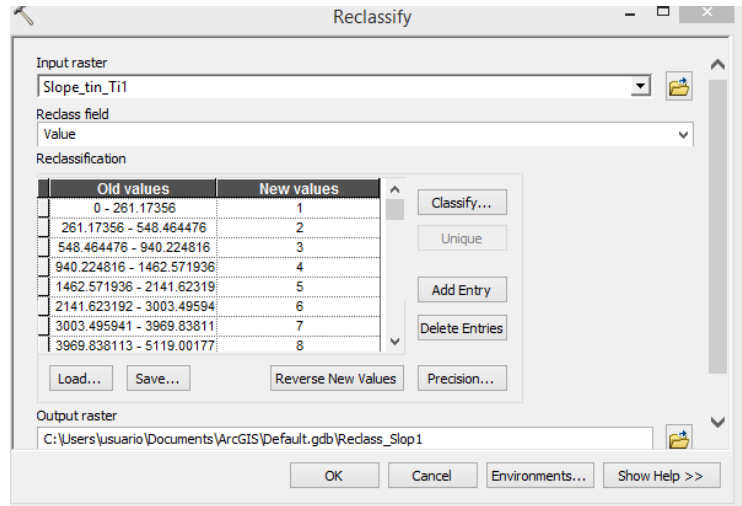
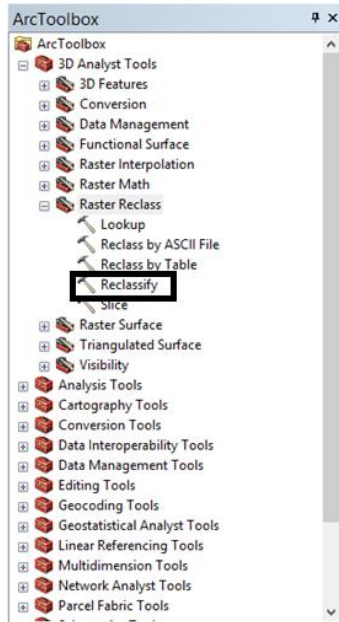
Dentro del submenú de “Surface Analysis”, la opción “Slope” genera el mapa de pendientes y la opción “Aspect” genera el mapa de orientaciones.



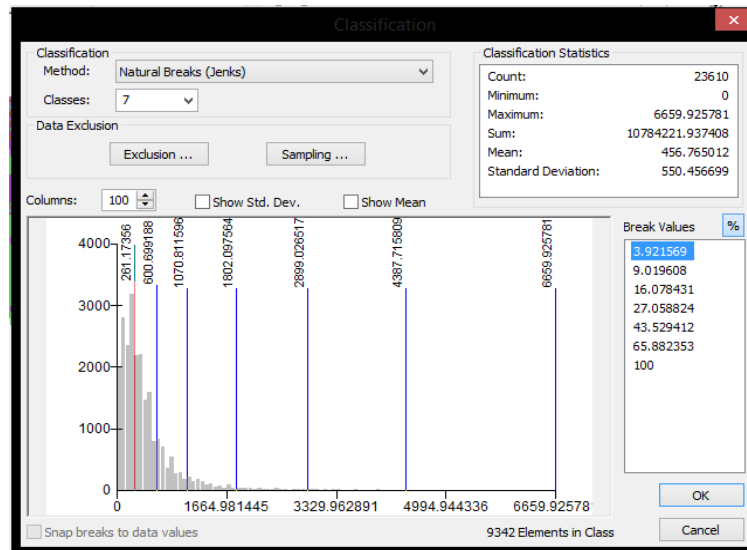
Slope permite escoger de que manera se generará el mapa de pendientes, ya sea en grados o en porcentaje.

RECLASIFICACIÓN DE UNA CAPA “RASTER”

Estos mapas generados con slope permiten clasificar la información con un rango de valores predeterminados. Para obtener un rango de valores que contemple 7 o 6 categorías (Según la clasificación del Metodo MVM), hay que establecer agrupaciones. Estas agrupaciones se realizan de manera diferente, si partimos de una capa “raster” (orientaciones o pendientes) o una capa vectorial (uso de suelo, geomorfológico, geología). A este proceso se le llama reclasificación.

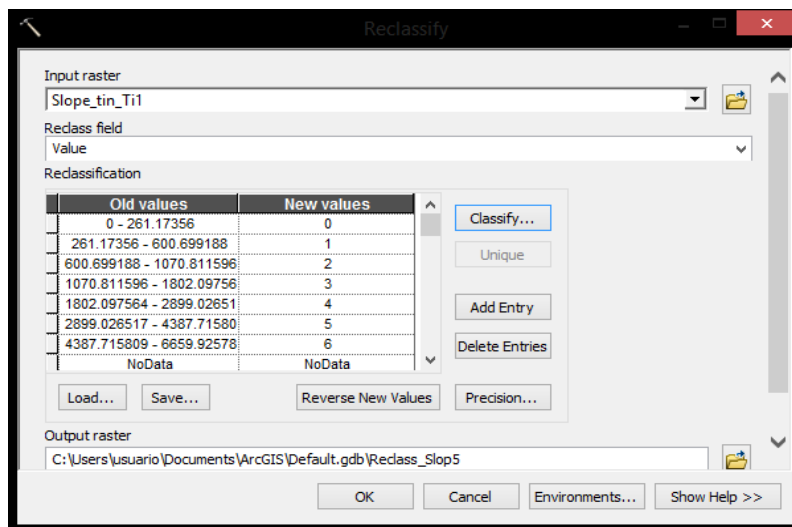


Independientemente de la manera en que se trabaje, ya sea en grados o en porcentajes ArcGis genera intervalos definidos por defecto. Para definir estos intervalos se debe reclasificar los intervalos, según lo requiere el método.

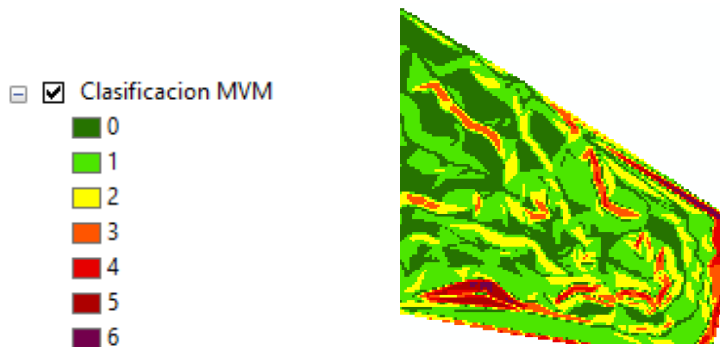


Para ingresar los rangos de clasificación solo es necesario ingresar a Classification activar opción % y escribir los rangos. Hecho estos los valores se modifican automáticamente, de tal manera que la pendiente dependerá del área en la que este dispuesta.

Para ingresar los valores de susceptibilidad se cierra la ventana, oprimiendo OK y se retorna al cuadro anterior donde se ingresarán en la celda New Values.



El resultado de el anterior procedimiento será :



Para establecer la escala de valores sólo basta con hacer doble Clic en el nombre de la capa Symbology y establecer manualmente los colores según la tabla 5.

7.2 PARÁMETRO DE SUSCEPTIBILIDAD LITOLÓGICA (S_i).

Los tipos de suelos y rocas juegan un papel preponderante en el comportamiento dinámico de las laderas. La composición mineralógica, la capacidad de retención de humedad, los espesores y grado de meteorización; el estado de fisuramiento, el ángulo de buzamiento, la posición y variación de los niveles freáticos etc, influyen claramente en la estabilidad o inestabilidad de las laderas.

La evaluación de este parámetro puede realizarse según las sugerencias de Mora, R. et al., (1992); Sin embargo, si se cuenta con descripciones de los macizos rocosos y la evaluación de propiedades geotécnicas de suelos, se recomienda utilizar los Tabla 7 y 8. El Tabla 7 se ha confeccionado con la utilización de la clasificación de macizos rocosos RMR (Bieniawski, 1989), y el Tabla 8 con la modificación del cuadro propuesto por Miles & Keafer (2002).

Tabla 7: Valoración del parámetro susceptibilidad litológica, Caso macizos rocosos según RMR (Bieniawski, 1989).

Valoración RMR	Número de clase RMR	Descripción RMR	Valoración del parámetro S_i
<20	I	Muy pobre	5
21-40	II	Pobre	4
41-60	III	Medio	3
61-80	IV	Bueno	2
81-100	V	Bueno	1

Tabla 8: Valoración del parámetro susceptibilidad litológica, caso suelos (Mora, R. et al., 1992).

Angulo de fricción efectiva [grados]	Cohesión Efectiva [kPa]	Descripción	Valoración del parámetro S_i
0 - 15	0 10	Muy bajo	5
15 -20	10-15	Bajo	4
20-25	15 20	Medio	3
25 - 30	20-25	Alto	2
>30	>25	Muy alto	1

7.2.1 IMPLEMENTACIÓN EN SIG (ARCGIS).

El factor S_i en el método MVM representa la susceptibilidad natural del material que conforma la ladera; siendo un eje fundamental, debido a la variación de la resistencia de un material a otro. La clasificación litológica por lo general se agrega en los POT de los municipios, debido a que el tipo de material restringe el tamaño de las edificaciones por la capacidad portante que posee cada material. Para cimientos superficiales, la obtención de la clasificación de una zona se puede realizar por:

1. Clasificación por muestreo en la zona.

La clasificación por punto de muestreo se hace agregando una hoja electrónica con las respectivas coordenada y la clasificación litográfica, el procedimiento en ArcGis sigue los pasos expuestos en la digitación de un levantamiento topográfico.

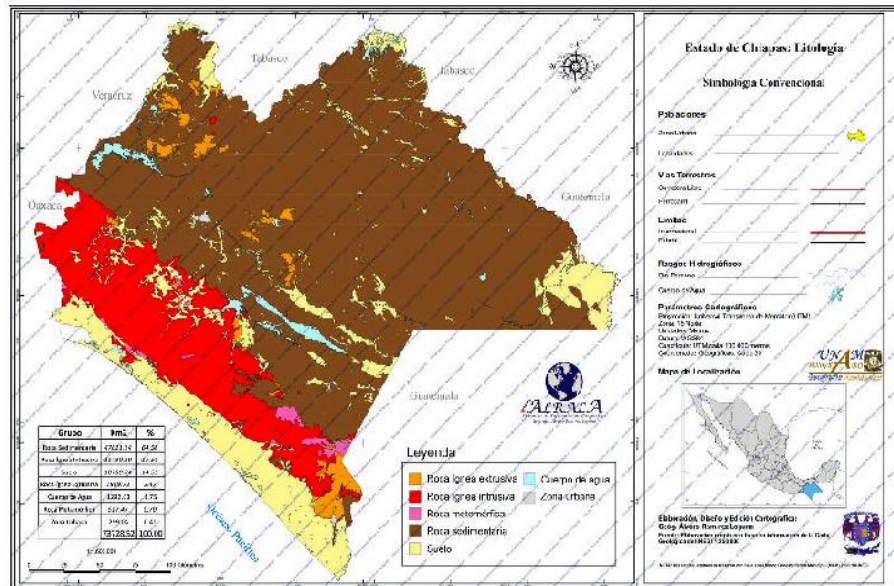
2. Digitalización de una carta o imagen referenciada.

La digitalización puede realizarse mediante polígonos o polylinea como se expuso anteriormente para generar curvas de nivel a partir de una carta topográfica, pero este procedimiento generaría errores en algunos casos, debido a que se omitirían detalles propios de una carta litológica ya sea por la escala o por error humano.

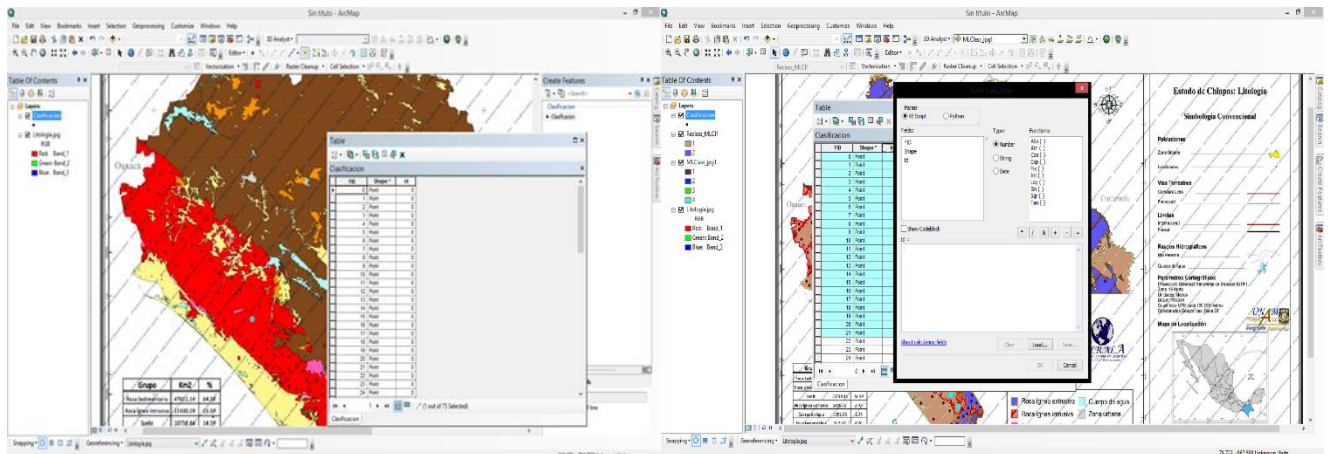
GENERACIÓN DE UNA CLASIFICACIÓN A PARTIR DE PUNTOS

En un primer momento se debe generar shapefile tipo Point y agregar la carta litográfica debidamente referenciada, ahora se generara una modificación en los atributos del shapefile para ello iniciamos Start Editing, luego abrimos Open Attribute Table con Clic derecho sobre la capa.

Nota: Como ejemplo se tomará una carta litográfica del estado Chiapas, tomada de internet.

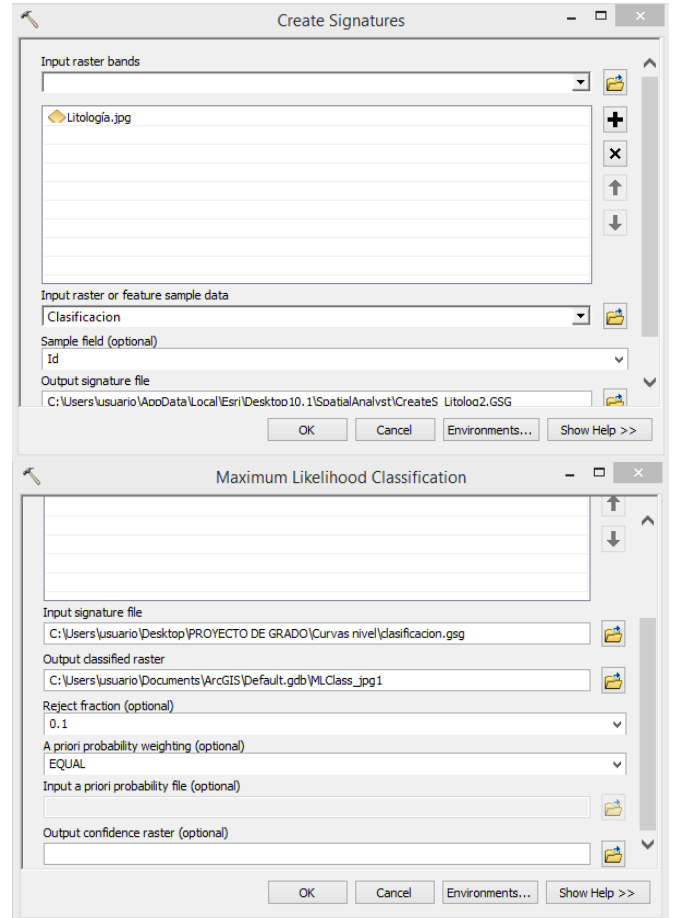
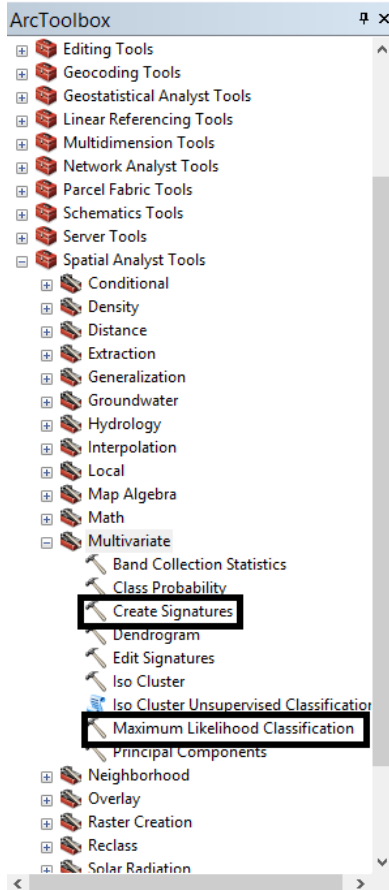


Ahora se insertarán puntos en las zonas a clasificar, entre mayor número de puntos, mayor precisión tendrá la conversión; una vez hecho esto se seleccionara FID de la tabla de atributos, luego con Clic derecho sobre el título de la columna Id, se modificaran mediante Field Calculator y en la sección Id se ingresara un valor que servirá de marcador para el tipo de suelo presente.

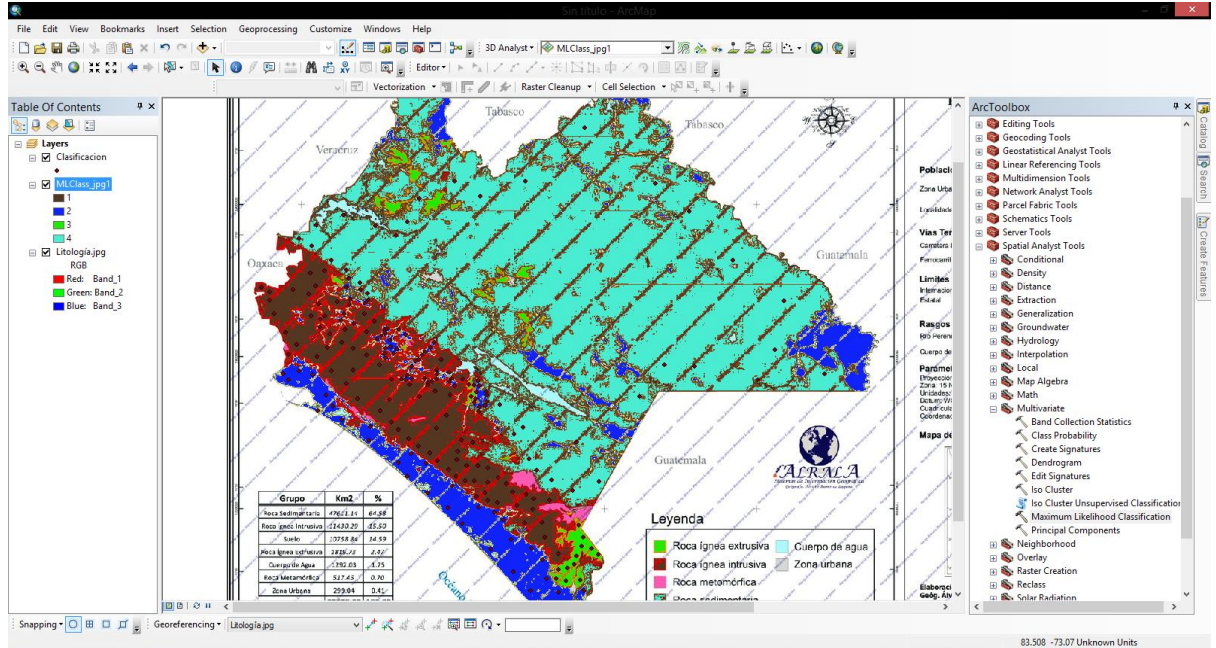


Una vez realizado la señalización de las áreas mediante puntos, se procederá a generar un registro digital con la herramienta Create Signature de Spatial Analyst

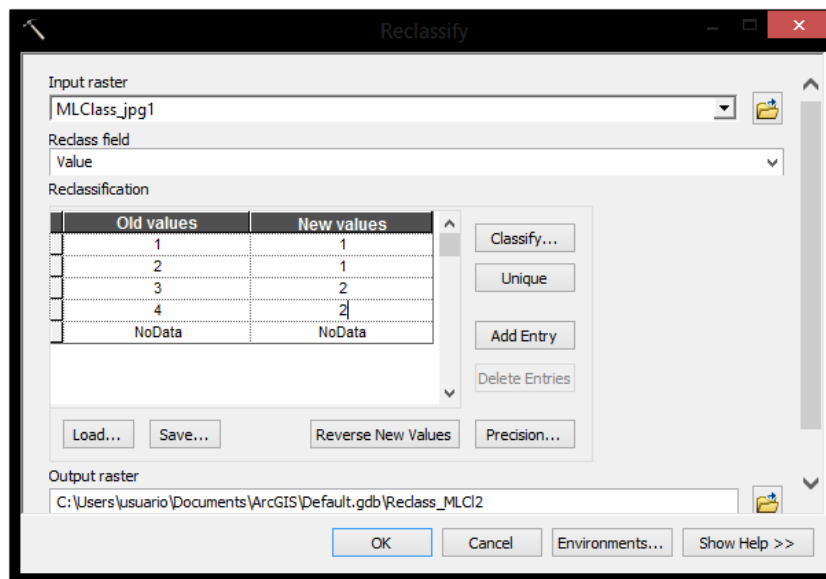
Tools, para que posteriormente se genere la clasificación automática por pixel mediante Maximum Likelihood Classification.



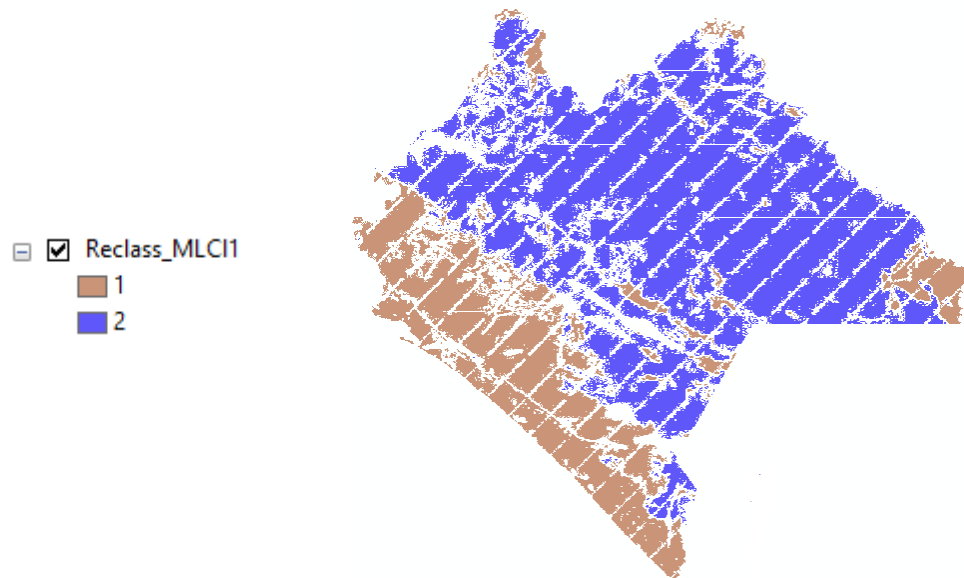
En la herramienta *Maximum Likelihood Classification* se debe introducir el archivo de texto con extensión .gsg que contiene el análisis espacial hecho por Create Signature , que relaciona la posición del punto clasificado y el color del pixel en el cual se encuentra; de tal modo que extrapola la regiones en las cuales no se halla realizado la clasificación y se debe ingresar de manera alterna. Se debe seleccionar 0.1 en *Rejec Fraction* que corresponde al valor permitido.



Este procedimiento generara un mapa de clasificación, dependiendo el tipo de material. Para establecer los valores determinados por el método se repetirá el proceso de recalificación hecho, para generar el mapa de pendientes (Reclassify).



En este caso debido a que el valor asignado por el método se repite, sólo se generan dos clase.



7.3 PARÁMETRO DE HUMEDAD DEL TERRENO (S_h).

En este caso se recurre a los promedios mensuales de precipitación, efectuando con ellos un balance hídrico simplificado, en donde se asume una evapotranspiración potencial de 125 mm/mes. Por lo tanto, precipitaciones mensuales inferiores a 125 mm no conducen a un aumento de la humedad del terreno, mientras que una precipitación entre 125 y 250 mm si la incrementa, y precipitaciones mensuales superiores a 250 mm conducen a una humedad del suelo muy alta.

Seguidamente, a los promedios mensuales se les asignan los valores del Tabla 9 y se efectúa la suma de estos valores para los doce meses del año, con lo que se obtiene un valor que puede oscilar entre 0 y 24 unidades. El resultado refleja los

aspectos relacionados con la saturación y la distribución temporal de humedad en el terreno (Mora, R. et al., 1992).

La valoración del parámetro se presenta en el Tabla 10.

Tabla 9 : Valores asignados a los promedios mensuales de lluvia (Mora, R. et al., 1992)

Promedio de precipitación mensual [mm]	Valor asignado
< 125	0
125-250	1
>250	2

Tabla 10: Valoración del parámetro humedad del terreno (S_h) (Mora, R. et al., 1992).

Suma de valores asignados a cada mes	Descripción	Valoración del parámetro S_h
0-4	Muy bajo	1
5-9	Bajo	2
10-14	Medio	3
15-19	Alto	4
20-24	Muy alto	5

7.3.1 IMPLEMENTACIÓN EN SIG (ARCGIS).

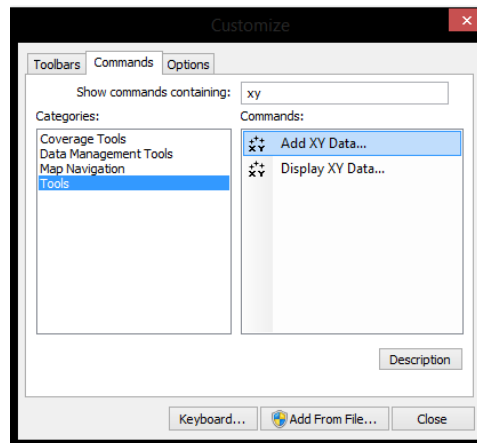
La humedad relativa de suelo es la relación entre la cantidad de agua que contiene el suelo y la que tendría si estuviera completamente saturado; así cuanto más se aproxima el valor de la humedad relativa al 100% más saturado se encontrar el suelo, la presencia de agua en una ladera o talud es un factor de inestabilidad, que debilita la cohesión y socaba las fisuras de un macizo rocoso, para establecer una

aproximación acorde a la realidad es necesario contar con información de la precipitación promedio mensual con un registro de 10 o 20 años.

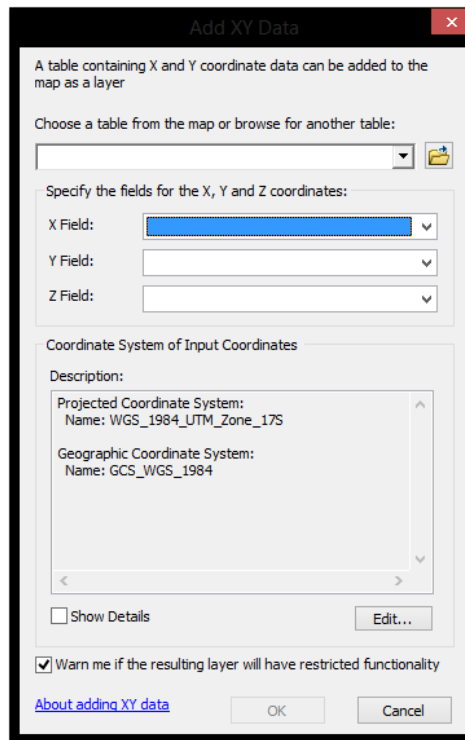
En ciertas áreas es posible que no exista un registro de la humedad relativa, en estos casos se debe establecer la litología y las condiciones medio ambientales presentes para poder realizar una extrapolación, basado en zonas de similares características; también es posible asumir un valor mensual basado en los meses de sequía o de invierno.

CREACIÓN DE UN SHAPEFILE A PARTIR DE ESTACIONES

Para la creación de un mapa de precipitación a partir de estaciones pluviométrica es necesario suministrar sus coordenadas, así como la precipitación promedio registrada; para ello se utiliza la herramienta Add XY, en caso que no se encuentre disponible se agrega entrando a Customize – Commands – XY en barra de Búsqueda – Tools – Se arrastra hasta la barra de tareas.



Utilizando la herramienta Add XY Data se procede a realizar la importación de datos tipo XML a ArcGis, es simple solo se especifica en que columna se encuentra las coordenadas X,Y,Z y origen del archivo así como el sistema de coordenadas.



Se debe comprobar el campo que contiene los datos de altitud, precipitación desde la tabla de atributos para cada fichero shapefile. Por último se debe generar un archivo shapefile, Clic derecho sobre la capa Data- Export Data y selecciona la carpeta en la cual se desea guardar la información.

MAPA DE HUMEDAD DEL SUELO

Para establecer la precipitación que recibe cada zona del área se debe realizar una interpolación entre estaciones, pero solo se podrá hacer si existe un mínimo de tres estaciones para realizar este procedimiento. Es necesario contar con la extensión

Spatial Analyst, dirigirse a la caja de herramientas ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Interpolation.

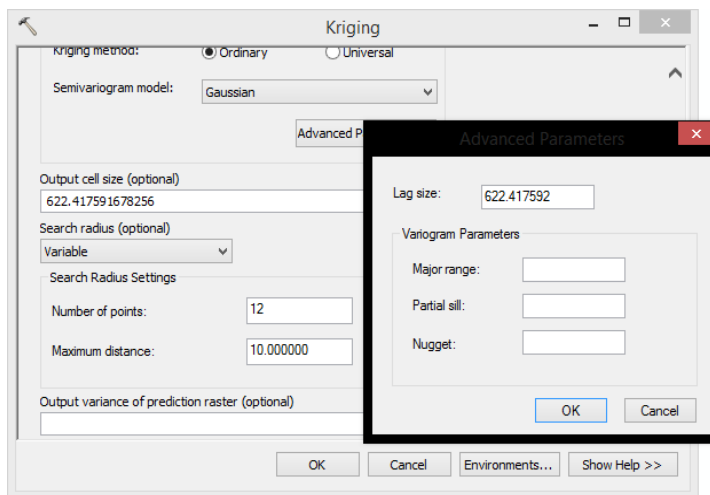
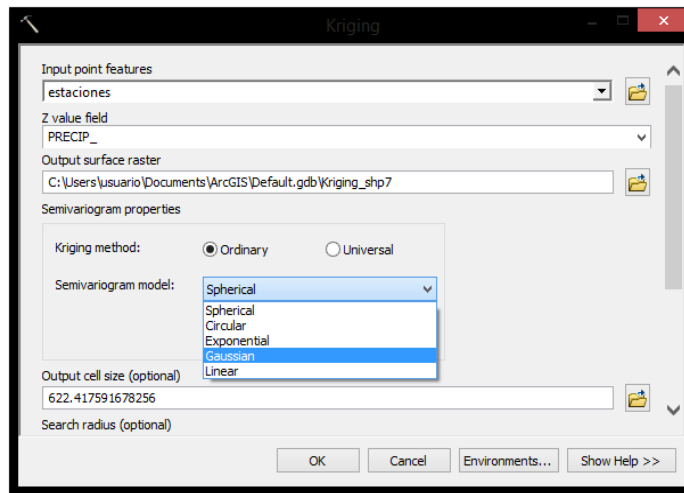
Ahora ArcGis brinda diferentes maneras de realizar una interpolación cada una con una función específica y requerimientos de información, las más utilizadas son:

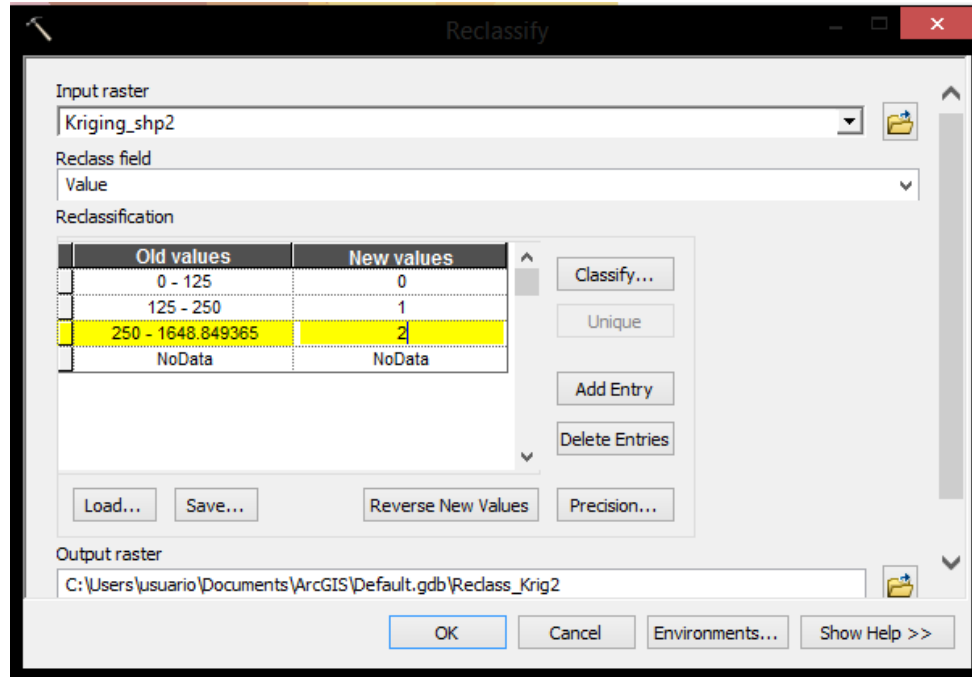
1. **IDW** (Distancia Inversa ponderada), este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra (es el método más simple, es inversamente proporcional a la distancia).
2. **Kriging**, es un procedimiento geoestadístico avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersados con valores z, usar la herramienta Kriging en forma efectiva implica una investigación interactiva del comportamiento espacial del fenómeno representado por los valores z antes de seleccionar el mejor método de estimación para generar la superficie de salida (muy empleada en suelos y geología).
3. **Natural Neighbor**, interpola una superficie de ráster a partir de puntos utilizando una técnica de vecinos naturales (útil cuando existen muchos puntos de entrada).
4. **Spline**, utiliza un método de interpolación que estima valores usando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, lo que resulta en una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada (empleada cuando las superficies varían suavemente).

En nuestro caso utilizaremos Kriging al ejecutarla en el cuadro de diálogo rellenamos los datos, Input point features, se selecciona el raster creando intervalo

de las isólinas, esto depende de la superficie, varianza y parámetros bajo un criterio técnico anteriormente. Output surface raster el poder en el que salvara el raster generado.

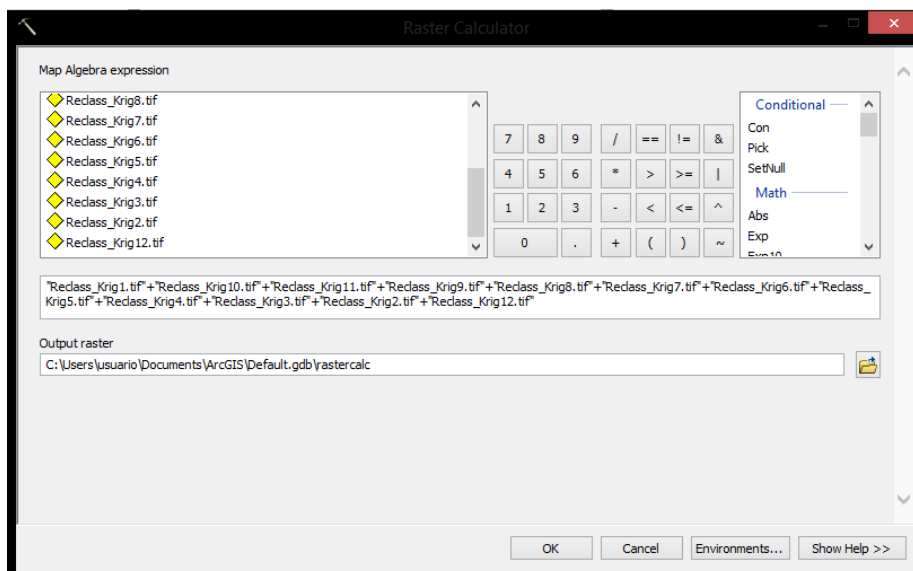
Para generar la clasificación según el método se debe reclasificar el raster para ello Spatial Analyst -Tools – Reclass - Reclassify.



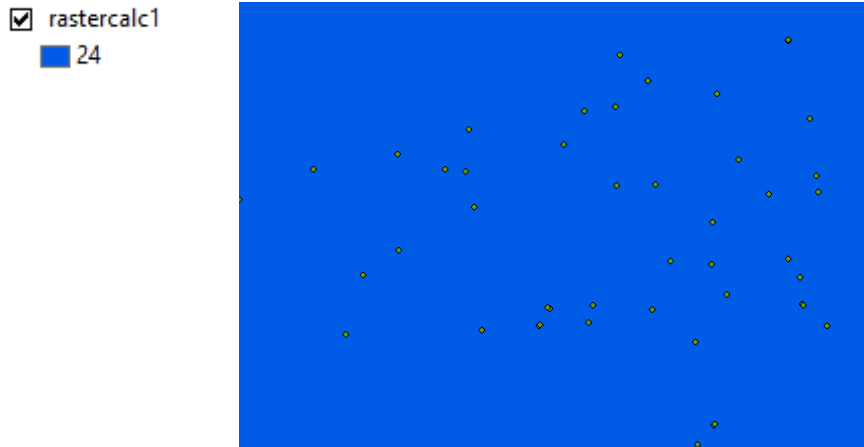


CREACIÓN DE MAPA DE HUMEDAD DEL TERRENO (S_H).

El método establece que el parámetro S_H será el resultado de la suma de los mapas de humedad correspondientes a cada uno de los meses del año, para ello se utilizara la herramienta Raster Calculator de Spatial Analyst Tools donde se agregaran todos los mapas de humedad generados.



Se obtendrá un mapa de humedad representativo.



Nota: El color azul obedece a la clasificación previamente hecha a cada uno de meses, en este caso correspondería a una zona con una precipitación muy alta según la clasificación MVM (Tabla 10), este puede variar para zonas con diferentes valores de precipitación.

7.4 PARÁMETRO DE DISPARO POR SISMICIDAD D_s .

Se ha observado que el potencial de generación de deslizamientos por actividad sísmica puede correlacionarse con la escala de intensidades Mercalli-Modificada. En caso de contar con datos sobre aceleraciones pico (PGA), se ha utilizado la relación de Trifunac & Brady (1975), para establecer los valores correspondientes del parámetro de disparo por sismicidad (D_s) (Tabla 11). Existen otras relaciones entre intensidad y aceleración que pueden ser utilizadas, a criterio de las personas que pongan en práctica esta metodología.

Tabla 11: Valoración del parámetro de disparo por sismicidad D_s (Mora, R. et al., 1992).

Intensidad Mercalli-Modificada	Aceleración pico (%g) (Trifunac & Biady. 1975)	Valoración del parámetro D_s.
1	0.3-0.6	1
II	0.6-1.1	2
III	1.1-2.2	3
IV	2.2-4.5	4
V	4.5-8.9	5
VI	8.9-17.7	6
VII	17.7-35.4	7
VIII	35.4-70.5	8
IX	70.5-140.8	9
X	140.8-280.8	10
XI	280.8-560.4	11
XII	> 560.4	12

7.4.1 IMPLEMENTACIÓN EN SIG (ARCGIS).

Dado que la mayoría de ocasiones en las cuales se realicen los estudios de MVM, no se contará con estudios de micro sismicidad, se puede asumir de manera conservadora los valores suministrados por la NSR – 10 sobre aceleración horizontal pico efectiva (A_a) en unidades de aceleración sísmica usadas por Trifunac & Brady, para ello solo basta multiplicar el A_a por el valor de la gravedad.

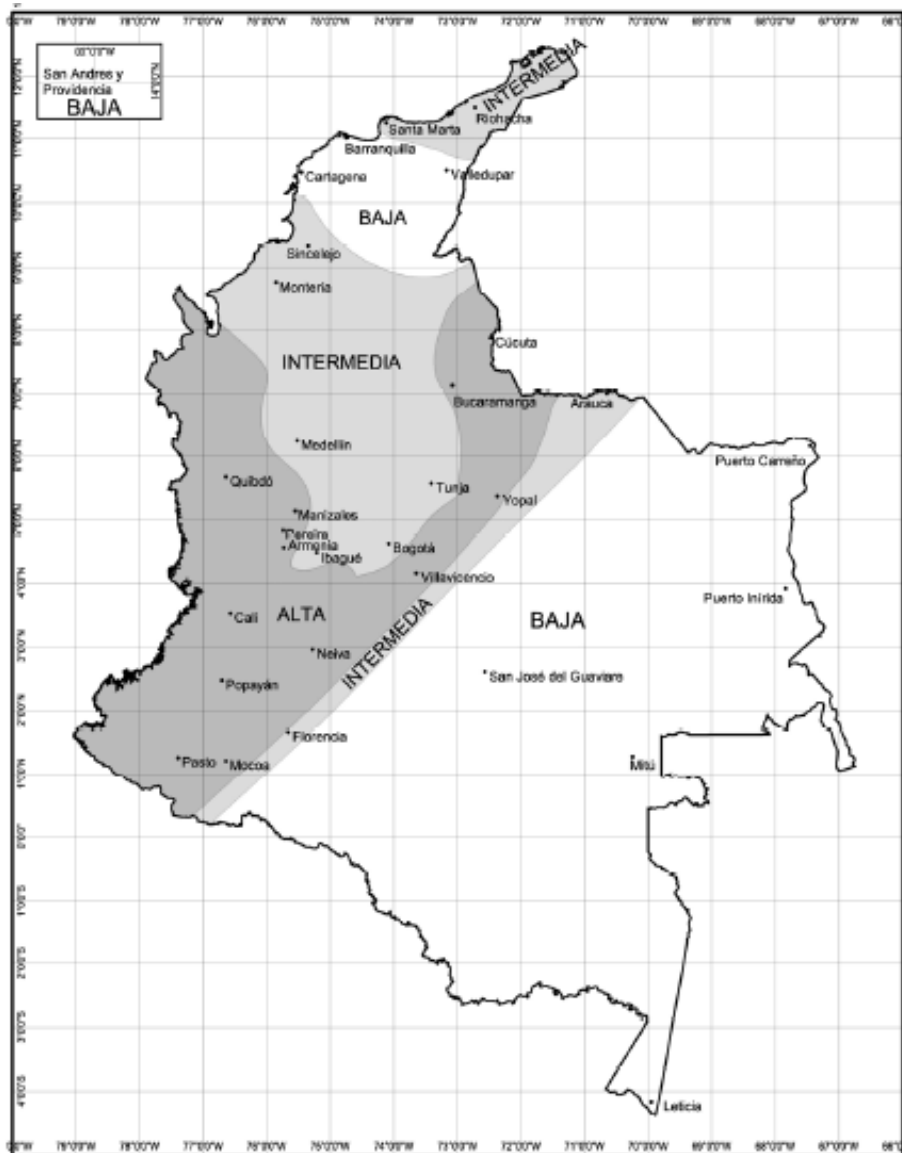


Figura 14: Zonas de Amenaza Sísmica en función de A_a y A_v . NSR-10

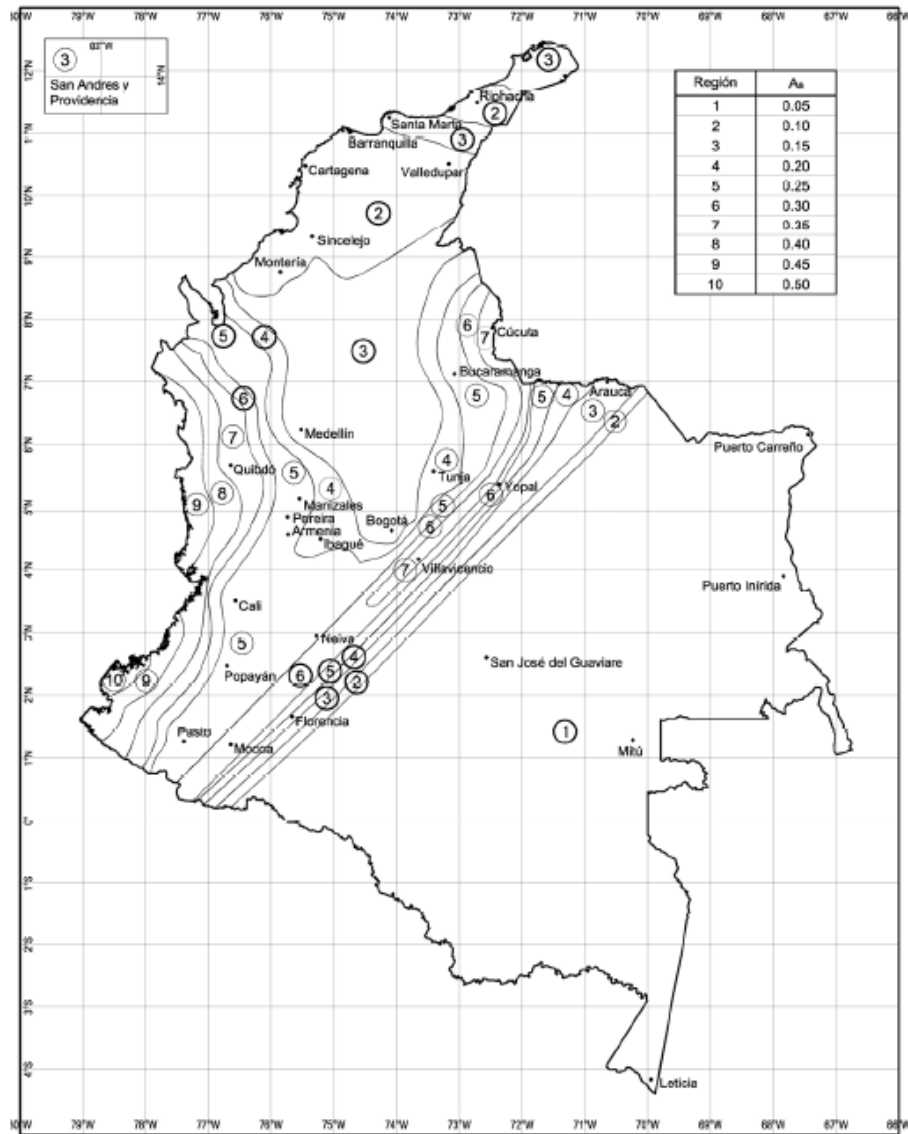


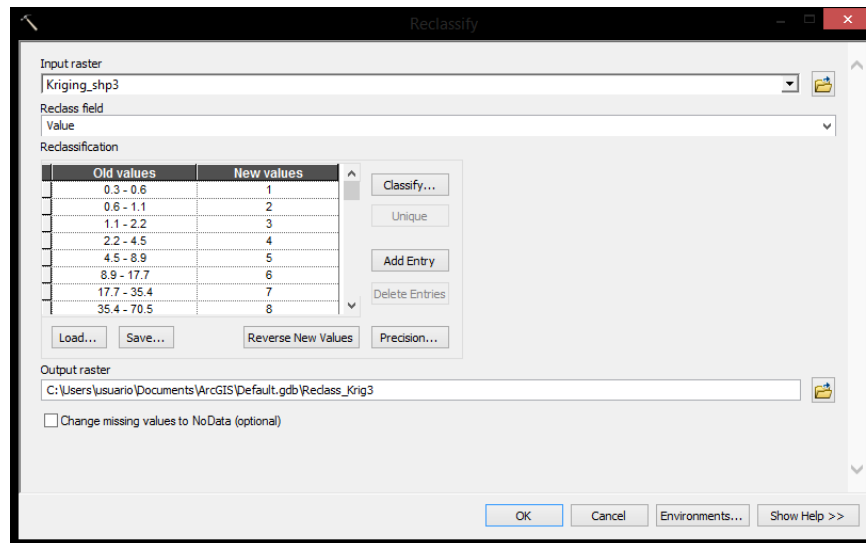
Figura 15: Mapa de Valores Aa NSR - 10.

Nota: Ver apéndice A-4 Título A (NSR-10). Para valores de A_a.

MAPA DE FACTOR DE DISPARO POR MEDIO DE ACELERÓGRAFOS

La estimación del factor D_s se realiza con un mínimo de 3 acelerógrafos para realizarla mediante una herramienta de interpolación en este caso Kriging, expuesta anteriormente para la generación de mapas de humedad, salvo que en este caso se utilizara los datos de aceleración horizontal.

Lo mismo sucede con el proceso de recalificación para incorporar la clasificación de MVM Spatial Analyst -Tools – Reclass - Reclassify.



En los casos que se tenga el valor específico de la aceleración horizontal pico el factor D_s puede asumirse como un valor y ser introducido como tal en Raster Calculator de Spatial Analyst Tools.

7.5 PARÁMETRO DE DISPARO POR LLUVIA D_{II} .

En este parámetro se consideran las intensidades de lluvias potencialmente generadoras de deslizamientos, se utiliza la lluvia máxima en 24 horas con un período de retorno de 100 años, aplicando la distribución de valores extremos

Gumbel tipo I o Log Pearson tipo III a series temporales con más de 10 años de registro (Mora, R. et al., 1992). En el Tabla 12 se aprecia la valoración del parámetro D_{II} .

7.5.1 IMPLEMENTACIÓN EN SIG (ARCGIS).

Este factor de disparo se basa en la inestabilidad generada en masas de tierra saturadas ya sea dispuestas en una ladera como en las fisuras de un macizo rocoso. Basado en esto el método establece como factor detonante precipitación máxima absoluta en 24 horas [mm/día], que es establecido mediante utilizando mediante el análisis de las precipitaciones con un registro recomendado de 10 a 20 años, proveniente de estaciones cercanas a la zona de interés, esta toma de datos lo realiza el IDEAM mediante estaciones pluviométricas.

Tabla 12: Valoración del parámetro de disparo por lluvias D_{II} (Mora, R. et al., 1992).

<i>Lluvia máxima en 24 horas, período de retorno 100 años [mm]</i>	<i>Descripción</i>	<i>Valor del parámetro D_{II}</i>
<i><100</i>	<i>Muy bajo</i>	<i>1</i>
<i>100-200</i>	<i>Bajo</i>	<i>2</i>
<i>200-300</i>	<i>Medio</i>	<i>3</i>
<i>300-400</i>	<i>Alto</i>	<i>4</i>
<i>>400</i>	<i>Muy Alto</i>	<i>5</i>

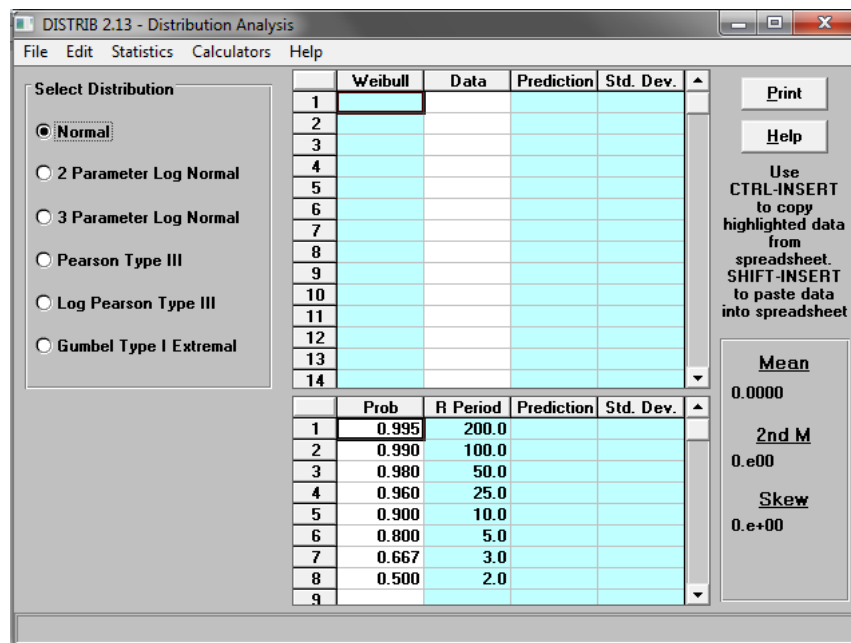
La extracción de la precipitación máxima absoluta en 24 horas se debe realizar en un estudio estadístico mediante la distribución estadística de Gumbel, Log Pearson y Pearson que puede realizarse a los valores de precipitación suministrados, el

"período de retorno o de recurrencia". (T) es el intervalo medio expresado en años en el que un valor extremo alcanza o supera al valor "x", al menos una sola vez. Así, si la precipitación máxima en 24 horas para un período de retorno de 100 como establece el método MVM será el valor predicho mediante alguna distribución que supere el valor del registro.

Este procedimiento puede realizarse mediante hojas de cálculo en Excel, aunque puede ser algo tedioso y los resultados no se ajustan a la realidad, si no se realiza de la forma adecuada; por ello se hace indispensable la utilización de software como MATLAB o SMADA 6.0 que tiene estas funciones definidas.

SMADA 6.0

La utilización de SMADA 6.0 es sencilla además de liviano y fácil de instalar, y su manejo resulta ser muy intuitivo además de contar con una herramienta (DISTRIB 2.13) que facilita aplicar diferentes distribuciones estadísticas:



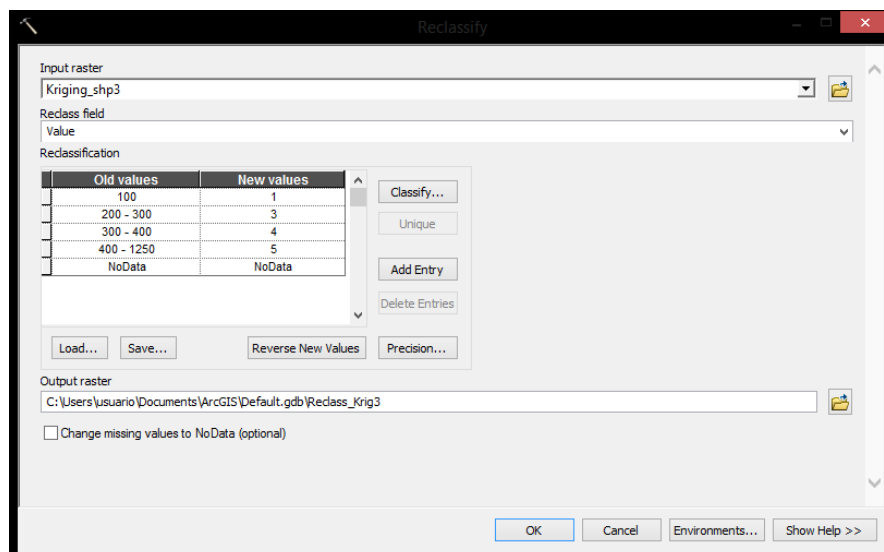
La precipitación máxima en 24 horas será el valor de la casilla de la columna Prediction cuando supere el valor de la casilla de la columna Data, la distribución que se debe utilizar será aquella que genere la menor desviación estándar.

Este procedimiento se debe realizar para cada estación para así obtener los valores finales de precipitación máxima en 24 horas.

MAPA DE FACTOR DE DISPARO POR MEDIO DE ESTACIONES

La estimación de del factor D_{II} se realiza con un mínimo de 3 acelerógrafos para realizar una mediante una herramienta de interpolación en este caso Kriging expuesta anteriormente para la generación de mapas de humedad, salvo que en este caso se utilizara el valor de la precipitación máxima en 24 horas de las diferentes estaciones.

Lo mismo sucede con el proceso de recalificación para incorporar la clasificación de MVM Spatial Analyst -Tools – Reclass - Reclassify.



En los casos que se tenga el valor específico precipitación máxima en 24 horas el factor D_{II} puede asumirse como un valor y ser introducido como tal en Raster Calculator de Spatial Analyst Tools.

7.6 MAPA DE INDICE AMENAZA MÉTODO MORA-VAHRSON

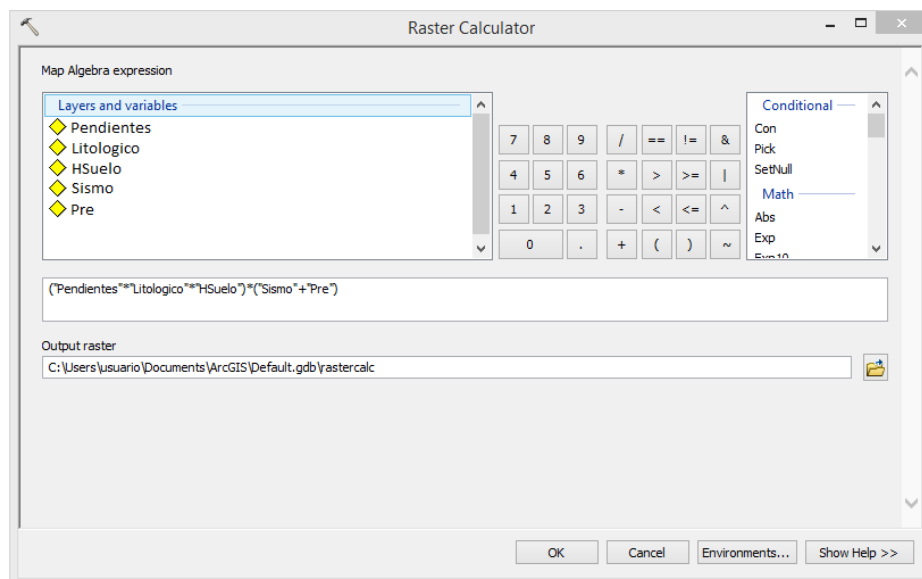
El proceso final consiste multiplicar el inventario de fenómenos que constituyen la susceptibilidad ($S_i * S_h * S_p$), y el indicativo de amenaza que representa la posibilidad de ocurrencia ($D_{II} + D_s$), dando como resultado:

$$H = (S_i * S_h * S_p) * (D_s + D_{II})$$

La índice de amenaza relativa a cada uno de los fenómenos sería:

$$H = (S_i * S_h * S_p) * D_s$$

$$H = (S_i * S_h * S_p) * D_{II}$$



El mapa obtenido se reclasifica nuevamente en base a la siguiente Tabla:

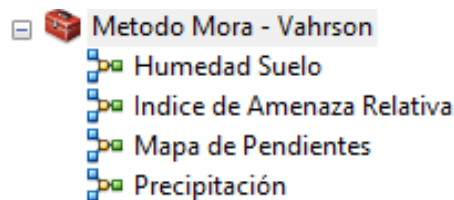
CLASE	RANGO DE VALORES	CATEGORIA
I	0-6	Muy Bajo
II	7-32	Bajo
III	33-512	Moderado
IV	513-1250	Alto
V	>1251	Muy Alto

Cabe resaltar que se puede establecer rangos según el requerimiento del usuario.

7.7 APLICACIÓN METODOLOGÍA MORA VAHRSON

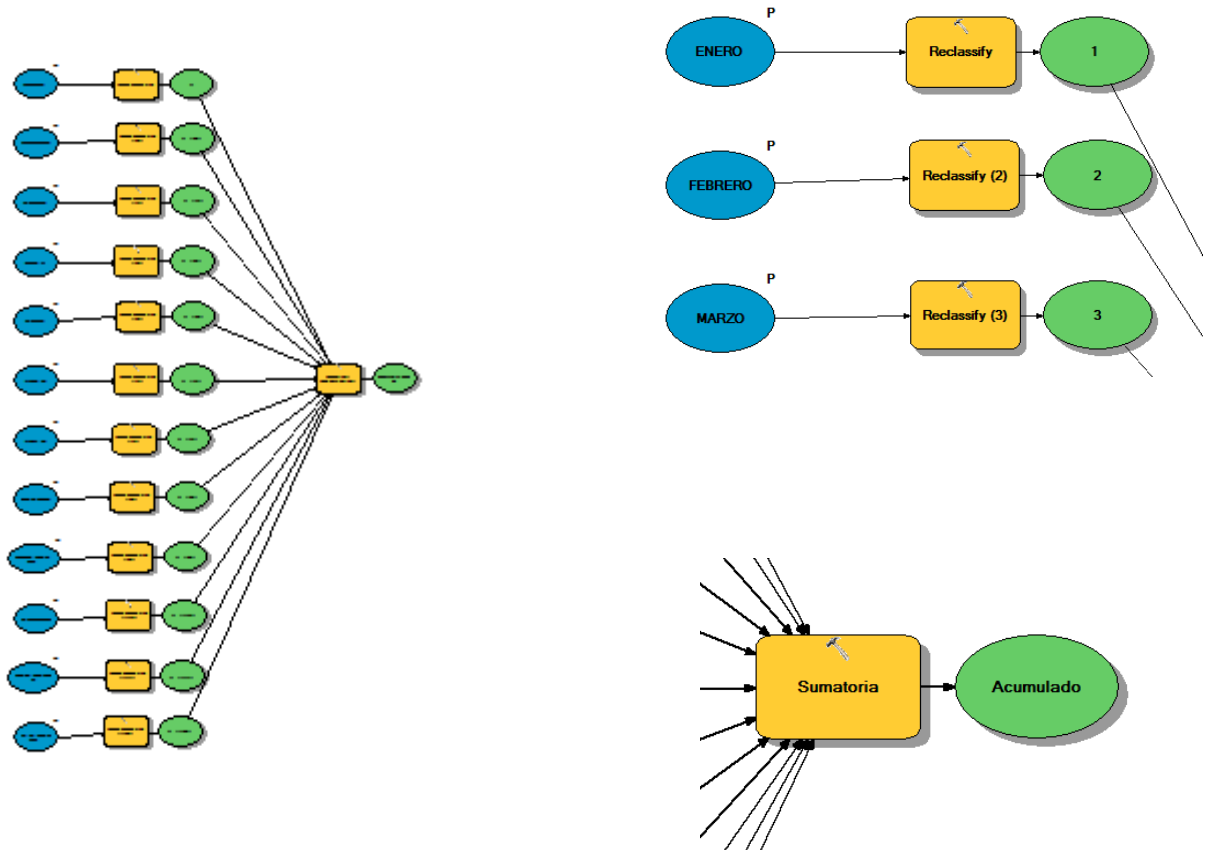
Esta aplicación elaborada en ArcGIS en forma de un de un Toolboxes la cual lleva el nombre de Método Mora – Vahrson, fue diseñada para una rápida elaboración de diferentes Factores que conforman el este método puedan ser generados satisfactoriamente.

Debido a que los Factores utilizados pueden ser generados de manera individual se propone un paquete de herramientas que permitirá acortar el tiempo requerido en cada tarea:



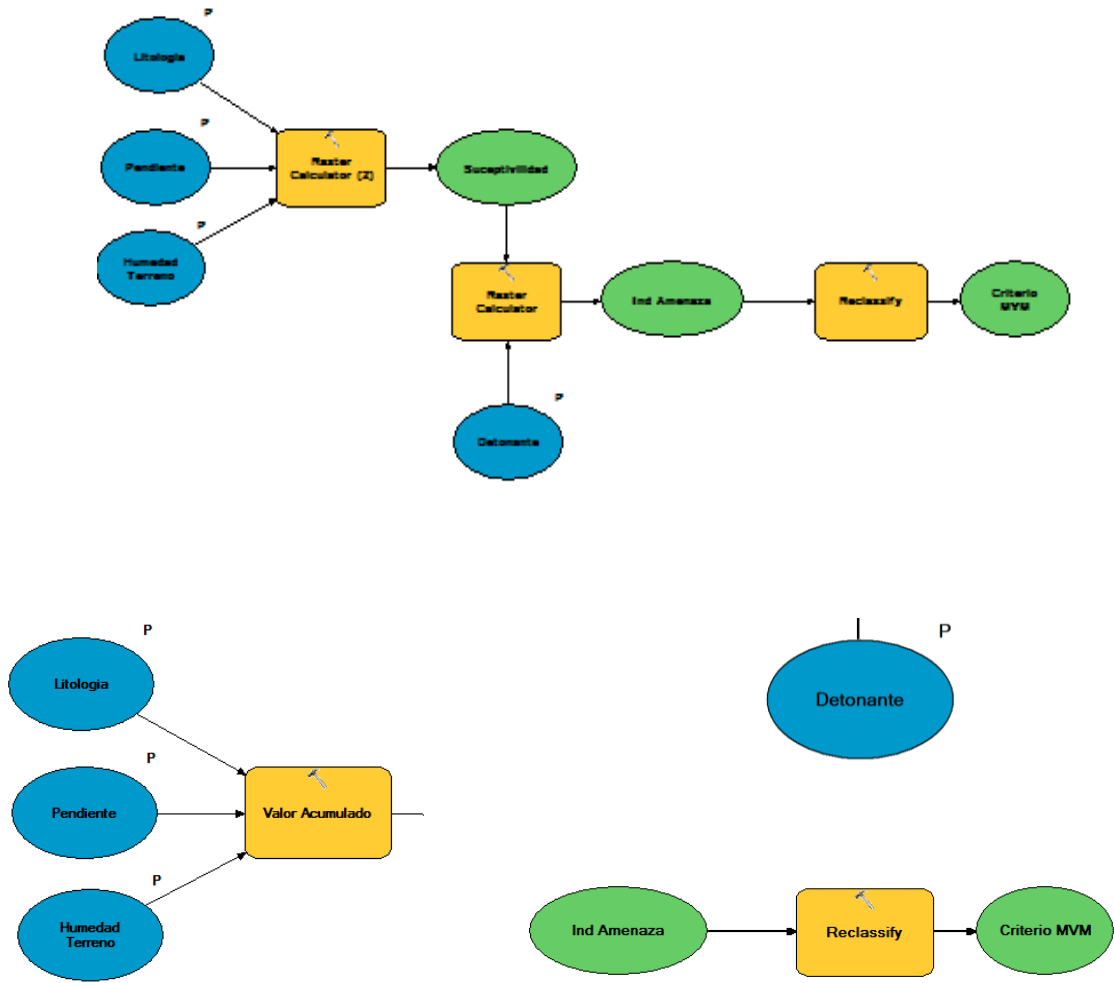
A continuación se explica de manera gráfica cada una de las herramientas:

Humedad del Suelo



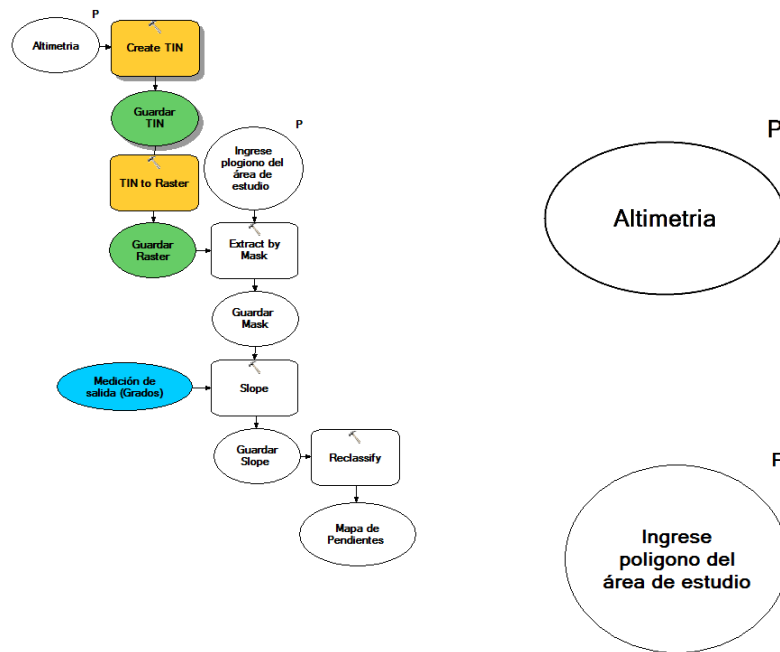
Esta herramienta permitirá generar el valor acumulado de la Humedad según la clasificación de Mora Vahrson, a partir de un mapa de interpolación de las estaciones o puntos donde se realizaron las muestras.

Índice de Amenaza Relativa



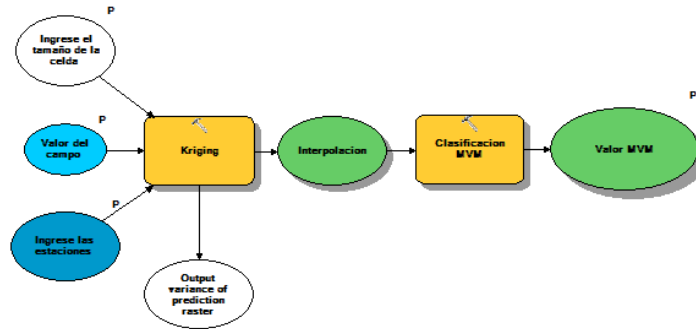
Esta aplicación tiene como parámetros de entrada los mapas de susceptibilidad y Valor detonante como lo puede ser Sismicidad o lluvia máxima en 24 horas, como se establece en el método. El valor final será la clasificación establecida por el Método.

Mapa de Pendientes



Al utilizar esta herramienta se podrá generar un mapa de pendientes según la clasificación de método, a partir de datos de altimetría, proveniente de diferentes fuentes como se expuso anteriormente en el parámetro S_p . Además permitirá delimitar zonas de estudio por medio de un polígono debidamente geográficamente referenciado.

Precipitación Máxima



Esta aplicación permite generar la interpolación de valores de lluvia máxima en 24 horas, la posterior clasificación de acuerdo al los reweightings del Método.

8 SUSCEPTIBILIDAD DE EROSIÓN

Para establecer la susceptibilidad de erosión se debe entender que es un proceso en el cual el suelo y la roca se eliminan de la superficie de la Tierra por procesos exógenos tales como el viento o el flujo de agua, acciones antrópicas y luego transportados y depositados en otras localidades.

Por esta razón cuantificar la erosión total de una zona se deberá estudiar los diferentes fenómenos que interactúan en un área, partiendo de su intensidad y duración. En el paso realizar estudios de erosión era una tarea tediosa debido al muestreo de información en diferentes lugares de una región así como un estudio detallado de la geomorfología de la zona realizado por topógrafos, desde los años 90 los estudios de erosión para estimar la susceptibilidad por medio de los SIG han tenido una gran acogida, ya que permite tener acceso a información cartográfica como la pendiente, o por medio de la foto interpretación reconocer usos de suelos así como zonas en las cuales es perceptible un proceso de erosión mediante la desertización.

Un estudio de susceptibilidad de erosión no es una cuantificación del material perdido una zona, está conformado por un análisis discriminante, entre las variables que se encuentran presentes como erosión eólica, hídrica etc...

8.1 INTRODUCCIÓN A LA EROSIÓN

La erosión es un proceso natural que está dentro del ciclo geológico de la tierra. Consiste en la disgregación y transporte de partículas del suelo. Es además un proceso dinámico natural modelador del paisaje, ya que puede generar una pérdida progresiva de nutrientes en las capas superficiales del suelo, fomentando la desertización y contornos en la superficie terrestre.

El proceso de pérdida de suelo generado por la erosión es un proceso progresivo y depende de las condiciones medio ambientales. La pérdida de la capa superficial del suelo por el arrastre de la masa de agua o el impacto del viento, disminuye la fertilidad y ocasiona una pérdida en los rendimientos de las cosechas. También, puede generar la degradación progresiva de laderas o taludes que puede dar como resultado un deslizamiento (movimiento en masa). La tierra arrastrada contribuye además a la contaminación y el aterramiento de los ríos o lagos.

8.2 MARCO TEÓRICO EROSIÓN

8.2.1 EROSIÓN

La erosión es la degradación y el transporte del suelo o roca que producen distintos procesos en la superficie de la Tierra. Entre estos agentes está la circulación de agua o hielo, el viento o los cambios térmicos. La erosión implica movimiento, transporte del material, en contraste con la disgregación de las rocas, fenómeno conocido como meteorización y es uno de los principales factores del ciclo

geográfico. Puede ser incrementada por actividades humanas o antropogénicas. La erosión produce el relieve de los valles, gargantas, cañones, cavernas y mesas.

8.2.2 AGENTES DE EROSIÓN DE ORIGEN NATURAL Y ANTRÓPICOS:

Erosión Natural: que se produce por la dinámica del medio ambiente, como el agua de las lluvias, la corriente de los ríos, el viento, el clima, la topografía. Esta erosión es imperceptible y tiende a buscar la estabilidad en la superficie del suelo y equilibrio, entre el proceso de desgaste de la superficie terrestre y la formación nueva del suelo.

Erosión Antrópica: es propiciada por el hombre al romper el equilibrio entre los suelos, la vegetación, el agua y los animales. Esta erosión se da cuando el ecosistema natural es transformado por la práctica productiva del hombre en un agroecosistema, en este proceso se altera el ciclo básico del ecosistema natural, es decir, de los diferentes flujos de la relación suelo-planta- agua. En consecuencia se produce un empobrecimiento químico del suelo, se reduce las poblaciones de microorganismos y empeoran las características físicas del suelo.

8.2.3 PRINCIPALES FORMAS DE EROSIÓN

8.2.3.1 EROSIÓN EÓLICA O DE VIENTO

La erosión eólica es el desgaste de las rocas o la remoción del suelo debido a la acción del viento. El viento es un agente de modelado del relieve ya que este puede transportar partículas que, cuando chocan con el terreno, lo van desgastando. Este tipo de erosión suele ser lento y, para que se produzca, el territorio debe estar desnudo, ya que la vegetación disminuye o anula el efecto.

La erosión eólica se produce, pues, en zonas áridas, como los desiertos y la alta montaña. Estos tienen además otra característica imprescindible: las grandes diferencias de temperaturas. Esto hace que la roca se rompa y la erosión eólica pueda actuar con mayor eficacia.

La corrosión es la abrasión sufrida por las rocas al ser friccionadas por los impactos de las partículas arenosas que son transportadas por el viento. Cuando estas partículas golpean las rocas sufren a su vez una transformación, tomando un aspecto redondeado. Cuando el viento pierde fuerza va depositando los materiales transportados de forma gradual, lo que habitualmente da lugar a la acumulación de partículas de similar tamaño y peso.

- **Desprendimiento:** El movimiento del suelo por acción del viento es un resultado de la turbulencia de la velocidad. La velocidad requerida al iniciar el movimiento aumenta, al aumentar el tamaño de las partículas. Para la mayoría de los suelos esta velocidad es de aproximadamente 20 km/h a una altura de 30 centímetros por encima de la superficie (Gray y Sotir, 1996).
- **Transporte:** La velocidad requerida para el transporte de las partículas una vez se inició es menos que la requerida para el desprendimiento. La mayor parte de las partículas del suelo se transportan cerca de la superficie de la tierra a una altura no mayor a 1.0 metro. Aproximadamente 62 al 97% del total de las partículas es transportado en esta zona cerca de la superficie. Este hecho sugiere la utilidad de instalar barreras bajas o rompedoras de viento para impedir el movimiento de estas partículas. La vegetación por ejemplo puede cumplir con este propósito adicionalmente a la de otras funciones de control de erosión y estabilidad del talud (Gray y Sotir, 1996).

- **Depositación:** Al disminuir la velocidad del viento o al encontrarse las partículas con una barrera, estas caen o se sedimentan por acción de las fuerzas de gravedad.

8.2.3.2 EROSIÓN HÍDRICA

Es producida principalmente por los efectos de la lluvia. El impacto de las gotas de agua en el suelo descubierto, ocasionan el desprendimiento de sus partículas y su remoción por agua de escorrentía. Los factores causales son los siguientes:

8.2.3.2.1 Erosión laminar

La erosión laminar consiste en el desprendimiento y transporte en capas bien definidas superficiales de suelo por acción de la escorrentía difusa. El suelo se va perdiendo casi en forma imperceptible. Este tipo de erosión es muy común en los suelos residuales y en las zonas recientemente deforestadas. La acción de las gotas de lluvia altera el suelo superficial. El agua parcialmente se infiltra y se acumula sobre la superficie del terreno, formando una capa delgada de agua con flujos de 2 a 3 milímetros de espesor. El flujo laminar es poco profundo en la cresta de la ladera pero la profundidad de flujo aumenta talud abajo. El flujo propiamente laminar tiene poco poder erosivo pero en partes se convierte en turbulento, aumentando en forma importante su capacidad de erosión. Al continuar la acción de la lluvia y al mismo tiempo ocurrir el flujo se genera turbulencia en el flujo, aumentando la capacidad de erosión. El flujo de agua toma un color marrón o amarillo por la presencia de sedimento. Las áreas de cultivos no permanentes son extraordinariamente susceptibles a la erosión laminar, al igual que los suelos sin vegetación y los sujetos a sobre pastoreo de ganado. **Suarez J. (2001)**. La ecuación básica que describe

este tipo de erosión fue propuesta por Watson y Laflen, (1986) citado por Fangmeier et al. (2006):

$$D_i = K_i * i^2 * S_f$$

Donde:

D_i = Tasa de erosión laminar en kg/m² –s,

K_i = Erodabilidad del suelo para erosión laminar en kg-s/m⁴.

I = Intensidad de la lluvia en m/s,

S_f = Factor de pendiente = $1.05 - (0.85 * e^{(-4 * \sin \theta)})$.

θ = pendiente en grados.

8.2.3.2.1.2 Erosión en surcos.

La erosión en surcos es un proceso hidráulico, donde el escurrimiento comienza a desagregar el suelo en la interface suelo-agua y continúa con el transporte de estas partículas.

Es un proceso donde pequeños canales de varios centímetros de profundidad son formados. El suelo es desprendido por la acción abrasiva del flujo de agua y por desprendimiento del suelo, causado por socavamiento de las paredes laterales de los canales. Las partículas desprendidas son transportadas por una combinación de suspensión, saltación y rodamiento. El potencial erosivo del flujo de agua depende de su velocidad, profundidad, turbulencia del flujo así como del tipo y cantidad del material siendo transportado. Erosión en surco incrementa rápidamente con la longitud y el grado de pendiente que causa un incremento en la velocidad y volumen del flujo de esorrentía superficial.

La erosión en surcos es provocada por la concentración del escurrimiento superficial; los cambios de pendiente favorecen la concentración y aumentan la velocidad del escurrimiento, aumentando la capacidad erosiva y de transporte de las partículas en suspensión. La mayoría de los surcos se forman por la acción retrocedente o corte hacia atrás del suelo, dependiendo de la textura del mismo, la labranza, la pendiente y del pico de descarga del escurrimiento. La formación de estos surcos de erosión puede evitarse o atenuarse con pequeños obstáculos que se conforman con la labranza conservacionista (rastrajo) y las raíces de los cultivos. (Marelli H, 2004).

La erosión en surco es la predominante en la mayor parte de los suelos. Es una función de la fuerza de corte del escurrimiento concentrado en surcos ζ y de dos propiedades del suelo: la erodabilidad del suelo para erosión en surcos K_r , y la resistencia al corte crítica del suelo ζ_c es decir aquella resistencia del suelo debajo de la cual el desprendimiento es despreciable. De acuerdo a esta relación, sólo habrá erosión si la fuerza de corte del escurrimiento ζ supera en la resistencia al corte crítica del suelo ζ_c . La relación entre estas variables se indica en la siguiente expresión (Fangmeier et al., 2006):

$$D_r = K_r * (\zeta - \zeta_c) * \left(1 - \frac{Q_s}{T_c}\right)$$

Donde:

D_r = Tasa de erosión en surcos en kg/m² -s,

K_r = erodabilidad del suelo para erosión en surcos en s/m,

ζ_c = resistencia al corte crítica, debajo de la cual no hay desprendimiento en Pa,

Q_s = contenido de sedimentos en el flujo de escorrentía por surcos en kg/m-s,

T_c = capacidad de transporte de sedimentos en los surcos en kg/m-s,

ζ = fuerza de corte hidráulica del escurrimiento en:

$$Pa = \rho * g * r * s$$

Donde:

ρ = densidad del agua en kg/m^3

g = aceleración de la gravedad en m/s^2

r = radio hidráulico del surco en m

s = gradiente hidráulico del flujo en surcos (similar a la pendiente del terreno).

El término $1-(Q_s/T_c)$ indica que cuando el contenido de sedimentos en el flujo Q_s es igual a la capacidad de transporte T_c , el flujo está saturado y la erosión se hace cero, inversamente cuando el contenido de sedimentos en el flujo es bajo (“agua clara”) la capacidad de erosión es máxima.

8.2.3.2.1.3 Erosión Zanjas o cárcavas.

La erosión en cárcavas es un fenómeno que aparece cuando hay una mayor concentración y volumen en el escurrimiento y las irregularidades del terreno permiten la unión de varios surcos, formándose zanjas de gran tamaño conocidas como cárcavas, generalmente ramificadas y que no permiten el uso de maquinarias, ni ningún cultivo. Esta forma de erosión es común en suelos altamente susceptibles a la erosión.

La aparición de surcos y cárcavas representan el grado superior del proceso de erosión que se manifiesta en los suelos y tiene su origen en el drenaje superficial. Las pérdidas de suelo en sitios agrícolas y de construcción son usualmente producto de una combinación de erosión laminar y en surco. Las cárcavas, expresión máxima del proceso erosivo por el agua; presentan dos áreas de donde proviene el material erosionable, la cabecera y las paredes laterales.” (Marelli, 2004).

Es un proceso que socava al suelo profundamente, generando zanjones en sitios de concentración de volúmenes considerables de escorrentía. Esta fase del proceso es precedida por las formas anteriores de erosión si no son corregidas. Al hacerse más profunda la socavación, el perfil va adquiriendo mayores pendientes aguas arriba, intensificándose las pérdidas de suelos por erosión retrocedente. La sección presenta una forma de U en terrenos que tienen capas de materiales homogéneos y forma de V cuando en profundidad aparecen capas más duras.

Se han desarrollado algunas ecuaciones de experiencias locales para estimar la erosión en cárcavas. La siguiente ecuación fue desarrollada en el estado de Iowa en E.U.:

$$Y = 0.01X_1^{0.882} X_2^{-0.044} X_3^{0.7954} X_4^{-0.2473} e^{-0.0036x_5}$$

Donde:

Y = Avance del área de la cárcava en acres para un determinado período de tiempo

X_1 = Índice de escorrentía (pulgadas)

X_2 = Área de la terraza o cuenca (acres)

X_3 = Longitud de la cárcava al inicio del período (pies)

X_4 = Longitud desde la cabeza de la cárcava hasta la divisoria de aguas (pies)

X_5 = La desviación de la precipitación desde su condición normal durante el período de tiempo (pulgadas).

Otra ecuación desarrollada de varios sitios en los E.U. es la siguiente:

$$Eq = 0.15A^{0.49} S^{0.14} P_a^{0.75} E_c$$

Donde:

Eq = Promedio anual de avance de la cabeza de la cárcava en pies

A = Área de drenaje en acres

S = Pendiente del canal de aproximación en porcentaje

Pa = Lluvia anual total en pulgadas de los aguaceros de más de media pulgada en 24 horas.

Ec = Porcentaje en peso de arcilla en el suelo.

Y otra tercera ecuación propuesta es la siguiente:

$$Eq = 1.5A^{0.46}P^{0.2}$$

Donde:

Eq = Promedio anual de avance de la cabeza de la cárcava en pies

A = Area de drenaje en acres

P = Suma de las lluvias mayores de 24 horas en un periodo de tiempo convertidos a promedio anual en pulgadas.

Las anteriores ecuaciones pueden servir para tener una idea de los factores que afectan la erosión en cárcavas; pero no es recomendable utilizarlas ciegamente para diseño, debido a que estas no están teniendo en cuenta los factores que determinan la magnitud de la erosión para sitios diferentes a donde fueron desarrolladas.

8.2.3.3 OTROS CAUSANTES DE EROSIÓN

8.2.3.3.1.1 Impacto de la gota de lluvia

La erosión por golpeo de la lluvia (Splash erosion) ocurre por el impacto de las gotas de agua sobre una superficie desprotegida, el cual produce el desprendimiento y remoción de capas delgadas de suelo (Figura 15). Este impacto rompe la estructura del suelo y lo separa en partículas relativamente pequeñas. Estas partículas son luego transportadas por la escorrentía. Al caer una gota de lluvia levanta partículas

de suelo y las reparte en un área de aproximadamente un metro cuadrado. Parte de la lluvia se infiltra y fluye sobre la superficie.

En un suelo sin protección vegetal se calculan hasta cincuenta metros cúbicos de suelo removido por hectárea en una lluvia fuerte de una hora de duración. La erosión es una función del poder erosivo del agua y de la erosionabilidad del suelo. La erosión causada por la lluvia está determinada por la cantidad, intensidad y duración de la misma. Cuando la intensidad y cantidad de lluvias es alta, la erosión será más rápida.

Tamaño y velocidad de las gotas de lluvia. El tamaño de las partículas de lluvia varía de 0.5 a 5 m.m. de diámetro, de acuerdo a la intensidad de la lluvia (Figura 16). Durante una lluvia las gotas son de diferentes tamaños.

La velocidad de las partículas de lluvia puede calcularse mediante la siguiente expresión (Atlas y Ulbrich, 1987):

$$V_t = 3.86d_r^{0.67}$$

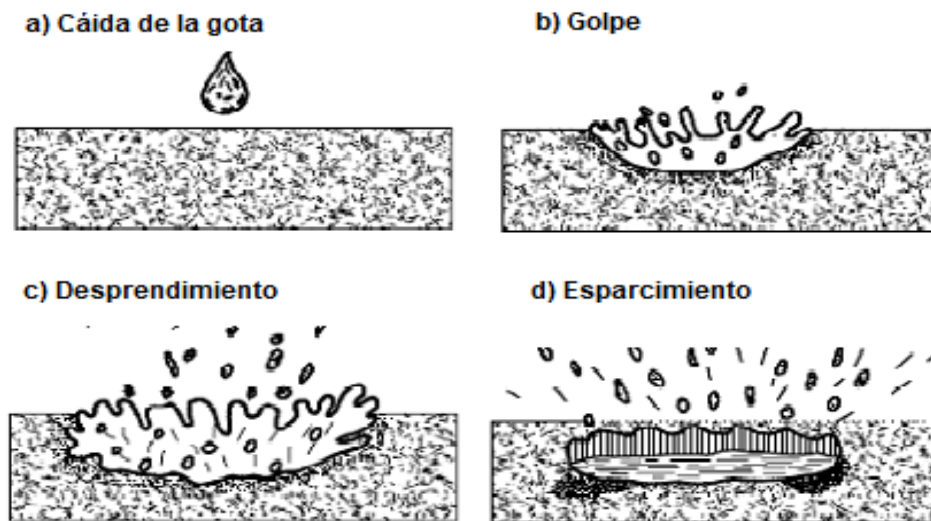


Figura 16: Erosión por golpe de una gota de lluvia Suarez J, 2001

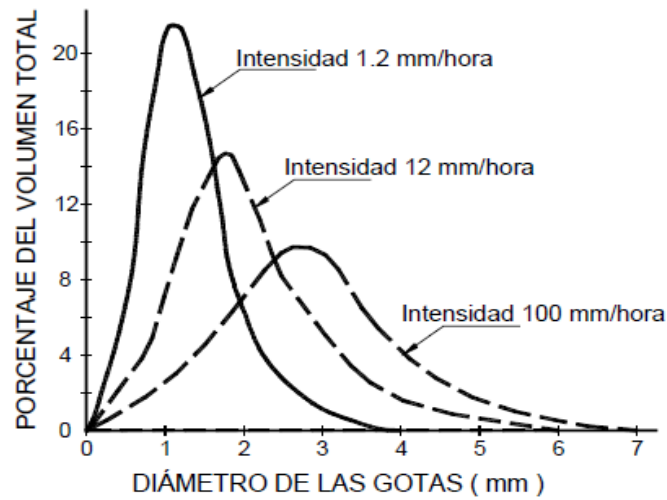


Figura 17 : Distribución de las gotas en una lluvia Suarez J, 2001.

Donde:

V_t = Velocidad en metros / segundo.

d_r = Diámetro en milímetros.

La velocidad de las gotas varía generalmente de 3 a 10 metros por segundo.

Con el tamaño y velocidad de las gotas puede calcularse la energía cinética, la cual es generalmente superior a la de una escorrentía normal.

La energía cinética depende del tamaño o masa de las partículas de agua y la velocidad

$$K_e = 1/mv^2$$

La energía cinética de una lluvia puede calcularse mediante la siguiente expresión (Wischmeier y Smith, 1965):

$$K_e = 916 + 330 \log_{10} i$$

Donde:

i = Intensidad de la lluvia en pulgadas / hora.

K_e = Energía cinética de la lluvia en pie – Ton/acre – pulgada de lluvia.

La lluvia es en sí entonces la fuente más importante de erosión, medida en volumen de suelo desprendido. Cuando el terreno tiene pendiente de más del 2% se forman pequeños surcos y en pendientes menores la erosión es laminar, por la acción de la escorrentía que transporta el suelo desprendido por la lluvia. Para la eliminación de la erosión por gotas de lluvia se emplea la cobertura vegetal especialmente los pastos.

8.2.3.3.1.2 Erosión por movimiento en masa

Implica el desplazamiento de grandes volúmenes de material en condiciones especiales de humedad, pendiente y tipo de suelo. Los movimientos en masa se producen frecuentemente en suelos someros, asentados sobre un material impermeable, como rocas graníticas, bajo fuertes pendientes. En estas condiciones el material “fluye” sobre la interfase suelo-roca por un efecto mecánico de disminución de la resistencia al corte, aumento del peso y lubricación del contacto entre ambas capas.

Las condiciones de manejo influyen además sobre este tipo de pérdida de suelo, en especial el desmonte de áreas en pendiente, con la consiguiente pérdida de propiedades mecánicas del sistema suelo-planta, por falta de anclaje y reforzamiento del volumen de suelo por las raíces. El fuego y el sobrepastoreo son

factores que inciden en la eliminación de la vegetación y en la generación de escurrimientos; por lo tanto, en los riesgos de ocurrencia de estos fenómenos.

Los fenómenos de erosión en masa incluyen los siguientes tipos de movimiento (Gray y Sotir, 1996):

- Reptación (Creep)
- Flujos de tierra
- Flujos de lodo
- Flujos de detritos
- Flujos hiperconcentrados
- Avalanchas

Nota: Los tipos de movimiento son explicados en profundidad en capítulo de remoción en masa.

8.2.3.3.1.3 Erosión de corrientes de agua.

Los bordes y fondos de ríos y arroyos son las zonas de la cuenca más susceptibles a la erosión en virtud de su proximidad al cauce y a que deben soportar la máxima energía de las crecientes, ya que son los lugares de traslado y concentración de escurrimientos.

La erosión de márgenes se produce en el pie del río debido a la acción erosiva de la corriente que desestabiliza la base y produce el desmoronamiento del resto de la margen, en forma similar al mecanismo descrito para la erosión en cárcavas. Este mecanismo se da típicamente en los sectores cóncavos de meandros o curvas de ríos de llanura, y es responsable del avance (también llamado corrimiento de meandros) del meandro sobre otras tierras.

Es un fenómeno relacionado estrechamente a la eliminación de la vegetación de la zona de riberas de la mayor parte de los ríos de la región central de Argentina, causada por el avance de la frontera agrícola y la sobreexplotación del recurso forestal, arbustivo y herbáceo de los denominados bosques en galería. Otros aspectos que regulan la magnitud de este tipo de erosión son la presencia de materiales poco cohesivos en las márgenes, la frecuencia y caudal de las crecientes ocurridas en la cuenca de aporte.

Un curso puede estar en equilibrio, si el nivel medio de la margen y el fondo no varían; se está erosionando si este nivel disminuye y se está sedimentando si aumenta. Otros tipos de erosión de los cursos son las siguientes (Pouey, 1998):

- Erosión transversal: Se produce en todas aquellas secciones donde se reduce el ancho del río,
- Erosión en las curvas: consiste en la profundización del cauce en la zona cercana a la orilla cóncava (meandro).
- Erosión al pie de obras: se produce cuando el flujo rodea a alguna obra realizada en el lecho del río.
- Erosión local en estribos o al pie de obras unidas a la margen: similar a la anterior para obras en la margen.
- Erosión aguas abajo de presas: ocurren cuando se reduce la carga de sedimentos de la corriente por acción de las presas (“aguas claras”).
- Erosión local aguas debajo de obras de desagüe: se producen al pie de obras de descarga desde la margen al río.

- Erosión aguas arriba de cortes de meandros y rectificaciones: se producen al alterar la forma de un meandro por canalización y rectificación. Hay aumento de la pendiente de fondo, de la velocidad y de la carga de sedimentos, que puede incrementar la erosión de fondo aguas abajo de la obra.
- Erosión bajo tubería: se produce cuando se colocan tubos en el lecho del río.

La erosión de fondo de los cauces (disminución del nivel de base) es un fenómeno relacionado a la pérdida paulatina de material del lecho, a causa de los caudales erogados en la cuenca, a la carga de sedimentos y al tipo de material del fondo. Es un fenómeno que afecta a la mayoría de los cursos permanentes, en especial aquellos que han sufrido degradación biológica de sus márgenes o degradación de su estado geomórfico (Brierkley y Friyrs, 2005).

8.2.4 CONCEPTOS HIDROLOGICOS PARA ANALISIS DE LA EROSIÓN

8.2.5 ANALISIS HIDROLOGICO

Es uno de los trabajos previos más importantes para el diseño de obras de control de erosión. Este tipo de análisis es importante para la determinación de los caudales máximos y velocidades máximas de la corriente; las cuales son indispensables para determinar las fuerzas de erosión, debidas al flujo de agua. Si no se conocen con precisión y confiabilidad, las intensidades máximas de precipitación, escorrentía y los caudales máximos de las corrientes, no es posible diseñar adecuadamente obras para controlar la erosión.

La hidrología no es una ciencia exacta y es posible que se obtengan resultados muy diferentes de acuerdo al método que se utilice para el cálculo y la metodología de manejo de la información; por lo tanto se deben utilizar criterios de sana ingeniería

para decidir cuál método se debe aplicar. Cuando se diseñan obras para el control de erosión se recomienda ser prudentemente en la suposición de lluvias y caudales, para no correr el riesgo de perder las obras al diseñar para fuerzas de erosión menores que las reales.

- **Ciclo hidrológico:** Es el proceso de circulación del agua entre los distintos compartimentos de la hidrosfera. Se trata de un ciclo biogeoquímico en el que hay una intervención de reacciones químicas y el agua, se traslada de unos lugares a otros o cambia de estado físico.

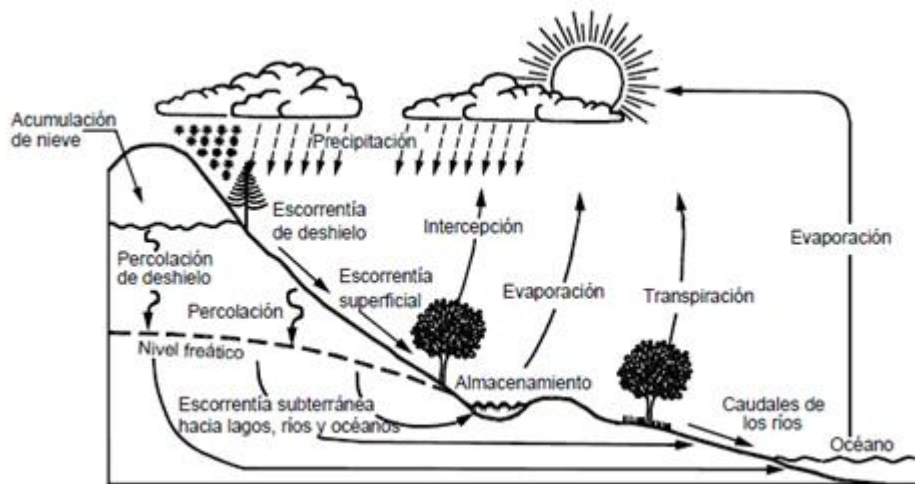


Figura 18: Ciclo hidrológico del agua (Dunne y Leopold, 1978).

8.2.6 LLUVIAS

Las lluvias se deben a una serie de fenómenos atmosféricos que ocurren en las nubes, entre los cuales los más importantes son:

8.2.6.1 PRECIPITACIÓN

Es producto de la condensación del vapor de agua atmosférica que se deposita en la superficie de la Tierra. Ocurre cuando la atmósfera (que es una gran solución

gaseosa) se satura con el vapor de agua, el agua se condensa y cae de la solución (es decir, precipita). El aire se satura a través de dos procesos, por enfriamiento y añadiendo humedad.

La precipitación que alcanza la superficie de la tierra puede producirse en muchas formas diferentes, como lluvia, lluvia congelada, llovizna, nieve, aguanieve y granizo.

8.2.6.1.1.1 Formas de precipitación

- **Actividad frontal:** La precipitación estratiforme o dinámica ocurre como consecuencia del ascenso lento del aire en sistemas sinópticos, como en los frentes fríos y antes de los frentes cálidos. Un ascenso similar se observa alrededor de los ciclones tropicales fuera del ojo; y en modelos de precipitación con cabeza de coma alrededor de los ciclones de latitud media.
- **Convección:** Se forman movimientos verticales de aire muy fuertes localmente, en los cuales la precipitación de partículas de lluvia se inicia en la base de las nubes y crece hacia arriba. El tiempo en que se forma la precipitación es muy corto (aproximadamente 45 minutos). Son generalmente lluvias intensas, pero de corta duración.
- **Efectos orográficos:** El levantamiento del aire con nubes al pasar sobre cadenas montañosas, puede generar inestabilidades convectivas que producen lluvia. Los frentes nubosos al chocar contra una cordillera generan precipitaciones muy fuertes a determinadas altitudes.
- **Actividad tropical:** La actividad tropical, en general, consiste en grandes masas de aire de varios cientos de millas con la presión baja en el centro y con vientos que soplan alrededor del centro en cualquier dirección en el

sentido de las agujas del reloj (hemisferio sur) o contrario a las agujas del reloj (hemisferio norte). La precipitación surge cuando un frente cálido se forma debido a una masa progresiva de aire cálido, que sube por una superficie inclinada de aire frío que se retira y es enfriada en el proceso de elevación, causando la precipitación.

- El Gran Desierto Arenoso obtiene casi toda su lluvia durante las tormentas monzónicas o la depresión lluviosa de algún ciclón tropical ocasional. Las tormentas ocurren en un promedio de 20-30 días anualmente, en la mayor parte del área. Aunque el desierto tenga tasas de precipitación bastante altas, debido a que también hay una alta tasa de evaporación, esta área permanece con un ambiente árido y áreas enormes de arena.

8.2.6.1.1.2 Características de la precipitación

- **Tamaño y forma:** Las gotas de lluvia tienen tamaños en los límites de 0.1 mm hasta los 9 mm de diámetro y por encima de ese tamaño, tienden a romperse. Las gotas más pequeñas se llaman gotitas de nube y su forma es esférica. Cuando una gota de lluvia aumenta de tamaño, su forma se hace más redondeada con un corte transversal más grande.
- **Intensidad y duración:** La intensidad y duración de la precipitación están, por lo general, inversamente relacionadas; es decir, las tormentas de intensidad altas probablemente serán de duración corta; y las tormentas de intensidad baja pueden tener una duración larga.
- **Intensidad y área:** Sobre un área grande la precipitación suele ser menos intensa que sobre un área pequeña.

- **Tamaño de gota e intensidad:** Las tormentas de intensidad alta tienen un tamaño de gota más grande que las tormentas de intensidad baja.

8.2.6.1.1.3 Medida de la precipitación

El método estándar de medir la lluvia o nevada es un pluviómetro estándar, que puede ser de plástico o metal, y de entre 100 mm y 200 mm. El cilindro interior se llena con 25 mm de lluvia, que al desbordar fluye en el cilindro externo. Los calibradores plásticos tienen marcas en el cilindro interior con una resolución de 0.25 mm, mientras que los calibradores metálicos requieren el uso de un palo diseñado con marcas de 0.25 mm. Estos calibradores se adaptan para el invierno quitando el embudo y el cilindro interior y permitiendo que la lluvia de nieve entre en el cilindro externo. Una vez que la nevada o hielo termina de acumularse, o cuando se acerca a 300 mm, se retira para que se derrita, o se usa agua caliente para llenar el cilindro interior a fin de derretir la precipitación congelada en el cilindro externo, guardando la cantidad de fluido caliente añadido, que luego se resta del total general una vez que todo el hielo o nieve se ha derretido.

Otros tipos de calibradores incluyen el pluviómetro de cuña (el pluviómetro más barato y más frágil), el pluviómetro de cubeta basculante y el pluviómetro pesado. Los pluviómetros de cuña y de cubeta basculante tienen problemas con la nieve. Las tentativas de compensar la nieve o hielo calentando la cuña basculante tienen un éxito limitado, ya que la nieve puede sublimar si el calibrador se guarda por encima de la temperatura de congelación. Los pluviómetros pesados con anticongelante son más apropiados para la nieve, pero hay que quitarles el embudo antes de que comience la precipitación. Para quienes quieren medir la precipitación de una forma casera y económica, es posible hacerlo con una lata cilíndrica con

lados rectos, pero su exactitud dependerá de la regla que se use para medir la lluvia. Cualquiera de los pluviómetros mencionados puede ser construido en casa.

Hay varias redes de mediciones de precipitación repartidas por todo el mundo, que comparten sus datos a través de Internet o de oficinas meteorológicas locales. Los datos de precipitación son importantes para pronosticar los flujos de los ríos y la calidad del agua del río, usando modelos de transporte hidrológicos como SWMM, SHE o el modelo DSSAM.

8.2.6.2 ESCORRENTÍA

Es un término geológico de la hidrología, que hace referencia a la lámina de agua que circula sobre la superficie en una cuenca de drenaje, es decir la altura en milímetros del agua de lluvia escurrida y extendida. Normalmente se considera como la precipitación menos la evapotranspiración real y la infiltración del sistema suelo. Según la teoría de Horton se forma cuando las precipitaciones superan la capacidad de infiltración del suelo. Esto sólo es aplicable en suelos de zonas áridas y de precipitaciones torrenciales. La escorrentía superficial es una de las principales causas de erosión a nivel mundial. Suele ser particularmente dañina en suelos poco permeables, como los arcillosos; y en zonas con una cubierta vegetal escasa.

Los principales parámetros que afectan la escorrentía son:

- La intensidad de la precipitación.
- La capacidad de infiltración de una superficie particular.
- La condición hidráulica a la que se encuentra el suelo o la roca
- Las características hidráulica del suelo o roca.

8.2.6.3 INFILTRACIÓN

Se define como infiltración al paso del agua de la superficie hacia el interior del suelo. Es un proceso que depende fundamentalmente del agua disponible a infiltrar, la naturaleza del suelo, el estado de la superficie y las cantidades de agua y aire inicialmente presentes en su interior.

A medida que el agua infiltra desde la superficie, las capas superiores del suelo se van humedeciendo de arriba hacia abajo, alterando gradualmente su humedad. En cuanto al aporte de agua, el perfil de humedad tiende a la saturación en toda la profundidad, siendo la superficie el primer nivel a saturar. Normalmente la infiltración proveniente de precipitaciones naturales no es capaz de saturar todo el suelo, sólo satura las capas más cercanas a la superficie, conformando un perfil típico donde el valor de humedad decrece con la profundidad.

Cuando cesa el aporte de agua en la superficie, deja de haber infiltración, la humedad en el interior del suelo se redistribuye, generando un perfil de humedad inverso, con valores de humedad menores en las capas cercanas a la superficie y mayores en las capas más profundas.

Capacidad de infiltración

Las capacidades de infiltración varían de dos a dos mil quinientos milímetros por hora, dependiendo de la cobertura vegetal, pendiente, textura del suelo, humedad natural y práctica de agricultura. Los suelos más permeables (Tabla 1) como las gravas y arenas poseen una capacidad mayor de infiltración. Las gravas y arenas son mucho más permeables que las arcillas.

Tabla 13: Coeficientes de permeabilidad y capacidad de infiltración

Suelo	Permeabilidad K cm/seg	Capacidad de infiltración mm/hora
Arcillas	$< 10 \times 10^{-9}$	0.25 a 2.5
Limos	1×10^{-9} a 1×10^{-7}	2.5 a 8
Arenas finas	1×10^{-7} a 1×10^{-5}	8 a 13
Arenas gruesas	1×10^{-5} a 1×10^{-2}	13 a 20
Gravas	$> 1 \times 10^{-2}$	20 a 30

La infiltración es también influenciada por la pendiente del terreno y por la textura del suelo; Sin embargo, hay otros factores que determinan la infiltración como son: las prácticas agrícolas que crean zonas de acumulación de agua y aumentan la porosidad del suelo subsuperficial. Una pasada de tractor en un área semiplana puede aumentar la rata de infiltración en un ochenta por ciento. Igual situación ocurre con la siembra siguiendo las líneas de nivel.

Cuando la línea del nivel de agua está muy cerca a la superficie, esta puede interceptarse con las corrientes superficiales formándose una zona de flujo combinado. Esta situación es común en depresiones en áreas de lutitas meteorizadas, especialmente en la cordillera oriental de Colombia, formándose una «semicuenca saturada» dentro de la cuenca general, la cual va creciendo durante el tiempo que dure la lluvia. Suarez J, 2001

8.2.7 CUENCA HIDROGRÁFICA

Es una área específica de la superficie de la tierra, en la que fluye el agua hacia un mismo punto y donde se combinan: fenómenos físicos (hidroclimáticos, geológicos), biológicos (flora y fauna) y actividades humanas. Una cuenca hidrográfica es delimitada por la línea de las cumbres, también llamada divisoria de aguas. El uso

de los recursos naturales se regula administrativamente separando el territorio por cuencas hidrográficas y con miras al futuro las cuencas hidrográficas se perfilan como las unidades de división funcionales con más coherencia, permitiendo una verdadera integración social y territorial por medio del agua.

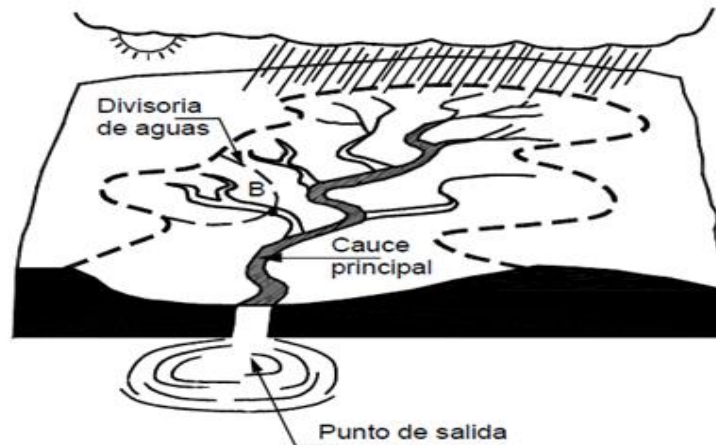


Figura 19: Delimitación de una cuenca Suarez J, 2001

8.2.7.1 CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA

Las principales características de una cuenca son:

- La curva cota superficie: esta característica es además una indicación del potencial hidroeléctrico de la cuenca.
- El coeficiente de forma: da indicaciones preliminares de la onda de avenida que es capaz de generar.
- El coeficiente de ramificación: también da indicaciones preliminares respecto al tipo de onda de avenida.

En una cuenca se distinguen los siguientes elementos:

- **Divisoria de aguas:** La divisoria de aguas es una línea imaginaria que delimita la cuenca hidrográfica. Una divisoria de aguas marca el límite entre

una cuenca hidrográfica y las cuencas vecinas. El agua precipitada a cada lado de la divisoria desemboca generalmente en ríos distintos.

- **Río principal:** Suele ser definido como el curso con mayor caudal de agua (medio o máximo) o bien con mayor longitud o mayor área de drenaje Tanto el concepto de río principal como el de nacimiento del río son arbitrarios, como también lo es la distinción entre río principal y afluente. Sin embargo, la mayoría de cuencas de drenaje presentan un río principal bien definido desde la desembocadura hasta cerca de la divisoria de aguas. El río principal tiene un curso, que es la distancia entre su nacimiento y su desembocadura.

En el curso de un río se distinguen tres partes:

- **Curso superior:** ubicado en lo más elevado del relieve, en donde la erosión de las aguas del río es vertical. Su resultado: la profundización del cauce.
- **Curso medio:** en donde el río empieza a zigzaguear, ensanchando el valle.
- **Curso inferior:** situado en las partes más bajas de la cuenca. Allí, el caudal del río pierde fuerza y los materiales sólidos que lleva se sedimentan, formando las llanuras aluviales o valles.

Otros términos importantes a distinguir en un río son:

- **Cauce o lecho:** Lecho de los ríos y arroyos. Conducto descubierto o acequia por donde corren las aguas para riego u otros usos.
- **Thalweg:** Línea que une los puntos de mayor profundidad a lo largo de un curso de agua.

- **Margen derecha:** Mirando río abajo, la margen que se encuentra a la derecha.
- **Margen izquierda:** Mirando río abajo, la margen que se encuentra a la izquierda.
- **Aguas abajo:** Con relación a una sección de un curso de agua, sea principal o afluente, se dice que un punto está aguas abajo, si se sitúa después de la sección considerada, avanzando en el sentido de la corriente.
- **Aguas arriba:** Es el contrario de la definición anterior.
- **Afluentes:** Son los ríos secundarios que desaguan en el río principal. Cada afluente tiene su respectiva cuenca, denominada sub-cuenca.
- **El relieve de la cuenca:** Consta de los valles principales y secundarios, con las formas de relieve mayores o menores y la red fluvial que conforma una cuenca. Está formado por las montañas y sus flancos; por las quebradas o torrentes, valles y mesetas.
- **Las obras humanas:** Algunas obras construidas por el ser humano, también denominadas intervenciones antropogénicas, que se observan en la cuenca suelen ser viviendas, ciudades, campos de cultivo, obras para riego y energía y vías de comunicación. El factor humano es siempre el causante de muchos desastres dentro de la cuenca, ya que se sobreexplota la cuenca quitándole recursos o «desnudándola» de vegetación y trayendo inundaciones en las partes bajas. Pero el mayor de los males es la construcción de viviendas,

urbanizaciones y poblaciones enteras en zonas inundables, sobre todo, en las llanuras aluviales de las cuencas de muchos ríos.

No obstante, los seres humanos también realizan obras muy positivas en la conservación y mejoramiento de las cuencas hidrográficas, para minimizar o eliminar los efectos destructivos de las crecidas e inundaciones. Lo mismo podríamos decir de los numerosos embalses de propósitos múltiples de numerosos ríos (siendo uno de esos propósitos la regulación del caudal). Basta a veces la construcción de un sólo embalse en un río pequeño para regularizar su caudal y limitar las crecidas y los daños que pueden producirse.

8.2.7.2 PARTES DE UNA CUENCA

Una cuenca tiene tres partes:

- **Cuenca alta:** que corresponde a la zona donde nace el río, el cual se desplaza por una gran pendiente.
- **Cuenca media:** la parte de la cuenca en la cual hay un equilibrio entre el material sólido que llega traído por la corriente y el material que sale. Visiblemente no hay erosión.
- **Cuenca baja:** la parte de la cuenca en la cual el material extraído de la parte alta se deposita en lo que se llama cono de deyección.

8.2.7.3 TIPOS DE CUENCAS

Existen tres tipos de cuencas:

- **Exorreicas:** Drenan sus aguas al mar o al océano.
- **Endorreicas:** Desembocan en lagos, lagunas o salares que no tienen comunicación fluvial al mar.

- **Arrecias:** las aguas se evaporan o se filtran en el terreno antes de encauzarse en una red de drenaje. Los arroyos, aguadas y cañadones de la meseta patagónica central pertenecen a este tipo, ya que no desaguan en ningún río u otro cuerpo hidrográfico de importancia. También son frecuentes en áreas del desierto del Sahara y en muchas otras partes.

8.2.7.4 CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA

Las principales características de una cuenca son:

- La curva cota superficie: esta característica es además una indicación del potencial hidroeléctrico de la cuenca.
- El coeficiente de forma: da indicaciones preliminares de la onda de avenida que es capaz de generar.
- El coeficiente de ramificación: también da indicaciones preliminares respecto al tipo de onda de avenida.

En una cuenca se distinguen los siguientes elementos:

- **Divisoria de aguas:** La divisoria de aguas es una línea imaginaria que delimita la cuenca hidrográfica. Una divisoria de aguas marca el límite entre una cuenca hidrográfica y las cuencas vecinas. El agua precipitada a cada lado de la divisoria desemboca generalmente en ríos distintos.
- **Río principal:** Suele ser definido como el curso con mayor caudal de agua (medio o máximo) o bien con mayor longitud o mayor área de drenaje Tanto el concepto de río principal como el de nacimiento del río son arbitrarios, como también lo es la distinción entre río principal y afluente. Sin embargo, la mayoría de cuencas de drenaje presentan un río principal bien definido

desde la desembocadura hasta cerca de la divisoria de aguas. El río principal tiene un curso, que es la distancia entre su nacimiento y su desembocadura.

En el curso de un río se distinguen tres partes:

- **Curso superior:** ubicado en lo más elevado del relieve, en donde la erosión de las aguas del río es vertical. Su resultado: la profundización del cauce.
- **Curso medio:** en donde el río empieza a zigzaguear, ensanchando el valle.
- **Curso inferior:** situado en las partes más bajas de la cuenca. Allí, el caudal del río pierde fuerza y los materiales sólidos que lleva se sedimentan, formando las llanuras aluviales o valles.

Otros términos importantes a distinguir en un río son:

- **Cauce o lecho:** Lecho de los ríos y arroyos. Conducto descubierto o acequia por donde corren las aguas para riegos u otros usos.
- **Thalweg:** Línea que une los puntos de mayor profundidad a lo largo de un curso de agua.
- **Margen derecha:** Mirando río abajo, la margen que se encuentra a la derecha.
- **Margen izquierda:** Mirando río abajo, la margen que se encuentra a la izquierda.
- **Aguas abajo:** Con relación a una sección de un curso de agua, sea principal o afluente, se dice que un punto está aguas abajo, si se sitúa después de la sección considerada, avanzando en el sentido de la corriente.

- **Aguas arriba:** Es el contrario de la definición anterior.
 - **Afluentes:** Son los ríos secundarios que desaguan en el río principal. Cada afluente tiene su respectiva cuenca, denominada sub-cuenca.
 - **El relieve de la cuenca:** Consta de los valles principales y secundarios, con las formas de relieve mayores o menores y la red fluvial que conforma una cuenca. Está formado por las montañas y sus flancos; por las quebradas o torrentes, valles y mesetas.
 - **Las obras humanas:** Algunas obras construidas por el ser humano, también denominadas intervenciones antropogénicas, que se observan en la cuenca suelen ser viviendas, ciudades, campos de cultivo, obras para riego y energía y vías de comunicación. El factor humano es siempre el causante de muchos desastres dentro de la cuenca, ya que se sobreexplota la cuenca quitándole recursos o «desnudándola» de vegetación y trayendo inundaciones en las partes bajas. Pero el mayor de los males es la construcción de viviendas, urbanizaciones y poblaciones enteras en zonas inundables, sobre todo, en las llanuras aluviales de las cuencas de muchos ríos.

No obstante, los seres humanos también realizan obras muy positivas en la conservación y mejoramiento de las cuencas hidrográficas, para minimizar o eliminar los efectos destructivos de las crecidas e inundaciones. Lo mismo podríamos decir de los numerosos embalses de propósitos múltiples de numerosos ríos (siendo uno de esos propósitos la regulación del caudal). Basta a veces la construcción de un sólo embalse en un río pequeño para regularizar su caudal y limitar las crecidas y los daños que pueden producirse.

8.2.7.5 PARTES DE UNA CUENCA

Una cuenca tiene tres partes:

- **Cuenca alta:** que corresponde a la zona donde nace el río, el cual se desplaza por una gran pendiente.
- **Cuenca media:** la parte de la cuenca en la cual hay un equilibrio entre el material sólido que llega traído por la corriente y el material que sale. Visiblemente no hay erosión.
- **Cuenca baja:** la parte de la cuenca en la cual el material extraído de la parte alta se deposita en lo que se llama cono de deyección.

8.2.7.6 TIPOS DE CUENCAS

Existen tres tipos de cuencas:

- **Exorreicas:** Drenan sus aguas al mar o al océano.
- **Endorreicas:** Desembocan en lagos, lagunas o salares que no tienen comunicación fluvial al mar.
- **Arrecias:** las aguas se evaporan o se filtran en el terreno antes de encauzarse en una red de drenaje. Los arroyos, aguadas y cañadones de la meseta patagónica central pertenecen a este tipo, ya que no desaguan en ningún río u otro cuerpo hidrográfico de importancia. También son frecuentes en áreas del desierto del Sahara y en muchas otras partes.

8.2.7.7 CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS

Las características geomorfológicas de una cuenca hidrográfica dan una idea de las propiedades particulares de cada cuenca; estas propiedades o parámetros facilitan

el empleo de fórmulas hidrológicas, generalmente empíricas, que sirven para relacionarla y relacionar sus respuestas, por ejemplo las curvas de avenidas, a otras cuencas con características geomorfológicas análogas.

Área de la cuenca (km²): Una cuenca tiene su superficie perfectamente definida por su contorno y viene a ser el área drenada comprendida desde la línea de división de las aguas (divisorium acuarium), hasta el punto convenido (estación de aforos, desembocadura etc.). Para la determinación del área de la cuenca es necesario previamente delimitar la cuenca, trazando la línea divisoria, esta línea tiene las siguientes particularidades:

- Debe seguir las altas cumbres.
- Debe cortar ortogonalmente a las curvas de nivel.
- No debe cortar ninguno de los causes de la red de drenaje.

Perímetro de la cuenca (km): Es la longitud del contorno del área de la cuenca.

Índice de compacidad: También denominado coeficiente de compacidad o de Graveliús, definida como la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de área equivalente.

$$K_c = P/2\sqrt{\pi A}$$

Donde:

P = Perímetro de la cuenca.

A = Área de la cuenca.

Curva hipsométrica: Puesta en coordenadas representa la relación entre la cota y la superficie de la cuenca que se encuentra por encima de esta cota. El relieve de una cuenca se representa correctamente con un plano con curvas de nivel, sin embargo, estas curvas de nivel son muy complejas, por medio de la curva

hipsométrica se sintetiza esta información, lo que la hace más adecuada para trabajar.

Polígono frecuencias de altitudes: Representa el grado de incidencia de las áreas comprendidas entre curvas de nivel con respecto al total del área de la cuenca.

De los dos parámetros anteriores, se definen los siguientes:

- **Altura media:** Es la ordenada media de la curva hipsométrica.
- **Altura más frecuente:** Es la altitud cuyo valor porcentual es el máximo de la curva de frecuencia de altitudes.
- **Altitud de frecuencia media:** Es la altitud correspondiente al punto de absisa media (50% del área) de la curva hipsométrica.

Rectángulo equivalente: Es un rectángulo que tendría un comportamiento hidrológico semejante a la cuenca. En este rectángulo las curvas de nivel son rectas paralelas al lado menor. Los lados del rectángulo equivalente se determinan a través de fórmulas empíricas, una de las más utilizadas es la que se presenta abajo.

$$L = \frac{P}{4} + \sqrt{\left(\frac{P}{4}\right)^2 - A} \text{ Lado mayor del rectángulo}$$

$$l = \frac{P}{4} - \sqrt{\left(\frac{P}{4}\right)^2 - A} \text{ Lado menor del rectángulo}$$

Donde:

P = Perímetro de la cuenca

A = Área de la cuenca

Factor de forma de la cuenca: Es la relación entre el ancho promedio (A_p) de la cuenca y la longitud del curso principal del río (L).

Ancho promedio: relación entre el área de la cuenca (A) y la longitud mayor del río (L).

$$F = A/L^2$$

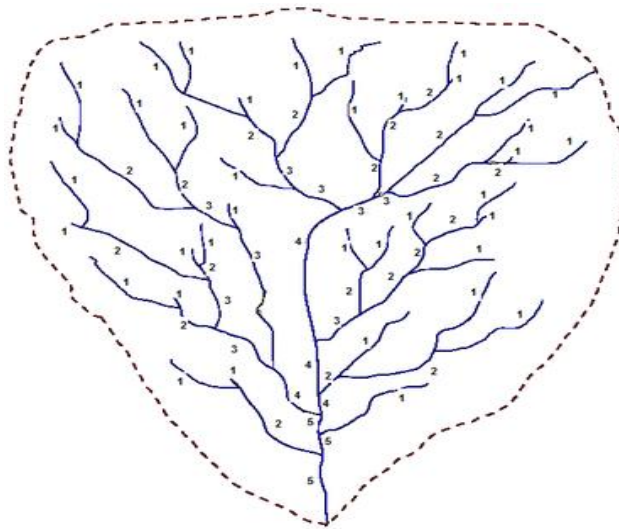


Figura 20: Orden de los ríos, en una cuenca de quinto orden

Red de drenaje: Es el conjunto de cursos de agua que van a conducir las aguas precipitadas sobre una determinada cuenca hidrográfica hacia el punto más bajo de la misma, también llamado punto de control. Los parámetros que definen una red de drenaje son los siguientes:

- **Longitud total de los cursos de agua (L_t):** es la suma de la distancia total recorrida por los diferentes cursos de agua que forman parte de la red hidrográfica de la cuenca. La distancia recorrida por un curso de agua se mide desde su origen hasta su desembocadura en el cuerpo receptor.

- **Orden el río principal de la cuenca y grado de ramificación:** Se determina el grado de ramificación de un curso de agua se considera el número de bifurcaciones que tienen sus tributarios, asignándole un orden a cada uno de ellos en forma creciente; desde el inicio de la divisoria hasta llegar al curso principal, de manera que el orden atribuido a éste, indique en forma directa el grado de ramificación de la red de drenaje. El río de primer orden es un tributario pequeño, sin ramificaciones. Un río de segundo orden es el que sólo posee ramificaciones de primer orden. Un río de tercer orden es el que presenta ramificaciones de primer y segundo orden, y así sucesivamente.

Densidad de drenaje o Longitud promedio de cursos de agua (Dd): La densidad de drenaje se calcula con la expresión:

$$D_d = L_t/A$$

9 METODOLOGÍAS APLICABLES PARA EROSIÓN

La estimación de la erosión puede afrontarse desde diferentes enfoques, pero siempre requiere de información específica de las condiciones medio ambientales presentes en la zona a estudiar. Además debe ir acompañada de estudios de suelos que permitan determinar las propiedades intrínsecas del material ya que junto a información del uso que recibe el terreno, serán los elementos más relevantes en la estimación de la susceptibilidad. A través de sistema de información geográfico y mediante análisis espacial (superposición) se podrá cuantificar y se permitirá establecer un mapa resultante que indica los rangos de erosión que se pueden generar en la zona.

Actualmente se distinguen dos tipos de modelos basados en las necesidades de datos de entrada que requieren para la determinación de la erosión hídrica.

9.1 MODELOS CARGAS POR SUPERFICIE UNITARIA (PREDICCIÓN ESTADÍSTICA)

Estos modelos generan respuestas aproximadas sobre la magnitud probable de la escorrentía química y de sedimentos. Se basa en una metodología estadística en la que se comparan datos sobre la escorrentía de sedimentos, nutrientes y plaguicidas por unidad de superficie (Ton/Hec) E.D. Ongley. (1997). Una manera más simplificada de este modelo, son las relaciones empíricas que se basa en la experimentación y la lógica empírica, que junto a la observación de fenómenos y su análisis estadístico pueden generar una aproximación acorde a la realidad.

Dentro de este tipo de modelo se destacan estudios directos Cargas por superficie unitaria, y la relación empírica USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo) y sus modificaciones MUSLE y RUSLE, que han sido desarrolladas para ser utilizadas en el mejoramiento de la producción agrícola.

9.2 MODELOS DETERMINISTAS Y ESTOCÁSTICOS

Son modelos que parten de simular la física del proceso de erosión. Las necesidades de datos en materia de calibración y verificación son enormes. Si bien estos modelos pueden ofrecer ciertas ventajas, sobre todo por el detalle con que se pueden simular prácticas agrícolas alternativas; no son por lo general los más idóneos para los países en desarrollo, precisamente por la gran necesidad de datos y por el hecho de que las decisiones de ordenación a nivel de las explotaciones casi siempre se pueden basar en datos más generales, pero también en la experiencia y el sentido común. E.D. Ongley. (1997)

Aunque estos modelos son complejos de realizar debido al modelamiento de los sistemas medioambientales presentes en las zonas a estudiar, actualmente estos modelos son creados por computadora teniendo como punto de partida las propiedades del material erosionable. La gran ventaja de estos modelos es la incorporación de sistemas de información que mediante teledetección se puede generar un registro en tiempo real, permitiendo incorporar datos en tiempo real de las condiciones presentes en la zona; en países en los cuales se cuenta con sistemas de teledetección ambiental, se pueden generar modelos en los cuales se pueda predecir la susceptibilidad, ya sea para el mejoramiento de la actividad agrícola como de desarrollo urbano.

Según los requerimientos del estudio a realizar se pueden emplear diferentes modelos. Si se requiere estudiar pequeñas zonas se puede emplear los modelos ANSWERS, CREAMS, HPSF; si por otro lado se requieren estudios que permitan el manejo de un área mayor se pueden emplear modelos como WEPP, SWAT, SWRRB.

Estos modelos manejan diversas variables en tiempo real por medio de estación pluviométrica, además permiten realizar estudios simultáneos de ciclos hidrológicos, balances hídricos, sedimentos y nutrientes presentes en la zona.

9.2.1 MODELO SWRRB (SIMULADOR DE RECURSOS HÍDRICOS EN CUENCAS RURALES)

Según Almorox J. et al (2010), El modelo SWRRB Simulator for Water Resources in Rural Basins, (Williams et al., 1985; Arnol y Williams, 1987; Arnold et al., 1990) fue desarrollado para la simulación hidrológica, sedimentación, transporte de nutrientes y pesticidas en cuencas rurales complejas grandes. Tiene como objeto el

predecir el efecto de las diferentes opciones de manejo sobre la producción de agua y sedimentos en cuencas rurales. Los tres componentes principales del SWRRB son clima, hidrología y sedimentación. Los procesos considerados incluyen escorrentía, Flujos y pérdidas, percolación, evapotranspiración, almacenamiento en zonas de acumulación y remanso, sedimentación y crecimiento de cultivo.

El modelo permite el cálculo simultáneo en varias Sub cuencas, además se añadieron componentes para simular clima, flujo de retorno, almacenamiento en lagunas y represas, crecimiento del cultivo, pérdidas de transmisión y movimiento de sedimentos. En profundidad, el modelo permite la variación de las propiedades del suelo hasta en diez horizontales. En el componente hidrológico, las cuencas complejas se dividen en subcuencas para reflejar diferencias para varios cultivos y suelos. La escorrentía se estima separadamente para cada subcuenca y diariamente mediante el método del número de curva, agregándolas de humedad en el suelo se consideran en el cálculo del número de curva.

Las variables climáticas necesarias para aplicar el modelo son precipitación, temperatura y radiación. Los datos requeridos para definir la cuenca incluyen su área total, la pendiente, y los datos de humedad. También se estima el flujo de retorno, la percolación, la evaporación. También cuantifica las pérdidas de agua en los canales, y el almacenamiento en lagunas y presas. La producción de sedimentos se calcula para cada subcuenca con la MUSLE (USLR modificada).

Para modelizar el crecimiento del cultivo, se calcula diariamente la biomasa sobre el suelo durante el periodo de crecimiento, como una función de la radiación solar y del índice de área foliar. El déficit de agua y la temperatura se utilizan como limitantes del crecimiento. El modelo requiere de muchos datos y en ocasiones su aplicación está limitada a que existen previamente estudios rigurosos de las cuencas en las que se aplica

El cálculo del escurrimiento, según la técnica de las curvas numéricas propuesto por el SCS (1972), está basado en la aplicación de la siguiente ecuación (Aparcio O., et al, (2001)):

$$Q_t = \frac{(P_t - I_a)^2}{P_t - I_a + S_t}$$

Donde:

Qt = Escurrimiento del día t (mm).

Pt = Precipitación total del día t (mm).

la = Abstracción inicial antes del encharcamiento (mm)

St = Retención potencial máxima del día t (mm).

Al estudiar los resultados obtenidos para muchas cuencas experimentales pequeñas, el SCS desarrolló la siguiente relación empírica:

$$I_a = 0.2 S$$

Con base en esto, la ecuación que determina el escurrimiento se transforma en la siguiente (Aparcio O., et al, (2001)):

$$Q_t = \left(P_t - \frac{0.2S_t}{P_t + 0.8S_t} \right)^2$$

Donde:

Qt = Escurrimiento del día t (mm).

Pt = Precipitación del día t (mm).

St = Parámetro de retención del día t (mm).

La ecuación utiliza un solo parámetro (S_t), que es función de la humedad antecedente y del tipo, uso y manejo del suelo en consideración. El valor de S_t varía entre cero y un valor indeterminado, que en principio puede ser muy grande; suele cambiarse por otro parámetro adimensional y estandarizado, CN , que varía entre cero (cuando S_t es muy grande) y 100 (cuando S_t es cero), de acuerdo con la relación (Aparcio O., et al, (2001)):

$$CN = \frac{25400}{S_t + 254}$$

Donde:

CN = Valor del nuevo parámetro. Curva numérica (adimensional, estandarizada).

La selección del valor de CN se efectúa realizando los siguientes pasos. Primero se escoge el tipo de cobertura dominante dentro del área de estudio; enseguida se selecciona el tratamiento aplicado a la asociación suelocultivo. En el tercer paso se evalúa la condición hidrológica de la parcela. La condición hidrológica es un indicador de la cobertura vegetal y su variación depende de la densidad de la cobertura, de tal manera que se dividen en tres grupos (Aparcio O., et al, (2001)):

- Buena = cobertura mayor de 75%.
- Regular = cobertura entre 50% y 75%.
- Mala = cobertura menor de 50%.

La evaluación del grupo hidrológico del suelo de la parcela considerada, constituye el cuarto paso para lo cual el SCS empleó las características texturales e hidrológicas relacionadas con el escurrimiento superficial de más de 3000 suelos. Además del escurrimiento superficial, el modelo SWRRB también simula la producción de sedimentos en las cuencas, a través de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Modificada, conocida por sus siglas en inglés como MUSLE (Williams y Berndt, 1977) y de un modelo de movimiento de sedimentos a lo largo de la red de drenaje de la cuenca.

La ecuación modificada incrementa la precisión del cálculo de la pérdida de suelo y es aplicable a eventos individuales; además elimina la necesidad de calcular la tasa de descarga. La ecuación modificada se expresa de la siguiente forma (Aparcio O., et al, (2001)):

$$Y = 11.8 * (Q * qp)^{0.56} * K * L * S * C$$

Donde:

Y = Pérdida del suelo promedio anual (t ha⁻¹ año)

Q = Volumen de escurrimiento (m³);

qp = Escurrimiento pico (m³ s⁻¹)

K = Erosionabilidad del suelo (t h hr/MJ mm ha)

L = Factor de inclinación del terreno (adimensional)

S = Pendiente del terreno (%)

C = Factor de manejo de cultivos (adimensional)

P = Factor de prácticas mecánicas de control de la erosión (adimensional).

Calibración y validación de modelos

Aunque se han desarrollado métodos de campo para medir parámetros del suelo (como la conductividad hidráulica), virtualmente todos los modelos requieren una calibración para ajustar al menos algunos de sus parámetros (Sorooshian *et al.*, 1998). La calibración de un modelo como el SWRRB, consiste en lograr un ajuste satisfactorio entre los caudales observados y calculados, mediante el cambio en los valores de los parámetros más influyentes, aun de aquellos que se consideraban conocidos. Por su parte, la validación del modelo consiste en medir su capacidad predictiva mediante la comparación de los caudales observados y calculados con los parámetros determinados en la fase de calibración, pero en un periodo diferente del utilizado en la calibración. Generalmente el ajuste entre caudales observados y calculados obtenidos durante la validación, es menos satisfactorio que el obtenido en la calibración, pero es más indicativo de la exactitud de las predicciones que se hagan con el modelo (Palacios, 1986).

Los procesos de calibración y validación se realizaron dividiendo los datos disponibles en dos grupos, utilizando uno de ellos para la calibración y para afinar los valores de mayor influencia en los procesos modelados; y utilizando el segundo subgrupo de datos para la validación, lo que permite medir el verdadero poder predictivo del modelo.

9.2.2 MODELO SWAT (SUELO Y HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN DEL AGUA)

El modelo SWAT soil and water Assessment tool (Arnold y Fohrer 2005), Ha sido desarrollado por USDA (Agricultural Research Service en el Grassland, Soil and Water Research Laboratory en Texas, EEUU. Es un modelo distribuido, de

simulación continua, diseñado para simular el transporte de agua, nutrientes y contaminantes a escala de cuenca y realiza una simulación continua desde un año hasta cien años con un paso de tiempo diario. Está diseñado para predecir los efectos de cambios en la cuenca sobre la producción de escorrentía, erosión, y transporte de sedimentos y contaminantes en grandes cuencas.

El modelo SWAT está conformado por un conjunto de submodelos, los cuales se emplean para simular distintos procesos hidrológicos, representados a través de la intercepción, evapotranspiración, escurrimiento superficial, percolación, flujo subsuperficial y escurrimiento subterráneo, así como encauzamiento en el cauce principal.

El modelo considera los procesos físico relacionados con movimientos de agua, movimiento de sedimento, desarrollo vegetativo del cultivo, ciclo de nutrientes, dosis y fechas de aplicaciones de plaguicidas, entre otros. Incluye efectos de cambio del clima y la vegetación, manejo de embalses, trasvase de cuenca, entre otros. Tiene las posibilidades de analizar impactos a largo plazo considerando las prácticas mecánicas y agronómicas, como son: uso de terrazas, rotación de cultivos, incorporación de residuos de cosecha, fechas de siembra y cosecha, riego, fertilización y las dosis y fechas de aplicación de plaguicidas. Se puede analizar diferentes tamaños de cuenca mediante subdivisiones en áreas homogéneas. SWAT dispone de interfase con SIG.

Balance Hídrico: determina la entrada salida y almacenamiento de agua en la cuenca, este balance se calcula con la siguiente ecuación:

$$SW_t = SW + \sum(Ri - Qi - ETi - Pi - QRi)$$

Donde:

SWt = es el contenido de agua en el suelo en el día t,

Sw = es el agua aprovechable por las plantas o el contenido de agua en el suelo a 0.1-bar menos el contenido de agua a 15-bar, t es el tiempo en días,

R= es la precipitación diaria

Q= la cantidad de escorrentía diaria

Et= la evapotranspiración diaria

P= la precolación diaria

QR= el flujo de retorno o flujo base

Todas las unidades en mm.

Escorrentía superficial: Es el agua superficial que fluye sobre la superficie terrestre y tiene relación directa con el almacenamiento de la humedad del suelo y del flujo subsuperficial o infiltración; flujo de aguas subterráneas, dentro del contexto de balance hídrico. Su cálculo afecta la cantidad de agua total expresada en el balance hídrico.

La cantidad de escorrentía (Q) es estimada por medio de la metodología de la curva número establecida por el servicio de conservación de suelos de los EEUU, con datos de lluvia diarios. Q es el escurrimiento diario, que está determinado por el suelo, la cobertura de suelo y la práctica de manejo que en este se realice.

$$Q = (R - 0.2s)^2 / (R + 0.8s) \quad R \geq 0.2s$$

$$Q = 0.0 \quad R \leq 0.2s$$

Donde:

Q= es el escurrimiento diario.

R= la lluvia diaria, y s es el parámetro de retención, este parámetro está relacionado con la curva. Número (CN) (USDA-SCS, 1972).

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right)$$

La constante 254 en la ecuación arroja s en mm. Así, R y Q también son expresados en mm. SWAT hace correcciones para CN pendiente, debido a que esta descrito para 7% de pendiente.

Infiltración: De acuerdo con Chow V. (1994), la infiltración es un proceso en el que el agua penetra desde la superficie del suelo. Algunos de los factores que intervienen y afectan este fenómeno son la cobertura vegetal, la porosidad y la conductividad hidráulica así como el contenido de humedad en el suelo, de ahí su importancia en el balance hídrico, ya que la infiltración se puede considerar de esta forma como una de las pérdidas en dicho balance(Proaño M., (2006))..

Flujo subsuperficial: Es el agua que se mueve por debajo de la superficie del suelo y sobre el nivel de los acuíferos y alimenta las canales de drenaje, quebradas y ríos. El flujo subsuperficial es calculado simultáneamente con la precolación para el perfil del suelo entre (0 - 2 m) mediante un modelo de almacenamiento cinético, que usa la ecuación de conservación de la masa con el perfil entero del suelo como el volumen de control(Proaño M., (2006)).:

$$(S_2 - S_1) / (t_2 - t_1) = I * L - ((q_{lat1} + q_{lat2}) / 2)$$

Donde:

S= es el volumen drenable de agua almacenada en la zona de saturación en m/m (mayor capacidad de campo),

t= es el tiempo en horas

q_{lat}= es el flujo lateral en m³/h.

L= es la longitud de la pendiente de la cuesta en m

1 y 2 =se refieren al comienzo y final del intervalo.

Percolación: El agua de percolación es la fracción del agua infiltrada que logra atravesar la zona radical, la cual SWAT considera entre 0 y 2m. Esta agua de percolación puede llegar hasta los canales de drenaje (flujo de retorno) o percolarse hasta los acuíferos profundos a más de 25m. El componente percolación del SWAT usa una técnica de almacenamiento combinado para predecir el flujo medio de cada capa de suelo. Una vez el agua es percolada al acuífero profundo, ésta no puede alimentar el escurrimiento (Proaño M., (2006)).

Flujo de retorno: Es el agua que llega hasta el cauce de los canales naturales desde las aguas subterráneas, este flujo es el que mantiene agua en los ríos y quebradas en las épocas de baja precipitación (Proaño M., (2006)).

Evapotranspiración: La evapotranspiración es el agua que sale del suelo hacia la atmósfera por transpiración de las plantas y por evaporación del agua del suelo. El modelo SWAT ofrece tres métodos para estimación de la Evapotranspiración potencial: Penman-Monteith (1965), Hargreaves-Sammani (1985) y Priestley-Taylor (1972).

Variables Climáticas: Las variables climáticas para el SWAT son precipitación, temperatura del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Si la precipitación y la temperatura diaria están disponibles, pueden entonces ser ingresadas directamente al modelo.

Sedimentación: Los sólidos perdidos o sedimentos son el suelo que se pierde por acción de la erosión hídrica, el suelo es desprendido por el golpe directo de las gotas de lluvia y por la fricción del agua de esorrentía. El suelo desprendido es transportado por los flujos superficiales hasta los canales de drenaje, por los cuales es sacado de la cuenca o depositados en el cauce.

La producción de sedimentos es calculada para cada unidad (HRU) de respuesta hidrológica con la ecuación modificada de la pérdida universal de suelo. (MUSLE). (Williams et al 1977).

$$Y = 11.8(V - pq)^{0.56} * K * C * PE * LS$$

Donde:

Y= es la producción de sedimentos desde la subcuenca en t,

V= es el volumen de escurrimiento superficial para la subcuenca en m³,

qp= es la tasa de flujo pico en m³/s

K= es el factor de erodabilidad del suelo

C= es el factor de manejo

PE= es el factor de la práctica de control de erosión,

LS= es el factor de la práctica del control de la erosión

LS=es el factor longitud de inclinación. (Arnold et al 2001).

El modelo SWAT ha sido ampliamente aplicado en diferentes zonas del mundo y con multiplicidad de finalidades, sus prestaciones ofrecen la posibilidad de hacer implementaciones variadas en las que se puede pretender hacer el análisis de todas las variables implicadas en los procesos llevados a cabo por el agua en su recorrido desde que se precipita hasta desembocar en las grandes corrientes, o simplemente ser usado para estimar flujos y transporte de sedimentos.

Una de las acciones importantes a efectuar en la modelación con SWAT es la calibración, después de correr el programa y antes de analizar los datos de salida, que se generan con respecto al balance hídrico y la pérdida de suelos.

Esto si es posible contar con datos de caudal (Q en m^3/s) de salida de la cuenca que se está trabajando o en su defecto de alguno de sus subdrenajes, para poder corroborar los caudal generado por el modelo, de tal forma que sean en teoría lo más ajustados a la realidad.

De igual manera con los sedimentos, aunque este dato es más difícil de encontrar; con una buena calibración de los caudales medios, se puede tener mayor confiabilidad de los demás análisis realizados con los resultados del modelo.

No se puede olvidar que un modelo trata de responder por medio de transformaciones a parámetros cuantificables, lo que sucede en realidad; por lo tanto no es probable llegar a un ajuste de 100 %, pero si se intenta realizar un proceso consecuente con lo que sucede en la vida real de la cuenca hidrográfica.

10 ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELOS REVISADO (RUSLE).

Es una ecuación utilizada para predecir la pérdida total de suelo por erosión pluvial o de escorrentía, como fue descrito por Mannaerts. 1999, la RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) se puede utilizar para:

- Predecir pérdida de suelo promedio a largo plazo de condiciones de campo específicas, usando un sistema específico de manejo.
- Predecir erosión entre surcos y en surcos, en pasturas, cultivos y sitios en construcción.
- Determinar la pérdida de suelo calculado por el modelo, que es la cantidad de sedimento perdido por el perfil y no la cantidad de sedimento que deja la cuenca o el terreno.

- Identificar el perfil del paisaje que es definido por una longitud de la pendiente, la cual es la longitud del origen del flujo superficial hasta el punto donde el flujo alcanza una mayor concentración o una mayor área de deposición como en las pendientes cóncavas y cerca de los límites del terreno.
- Estimar las tasas de erosión que son removidas del suelo, de partes críticas del paisaje y que guían a la elección de las prácticas de control de la erosión hasta un nivel de pérdida de suelo tolerable.

El **RUSLE** se define mediante la siguiente expresión matemática:

$$A = R * K * LS * C * P$$

Dónde:

A: Pérdida de suelo promedio anual por unidad de área [t/ha/año].

R: Factor erosividad de la lluvia [MJ/ha*mm/hr].

K: Factor erodabilidad del suelo [t/ha.MJ*ha/mm*hr].

L: Factor de longitud de la pendiente.

S: Factor de inclinación de la Pendiente.

L*S: Factor Topografico.

C: Factor Cobertura vegetal.

P: Factor de prácticas de conservación del suelo.

10.1 DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA METODOLOGÍA RUSLE

10.1.1 EROSIVIDAD DE LA LLUVIA (FACTOR R)

El factor R en RUSLE refleja la fuerza erosiva de la lluvia sobre la superficie del suelo y se define como el producto de la energía cinética por la intensidad. Los procesos de erosión generados por la lluvia comienza al sobrepasa los valores de

infiltración del suelo saturándolo y debilitando su cohesión generando pérdidas de material y la remoción del mismo por el arrastre generado por el flujo superficial.

La energía cinética de que posee la lluvia puede ser estimada promedio de una intensidad media de precipitación, USDA. 1993 define la siguiente expresión:

$$e_m = 0.29 * (1 - 0.72 * e^{(-0.05(t_m))})$$

La energía liberada con las gotas de lluvia al impacto con la superficie del suelo, rompen los agregados y remueven las partículas de suelo, produciendo una ligera compactación. La capa compactada disminuye la capacidad de infiltración, originando el escurrimiento superficial. Wischmeier y Smith (1965) señalan que el mejor estimador de la erosividad de la lluvia es el EI30, el cual se obtiene con la siguiente ecuación (Loredo, C. et al., 2007):

$$EI30 = (E) * (I30)$$

Donde:

EI_{30} = Índice de erosividad en un evento (MJmm/ha hr).

E = Energía cinética de la lluvia (MJ/ha).

I_{30} = Intensidad máxima en 30 minutos continuos de lluvia (mm/hr).

Con la suma de todos los EI_{30} de cada uno de los eventos del año, se obtiene el índice de erosividad anual (R). Entonces USDA. 1993:

$$R = \sum (EI_{30})\sqrt{N}$$

La determinación de la intensidad de precipitación, se realiza con base a la distribución de Gumbel, para cada una de las estaciones meteorológicas (ver Tabla 14).

Clase	R (MJ/ha*mm/hr)
Muy baja	<500
Baja	500-1000
Mediana	1000-3000
Alta	3000-6000
Muy alta	>6000

Tabla 14. Clasificación de rangos típicos de R anual Mannaerts (1999).

CALCULO DEL FACTOR R

La determinación del factor "R", depende de la intensidad máxima de lluvia en 30 minutos consecutivos, para la determinación de la intensidad máxima en 30 minutos por evento de lluvia, para ello es necesario partir de la curva de un pluviograma en la cual se presente la mayor pendiente, en un intervalo de tiempo equivalente a treinta minutos consecutivos. El resultado obtenido se multiplica por dos para expresar los datos en milímetros por hora si el pluviograma se expresa en intervalos de 30 min.

No es necesario analizar todas las gráficas de precipitación, se desprecian todas aquellas lluvias menores o iguales a 13 milímetros, siempre y cuando estén separados por intervalos de tiempo mayores de 6 horas, al menos que caigan 6 milímetros de lluvia en un tiempo de 15 minutos.

Se debe hacer el cálculo de unitarias por segmento de lluvia, posteriormente se suman para obtener la energía global por evento de lluvia, que multiplicada por la intensidad en 30 minutos en mm/hora da los valores de EI_{30} , en donde la I es la intensidad expresada en milímetros por hora de cada uno de los segmentos. Si la

intensidad excede los 76 milímetros por hora, se toma la energía cinética directamente como 0.283. El registro para los valores EI de las estación pluviométricas debe ser por un periodo de tiempo de 15 a 20 años.

10.1.1.1 IMPLEMENTACIÓN EN SIG (ARCGIS).

Para establecer un ejemplo metodológico de la aplicación de RUSLE se tomaron datos suministrados por internet (<http://videogis.blogspot.com/>), estos datos se encuentran en adjuntos en una carpeta la cual se denomina con el nombre de Erosión_ de_Suelo, en el cual contiene: EDAFOLOGIA, LandUse (uso de tierra), Stations (Estaciones), Reclassify y ASTER (DEM),

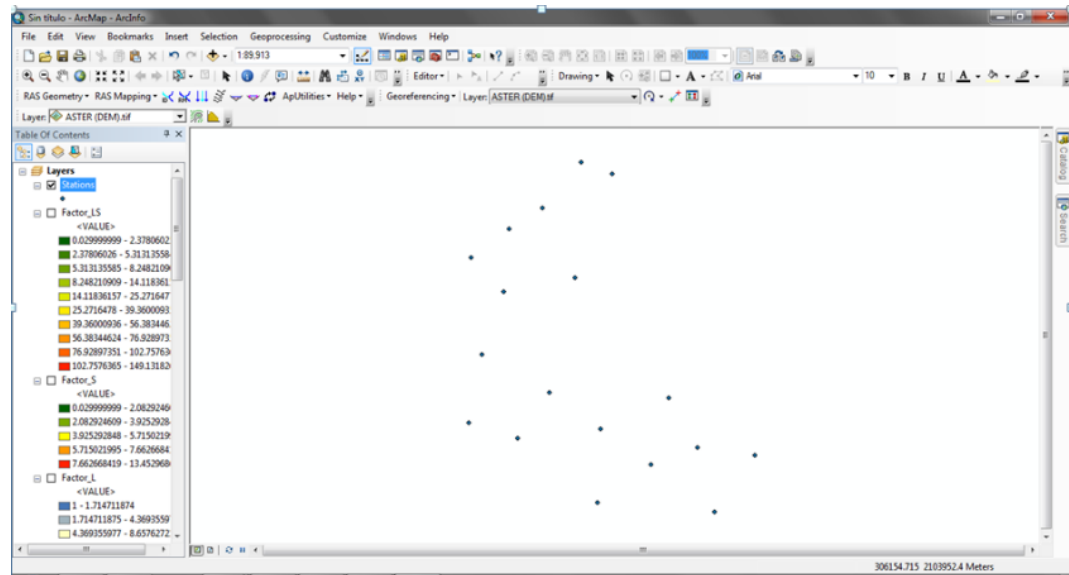
En la creación del Mapa factor R se hará mediante una interpolación de los valores de precipitación obtenidos a partir de las estaciones existentes en y alrededor del área de estudio, para obtener el valor de R se debe seguir el mismo procedimiento

1. Para comenzar se debe cerciorar que la extensión Spatial Analyst está activa y que el menú correspondiente también está visible en la barra de menús del programa.
2. Se inserta los datos de Stations (estaciones), para ello seguimos los siguientes pasos en caso de que no posea el archivo en formato shapefile se podrá generar mediante el procedimiento expuesto en la creación de la Mapa de Huedad de método MVM.

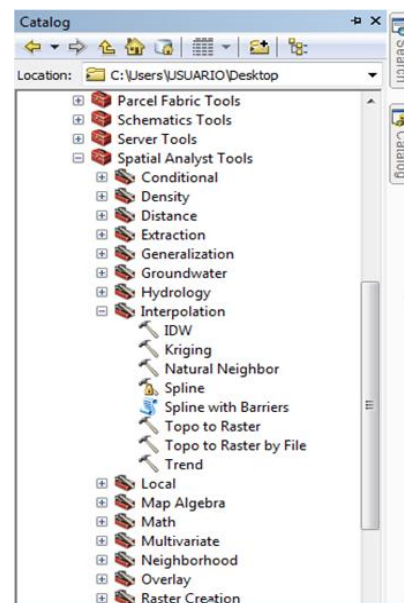
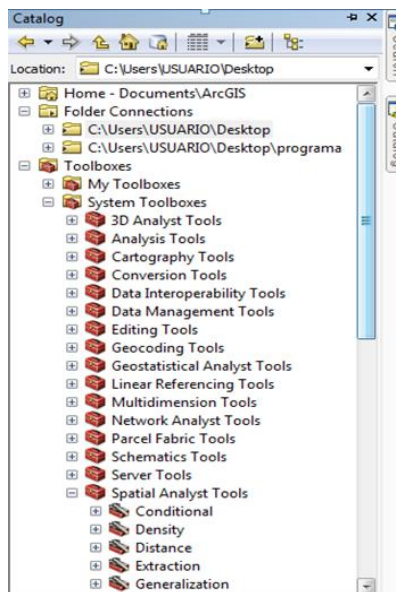


Add Data, luego se despliega un cuadro de dialogo en la cual seleccionamos los datos que necesitamos en este caso (Station.shp), se debe tener especial cuidado con la unidades métricas en las cuales se encuentran los datos ingresados.

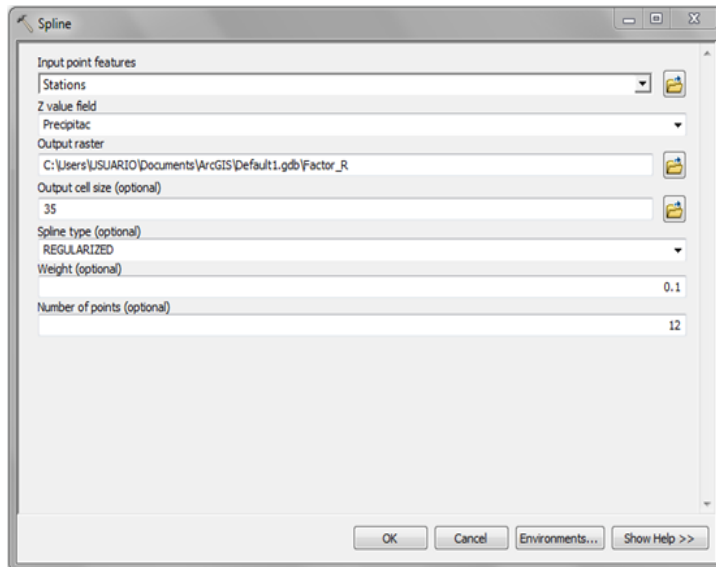
- La importación de esta información nos genera la ubicación de las estaciones mediante una serie de puntos la cual nos servirá como indicativo de posición.



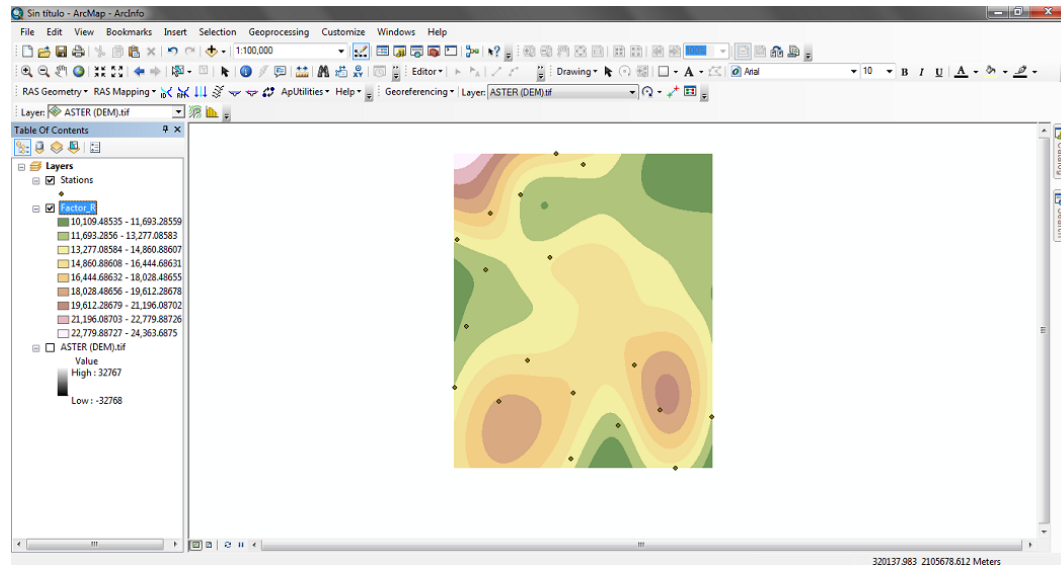
3. Luego de insertar la capa Stations, nos dirigimos a **Catalog-Toolboxes-System Toolboxes -Spatial Analyst Tools- Interpolation -Spline.**



- Aparece el siguiente cuadro de diálogo la cual llenaremos de la siguiente forma:



- Aunque en este caso la clasificación de los valores generados no es de relevación para el método se puede establecer la escala precipitación de RUSLE mediante la herramienta Reclassify.
- Damos OK, generando nuestro Mapa del Factor R con la ubicación de las estaciones (Stations), que representa la distribución de las precipitaciones a lo largo de nuestra área de estudio



10.1.2 ERODABILIDAD DEL SUELO (FACTOR K)

El factor K representa la susceptibilidad natural de un suelos al ser erosionado por sus propiedades intrincadas, como lo son granulometría; material del cual se compone.

En términos prácticos, el factor de erosionabilidad (K) del suelo es la representación de la respuesta del suelo a las fuerzas erosivas de las lluvias; es decir, el factor de erosionabilidad del suelo, es un parámetro que representa un valor de la reacción total del suelo antes de ser desprendido por un proceso de erosión o procesos hidrológicos. Estos procesos consisten en la separación del suelo y el transporte de residuos generados por el impacto de las gotas de lluvia y el flujo superficial. La deposición se da según la topografía y rugosidad, ya sea inducida por procesos antrópicos y la infiltración de agua de lluvia en el suelo USDA. 1993.

Las propiedades físicas del suelo como mineralogía y sus interacciones con químicos en la superficie del suelo o infiltrados por el agua pueden afectar los valores de K, estas variaciones pueden generar inconsistencias en el valor real.

Por otra parte, varios mecanismos de erosión interactúan al mismo tiempo y cada uno de ellos reacciona de manera diferente con la propiedad del suelo; Por lo tanto, es poco probable que un número basado en las características del suelo describa con precisión los valores de K para diferentes entornos. Sin embargo, varios intentos se han hecho para relacionar valores de K medidos a las propiedades del suelo.

De estos estudios, el más utilizado y citado con frecuencia es el nomograma suelo credibilidad (Wischmeier et al. 1971). El nomograma, que se muestra en la Figura 5 – Anexos 2, se compone de cinco suelo y un suelo de parámetros: porcentaje de limo (0,002 hasta 0,1 mm), porcentaje de arena (0.1-2 mm), porcentaje de materia orgánica (OM), tipo de estructura (s) y permeabilidad (p). Las clases y sus grupos de estructura y permeabilidad se tomaron de la Soil Survey Manual (USDA 1951). Una aproximación algebraica útil es la propuesta por (Wischmeier y Smith 1978) mediante el nomograma para aquellos casos en los que la fracción limo no supere el 70% es USDA. 1993.

$$K = \left(\frac{2.1 * 10^{-4} * (12 - 0M) * M^{1.14} + 3.25(S - 2) + 2.5(P - 3)}{100} \right)$$

Donde M es producto de la multiplicación fracción de las partículas primarias: (% de limo o la fracción de tamaño de 0,002 a 0,1 mm) • (% limo +% de arena). K se expresa como toneladas * acres ⁻¹ por unidad de índice de erosión con las unidades

de EE.UU. de tonelada * acres h (pies acre-tonf • in). División de la parte derecha de esta y las ecuaciones del factor K posteriores con el factor 7.59 se obtendrá valores K. expresados en unidades SI [$t\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$] USDA. 1993.

El nomograma es muy adecuado para los suelos superficiales de textura media, menos agregados.

CALCULO DEL FACTOR K

En la elaboración del mapa del factor K (erodabilidad del suelo) tomando en cuenta los siguientes factores:

- Textura del suelo (fracciones).
- Permeabilidad.
- Estructura.

El Factor K puede ser calculado por el nomograma Wischmeier y Smith teniendo los porcentajes requeridos fruto de estudios de laboratorios, en caso que el material limoso supere el 70% se debe utilizar la fórmula de K.

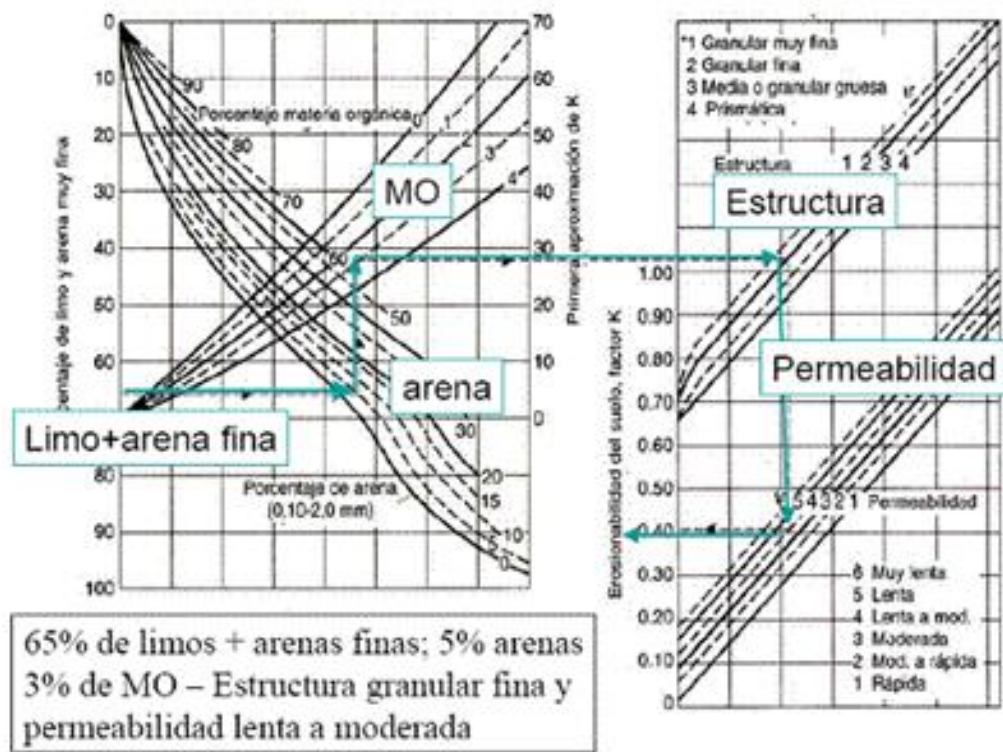
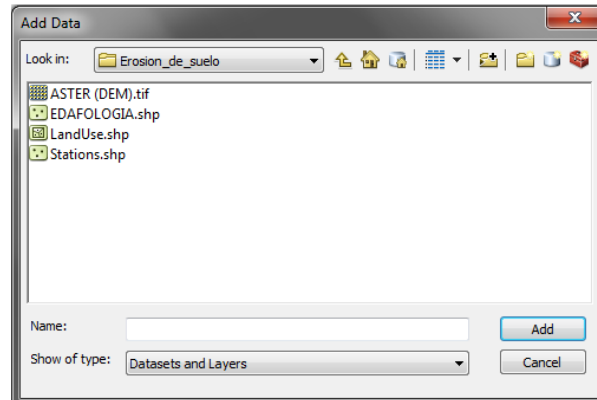


Figura 21: Nomograma de Erodabilidad del suelo (Wischmeier et al. 1971).

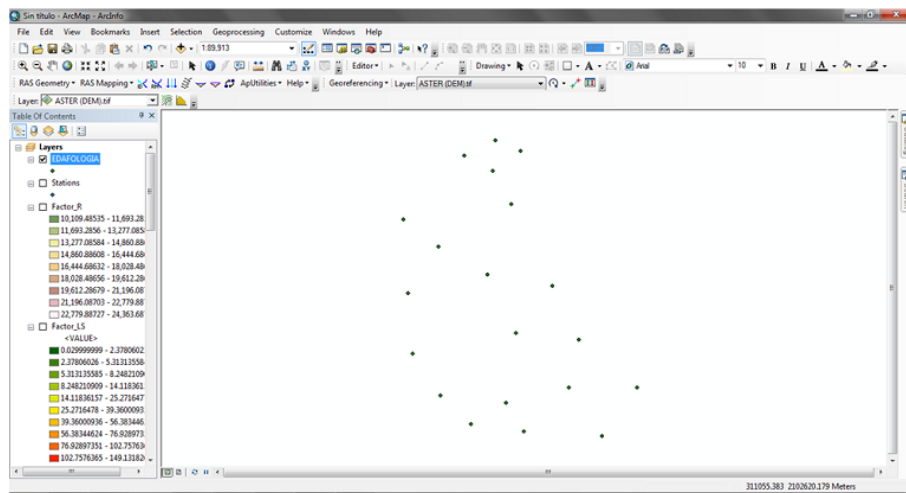
10.1.2.1 IMPLEMENTACIÓN EN SIG (ARCGIS).

A PARTIR DE ESTUDIOS DE SUELOS

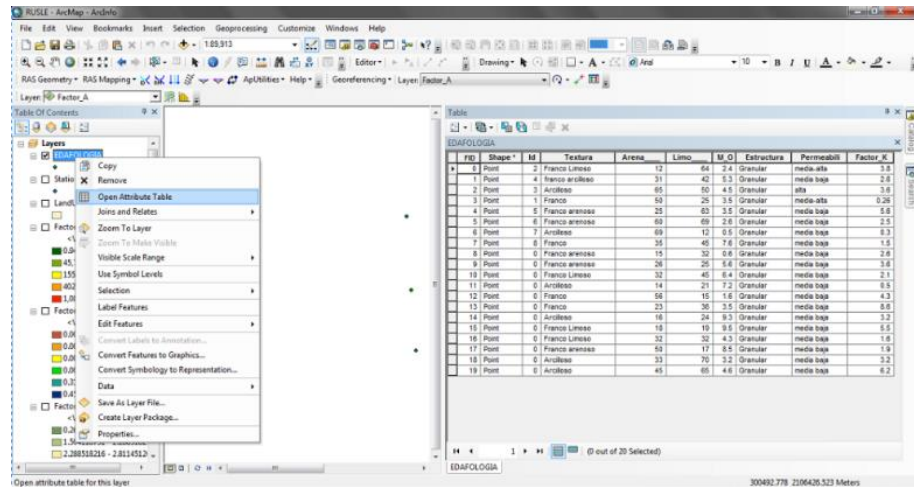
- Siguiendo el ejemplo seleccionamos la herramienta **Add Data** mencionada anteriormente, después nos aparecerá un cuadro de diálogo en el cual seleccionamos **EDAFOLOGIA** y damos en Add.



- Aparecerá la localización diferentes puntos donde evalúan la erodabilidad del suelo mediante el registro de cualidades en base a imágenes satelitales.

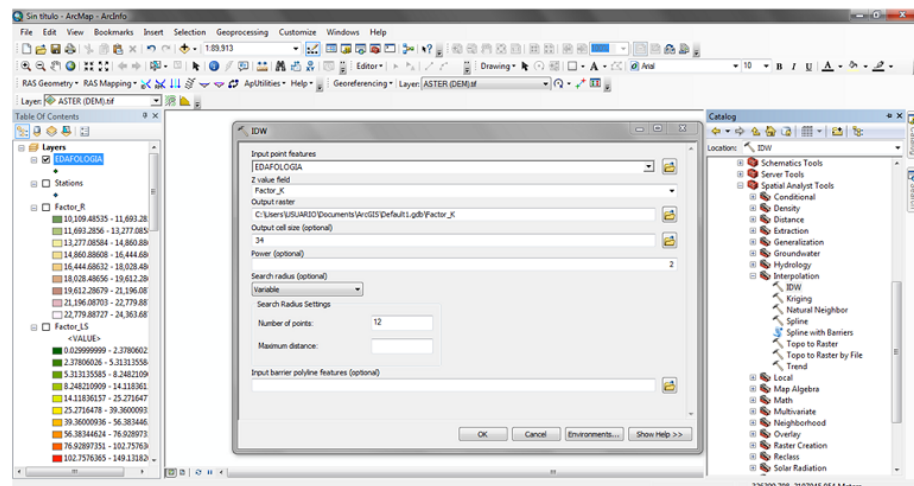


- Para observar nuestra tabla de datos de **EDAFOLOGIA** nos dirigimos a Table of contents (Tabla de contenido), damos clic derecho en **EDAFOLOGIA**, seleccionamos Open Attribute Table, nos genera nuestra tabla de datos en el cual se observa nuestro Factor K el cual se puede modificar de pendiente la textura del suelo, Permeabilidad y estructura.



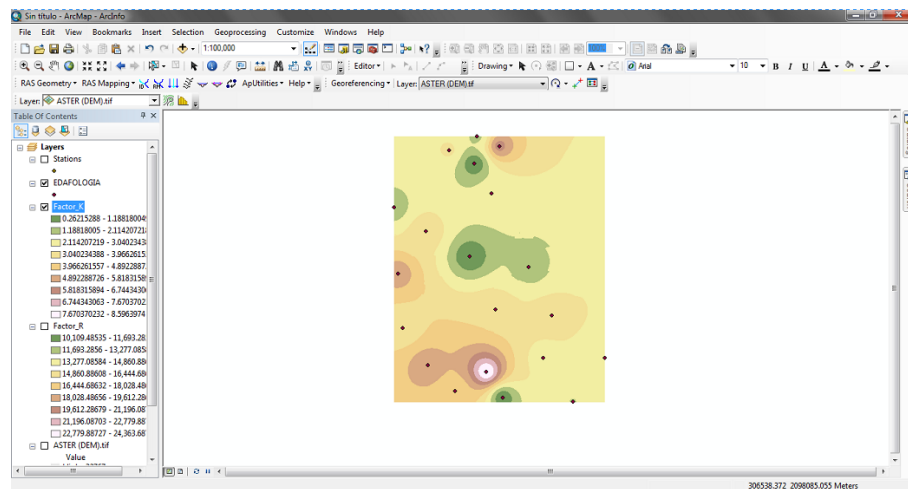
1. Ya con esta esta información nos disponemos a crear nuestro Mapa del Factor K (erodabilidad del suelo).

- No dirigimos a **Catalog - Toolboxes- System Toolboxes - Spatial Analyst Tools - Interpolation - IDM**, damos doble clic y nos aparecerá un cuadro de diálogo la cual llenaremos de igual forma que la que veremos a continuación:



- Al terminar de introducir los datos damos OK.

- Se genera el Mapa del Factor K (erodabilidad del suelo) en base a los puntos de EDAFOLOGÍA, una manera alterna de realizar este procedimiento en base a imágenes satelitales y no mediante un registro de campo, parte de la creación de un registro de cualidades mediante Herramienta Multivariable - Create Signature como se expuso en la creación de un mapa litológico de método Mora Vahrson.



10.1.3 FACTOR TOPOGRÁFICO (FACTOR LS)

El efecto de la topografía sobre la erosión en RUSLE se explica por el factor LS. La erosión aumenta a medida que aumenta la longitud de la pendiente, y es considerado por el factor de longitud de la pendiente (L). Longitud de la pendiente se define como la distancia horizontal desde el origen del flujo superficial hasta el punto, donde (1) el gradiente de pendiente disminuye lo suficiente para comenzar que la deposición o (2) la escorrentía se concentra en un canal definido (Wischmeier y Smith 1978).

Mediante la expresión de Wischmeier y Smith 1978 L se puede definir como:

$$L = (\lambda/72.6)^m$$

Dónde:

L = Factor de longitud de pendiente.

λ = Longitud de la pendiente.

m: Coeficiente que depende del grado de la pendiente (varía de 0.2 a 0.5 Tabla 11 Anexo 1).

72.6 = Longitud de parcela unitaria RUSLE.

El coeficiente m de pendiente/longitud parte de β que establece la razón entre la erosión en surcos (causada por el flujo) a erosión entresurcos (causado principalmente por el impacto de la lluvia) por la siguiente ecuación (Foster et al 1977.):

$$m = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

Los valores de β que relacionan la erosión en surcos y erosión entresurcos, en condiciones cuando el suelo es moderadamente susceptible a la erosión entre surcos y entresurcos al mismo tiempo se calcularon a partir de (McCool et al. 1989)

$$\beta = (\text{sen}(\theta)/0.0896) / (3.0 (\text{sen}(\theta))^{0.8} + 0.56)$$

Donde:

θ = Ángulo de la pendiente [°].

El valor calculado de β se usará para hallar m , los valores típicos para m calculados a partir de las fórmulas anteriores se muestran en la mitad de la columna de la Tabla 15 Anexo 1, donde el suelo es susceptible a sufrir los dos tipos de erosión se deben tomar los valores del medio de la tabla, cuando la escorrentía, suelo, cobertura y las condiciones de manejo indican que el suelo altamente susceptible a la erosión en surcos los valores de m será los consignados a la derecha de la Tabla 15 Anexo, en caso de que el suelo sea propenso a la erosión entresurco se debe tomar los valores de la izquierda.

El factor de inclinación de la pendiente (S) refleja la influencia de la inclinación de la pendiente en la erosión. La pendiente se calcula en el campo mediante el uso de un inclinómetro, nivel Abncy, o un dispositivo similar. Pendiente puede estimarse a partir de los mapas de curvas de nivel que tienen intervalos de 2 pies (0.61 m) de contorno si se realiza adecuadamente USDA. 1993.

El factor de inclinaciones la pendiente (S) se evalúa a partir de (McCool et al. 1987):

$$S = 10.8 * \text{sen}(\theta) + 0,03 \quad s \leq 9 \%$$

$$S = 16,8 * \text{sen}(\theta) - 0,50 \quad s \geq 9 \%$$

Donde:

S = Factor de inclinación de pendiente.

s = Inclinación de pendiente [%].

θ = Angulo de pendiente [°].

Tabla 14: Variación de m. (McCool et al. 1989).

Pendiente (%)	Valor de m basado en la relación		
	Erosión surcos/entresurcos		
	Baja	Media	Alta
0.2	0.02	0.04	0.07
0.5	0.04	0.08	0.16
1	0.08	0.15	0.26
2	0.14	0.24	0.39
3	0.18	0.31	0.47
4	0.22	0.36	0.53
5	0.25	0.4	0.57
6	0.28	0.43	0.6
8	0.32	0.48	0.65
10	0.35	0.52	0.68
12	0.37	0.55	0.71
14	0.4	0.57	0.72
16	0.41	0.59	0.74
20	0.44	0.61	0.76
25	0.47	0.64	0.78
30	0.49	0.66	0.79
40	0.52	0.68	0.81
50	0.54	0.7	0.82
60	0.55	0.71	0.83

El coeficiente m de pendiente/longitud parte de β que establece la razón entre la erosión en surcos (causada por el flujo) a erosión entresurcos (causado principalmente por el impacto de la lluvia) por la siguiente ecuación (Foster et al 1977.):

$$m = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

Los valores de β que relacionan la erosión en surcos y erosión entresurcos, en condiciones cuando el suelo es moderadamente susceptible a la erosión entre surcos y entresurcos al mismo tiempo se calcularon a partir de (McCool et al. 1989)

$$\beta = (\text{sen}(\theta)/0.0896) / (3.0 (\text{sen}(\theta))^{0.8} + 0.56)$$

Donde:

θ = Ángulo de la pendiente [°].

El valor calculado de β se usará para hallar m , los valores típicos para m calculados a partir de las fórmulas anteriores se muestran en la mitad de la columna de la Tabla 11 Anexo 1, donde el suelo es susceptible a sufrir los dos tipos de erosión se deben tomar los valores del medio de la tabla, cuando la escorrentía, suelo, cobertura y las condiciones de manejo indican que el suelo altamente susceptible a la erosión en surcos los valores de m será los consignados a la derecha de la Tabla 11 Anexo, en caso de que el suelo sea propenso a la erosión entresurco se debe tomar los valores de la izquierda.

El factor de inclinación de la pendiente (S) refleja la influencia de la inclinación de la pendiente en la erosión. La pendiente se calcula en el campo mediante el uso de un inclinómetro, nivel Abncy, o un dispositivo similar. Pendiente puede estimarse a partir de los mapas de curvas de nivel que tienen intervalos de 2 pies (0.61 m) de contorno si se realiza adecuadamente USDA. 1993.

En un nuevo esfuerzo para revisar la relación del factor S en el USLE, McCool et al. (1987) derivan dos relaciones de pendientes moderadas ($s < 9\%$) y las pendientes más pronunciadas ($s \geq 9\%$)

El factor de inclinaciones la pendiente (S) se evalúa a partir de (McCool et al. 1987):

$$S = 10.8 * \text{sen}(\theta) + 0,03 \quad s \leq 9 \%$$

$$S = 16,8 * \text{sen}(\theta) - 0,50 \quad s \geq 9 \%$$

Donde:

S = Factor de inclinación de pendiente.

s = Inclinación de pendiente [%].

θ = Angulo de pendiente [°].

MODELIZACIÓN ESPACIAL CON RUSLE EN 3D

En la actualidad, los modelos de los procesos hidrológicos distribuidos espacialmente, se han desarrollado para incorporar los patrones espaciales de terrenos, suelos y vegetación con el uso de sensores remotos y SIG. En la actualidad, los modelos de los procesos hidrológicos distribuidos espacialmente, se han desarrollado para incorporar los patrones de espacio de terreno, los suelos, y la vegetación con el uso de sensores remotos y SIG.

USLE revisada - RUSLE utiliza los mismos principios empíricos como USLE, sin embargo, incluye numerosas mejoras, como los factores mensuales, la incorporación de la influencia del perfil convexidad / concavidad mediante la segmentación de las pendientes irregulares, y la mejora de las ecuaciones empíricas para el cálculo del factor LS (Renard et al., 1997).

Para incorporar el impacto de la convergencia de flujo, el factor de longitud de la pendiente, λ , fue sustituido por área de contribución pendiente ascendente, **A** (Moore y Burch, 1986). La ecuación modificada para el cálculo del factor L y S en

forma de diferencias finitas en una celda de la cuadrícula representa un segmento de laderas se derivó por Desmet y Govers (1996). El factor L con el área de drenaje aportadora

$$L = \frac{(A_{(i,j)} + D^2)^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}}{x^m * D^{m+2} * (22.13)^m}$$

Donde:

A (i,j): Es el área aportadora unitaria a la entrada de un pixel (celda) [m].

D: Tamaño del pixel y x es el factor de corrección de forma.

El factor S: El ángulo θ se toma como el ángulo medio a todos los subgrids en la dirección de mayor pendiente (McCool et al, 1987,1989).

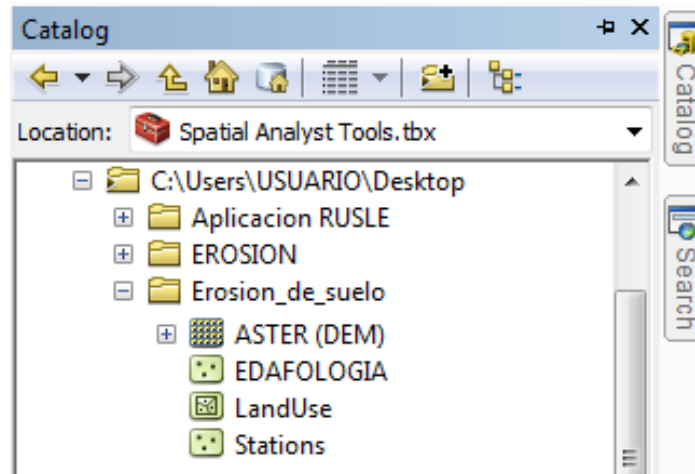
$$S = 10.8 * \text{sen}(\theta_{(i,j)}) + 0,03 \quad \tan(\theta_{(i,j)}) \leq 9 \%$$

$$S = 16,8 * \text{sen}(\theta_{(i,j)}) - 0,50 \quad \tan(\theta_{(i,j)}) \geq 9 \%$$

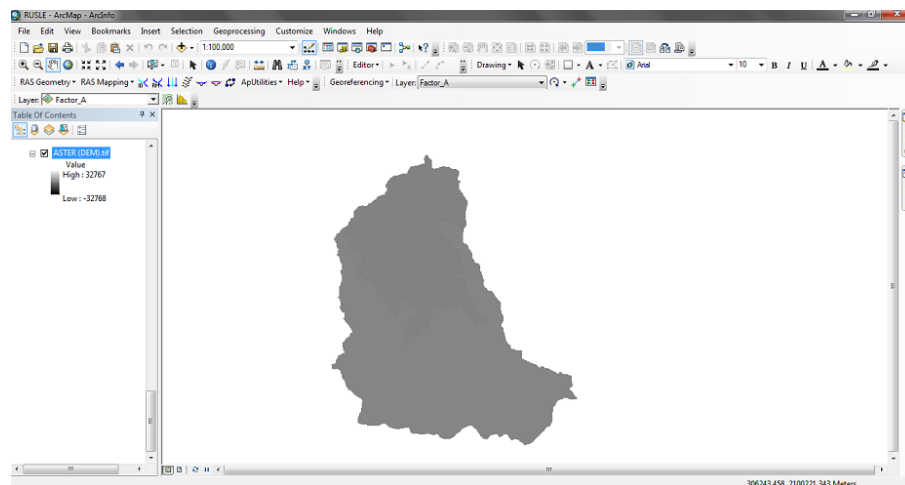
10.1.3.1 IMPLEMENTACIÓN EN SIG (ARCGIS).

Para la elaboración del factor LS solo basta tener digitalizada la topografía del terreno de interés, ya que todos los elementos para calcularlo pueden ser obtenidos por ArcGis, para elaboración de nuestro mapa de del Factor usaremos los valores suministrado por el ejercicio, por ello seguiremos los siguientes pasos:

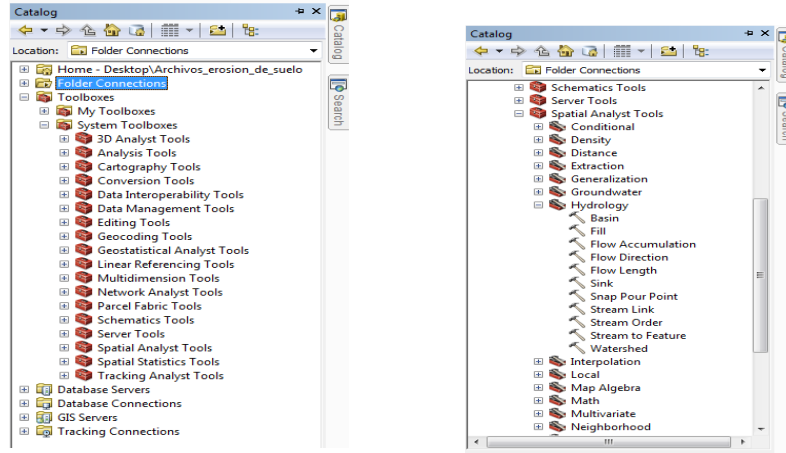
- Se cargar la carpeta en la cual va a estar toda la información necesaria para la elaboración de nuestro Mapa, los pasos a seguir son **Catalog - Folder Connections - C:\Users\USUARIO\Desktop - Erosion_de_suelo.**



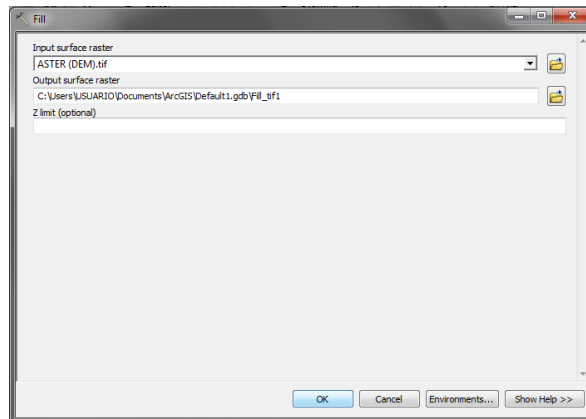
- Seleccionamos ASTER (DEM) y lo arrastramos hasta nuestra Table Of Contents y nos generara un Mapa.



- Nos dirigimos a Catalog - Toolboxes-System Toolboxes - Spatial Analyst Tools - Hydrology – FILL, la herramienta Fill establece la diferencia máxima entre la profundidad de un sumidero y el punto de interés.



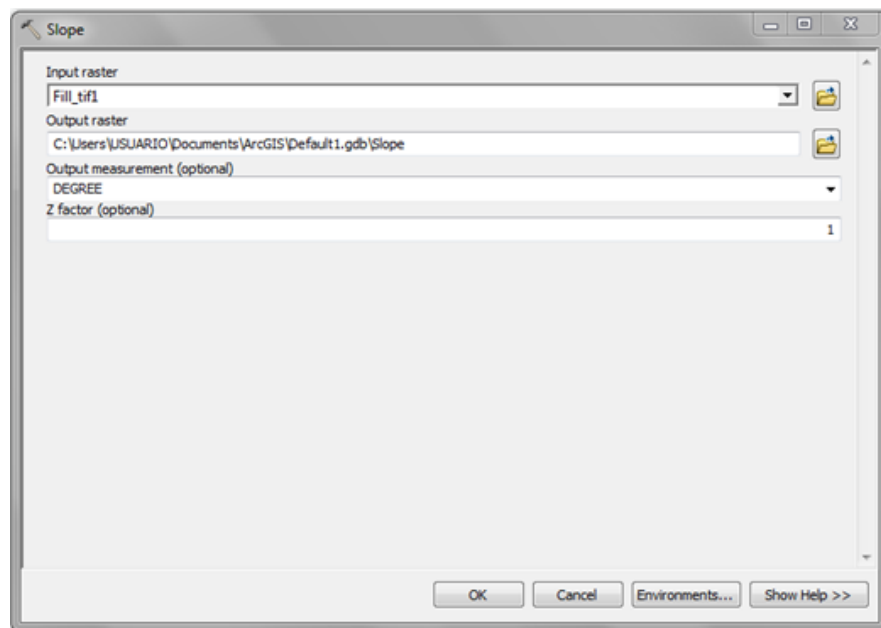
- Al dar clic sobre Fill nos aparecerá un cuadro de diálogo la cual se debe llenar con los datos que aparecen en ella.



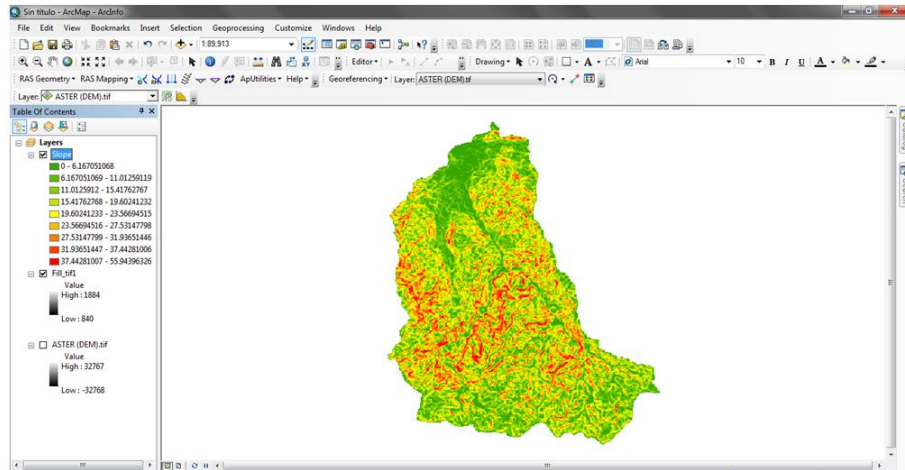
- Damos clic en OK, generando el siguiente Mapa.



- Volvemos a **Catalog - Toolboxes - System Toolboxes - Spatial Analyst Tools - Surface - Slope**, luego llenamos el cuadro de diálogo que aparece con los datos mostrados a continuación:



- Damos Ok y nos generará el Mapa de Slope (Pendiente).

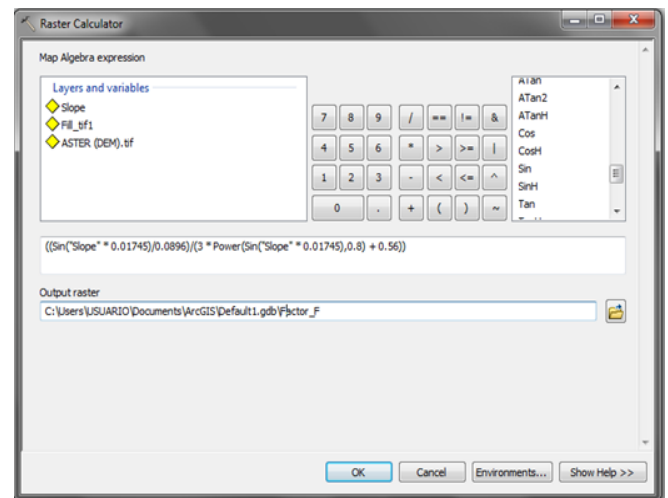
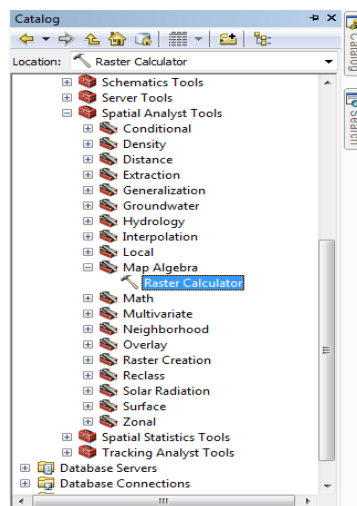


A continuación calcularemos nuestro β factor, pero por facilidad lo denominaremos F.

- Nos dirigimos a **Catalog - Toolboxes - System Toolboxes - Spatial Analyst Tools - Map Algebra - Raster Calculator**, en el cuadro de dialogo que aparece se introduce su respectiva fórmula.

Factor F: $((\text{Sin}(\text{"Slope"} * 0.01745) / 0.0896) / (3 * \text{Power}(\text{Sin}(\text{"Slope"} * 0.01745), 0.8) + 0.56))$.

Slope generado se debe multiplicar por 0.01745 para trabajar en radianes.

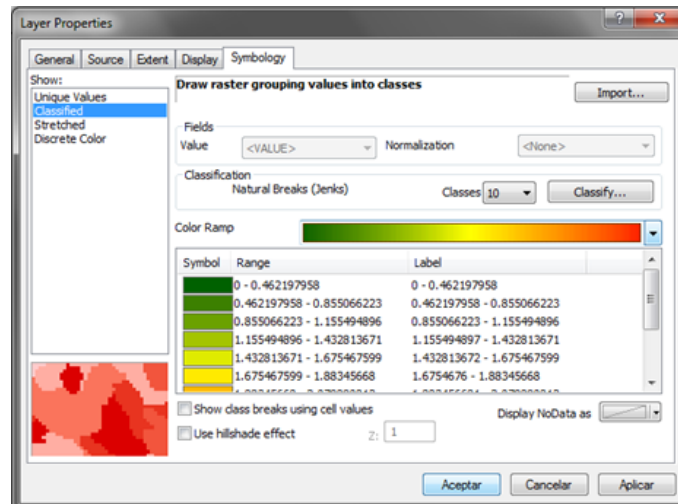


- Luego de introducir la fórmula de nuestro Facto F damos Ok y nos generará su respectivo Mapa.

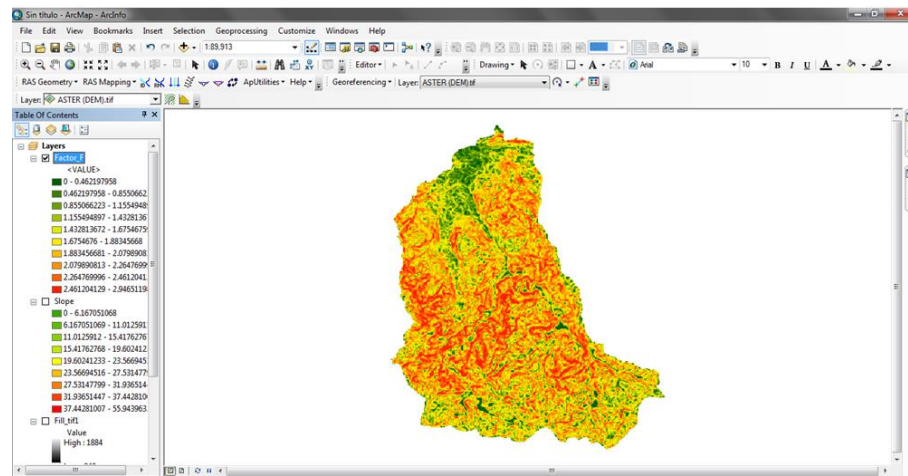


Luego de generarlo se hace las respectivas modificaciones:

- Damos doble Clic en Nuestro Factor F, nos aparecerá un cuadro de diálogo.
- Hacemos clic en la parte superior **Symbology**, en Show: seleccionamos **Classified**.
- En la parte de Classification escogemos Classes: 10
- En la parte de Color Ramp seleccionamos la gama de colores acorde a nuestro Mapa, una vez seleccionada damos en Aceptar.



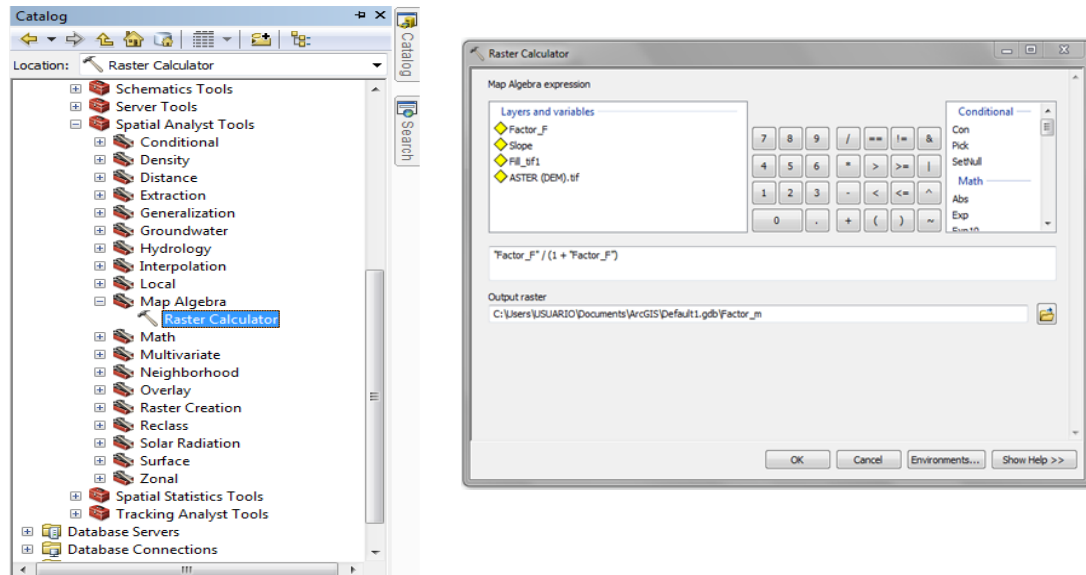
- A continuación nos genera nuestro Mapa del Factor F ya modificado.



Cálculos y generación del Mapa del Factor m (Exponente de la longitud de la pendiente).

- Nos dirigimos a **Catalog - Toolboxes - System Toolboxes - Spatial Analyst Tools - Map Algebra - Raster Calculator**, en el cuadro de diálogo que aparece se introduce su respectiva fórmula.

“Factor_F”/(1+“Fator_F”).

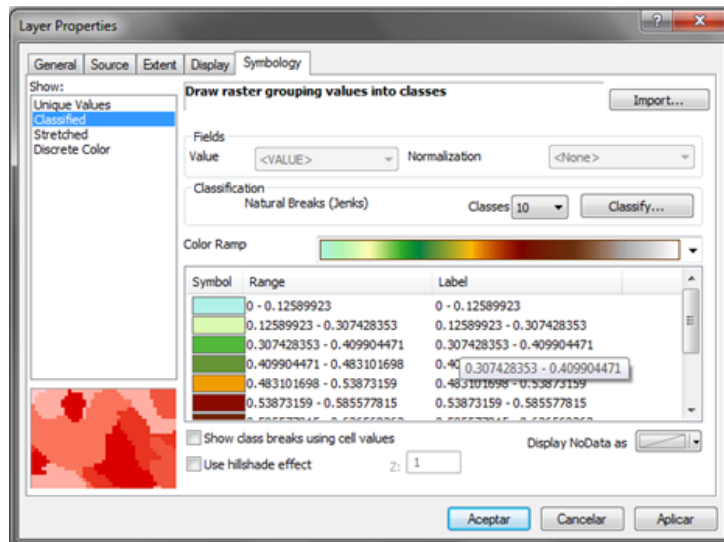


- Luego de introducir la fórmula de nuestro Factor m damos Ok y nos genera su respectivo Mapa.

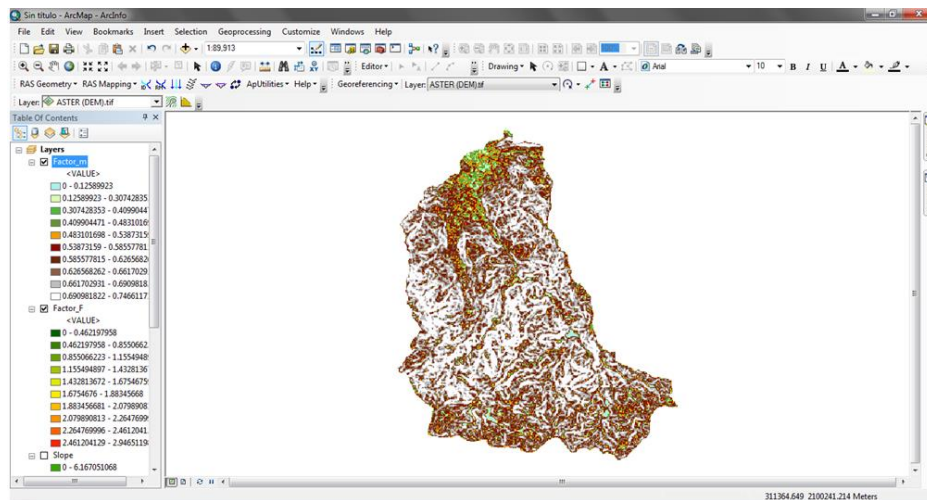


Luego de generarlo se hace su modificación.

- Damos doble clic en Nuestro Factor m, nos aparecerá un cuadro de diálogo.
- Hacemos clic en la parte superior **Symbology**, en Show: seleccionamos **Classified**.
- En la parte de Classification escogemos Classes: 10
- En la parte de Color Ramp seleccionamos la gama de colores acorde a nuestro Mapa, damos en Aceptar.

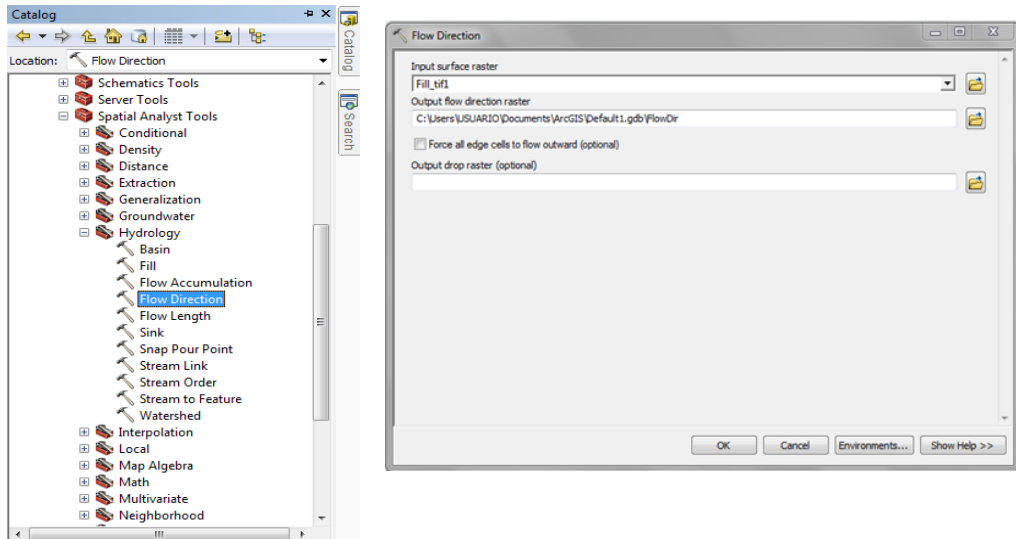


- Nos genera nuestro Mapa del Factor m ya modificado.



Creación del Mapa Flow Direction (Dirección de Flujo).

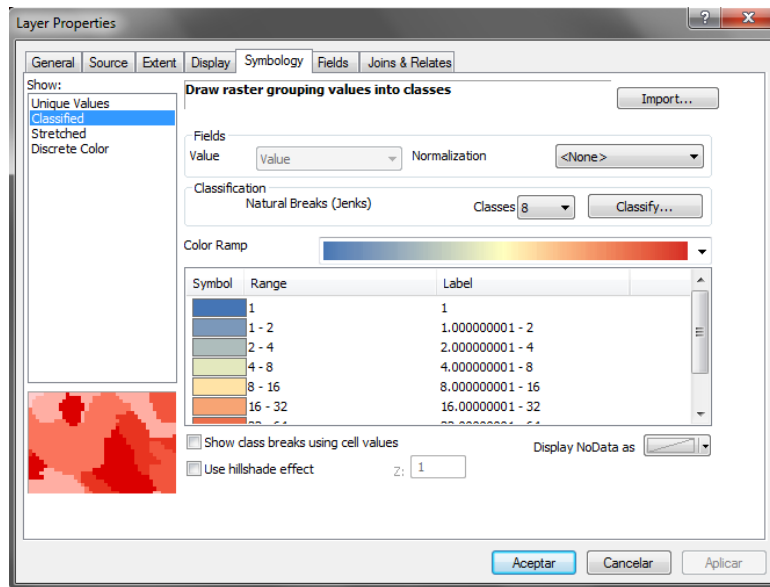
- Nos dirigimos a **Catalog - Toolboxes - System Toolboxes - Spatial Analyst Tools - Hydrology - Flow Direction**, en el cuadro de diálogo que aparece se introduce sus respectivos datos vistos a continuación:



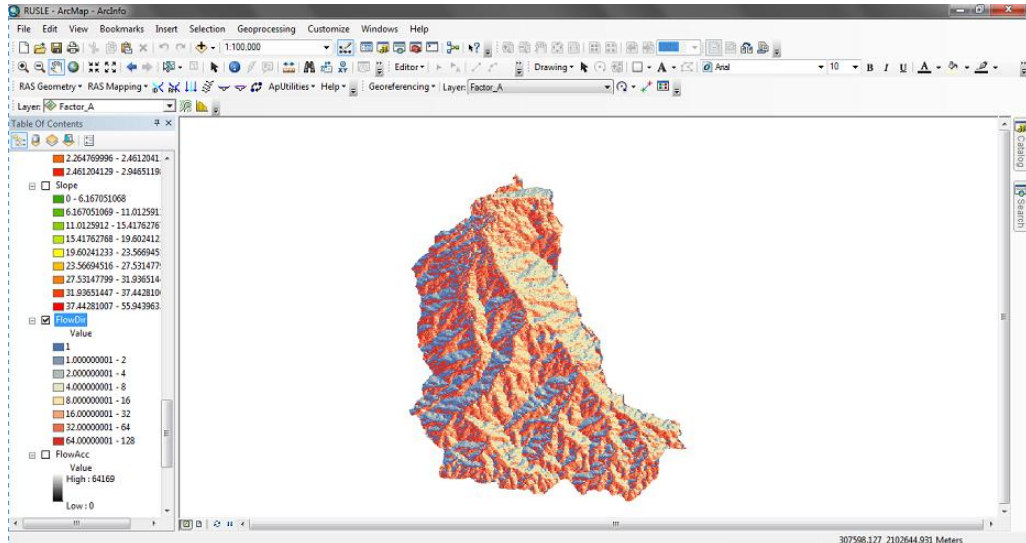
- Luego de introducir los datos en nuestro cuadro de diálogo Flow Direction la guardamos con el nombre de FlowDir damos Ok.

Nos generará un mapa al cual se le hacen las respectivas modificaciones.

- Damos doble Clic en FlowDir, nos aparecerá un cuadro de diálogo.
- hacemos clic en la parte superior **Symbology**, en de Show: seleccionamos **Classified**.
- En la parte de Classification escogemos Classes: 8
- En la parte de Color Ramp seleccionamos la gama de colores acorde a nuestro Mapa, damos en Aceptar.



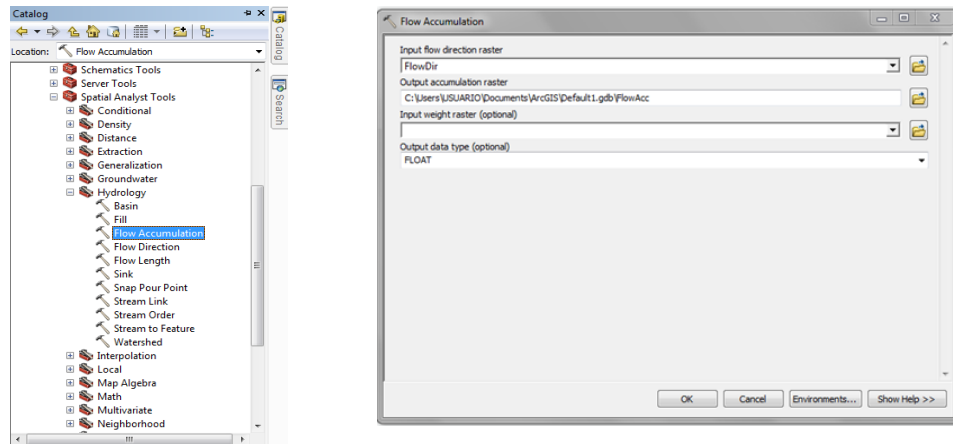
Nos genera nuestro Mapa FlowDir ya modificado.



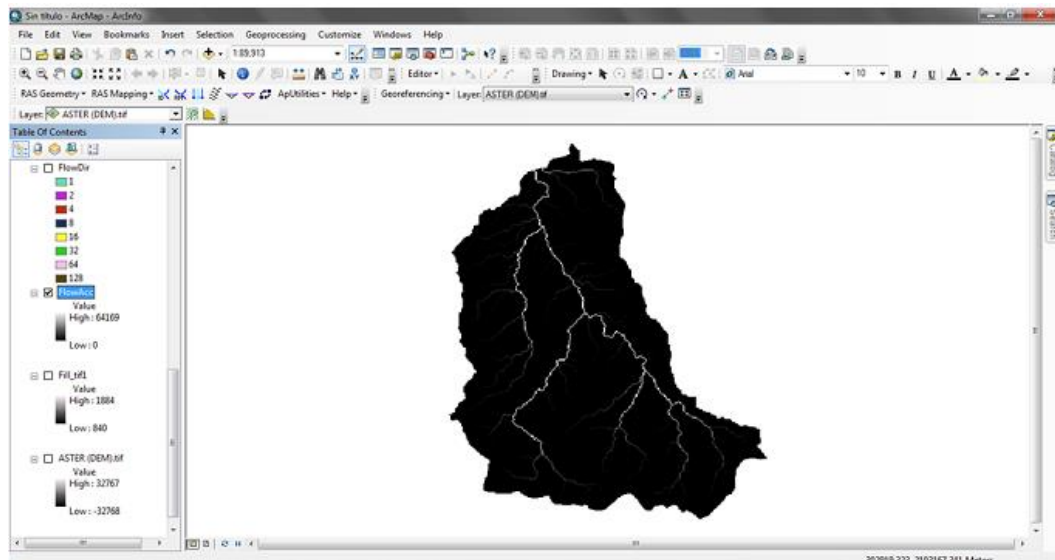
Creación del Mapa Flow Accumulation (Acumulación de Flujo).

- Nos dirigimos a **Catalog - Toolboxes - System Toolboxes - Spatial Analyst Tools - Hydrology - Flow Accumulation**, en el cuadro de

diálogo que aparece se introduce sus respectivos datos vistos a continuación:



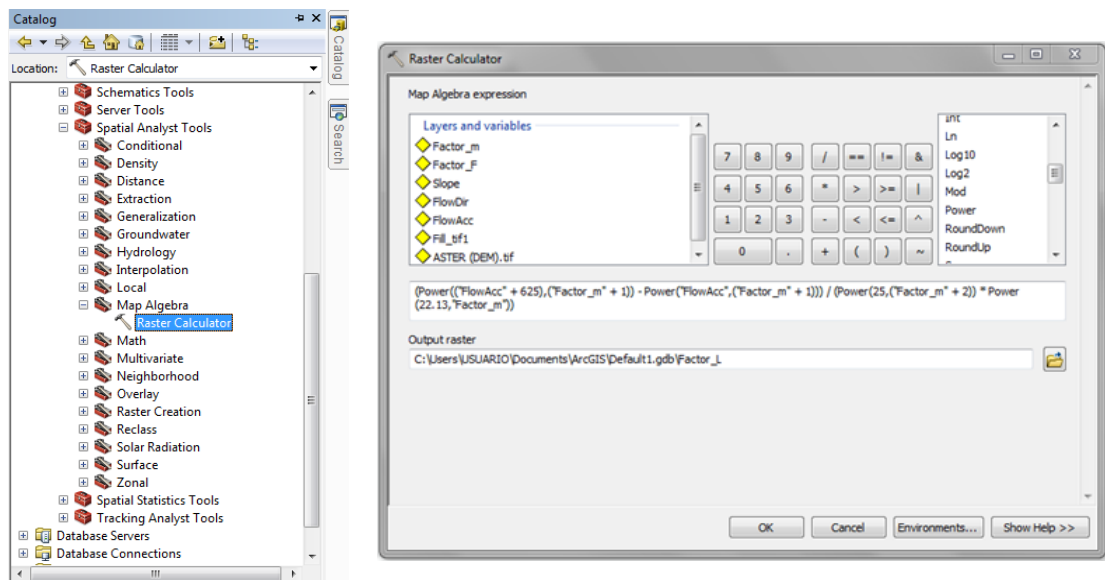
- Luego de introducir los datos en el cuadro de dialogo Flow Accumulation lo guardamos con el nombre de FlowAcc damos Ok y nos genera su respectivo Mapa.



Calcularemos nuestro Factor L (Factor de longitud de pendiente) y su respectivo Mapa.

- Nos dirigimos a **Catalog-Toolboxes-System Toolboxes-Spatial Analyst Tools-Map Algebra-Raster Calculator**, en el cuadro de diálogo que aparece se introduce su respectiva fórmula vista a continuación se introducir en el Raster Calculator:

Factor L :
$$\left(\text{Power}(\text{"FlowAcc"} + 625, \text{"Factor_m"} + 1) - \text{Power}(\text{"FlowAcc"}, \text{"Factor_m"} + 1) \right) - \left(\text{Power}(25, \text{"Factor_m"} + 2) * \text{Power}(22.13, \text{"Factor_m"}) \right)$$

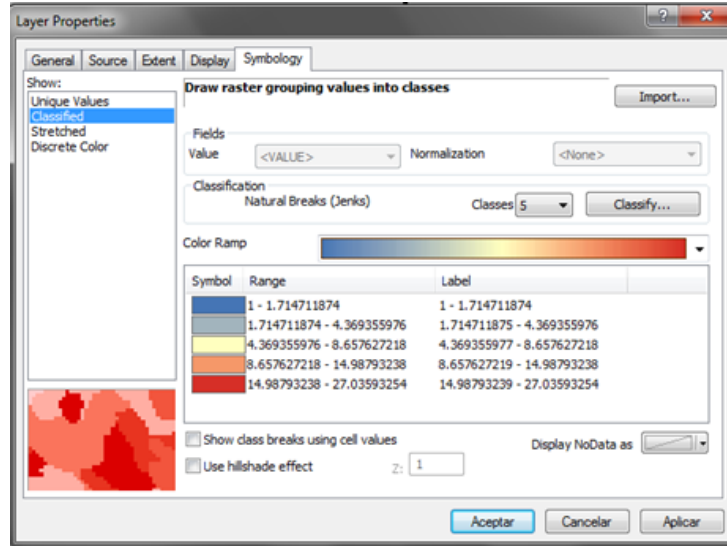


- Luego de introducir la fórmula de nuestro Factor L damos Ok y nos genera su respectivo Mapa.

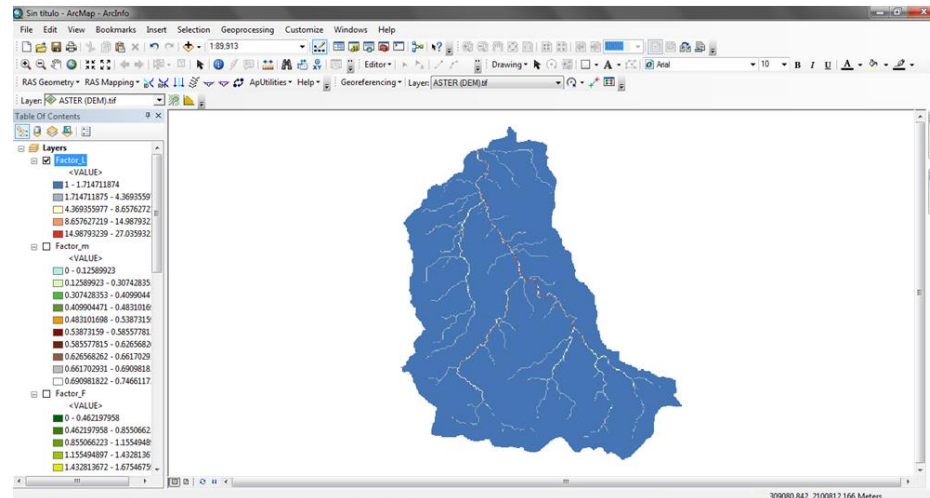


Luego de generarlo se hace las modificaciones.

- Damos doble Clic en el Factor L, nos aparecerá el cuadro de diálogo.
- Hacemos clic en la parte superior **Symbology**, en Show: seleccionamos **Classified**.
- En la parte de Classification escogemos Classes: 5
- En la parte de Color Ramp seleccionamos la gama de colores acorde a nuestro Mapa, damos en Aceptar.



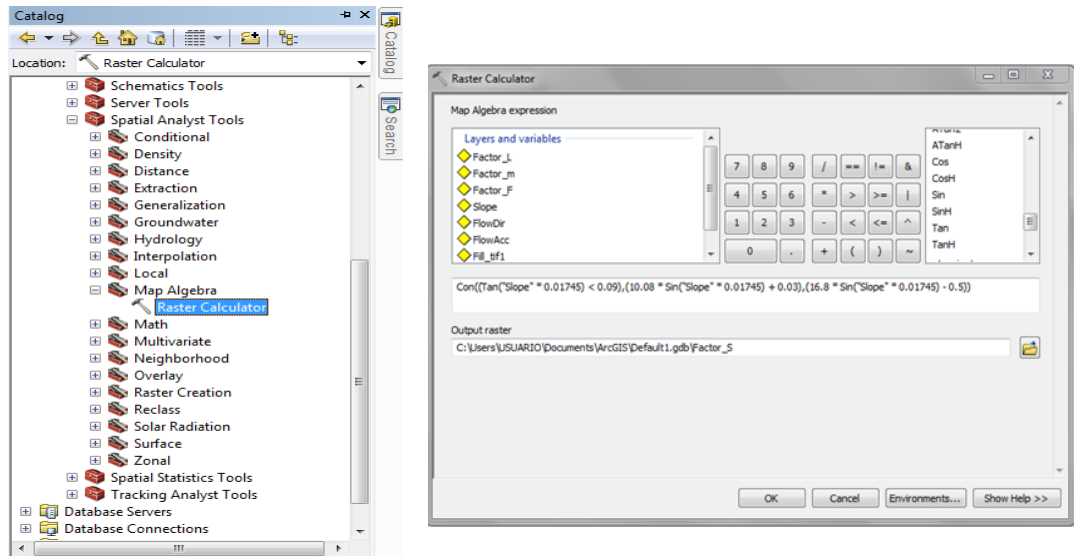
- Nos genera nuestro Mapa del Factor L ya modificado.



Obtención de nuestro Factor S y su respectivo Mapa.

- Nos dirigimos a **Catalog-Toolboxes-System Toolboxes-Spatial Analyst Tools-Map Algebra-Raster Calculator**, en el cuadro de diálogo que aparece se introduce su respectiva fórmula vista a continuación se introduce en el Raster Calculator:

Con((Tan("Slope" * 0.01745) < 0.09),(10.08 * Sin("Slope" * 0.01745) + 0.03),(16.8 * Sin("Slope" * 0.01745) - 0.5))



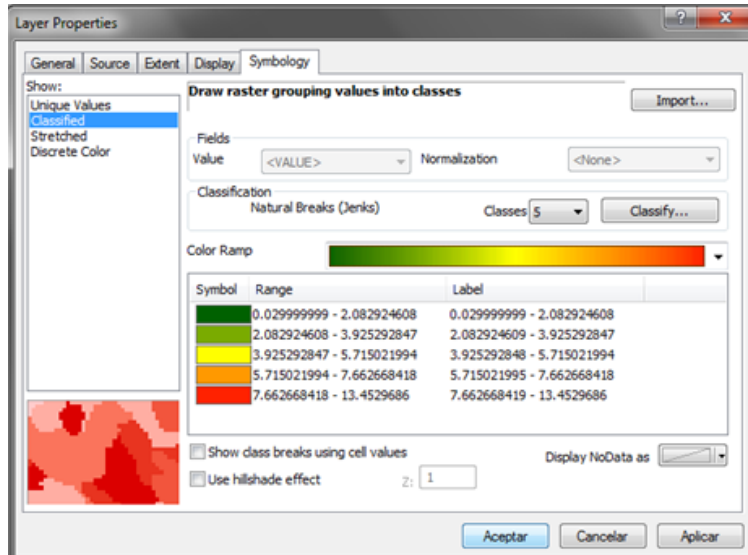
- Luego de introducir la fórmula de nuestro Factor S damos Ok y nos genera su respectivo Mapa.



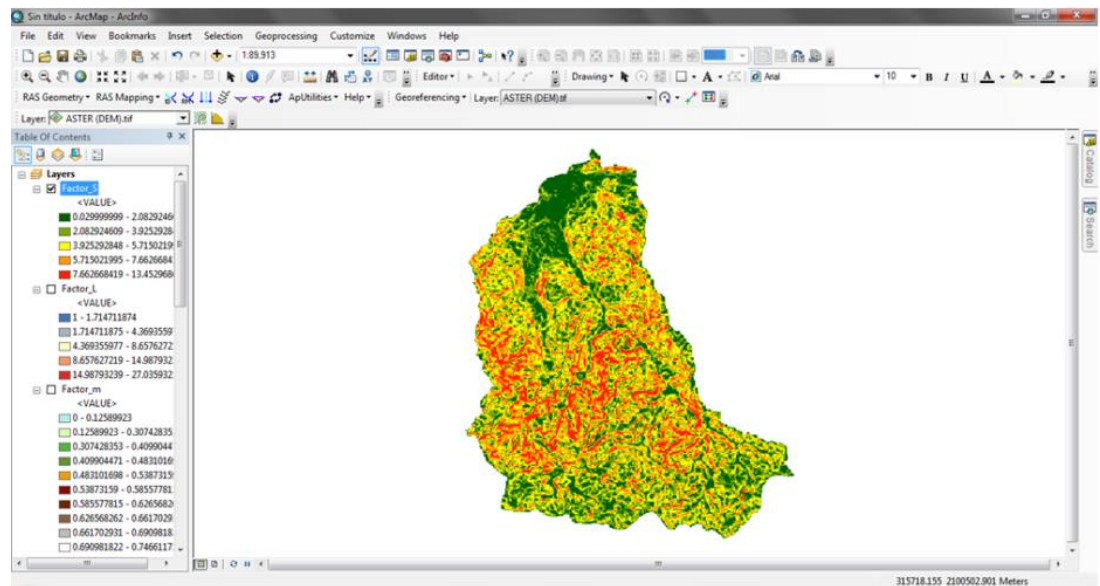
Luego de generarlo se hace la respectiva modificación.

- Damos doble Clic en Nuestro Factor S, nos aparecerá un cuadro de diálogo.

- hacemos clic en la parte superior **Symbology**, en Show: seleccionamos **Classified**.
- En la parte de Classification escogemos Clases: 5
- En la parte de Color Ramp seleccionamos la gama de colores acorde a nuestro Mapa, damos en Aceptar.



- A continuación nos genera nuestro Mapa del Factor S ya modificado.

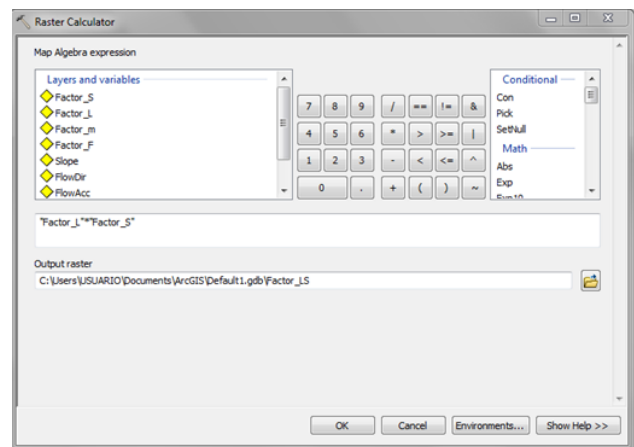
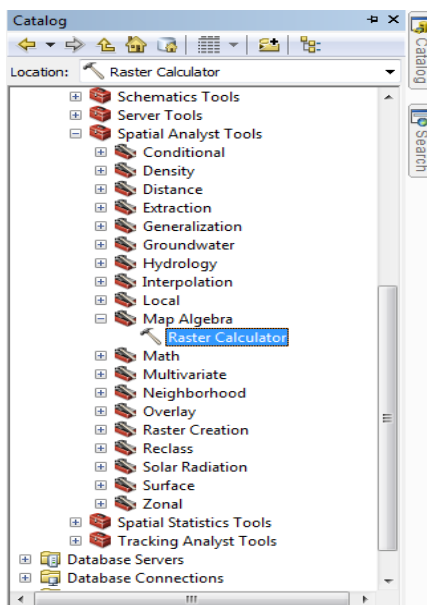


Obtención de nuestro Factor LS (**Factor topográfico**) y su respectivo Mapa.

- Nos dirigimos a **Catalog - Toolboxes - System Toolboxes - Spatial Analyst Tools - Map Algebra - Raster Calculator**, en el cuadro de diálogo que aparece se introduce su respectiva fórmula.

Fórmula a introducir en el Raster Calculator: "Factor_L"*"Factor_S"

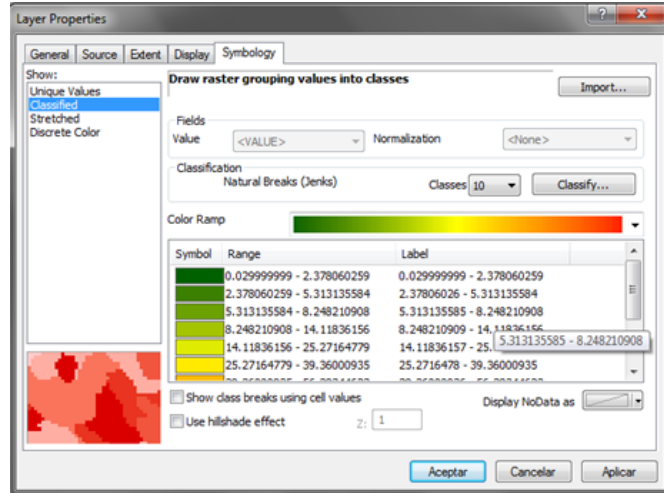
- Se introduce la fórmula de nuestro Factor LS damos Ok y nos genera su respectivo Mapa.



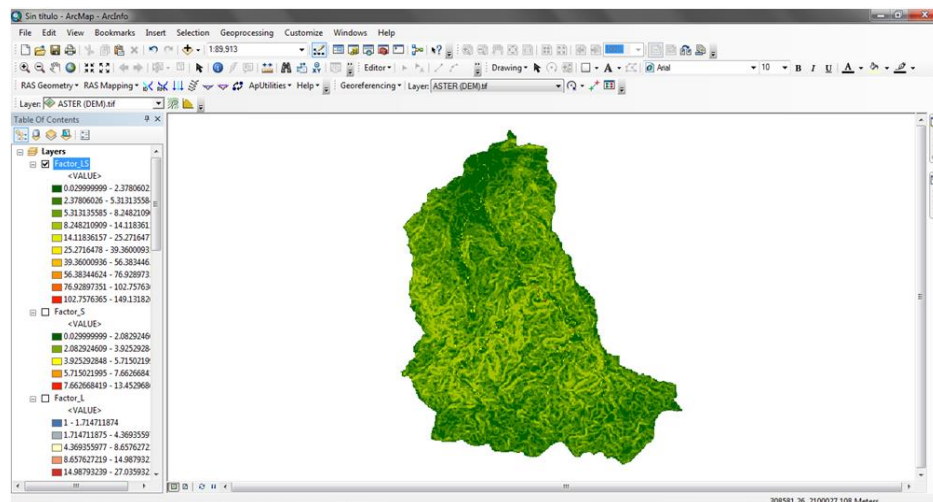


Luego de generarlo se hace la respectiva modificación.

- Damos doble Clic en Nuestro Factor LS, nos aparecerá un cuadro de diálogo.
- Hacemos clic en la parte superior **Symbology**, en Show: seleccionamos **Classified**.
- En la parte de Classification escogemos Classes: 10
- En la parte de Color Ramp seleccionamos la gama de colores acorde a nuestro Mapa, damos en Aceptar.



- A continuación nos genera nuestro Mapa del Factor LS ya modificado.



10.1.4 FACTOR DE MANEJO DE COBERTURA (C)

El factor C se utiliza tanto en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) y la USLE revisada (RUSLE) para reflejar el efecto del cultivo o la capa vegetal presente en las tasas de erosión. Este factor se utiliza para comparar los impactos relativos de planes de conservación. El factor C indica cómo el plan de conservación afectará la pérdida de suelo anual promedio y el potencial de pérdida de suelo se distribuirá en el tiempo que dure las actividades de siembra y rotación de cultivos, u otros esquemas de gestión

Tabla 15: Factor C Relación de pérdida de suelo por vegetación y manejo de residuos de cultivo

CULTIVO Y PRÁCTICA	Media anual del factor C
Suelo desnudo	1.0
Bosque o matorral denso, cultivos con alto porcentaje de <i>mulch</i>	0.001
Sabana o pradera herbácea en buenas condiciones	0.01
Sabana o pradera herbácea sobrepastada	0.1
Maíz, sorgo o mijo: alto rendimiento con laboreo convencional	0.20 - 0.55
Maíz, sorgo o mijo: alto rendimiento sin laboreo convencional	0.50-0.90
Maíz, sorgo o mijo bajo rendimiento con laboreo mínimo o no laboreo	0.02-0.10
Maíz, sorgo o mijo: alto rendimiento, laboreo con chisel entre residuos	0.12-0.20
Maíz, sorgo o mijo: bajo rendimiento, laboreo con chisel entre residuos	0.30-0.45
Algodón	0.40 - 0.70
Pradera herbácea	0.01 -0.025
Soja	0.20 - 0.50
Trigo	0.10-0,40
Arroz	0.10-0.20
Cacahuete	0.30 - 0.80
Palmera, cafeto, cocotero, con cobertura vegetal	0,10-0.30
Pina cultivada a nivel, con retirada de residuos	0.10-0.40
Pina cultivada a nivel, con residuos en superficie	0.01
Patata, surcos según la pendiente	0.20 - 0.50
Patata, surcos transversales a la pendiente	0.10-0.40
Caupi (judía de vaca)	0.30-0.40
Fresca con cobertura de malas hierbas	0.27
Granado con cobertura de malas hierbas	0.08
Granado limpio de malas hierbas	0.56
Tef (<i>Eragrostis tef</i>)	0.25
Caña de azúcar	0.13-0.40
Ñame	0.40-0.50
Guisante de Angola	0.60 - 0.70
Judía mungo	0.04
Pimiento	0.33
Cafeto: después de la primera recolección	0.05
Plátano después de su establecimiento	0.05-0.10
Papaya	0.21

Wischmcier y Smith (1978); Roose (1977); Singh. Babu y Chandra (1981); El-Swaify. Dan- Hurni (1987).

El factor C es usado para reflejar el efecto de la cultivación y prácticas de manejo en las tasas de erosión. Este factor mide como el potencial de pérdida de suelo será distribuido en el tiempo durante la construcción de actividades, rotación de cultivos, y otros esquemas de manejo USDA. 1993.

Sobre la base de nuevas descripciones de prácticas de cultivo y de gestión, así como su influencia en la pérdida de suelo (Laflen et al. 1985). Las razones de la pérdida de suelo se calculan como

$$SLR = PLU * CC * SC * SR * SM$$

Donde:

SLR: Pérdida de suelo por cobertura vegetal.

PLU: Subfactor es el uso anterior de la tierra.

CC: Subfactor dosel cubierta vegetal.

SC: Subfactor de superficie cubierta vegetal.

SR: Subfactor de rugosidad de la superficie.

SM: Subfactor de humedad del suelo.

Cada subfactor contiene variables de cultivo y de gestión que afectan a la erosión del suelo. Los subfactores individuales dependen de funciones que tienen en cuenta una o más variables, incluyendo cobertura de residuos, la cobertura del dosel, la altura del dosel, la rugosidad superficial, biomasa subterránea (masa radicular más residuos incorporado), cultivo previo, la humedad del suelo y el tiempo.

Subfactor de uso previo (PLU)

El subfactor uso previo del suelo (PLU) expresa (1) la influencia de usos del suelo anteriores y su erosión (2) el efecto de las prácticas de labranza usos anteriores sobre la consolidación del suelo. La relación es de la forma USDA. 1993:

$$PLU = C_f * C_b * e^{(-C_{ur} * B_{ur})} + C_{us} * B_{us} / C_f^{C_{uf}}$$

Dónde:

PLU= Subfactor de uso anterior del suelo (Rango 0-1).

C_f = Factor de consolidación del suelo (1-0.45).

C_{ur}, us = Coeficientes dependiente en la efectividad de la cobertura del suelo para reducir erosión.

C_b = Representa la efectividad relativa de los residuos del subsuelo en la consolidación.

B_{ur} = Densidad de masa de raíces vivas y residuos enterrados (incluye raíces muertas) en la capa superior del suelo [lb/acre. in].

B_{us} = Residuo orgánico incorporado por operación de arado del cultivo actual en [lb/acre.in].

Los coeficientes C_b, C_{ur}, C_{us}, y C_{uf} describen la eficacia relativa de la biomasa subterránea en la reducción de la erosión. Estos fueron calibrados utilizando la información de Van Liew y Saxton (1983), en Agriculture Handbook 537 (Wischmeier y Smith, 1978).

Subfactor de cobertura de dosel (CC)

El subfactor cobertura de dosel, expresa la eficacia del dosel vegetal en la reducción de la energía de la lluvia al golpear la superficie del suelo; Aunque la mayoría de la lluvia es interceptada por el follaje, alcanzara finalmente la superficie del suelo, con mucho menos energía, que la lluvia que golpea el suelo, sin haber sido interceptado. Las gotas de lluvia interceptados se fracturan en gotas más pequeñas, con menos energía o se transforman en goteo en las hojas y viajan a través de la cobertura vegetal superficial. El efecto del dosel de la cubierta se da como USDA. 1993.

$$CC = 1 - Fc * e^{(-0.1*H)}$$

Dónde:

CC = Subfactor de cobertura de dosel. (Rango 0-1).

H = Distancia de caída de las gotas de lluvia después de ser interceptados por el dosel [ft].

Fc=Fracción de superficie terrestre cubierta por dosel.

Subfactor de cobertura superficial (SC)

La cubierta superficial afecta la erosión mediante la reducción de la capacidad portante del agua de escorrentía (Foster 1982), causando la deposición en áreas estancada (Laflen 1983). El disminuir el área de la superficie susceptible de impacto de la lluvia, es uno de los factores más importantes en la determinación de los valores de SLR. La cubierta superficial incluye residuos de cultivos, rocas y otro material erosionable que se encuentra en contacto directo con la superficie del suelo. El efecto de la cubierta de la superficie sobre la erosión del suelo está dada por USDA. 1993:

$$SC = e^{(-bS_p * (\frac{0.24}{R_u})^{0.08})}$$

Donde:

SC es el subfactor de superficie cubierta.

b: valor empírico.

Sp : Porcentaje de la superficie cubierta por la cubierta de la superficie.

Ru: rugosidad superficial (in).

Subfactor de rugosidad de la superficie (SR)

Rugosidad de la superficie afectan directamente a la erosión del suelo (Cogo et al. 1984), y afectar indirectamente el impacto sobre suelo y los residuos. En cualquier caso, representa la rugosidad aleatoria de la superficie, que se define como la desviación estándar de las elevaciones superficiales cuando los cambios debido a la pendiente del terreno o marcas de labranza (tales como surcos muertos, marcas de tráfico y marcas de disco) se eliminan de la consideración (Allmaras et al. 1966).

Una superficie áspera tiene muchas depresiones y barreras durante un evento de lluvia, convirtiéndose en una trampa de agua y sedimento, generando que la superficie se erosione a una tasa más lenta, que una superficie lisa en condiciones similares. El aumento de la rugosidad de la superficie disminuye la capacidad de transporte y disminuye la escorrentía por reducción de la velocidad de flujo USDA. 1993.

Una superficie rugosa tiene muchas depresiones y barreras. Durante un evento de lluvia, estas trampas de sedimento y agua causan superficies rugosas a erodar a bajas tasas que las superficies lisas bajo condiciones similares.

La SR está definida por condiciones base por unidad de parcela que está limpio de cultivos, suave y expuesta a lluvia de moderada intensidad.

Se expresa de la siguiente manera:

$$SR = e^{(-0.66(R_u-0.24))}$$

Dónde:

SR = Subfactor de rugosidad de superficie.

Ru = Rugosidad de la superficie rugosidad, depende factores tomados de campo.

Subfactor de agotamiento de la humedad del suelo (SM)

La humedad del suelo presente tiene una influencia sustancial sobre la infiltración y la escorrentía; por consecuente, en la erosión del suelo. En general, los efectos de la humedad están presente son un componente inherente de las parcelas en barbecho³ continuos labrada; y estos efectos se reflejan en la variación producción del suelo durante todo el año. La humedad del suelo es usualmente alta durante el estadio de cultivos susceptibles en primavera y al principio del verano cuando la mayor parte de la erosión ocurre USDA. 1993.

Un factor de agotamiento de la humedad del suelo, está incluido en el RUSLE, que toma en cuenta el efecto de la humedad del suelo en la erosión; por tanto:

- Perfil del suelo cerca de capacidad de campo, SM = 1 (parcela continua-tierra de barbecho).

³ Barbecho: Porción de tierra que no está sembrada durante un tiempo.

- Perfil del suelo cerca de punto de marchitez permanente (a 6 ft de profundidad), SM = 0 (no se espera escurrimiento ni erosión).

CALCULO DEL FACTOR C

El valor de C no es constante a lo largo del año, especialmente en el caso de cultivos agrícolas, estableciéndose para su cálculo los períodos denominados: barbecho, siembra, establecimiento, crecimiento y maduración y rastrojo. Estos períodos varían de unos cultivos a otros y de unas zonas geográficas a otras, por lo que se relaciona con el índice de erosividad, R, y su comportamiento anual.

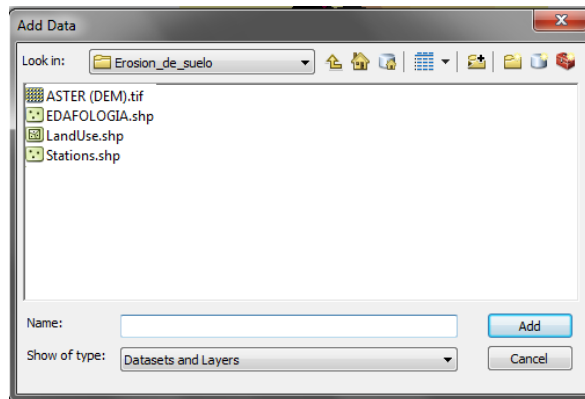
El valor de C tiene un valor de 1 el cual tiende a ser reducido por prácticas de conservación especiales, dentro de las cuales las más comunes en áreas cultivadas son, cultivos en contorno. Las prácticas de conservación que afectan el factor P, actúan en la retención de sedimentos, facilitan la infiltración, disminuyendo el escurrimiento.

10.1.4.1 IMPLEMENTACIÓN EN SIG (ARCGIS).

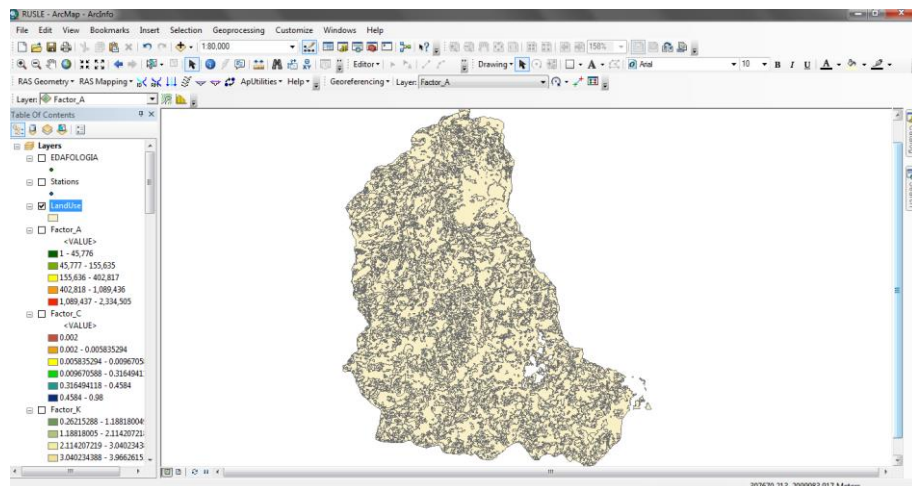
Para generar la capa del factor C puede hacerse mediante la digitalización de una fotografía digital utilizando la herramienta de auto digitación expuesta en la generación de la capa litográfica de método Mora Vahrson usando la asignación de valores a según su tipo.

Para la elaboración de nuestro Mapa del Factor C (cobertura del suelo) debemos agregar un nuevo Layer (capa) llamada LandUse, la cual contiene la tabla de datos a utilizar.

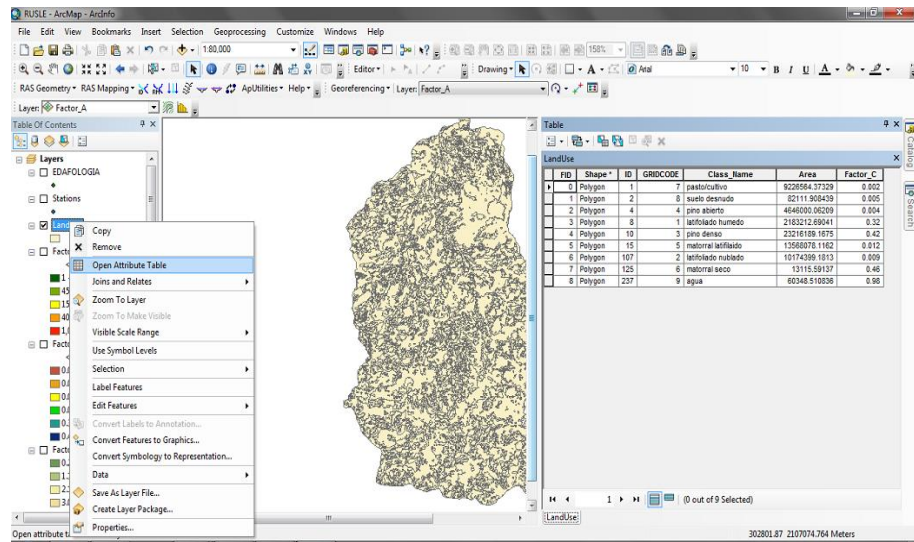
- Seleccionamos la herramienta **Add Data** mencionada anterior mete, nos aparece un cuadro de diálogo en el cual seleccionamos **LandUse** y damos en Add.



- Nos aparecerá el siguiente Mapa de LandUse.

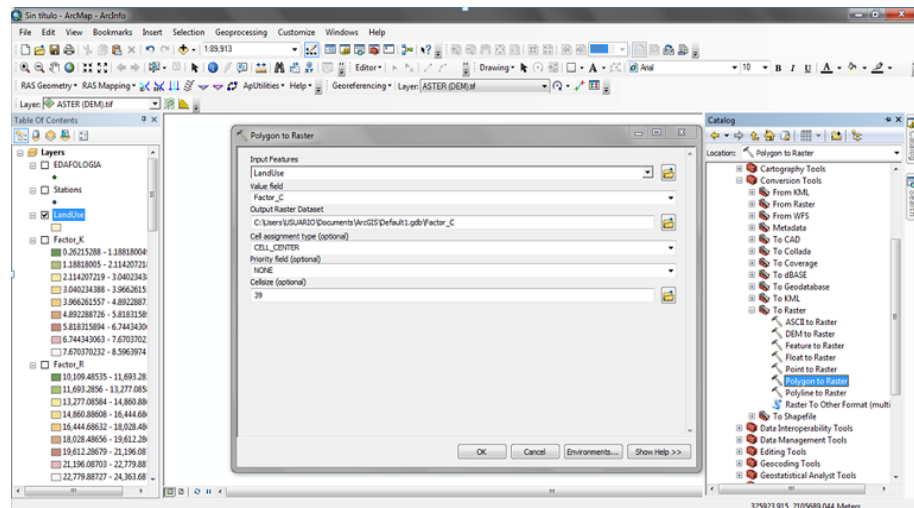


- Para observar nuestra tabla de datos de LandUse nos dirigimos a Table of contents, damos clic derecho en LandUse, seleccionamos Open Attribute Table y nos generará nuestra tabla de datos en el cual se observa nuestro Factor C el cual se puede modificar.



Ya con esta esta información nos disponemos a crear nuestro Mapa del Factor C.

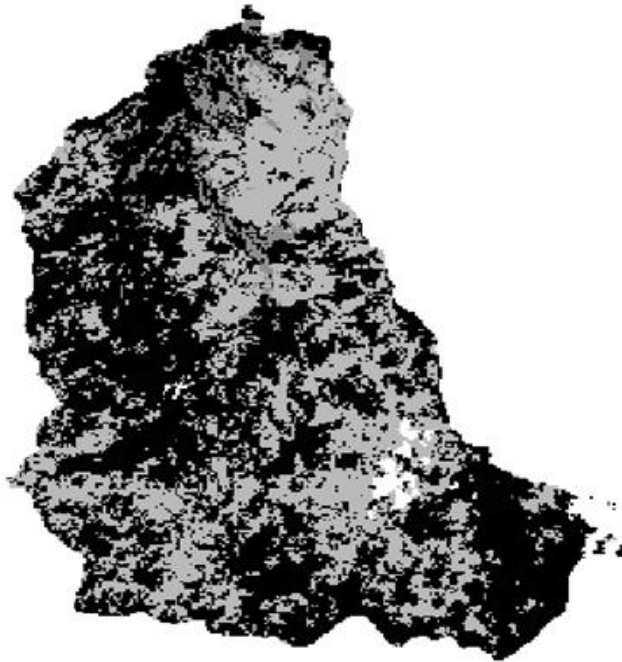
- No dirigimos a **Catolog- Toolboxes - System Toolboxes - Conversion Tools - To Raster - Polygon to Raster**, damos doble clic y nos aparecerá un cuadro de diálogo el cual llenaremos de igual forma que veremos a continuación:



- Al terminar de introducir los datos damos OK.

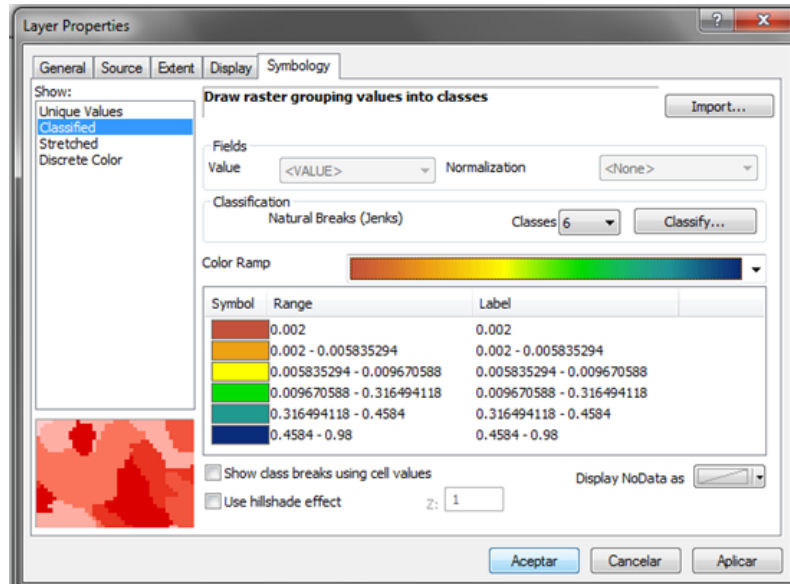
Nos genera el Mapa del Factor C al cual debemos hacerle unas modificaciones de diseño.

- Mapa de Erosión sin modificaciones.

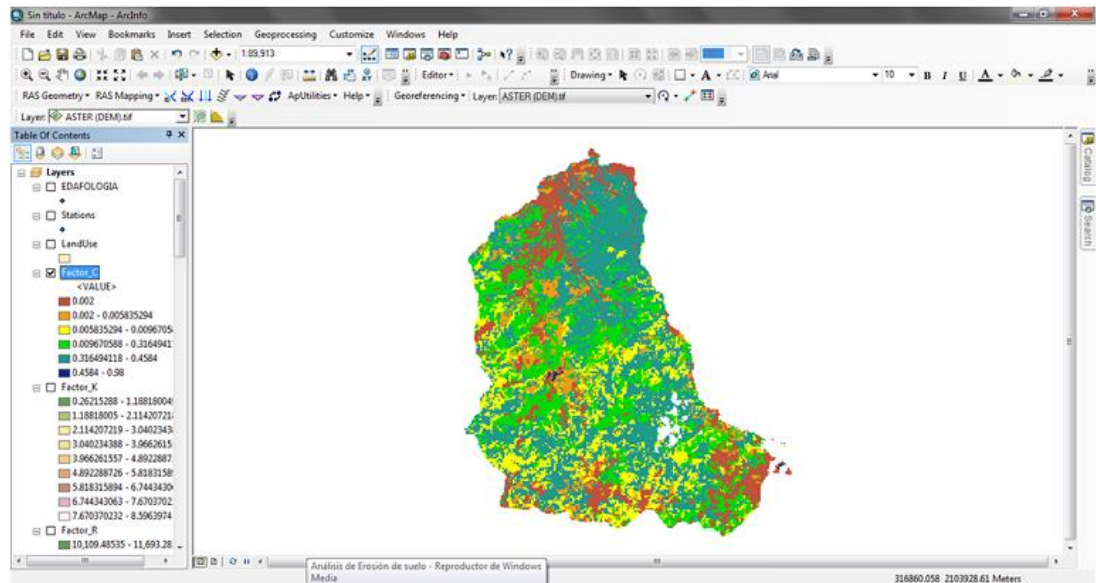


Luego de generarlo se hace la respectiva modificación.

- Damos doble Clic en Nuestro Factor C, nos aparecerá el siguiente cuadro de diálogo.
- Hacemos clic en la parte superior **Symbology**, en Show: seleccionamos **Classified**.
- En la parte de Classification escogemos Classes: 6
- En la parte de Ramp seleccionamos la gama de colores acorde a nuestro Mapa, damos en Aceptar.



- Nos genera nuestro Mapa del Factor C ya modificado.



10.1.5 PRÁCTICAS DE CONTROL DE LA EROSIÓN (FACTOR P).

Por definición, el factor de la práctica de apoyo (P) en RUSLE es la relación entre la pérdida de suelo con una práctica de apoyo específico y la pérdida pendiente arriba de material.

Estas prácticas afectan principalmente a la erosión mediante la modificación del patrón de flujo, grado, o la dirección de la escorrentía superficial y la reducción de la cantidad y velocidad de la escorrentía (Renard y Foster 1983). Para las tierras cultivadas, las prácticas de apoyo o soporte a considerar el contorno⁴ (la labranza y la siembra en contorno), cultivo en fajas, terrazas y drenaje subterráneo. En las zonas secas o pastizales, prácticas de suelo alterar la orientación en o cerca del contorno que resulta en el almacenamiento de la humedad y la reducción de la escorrentía que se utiliza también como prácticas de apoyo USDA. 1993.

Prácticas de Apoyo utilizadas por RUSLE:

Surcos en contorno

- Camellones
- Contornos a desnivel
- Longitud de pendiente crítica, gradiente

Terrazas

- Terraceo en gradas.
- Deposición.

⁴ Cultivo en contorno: Cultivo en curvas de nivel.

Cultivos en fajas

- Fajas de amortiguación.
- Fajas perpendiculares a la pendiente.

Drenaje Subsuperficial

- Drenes

Medidas de conservación de tierras silvopastoriles

- Prácticas de manejo silvopastoril.

Tabla 16. Valores de P mínimos para prácticas de contorno RUSLE (1993)

Altura entre surcos	Factor P mínimo
Muy baja	0.5
Baja	0.3
Moderado	0.15
Alto	0.08
Muy alto	0.05

Tabla 17. Valores de P para terrazas en función a su grado de pendiente RUSLE (1993)

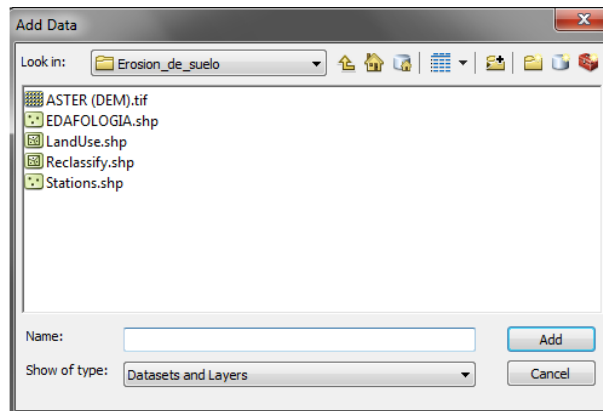
Grado de la terraza (%)	Subfactor de Entrega de Sedimentos
Al final de la salida	0.05
Nivel Cero	0.1
0.1	0.13
0.2	0.17
0.4	0.29
0.6	0.49
0.8	0.83
0.9	0.9
>1	1

10.1.5.1 IMPLEMENTACIÓN EN SIG (ARCGIS).

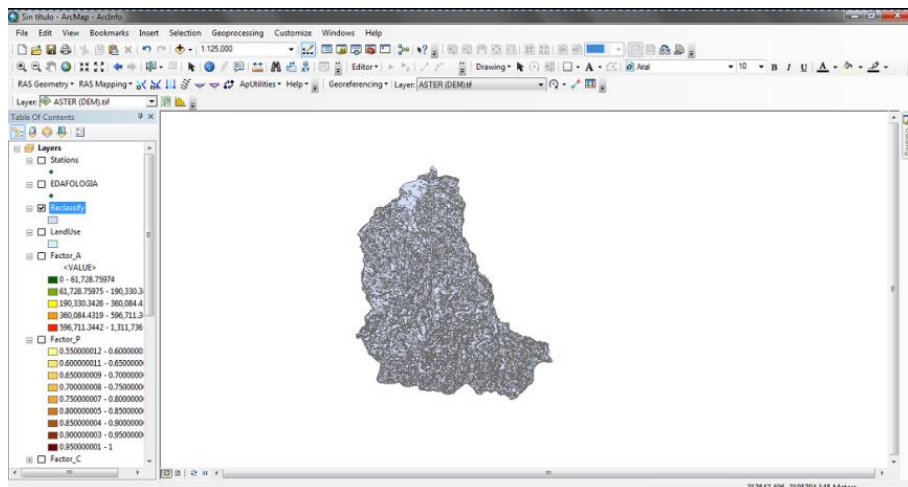
Elaboración del mapa del factor P (Prácticas de cultivo).

1. Para la elaboración de nuestro Mapa del Factor P (Prácticas de cultivo) debemos agregar un nuevo la Layers (capa) llamada Reclassify, la cual contiene la tabla de datos a utilizar.

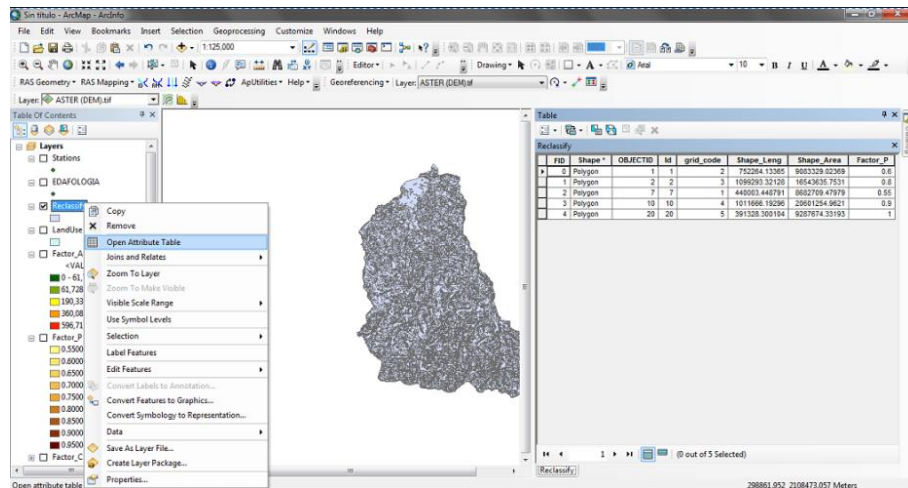
- Seleccionamos la herramienta **Add Data** mencionada anteriormente, nos aparece un cuadro de diálogo en el cual seleccionamos Reclassify y damos en Add.



- Aparecerá el siguiente Mapa de Reclassify.

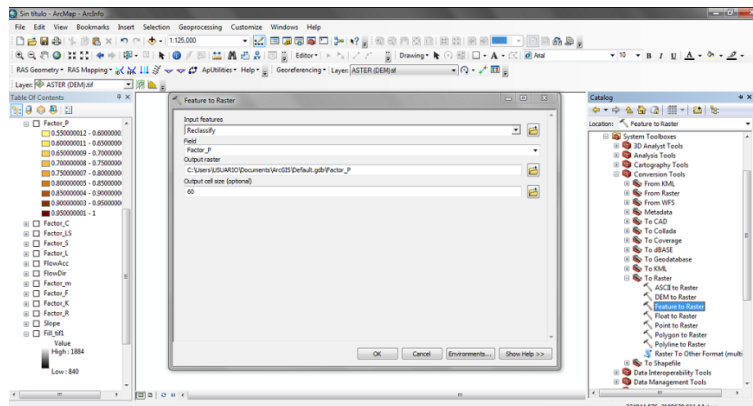


- Para observar nuestra tabla de datos de Reclassify nos dirigimos a Table of contents, damos clic derecho en Reclassify, seleccionamos Open Attribute Table y nos genera nuestra tabla de datos en el cual se observa nuestro Factor P el cual se puede modificar.



Ya con esta esta información nos disponemos a crear nuestro Mapa del Factor P.

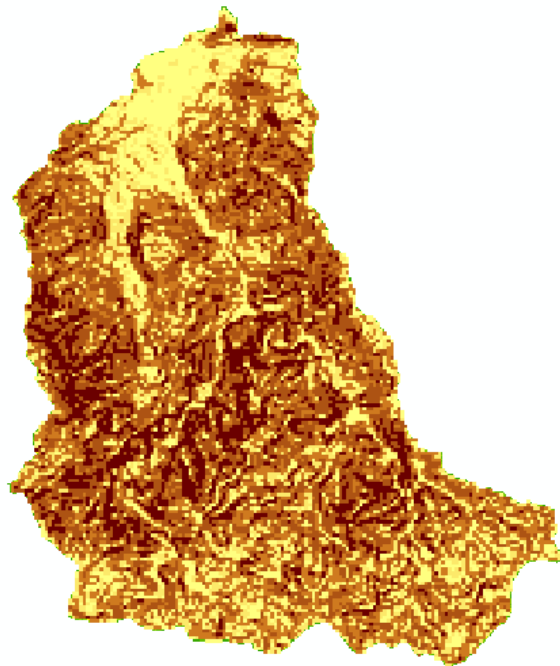
- No dirigimos a **Catolog- Toolboxes - System Toolboxes - Conversion Tools - To Raster - Feature to Raster**, damos doble clic y nos aparecerá un cuadro de diálogo el cual llenaremos de igual forma que veremos a continuación:



- Al terminar de introducir los datos damos OK.

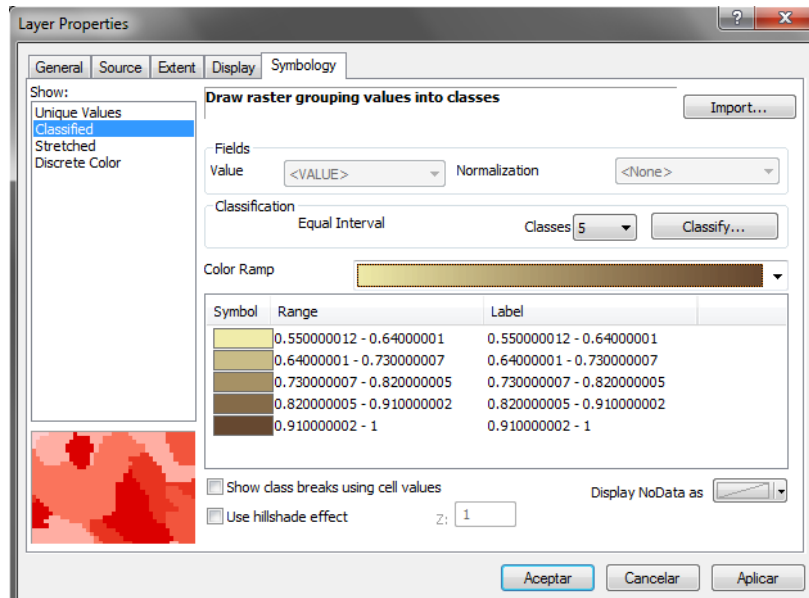
Nos genera el Mapa del Factor P al cual debemos hacerle unas modificaciones de diseño.

- Mapa de Erosión sin modificaciones.

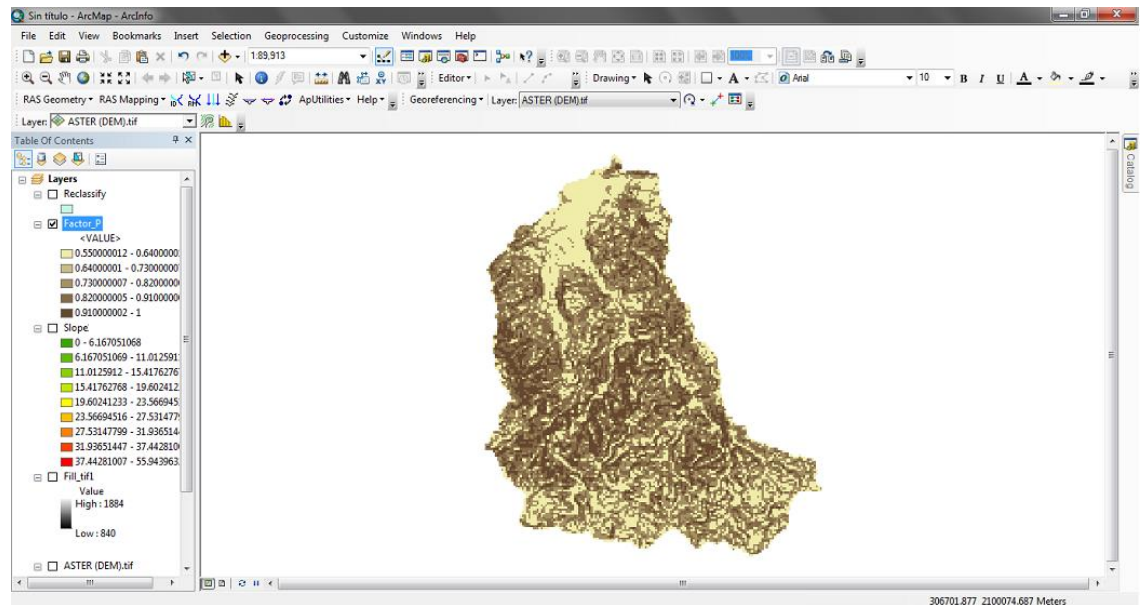


Luego de generarlo se hace la respectiva modificación.

- Damos doble Clic en Nuestro Factor P, nos aparecerá el siguiente cuadro de diálogo.
- Hacemos clic en la parte superior **Symbology**, en Show: seleccionamos **Classified**.
- En la parte de Classification escogemos Classes: 5
- En la parte de Ramp seleccionamos la gama de colores acorde a nuestro Mapa, damos en Aceptar.



- Nos genera nuestro Mapa del Factor P ya modificado.

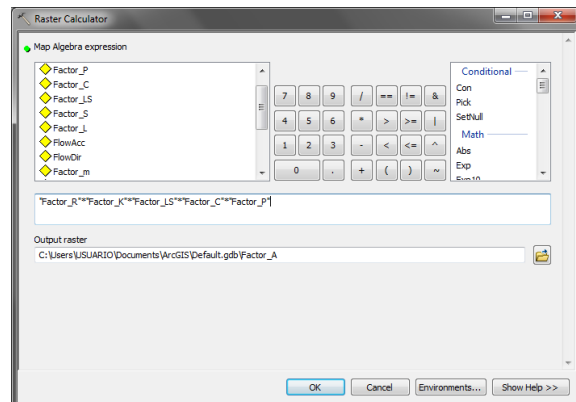
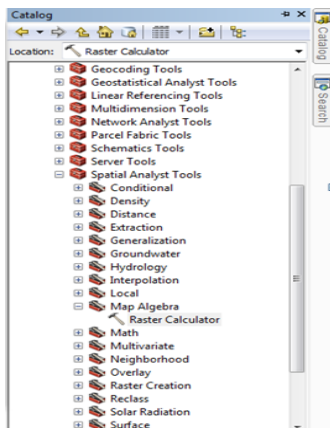


10.2 ELABORACIÓN DEL MAPA DE EROSIÓN (RUSLE).

Ahora se elaborará el mapa de Erosión haciendo uso de la fórmula RUSLE.

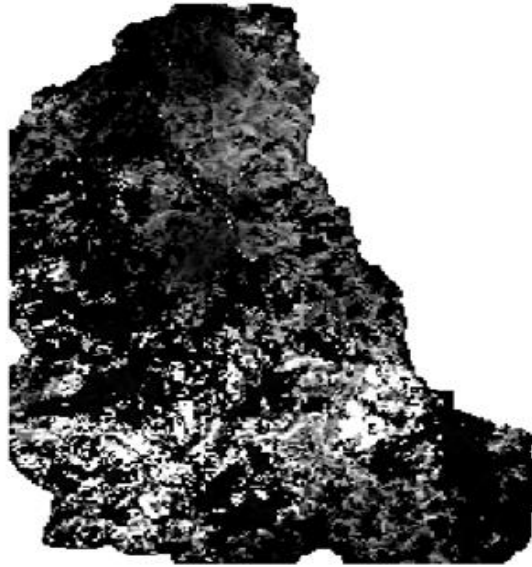
Abra de nuevo el Raster Calculator e introduzca la fórmula para calcular el valor de la Erosión de la fórmula de la RUSLE, luego haga clic en OK.

- Fórmula que debemos introducir para la creación del Factor A (= **"Factor_R" * "Factor_K" * "Factor_LS" * "Factor_C"*"Factor_P"**



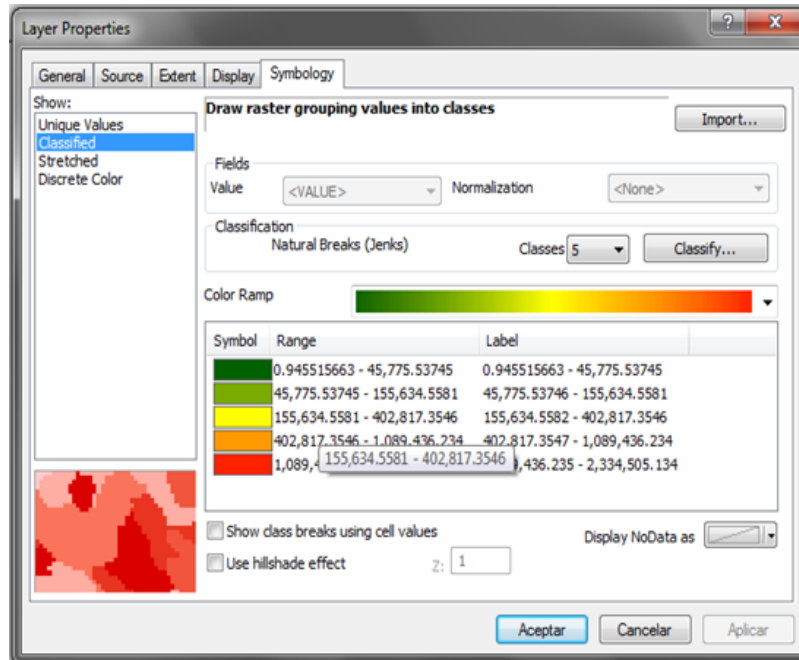
Nos genera el Mapa de Erosión (RUSLE) al cual debemos hacerle unas modificaciones de diseño:

- Mapa de Erosión sin modificaciones de diseño.

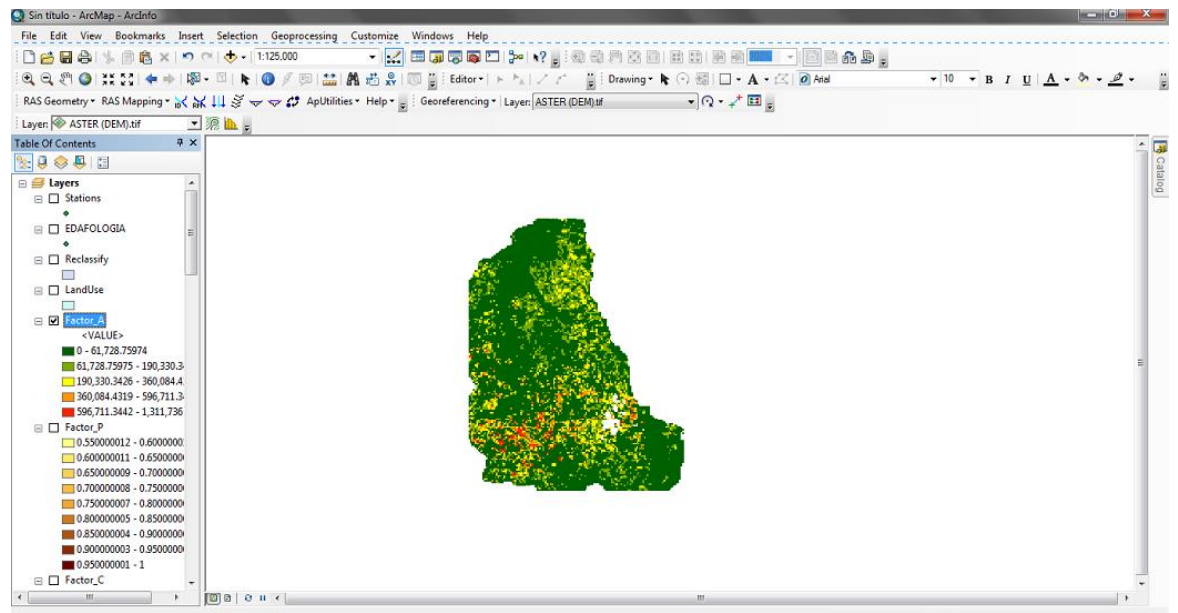


Luego de generarlo se hace la respectiva modificación.

- Damos doble Clic en Nuestro Factor A, nos aparecerá un cuadro de dialogo.
- Haga clic en la parte superior **Symbology**, en Show: seleccionamos **Classified**.
- En la parte de Classification escogemos Classes: 5
- En la parte de Ramp seleccionamos la gama de colores acorde a nuestro Mapa, damos en Aceptar.



- A continuación nos genera nuestro Mapa de Erosión ya modificado.



10.3 APLICACIÓN METODOLOGÍA RUSLE

Esta aplicación elaborada en ArcGIS en forma de un de un Toolboxes la cual lleva el nombre de Metodología RUSLE fue diseñada para una rápida elaboración de diferentes Factores que conforman la ecuación RUSLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisado), estos factores son:

- A = Pérdida de suelo promedio anual.
- R = Factor erosividad de las lluvias.
- K = Factor erodabilidad del suelo.
- LS = Factor topográfico (función de longitud-inclinación-forma de la pendiente), adimensional.
- C = Factor ordenación de los cultivos (cubierta vegetal), adimensional
- P = Factor de prácticas de conservación (conservación de la estructura del suelo), adimensional.

Esta aplicación genera los Mapas de cada Factor mencionados anteriormente los cuales se les debe hacer las respectivas modificaciones, ya que de cada usuario que utilice esta aplicación, maneja diferentes datos de ingreso como: tipos de suelos, clasificación de la vegetación, áreas, datos de estaciones, ubicación de cuencas, curvas de nivel, clasificación de colores, etc.

CONCLUSIONES

Aunque se cuente con una guía metodológica para realizar estudios de erosión y remoción en masa, que aborde eficientemente los problemas generados en la estimación de cada una de las variables requeridas, por los métodos expuestos en el manual, el resultado final dependerá directamente del criterio del usuario, así como la fiabilidad y cantidad de información con la que cuente.

Los modelos utilizados en la actualidad para estimar procesos de erosión y remoción en masa, brindan una buena estimación tanto de los factores involucrados como de la susceptibilidad presente en la zona generada por los fenómenos anteriormente expuestos.

Sin embargo, estos modelos en su mayoría presentan problemas para su implementación en nuestro entorno regional o nacional. Esto es a raíz de que requieren grandes volúmenes de información precisa; así como mecanismos de teledetección que permitan realizar un monitoreo permanente a las condiciones medio ambientales.

En el desarrollo del manual, el usuario contará con herramientas metodológicas para la creación de cada uno de los elementos requeridos por los diferentes métodos. Para esto, se hace indispensable el previo conocimiento en el manejo del programa ArcGis, así como una fluidez en el concepto básico de cada una de las herramientas del programa usadas a lo largo del manual, las cuales por no ser la finalidad del manual desarrollado, no serán explicadas en profundidad.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Al-Kodmany, Kheir. (2000) Extending Geographic Information System to Meet Neighborhood Planning Needs: Recent Developments in the Work of the University of Illinois at Chicago, URISA Journal, Vol. 12, and No.3. pp. 19-20.
- [2] Allmaras, R., Burwell R, Larson E, Hoh R., and Nelson W. (1966), Total porosity and random roughness of the interrow zones influenced by tillage. U.S. Department of Agriculture Conservation Research Report 7, 22 pp. U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- [3] Almorox J., Lopez F., Rafaelli S. (2010). La Degradación de los Suelos por Erosión Hídrica. Métodos de Estimación. Universidad de Murcia: Edit.um.
- [4] Arnold, J. G., P. M. Allen, and D. S. Morgan. (2001). Hydrologic model for design and constructed wetlands. Wetlands; 167-170.
- [5] Atlas D. y Ulbrich, (1987). Early foundations of measurement of rainfall by radar. In Radar in Meteorology. D. Atlas, Ed., American Meteorological society, Boston.
- [6] Bernhardsen, T., (1992): Geographic Information Systems, Viak IT, Norway, 319 pp.
- [7] Bonhomme, (1999). A Visual Language for Querying Spatio-Temporal, Washington.
- [8] Cardona A. (1997). Estudio General de Amenaza Sísmica. Colombia: INGEOMINAS.
- [9] Chow, V. (1994) Hidráulica de los Canales Abiertos, McGraw-Hill Interamericana, Colombia.
- [10] Chrisman, N.R. (1997) Exploring Geographic Information Systems. John Wiley and Sons.
- [11] Chung, C. F. and Fabbri, A. G.: (1993), the representation of geoscience information for data integration, Nonrenewable Resources, 2-2, 122–124.
- [12] Chung, C. F. and Fabbri, A. G.: (2002), Modeling the conditional probability of the occurrence of future landslides in a study area characterized by spatial data, Proceedings of 2002 ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) Meeting, Ottawa, Canada, July, 2002, in press.
- [13] Chung, C. F., Fabbri, A. G., Van Westen, C. J.: (1995), Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation, In: A. Carrara and F. Guzzetti (eds), Geographic Information Systems in Assessing Natural Hazards, Kluwer, Dordrecht, pp. 107–110.

- [14] Cobos, G; Lastrada, E; Martínez, S; Javier, F; (2011). Elaboración de los Mapas De Susceptibilidad De Movimientos de Ladera, Colapsos, Vientos Fuertes e Inundaciones Esporádicas En Aragón. España: Gobierno de Aragon Departamento de política Territorial y del interior.
- [15] Collins, B., Znidarcic, D. (1997). "Triggering Mechanisms of Rainfall Induced Debris Flows". II Simposio Panamericano de Deslizamientos, Río de Janeiro .pp. 277-280.
- [16] DeMers, M.N. (1997) Fundamentals of Geographic Information Systems. John Wiley and Sons.
- [17] Desmet, P. J. J. And Govers, G. A (1996), GIS Proce-dure for automatically Calculating the USLE LS Factor on Topographicalty Complex Landscapes Units. Journal of Soil and Water Conservation 51.
- [18] Dunne y Leopold, (1978). Water in Environmental Planning, W. H. Freeman Co., San Francisco, 818 pp.
- [19] Dyne, R. (1994). Disastrous Assumptions about Community Disasters. Delaware: University Of Delaware Disaster Research Center.
- [20] ERENAS, Godin Carlos, (1995), Ejercicios de Geotecnia y Cimientos, Edición Nº 6, Editorial CEDEX, Madrid.
- [21] Fangmeier, D.D., W.J. Elliot, S.R. Workman, R.L. Huffman, And G.O. Schwab. 2006. Soil and water conservation engineering, 5th ed. Thomson Delmar Learning, Clifton Park, NY. 502 p.
- [22] Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja (IFRC); (2010); Qué es la vulnerabilidad, (2014), de IFRC Sitio web: <http://www.ifrc.org/es/introduccion/disaster-management/sobre-desastres/que-es-un-desastre/que-es-la-vulnerabilidad/>.
- [23] Foster, G.R. (1982) Relation of USLE factors to erosion on rangelands. p. 17-35. In: Proc. Workshop on Estimating Erosion and Sediment Yield on Rangelands. USDA-ARS, ARM-W 26. Tucson, Ariz.
- [24] Foster, G.R., L.D. Meyer. And C.A. Onstad. (1977) A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates. Trans. ASAE 20. p. 683-687.
- [25] García, J. (2005). Análisis de la vulnerabilidad por movimientos de ladera: Desarrollo de las metodologías para evaluación y cartografía de la vulnerabilidad. ; España: Instituto Geológico y Minero de España.
- [26] Gray, D., and R. Sotir. (1996). Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: A practical guide for erosion control. A Wiley-Interscience Publication, New York.

- [27] Greenway D.R. (1987), "Vegetation and Slope Stability", Slope Stability, edited by Anderson M.G, John Wiley and Sons Ltd. Pp. 187-190, New York.
- [28] Gregory, K.J. & Walling, D.E. (1973): Drainage basin form and processes. A geomorphological approach. London, Arnold, 472 pp.
- [29] Grün, (1999). Urban Data Management with a Hybrid 3-D Gis., Proceedings of UDMS'99 (Urban Data Management Society), April.
- [30] Hutchinson J. N. (1968). "Mass Movement". Encyclopedia of Geomorphology. Reinhold New York, pp. 688-691.
- [31] Hutchinson J.N. (1988). "Morphology and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology". Fifth International Symposium on landslides, Lausanne,
- [32] J. M. Laflen, Dickey, E. C, Fenster C. R, and Mickelson R. H. (1983). Effects of tillage on soil erosion in a wheat fallow rotation. Transactions of the American Society Agricultural Engineers 26(3):814-820.
- [33] Laflen J.M., Dickey, E. C, Fenster C. R, and Mickelson R. H, (1983). Effects of tillage on soil erosion in a wheat-fallow rotation. Transactions of the American Society Agricultural Engineers.
- [34] Laflen, J.M.. G.R. Foslet, and C.A. Onslad, (1985); Simulacion of individual-storm soil loss for modeling the impact of soil erosion on crop productivity. In S.A. El-Swaify, W.C. Moldenhauer, and A. Lo, eds., Soil Erosion and Conservation, pp. 285-295. Soil conservation. Soc. Am., Ankeny, Iowa..
- [35] Lavell A. (2009); Sobre la Gestión del Riesgo: Apuntes hacia una Definición, Primer encuentro de la red de solidaridad de micro seguros rurales 2009; México; 22p.
- [36] Lavell, A. (1996); "Degradación Ambiental, Riesgo y Desastre Urbano: Problemas y Conceptos". En Fernández, María Augusta. Ciudades en Riesgo. LA RED. USAID. Lima, Perú
- [37] Loredó, C. Beltrán, S. Moreno, F. & Casiano, M. (2007). Riesgo a la Erosión Hídrica y Proyección de Acciones de Manejo y Conservación del Suelo en 32 Microcuencas de san Luis Potosí. México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- [38] Mannaerts, C. (1999). Factores de erosión. Módulo 11: Degradación de suelos. ITC. Curso de Postgrado en levantamiento de recursos hídricos. Notas de clase y ejercicios. CLAS. Cochabamba, Bolivia
- [39] Marelli H, (2004,) Caracterización del Potencial Erosivo de Suelo de Centro Sudeste de la Provincia de Córdoba. INTA. EEA-Córdoba.

- [40] McCool, D. K., Brown, L. C., Foster, G. R., Mutchler, C. K. and Meyer, L. D. (1987), Revised Slope Steepness Factor for the USLE. USA.
- [41] McCool, D.K., G.R. Foster, C.K. Mutchler, and L.D. Meyer. (1989), Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. Trans. ASAE.
- [42] Molano J, Polacheck I, Duran A, Cabib E (1993) an endochitinase from wheat germ. Activity on nascent and preformed chitin. J Biol Chem 254 4901-4907
- [43] Moore. I. D. Y Burch G. J.(1986), Modelling Erosion and Deposition: Topographic Effects. Trans ASAE.
- [44] Mora R, Vahrson W. (1992), Mapa de Amenaza de Deslizamientos, Valle Central, Costa Rica. Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres Naturales en América Central (CEPRENAC),
- [45] Mora R. (2004). Evaluación de la Susceptibilidad al Deslizamiento del Cantón de San José, Provincia de San José, costa rica. Costa Rica: Escuela Centroamericana de Geología. República de Colombia. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- [46] NCGIA, (1990) National center of Geographic Information and Analysis. Printing Office, Washington, DC.
- [47] OEA (Organization of American States. Dept. of Regional Development and Environment). (1993). Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado. Washington, D.C.: Organización de los Estados Americanos.
- [48] Olcina J., Ayala-Carcedo F.J., Miró Pérez J. y Pérez A.P. (2002). Anexo II. Relación de catástrofes naturales importantes acontecidas en España en la segunda mitad del Siglo XX. En: Ayala-Carcedo F.J. y Olcina J. (coord.). Riesgos Naturales, Ariel Ciencia, Barcelona. Pgs. 1475-1480
- [49] Ongley, E.D. (1997): (Canada Centre for Inland Waters, Burlington (Canada)) En: Estudio FAO: Riego y Drenaje (FAO), no. 55 (Spanish) / FAO, Rome (Italy). Direccion de Fomento de Tierras y Aguas.
- [50] Orduña, F. (2007). Aplicaciones de software SIG: ArcGIS 9.2. Lección 1: Introducción a ArcGIS Desktop. UNIGIS Girona. 9ª ed. España. Universidad de Girona.
- [51] Palacios. (1986). El uso de modelos en irrigación y áreas afines. Terra 4: 41-46

- [52] Pouey, N. (1998) Erosión Hídrica en Cursos de Llanura sobre Lechos Cohesivos, UNR Editora, Rosario, Argentina.
- [53] Proaño M., Gavilanes C., Valenzuela P., Cisneros C., (2006). aplicación del modelo swat en la subcuenca del río ambato. ecuador: proyecto cuencas andinas – codesan - gtz
- [54] R.A. Van Zuidam. (1986), Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping. Smith Publisher, The Hague, 442 pp.
- [55] Renard K; Foster D; Weesies D. Predicting Soil Erosion by Water 1997.: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). United States of America: USDA
- [56] Renard, K. G., Foster G. R. Weesies G. A., Mccool D. K. And Yoder D. C. (1997), Predicting Soil Erosion by Water; a Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation. US Department of Agriculture, Agriculture! Research Services, Agriculture! Handbook 703. USA.
- [57] Renard, K.G., Foster, G.R. (1983), Soil Conservation Principles of erosion by water. In: Dregne, H.E., Willis, W.O. (Eds.), Dryland Agriculture. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, WI, USA,
- [58] Renard, K.G., Foster, G.R., (1983). Soil Conservation—Principles of erosion by water. In: Dregne, H.E., Willis, W.O. (Eds.), Dryland Agriculture. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, pp. 155–160
- [59] Revelo, V. (2008). Modelo Para la Estabilización de Taludes En Las Carreteras del Subtrópico del Noroccidente del Ecuador a fin de Evitar Accidentes de Tránsito Y Disminuir Los Costos de Operación Vehicular. Ecuador: UTA.
- [60] Rice, R.M., Krames, J.S. (1970), “Mass-Wasting Process in Watershed Management,” Proceedings on Interdisciplinary Aspects of Watershed Management, ASCE, pp. 231-235.
- [61] Roche, (1999), Stéphane and Humeau, Jean Baptiste, GIS Development and Planning Collaboration: a Few Examples from France, URISA Journal, Vol. 11, No.1., Spring 1999, pp.5-10.
- [62] S.B. Miles & D.K. Keafer. (2002), Seismic landslide hazard for the city of Berkeley, California. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. (Documento no editable en Internet).
- [63] Sorooshian (1998). Calibration of Hydrologic Models Using Multi-Objectives and Visualization

- [64] Spence, R.J.S., (1990); "Seismic Risk Modelling - A review of Methods", contribution to "Velso il New Planning", University of Naples, Papers of Martin Centre for Architectural and Urban Studies, Cambridge.
- [65] Star. & Estes. (1990) Geographical Information Systems: An Introduction. Englewoods Cliffs, New Jersey, Prentice Hall.
- [66] Styczen M.E. -Moran R.P.C.(1996) "Engineering properties of vegetation" Slope Stabilization and Erosion Control. Editors: Morgan R.P.C. Rickson R.J. E&FN SPON, London. Pp 5-11.
- [67] Suarez J. (2001), Control de Erosión en Zonas Tropicales, Ediciones UIS,
- [68] Suarez J.; (1998); Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales; Capitulo 8; Colombia: Publicaciones UIS.
- [69] Suarez J.; (2009); Deslizamientos Análisis Geotécnico; Capitulo 1 Colombia: Publicaciones UIS.
- [70] Techniques. Final Report on Project Proposal Number EAR- 9418147. Department of Hydrology and Water Resources. University of Arizona, Tucson. 78 pp
- [71] Thomas, J. & Suavita, M. (1994), "El geosistema como base en el proceso de ordenamiento territorial". Ponencia, XIII Congreso Colombiano de Geografía. Florencia (Caquetá) 11-14 de Agosto de 1994, en memorias.
- [72] Tomlinson, R.F., (2005) Thinking about GIS: Geographic Information System Planning for Managers. ESRI Press. 328 pp
- [73] Tomlinson. (1989) "Presidential Address: Geographic Information Systems and Geographers in the 1990's" en The Canadian Geographer
- [74] UNDRO, (1979); "Natural Disasters and Vulnerability Analysis", Report of Experts Group Meeting, Geneva.
- [75] USDA. (1951). Soil Survey Manual. Washington: Dept. of Agriculture, Office of Governmental and Public Affairs.
- [76] USDA. (1993). User's guide, Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). United States Department of Agriculture. Agriculture Handbook.
- [77] Van Liew and Saxton (1983). Slope steepness and incorporated residue effects on rill erosion, Trans. ASAE, 26, 1738-1743.

- [78] Van Westen, C.J. (1993), remote sensing and geographic information systems for geologic hazard mitigation. In: ITC journal: bulletin de l'ITC, (1993)4, pp. 63-70.
- [79] Varnes D.J. (1958). "Landslides types and processes". Special report 29: Landslides and engineering practice (E.B. Eckel, Ed.) HRB, National Research Council, Washington, D.C.,
- [80] Varnes D.J. (1978). "Slope movement types and processes". Special report 176: Landslides: Analysis and control (R.L. Schuster and R.J. Krizek, eds.), TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.11-16.
- [81] Williams et al., (1985). Estimated Bioresource Sensitivity to Climatic Change; Alberta, Canada.
- [82] Williams. Y LaSeur, (1976) Water yield model using SCS curve numbers. J. Hydraul. Div., Proc. Amer. Soc. Civ. Engrs 102, no.HY9, 1241-1248.
- [83] Wischmeier y Smith, (1965), Predicting rainfall-erosión losses from cropland east of the Rocky Mountains, U.S. Dept. Agr., Washington, DC.
- [84] Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses-a Guide to Conservation Planning-USDA; Agriculture Handbook 537. Sci. and Educ. Admin. USDA Washington, D.D. 59- p.
- [85] Wischmeier, W. H., C. B. Jonson, and B.V. (1971),. Cross. a soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. J. Soil and Wat. Conservation.
- [86] Wischmeier. W. H. & Smith, D. D. (1965), Predicting Rainfall-Erosión Losses from Cropland East Of the Rocky Mounáins: A Guide for Seleclion of Practices for Soil and Water Conservation. Agriculture Hand-book 282. U.S. Department of Agriculture, Washington. DC. USA