



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
CONSEJO DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
NÚCLEO UNIVERSITARIO DEL TÁCHIRA
DR. PEDRO RINCÓN GUTIÉRREZ
MAESTRÍA EN EDUCACIÓN
MENCIÓN: ENSEÑANZA DE LA GEOGRAFÍA**

**EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A DESARROLLAR
MOVIMIENTOS EN MASA ASOCIADOS A SISMICIDAD, EN UNIDADES
GEOMORFOLÓGICAS DEFINIDAS SEGÚN LA PROPUESTA DE ALFRED
ZINCK, EMPLEANDO TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA, EN LA CUENCA DEL RÍO TORBES**

Trabajo de Grado elaborado para optar al título de
Magister Scientiae en Educación, Mención: Enseñanza de la Geografía

Autor: Lcdo. Juan Luis Rodríguez Serrano
Tutor: Ing. Julio Rafael González Tovar

San Cristóbal, Marzo de 2017



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
CONSEJO DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
NÚCLEO UNIVERSITARIO DEL TÁCHIRA
DR. PEDRO RINCÓN GUTIÉRREZ
MAESTRÍA EN EDUCACIÓN
MENCIÓN: ENSEÑANZA DE LA GEOGRAFÍA**

**EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A DESARROLLAR
MOVIMIENTOS EN MASA ASOCIADOS A SISMICIDAD, EN UNIDADES
GEOMORFOLÓGICAS DEFINIDAS SEGÚN LA PROPUESTA DE ALFRED
ZINCK, EMPLEANDO TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA, EN LA CUENCA DEL RÍO TORBES**

Trabajo de Grado elaborado para optar al título de
Magister Scientiae en Educación, Mención: Enseñanza de la Geografía

Autor: Lcdo. Juan Luis Rodríguez Serrano
Tutor: Ing. Julio Rafael González Tovar

San Cristóbal, Marzo de 2017

DEDICATORIA

Dedico este trabajo en primer lugar a Dios, por ser él quien me otorgó la oportunidad de estar estudiando y desarrollarme profesionalmente pese a todas las dificultades que se me han presentado.

En segundo lugar, se lo dedico a mi hijo Jesús Daniel, pues él representa la persona más importante de mi vida y por quien me he esforzado y seguiré esforzando; gracias mi niño por hacerme una mejor persona, eres la luz de mis ojos.

Se lo dedico especialmente a mi esposa Sheila, eres el amor de mi vida, y a lo largo de estos años juntos, te has encargado de darme felicidad y alegría, gracias a tu apoyo y comprensión constante, puedo estar hoy donde estoy.

A mi Papá, que aunque físicamente no está presente, sé que desde donde esté me alienta a seguir adelante y a no desfallecer en el camino.

A mi Mamá, por ser ejemplo de dedicación y esfuerzo constante.

Finalmente, me lo dedico a mí mismo, ya que este trabajo representa el logro de una nueva meta propuesta: Ser magíster.

AGRADECIMIENTOS

Dar gracias, es muchas veces una de las cosas más difíciles de hacer, pero hoy que culmino después de mucho esfuerzo y constancia este trabajo de investigación, quiero expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que con su apoyo y ayuda me permitieron llegar hasta este punto.

- **A Dios**, quien a través de su amor permitió la coronación de este esfuerzo, dándome en todo momento fortaleza y perseverancia.
- **Al Prof. Julio**, por haber sido un mentor durante esta etapa profesional, sus orientaciones y palabras de ánimo, me ayudaron a confiar en mis posibilidades de éxito.
- **Al programa de Maestría en Educación, mención: Enseñanza de la Geografía**, por la formación que procuró para perfeccionar mi práctica profesional durante mi tiempo de escolaridad y tesis.
- **A la Prof. Nelcy**, por haber sido un ángel que me ayudó y corrigió en aspectos complejos del desarrollo de la tesis.
- **Al Prof. Armando**, su ejemplo para ser cada vez mejor docente de geografía, fue una inspiración constante.
- **Al Departamento de Aguas del Antiguo Ministerio de Ambiente**, porque en la medida de lo posible, me aportaron la información disponible para completar la tesis.
- **Al Laboratorio de Ecología del IVIC**, gracias a su formación perfeccione mi manejo en las herramientas SIG, y me facilitaron gran cantidad de información que me ayudó a completar los objetivos propuestos.
- **A Sheila**, por su paciencia y orientaciones constantes en particularidades de la teoría geográfica.



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
CONSEJO DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
NÚCLEO UNIVERSITARIO DEL TÁCHIRA
DR. PEDRO RINCÓN GUTIÉRREZ
MAESTRÍA EN EDUCACIÓN
MENCIÓN: ENSEÑANZA DE LA GEOGRAFÍA

EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A DESARROLLAR MOVIMIENTOS EN MASA ASOCIADOS A SISMICIDAD, EN UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS DEFINIDAS SEGÚN LA PROPUESTA DE ALFRED ZINCK, EMPLEANDO TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, EN LA CUENCA DEL RÍO TORBES

Autor: Juan L. Rodríguez S.
Tutor: Julio R. González T.
Fecha: Febrero de 2017

RESUMEN

El medio físico presenta una dinámica particular asociada a la interacción entre sus elementos, siendo de gran importancia el estudio de las geoformas pues estas actúan como sustrato para la interrelación de las geosferas. Cada geoforma posee una serie de atributos que la hacen más o menos susceptible a la ocurrencia de movimientos en masa, éstos últimos responden a una serie de factores que permiten su análisis, entre los que destaca la sismicidad. En este sentido, la presente investigación tuvo como premisa, evaluar la susceptibilidad a desarrollar movimientos en masa asociados a sismicidad, en unidades geomorfológicas definidas según la propuesta metodológica de Alfred Zinck, empleando Tecnologías de Información Geográfica, en la cuenca del río Torbes. Partiendo de la descripción y análisis de sus características físico naturales e incorporando la metodología de Alfred Zinck para la identificación de las unidades geomorfológicas presentes en el área de estudio, se elaboró un inventario de movimientos en masa; se determinaron los patrones de sismicidad y finalmente se identificaron las unidades geomorfológicas más susceptibles a desarrollar movimientos en masa asociados a sismicidad. La investigación se estructuró en cinco etapas: conceptual, conceptual metodológica, metodológica técnica, validación - evaluación teórica, y transferencia, atendiendo a los postulados de la Geografía Aplicada. Para la realización del estudio se aplicaron técnicas e instrumentos como la digitalización; análisis e interpretación de mapas, elaboración, evaluación y análisis de modelos digitales de elevación, interpretación de información climática, procesamiento digital de imágenes, análisis espacial de patrones de sismicidad, elaboración, procesamiento y análisis de mapas de geoformas. Los resultados obtenidos a partir de la aplicación de las Tecnologías de Información Geográfica, representan un aporte importante de información cartográfica para los entes responsables de la gestión de amenazas y vulnerabilidades pues permite el desarrollo de políticas de prevención y mitigación de riesgos en la búsqueda del bienestar de los asentamientos humanos.

Palabras claves: cuenca del río Torbes, Geoformas, Movimientos en Masa, Susceptibilidad, Sismicidad, Tecnologías de Información Geográfica.



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
CONSEJO DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
NÚCLEO UNIVERSITARIO DEL TÁCHIRA
DR. PEDRO RINCÓN GUTIÉRREZ
MAESTRÍA EN EDUCACIÓN
MENCIÓN: ENSEÑANZA DE LA GEOGRAFÍA**

**EVALUATION OF THE SUSCEPTIBILITY TO DEVELOP LANDSLIDES
RELATED TO SEISMICITY, IN GEOMORPHOLOGICAL UNITS DEFINED
ACCORDING TO THE PROPOSAL OF ALFRED ZINCK, USING
GEOGRAPHICAL INFORMATION TECHNOLOGIES, IN THE TORBES RIVER
BASIN**

Author: Juan L. Rodríguez S.
Tutor: Julio R. González T.
Date: 2016 February

ABSTRACT

The physical environment presents dynamics associated to the interaction between its elements, being of great importance the study of the geoforms as these act as substrate for the interrelation of the geospheres. Each geoform has a series of attributes that make it susceptible to the occurrence of mass movements, the latter responding to a series of factors that allow its analysis, among which is the seismicity. In this sense, the present investigation had as premise, to evaluate the susceptibility to develop mass movements associated to seismicity, in geomorphological units defined according to the methodological proposal of Alfred Zinck, using Geographic Information Technologies, in the basin of the river Torbes, starting from The description and analysis of their natural physical characteristics and incorporating the methodology of Alfred Zinck for the identification of the geomorphological units present in the study area. An inventory of mass movements was developed, and seismicity patterns were determined and finally identified geomorphological units more susceptible to mass movements associated with seismicity. The research was structured in five stages: conceptual, conceptual methodological, methodological technique, validation - theoretical evaluation, and transfer, attending to the postulates of Applied Geography. To carry out the study, techniques, and instruments such as digitization, map analysis and interpretation, elaboration, evaluation and analysis of digital elevation models, interpretation of climate information, digital image processing, spatial analysis of seismicity patterns, Processing, and analysis of geoform maps. The results obtained from the application of Geographic Information Technologies represent an important contribution of cartographic information for the entities responsible for the management of threats and vulnerabilities, since it allows the development of policies to prevent and mitigate risks in the search for welfare of human settlements.

Keywords: Torbes River Basin, Geoforms, Landslides, Susceptibility, Seismicity, Geographic Information Technologies

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	iv
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT	vii
INTRODUCCIÓN	19
CAPÍTULO I EL PROBLEMA	24
Planteamiento del Problema	24
Objetivos de la Investigación	34
Objetivo General.....	34
Objetivos Específicos	34
Justificación.....	35
Operacionalización de las Variables	38
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	42
Antecedentes	42
Bases Teóricas	45
Experiencia en la clasificación de las formas del relieve en Venezuela.....	45
Formas del Relieve y Geoformas.....	46
Clasificación de las Geoformas	48
Atributos de las Geoformas	49
Importancia diferencial de los atributos geomorfológicos	49
Atributos Diferenciantes o Diagnósticos	49
Atributos Accesorios.....	49
Atributos Accidentales	50
Atributos Morfográficos	50
Atributos Morfométricos	52
Atributos Morfogénéticos	52
Distribución del tamaño de las partículas o Granulometría:	53
Estructura Geogenética	53
Estructura Pedogenética.....	53
Consistencia	53
Mineralogía	54

Morfoscopía	54
Atributos Morfocronológicos	55
Ponderación de los atributos en el sistema de clasificación de las Geoformas ...	56
Sistema jerárquico de clasificación de las geoformas propuesto por A. Zinck ...	57
Primera Categoría: Geoestructuras	57
Segunda Categoría: Ambiente Morfogenético.....	58
Ambiente Estructural:.....	58
Ambiente Depositional:	58
Ambiente Erosional	58
Ambiente Disolucional.....	59
Ambientes Mixtos:	59
Tercera Categoría: Paisajes Geomorfológicos.....	59
Valle	59
Planicie	59
Peneplanicie.....	59
Altiplanicie.....	60
Piedemonte	60
Lomerío	60
Montaña.....	60
Cuarta Categoría: Relieve/Modelado.....	61
Quinta Categoría: Litología/Facies	62
Sexta Categoría: Forma de Terreno	62
Limitaciones del Sistema de Clasificación de las Geoformas	62
Sismos y Sismicidad	64
Mecánica de la Fuente Sísmica.....	67
Magnitud, Momento Sísmico e Intensidad.....	68
Magnitud:	68
Magnitud Local (M_l):	69
Magnitud de Ondas Superficiales (M_s):	69
Magnitud de Ondas de Cuerpo (M_b):.....	70
Magnitud del Momento Sísmico (M_w):.....	70

Intensidad	70
Recurrencia de las Magnitudes y Retorno Sísmico	71
Fuente Sísmica y Actividad de la Fuente.....	73
Ondas Sísmicas	74
Ondas Internas o de Cuerpo:	75
Ondas Superficiales.....	76
Aceleración Sísmica, Amplificación y Atenuación Sísmica	76
Eventos Cosísmicos	79
Movimientos en Masa como evento cosísmico	79
Movimientos en Masa.....	80
Tipología de los Movimientos en Masa.....	82
Desprendimientos o Caídas (Fall).....	83
Vuelcos o Desplomes (Topples)	84
Deslizamientos (Slides).....	85
Deslizamientos Rotacionales (Slump).....	86
Deslizamientos Traslacionales	86
Desplazamientos o Expansiones Laterales (Lateral Spread)	87
Flujos (Flow).....	87
Movimientos en masa complejos.....	88
Avalanchas de Rocas:.....	89
Flujos Deslizantes:	89
Riesgo, Amenazas, Vulnerabilidades y Susceptibilidad.....	89
Factores que inciden en la Susceptibilidad a los Movimientos en Masa.....	92
Factores Intrínsecos:.....	92
Distribución del tamaño de las partículas.....	93
Estructura Micromecánica.....	93
Límites de Consistencia.....	94
Cohesión.....	94
Sensitividad Edáfica	94
Capacidad de retener agua.....	95
Efecto Dispersión	95

Horizontes del Suelo (Sequum).....	95
Condiciones Geomorfológicas	95
Factores Condicionantes	96
La cobertura vegetal	96
Contexto Geohidrológico	96
Las estructuras geológicas.....	97
Sismicidad	97
Factores Activadores.....	97
Tecnologías de Información Geográfica.....	98
Sistemas de Información Geográfica (SIG):.....	99
Elementos de un SIG	100
Elementos Clásicos de un SIG	100
Enfoque Actual de los Elementos de un SIG: GIS Evolve	102
Tecnología:.....	102
Análisis:.....	103
Visualización:.....	103
Datos.....	104
La estructura de datos en los SIG	104
Objetos Espaciales en los SIG	105
Modelos de Datos Espaciales	106
Modelo de Datos Vectoriales.....	107
Modelo de Datos Ráster.....	107
Teledetección y Percepción Remota.....	108
La Fuente de Energía:	108
La cubierta terrestre:	108
El sistema sensor:.....	109
Sistema de Recepción:	109
El intérprete.....	109
Usuario Final:.....	109
Aplicaciones de la Teledetección	109
Tratamiento Visual y Digital de Imágenes	110

Criterios de análisis visual	110
Brillo.....	111
Color.....	111
Textura.....	111
Forma-Tamaño	112
Contexto Espacial.....	112
Sombras	112
Patrón Espacial	113
Visión Estereoscópica	113
Período de Adquisición	113
Procesamiento Digital de Imágenes Satelitales.....	113
Clasificación No Supervisada	114
Clasificación Supervisada	115
Sistema Global de Navegación Satelital (GNSS).....	115
Funcionamiento de los GNSS	117
Los WebGIS	118
Tipología de los WebGIS.....	118
Bases Legales	119
CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO	123
Naturaleza y Tipo de Investigación.....	123
Diseño de la Investigación	124
Fases de la Investigación.....	126
Fase 1: Conceptual.....	126
Fase 2: Conceptual Metodológica.....	127
Fase 3: Metodológica – Técnica	130
Fase 4: Validación y Elaboración Teórica.....	131
Fase 5: Transferencia	131
Población y Muestra	132
CAPÍTULO IV ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	135
Descripción de las Características Físico-Naturales en la cuenca del río Torbes .	135
Geología.....	135

Geología Regional y Formaciones Geológicas	138
Formación Mucuchachí (Cm):	139
Formación Sabaneta (Cs):	139
Formación La Quinta (TRjlq):	140
Formación río Negro (Krn):	140
Formación Apón (Ka):	141
Formación Aguardiente (Kag):	141
Formación Capacho (Kcp):	141
Formación La Luna (Kl):	142
Formación Colón (Kc):	142
Formación Mito Juan	143
Unidad Cartográfica Colón-Mito Juan (Kcmj)	143
Formación Barco (Tpb):	143
Formación Los Cuervos (Tplc):	144
Formación Mirador (Temi):	144
Formación Carbonera (Teca):	144
Cuaternario:	145
Fallas	145
Suelos	147
Typic Eutropepts:	151
Typic Tropohumults:	151
Typic Humitropepts:	152
Oxic Humitropepts:	152
Typic Haplumox	153
Ustoxic Humitropepts	153
Lithic Troporthent	154
Typic Troporthent	154
Typic Tropudalfs	155
Oxic Distropepts	155
Ustoxic Tropohumults	156
Typic Tropofluvents	156

Typic Hapludolls	157
Oxic Tropohumults	157
Altimetría de la cuenca y Modelo Digital de Elevación.....	157
Delimitación de la Poligonal.....	166
Pendiente.....	168
Orientación.....	173
Sistema de Drenaje	175
Coberturas	178
Limitaciones de la Imagen Satelital Empleada	180
Interpretación del Mapa de Coberturas	180
Bosque Natural Denso:.....	180
Tierras desnudas o degradadas:.....	182
Pastizales	182
Arbustos y Matorrales	182
Áreas Urbanizadas:.....	182
Áreas abiertas sin o con poca vegetación.....	183
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales.....	183
Sin Clasificar	183
Clima.....	184
Precipitación.....	184
Temperatura	186
Evapotranspiración Potencial.....	189
Delimitación de las Unidades Geomorfológicas en la cuenca del río Torbes.....	191
Unidades Geomorfológicas.....	192
Geoestructuras.....	193
Ambientes Morfogénéticos	197
Tipo de Paisaje	200
Montañas	203
Piedemonte	207
Valle	211
Facies de Tipo de Paisaje	211

Patrones de Sismicidad que inciden en la cuenca del río Torbes	216
Amenaza Sísmica.....	228
Inventario de Movimientos en Masa	231
Unidades Geomorfológicas con mayor Susceptibilidad a Movimientos en Masa Asociados a Sismicidad.....	240
CAPITULO V	244
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	244
Conclusiones	244
Recomendaciones	248
Referencias	249
ANEXOS	265

www.bdigital.ula.ve

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°: 1 Posición relativa de la cuenca del río Torbes – Estado Táchira	31
Figura N°: 2 Perfil Topográfico de las Formas del Relieve	51
Figura N°: 3 Modelo relacional para la clasificación de Movimientos en Masa	83
Figura N°: 4 Flujograma de Sistematización – Primer Objetivo.....	127
Figura N°: 5 Flujograma de Sistematización – Primer Objetivo (Continuación).....	128
Figura N°: 6 Flujograma de Sistematización – Segundo Objetivo.....	128
Figura N°: 7 Flujograma de Sistematización – Tercer Objetivo	129
Figura N°: 8 Flujograma de Sistematización – Cuarto Objetivo y Quinto Objetivo.....	129
Figura N°: 9 Mapa Geológico de la cuenca del río Torbes	137
Figura N°: 10 Fallas Geológicas en la cuenca del río Torbes	146
Figura N°: 11 Mapa Edafológico de la cuenca del río Torbes	149
Figura N°: 12 Comparación entre Sombreados derivados del MDE	161
Figura N°: 13 Captura de pantalla con fórmulas y datos para obtener EMC	164
Figura N° 14 Modelo Digital de Elevación de la cuenca del río Torbes.....	165
Figura N°: 15 Poligonal de la Divisoria de Aguas de la cuenca del río Torbes	169
Figura N° 16 Mapa de Pendiente de la cuenca del río Torbes	170
Figura N°: 17 Distribución por Rango y Superficie de la Pendiente cuenca del río Torbes .	172
Figura N°: 18 Mapa de Orientación del Relieve – cuenca del río Torbes.....	174
Figura N°: 19 Red de Drenaje – cuenca del río Torbes.....	177
Figura N°: 20 Mapa de Coberturas – cuenca del río Torbes	181
Figura N°: 21 Variación Altitudinal de la Temperatura – cuenca del río Torbes	188
Figura N°: 22 Evapotranspiración Potencial – cuenca del río Torbes.....	191
Figura N°: 23 Geoestructuras de Venezuela	194
Figura N°: 24 Facies de las Geoestructuras Venezuela.....	196
Figura N°: 25 Depresión del Táchira	199
Figura N°: 26 Perfil Transversal: Transición Montaña - Piedemonte.....	201
Figura N°: 27 Tipos de Paisaje cuenca del río Torbes	202
Figura N°: 28 Tipo de Paisaje: Montaña – cuenca del río Torbes.....	204
Figura N°: 29 Forma Topográfica – Tipo de Paisaje: Montaña	205
Figura N°: 30 Modelo Digital de Elevación – Tipo de Paisaje: Montaña.....	206
Figura N°: 31 Forma Topográfica – Tipo de Paisaje: Piedemonte.....	209
Figura N°: 32 Forma Topográfica – Tipo de Paisaje: Lomerío.....	210

Figura N°: 33 Facies de Tipo de Paisaje	215
Figura N°: 34 Ecuación de Regresión Sísmica	221
Figura N°: 35 Distribución Temporal Eventos Sísmicos – Tiempo de Retorno	221
Figura N°: 36 Relación Distancia a Fallas – Epicentro – Catálogo Sísmico (1966-2016)....	225
Figura N°: 37 Distribución de Magnitudes de Eventos Sísmicos (1966 – 2016).....	226
Figura N°: 38 Distribución de la Aceleración Máxima Horizontal a Nivel de Roca	227
Figura N°: 39 Distribución Máxima Horizontal a Nivel de Roca – cuenca del río Torbes...	229
Figura N°: 40 Nivel de Amenaza Sísmica de la cuenca del río Torbes.....	230
Figura N°: 41 Mapa de Cobertura: Tierra desnuda o degradada – cuenca del río Torbes	233
Figura N°: 42 Inventario de Movimientos en Masa	235
Figura N°: 43 Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en Masa – cuenca del río Torbes...	238
Figura N°: 44 Susceptibilidad a Movimientos en Masa asociados a Sismicidad.....	242

www.bdigital.ula.ve

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro N° 1 Operacionalización de las Variables – Primer objetivo	38
Cuadro N° 2 Operacionalización de las Variables – Segundo Objetivo	39
Cuadro N° 3 Operacionalización de las Variables – Tercer Objetivo	39
Cuadro N° 4 Operacionalización de las Variables – Cuarto Objetivo	40
Cuadro N° 5 Operacionalización de las Variables – Quinto Objetivo	40
Cuadro N° 6 Formas de la Topografía: Clases de Relieve	51
Cuadro N° 7 Jerarquización de los atributos de las Geoformas	56
Cuadro N° 8 Escalas de Expresión Cartográfica y niveles de abstracción.....	57
Cuadro N° 9 Tipos de Relieve y Modelado	61
Cuadro N° 10 Clasificación de los Movimientos en Masa, según el tipo de movimiento	84
Cuadro N° 11 Muestreo por clases de pendiente	134
Cuadro N°: 12 Distribución de las diferentes unidades cartográficas de suelo.....	150
Cuadro N°: 13 Valores del Error Medio Cuadrático (EMC) para cada MDE.....	164
Cuadro N°: 14 Datos Estaciones Pluviométricas	185
Cuadro N°: 15 Promedios Mensuales Estaciones Pluviométricas	186
Cuadro N°: 16 Algunos atributos Morfométricos de la clase Cordillera – Geoestructuras ..	197-
Cuadro N°: 17 Algunos atributos morfométricos de la Depresión del Táchira.....	198
Cuadro N°: 18 Ejemplo de conceptualización del Código de Nomenclatura Facies	213
Cuadro N°: 19 Distribución de Superficie por Facie de Tipo de Paisaje	214
Cuadro N°: 20 Eventos Sísmicos Período 1966-2016.....	219
Cuadro N°: 21 Probabilidad de Excedencia	222
Cuadro N°: 22 Distribución de la Amenaza Sísmica según la Fuerza de Gravedad	228
Cuadro N°: 23 Clases de Susceptibilidad en función del IDM	236
Cuadro N°: 24 Índice de Densidad de Movimientos en Masa – Facies de Tipo de Paisaje..	237

INTRODUCCIÓN

La complejidad del medio físico natural es la síntesis del conjunto de interrelaciones que ocurren entre las diferentes geosferas que componen el sistema terrestre. El conocimiento y comprensión de esta realidad natural es indispensable para interpretar y explicar el medio físico sobre el cual se llevan a cabo, en forma integral y dinámica, todos los procesos físicos, químicos, biológicos y el conjunto de las actividades humanas. Dada esta complejidad sobre la superficie terrestre, su estudio debe enfocarse según las relaciones de causalidad natural, lo cual implica considerar en primer término el origen, evolución y estructura de los materiales.

En este marco de ideas surge el concepto de Geoforma, definido por Zinck (2012) para referirse a las características de las formas del relieve, igualmente Elizalde (2012) plantea que, en este sustrato superficial, es donde interactúan la atmósfera, hidrosfera, biosfera, litosfera dando origen a gran diversidad de paisajes geográficos en nuestro planeta y, en consecuencia, la diversidad de espacios naturales de Venezuela. Las condiciones geológicas y climáticas propias de cada paisaje son rasgos de la dinámica natural, y a su vez recursos, con sus potencialidades y limitantes, con que las sociedades humanas han interactuado a través de la historia. El análisis de los principales procesos geológicos, edáficos y climáticos y su variabilidad espacial y temporal, permiten, junto con los otros componentes de la realidad físico natural, lograr la interpretación funcional integral y sistémica de la naturaleza.

En virtud de lo anterior se hace necesario sistematizar las geoformas para construir un marco conceptual que permita comprender las condiciones que las generaron y sus atributos en la actualidad, para así, analizar su incidencia en las actividades humanas. Durante los últimos 200 años, se han desarrollado esfuerzos para conformar sistemas de clasificación de las formas del relieve, con diversa eficacia. En Venezuela desde la década de los cincuenta del siglo XX, se han impulsado aproximaciones como las Zinck (1980; 1988) Steegmayer y Bustos (1980) y Elizalde (1983), que devinieron en los

Sistemas de Clasificación de Formas de Paisaje de Elizalde (2012) y el Sistema de Clasificación de las Geoformas propuesto por Zinck (2012). Este último será el marco referencial para el desarrollo del presente trabajo.

Uno de los procesos erosivos que inciden sobre las geoformas son los movimientos en masa, los cuáles según Elizalde y Daza (2000), son formas de erosión, que pueden manifestarse en distintos lapsos y con diversas dimensiones. Alcántara (2000), plantea que estos procesos afectan fundamentalmente las laderas de las montañas, lo que incide con suma frecuencia en los grupos humanos asentados en las inmediaciones de éstas, lo cual hace necesario comprender los mecanismos que rigen su funcionamiento para mitigar los daños que se pudieran generar. En este sentido Zinck (1996) plantea que los procesos de remoción de masas pueden ser analizados partiendo de tres factores fundamentales: los intrínsecos, relacionados con las propiedades internas de los materiales; los condicionantes, que actúan sobre los materiales propiciando las condiciones para su desplazamiento y finalmente los activadores, que son los responsables directos del inicio del fenómeno.

Al respecto diversos autores como Zinck (1996), Alcántara (2000), entre otros plantean que uno de los factores que es condicionante, pero a su vez es activador, es la sismicidad, término que hace referencia a la ocurrencia continua de eventos sísmicos sin considerar su magnitud en un área determinada. Audemard (2002), plantea que Venezuela se encuentra en el área de interacción entre un conjunto de placas y bloques que han originado innumerables sismos de diversa magnitud. En estos límites, se han generado complejos sistemas de fallas que cruzan el país, entre los cuales se puede mencionar el Sistema de Fallas de Boconó, que se inicia en las estribaciones de la Cordillera de la Costa y se extiende hasta la Depresión del Táchira. Particularmente, la cuenca del río Torbes se encuentra en esta última unidad, y es aquí donde este sistema de fallas cambia de orientación hacia el Oeste, en las cercanías de la población de Cordero, para llegar hasta la frontera con Colombia. Lo que permite inferir, que la sismicidad del área puede aumentar la susceptibilidad a movimientos en masa e incluso detonarlos.

Asimismo, el proceso de transformación espacial iniciado en Venezuela a finales de los años 40 cuyas repercusiones alcanzan hoy día niveles exacerbados, respondieron a las condiciones de un momento histórico en el que la Venezuela agrícola pasa a ser petrolera y en la que el campesino deja su sombrero de paja y sus herramientas de siembra para usar casco y ser un asalariado de la naciente industria petrolera. Este hecho trastocó las pautas que regían la sociedad tradicional, modificando sus costumbres y modos de vida, era necesario la búsqueda de espacios para el desarrollo de allí surge la ciudad como elemento integrador de la dinámica social y el desarrollo económico. No obstante, el desarrollo de la ciudad en Venezuela fue un proceso acelerado y no controlado por lo que, en menos de 30 años, entre la década de los 40 y los 70 más del 50% de población habitaba en las ciudades.

En este sentido, se considera que el proceso de ordenamiento territorial en los espacios urbanos dentro de la cuenca del río Torbes, no responde a una lógica espacial eficaz, por el contrario es consecuencia de sucesivas etapas históricas vinculadas al crecimiento urbano, el éxodo rural y la llegada de inmigrantes colombianos. Aunado a ello, existen una serie de condiciones físico naturales de origen tectónico y morfoestructural que inciden directamente en la inestabilidad del área entre ellos la presencia de una conformación de materiales no consolidados pertenecientes al cuaternario sin diferenciar, lo que implica la existencia de conglomerados, arcillitas y areniscas rocas de tipo sedimentario comunes en sectores donde la actividad pedogenética es incipiente. (Ferrer; 1977). Por otra parte, el sistema de fallas localizadas en la cuenca del río Torbes ejerce una continua presión sobre las estructuras sedimentarias lo que aunado a índices de precipitación elevados origina que los procesos de remoción de masa sean recurrentes en el área.

En torno a lo planteado, se pretende diagnosticar las variables físico naturales de la cuenca del río Torbes para construir una base de datos geoespacial, lo que sumado a la elaboración de un inventario de los movimientos en masa dentro de la cuenca, permitirá verificar en ambiente SIG, la relación existente entre estos con los procesos asociados a las estructuras falladas. Posteriormente y en virtud del mapa obtenido establecer un

mapa de la susceptibilidad a movimientos en masa asociados a sismicidad. Es importante señalar que la utilización de las Tecnologías de Información Geográfica, favorece la realización de un estudio más preciso y tomando en cuenta múltiples variables que pueden incidir en los procesos geofísicos dentro de la cuenca.

El trabajo está estructurado en cinco capítulos: el primer capítulo, el problema, está conformado por el planteamiento del problema, en el que se describe la situación objeto de interés, redactado de lo general a lo particular y finalizando con una serie de interrogantes que son parte de las premisas del trabajo, asimismo contiene los objetivos de la investigación; uno general y cinco específicos diseñados para dar una solución efectiva a la problemática, la justificación en la que se explica la importancia de la investigación y finalmente el cuadro de operacionalización de las variables en donde se categorizan cada uno de los elementos a estudiar con sus respectivos indicadores técnicas e instrumentos.

El segundo capítulo, marco teórico, inicia con la descripción de los antecedentes de la investigación (desde el análisis de la metodología y el objetivo coincidente) que aportan información valiosa para el trabajo a ejecutar, las bases teóricas vinculadas al cuadro de variables proporcionan el sustrato conceptual al trabajo realizado, permitiendo contrastar los postulados teóricos con la realidad, finalmente las bases legales con mención especial a la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela del Territorio, la Ley Orgánica del Ambiente y Ley de Aguas .

En el tercer capítulo, marco metodológico, se esboza la naturaleza y tipo de investigación con énfasis en el enfoque de investigación mixta o cualicuantitativa, se resalta el diseño de investigación seleccionado, las características de la población y la muestra y se incluyen además las cinco fases o etapas sugeridas en el marco de investigaciones de geografía aplicada.

En el cuarto capítulo, análisis y presentación de los resultados, se explican detenidamente cada uno de los pasos requeridos para el procesamiento, evaluación e interpretación de los datos, en el mismo se muestran las características físico naturales

presentes en el área de estudio, el análisis de las características altimétricas de la cuenca, así como la delimitación de la poligonal. Asimismo, se describen los pasos para la delimitación de las geoformas en los diversos niveles categóricos de la clasificación propuesta por Zinck (2012), se establecieron los patrones de sismicidad que afectan la cuenca del río Torbes y se elaboró un análisis de los niveles de amenaza sísmica, finalmente se analizó la susceptibilidad a movimientos en masa a partir del índice de densidad de cicatrices a partir de un inventario de movimientos en masa.

En el quinto capítulo, conclusiones y recomendaciones, donde se expresan las consideraciones finales con respecto a los objetivos alcanzados.

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

Planteamiento del Problema

En el transcurrir de los años, el ser humano ha convivido en íntima relación con el medio físico, participando en muchas de las transformaciones que en él ocurren, dinamizando la cotidianidad y originando nuevas formas de ocupar el espacio geográfico. Es importante recordar que el planeta tierra, es un sistema dinámico, donde una de las manifestaciones superficiales son las formas del relieve, las cuales tienen su génesis en la interacción de procesos endógenos activados por la energía interna del planeta, tales como la orogénesis, la epirogénesis y la actividad ígnea y procesos exógenos como la meteorización, erosión y sedimentación, impulsados por otras fuentes de energía entre ellas: la radiación solar y la energía potencial gravitatoria. Las formas del relieve, son el objeto de estudio de la Geomorfología según lo planteado por Gutiérrez (2009), y son producto según Elizalde (2012) de los intercambios que ocurren en la fase superficial del ciclo geológico, donde interactúan los componentes líquidos, sólidos y gaseosos, que conforman la hidrosfera, la biosfera, las capas externas de la litosfera y la atmósfera.

En este sentido, han surgido múltiples vocablos para referirse a las formas del relieve, todos derivados de las diversas traducciones hechas del término landform, el cual fue acuñado por la escuela norteamericana encabezada por Morris a finales del siglo XIX para referirse a los atributos superficiales de la corteza terrestre (Sala; 2004). El Fondo de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO), en su guía para la Descripción de Suelos (2009), plantea el uso del término geoforma para referirse a todos los tipos de formas del relieve, por su parte Elizalde (2012) considera el término paisaje geomorfológico para referirse a esta porción superficial del planeta, en este sentido, Zinck (2012), plantea el uso del término geoforma, para expresar: "...las

características de las formas del relieve, sin considerar su origen, dimensión y nivel de abstracción” (p. 51).

A partir de esto, se han propuesto diversos sistemas de clasificación para estudiar a distintas escalas y con diferentes niveles de profundidad las formas del relieve o geoformas. Por ejemplo, Tricart en el año 1979 planteó en Francia un esquema donde las formas del relieve se agrupan en unidades geomorfológicas, entendidas como un conjunto territorial con características homogéneas desde una perspectiva fisiográfica. En Venezuela, se ha utilizado extensamente el sistema de clasificación propuesto por Zinck (1988), especialmente en áreas aluviales, así mismo, se ha empleado particularmente en áreas montañosas, la clasificación de Steegmayer y Bustos (1980), y el sistema de Elizalde (1983), de amplia aplicación, en diferentes trabajos efectuados en el sistema montañoso de la Costa.

En concordancia con lo expuesto, el sistema propuesto por Zinck (1988), fue modificado para incorporarle una extensa experiencia obtenida por el autor en países latinoamericanos y africanos, este trabajo fue publicado en el texto Geopedología del año 2012, en el cual se plantea la necesidad de clasificar jerárquicamente las geoformas, utilizando una serie de niveles, donde se combinan elementos propios del componente epigeo, el cual es percibido a partir de una serie de características morfográficas y morfométricas, y el componente hipogeo donde se analiza la composición de la forma, a partir de sus propiedades genéticas y estratigráficas.

En esta secuencia de ideas, Elizalde (2012), indica la importancia de clasificar los paisajes geomorfológicos llamados por Zinck (2012) geoformas, ya que esta clasificación permite una serie de beneficios para construir marcos de referencia para la correlación regional e internacional de paisajes, al igual que se podrá identificar y conocer la distribución espacial de los indicadores de riesgo ambiental de diferentes tipos de uso de la tierra, y para la selección de áreas adecuadas para proyectos agroambientales y finalmente para la generación de cartografía geomorfológica que permita analizar elementos edáficos, geológicos, fisiográficos y su incidencia en las características ambientales de diversas regiones. Al respecto, Palacios y De Marcos

(1996), resaltan la importancia de dicha cartografía puesto que permite comprender los riesgos asociados a los procesos geomorfológicos y delimitar las áreas vulnerables a éstos, expresando en mapas las estructuras presentes en una región, así como la morfogénesis de los materiales y las configuraciones presentes en la interfase: atmósfera-litosfera-biosfera-hidrosfera.

Al respecto, Alcántara (2000), plantea que: "...es en esta interfase donde ocurren los movimientos en masa, movimientos de ladera o de remoción en masa" (p. 77), los cuales son el producto de diversos elementos, donde la configuración del relieve y evolución de las laderas juegan un papel determinante (Aristizábal, Martínez y Vélez, 2010). La definición más simple y ampliamente aceptada es la dada por Cruden (2001), quien plantea el término: "...como el movimiento de una masa de rocas, suelo o derrubios, en un terreno con la suficiente pendiente para permitir su desplazamiento en un sentido descendente y que puede ser activado por diversos fenómenos" (p. 211).

Por su parte, Elizalde y Daza (2000), plantean que los movimientos en masa, son formas de erosión cuyas consecuencias pueden manifestarse en paisajes (geoformas, formas de relieve) de diversas dimensiones, en lapsos diferentes y con efectos desde ínfimos hasta catastróficos. Asimismo, Zinck, López, Metternitch, Shresta y Vázquez-Selem (2001), definen los movimientos en masa como procesos erosivos que conllevan el desplazamiento de altos volúmenes de material sedimentario, regolitos, rocas, suelo; originados por diversas causas como pluviosidad, sismicidad, entre otros, y que ocurren fundamentalmente en los estratos más superficiales. En general, se reconoce que los movimientos en masa, son parte de los procesos exógenos responsables de la génesis de las formas de relieve (Elizalde; 2012).

Para definir las tipologías de los movimientos en masa se han planteado múltiples clasificaciones. Al respecto Alcántara (2000) plantea la diversidad de enfoques utilizados para este fin, los cuáles en su mayoría han tomado en cuenta los atributos morfológicos de los movimientos, el tamaño y tipo de los materiales, la antigüedad del movimiento, el grado de actividad y el tipo climático. El autor afirma que la clasificación más aceptada es la dada por Varnes (1978) y complementada por

Hutchinson (1988), donde el mecanismo del movimiento y los materiales desplazados definen los siguientes tipos: desprendimientos, caídas, vuelcos, desplome de materiales, deslizamiento rotacional o traslacional de ladera, deslizamiento planar, flujos, expansiones y, por último, movimientos complejos

Al respecto Zinck (1996) afirma que: "... en la naturaleza, la separación categórica en clases puras de movimientos en masa queda frecuentemente enmascarada por la variedad de formas resultado de la combinación de procesos" (p. 29). Por tanto, plantea una evolución hacia un modelo general de los movimientos en masa partiendo del modelo gráfico de Carson y Kirkby (1972), en donde cualquier proceso específico del movimiento en masa será resultado de la combinación de tres elementos: la velocidad del movimiento, la plasticidad del mismo y nivel de humedad en los materiales.

Aunado a esto, Zinck (1996), plantea la existencia de tres grupos de factores que inciden directamente en los movimientos en masa, el primero de ellos lo define como factores intrínsecos que son las propiedades mecánicas, físicas, químicas, mineralógicas y morfológicas que se combinan para conferirle una susceptibilidad propia al material edáfico para moverse en masa. En segundo lugar, los factores condicionantes, que según Cruden y Varnes (1996), afectan en un período de tiempo variable y con una magnitud determinada los materiales, entre estos factores se mencionan las características geológicas, la precipitación, la actividad sísmica, el grado de meteorización, la acción de otros agentes erosivos, la deforestación, la expansión y contracción de las arcillas y la actividad antrópica. Finalmente, los factores detonantes los cuáles activan el movimiento, entre estos la precipitación, la actividad antrópica y la sismicidad. Es importante resaltar que en los trabajos de Zinck (1996; 2012), Alcántara (2000), Ibáñez (2004), Sieron (2006) Aristizábal; Martínez y Vélez (2010) que analizan los factores que inciden en los movimientos en masa, coinciden en plantear que tanto la sismicidad como la precipitación, juegan un papel doble, puesto que no sólo activan el movimiento, sino también pueden actuar de manera constante favoreciendo la disposición de los materiales a desplazarse.

Particularmente la sismicidad, detonante importante de movimientos en masa, es entendida según Ordaz (1999), como: "...el número de veces que ocurre un sismo de una magnitud dada" (p.22), en un área definida, durante un tiempo determinado. Del mismo modo, Babín y Gómez (2010), plantean que el concepto de sismicidad está referido a la actividad sísmica en un lugar específico, estableciendo niveles de sismicidad a partir de relacionar la magnitud y el número de sismos en un sitio, área, región entre otros. Los sismos según Nava (2008), son movimientos del terreno originados por la energía elástica que se libera como consecuencia principalmente del rompimiento de los materiales rocosos que se encuentran en el interior del planeta. Por su parte, Gutiérrez (2009) define los sismos como una liberación súbita de energía debido al desplazamiento de bloques en el interior de las placas tectónicas y que en su mayoría se distribuyen en las zonas donde limitan estas placas, particularmente en bordes de tipo convergentes y transformantes y en menor medida en los bordes divergentes.

Venezuela, según Audemard (2001), está ubicada en una zona de interacción de placas tectónicas mayores y de estas con bloques tectónicos menores, lo que origina según Orihuela (2007), una franja, cuya actividad tipo se inicia desde el límite Plio-Pleistoceno, donde se encuentran presentes componentes convergentes y transformantes. Una primera área de interacción, se ubica al norte del país, entre la Península de Paria y la Depresión de Yaracuy, donde la placa Caribe se desplaza hacia el Este con respecto a la placa Sudamericana, con rangos de velocidad que oscilan entre 5 y 30 mm/año (Audemard, 2001), originando el Sistema de Fallas San Sebastián-El Pilar, la segunda sección también al norte donde el bloque de Maracaibo, es afectado por la colisión del arco Centroamericano y el bloque de Bonaire, con el borde noroeste de la placa Sudamericana, lo que origina la existencia de la falla Oca-Ancón (Audemard, 2001) y finalmente al occidente del país, donde según el precitado autor, producto de esfuerzos relacionados al comportamiento de la placa de Nazca, que converge con la placa Sudamericana, proceso que se vio influenciado por la acción del bloque de Bonaire sobre el bloque de Maracaibo, a su vez, el desplazamiento hacia el

Este de la placa del Caribe por efecto de su interacción con la placa Norteamericana, derivó una serie de esfuerzos compresionales, extensionales y de cizalla que dieron origen al Sistema de Fallas de Boconó que se extiende desde la depresión del Táchira hasta el Mar Caribe, discurriendo por la Cordillera de Mérida.

De acuerdo con Alvarado et. al. (2015), la falla Oca-Ancón y los sistemas de fallas Boconó y San Sebastián-El Pilar, forman parte del eje sismogénico principal que se encuentra al norte y al Oeste de Venezuela. Orihuela (2007), plantea que estos sistemas, presentan un alto nivel de sismicidad con un promedio de siete a ocho sismos diarios de magnitudes bajas (2,5 Mw) y uno o dos mensuales de magnitudes medias (4,5 Mw), según datos de la Fundación Venezolana de Investigación Sísmica (FUNVISIS).

Aunque existe incertidumbre, respecto a la relación causal de los grandes sismos ocurridos en el occidente venezolano, un gran número de autores entre ellos Audemard (2014), adjudican los principales sismos históricos e instrumentales (contemporáneos) ocurridos en esta parte del país al sistema de fallas de Boconó. Este sistema, está conformado según Schubert, Vivas y Estévez (1993):

Por un conjunto de fallas paralelas rumbodeslizantes dextrales (hacia la derecha) de orientación Noreste, coexistiendo con una serie de fallas inversas con la misma orientación, en ambos piedemontes andinos. Se encuentra expuesta desde el Mar Caribe hasta la Depresión del Táchira, en donde han ocurrido eventos sísmicos con magnitudes que han alcanzado y superado el nivel 6 Ms, por tanto, es considerada una zona de fallas muy activas. (p. 98)

Del mismo modo, Audemard (2010) precisa, que esta estructura presenta diferentes velocidades en cada una de las secciones en las que se ha dividido, en su sección Norte entre Morón y Cabudare, tiene una velocidad de 1-3 mm/año, en la sección entre Barquisimeto y La Ciénaga (municipio Anzoátegui, estado Lara) se desplaza a un ritmo de 5 mm/año, entre La Ciénaga y Mucuchíes su velocidad es de 9 mm/año, entre Los Frailes y Santa Cruz de Mora, su tasa de movimiento varía de 6 a 9 mm/año, y finalmente la sección sur entre San Juan de Lagunillas y Colombia oscila desde los 5,2 mm/año al Suroeste de Mérida, disminuyendo progresivamente hasta los 0,9 mm/año en las cercanías de San Cristóbal, el mencionado autor plantea, que probablemente esto

se deba a la ramificación que sufre el sistema de fallas principal al entrar al territorio tachirenses.

En el Táchira, el sistema de fallas de Boconó cruza la entidad de Noreste a Suroeste, derivándose en quiebres subsidiarios. Ferrer en su análisis en 1977, señaló la existencia de tres sectores principales: La Grita, al norte del Estado Táchira, Capacho, que transita transversalmente desde el Zumbador hasta la frontera con Colombia y San Cristóbal, concentrado en el suroeste de la Serranía de la Maravilla. Posteriormente Audemard (2000; 2002; 2014), planteó un agrupamiento diferente de los sectores, a partir del desarrollo de nuevas metodologías en la identificación y análisis de las estructuras asociadas al sistema de fallas, señalando que en el Táchira, se ubica la sección sur identificada en el sistema de clasificación de fallas cuaternarias con el código VE-6A, el cual discurre desde San Juan de Lagunillas en el estado Mérida, cruzando luego en las inmediaciones de San Cristóbal hacia el Oeste 90° hasta la frontera con Colombia, donde se une a los sistemas de Bramón y Chinacotá en las cercanías del inductor de Pamplona, presentando fallas menores paralelas, tales como Zumbador, Loma de Pío, Uribante, Caparo, entre otras.

Particularmente en el área correspondiente a la cuenca del río Torbes los trabajos de Ferrer (1977), Chacón y Pernía (2010) y Audemard (2014) señalan que la traza principal del sistema de Fallas de Boconó, se identifica con el nombre de Falla de Capacho, así mismo, se reportan múltiples ramificaciones de la falla, asociadas al sistema principal, entre estas, las fallas de San Cristóbal, El Zumbador y Loma de Pío, lo que conlleva, según lo establecido por FUNVISIS (2008), a un nivel de amenaza sísmica elevada, que podría afectar un gran número de habitantes establecidos en los espacios urbanizados, en las inmediaciones de estas estructuras.

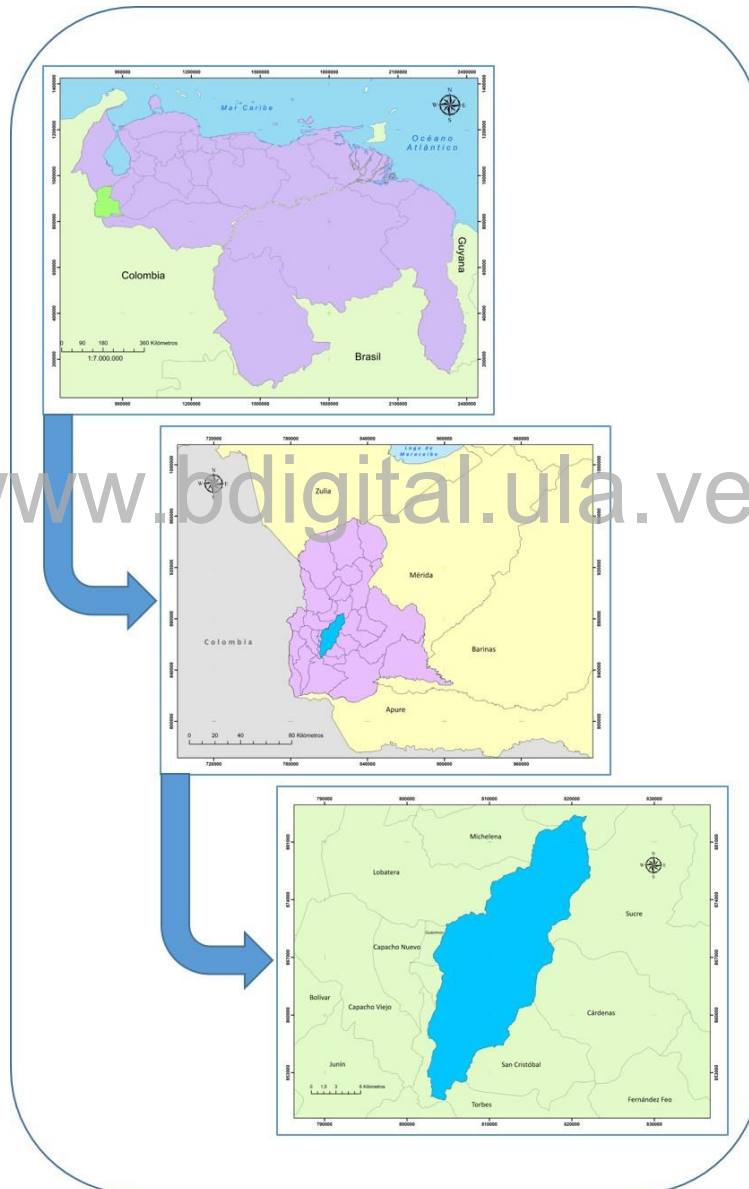
La cuenca del río Torbes, ocupa aproximadamente 30452¹ ha, en la región suroccidental del Estado Táchira (Ver Figura N°: 1), en este espacio se establecen un conjunto de centros poblados que concentran cerca del 45% de la población de la

¹ Información extraída de la delimitación de la cuenca.

entidad, según el censo del 2011 (INE, 2012), asentados en las inmediaciones de los cauces que forman la red hídrica de la cuenca, por ello son afectados ocasionalmente por eventos naturales asociado a la dinámica propia de los cursos de agua.

Figura N°: 1

Localización de la cuenca del río Torbes – Estado Táchira



Fuente: Elaboración Propia – Año: 2016

En general, como muchas de las poblaciones en paisaje montañoso, los centros poblados en la cuenca del Torbes, son frecuentemente afectados por movimientos en masa que trastocan las diferentes actividades, su ocurrencia se asocia a un conjunto de interacciones muy complejas donde destaca entre otros la incidencia de los elementos del clima, especialmente eventos lluviosos. Sin embargo, es importante señalar que, en el límite de la cuenca, se han identificado un conjunto de estructuras geológicas asociadas al sistema de Fallas de Boconó (Ferrer, 1977; Schubert y Costa, 1986; Guerra y González, 2006). Varias de estas estructuras han sido relacionadas por estudios de sismicidad histórica (Ferrer, 2005) a eventos sísmicos de considerable intensidad entre los cuáles se pueden mencionar los sismos de 1875, 1894 y 1932. Asimismo, boletines de sismicidad reciente (FUNVISIS, 2015) han vinculado dichas estructuras a eventos sísmicos tales como el de 1963, 1977, 1988, entre otros.

En varios de estos eventos sísmicos, según Rodríguez y Audemard (2006) se han reportado procesos co-sísmicos, tales como: "...deslizamientos de laderas" (p. 32) posteriores a los sismos de 1963 y 1977, y particularmente fenómenos de licuefacción de sedimentos, también denominados flujos por Zinck (1996), inducidos por sismos que han sido catalogados en el inventario nacional de estos fenómenos de FUNVISIS (2008), allí destaca el fenómeno ocurrido en el Barrio La Escondida en las cercanías de San Cristóbal, en el año 1981.

En este orden de ideas, es importante señalar que las cuencas hidrográficas son una unidad espacial relevante para analizar variables físico-naturales y su incidencia en las actividades humanas (ONU, 1978; Méndez, 1990; Dourojeanni, 1994; Londoño, 2001; Tapia, 2005; Maas, 2005; García, 2008; USGS, 2008; Gil, 2009; Woolsink, 2013). En efecto, las posibilidades de diferenciación espacial y de integración conceptual de los procesos físico-naturales que esta unidad brinda, hacen de ella un marco geográfico propicio para los estudios ambientales. En la cuenca se estructuran relaciones múltiples entre factores naturales y humanos en un espacio que no solo es delimitado por los sistemas fluviales, sino que además históricamente se circunscribe en un proceso de poblamiento y utilización social del espacio (Arias y Duque, 1992). La cuenca facilita

el análisis de la relación entre los habitantes asentados, aunque estos se encuentren por razones político-administrativas en entidades diferentes, debido a su dependencia común de un sistema hídrico compartido que incide directamente en su forma de organizar el espacio.

Es necesario destacar, que en la cuenca del Torbes, se presentan movimientos en masa que alteran la cotidianidad de los núcleos poblacionales, pudiendo mencionar como ejemplos: los movimientos en la Troncal 9 Montaña, que frecuentemente obstruyen el flujo vehicular en sectores como La Gransonera, donde se aprecia un movimiento en masa con forma de herradura, propiciado entre otros, por la aparente eliminación de la cobertura vegetal. Igualmente, a la altura de la quebrada La Colorada, se puede apreciar el efecto del desprendimiento de materiales debido a la inestabilidad del terreno, asociadas a las condiciones geológicas del sector (García y Puente, 2010).

La ciudad de San Cristóbal, núcleo urbano más relevante en la cuenca del Torbes, concretamente en los últimos cincuenta años, ha vivido un profundo proceso de urbanización y expansión del área urbana a los márgenes de la ciudad, que ha traído como consecuencia una distribución anárquica de los asentamientos, sin tomar en cuenta factores físico-naturales y respondiendo únicamente a intereses sociales y económicos (García y Puente, 2010)

La situación referida pudiera tener su origen, en la falta de una planificación territorial adecuada, aunado al no cumplimiento del ordenamiento territorial establecido en las diversas leyes promulgadas para tales fines. Parece evidente, que, al no aplicar las medidas de prevención necesarias, las consecuencias materiales y humanas de los movimientos en masa en la cuenca irán aumentando con el paso del tiempo. Es por tanto imprescindible, que los organismos responsables de la mitigación de riesgos, a diversas escalas, y que tienen su foco de acción en los diversos municipios dentro de la cuenca, cuenten con información cartográfica actualizada que les permita responder a las consecuencias de los fenómenos naturales asociados a la dinámica hidrometeorológica de la cuenca y particularmente a los movimientos en masa.

Ante esta situación se plantean las siguientes interrogantes:

¿Cuál es la susceptibilidad a desarrollar movimientos en masa asociados a sismicidad, en las unidades geomorfológicas, presentes en la cuenca del río Torbes?
¿Cuáles son las características físico-naturales presentes en la cuenca del río Torbes?
¿Cuáles son las unidades geomorfológicas presentes en el área de estudio, según la propuesta metodológica de Alfred Zinck? ¿Qué patrones de sismicidad inciden en la cuenca del río Torbes, según la guía metodológica para la evaluación de riesgos por fenómenos de remoción en masa de Ingeominas? ¿Qué técnicas de percepción remota pudieran emplearse para la elaboración de un inventario de los movimientos en masa del área objeto de trabajo? ¿Qué unidades geomorfológicas presentes en la cuenca del río Torbes, son más susceptibles a desarrollar movimientos en masa asociados a sismicidad?

Objetivos de la Investigación

Objetivo General

Evaluar la susceptibilidad a desarrollar movimientos en masa asociados a sismicidad, en unidades geomorfológicas definidas según la propuesta metodológica de Alfred Zinck, empleando Tecnologías de Información Geográfica, en la cuenca del río Torbes, Estado Táchira.

Objetivos Específicos

- Describir las características físico-naturales presentes en la cuenca del río Torbes.
- Delimitar las unidades geomorfológicas presentes en el área de estudio, según la propuesta metodológica de Alfred Zinck (2012).
- Elaborar mediante técnicas de percepción remota un inventario de los movimientos en masa del área objeto de trabajo.

- Establecer los patrones de sismicidad que inciden en la cuenca del río Torbes, según la guía metodológica para la evaluación de riesgos por fenómenos de remoción en masa de Ingeominas (2001).
- Identificar unidades geomorfológicas con mayor susceptibilidad a desarrollar movimientos en masa asociados a sismicidad en la cuenca del río Torbes del Estado Táchira.

Justificación

La Geografía como ciencia del espacio geográfico y la Geomorfología como ciencia que estudia las formas relieve, utilizan diversos niveles de abstracción para comprender los fenómenos inherentes a su objeto de estudio. En este sentido, ambas ciencias han utilizado las cuencas hidrográficas como unidades básicas de análisis para comprender las diferentes variables físico-naturales, sociales, económicas y ambientales que interactúan en este marco espacial. (García; 2008)

La cuenca del río Torbes, si bien no es tan extensa como otras del occidente venezolano, tiene relevancia por los procesos de ocupación y asentamiento poblacional ya que en sus límites se asientan núcleos urbanos que concentran cerca del 45% de la población del Estado Táchira. Por tanto, comprender sus características y condiciones físico naturales, así como su susceptibilidad frente a la ocurrencia de movimientos en masa, es de vital importancia para mitigar los riesgos a las que están expuestos los grupos humanos que allí residen, aunado al hecho de que es un área con una considerable actividad sísmica que puede actuar como factor condicionante y detonante de los ya mencionados eventos. (Zinck, 1996)

En este sentido, la presente investigación pretende a través de un análisis apoyado en un estudio físico natural, identificar sectores con alto grado de susceptibilidad a movimientos en masa asociados a sismicidad, generando información cartográfica importante para los organismos encargados de la prevención de riesgos, y brindando datos que permitan la actuación oportuna y pertinente frente a posibles desastres.

Este trabajo, representa desde un punto de vista teórico un valioso cúmulo de información que permitirá analizar un conjunto de variables físico-naturales (altitud, pendiente, orientación, coberturas, hidrografía, suelos, geología, temperatura, entre otros), así como un compendio de datos asociados a la conceptualización de movimientos en masa, y el papel de los sismos como factor detonante y condicionante para la ocurrencia de estos eventos, información fundamental para ser considerada en los diversos planes y proyectos para el desarrollo de la región.

Es importante señalar, que los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se han constituido como una herramienta fundamental para estudiar las variables físicas, dada su capacidad de analizar e interrelacionar las diferentes capas temáticas disponibles para un área determinada, y a partir de allí, comprender los diversos procesos que ocurren en la superficie terrestre y su interrelación con los procesos que ocurren en profundidad. En este sentido, los movimientos en masa como parte de los procesos exógenos (Elizalde; 2012; Zinck; 1996) pueden presentarse en diversas magnitudes y ser activados por distintas causas, por ello han sido ampliamente modelizados utilizando SIG en diversos estudios efectuados a diferentes niveles de abstracción.

Particularmente en Venezuela, se han desarrollado múltiples investigaciones con esta metodología, en el Táchira se ha utilizado para estudiar múltiples variables o como herramientas de elaboración y análisis de cartografía. La presente investigación contiene elementos en cuanto al uso de los SIG como herramienta no sólo para caracterizar elementos físico-naturales sino también, para comprender la incidencia que la sismicidad, tiene sobre los movimientos en masa, a través del análisis espacial.

Así mismo, este estudio aplica la propuesta metodológica para clasificar e identificar las geoformas, desarrollada por Alfred Zinck en diversos trabajos (1980; 1988; 2012), en la cuenca del río Torbes, combinando de una manera jerárquica, las expresiones superficiales del relieve junto con las estructuras geológicas y los atributos edáficos.

Desde un punto de vista práctico, está investigación brinda insumos para los organismos responsables de la mitigación y prevención de riesgos, puesto que permitirá

identificar las áreas susceptibles a sufrir movimientos en masa de acuerdo a las características intrínsecas de los materiales, y la incidencia que la sismicidad pueda tener en los mismos, que combinado con estudios posteriores donde se relacione también el efecto de la precipitación y las acciones antrópicas, permitirá categorizar los niveles de amenaza a movimientos en masa dentro de la cuenca, lo que aunado a la capacidad de actualización permanente que dota el uso de los SIG, facilitará diseñar mecanismos de reacción inmediata a los diversos eventos que se puedan presentar.

www.bdigital.ula.ve

Operacionalización de las Variables

Cuadro N° 1

Operacionalización de las Variables – Primer objetivo

<i>Objetivo</i>	Describir las variables físico-naturales presentes en la cuenca del río Torbes del Estado Táchira.				
<i>Variable</i>	<i>Dimensión</i>	<i>Indicador</i>	<i>Subindicador</i>	<i>Técnica</i>	
Características Físico-Naturales. Entendidas como elementos físicos que intervienen en la configuración del paisaje natural.	Físico-Natural	Suelos	Propiedades Químicas	Interpretación de Mapas Edafológicos.	
			Propiedades Físicas		
			Propiedades Mineralógicas		
		Rocas	Formaciones	Interpretación de Mapas Geológicos y Estructurales	
			Estructuras		
		Relieve	Altitud	Procesamiento e Interpretación de Modelos Digitales de Elevación	
			Pendiente		
			Orientación		
		Coberturas	Tipos de Cobertura	Procesamiento e Interpretación de Imágenes Satelitales	
		Red de Drenaje	Patrón de Drenaje	Análisis Morfométrico	
			Densidad de Drenaje		
			Longitud de Drenaje		
		Clima	Temperatura	Análisis de Información Climática	
Evapotranspiración					
Precipitación					

Fuente: Objetivos de la Investigación

Cuadro N° 2

Operacionalización de las Variables – Segundo Objetivo

<i>Objetivo</i>	Delimitar las unidades geomorfológicas presentes en el área de estudio.			
<i>Variable</i>	<i>Dimensión</i>	<i>Indicador</i>	<i>Subindicador</i>	<i>Técnica</i>
Geoformas. Describen las formas del relieve sin considerar su origen y nivel de abstracción.	Espacial	Componente Epigeo	Morfometría	Procesamiento y Análisis de Modelo Digital de Elevación
			Morfografía	
		Componente Hipogeo	Atributos Morfogenéticos	Análisis e Interpretación de Mapas utilizando SIG
			Atributos Morfocronológicos	

Fuente: Objetivos de la Investigación

www.bdigital.ula.ve

Cuadro N° 3

Operacionalización de las Variables – Tercer Objetivo

<i>Objetivo</i>	Establecer los patrones de sismicidad en la cuenca del río Torbes.			
<i>Variable</i>	<i>Dimensión</i>	<i>Indicador</i>	<i>Subindicador</i>	<i>Técnica</i>
Patrones de Sismicidad. Son parámetros que se establecen al analizar la sismicidad de un área.	Instrumental	Retorno Sísmico	Fecha	Análisis Espacial
			Coordenadas Epicentro	
			Profundidad Hipocentro	
			Magnitud	
		Fuente Sísmica	Fallas Activas	Análisis Espacial
			Actividad de la Fuente	

Fuente: Objetivos de la Investigación

C.C.Reconocimiento

Cuadro N° 4

Operacionalización de las Variables – Cuarto Objetivo

<i>Objetivo</i>	Elaborar un inventario de los movimientos en masa del área objeto de estudio			
<i>Variable</i>	<i>Dimensión</i>	<i>Indicador</i>	<i>Subindicador</i>	<i>Técnica</i>
Movimientos en Masa. Son procesos erosivos, cuyo principal agente es la gravedad.	Espacial	Localización	Posición Absoluta	Procesamiento e Interpretación de Imágenes Satelitales
		Forma y Tamaño	Extensión	
			Huella	

Fuente: Objetivos de la Investigación

Cuadro N° 5

Operacionalización de las Variables – Quinto Objetivo

<i>Objetivo</i>	Identificar unidades geomorfológicas con mayor susceptibilidad a desarrollar movimientos en masa asociados a sismicidad en la cuenca del río Torbes del Estado Táchira.			
<i>Variable</i>	<i>Dimensión</i>	<i>Indicador</i>	<i>Subindicador</i>	<i>Técnica</i>
Susceptibilidad. Definida como el grado de propensión que tiene un área a que en ella se genere o resulte afectada por un fenómeno natural debido a sus condiciones propias internas.	Factores Intrínsecos	Material Suelo	Propiedades Mecánicas	Análisis e Interpretación de Mapas de suelo
			Propiedades Físicas	
			Propiedades Químicas	
			Propiedades Mineralógicas	
		Geomorfología	Componente Epigeo	Procesamiento y Análisis de Mapa de Geoformas
Componente Hipogeo				

(Continuación del Cuadro N° 5)

Objetivo	Identificar unidades geomorfológicas con mayor susceptibilidad a desarrollar movimientos en masa asociados a sismicidad en la cuenca del río Torbes del Estado Táchira.			
Variable	Dimensión	Indicador	Subindicador	Técnica
Susceptibilidad. Definida como el grado de propensión que tiene un área a que en ella se genere o resulte afectada por un fenómeno natural debido a sus condiciones propias internas.	Factores Condicionantes	Medio Ambiente	Cobertura Vegetal	PDI
			Geohidrología	Procesamiento y Análisis de Modelo Digital de Elevación
			Estructuras Geológica	Análisis e Interpretación de Mapas Geológicos y Estructurales
	Factores Detonantes	Sismicidad	Intensidad	Análisis e Interpretación de Mapa de Fuente Sísmica
			Recurrencia	Análisis e Interpretación de Mapa de Retorno Sísmico

Fuente: Objetivos de la Investigación

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Antecedentes

En el desarrollo de esta investigación, es necesaria una consulta documental y electrónica, para la construcción de un marco conceptual y metodológico que brinden criterios que encaminen el proceso investigativo. Por esta razón, se recopilaron un conjunto de trabajos, en los que sus objetivos o métodos, se aproximan a los diseñados en el presente trabajo.

En el ámbito internacional, Durán, Escolero, Muñoz, Castillo y Silva (2014), cartografiaron la geomorfología a escala 1:50000 en el Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas, México. Utilizaron los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para delimitar geoformas siguiendo la metodología planteada por Zinck (1988) y Verstappen y Van Zuidam (1991), el trabajo fue realizado en dos etapas principales. En la primera se buscaba reconocer las formas del relieve en el campo y en la segunda se contrastó lo obtenido con procesos automáticos de delimitación de geoformas a partir de capas temáticas de información morfométrica, morfográfica y geológica en ambiente SIG. Entre las conclusiones alcanzadas en el estudio se destaca la importancia de la cartografía geomorfológica para el apoyo de estudios de ordenamiento territorial, así como en el análisis de las características de los procesos erosivos asociados a las geoformas.

Esta investigación plantea un esquema de los procesos y herramientas en ArcGIS 10.1 para generar capas temáticas de las propiedades morfométricas y morfográficas necesarias para delimitar las geoformas, lo que es relevante para la presente investigación dado que se utiliza la misma familia de software SIG y un sistema análogo de clasificación de las formas del relieve.

van Westen, Slob, Montoya, Boerboom y Vargas (2012) aplicaron los SIG para la evaluación de la amenaza sísmica y el riesgo asociado en la ciudad de Katmandú, Nepal, sus objetivos fueron aplicar el método RADIUS para identificar los problemas relacionados con amenaza sísmica en áreas urbanas utilizando sistemas de información geográfica y sistemas de teledetección. La metodología RADIUS utiliza parámetros como: datos demográficos, catálogos sísmicos, mapa de unidades y de estructuras geológicas, inventario de movimientos en masa, mapa de suelos entre otros para luego generar modelos de amenaza sísmica. Entre sus principales conclusiones se encuentran la relevancia que tiene mantener bases de datos de eventos sísmicos y cosísmicos para generar modelos de prevención de riesgo.

Esta investigación es de suma relevancia puesto que plantea un método específico para a partir de un catálogo sísmico identificar y establecer los diversos patrones de sismicidad (tiempo de retorno, aceleración vertical, efectos suelo y aceleración máxima del suelo) presentes en un área de estudio en este caso, la cuenca del río Torbes.

En el contexto nacional, se tiene a Rodríguez (2008), quien evaluó las geoamenazas con fines de microzonificación sísmica en las ciudades de Barquisimeto y Cabudare del Estado Lara, Venezuela. Entre sus objetivos planteó identificar las unidades geomorfológicas presentes en el área de estudio, para luego establecer su inestabilidad intrínseca y asociar las áreas inestables con los patrones de sismicidad mediante análisis causal en ambiente SIG. Del mismo modo identificó fuentes sismogénicas y estructuras geológicas activas; algunas de las conclusiones de la investigación indican que las propiedades de los materiales en las unidades geomorfológicas están relacionados con la velocidad de los procesos erosivos que las afectan, asimismo los patrones de sismicidad coadyuvan a favorecer las condiciones para fortalecer dichos procesos erosivos y en algunos casos detonarlos; finalmente plantea la autora que la localización de las estructuras geológicas vinculadas con la sismicidad está también relacionada con la actividad de los procesos erosivos presentes en el área de estudio.

Esta investigación presenta un marco referencial para asociar las unidades geomorfológicas y los patrones de sismicidad con procesos erosivos, es relevante

también señalar que, si bien se encuentra en un sector diferente del Sistema de Fallas de Boconó, se pueden establecer datos referenciales del comportamiento de las estructuras geológicas pertenecientes a ese sistema, con la cuenca del río Torbes.

Cartaya, Méndez y Pacheco, (2006) procedieron a realizar en la Microcuenca de la Quebrada Curucutí del Estado Vargas un proyecto con el objetivo de adaptar y aplicar la metodología utilizado por el Instituto de Investigaciones Geológico-Mineras de Colombia (INGEOMINAS) para el análisis de la distribución espacial de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa. Para lograr los objetivos planteados emplearon el método estadístico multivariado, el mismo, comprendió las siguientes fases de trabajo: “...(a) estructuración de la información temática base, (b) definición de las variables y generación de mapas temáticos digitalizados, (c) análisis geoestadístico y superposición de mapas, y (d) mapa de susceptibilidad final y calibración del modelo (p. 23)”. Dentro de las conclusiones del mencionado proyecto destaca que el modelo permitió establecer los factores que inciden en la susceptibilidad a movimientos en masa e identificar las áreas en las que ocurren con una confiabilidad del 80% lo que implica que sus resultados se ajustan a la realidad.

Este trabajo demuestra que la metodología de INGEOMINAS (2001) ha sido aplicada con éxito en Venezuela y que sus bases teóricas pueden ser utilizadas para establecer la susceptibilidad a movimientos en masa en geoformas presentes en la cuenca del río Torbes, objetivo general de esta investigación.

En el ámbito regional, Omaña, Dal Pozzo y Sánchez (2015) zonificaron la susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa en las microcuencas Agua Blanca y La Laja, municipios Capacho Viejo, Capacho Nuevo y Junín, del Estado Táchira, Venezuela, su objetivo principal fue establecer la susceptibilidad a movimientos en masa, evaluando los factores que ejercen influencia en la ocurrencia de estos fenómenos, mediante un método heurístico donde se asignan ponderaciones a los factores en función de sus características y extensión, luego lo relacionaron con un inventario de movimientos en masa del área de estudio. Entre las conclusiones de la investigación se estableció que esta metodología es adecuada para vincular los factores

(intrínsecos y condicionantes) con la susceptibilidad a los movimientos en masa, igualmente indican los autores que el uso de los SIG constituye una herramienta fundamental para el análisis de fenómenos de remoción de masas puesto que permite relacionar diversas capas temáticas entre sí para obtener la zonificación de la susceptibilidad. Esta investigación plantea ponderaciones a los factores que inciden en la susceptibilidad de los movimientos en masa en un área con condiciones similares a la cuenca del río Torbes.

Bases Teóricas

Experiencia en la clasificación de las formas del relieve en Venezuela

El proceso de clasificar las formas del relieve en Venezuela se inicia en la segunda mitad del siglo XX, a partir de los esfuerzos para sistematizar un inventario de los suelos en el país. Zinck (2012), plantea que las primeras aproximaciones se hacían a partir del análisis preliminar de fotografías aéreas, previo a desarrollar actividades en el campo; este trabajo era hecho de forma mancomunada entre geomorfólogos y edafólogos y se realizaba bajo el auspicio del Ministerio de Obras Públicas. De ello nació la Comisión para la Planificación de los Recursos Hidráulicos (CONAPLARH) que, en conjunto con el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales Renovables, completaron la primera síntesis geomorfológica en zonas aluviales de las planicies de los Llanos del Orinoco.

Elizalde (2012), acota que esto favoreció un incremento de los trabajos de corte agrológico en áreas con fuertes procesos erosivos, que buscaban aplicar las propuestas hechas por Alfred Zinck en CONAPLARH, aunque los resultados no fueron totalmente satisfactorios, lo que trajo como consecuencia el surgimiento de nuevos supuestos que buscaban responder a las particularidades regionales de las formas del relieve. Steegmayer y Bustos (1980), desarrollaron un sistema de clasificación para áreas montañosas, posteriormente Elizalde (1983), presentó una primera aproximación a sistema de clasificación de los paisajes. Estos intentos fueron avanzando y mejorando, hecho que se evidencia, en el sistema de clasificación propuesto por Zinck (1988), que

buscaba ampliar las experiencias en la década de los setenta a no sólo áreas aluviales, sino también a formas de relieve de origen diverso.

Del mismo modo, Elizalde (2012) asevera una segunda propuesta marco conceptual para la clasificación sistemática de los paisajes, donde se considera un enfoque pedogeomorfológico, es decir, un sistema que combina los suelos, los sedimentos, los regolitos y las rocas, en conjunto como un subsistema hidrológico y que interactúa con la antropósfera, la atmósfera y la biosfera en el marco de un ecosistema.

Finalmente, Zinck (2012) señala un sistema jerárquico de clasificación de las geoformas utilizando el enfoque geopedológico, que combina la información del componente epigeo (externo) y el componente hipogeo (interno), el cuál abarca una amplia gama de análisis y métodos para identificar y sistematizar los atributos morfométricos, morfográficos, morfogénéticos y morfocronológicos, haciendo uso de análisis de campo y productos derivados de la teledetección, para luego interpretar las formas del relieve y representarlas en productos cartográficos.

Formas del Relieve y Geoformas

Las geoformas o formas del relieve, son cuerpos naturales ubicados en la superficie terrestre y particularmente en la interfase donde interactúan litosfera, atmosfera, hidrosfera y biosfera. Presentan un componente epigeo y un componente hipogeo, el primero se refiere a la parte superior que sirve de límite con la atmosfera y la biosfera para constituir una superficie irregular caracterizada por presentar forma, pendiente, altitud y orientación. Mientras el segundo incluye rocas, regolitos y sedimentos dispuestos en una estructura característica. Las geoformas son el producto de la acción de un conjunto de procesos clasificados tradicionalmente según Ahnert (1996) como endógenos (orogénesis, epirogénesis y actividad ígnea) y exógenos (meteorización, erosión y sedimentación) que son activados por la interacción de factores que controlan la naturaleza y cantidad de materia y energía que dispone el sistema para que esos procesos ocurran.

La erosión como parte de los procesos exógenos es un fenómeno complejo y muy importante para comprender la génesis de la forma del relieve, Según Lobo (2006) se define como el proceso de desgaste y deterioro del suelo, regolito y sedimentos, a través de la remoción progresiva y selectiva de las partículas y productos solubles del mismo, debido a la acción individual y/o combinada de los elementos climáticos (lluvia, viento, hielo), afectada por la biota (vegetación) y el relieve (pendiente, longitud, forma y grado de inclinación) actuando en el tiempo.

Es tradicional dividir la erosión en tipos, y uno de los criterios más utilizados para ello considera el/los agentes principales responsables del fenómeno. Con base a este planteamiento es frecuente escuchar erosión hídrica o erosión eólica, para referirse a aquellos fenómenos donde los principales agentes responsables de la separación y transporte de componentes sólidos o disueltos, son el agua y el viento.

Los movimientos en masa, fenómeno de especial interés en este trabajo se consideran un tipo de erosión (Zinck, 1996), donde destaca la acción de la gravedad, así como la participación de manera combinada de varios agentes, estos movimientos son importantes en la génesis de algunas geoformas y su ocurrencia requiere de una combinación particular de atributos, por esta razón las formas del relieve presentan susceptibilidades diferenciales a desarrollarlos en función de sus propiedades.

El objeto de estudio de la geomorfología según Gutiérrez (2009) y Zinck (1988) son las formas del relieve las cuales tienen características morfográficas, morfométricas, morfogénéticas y morfocronológicas. El término geoforma propuesto por Zinck (2012) es un concepto genérico para referirse a todos los tipos de formas del relieve, independientemente de su origen, dimensión y nivel de abstracción. El componente externo de una geoforma, llamado epigeo por Zinck (1988), se evalúa mediante una combinación de atributos morfográficos (geométricos) y morfométricos (dimensiones), los cuales son directamente accesibles a la percepción humana o instrumental, y es de gran importancia para efectos del reconocimiento directo y posterior cartografía (Zinck, 2012).

En este sentido, las geoformas también están conformadas por un componente hipogeo (interno), a través del cual se pueden establecer las condiciones de formación y evolución de las mismas. El señalado autor, también afirma que las geoformas y el suelo son objetos naturales que se asientan en la interfase que existe entre la parte superior de la capa sólida del planeta (litosfera) y las demás esferas: atmósfera, hidrosfera y biosfera. Estos cuerpos naturales, comparten factores formadores, y provienen de una serie de intercambios de energía y materia que tienen su origen en la geodinámica interna y externa del planeta. Por esta razón, para poder comprender las formas del relieve, es relevante también conocer las propiedades del suelo que se encuentra en la interfase.

Clasificación de las Geoformas

Dentro de los estudios geomorfológicos se le ha dado mayor relevancia, a la descripción de las formas del relieve, según Zinck (1987), esto ha sido así por: "... la marcada incidencia de una corriente fisiográfica" (p. 91). Posteriormente, se buscó comprender no sólo formas del relieve sino también los procesos que intervinieron en la formación de éstas, aunque sin preocuparse por un sistema jerárquico de clasificación. Según el señalado autor, uno de los primeros intentos por clasificar las geoformas fue presentado por Tricart y Cailleux en 1974, este sistema estaba basado en función del tamaño de las formas, agrupándolas en siete órdenes. Una de las principales críticas hechas estaba en el hecho de que era una clasificación con un marcado carácter dimensional.

Surge después, la necesidad de clasificar las geoformas siguiendo criterios no sólo geomorfológicos sino también edafológicos. En este caso, el criterio no es solamente dimensional, sino también morfogenético, dando pie al surgimiento de un modelo planteado por Zinck (1980; 1987; 1988; 2012) llamado enfoque geopedológico, donde el autor sugiere una combinación de unidades físico-geográficas en los niveles superiores, mediante el uso de criterios morfométricos y morfográficos y en los niveles inferiores un conjunto de unidades taxonómicas empleando atributos cronológicos, pedológicos y geológicos.

Atributos de las Geoformas

Según Zinck (2012), los atributos son propiedades usadas para la descripción, identificación y clasificación de las geoformas, estos permiten operacionalizar el sistema de clasificación. En este sentido, para explicar los atributos necesarios que definen una geoforma, según Zinck (1987), es necesario precisar cuál es la caracterización de las propiedades y los constituyentes de las formas, luego comparar lo obtenido con referencias establecidas y finalmente ubicarlo dentro de un nivel taxonómico. Para esto, se deben utilizar una serie de atributos morfográficos que describen la geometría de las geoformas, morfométricos, establecen las medidas y proporciones, morfogénéticos que explican tanto, el origen como el proceso de formación y morfocronológicos que podrá contextualizar en un marco temporal adecuado la evolución de la geoforma.

Importancia diferencial de los atributos geomorfológicos

Cada uno de los atributos de las geoformas (morfométricos, morfográficos, morfogénéticos y morfocronológicos) revisten diversos niveles de importancia al momento de definir una geoforma, Zinck (2012) define tres tipos de atributos: diferenciales, accesorios y accidentales.

Atributos Diferenciantes o Diagnósticos

De acuerdo a la opinión de Zinck (2012) los atributos diferenciantes o diagnósticos son aquellos atributos que distinguen una geoforma de otra en cada uno de los niveles jerárquicos, es decir, un cambio en el rango de valores asociado a un atributo, cambia la clasificación de la geoforma. En otras palabras, un atributo con esta propiedad es considerado diagnóstico.

Atributos Accesorios

Tal como lo señala Zinck (1987) los atributos accesorios son aquellos que contribuyen a reforzar la diferenciación dada por un atributo diferencial. Es importante

señalar que según el autor los atributos accesorios por sí mismos no son capaces de distinguir una geoforma de otra.

Atributos Accidentales

Son conceptualizados por Zinck (2012) como los que no contribuyen a la identificación de la geoforma, pero muestran información útil para su caracterización, algunos atributos de este tipo son: la altitud relativa, la pendiente, entre otros.

Atributos Morfográficos

Estos atributos son esencialmente descriptivos y se evalúan en términos de: la topografía (altimetría) y la planimetría de la forma. En este sentido, Zinck (2012), hace alusión a la topografía, como la sección transversal de una porción del terreno y puede ser visualizada en dos o tres dimensiones, es de suma importancia para la caracterización de áreas con pendiente, y su evaluación se realiza mediante los conceptos de forma topográfica y el perfil topográfico, que se utilizan a niveles de abstracción diferentes.

Las formas topográficas, según Zinck (1987) se valoran mediante clases de pendiente, también llamadas clases de relieve, de acuerdo al Cuadro N°: 6. Es necesario destacar, que la forma topográfica, se emplea como atributo para diferenciar clases en la categoría tipo de paisaje. El perfil topográfico, visualizado en dos o tres dimensiones, sirve para diferenciar clases en la categoría tipo de relieve/modelado, en general se evalúa transversalmente y se describe como: plano, cóncavo, convexo, convexo-cóncavo, convexo-rectilíneo-cóncavo, rectilíneo, con peldaños intermedios, con afloramientos rocosos, con escarpe, disimétrico e irregular. (Ver Figura N°: 2)

Cuadro N° 6

Formas de la Topografía: Clases de Relieve

Clase	Pendiente (%)	Amplitud del relieve
Plano o casi plano	0-2	Muy baja
Ondulado	2-8	Baja
Fuertemente ondulado	8-16	Baja
Colinoso	16-30	Moderada
Fuertemente disectado	30-60	Moderada
Montañoso	>60	Alta

Fuente: Zinck (2012)

Figura N°: 2

Perfil Topográfico de las Formas del Relieve

		PERFIL TRANSVERSAL DE LA LADERA			REFERENCIAS	
		RECTILÍNEO	CÓNCAVO	CONVEXO	SÍMBOLO	DENOMINACIÓN
PERFIL LONGITUDINAL DE LA LADERA	RECTILÍNEO					Escalas variables
	CÓNCAVO					Flujo vertical centripeto
						Flujo vertical centrífugo
	CONVEXO					Flujo vertical homogéneo
						Flujo superficial convergente
					Flujo superficial divergente	
						Flujo superficial paralelo
		FLUJO SUPERFICIAL Y PARALELO	FLUJO CONVERGENTE Y CENTRIPETO	FLUJO DIVERGENTE Y CENTRIFUGO		

Fuente: Jaimes (1985)

La otra variable morfográfica en el estudio de las geoformas, es la planimetría, que de acuerdo a la opinión de Zinck (2012) consiste en la proyección vertical de los límites

de las formas en un plano horizontal. La planimetría se evalúa a partir de "...la configuración, el diseño de sus contornos, el patrón de drenaje y las condiciones del medio circundante" (p. 91), es decir, las relaciones de vecindad entre las geoformas. A partir de la configuración se puede precisar la anchura y la estrechez de la forma del relieve lo que se puede asociar a una tipología específica de la misma, mientras que, a partir del contorno se logra establecer el trazado, e inferir algunas circunstancias asociadas con su génesis.

Atributos Morfométricos

Las variables geomorfométricas se miden directamente sobre la geoforma, y mencionan los aspectos cuantitativos de la misma. Las variables que Zinck (2012) propone sean determinadas son: altitud relativa, la densidad del drenaje y el gradiente de relieve. En este contexto de ideas, Zinck (1987) sostiene que estos atributos son accidentales, es decir, sólo pueden ser considerados localmente y únicamente válidos para estas situaciones. Del mismo modo, estos atributos pueden ser utilizados en cualquiera de los niveles jerárquicos del sistema de clasificación y en su mayoría pueden ser calculados mediante el empleo de modelos digitales de elevación.

La altitud relativa o amplitud del relieve destaca la diferencia altitudinal que existe entre geoformas y se puede describir haciendo uso de los términos alta, media o baja, calculada mediante rangos de valores numéricos. La densidad del drenaje es el grado de disección o incisión de una superficie y el gradiente del relieve se refiere a los rangos específicos de la pendiente que puede tener una geoforma, y se expresa en grados o porcentajes.

Atributos Morfogénéticos

Son atributos sumamente importantes tanto en los materiales geomorfológicos como en los suelos, dado que infieren los procesos que originaron las geoformas, los suelos, regolitos o sedimentos sobre ellas. En función, de estos atributos, se reconstruye la evolución de un área y conocer las condiciones ambientales presentes en un período de tiempo. Los atributos morfogenéticos en el sistema propuesto por Zinck (2012) son:

Distribución del tamaño de las partículas o Granulometría:

Expresa las proporciones relativas de las partículas minerales agrupadas por clases de tamaños en fracciones granulométricas. En función de ella, se deducen otras propiedades de los materiales geogenéticos, asociadas al tamaño y distribución de las partículas tales como: densidad aparente, superficie específica, cohesión, adhesividad, permeabilidad, conductividad hidráulica, tasa de infiltración y consistencia (Zinck, 2012). Igualmente ayuda a identificar rasgos geodinámicos de los materiales no consolidados como: agentes de transporte, competencia y capacidad, procesos ambientales que originaron la deposición y acción de la meteorización.

Estructura Geogenética

Según Zinck (2012) cuando se analiza la estructura geogenética de los materiales que constituye la geoforma, se estudia tanto la estructura del material geológico (rocas consolidadas), como la estructura del material geomorfológico (rocas no consolidadas). En el análisis de la estructura de las rocas consolidadas, a partir de la resistencia diferencial de los materiales, se identifica el nivel de meteorización, en el caso de los materiales no consolidados se establece la naturaleza de los procesos deposicionales que los originaron, en función del estudio de la estructura cíclica de los depósitos, la estructura lenticular, la crioturación y la bioturación.

Estructura Pedogenética

Para Zinck (1988) la estructura del suelo, consiste en la organización del componente sólido de estos cuerpos en unidades denominadas agregados, que en general junto a la granulometría determina el comportamiento frente a los fluidos, es decir, frente al agua y al aire; del mismo modo indica el grado de desarrollo de los suelos.

Consistencia

Se define como la resistencia mecánica de los cuerpos a ser deformados por la acción de fuerzas externas y se debe a la fuerza de cohesión entre partículas y la adhesividad

entre estas y el agua. Según Zinck (1988; 2012) con base en esta, se comprende el comportamiento mecánico (actual o futuro) del suelo, detritos, regolitos y materiales no consolidados.

Los materiales geogénicos de acuerdo a su contenido de humedad, se comportan como sólidos, semisólidos, plásticos y como materiales viscosos (cuando se saturan con agua). Los contenidos de humedad gravimétricos que determinan estos cambios en comportamiento de los materiales se denominan límites de consistencia o límites de Atterberg (Zinck, 2012) y son utilizados para evaluar este importante atributo.

Mineralogía

Zinck (1988) asevera que conocer la composición mineralógica de las fracciones texturales arena, limo y arcilla, de los materiales geogénicos, determina la dinámica geoquímica del ambiente, que en principio está controlado por procesos morfogenéticos. Con base en las asociaciones minerales se establece las litologías dominantes en la fuente de los materiales, diferenciar materiales recientes y evolucionados, analizar las condiciones morfoclimáticas del área de formación de los materiales y también el efecto que la topografía tiene en la formación y distribución de los minerales arcillosos.

Morfoscopía

Para Zinck (2012) la morfoscopía indica el estudio de la esfericidad y aspecto (marcas y brillo) de la superficie de las partículas que integran las fracciones granulométricas de arena y limo grueso, para este estudio se utiliza el microscopio de luz polarizada, en el caso de partículas de menores dimensiones puede complementarse la información a través del microscopio electrónico. La morfoscopía permite realizar inferencias sobre las características del transporte (distancia, capacidad, competencia), y en particular modalidades y ambientes especiales como actividad marina o eólica.

Atributos Morfocronológicos

El cuaternario ha sido un período geológico donde los procesos morfogenéticos presentan particular intensidad, de esta manera se originan nuevas geoformas y otras muy antiguas se han modificado profundamente. Por este motivo, en los estudios morfocronológicos se hace hincapié en las épocas y las diferentes subdivisiones de esta unidad de tiempo geológico, teniendo en cuenta entre otros criterios la alternancia de períodos glaciares e interglaciares que se relacionan con la alternancia de alta y baja actividad morfogenética.

Con base en el estudio de la historia de las geoformas Zinck (1988; 2012) puntualiza que se conoce el grado de actividad de las geoformas (activa, inactiva, estabilizada); la edad de la forma utilizando técnicas de datación absoluta, la cronología geológica asociada a la escala de tiempo geológico y los eventos ocurridos en cada período y la cronoestratigrafía mediante el uso de las propiedades del suelo para datar la edad de los materiales.

De este modo, no es fácil, reconocer el tiempo de interacción de los factores y los procesos que actuando con intensidad variable originan las geoformas, además cuando se utiliza la nomenclatura que combina la letra Q (Cuaternario) con números y letras del alfabeto latino, esta edad se refiere a los materiales geomórficos y no directamente a la edad de los suelos que en la mayoría de los casos se deriva de esta.

En Geomorfología, la datación se ha efectuado en forma absoluta y en forma relativa. La datación absoluta emplea múltiples técnicas entre ellas las radiométricas que son costosas y se limitan en la mayoría de los casos a la datación de horizontes de suelos y de estratos sedimentarios con materia orgánica. La datación relativa, por otro lado, es muy empleada y los eventos se organizan en secuencia, de acuerdo a principios de naturaleza estratigráfica y pedológica (pedostratigráfica), lo que precisa el marco temporal en el cual se desarrollan los procesos morfogenéticos.

Ponderación de los atributos en el sistema de clasificación de las Geoformas propuesto por Alfred Zinck

Zinck (2012), propone un esquema (Ver cuadro N° 7) para comprender la importancia de cada atributo en la identificación y clasificación de las geoformas, indicando cuáles son utilizados en algunos niveles del sistema de clasificación.

Cuadro N° 7

Jerarquización de los atributos de las Geoformas

<i>Atributos</i>	<i>Paisaje</i>	<i>Relieve</i>	<i>Litología</i>	<i>Forma de Terreno</i>
<i>Morfométricos</i>				
<i>Altura relativa</i>	+	+	-	θ
<i>Densidad de drenaje</i>	+	+	-	-
<i>Pendiente</i>	+	+	-	+
<i>Morfográficos</i>				
<i>Forma topográfica</i>	+	θ	-	+
<i>Perfil topográfico</i>	-	+	-	+
<i>Exposición</i>	-	+	-	+
<i>Configuración</i>	-	+	-	+
<i>Diseño de los contornos</i>	-	+	-	+
<i>Patrón de drenaje</i>	+	+	-	-
<i>Condiciones circundantes</i>	+	+	+	+
<i>Morfogenéticos</i>				
<i>Granulometría</i>	-	θ	+	+
<i>Estructura</i>	-	-	+	+
<i>Consistencia</i>	-	-	+	+
<i>Mineralogía</i>	-	-	+	+
<i>Morfoscopía</i>	-	-	+	+
<i>Morfocronológicos</i>				
<i>Grado de meteorización</i>	-	-	+	+
<i>Grado de desarrollo pedológico</i>	-	-	θ	+
<i>Índices de lixiviación</i>	-	-	θ	+
<i>Estado del complejo adsorbente</i>	-	-	θ	+
<i>Mineralogía de arcillas</i>	-	-	+	+

Atributo muy importante: +
 Atributo moderadamente importante: θ
 Atributo menos importante: -

Fuente: Zinck (1988, 2012)

El autor señala también que los atributos morfográficos son esencialmente accesorios, aunque en algunos casos también pueden ser diagnósticos, los atributos morfométricos son predominantemente accidentales, en cambio los morfogenéticos y morfocronológicos son fundamentalmente diferenciadores. Del mismo modo, el autor antes citado, señala que en los niveles superiores del sistema de clasificación se emplean menor cantidad de atributos que en los niveles inferiores.

Sistema jerárquico de clasificación de las geoformas propuesto por Alfred Zinck

El sistema de clasificación de las geoformas desarrollado por Zinck (1980, 1987, 1988, 2012), es natural, en otras palabras, se afianza en atributos de la geoformas, es además jerárquico, es decir, funciona como un árbol genealógico, y está constituido por seis niveles de abstracción, por ello es multicategorico. Cada categoría conformada por taxas, que son identificadas a partir de los atributos diagnósticos. Las categorías del sistema propuesto por Zinck (2012) se muestran en forma decreciente, en el cuadro N° 8.

www.bdigital.ula.ve

Cuadro N° 8

Escalas de Expresión Cartográfica y niveles de abstracción Sistema de Clasificación de las Geoformas de Alfred Zinck

<i>Escala</i>	<i>Zinck (1980)</i>	<i>Zinck (1988, 2012)</i>
1:30000000		Geoestructura
1:10000000	Provincias	Ambiente Morfogenético
1:2000000	Regiones	
1:300000		Paisaje
1:125000	Tipos de paisaje	Relieve – modelado
1:25000	Tipos de relieves	Litología – facies
1:10000	Formas de terreno	Forma de terreno

Fuente: Modificado de Zinck (2012, p. 68) y Elizalde (2012, p. 34)

Primera Categoría: Geoestructuras

En esta categoría se agrupan grandes porciones continentales caracterizadas por sus estructuras geológicas, edad y tectónica, su génesis se relaciona con la geodinámica

asociada a las placas tectónicas. Comprenden tres taxas: cordillera, escudo y geosinclinal que se describen a continuación: la cordillera, de acuerdo con Zinck (2012) se define como "...un sistema de cadenas montañosas jóvenes, incluyendo planicies y valles, que han sido fuertemente plegadas por orogénesis relativamente reciente" (p. 69). Las cadenas montañosas asociadas a la cordillera tienen diversas orientaciones, pero la dirección de la cordillera en general es la misma.

El escudo: considerado un bloque continental relativamente estable, que ha sufrido ligeras deformaciones y está constituido fundamentalmente por rocas cristalinas del pre-cámbrico.

Los geosinclinales o cuencas sedimentarias, son grandes depresiones de forma alargada o masiva, donde se han depositado una gran cantidad de sedimentos.

Segunda Categoría: Ambiente Morfogenético

Zinck (1988, 2012) lo define como el tipo de medio biofísico, caracterizado por una serie de procesos geodinámicos internos y externos del planeta. Esta categoría está conformada por seis taxas.

Ambiente Estructural:

Originado por la geodinámica interna del planeta mediante deformaciones, plegamientos, cizallamiento, expansiones, compresiones y fallamiento asociado a la tectónica y al vulcanismo.

Ambiente Depositional:

Asociado a la deposición de materiales desplazados por acción de procesos externos.

Ambiente Erosional

Definido por procesos de disección y remoción de materiales transportados por los agentes de la erosión.

Ambiente Disolucional

Relacionado con procesos de disolución de rocas como el carst en rocas calcáreas y el pseudocarst en rocas no calcáreas.

Ambientes Mixtos:

Cuando coinciden en una misma área dos o más ambientes.

Tercera Categoría: Paisajes Geomorfológicos

Zinck (1987) hace mención a esta categoría, como una porción de espacio constituido por una repetición de geoformas relativamente idénticas o por una asociación de formas de relieve diferentes. El autor plantea dividir este nivel de abstracción en siete taxas.

Valle

Aunque Zinck (2012) explica diversas acepciones del término valle, a fines de la presente investigación, se asume particularmente la concepción de "...área de deposición de aportes longitudinales de sedimentos, correspondiente a la vega o llanura de inundación y a las terrazas del fondo del valle" (p. 71).

Planicie

Zinck (1987) la plantea como una extensión plana, con desniveles de 1 a 10 m y con pendientes suaves (no mayores a 3%).

Peneplanicie

Zinck (2012) se refiere a la peneplanicie como: "...una porción de terreno ligeramente ondulada, caracterizada por una repetición sistemática de cerros bajos redondeados o alargados, con cimas de similar altura" (p. 71). Al respecto, Schargel (2011), afirma que en una peneplanicie los desniveles deben ser menores a 15 m. En muchos casos, posee una red hídrica reticular, habitualmente tiene su origen en la disección de una planicie o altiplanicie o en la intensa meteorización y erosión de rocas cristalinas o de alto grado de metamorfismo como sucede en el macizo guayanés.

Altiplanicie

Es una extensión plana pero elevada y caracterizada por el entalle o formación de gargantas en sus límites, en general posee una topografía tabular, debido al encajonamiento de los cursos de agua (Zinck, 2012). Su génesis se asocia a una planicie afectada por procesos tectónicos que modifican el nivel de base y favorecen el entallamiento de los cursos de agua.

Piedemonte

Es un tipo de relieve transicional, conformado por planos inclinados, habitualmente ubicado a los márgenes de cadenas montañosas, su composición es heterogénea, puede estar conformado por asociaciones de terrazas, abanicos y glacis. Los piedemontes pueden sufrir la acción tectónica lo que deriva en flexuras y fracturas, que originan, por ejemplo, terrazas inclinadas por basculamiento, como se observan en las cercanías de la ciudad de Barinas (Zinck, 1981; 1988). El criterio de incluir como piedemonte las colinas y/o lomas desarrolladas en sustratos pre cuaternarios, como sucede en los alrededores de Abejales, Estado Táchira, no es compartido por algunos autores como Schargel (2011), quien plantea la necesidad de excluir las colinas y lomas como parte del paisaje de piedemonte a pesar de su posición respecto a paisajes más elevados.

Lomerío

Según Zinck (2012) el lomerío consiste en: "...una porción de terreno quebrada, caracterizada por una repetición de colinas (redondas) o lomas (alargadas), con cumbres de alturas variables, separada por una red hidrográfica moderadamente densa y vallecitos coluvio-aluviales" (p. 72). En este sentido, Schargel (2011) precisa que los desniveles en este tipo de paisaje van entre 10 y 300 m.

Montaña

De acuerdo a la opinión de Zinck (1987) la montaña corresponde a un tipo de paisaje alto y accidentado, con una importante diferencia altitudinal en relación a paisajes

aledaños como los valles intermontanos. Schargel (2011) señala que los desniveles entre la cima y los valles vecinos son superiores a 300 metros.

Cuarta Categoría: Relieve/Modelado

Zinck (2012) argumenta que el término relieve se refiere a geoformas que muestran una combinación de estructuras geológicas y topografía, originada por acción de la geodinámica interna. El autor antes citado, indica que el vocablo modelado describe geoformas generadas por acción de procesos morfogénéticos condicionados por las características morfoclimáticas. Zinck (1988, 2012), propone un esquema de las taxas a este nivel jerárquico agrupadas en función de los procesos formadores predominantes (Ver cuadro 9), y destaca la posibilidad de incorporar nuevas geoformas a medida que la clasificación es aplicada y validada.

Cuadro N° 9

Tipos de Relieve y Modelado, ordenado de acuerdo a los procesos dominantes

	<i>Estructural</i>	<i>Erosional</i>	<i>Deposicional</i>	<i>Disolucional</i>	<i>Residual</i>
	Depresión	Depresión	Depresión	Depresión	Área de aplanamiento
	Mesa (meseta)	Vallecito	Vallecito (swale)	Domo	Domo
	Cuesta	Cañón (garganta)	Llanura de Inundación	Torre	Inselberg
	Crestón	Glacis	Plano (tidal flat)	Colina (hum)	Campo de bloques
<i>G</i>	Hogback	Mesa (meseta)	Terraza	Polje	
<i>E</i>	Barra	Colina	Mesa (meseta)	Vallecito ciego	
<i>E</i>	Escarpe	Loma	Abanico	Vallecito seco	
<i>O</i>	Graben	Cresta	Cono	Cañon	
<i>F</i>	Horst	Fila	Glacis		
<i>O</i>	Anticlinal	Viga	Bahía		
<i>R</i>	Sinclinal	Cadena (montañosa)	Delta		
<i>M</i>	Comba	Dique	Estuario		
<i>A</i>	Cadena (montañosa)	Artesa	Marisma		
<i>S</i>	Cono (volcánico)	Circo	Arrecife		
	Dique		Atolón		

Fuente: Zinck (2012)

Quinta Categoría: Litología/Facies

En este nivel, se analiza la naturaleza petrográfica de las rocas que sirven de substrato a las geoformas, del mismo modo, se consideran las facies de los materiales no consolidados. Estos aspectos son los constituyentes del componente hipogeo de las geoformas, en otras palabras, esta categoría parte de los materiales parentales de los suelos para identificar las geoformas. Zinck (2012), justifica considerar la litología en los niveles inferiores del sistema de clasificación, en virtud, de la dependencia particular que los materiales parentales tienen sobre las geoformas y que sólo a escalas muy detalladas se pueden percibir estos fenómenos.

Sexta Categoría: Forma de Terreno

Zinck (2012) precisa que el vocablo forma de terreno, es usado comúnmente, como concepto general, que: "...cubre cualquier tipo de unidad geomorfológica desde nivel de paisaje hasta los niveles más bajos del sistema" (p. 76). Sin embargo, establece que, para fines del sistema de clasificación de las geoformas, el término hace alusión, a la categoría jerárquica inferior, siendo la unidad geomorfológica fundamental, donde se analizan principalmente la dinámica y la evolución de la forma del relieve.

Para ordenar las geoformas en este nivel, se requiere un juicio de expertos y valoración directamente en el campo. Este nivel se divide en formas de terreno predominantemente controladas por la estructura geológica (geodinámica interna) y las formas del terreno predominantemente controladas por los agentes morfogénéticos (geodinámica externa), al respecto Zinck (2012) precisa las taxas para cada forma de terreno.

Limitaciones del Sistema de Clasificación de las Geoformas

Las escalas y niveles de abstracción en los que se estudian los fenómenos geomorfológicos varían según los propósitos que se persigue con su análisis (Elizalde, 2012). En este sentido, los estudios pueden ser a nivel planetario, continental, a nivel de países, regiones o al estudio detallado de áreas más pequeñas, por tanto, un sistema de clasificación de las formas del relieve, debe responder a diversos ámbitos y niveles

de abstracción, es decir, debe proporcionar tipologías adecuadas para cada nivel y escala. Al respecto, Elizalde (2012) admite que una unidad geomorfológica es:

Una entidad geográfica reconocida o definida a cierto nivel categórico como miembro de una sola clase, que puede ser subdividida en áreas distintas si se pasa a una categoría más detallada y que solamente pertenece a una sola de las clases de las categorías generales (p. 35)

Según esto, se pueden generar relaciones de continuidad entre los niveles jerárquicos superiores e inferiores, que permiten vincular las propiedades y componentes de forma horizontal y vertical, entre cada uno de los órdenes que conforman el sistema de clasificación. En correspondencia con la idea planteada, Zinck (2012), expone un conjunto de categorías que catalogan las geoformas, sin embargo, se evidencia que este sistema presenta saltos de continuidad en los niveles jerárquicos superiores, puesto que no brinda clases que permitan precisar geoformas entre las grandes geoestructuras (cordilleras, geosinclinales y escudos) y ambientes morfogenéticos (estructural, erosional, deposicional, Disolucional y residual) con el nivel de tipo de paisaje (montaña, valle, piedemonte, entre otros)

En la aproximación anterior al sistema de clasificación de las geoformas, Zinck (1980) destaca la existencia de niveles intermedios que denominó provincia fisiográfica y región natural, y para ejemplificar dichos niveles, esquematizó las geoformas en Venezuela. Por ejemplo, las cordilleras, las dividió en el sistema de la costa y en el sistema andino, este último dividiéndolo en cordillera de Mérida, de Perijá y en las depresiones intramontanas del Táchira, del Chama y de Valera. Se aprecia entonces una continuidad en el sistema de clasificación, puesto que se puede escalar de forma descendente las jerarquías de las geoformas.

Por tanto, es necesario adecuar a fines prácticos de esta investigación, un conjunto de facies en los niveles superiores del sistema de clasificación, para hacerlo más fluido al momento de esquematizar las geoformas. Esto se hace en el marco de que el mismo Zinck (2012) plantea que el sistema propuesto es una construcción que ha ido evolucionando desde sus primeros intentos en conjunto con el COPLANARH y que está en constante evaluación.

Sismos y Sismicidad

El término sismo según Nava (2008) proviene del griego *seien* (σεισμός [*seismós*]), que significa mover, y se usa para definir a cualquier movimiento telúrico. El autor antes citado, señala que popularmente se utilizan palabras sin precisión técnica para identificar el fenómeno, habitualmente se emplea el vocablo temblor, para referirse a un sismo pequeño generalmente local, mientras que a los más intensos se le denomina terremotos. Sin embargo, todos son manifestaciones del mismo proceso, donde hay una liberación de energía elástica acumulada producto de la deformación en los bloques corticales, tal y como lo plantea el geólogo Henry Reid en 1911 en su modelo del rebote elástico (Tarbuck y Lutgens, 2005), desarrollado a partir del estudio de los procesos que actuaron en terremoto de San Francisco en 1906.

A propósito de esto, Herráiz (1996) afirma que los sismos:

Son el resultado de un proceso de deformación elástica y acumulación de esfuerzos en una zona de la corteza, que se mantiene hasta que se supera la resistencia del material, lo que sucede cuando los esfuerzos de cizalla alcanzan valores próximos a 1000 bares. En ese momento la falla experimenta una dislocación, los esfuerzos se relajan total o parcialmente de forma súbita y la energía elástica acumulada se libera bruscamente (p. 6)

Lo que quiere decir que, durante un sismo las rocas que experimentan deformación por el esfuerzo se mueven a ambos lados de la falla lo que ocasiona la desaparición de la deformación elástica. En este sentido, Keller (2007) indica que parte de la energía liberada se disipa en fenómenos no elásticos en la zona de ruptura y parte se propaga en forma de ondas sísmicas que hacen vibrar el terreno. La génesis de un sismo consta, según Sarria (2008), de dos etapas: una de acumulación lenta de la energía elástica y otra de relajación súbita. Bolt (2003): "...mientras que la primera puede prolongarse muchos años, la segunda dura únicamente decenas de segundos". (p. 98). Además, Keller (2007) opina que son diversas las fases que existen en el proceso de ruptura y en la generación de ondas con distintas frecuencias, planteamiento que se considera uno de los aportes de mayor relevancia a los modelos modernos que explican el mecanismo sísmico.

Los sismos son entonces, movimientos súbitos que ocurren como consecuencia de una ruptura del equilibrio de la litósfera, en especial donde se ha acumulado energía elástica debido a los lentos desplazamientos de la parte sólida del planeta (Sarria, 2008). Es así que, la energía liberada en la ruptura debe disiparse a medida que atraviesa los materiales para que el medio regrese a una situación de equilibrio. Sarria (2008) y Gutiérrez (2009) acotan que esto genera un proceso oscilatorio debido a la interacción entre las energías potencial y cinética del medio sólido perturbado. Dicho proceso disminuye desde la ruptura, propagándose en tres dimensiones dentro de la Tierra, ello ha permitido analizar de manera indirecta las características físicas y geométricas del interior del planeta y además comprender el efecto que pueden tener los sismos en un área de interés.

En su propagación, las oscilaciones sísmicas se desplazan con velocidades variables que dependen de la rigidez del medio, propiedad que varía con la profundidad en un mismo material. Dicha propagación según Bolt (2003) se realiza con: "...trayectorias curvas que finalmente alcanzan la superficie terrestre y sacuden el suelo, este a su vez mueve las edificaciones que reposan sobre o dentro de él" (p.55). La intensidad de las oscilaciones que localmente sacuden las construcciones depende de las características frecuenciales de las ondas sísmicas, de las propiedades de los materiales y las edificaciones mismas.

Ahora bien, la sismicidad según Ordaz (1999) es la medida de la frecuencia con que ocurren sismos en un área determinada, a partir de la cual se establece las nociones de peligro sísmico y el riesgo sísmico que incluye los daños que se presentan en las infraestructuras. Para Ferrer (2005) la sismicidad es la ocurrencia repetitiva y constante de eventos sísmicos en una región o territorio determinado, que incide directamente en la estructura y dinámica morfológica de dicho espacio, y está relacionada con la presencia de fallas y demás estructuras geológicas asociadas a sismos. Las fallas son la principal estructura sismogénica, asociar un evento sísmico a una falla activa es un proceso complejo que requiere de actividad campo, sin embargo, es la base conceptual de lo que Sarria (2008) define fuente sísmica.

La evaluación de la sismicidad local, que según Ordaz (1999), consiste en determinar qué tan frecuentemente ocurren sismos con determinadas magnitudes, se ha desarrollado mediante dos conceptos: la tasa de excedencia de magnitudes que es el número medio de veces, por unidad de tiempo, que ocurre un sismo con una magnitud superior a M , y el período de retorno que se obtiene a partir del inverso de la tasa de excedencia. Al respecto, Monzón (2010) considera que el cálculo de los parámetros de sismicidad local se efectúa usando los datos contenidos en los catálogos sísmicos para el área de estudio.

En este orden de ideas, es importante señalar que en muchos países los sistemas instrumentales que permiten la elaboración de dichos catálogos datan de mediados del siglo XX, (Sieh, 2001), lo que ha motivado el surgimiento de la sismicidad histórica como herramienta para disminuir la incertidumbre y acortar los errores al momento de calcular las tasas de sismicidad. Rodríguez y Audemard (2001) manifiestan que el análisis histórico de un sismo tiene por objeto definir:

De la manera más cercana posible los parámetros que han influido en el mismo, la fecha, la hora, el epicentro, la intensidad, en función de noticias aparecidas en documentos de variada naturaleza y con el mayor acopio de evidencias, siempre limitado por elementos que escapan al testimonio escrito. (p. 48)

Por lo general, esta situación ha llevado a dar repuestas técnicas en forma de hojas cartográficas, en la que se estudia e interpreta los niveles de daño similar, conocidas como mapa de isosistas, con una visión limitada pues no son tomados en cuenta todos los parámetros. En consecuencia, la sismicidad histórica según Ordaz (1999), se ha estudiado de manera muy intensa en países con años de historia documental.

En Venezuela según Palme y Altéz (2010)

La sismología histórica es una inquietud que empezó a convertirse en una investigación sistemática en 1997, cuando en la ciudad de Trujillo se celebró la Primera Jornada de Sismicidad Histórica, lo que derivó en una aproximación al conocimiento histórico y detallado de los sismos, sus magnitudes, localizaciones, asociaciones a sistemas de fallas activas y las características de sus rupturas, lo que resultó en un elemento fundamental para el estudio del riesgo sísmico del país (p. 15)

En función de lo anterior, desde los primeros listados de terremotos elaborados por los pioneros de esta disciplina en el siglo XIX, hasta el primer catálogo completo de eventos sísmicos (Catalogo de Centeno – Grau), la sismología histórica en Venezuela no ha parado de avanzar.

Desde esta perspectiva, Zúñiga (2011), dice que el desarrollo tanto de la sismicidad histórica como la instrumental, permite establecer relaciones entre datos estadísticos y las dimensiones físicas de las áreas sísmicamente activas, proporcionando parámetros confiables para comprender la actividad de la mismas lo que deriva en la identificación de fuentes sísmicas, definidas por Keller (2007), como áreas con altos niveles de sismicidad con diversos períodos de retorno, donde a partir de la actividad de la fuente se pueden establecer medidas de prevención del riesgo sísmico local.

Mecánica de la Fuente Sísmica

El proceso de acumulación lenta de energía elástica en la corteza o en la litosfera debido a la continua deformación de la superficie terrestre, genera según Sarria (2008) un campo de esfuerzos producto de las deformaciones. En este sentido, la liberación súbita de la energía elástica acumulada constituye el origen de un sismo, evento que según Stein y Wysession (2003) requiere de dos conceptos para su ubicación: El foco que corresponde a la región del campo de esfuerzos donde se inicia la liberación de energía, y el epicentro que es la proyección del foco sobre la superficie terrestre.

El foco también es denominado hipocentro por algunos autores como Fowler (2005), Sarria (2008), Turcotte y Schubert (2014), ocurre a una profundidad usualmente medida en kilómetros y al igual que el epicentro tiene unas coordenadas expresadas tradicionalmente como longitud y latitud, que se logran a partir de una triangulación producto del análisis de los sismogramas, registros que dejan en los sismógrafos las ondas de esfuerzo al desplazarse por la Tierra, procedimiento que genera según Sarria (2008) incertidumbre en la ubicación del foco.

Magnitud, Momento Sísmico e Intensidad

Los conceptos de magnitud, momento sísmico e intensidad se emplean en sismología para comparar los sismos y para cuantificar la energía liberada durante la ruptura que le da origen. Según Schearer (2009) los tres conceptos están íntimamente ligados, son de gran importancia en el estudio sísmico y se describen a continuación.

Magnitud:

El concepto de magnitud según Sarria (2008) lo introdujo C.F. Richter en el año 1935 con el objeto fundamental de comparar la energía liberada entre sismos. No obstante, a pesar de las limitaciones que los sismólogos le han encontrado, éste sigue siendo el parámetro de más amplio uso para caracterizar la energía liberada. La magnitud según Bolt (2003), Sarria (2008) Schearer (2009), Keller (2009) y Haakon (2010) fue explicada por Richter mediante la ecuación:

$$M = \log \left(\frac{A}{T} \right) + \phi(\Delta, h) + C_s + C_r$$

Donde:

M= Magnitud

A= la amplitud de la deformación del medio en el cual está colocado el geófono del sismógrafo; se expresa en milésimas de milímetro. Según Sarria (2008) en su definición inicial Richter toma la amplitud del registro y no la del terreno.

T= el periodo de la onda sobre la cual se mide la amplitud, en segundos.

Δ = la distancia epicentral en grados;

h = la profundidad del foco, en kilómetros.

Cs = factor de corrección propio de la estación sismológica.

Cr= factor de corrección regional que varía en una forma más o menos compleja.

La evaluación de la distancia (Δ) y la profundidad (h), que se utiliza en la fórmula anterior, según Bolt (2003) se hace a partir de estudios analíticos y empíricos, que consideran además de la atenuación, que altera el registro de los datos, el tipo de onda sísmica, lo que permite incorporar a la estimación, la velocidad y la distancia al foco. La magnitud es propia de cada sismo y teóricamente dice Sarria (2008) que debería estar representada por un número. Sin embargo, al considerar los diferentes tipos de onda que parten de la fuente sísmica se han desarrollado algunos conceptos de magnitud como los que se describen a continuación:

Magnitud Local (M_l):

Destaca Sauter (1989) que la magnitud local corresponde a la concepción inicialmente propuesta por Richter en 1935, para eventos ocurridos en el sur de California. Esta magnitud fue definida como: "...el logaritmo de base 10 de la máxima amplitud de la onda sísmica expresada en micrones, registrada en el sismómetro estándar a una distancia de 100 km del epicentro del evento" (p. 82)

Articulado con este discurso, Schearer (2009) expone que el mayor problema con la magnitud local radica en que es difícil relacionarla con las características físicas del origen del sismo, por ello, posteriormente evolucionó a la escala de magnitud de ondas superficiales.

Magnitud de Ondas Superficiales (M_s):

Según Sarria (2008), fue propuesta por Gutenberg y Richter en el año 1945 y es válida para diferentes distancias epicentrales y sismógrafos. Esta magnitud puede evaluarse para ondas superficiales, con períodos aproximados de 20 segundos en el componente horizontal de la onda de Rayleigh. Aunque para Kanamori y Hanks (1979), la magnitud de onda superficial representó un avance en el cálculo de la magnitud, seguía presentando dificultades para precisar la magnitud en sismos superiores al nivel 8 de la escala, por esta razón, los precitados autores plantean el uso de la magnitud del momento.

Magnitud de Ondas de Cuerpo (Mb):

Esta escala considera la relación existente entre la amplitud máxima, es decir, la amplitud del componente vertical de una onda P o S (Ondas de volumen), en un período entre 0,1 y 3,0 segundos (Tavera, 2001). Es válida para sismos ocurridos a diferentes profundidades. Fue ampliamente utilizada en los registros sísmicos de Venezuela desde 1950 hasta 1990, año que inicia su sustitución progresiva por la magnitud del momento sísmico (FUNVISIS, 2014)

Magnitud del Momento Sísmico (Mw):

Se expresa de acuerdo con Kanamori y Hanks (1979) en una escala logarítmica usada para medir y comparar sismos a partir de la medición de la energía total liberada, a diferencia de las anteriores magnitudes, según Sarria (2008) no se satura en los valores altos, ya que calcula el momento sísmico. Este último, es una medida del tamaño de un sismo basada en: el área de la ruptura de la falla, el promedio del desplazamiento de la misma y la fuerza necesaria para generar este movimiento. Autores como Bolt (2003), Sarria (2008), Schearer (2009) y Turcotte y Schubert (2014) plantean que tanto el momento sísmico como la magnitud del momento, constituyen en el presente la forma más directa y precisa de cuantificar la energía liberada en la fuente sísmica.

Intensidad

La intensidad no mide el movimiento del suelo o el tamaño de los sismos evaluados en cuanto a la liberación de energía, pero si indica los efectos que estos producen en la superficie, donde causan daños a los grupos humanos y a las infraestructuras (Keller, 2007). Inicialmente los esfuerzos para determinar el tamaño de un sismo se fundamentaron en observaciones de los efectos del mismo en los centros poblados. De allí según Bolt (2003) surge la primera escala de intensidad en 1883 (Rossi – Forel), que agrupa los efectos del sismo en 10 grados de intensidad. El autor antes citado en su análisis histórico del concepto de intensidad, señala que, en 1902, el vulcanólogo Giuseppe Mercalli introduce una nueva escala también de 10 grados de intensidad, que

luego fue incrementada a 12 por el físico A. Cancani. En 1923 Sieberg publica una escala más detallada, pero basada en las anteriores. En 1931 Wood y Newmann proponen una nueva escala, modificando y condensando la escala de Mercalli-Cancani-Sieberg, conformando así la escala de Mercalli Modificada (MMI).

Los sismos pueden generar diferentes niveles de daño a diversas distancias del epicentro, que obviamente se expresan en diferentes niveles de intensidad, al respecto Strahler (2005), comenta que el terremoto de San Fernando, California en 1971, con una Mw de 6.7, presentó una intensidad Mercalli Modificada que variaba de grado I a XI dependiendo de la proximidad al epicentro y de las condiciones geológicas locales.

Recurrencia de las Magnitudes y Retorno Sísmico

La acumulación de energía principalmente en las zonas de convergencia, de expansión y transformantes de la corteza terrestre, es la responsable del rompimiento en una falla que da origen a un sismo. Al respecto Sarria (2008) plantea que dentro de las investigaciones sismológicas y geodinámicas siempre ha estado presente la inquietud sobre la frecuencia con que ocurren y qué magnitudes presentan los sismos. Ahora bien, Bolt (2003) afirma que las respuestas a estas preguntas no son sencillas si se intenta comprender el fenómeno físico de cada campo de esfuerzos, sin embargo, existe una tendencia estadística general que permite estudiar el problema de manera expedita.

La sismicidad según Sarria (2008) analiza los datos sobre sismos pasados. Estos datos se pueden procesar de tal manera que se deduzcan importantes características regionales. La recurrencia de las magnitudes es una de esas características. En este sentido, Stein y Wyssession (2003) plantean que para: "...hacer estudios de recurrencia de las magnitudes es necesario circunscribirse a un área que no puede ser pequeña" (p. 94), por este motivo autores como Palacios y De Marcos (1996); Castro y Ojeda (2001); Oropeza y Zambrano (2007); Sarria (2008) y Zúñiga (2011), sugieren el uso de un área de influencia entre 200 y 300 km de radio, para el análisis de los procesos asociados a la sismicidad.

Sarria (2008) explica, que con los datos de los sismos pasados localizados dentro del área de influencia se puede formar un listado de las magnitudes en orden creciente a partir de una magnitud mínima usualmente igual a cuatro. Luego, se cuentan los sismos que igualan o superan la magnitud de referencia, de forma que se puede establecer utilizando un método estadístico la recurrencia de las magnitudes en un área determinada a lo largo del tiempo, con ello según Bolt (2003) se puede inferir la propensión del área a sismos de una magnitud dada.

El retorno sísmico según Sarria (2008): "...se define como el tiempo inferior entre eventos sísmicos de iguales características" (p.124), por su parte, Sauter (1989) plantea que en el análisis del retorno sísmico es importante considerar los ciclos sísmicos de las fallas activas, para establecer entre otros parámetros, las fuentes sismogénicas.

El ciclo sísmico según Schearer (2009) es entendido como la correlación entre la magnitud del sismo y el tiempo que transcurre hasta el próximo evento. Este tipo de comportamiento cíclico de las fallas se puede explicar con base en el modelo físico del mecanismo de ruptura establecido en la teoría del rebote elástico, que plantea según el autor precitado la existencia de bloques de roca adyacente que se deslizan en forma continua en sentidos opuestos, resultando en la acumulación constante de energía de deformación; los esfuerzos aumentan progresivamente y cuando alcanzan determinado límite y sobrepasan la resistencia del material, desencadenan el sismo al producirse la fractura violenta de la roca.

El momento sísmico, la magnitud del sismo y por lo tanto la cantidad de energía liberada, dependen de la caída de esfuerzos en la falla; a mayor caída de esfuerzos, mayor magnitud del evento (Sarria, 2008). Asimismo, existe una dependencia temporal entre eventos sísmicos sucesivos que Sauter (1989) denomina como período de recurrencia característico, que depende de la razón de deslizamiento y de la acumulación de esfuerzos en el material de la corteza. A mayor razón de deslizamiento y mayor intervalo entre eventos sucesivos, mayor será la magnitud y la energía sísmica liberada en cada evento. Según Stein y Wyssession (2003) ello implica que en un segmento de falla o en una región determinada, los sismos no ocurren de una manera

meramente aleatoria, es decir, independientes entre sí, sino que existe una correlación entre los tiempos de recurrencia de eventos sucesivos y la magnitud.

Algunas regiones se caracterizan por intervalos de tiempo largos entre eventos muy grandes, mientras en otras, los sismos ocurren con mayor frecuencia, pero son de menor magnitud, pudiendo ser el total de la energía liberada igual en ambas regiones (Sauter, 1989). Ya que en eventos grandes la caída de esfuerzos es mayor, se requiere un tiempo más largo para que los esfuerzos alcancen nuevamente el límite de los materiales. Por tanto, el retorno sísmico de un segmento de falla, está dado por la magnitud de los sismos y por la razón de deslizamiento, que equivale según el precitado autor, a la razón de aumento de los esfuerzos acumulados en los bordes de la falla.

Fuente Sísmica y Actividad de la Fuente

En la fuente sísmica participan según Sarria (2008) una serie de variables de orden geométrico y físico. Desde el punto de vista geométrico se consideran sus dimensiones y desde el punto de vista físico, la dinámica asociada a la ruptura se debe a la liberación de fuerzas de volumen y contacto. Al respecto Bolt (2003) indica que las dimensiones de la fuente están caracterizadas por la geometría del plano de falla. Sauter (1989), afirma que en la realidad no existe un plano sino un área esforzada que se idealiza con éste. El área del plano de falla, su buzamiento y su posición geográfica definen la geometría de la fuente.

Las características físicas principales de la fuente sísmica que condicionan el contenido frecuencial y la magnitud de las perturbaciones impuestas al medio, de acuerdo a Schearer (2009) son las siguientes:

- La distribución de las barreras y asperezas en el plano de falla.
- Las características del material fracturado dominante.
- La velocidad de ruptura.
- La dirección del desplazamiento durante la ruptura.
- El estado de esfuerzos y deformaciones.
- La relación entre tiempo, acumulación y liberación de energía (retorno sísmico)

Dichos planteamientos se corresponden con lo expuesto por Schearer (2009), quien sostiene que cuando una aspereza se rompe produce algo similar a una función impulsiva que contiene todas las frecuencias con igual amplitud. En el instante de la fractura, la energía elástica acumulada se transforma en cinética y se genera un deslizamiento muy complicado en el llamado plano de falla. Este deslizamiento se inicia en un punto y se extiende muy rápido al plano involucrado. Las porciones que se deslizan se frenan de una manera más o menos abrupta y la energía cinética asociada a la masa involucrada vuelve a sufrir cambios de corta duración a estados potenciales. El proceso se extiende a todo el campo de liberación con fuertes disipaciones de energía por fricción. A la primera ruptura se le denomina según Bolt (2003) con el nombre de nucleación del proceso.

La dinámica en la fuente es compleja y las aproximaciones analíticas disponibles en sismología, según Sarria (2008), apenas producen resultados que en los mejores casos son parecidos a los registrados. Los procesos dinámicos asociados a la liberación de energía en el campo de esfuerzos están en proceso de investigación por muchos grupos de sismología analítica.

Ondas Sísmicas

Bolt (2003) comenta que la energía elástica acumulada a lo largo del tiempo en las zonas de convergencia o de movimientos relativos entre diferentes bloques de la corteza, se libera súbitamente por los desequilibrios asociados al rompimiento de la falla. Esta energía se debe disipar para que el medio pueda retornar a una condición de equilibrio. La disipación se produce por el desplazamiento del estado de esfuerzo liberado y obedece a los fenómenos de fricción y debilitamiento de la intensidad energética al aumentar el área por la cual pasa la misma cantidad de energía, lo que ocurre a medida que las ondas se alejan de la fuente que las originó (Schearer, 2009).

Por otra parte, Sarria (2008) argumenta que la propagación de la perturbación desde la fuente sísmica tiene una serie de componentes compresivos y cortantes desde el punto de inicio del desplazamiento. Estas perturbaciones se transmiten en términos de

procesos ondulatorios porque la elasticidad del medio perturbado hace que se desarrolle un intercambio de energía elástica y cinética. En cada punto del plano de ruptura ocurre un proceso oscilatorio que origina las ondas sísmicas, las cuales transmiten un conjunto de esfuerzos que se propagan por el interior del planeta en múltiples direcciones.

Desde la perspectiva de Stein y Wysession (2003) las ondas sísmicas se clasifican en: ondas internas (cuerpo), es decir, aquellas que se propagan por el interior de los materiales sólidos, y las ondas superficiales, que se pueden transmitir por la superficie o por los contactos entre bloques que tienen diferentes propiedades elásticas. A continuación, se describen cada una de las principales ondas sísmicas:

Ondas Internas o de Cuerpo:

Las ondas internas según Sarria (2008) son procesos oscilatorios libres que se transmiten en cualquier dirección en el interior de los cuerpos, existen dos tipos de ondas internas: las longitudinales también llamadas compresionales y las ondas transversales. Las primeras también son conocidas como ondas P, gráficamente su representación es similar a las ondas que portan la energía que transmite el sonido. Las ondas S, son las transversales, se asemejan visualmente a las observadas en una cuerda que se hace mover con un extremo fijo.

De allí que, la velocidad de las ondas P, siempre es superior a la velocidad de las ondas S. Por este motivo, en una estación sismológica, las ondas P siempre son detectadas antes que cualquier otra onda, aunque es importante señalar, que pese a esto las ondas P son más débiles en términos relativos que las S, dado que estas últimas tienen mayor amplitud, lo que redundaría en mayor capacidad de destrucción. Es por esto que, en un sismo se sienten primero unas sacudidas suaves que luego aumentan en intensidad.

Las ondas P, según la apreciación de Schearer (2009) se caracterizan por el aglutinamiento o compresión de las partículas del medio transmisor a lo largo de la trayectoria ondulatoria, mientras que las ondas S, se caracterizan por desplazamientos del medio transmisor que son perpendiculares a la dirección de la propagación. Las

ondas internas sufren fenómenos de reflexión y de refracción en los contactos entre medios de diferente comportamiento elástico que simultáneamente implican diferentes velocidades, lo que según los planteamientos de Bolt (2003) ha permitido identificar algunos casos donde las ondas P se convierten en ondas S a partir de los cambios en los materiales.

Ondas Superficiales

Las ondas superficiales son de dos tipos: ondas R o de Rayleigh y las ondas L o de Love. Según Sarria (2008), las ondas R:

Se desplazan por la superficie de tal manera que las partículas del medio transmisor describen trayectorias elípticas y las ondas L o de Love, que se asemejan a las ondas de cortante. La velocidad de las ondas superficiales es similar a las ondas S, asimismo la amplitud decrece con la profundidad, y los desplazamientos que generan se encuentran en el plano de incidencia (p. 148)

Las ondas superficiales pueden experimentar dispersión por lo que es necesario distinguir entre la velocidad de fase (con la que viajan los máximos y los mínimos) y la velocidad de grupo (con la que se transporta la energía y es función de la frecuencia). Para las ondas Rayleigh las partículas se mueven según Bolt (2003) "...vertical y horizontalmente en el plano vertical orientado a la dirección del movimiento" (p. 28). En cambio, las ondas Love son ondas polarizadas horizontalmente con un movimiento perpendicular a la dirección de propagación y según Herráiz el mecanismo se denomina reflexiones totales múltiples.

Aceleración Sísmica, Amplificación y Atenuación Sísmica

Las alteraciones en las ondas sísmicas desde la fuente de liberación de la energía elástica hasta la superficie durante un evento sísmico, están muy relacionadas con el medio geológico por el cual se desplazan las ondas. Según Trigo (2012), también se conoce como efecto de sitio, dado que se asocia a las propiedades geotécnicas y la profundidad de los materiales, lo que deriva, una fuerte dependencia entre la amplificación de las ondas sísmicas y las condiciones locales del terreno y del subsuelo.

La modificación de la señal sísmica, entendida por Chirinos, Infante, Montoya y Figueroa (2009) como la combinación de las ondas sísmicas y la interferencia que generan estas al entrar en contacto con los materiales, genera una mayor duración de la misma y la variación de la frecuencia con la que la onda sísmica se desplaza. En este sentido, Trigo (2012) admite que el suelo funge como filtro de las frecuencias de las ondas sísmicas, por tanto, cuando los materiales interactúan con las ondas pueden ampliar o disminuir el número de repeticiones de las mismas por unidad de tiempo. Al respecto Beltrán, Castiblanco y Alfaro (2006) refieren que los denominados suelos blandos, aquellos que por sus propiedades de cohesión y fricción intergranular no están fuertemente cementados, generan una amplificación de la señal sísmica que trae como consecuencia, un aumento en la flexibilidad del suelo, lo que conlleva una mayor vulnerabilidad de las infraestructuras que se encuentran en superficie.

La amplificación sísmica, está determinada por las propiedades dinámicas de los suelos, particularmente importantes son la rigidez y el amortiguamiento, del mismo modo tienen un efecto indirecto propiedades como la densidad, el índice de porosidad y la plasticidad. A partir de esto, Trigo (2012) plantea que se pueden establecer las respuestas del suelo, regolitos, sedimentos y rocas a diversas frecuencias de onda que permiten inferir las denominadas frecuencias predominantes del suelo, puesto que a partir de esto se puede establecer, mecanismos de control que permitan disminuir los cambios originados por la interacción de los materiales con las ondas sísmicas.

El proceso contrario de la amplificación sísmica, se denomina atenuación de la aceleración (Sauter, 1989), este fenómeno que se relaciona directamente con la intensidad del movimiento del terreno y su aceleración, permite establecer que, a determinada distancia de la fuente sísmica, las ondas elásticas originadas por la ruptura, van disminuyendo la amplitud de las vibraciones y por tanto la intensidad. Esto ocurre, debido a la pérdida de energía que sufren las ondas sísmicas al interactuar con los materiales. Este proceso de atenuación, puede variar de acuerdo a diversos factores, tales como: la profundidad del foco y las condiciones del medio por el que se han desplazado las ondas.

A partir de esto, se establecen según Zúñiga (2011) unas leyes de atenuación que son sumamente importantes para determinar el peligro sísmico de un área. Estas leyes son el resultado de diversos análisis hechos con sismógrafos, según el autor, "...a diferentes distancias, en diferentes sismos y en diferentes regiones" (p. 27); a partir de esta combinación de fuentes y procesando los distintos sismogramas, se generan inferencias físicas y estadísticas que permiten comprender mejor el comportamiento en función de la distancia de las ondas sísmicas. En este sentido, se ha podido deducir que, en la mayoría de los casos, las altas frecuencias son atenuadas más rápidamente con la distancia que las bajas, es decir, que los sismos con mayor intensidad, se atenúan más rápidamente que los de menor (Zúñiga, 2011).

Para comprender los efectos de la atenuación, se calcula en función de la distancia, el efecto de todas las fuentes sismogénicas que pueden potencialmente tener sobre dicho sitio, esto permite establecer los valores de aceleración máxima esperada, lo que facilita comprender las posibles interacciones que las ondas sísmicas puedan generar con los materiales presentes en un área y aproximarse a los efectos extremos posibles.

La aceleración máxima del terreno, según Sauter (1989), es el parámetro más comúnmente empleado para identificar la intensidad de la sacudida sísmica, se expresa en cm/s^2 o en porcentaje de la gravedad (%g) y es medida instrumentalmente mediante acelerógrafos que registran las vibraciones de la superficie terrestre y las variaciones en la aceleración del terreno en función del tiempo, a partir, de tres componentes del movimiento, dos horizontales ortogonales entre sí, y una componente de movimiento vertical.

Cabe señalar, que en conjunto la aceleración máxima del terreno, la amplificación y atenuación sísmica, se han convertido según Sauter (1989), en el elemento base para el análisis estructural de los materiales y edificaciones, así como para el diseño de normas de sismorresistencia, por tanto, es de suma importancia el cálculo y análisis de estos parámetros en el marco de un análisis de peligrosidad sísmica.

Eventos Cosísmicos

Una de las múltiples particularidades asociados a los sismos, son los denominados eventos cosísmicos, en este sentido Keller (2007) afirma que la vibración generada por las ondas sísmicas y por consiguiente su efecto en las infraestructuras y los grupos humanos son identificados como efectos primarios de un sismo, por su parte, movimientos en masa, cambios regionales en la elevación del terreno, incendios, tsunamis entre otros, son llamados efectos secundarios o eventos cosísmicos.

Movimientos en Masa como evento cosísmico

Los movimientos en masa son un proceso erosivo, que ocurre en las vertientes en determinadas condiciones de pendiente, y donde intervienen un conjunto de factores que ocasionan las condiciones adecuadas, para que se active el desplazamiento de los materiales (Keller, 2007), uno de estos factores detonantes, es la sismicidad, ya que la vibración de los materiales al entrar en contacto con las ondas sísmicas, producen cambios en su estado de consistencia que pueden favorecer, si el escenario es propicio, la pérdida de cohesividad y cementación de los materiales que originan el fenómeno de remoción de masas.

Un sismo puede originar diversos tipos de movimientos en masa, los más frecuentes, son los deslizamientos, los desprendimientos o caídas y la licuefacción, autores como Ferrer (2005) y Keller (2007), precisan un conjunto de movimientos en masa que tuvieron su origen de forma posterior a un sismo, particularmente en Venezuela se tiene registro de diversos eventos con estas características en áreas de montaña, Ferrer (1999) enumera entre otros: el alud sísmico de la playa, causado por el terremoto de bailadores en 1610; flujo de descarga en la quebrada Montalbán en 1947 en Ejido, ambos eventos en el estado Mérida. Particularmente en el Táchira se tiene registro de varios fenómenos cosísmicos; sin embargo, Rodríguez y Audemard (2006) resaltan el ocurrido en 1981, en las cercanías de la ciudad de San Cristóbal, en el barrio La Escondida, posterior a un sismo de mediana magnitud en combinación con intensas precipitaciones los días

previos, se activó un proceso de licuefacción, que trajo como consecuencia daños humanos y materiales.

Movimientos en Masa

La mayor parte de la superficie terrestre según Gutiérrez (2009) está formada por vertientes o laderas, que según Porta, López y Roquero (2003) se definen como un elemento inclinado que enlaza una divisoria de aguas con un fondo. El estudio de su forma, significado y evolución constituye una de las materias básicas de la Geomorfología (Gutiérrez, 2009). Las vertientes son sistemas dinámicos y en evolución, donde actúan un conjunto de procesos morfogénéticos que poseen un componente perpendicular y un componente paralelo a la superficie. La expresión del primer componente, según el precitado autor, es la meteorización y la edafogénesis; mientras que la expresión del componente paralelo es la erosión.

La erosión, donde el principal agente es la gravedad, se define de acuerdo con diversos autores, entre ellos Zinck (1996), Suárez (1998), Elizalde y Daza (2000) Muñoz (2000), Gómez, Guerra y González, (2003) Keller (2007), Gutiérrez (2009), Aristizábal, Martínez y Vélez (2010) como movimientos en masa, los cuáles según Zinck, López, Metternich, Shresta y Vázquez-Selem (2001), conllevan el desplazamiento de altos volúmenes de material sedimentario, regolitos, rocas y suelo; por diversas causas como pluviosidad, sismicidad, entre otros, y que ocurren fundamentalmente en las capas superficiales.

Por su parte González de Vallejo (2002) definen los movimientos en masa como:

Procesos geodinámicos de diferentes magnitudes y características, donde por acción de la gravedad y por el debilitamiento progresivo de los materiales, debido a la meteorización y la actuación de otros fenómenos naturales y ambientales, y que se ven agravados por las propiedades edafológicas, geológicas y geomorfológicas intrínsecas de los materiales, hacen que las laderas se desplacen desde un estado de reposo inicial a uno final en función de un balance morfogénético (p. 622)

Gutiérrez (2009) señala que Tricart en 1957, utilizó el término balance morfogénético para referirse a la relación entre las fuerzas morfogénéticas y la

evolución de la ladera en función de la magnitud de las mismas. Habitualmente la pendiente de las laderas, cambia hacia un estado de equilibrio, pero dado que estas están constituidas por materiales como rocas y suelos, que tienen propiedades mecánicas contrastantes y evolucionan de diferente manera ante un cambio en el estado de equilibrio, los materiales rocosos tienden a fracturarse y en caso del suelo a desplazarse en función del grado de pendiente y la humedad presente.

La gravedad entonces, está siempre presente, jugando un importante papel en todas las acciones de modelado. Según González de Vallejo (2000) su actuación es directa e indirecta. De forma directa provoca el desplazamiento de partículas sueltas, que por su propio peso tienden a caer. De forma indirecta, afecta muy especialmente a masas que tienden a fluir, desplazándose y ejerciendo una acción sobre la superficie por la que se movilizan. La acción de la gravedad se produce de forma permanente, pero los resultados de dicha acción son diferentes, dependiendo de las condiciones en que se produzca, en este sentido, es sumamente importante la inclinación en que se origina el movimiento por acción de la gravedad.

La acción de la gravedad, según Muñoz (2000), tiende teóricamente a buscar el equilibrio y suavizar los desniveles, en un proceso cíclico, donde la actuación de las fuerzas internas, principales generadoras del relieve, lo renuevan constantemente. Aunque si bien es cierto la acción de la gravedad es fundamental para los procesos involucrados en los movimientos en masa, es importante señalar como plantea Zinck (1996) que: "...las propiedades geológicas y de los suelos condicionan estrechamente la magnitud y la probabilidad de ocurrencia" (p. 26), dado que determinan una serie de propiedades que pueden favorecer los desplazamientos de los materiales. Asimismo, diversos autores tales como Zinck (1996), Alcántara (2000), Aristizábal, Martínez y Vélez (2010) afirman la existencia de factores condicionantes que afectan los materiales y están vinculados a la susceptibilidad de los movimientos en masa.

Tipología de los Movimientos en Masa

Los diferentes tipos de movimientos en masa son el resultado de una combinación de procesos y factores, lo que ofrece diversas posibilidades de clasificación. Gutiérrez (2009) afirma que: "...pueden diferenciarse en función del tipo cinemático del movimiento, tipo de material movilizado, según su estado de actividad, velocidad de movimiento y etapa de desarrollo" (p. 233). La proliferación de tipologías ha dado lugar a una variada nomenclatura, que conlleva una dificultad añadida para identificar cada movimiento en diversas regiones, por la ausencia de criterios técnicos únicos para desarrollar una clasificación mundialmente aceptada.

Otro problema asociado a la clasificación de los movimientos en masa, se atribuye según diversos autores (Alcántara, 2000; Gutiérrez, 2009) al término mismo que identifica el fenómeno, que con el avance científico ha ido cambiando en el tiempo incorporando expresiones de origen anglosajón, que luego de traducciones libres que estudiosos de la materia le fueron realizando, generaron inconvenientes para la aproximación al fenómeno en lengua castelana, al respecto Alcántara (2000) plantea:

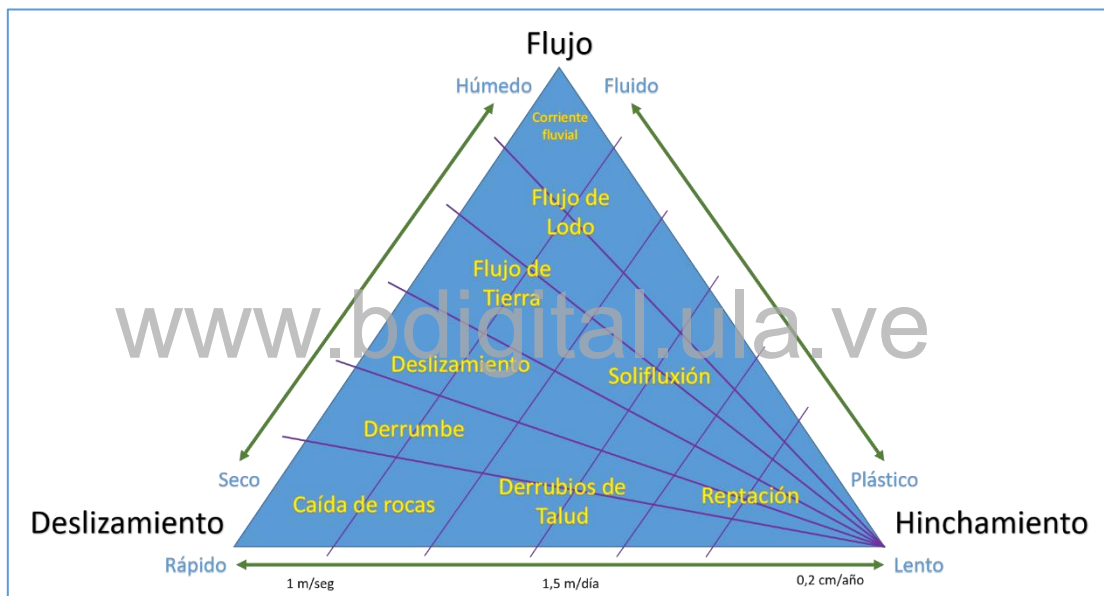
Los movimientos en masa han evolucionado desde las primeras referencias de los mismos, hechas por Ward en 1945, donde los denominó *slope failure*, Yatsu en 1966, los nombró *mass wasting*; Hutchinson en 1968, se refirió a *mass movement*; Varnes en 1978 los denominó *slope movement*. En América Latina, todos estos términos en muchas ocasiones se han traducido como deslizamientos o deslizamientos de tierra, lo que es una noción errada, ya que este término hace referencia a una tipología del movimiento, dejando a un lado otras denominaciones vinculadas a diversas características del proceso. (p. 8)

Ante el planteamiento anterior, a pesar de las diferencias descritas, autores como Zinck (1996), Alcántara (2000) Elizalde y Daza (2000), Gómez, Guerra y González (2003) y Gutiérrez (2009), consideran conveniente denominar a los procesos erosivos que ocurren en las laderas, y donde el principal agente es la gravedad, como movimientos en masa o movimientos de remoción de masas, lo que permite clasificarlos con mayor precisión. En este sentido Zinck (1996) y Gutiérrez (2009) plantean que la clasificación más aceptada de estos fenómenos deriva de los planteamientos hechos por Carson y Kirkby en 1972 (Ver Figura N° 3), a partir de tres

variables básicas: velocidad de los materiales, su consistencia y el contenido de humedad. Cualquier proceso específico de los movimientos en masa y geoformas resultantes derivan de la combinación particular de estas tres variables, en conjunto con los tipos de rotura, los mecanismos de la misma, las causas y por supuesto los tipos de materiales que intervienen en el proceso, de acuerdo con Cruden y Varnes (1996) (Ver Cuadro N°: 10).

Figura N°: 3

Modelo relacional para la clasificación de Movimientos en Masa



Fuente: Carson y Kirkby (1972) modificado por Zinck (1996)

A continuación, se describen los movimientos en masa de forma resumida, según tipo de movimientos y materiales de acuerdo a los planteamientos de Cruden y Varnes (1996).

Desprendimientos o Caídas (Fall)

Se definen como una masa generalmente de rocas que se desprende de un talud abrupto, mediante una superficie de corte normalmente pequeña (Gutiérrez, 2009). Los materiales descienden por caída libre si la pendiente es superior a 90°, se consideran

que los materiales se desplazan saltando con pendientes entre 45° y 90°, y si la pendiente es menor a 45°, las partículas se movilizan rodando (Cruden y Varnes, 1996). Los bloques desprendidos, al impactar con la ladera, suelen romperse en fragmentos más pequeños. Por otra parte, los desprendimientos se subdividen en caídas de rocas, detritos y suelos, en función del tamaño de los materiales, aunque la dinámica del movimiento es muy similar. Según González de Vallejo (2000), la superficie inicial de rotura puede ser planar, en cuña, escalonada o vertical.

Cuadro N° 10
Clasificación de los Movimientos en Masa, según el tipo de movimiento y materiales

<i>Tipo de Movimiento</i>	<i>Tipo de Material</i>		
	Roca	Predominantemente Grueso	Predominantemente Fino
<i>Caída</i>	Caídas de roca o Desprendimiento	Caída de detritos	Caída de Suelos
<i>Vuelcos</i>	Vuelco de rocas	Vuelco de detritos	Vuelco de suelos
<i>Deslizamiento Rotacional</i>	Asentamiento de rocas	Asentamiento de detritos	Asentamiento de suelos
<i>Deslizamiento Traslacional</i>	Deslizamiento de rocas	Deslizamiento de detritos	Deslizamiento de suelos
<i>Desplazamiento Lateral</i>	Desplazamiento de rocas	Desplazamiento de detritos	Desplazamiento de suelos
<i>Flujos</i>	Flujo de rocas	Flujo de detritos	Colada de barro
<i>Complejos</i>	Combinación de dos o más movimientos		

Fuente: Cruden y Varnes (1996)

Keller (2007), plantea que las causas de los desprendimientos son variadas y una de las más importantes se debe a ciclos prolongados de hielo y deshielo en las diaclasas (gelifracción), por su parte Suárez (1998), sostiene que lluvias intensas también suelen constituir un importante factor desencadenante, además de la actividad sísmica y el socavamiento basal de la vertiente producto de la erosión fluvial.

Vuelcos o Desplomes (Topples)

Un vuelco consiste en una rotación hacia adelante de una masa de roca o suelo, en torno a un punto o eje por debajo del centro de gravedad de la masa desplazada (Cruden

y Varnes, 1996). Los vuelcos son roturas que se desarrollan sobre materiales con estructuras verticales formadas por planos de discontinuidad de la roca. Aguilera, Borderías, González y Santos (2004), expresan que el despegue de las columnas puede realizarse sobre una o varias superficies y la descompresión suele ser un requisito esencial. Así mismo, Cruden y Varnes (1996) distinguen varios tipos de vuelcos: el vuelco por flexión, frecuente en pizarras, filitas y esquistos; el vuelco de bloques, desarrollado sobre materiales que presentan diaclasas espaciadas y son típicos de calizas y areniscas masivas; el vuelco en chevron, donde el cambio de buzamiento se realiza a lo largo de una superficie de rotura y los vuelcos de bloques flexionados, que se caracterizan por flexiones falsamente continuas de largas columnas afectadas por movimientos a lo largo de varias diaclasas.

Keller (2007) refiere que: "...los factores que influyen en los vuelcos son los ciclos de hielo y deshielo, la meteorización salina en areniscas y disolución de caliza" (p. 178), del mismo modo Gutiérrez (2009) plantea que los vuelcos de rocas se producen en grandes escarpes, mientras que los vuelcos de detritos se encuentran en pequeños escarpes.

Deslizamientos (Slides)

Un deslizamiento es un movimiento de ladera de una masa de roca, detritos o suelo que tiene lugar sobre superficies de rotura o sobre estrechas zonas de intensa deformación por cizallamiento (Cruden y Varnes, 1996). Con frecuencia, las primeras señales de movimiento del terreno son grietas superficiales y a lo largo de ellas se suele desencadenar el deslizamiento. Por lo tanto, se trata de un movimiento progresivo, en el que la masa desplazada puede deslizarse más allá de la superficie de rotura sobre otra denominada superficie de separación (Gutiérrez, 2009).

Una vez producido el deslizamiento se pueden observar los escarpes y flancos indicadores de la dirección del movimiento, tal y como plantean Ayala, Andreu, Ferrer, Fernández, Olalla, Gómez y San Pedro (1987). Cruden y Varnes (1996) diferencian también los deslizamientos según su edad, en contemporáneos y fósiles.

Deslizamientos Rotacionales (Slump)

Son definidos por Cruden y Varnes (1996) como movimientos alrededor de un eje que es paralelo a las curvas de nivel de la ladera (rotacional), y que implica un deslizamiento de cizalla, a lo largo de una superficie cóncava, que es visible o puede reconocerse sin dificultad. La superficie de cizalla, según Gutiérrez (2009) tienen forma circular o de cuchara. Los deslizamientos rotacionales se producen en rocas, detritos y suelos, así mismo presentan un pequeño grado de deformación interna en el material desplazado, que lo distingue de los flujos (Ayala et al., 1987). Después de iniciarse la rotura, la masa deslizada comienza a rotar y se desintegra en varios bloques a partir de las grietas transversas desarrolladas. En el área de cabecera, los bloques oscilan contra la pendiente, allí se sitúan lagunas que posteriormente se colmatan y evolucionan en zonas pantanosas (Strahler, 2005). Además, se reconocen estrías en la superficie de deslizamiento y las grietas expuestas son céntricas y cóncavas hacia la dirección del movimiento.

Deslizamientos Traslacionales

En los deslizamientos traslacionales la masa progresa, a lo largo de una superficie plana o ligeramente ondulada (Cruden y Varnes, 1996). La masa deslizada se desplaza por la superficie del terreno y a favor de los planos de discontinuidad de las rocas (estratificación, fallas y diaclasas) y en depósitos con variaciones claras en la resistencia a la deformación, originadas en rocas, detritos y suelos (Gutiérrez, 2009).

Los deslizamientos de bloques (block slides), implican movimiento de bloques sobre un plano, que suele ser el de estratificación y van acompañados por pequeños deslizamientos rotacionales. En el área de despegue del deslizamiento se suele desarrollar una pequeña concavidad que forma una depresión. Este tipo de deslizamiento se lleva a cabo por etapas e incrementan su velocidad por acción de la precipitación (Cruden y Varnes, 1996).

Los deslizamientos rocosos (rock slides), según Keller (2007) son típicos de vertientes en paisaje de montaña, en donde los planos de discontinuidad de las rocas

son aproximadamente iguales al de la ladera (cuestas de buzamiento). Los deslizamientos de detritos, son frecuentes en suelos meteorizados, a partir de regolitos originados de lutitas y arcillitas. Estos se movilizan por una cizalla próxima a la superficie. El ángulo de desplazamiento está relacionado con el grado y la profundidad de la meteorización, igualmente su ancho y longitud son mucho mayores que la potencia del material deslizado. Así mismo, las roturas de este material no consolidado, hacen que, en su avance, este se rompa en pequeñas partes, y en función de la pendiente su velocidad y recorrido aumenta.

Otro tipo de deslizamiento, son las coladas de barro (mudflow), un tipo de movimiento en masa, en que los detritos arcillosos, limosos y de arena muy fina se movilizan fundamentalmente por el deslizamiento sobre superficies de rotura, con un movimiento relativamente lento, dando lugar a formas lobuladas o alargadas. (Gutiérrez, 2009)

Desplazamientos o Expansiones Laterales (Lateral Spread)

El término desplazamiento (spread), según Cruden y Varnes (1996), describe movimientos súbitos en arenas y limos con agua en el espacio poroso. La rotura superficial es lenta, debido a la licuación o flujo y posterior extrusión de material más blando. Por otra parte, Muñoz (2000), señala que la expresión desplazamiento lateral se utiliza fundamentalmente para describir la extensión lateral de una roca o masa de suelo sobre un material infrayacente más blando. Los desplazamientos laterales según Cruden y Varnes (1996) se dividen en: desplazamiento lateral de rocas y desplazamiento en suelos y detritos.

Flujos (Flow)

Los flujos constituyen un tipo de movimiento en masa, que se comporta como un fluido por acción del agua o del aire. Según Cruden y Varnes (1996), el flujo implica una mayor deformación interna que un deslizamiento, debido a que tiene lugar sobre un gran número de pequeñas superficies de cizalla o porque el contenido de humedad de la masa, es tan alto que llega a comportarse como un fluido.

Los flujos según Gutiérrez (2009), se subdividen en varios tipos en función de los materiales: flujos de detritos, flujos de suelo y flujos de rocas. Los primeros movilizan fragmentos de roca, bloques y cantos en una mezcla arenosa con escaso contenido de arcilla, los segundos, se desarrollan en arenas, limos y arcillas saturados en agua o licuados, estos según Zinck (1996), son también llamados soliflucción. Y los últimos, que, a diferencia de los anteriores, se desarrollan sobre materiales no consolidados y se asocian a deformaciones gravitacionales profundas (Cruden y Varnes, 1996).

Es importante señalar, que autores como Cruden y Varnes (1996), Alcántara (2000), Strahler (2005), Keller (2007) y Gutiérrez (2009) señalan que los flujos de detritos (debris flow) son más comunes y peligrosos, se localizan en la mayoría de las zonas morfoclimáticas, se desplazan a grandes distancias y son muy destructivos. La fuente del material puede ser regolitos producto de la meteorización in situ o depósitos en ladera, para Zinck (1996) los depósitos aluviales en áreas montañosas, también se consideran como fuente de alimentación de estos flujos.

En esta secuencia de ideas, Gutiérrez (2009), asevera que el agua necesaria para generar los flujos de detritos, suele proceder de lluvias de alta intensidad o de deshielos rápidos, que favorecen el escurrimiento y al mezclarse con los materiales, originan estos movimientos, que van reduciendo su viscosidad al aumentar la velocidad y disminuir la resistencia sobre el plano de ruptura. Un tipo particular de flujos de detritos son los lahares volcánicos o flujos piroclásticos, originados a partir de los materiales incandescentes de los flancos de un volcán, generalmente de carácter explosivo.

Movimientos en masa complejos

Con frecuencia, en el análisis de los movimientos en masa se identifican uno o más tipos de los descritos anteriormente, de allí su nombre de complejos, los cuáles según Gutiérrez (2009), se manifiestan en las diferentes partes de la masa movilizada o por las distintas etapas del desarrollo de los movimientos, es decir, cuando la masa comienza a moverse tienen características de un tipo de rotura y posteriormente

evoluciona en su desplazamiento a otro tipo de movimiento. Los movimientos complejos se clasifican en: Avalancha de rocas y flujos deslizantes.

Avalanchas de Rocas:

Son definidas por Gutiérrez (2009) como: "...un movimiento en masa producto del desprendimiento de rocas por acción del aire que las fluidifica y que se moviliza por acción de la gravedad" (p. 249). En este sentido, las velocidades de las grandes avalanchas de rocas superan los 90 km/hora, aunque hay bloques que alcanzan velocidades superiores, en la mayoría de los casos, éstas tienen su génesis en altas montañas con laderas abruptas (pendiente próximas a 90°) y socavadas por procesos fluviales y glaciares, que originan taludes casi verticales que favorecen la caída de grandes masas rocosas. Gutiérrez (2009) opina que el análisis mecánico de una avalancha de rocas incluye, en primer lugar, la rotura inicial que activa el desprendimientos o caída, y, en segundo lugar, el deslizamiento subsiguiente.

Flujos Deslizantes:

Son colapsos estructurales del material de las laderas, que se convierte en fluido momentáneamente y luego se moviliza, alcanzando grandes velocidades y largos desplazamientos (Keller, 2007). Un flujo deslizante está compuesto por material con baja compactación que pierde su cohesión, y que, por acción del agua o el aire, se comporta como fluido. Mecánicamente este movimiento inicia como un deslizamiento, pero en su evolución se fluidifica rápidamente, aunque la duración de su evento principal puede ser de pocos minutos, el frente del flujo deslizante puede seguir movilizándose durante algunos días, oscilando en períodos de movimiento y estabilidad.

Riesgo, Amenazas, Vulnerabilidades y Susceptibilidad

El ser humano ha intervenido en múltiples procesos que afectan los diferentes sistemas del planeta tierra, procesos que se han acentuado en las últimas décadas por el rápido crecimiento de la población y la aparición de numerosos tipos de estructuras asociadas a las actividades antrópicas, esto ha traído como consecuencia el aumento de

pérdidas de vidas humanas y grandes daños materiales, por acción de los fenómenos naturales asociados a la dinámica terrestre.

A raíz de esto según INGEOMINAS (2001), han surgido múltiples iniciativas para comprender los fenómenos que afectan a los grupos humanos, buscando establecer sus causas, los procesos que intervienen en estos, además de su distribución y magnitud; para de esta manera generar políticas que coadyuven el manejo de las áreas propensas a los mismos. Por otra parte, si bien el conocimiento de estos eventos, permite establecer medidas para contrarrestar sus efectos, no es menos cierto que la decisión de tomar las medidas necesarias, dependerá de la valoración particular que los organismos responsables, efectúen sobre las consecuencias que estos acontecimientos tengan sobre la cotidianidad de las personas.

Ante esta perspectiva, Keller (2007) señala que surge un nuevo paradigma que establece los elementos conceptuales de la amenaza, vulnerabilidad, riesgo y susceptibilidad, para diseñar medidas que mitiguen los daños. Es importante resaltar, que en este paradigma de acuerdo a INGEOMINAS (2001), a los términos: amenaza y riesgo se les ha dado un significado técnico particular distinto al que tienen en el lenguaje coloquial, donde ambos se suelen emplear indiscriminadamente para referirse a eventos que puede causar algún tipo de daño.

Diversas conferencias promovidas por la Oficina Coordinadora de las Naciones Unidas para el Socorro en casos de Desastre (UNDRO), condujeron a la redacción del Manual para el manejo de desastres del año 1984, donde se establece de forma clara y precisa una conceptualización de los términos empleados en esta temática, sin embargo, Muñoz (1997) plantea que estas expresiones han estado matizadas por el contexto para el cual se proponen o por las bases metodológicas y filosóficas adoptadas por el investigador de turno, influenciadas indudablemente por las áreas del conocimiento donde son manejadas. En el caso de las Ciencias de la Tierra y de las Ciencias Ambientales, es frecuente utilizar el enfoque de la UNDRO para referirse a los eventos naturales que impactan sobre los grupos humanos, según lo planteado por

diversos autores como Blaikie (1996), Cardona (1996) Muñoz (1997), Calvo (2001), Aneas (2004), Keller (2007) Ayala (2009), Barranco (2012).

Según Aneas (2004) y considerando los planteamientos hechos por la UNDR0, el riesgo se puede conceptualizar como:

La probabilidad de ocurrencia de un acontecimiento natural o antrópico y la valoración por parte del hombre en cuanto a sus efectos nocivos (vulnerabilidad). La valoración cualitativa puede hacerse cuantitativa por medición de pérdidas y probabilidad de ocurrencia. Cuando se cuenta con los datos adecuados para realizar un cálculo de probabilidades se puede definir el riesgo. En cambio, cuando no existe posibilidad de calcular probabilidades, sino que solo existe intuición o criterio personal, se está frente a una incertidumbre (s/p).

Por tanto, se pone de manifiesto que la noción de riesgo es una construcción social a partir del cálculo de las consecuencias sociales, económicas, políticas que un evento puede tener, y que por tanto requiere de unas medidas específicas para la prevención de los mismos.

La UNDR0 (1984), enfatiza que el término amenaza se refiere a la: "...probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural potencialmente perjudicial en un área o período específico" (p. 80), en este sentido, INGEOMINAS (2001) resalta que no sólo un único evento tiene la potencialidad de causar daño, por tanto, es necesario incorporar al análisis, todas las aristas asociadas al fenómeno, por ejemplo: un huracán en una región, puede causar daños humanos y materiales no solo por la lluvia y el viento, sino también por los movimientos en masa activados por estos.

La vulnerabilidad de acuerdo con Ayala (2009) se refiere a: "...las características de un grupo humano, estructuras naturales o antrópicas, en términos de su capacidad para anticipar, soportar, resistir y recobrase de los impactos de una amenaza" (p. 48), esta noción está íntimamente relacionada con el concepto de susceptibilidad.

INGEOMINAS (2001) define la susceptibilidad como: "...el grado de propensión que tiene una zona a que en ella se genere o a que resulte afectada por un fenómeno natural debido a sus condiciones intrínsecas" (p. 19), particularmente en el caso de los movimientos en masa, Zinck (1996) se refiere a la susceptibilidad como la

predisposición de una forma del relieve o parte de ella a desplazarse por acción de la gravedad, como consecuencia de sus características internas, tales como: las propiedades del suelo, su capacidad para resistir los esfuerzos, las condiciones de drenaje superficial y subsuperficial, la geometría del terreno y su cobertura.

Factores que inciden en la Susceptibilidad a los Movimientos en Masa

Aunque es una tarea muy compleja, en el estudio de los movimientos en masa, es de primordial importancia reconocer y diferenciar los factores que inciden en la estabilidad de las laderas de aquellos que las preparan o condicionan y sobre todo identificar los factores que desencadenan el desplazamiento (Gutiérrez, 2009). Es necesario señalar que los materiales de una ladera están sometidos a esfuerzos que tienden a promover el movimiento del material ladera abajo, y a esfuerzos de resistencia contraria al movimiento, estos últimos condicionados por factores que estabilizan la ladera.

Los movimientos en masa están íntimamente ligados al ciclo geológico. Según Gutiérrez (2009) epirogénesis, meteorización, entre otros, son procesos de ladera de larga duración que preparan las condiciones para que se desencadenen los movimientos en masa. Según Zinck (1996) y Elizalde y Daza (2000) los factores controlan la naturaleza e intensidad de los procesos que favorecen los movimientos de la masa afectada, Zinck (1996), Alcántara (2000) y Aristizábal et al. (2010) clasifican estos factores en: intrínsecos, condicionantes y detonantes.

Factores Intrínsecos:

Zinck (1996) los define como factores inherentes a los materiales, es decir, sus propiedades físicas, químicas, mineralógicas y morfológicas, que no solo influyen en la estabilidad de los materiales sino también pueden actuar según Gutiérrez (2009) como catalizadores del accionar de otros factores que acentúan el movimiento. Keller (2007) y Elizalde y Daza (2000) plantean que no solamente las propiedades de los materiales consolidados y no consolidados influyen sobre la susceptibilidad de los movimientos en masa, afirman que las condiciones geomorfológicas de la ladera

también inciden en el movimiento, puesto que no todas las geoformas o parte de estas son susceptibles a desplazarse. Entre los principales factores intrínsecos se encuentran: distribución del tamaño de las partículas, estructura micromecánica, estados y límites de consistencia, sensibilidad edáfica, capacidad de retener agua, efecto dispersión, la horizonación del suelo y las condiciones geomorfológicas.

Distribución del tamaño de las partículas

Según Zinck (1996), la mayoría de las propiedades de los materiales edáficos que favorecen los movimientos en masa están asociadas originalmente al tamaño de las partículas. Aunque existen diversos sistemas de clasificación por tamaño, se pueden establecer niveles de susceptibilidad, por ejemplo, donde predominan las arcillas (partículas menores a 0,002 mm) los materiales son altamente susceptibles a deslizarse, si se presentan cantidades significativas de limos (partículas entre 0,002 y 0,05 mm) y arena fina (partículas entre 0,05 mm y 0,25) favorecen la solifluxión, mientras que mayores cantidades de arena gruesa (partículas entre 0,25 y 2 mm.) pueden inducir movimientos por licuefacción.

Estructura Micromecánica

Zinck (1996) considera que la susceptibilidad de un material a moverse, depende principalmente de la organización de las partículas del material edáfico. Refiere también, que de acuerdo al tamaño de las partículas se reconocen dos tipos de estructura micromecánica: el apilamiento (arena y limo grueso) y las unidades de fábrica (limo fino y arcilla). El primero se refiere a un arreglo que puede ser cúbico o tetraédrico, en este último las partículas de forma irregular, generan más fricción intergranular lo que conlleva una mayor estabilidad; la segunda estructura micromecánica se refiere a un conjunto de arreglos que asumen las partículas finas (desfloculado, disperso, agregado o floculado), controlando cada uno la susceptibilidad de estas partículas a los movimientos en masa.

Límites de Consistencia

Gutiérrez (2009) indica que la consistencia, evaluada mediante límites de Atterberg e índices de consistencia es un indicador de la susceptibilidad de los materiales a moverse en fenómenos de remoción de masas. Al respecto Zinck (1996), refiere que habitualmente los deslizamientos ocurren en estado semisólido, la soliflucción en estado plástico y los flujos en estado líquido.

Cohesión

Zinck (1996) plantea que esta propiedad de los materiales edáficos está vinculada con la capacidad de los mismos a resistir tensiones mecánicas de tipo tangencial, es decir, tensiones perpendiculares a la superficie. Para calcular la cohesión de los materiales se toma en cuenta su resistencia al corte que es la resistividad del suelo a moverse por acción una fuerza externa. Las arcillas son partículas altamente cohesivas, producto de fuerzas electroquímicas que actúan dentro de ellas, le brindan a los materiales que las contienen elevados niveles de resistencia al corte.

Sensitividad Edáfica

Zinck (1996) hace referencia al comportamiento mecánico de los suelos al perder su estructura y cohesión por cambios en los contenidos de humedad. Este comportamiento se evidencia en procesos como la tixotropía (pérdida y recuperación de la capacidad cohesiva de las partículas al estar sometidas a presión), la licuefacción, la resistencia a la subsidencia y el potencial de contracción-expansión (cambios de volumen por presencia/ausencia de humedad). Por ejemplo, algunas arcillas expansivas (montmorillonita y la vermiculita), experimentan cambios en su estructura física vinculados a cambios a contenido de humedad, lo que favorece la inestabilidad de los materiales, puesto que, al estar secos, se agrietan y pueden desplazarse; del mismo modo, cuando se saturan, son susceptibles a producir flujos por su estado de plasticidad.

Capacidad de retener agua

Diversas propiedades mecánicas que inciden directamente en la susceptibilidad de los materiales a los movimientos en masa están vinculadas con la capacidad del suelo de retener agua, que tradicionalmente se evalúa mediante parámetros como el punto de marchitez permanente, muy relacionado con la microporosidad, y la capacidad de campo. Zinck (1996) plantea que los excesos de agua pueden reducir la capacidad cohesiva del suelo, aumentar el peso de los materiales, lo que influye en la inestabilidad gravitacional y facilita el deslizamiento de los planos de cizallamiento.

Efecto Dispersión

Este efecto para Zinck (1996) se evalúa a partir del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y la relación de adsorción de sodio (RAS), la presencia de este elemento químico indica que las partículas que componen el material edáfico, no logran tocarse a causa del gran radio hidráulico del sodio, que disminuye la capacidad de cohesión y las partículas se dispersan, en otras palabras, un mayor contenido de sodio intercambiable favorece la dispersión de los materiales y el colapso de la estructura edáfica (fábrica), lo que obviamente posibilita el desplazamiento.

Horizontes del Suelo (Sequum)

El nivel de evolución de los suelos, evidenciado en la presencia de horizontes bien diferenciados con propiedades contrastantes, favorece la aparición de planos de debilidad o de superficies de cizallamiento, que contribuyen a la acumulación de agua que promueven el desplazamiento de los horizontes. Este fenómeno es frecuente en suelos con horizonte argílico como en ultisoles y alfisoles.

Condiciones Geomorfológicas

Gutiérrez (2009) refiere que la energía del relieve, la geometría (altura, longitud y forma) y la exposición de la ladera constituye un conjunto de elementos que favorecen los movimientos en masa. Al respecto Elizalde y Daza (2000) refieren que los cambios en estas propiedades se vinculan con los intercambios de energía y materia entre los

componentes sólidos, líquidos, gaseosos y bióticos de la Tierra. En este sentido Keller (2007) indica que en las laderas de escasa inclinación se originan muy pocos movimientos en masa, por tanto, se infiere que, aunque las propiedades de los materiales consolidados y no consolidados sean propicias para el desplazamiento, si no están dadas las condiciones geomorfológicas necesarias, no se activará la remoción de los materiales.

Factores Condicionantes

La susceptibilidad de los materiales a desplazarse aumenta o disminuye por la acción de otros factores ambientales, por este motivo, Zinck (1996) propone la existencia de los factores condicionantes que son aquellos que predisponen la ladera al movimiento, algunos autores como Keller (2007) y Gutiérrez (2009) también los denomina factores constantes, puesto que su acción se ubica en un marco temporal bastante amplio. Entre los principales factores condicionantes se enumeran:

La cobertura vegetal

Las condiciones de la cobertura vegetal, tienen un efecto positivo, puesto que mejoran y mantienen la estabilidad superficial del terreno. Igualmente, la vegetación puede evitar la degradación y disgregación de los suelos, sirve como protección de la erosión al mejorar el drenaje y cohesiona los niveles superficiales de los materiales por la acción de las raíces. En este sentido, los suelos con escasa o nula presencia vegetal, aumentan sus tasas erosivas, puesto que permite que los agentes erosivos actúen directamente sobre los materiales.

Contexto Geohidrológico

Zinck (1996) comenta que la circulación del agua en el manto edáfico determina la formación de superficies de lubricación que favorecen la presencia de cizallamientos y de mesas freáticas que controlan los movimientos en masa. Del mismo modo, refiere el autor que los regímenes de humedad que tienden a mantener los suelos húmedos (údic) y saturados (acuico) aumenta la susceptibilidad de los movimientos en masa.

Las estructuras geológicas

Las condiciones geológicas presentes en la ladera entre ellas la litología y la estructura de los materiales determinan en muchas ocasiones según Gutiérrez (2009) el comportamiento geomecánico de los materiales. Al respecto Zinck (1996) sugiere que los regolitos profundos derivados de la meteorización de las rocas, favorecen los deslizamientos rotacionales. En cambio, direcciones de buzamiento y foliación paralelas a las pendientes permiten la concentración oblicua de flujos de agua y promueven deslizamientos traslacionales.

Sismicidad

La intensidad sísmica representa la fuerza del movimiento sísmico, sin embargo, ésta no siempre es responsable de la activación de un movimiento en masa, al respecto Keller (2007) afirma que en muchas ocasiones los sismos también actúan como fenómenos debilitantes, es decir, condicionan las vertientes y los materiales puesto que generan cambios en los estados de consistencia y cohesión de los materiales, del mismo modo, puede causar grietas que se convierten en planos de debilidad en las laderas. Es importante señalar, que según Smiles y Keefer (1999) la sismicidad consiste en la repetencia de eventos sísmicos en un área determinada, se considera como factor condicionante en función de la recurrencia de las magnitudes y la intensidad, por tanto, hay que distinguir que sismos de baja o mediana magnitud ($< 4,5$ Mw) no son motivo suficiente para activar un proceso gravitacional, excepto en condiciones muy particulares, sino más bien constituyen un elemento de riesgo, puesto que si el periodo de retorno sísmico es bajo, puede cambiar las condiciones iniciales de los materiales aumentando sus susceptibilidad

Factores Activadores

Son considerados como el estímulo externo que genera una respuesta inmediata al movilizar los materiales que conforman la ladera (Gutiérrez, 2009). Estos factores son llamados también variables por Keller (2007) y Gutiérrez (2009), puesto que transcurren de forma intermitente en el tiempo y pueden iniciar el movimiento en masa

de diferentes formas. Las condiciones hidrometeorológicas (o climáticas), activan los movimientos en masa, en el caso de la lluvia su duración e intensidad puede conducir a la sobresaturación de los materiales que inicia la remoción en masa. Otro factor activador son las acciones antrópicas, estas causan de modo directo movimientos en masa, cuando se desarrollan en suelos frágiles sin tomar en cuenta su susceptibilidad intrínseca y los condicionantes a que han estado expuestos (Zinck, 1996)

Finalmente, los sismos, constituyen otro factor activador, porque el efecto mecánico que estos tienen sobre el terreno, desencadenan el movimiento en masa. Gutiérrez (2009) manifiesta que el efecto de los sismos sobre los materiales se analiza a partir de una serie de etapas que pueden actuar de manera sucesiva o no y que tienen diversas implicaciones. En un primer momento el efecto de la energía elástica de las ondas sísmicas acelera el terreno, lo que origina una energía potencial de movimiento sobre la masa afectada, que se estima según el autor en 0,5 veces la aceleración de la gravedad, en un segundo momento o etapa, esta fuerza generada actúa en varias direcciones, lo que deriva en el inicio del movimiento por el aumento de las fuerzas desestabilizadoras, y finalmente, en la última etapa, por los efectos que las ondas sísmicas tienen en la cohesión de los materiales, especialmente aquellos susceptibles a disminuir su resistencia por los esfuerzos de cizalla y compresión, originan cambios en los estados de consistencia y potencian el movimiento en masa.

Tecnologías de Información Geográfica

Las Tecnologías de Información Geográfica (TIG) se pueden definir como una: “tecnología integradora que une varias disciplinas con el objetivo común del análisis, creación, adquisición, almacenamiento, edición, transformación, visualización y distribución de la información geográfica (p. 1)” (Gómez y Barredo, 2005). Esta tecnología ha pasado por diversas fases de desarrollo alcanzando en la actualidad diversas áreas como la simulación de escenarios urbanos o el estudio del desarrollo sostenible (Gómez y Barredo, 2005).

Según Conesa (2004), las TIG inicialmente surgen como herramienta para la aplicación de técnicas de análisis espacial orientadas a la cartografía, posteriormente con el auge de los sistemas de observación terrestre y luego la masificación de las computadoras y el internet, surgen cinco herramientas fundamentales que hoy constituyen el eje fundamental de las TIG: Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), la teledetección y percepción remota, los Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS), los WebGIS y los Sistema de Apoyo a Decisiones Espaciales (SADE). Según Llopis (2008), estas herramientas de gestión de la información, permiten unificar teorías específicas de diversas áreas para generar modelos del mundo real, inscritos en sistemas de referencia, que permiten conocer y describir las características de los fenómenos naturales y sociales.

Sistemas de Información Geográfica (SIG):

Los SIG han sido definidos de diversas formas, en función del enfoque para el cuál se utilizan, aunque todas estas conceptualizaciones tienen ciertos elementos en común que permiten comprender sus principales características. Según Gómez y Barredo (2005), los SIG fueron implementados por primera vez en la década de los sesenta, evolucionando desde entonces en función de los avances teóricos aportados por los estudios geográficos y por aportes recibidos de otras disciplinas que han utilizado la herramienta para profundizar en sus análisis.

Desde la concepción dada por Cebrián (1984) sobre los SIG como base de datos georreferenciados o base de datos espacial, se ha pasado a la esbozada por Bosque (2007) donde plantea que los SIG son un: "...un sistema computarizado que, a partir de datos georreferenciados, permite la aplicación de procedimientos para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espaciales para resolver problemas complejos de planificación y gestión" (p. 18). Por su parte Olaya (2014) define los SIG como: "...un sistema integrador de tecnologías informáticas, personas e información geográfica, y que permite integrar teorías y fundamentos de las ciencias de la información geográfica, para analizar, almacenar, editar y representar los datos espaciales" (p.7). El autor también plantea, que es

necesario excluir del ámbito de los SIG, las herramientas que permiten el Diseño Asistido por Computador (CAD), ya que si bien es cierto comparten elementos comunes, ambos sistemas fueron diseñados con propósitos diferentes, puesto que los CAD buscan la creación y los SIG aspiran estudiar la realidad ya creada.

Elementos de un SIG

Básicamente un SIG está formado por cinco elementos fundamentales, con los cuales realiza sus operaciones, considerando la complejidad del tratamiento del dato espacial y sus componentes, autores como Olaya (2014), incluyen nuevas formas de conceptualizar los elementos de un SIG, pero sin dejar a un lado la concepción clásica.

Elementos Clásicos de un SIG

Como lo afirma Gómez y Barredo (2005) los elementos que componen un SIG son: hardware o parte física del sistema, software o programas de aplicación, datos, métodos o procedimientos y el liveware o parte viva del sistema. El primer elemento representa la parte física donde se asienta el SIG, éste suele estar representado por alguna plataforma de computador (Gómez y Barredo, 2005) que pueden ser computadoras personales (PC), estaciones de trabajo (Workstation), así como otros entornos informáticos. Asimismo, se incluye un conjunto de periféricos como mesas digitalizadoras, plotters, escáneres, unidades de almacenamiento y procesamiento de datos, requeridos para desarrollar las operaciones dentro de un SIG.

El segundo elemento, el software, es el encargado de realizar las operaciones y la manipulación de los datos, con éste, el usuario establece una estrecha relación de comunicación sobre las limitaciones y potencialidades de las operaciones realizadas (Llopis, 2008). Existen diversos paquetes de software SIG, muchos de ellos realizan ciertas operaciones en común, pero cada uno presenta aspectos particulares en cuanto al modelo de datos espaciales que utiliza, operaciones que puede efectuar y cómo las realiza, manera de almacenar los datos, capacidad de procesamiento de datos y otros.

El usuario debe decidir durante la planificación del proyecto SIG “qué software se adapta de manera más adecuada a las operaciones y requerimientos planteados (p.4)”

(Gómez y Barredo, 2005). En este sentido, Olaya (2014) sostiene que, en muchas ocasiones en los proyectos SIG, son necesarios un conjunto de procesos y operaciones que requieren utilizar diversas aplicaciones, en función de las necesidades y propósitos que se quieran alcanzar, además de lo cómodo que sienta el usuario con cada software.

El tercer elemento de un SIG es el dato, en muchos casos éste es el elemento crucial, ya que sobre él son realizadas todas las operaciones posibles de desarrollar en un SIG, además de ser el componente que requiere el mayor esfuerzo para su implementación en un proyecto SIG (Tomlinson, 2013). Por tanto, obtener los datos espaciales necesarios absorbe no solamente gran parte del presupuesto de estos proyectos sino también requiere un esfuerzo considerable para la recolección de la información, además de consumir gran parte del tiempo, en conjunto todos estos factores son responsables del fracaso o éxito de un proyecto SIG (Llopis, 2008).

De allí, que la recolección de datos para un SIG, es un proceso complejo debido a varios aspectos que son propios de los datos espaciales por ejemplo: la variedad de fuentes y formatos en que se presentan, el proceso de homogeneización en cuanto a escalas e información temática antes de ser incorporado en los SIG, la necesidad de procesar imágenes provenientes de otras herramientas de las TIG, la inexistencia de ciertos tipos de información y otras variables que hacen del proceso de recolección de datos uno de los más delicados.

El cuarto elemento son los métodos y procedimientos que Olaya (2014) define "...como el conjunto de formulaciones y metodologías a aplicar sobre los datos" (p.15), es decir, antes de procesar los datos es necesario tener claros los objetivos previstos en proyecto SIG, para poder desarrollar procesos y prácticas operativas adecuadas para alcanzar los fines previstos. El quinto elemento de los SIG es el liveware, considerado el más importante (Gómez y Barredo, 2005).

Este se define según Llopis (2008) como: "...las personas encargadas del diseño, implementación y uso de los SIG" (p. 7), estas personas son las que deben gestionar y desarrollar las posibilidades que ofrecen estos sistemas, para así producir resultados,

soluciones, selecciones y análisis a partir de las bases de datos espaciales, lo que convierte al liveware como el nexo entre todos los elementos de un SIG.

Enfoque Actual de los Elementos de un SIG: GIS Evolve

La postura tradicional de abordar los componentes de un SIG con base a los llamados elementos clásicos (hardware, software, datos, métodos, personal) mantenida de acuerdo a la opinión de Andes (2006) en las universidades, por los geógrafos, estudiantes y las personas encargadas de llevar a cabo los proyectos SIG, se ha ido modificando al considerar las potencialidades de la herramienta, la evolución de la tecnología y los aportes dados por otras disciplinas, que para Andes (2006) y Olaya (2014), necesitan evolucionar e incorporar el “corpus” de esas otras áreas a los procesos y procedimientos que se desarrollan en un SIG, así como las nuevas herramientas para tratar y representar los datos espaciales.

Surge entonces, una nueva concepción de los elementos de un SIG, donde el hardware y el software se convierten en tecnología, el liveware se separa en conceptos geográficos básicos y campos de aplicación, los procedimientos se incorporan al elemento análisis y los datos se mantienen como por separado y por último se plantea uno nuevo llamado visualización, que según Olaya (2014) es sumamente relevante puesto que son las capacidades de visualización, las que permite a los usuarios interactuar con el SIG y modelar los datos espaciales de acuerdo a sus necesidades.

Tecnología:

Es la suma tanto del hardware como del software donde se ejecutan las aplicaciones SIG. Se considera que los elementos físicos del sistema han evolucionado desde la concepción de computadora personal o estación de trabajo a tomar en cuenta la capacidad de las redes de trabajo por internet, constituyéndose una arquitectura cliente-servidor sumamente compleja que permite la interacción inmediata de un amplio grupo de usuarios con la información que no comparten una misma localización. Del mismo modo, si bien es cierto que los GNSS son una tecnología de información geográfica

diferente, Olaya (2014) refiere que brindan capacidades de geolocalización que han ampliado los horizontes de gestión de datos en el marco de los SIG.

En lo concerniente al software, además de las aplicaciones clásicas que permiten la interacción con los datos espaciales, han surgido nuevos ámbitos donde, aunque no son aplicaciones SIG propiamente dichas, hacen uso de sus capacidades y funcionalidades particularmente en la visualización de la cartografía digital.

Análisis:

El análisis según Olaya (2014) es: "... una de las funcionalidades básicas de los SIG, y una de las razones fundamentales que llevaron al desarrollo de estos" (p. 19). Los SIG siempre han incorporado metodologías y procedimientos que han permitido desarrollar análisis y alcanzar resultados a partir de los datos espaciales, estos procesos pueden ser desde simples hasta complejos, y según el precitado autor no todos tienen su origen en la geografía, permitiendo la incorporación de tales procedimientos a la automatización de tareas y la aparición de nuevos procesos, lo que derivó en que los SIG se hayan constituido como un campo propicio para el surgimiento de nuevos métodos de análisis que han facilitado en múltiples ámbitos y disciplinas, resolver y comprender fenómenos que ocurren en el mundo.

Visualización:

Como lo dice Andes (2006) los datos manejados dentro de un SIG se representan en forma de mapas, gráficos, tablas, animaciones y simulaciones. Estas potencialidades de la visualización han permitido la aparición de nuevas perspectivas en la forma como se comunica la información espacial. En este sentido, Olaya (2014) expresa que la información geográfica no solamente se visualiza para trabajar con ella en las aplicaciones SIG, sino también interpretarla, puesto que es de naturaleza visual, y a partir de lo observado se puede comprender el espacio geográfico.

Es importante señalar, que la visualización de la información geográfica sigue los principios y conceptos que se utilizan para la realización de cartografía impresa, no obstante, es necesario incorporar nuevas ideas, puesto que las posibilidades de

representación gráfica asociadas a la capacidad de procesamiento de información de un SIG, permite visualizaciones mucho más complejas que las de carácter estático de la cartografía, lo que aunado a la interactividad propia de la herramienta, constituye un componente fundamental en el desarrollo actual de los sistemas de información geográfica.

Datos

Cualquier agrupamiento de hechos relacionados y organizados, es considerado un dato, ahora bien, los datos y la información geográfica, no solo agrupan sino también incorporan elementos que describen la ubicación, el marco temporal y los atributos temáticos de los fenómenos espaciales, analizados en un SIG (Gutiérrez y Gould, 2009). Tal y como se planteó con anterioridad los datos son elementos esenciales de los SIG, por cuanto se requiere que sean adecuados para que los sistemas tengan la capacidad de analizar y brindar respuestas precisas a los requerimientos propios de un proyecto SIG.

En la actualidad la complejidad asociada a los datos geográficos va en aumento, Olaya (2014) considera que los aspectos vinculados al manejo y almacenamiento de estos datos han ido evolucionando desde los soportes con capacidades de unos pocos bytes hasta sistemas en la nube que permiten manejar volúmenes de información sumamente altos. Esto ha causado el surgimiento de sistemas complejos de gestión a partir de la utilización de herramientas informáticas como las bases de datos geoespaciales que han permitido organizar de forma eficiente los altos niveles de información asociada a un proyecto SIG.

La estructura de datos en los SIG

Los datos espaciales contenidos en un SIG se conciben como un conjunto de mapas de una porción específica de la superficie, cada uno de los cuales representa una variable temática, por ejemplo: red vial, hidrografía, suelos, entre otros. Una vez que una variable temática ha sido introducida en el SIG, recibe el nombre de capa temática, en ella se representa una tipología específica de elementos del mundo real. Bosque

(2007) define las capas como: "...un conjunto de elementos geográficos lógicamente relacionados, que tienen una vinculación con unos atributos temáticos" (p. 38), también las capas temáticas, pueden entenderse como la separación lógica de los datos espaciales de un mapa de acuerdo a un tema determinado, así cada capa almacena un tipo particular y homogéneo de objetos espaciales.

En función de la estructuración de los datos espaciales en un SIG, éste se entiende como una representación abstracta y estratificada de la realidad, en la cual cada estrato o capa constituye un tema específico, representado por ciertos objetos espaciales que lo definen, tales como puntos, líneas (arcos), áreas (polígonos) o bien celdas (Longley, Goodchild, Maguire, Rhind; 2004). Al respecto Gómez y Barredo (2005) resaltan que: "...al concebir la estructura de los SIG como una representación de la realidad, surge el concepto de modelo, el cual está asociado al modelo de datos espaciales, a través del cual el mundo real puede ser representado en un SIG" (p. 39).

Bosque (2007) manifiesta que la representación de los datos espaciales debe ser a partir del uso de objetos espaciales que se encuentran dentro de una capa, lo que permitirá que el SIG maneje las características espaciales de los objetos geográficos, es decir, su geometría, su localización absoluta y sus relaciones con otros objetos espaciales (topología), así como sus aspectos temáticos y temporales, lo que facilita el análisis dentro de un proyecto SIG. Otro aspecto destacable dentro de la estructura de un SIG según Olaya (2014), es: "...que el conjunto de capas que lo componen, tienen una característica fundamental para el análisis, y es que un punto localizado en una determinada capa tiene exactamente la misma posición en el resto de capas (p. 75)", esto quiere decir, que existe una precisa superposición entre dos o más capas en un mismo SIG para realizar determinadas operaciones espaciales.

Objetos Espaciales en los SIG

Los objetos espaciales pueden entenderse según Bosque (2007) como: "...la representación de los hechos espaciales en una capa temática, estos objetos se representan en función de los distintos tipos de unidades de observación que se pueden

distinguir en la realidad” (p. 12). Por tanto, de acuerdo a las propiedades geométricas de un hecho espacial, éste se representa en una capa por medio de objetos espaciales como: puntos (0 dimensionales), líneas (unidimensionales), áreas (bidimensionales) y celdas (multidimensionales) (Olaya, 2014).

Es importante señalar, que la representación del mundo real en un proyecto SIG, requiere utilizar la noción de escala espacial, puesto que hechos espaciales pueden ser representados geoméricamente por diferentes objetos en función del nivel de detalle que sea necesario. En referencia a esto, Bosque (2007) indica que las capas que contengan un tipo específico de objetos espaciales, tendrán propiedades diferentes, por lo cual las técnicas de análisis y organización (estructura de datos) será también distinta. Gómez y Barredo (2005) resaltan que la información geográfica es sumamente compleja y difícil de representar, dado que tiene características únicas, lo que genera una serie de dificultades para su manejo, por esto se hace necesario desarrollar un proceso de abstracción que permita representarla utilizando objetos como puntos, líneas, áreas o celdas.

Modelos de Datos Espaciales

Los datos geográficos se representan digitalmente en un SIG a través de dos modelos de datos espaciales: vectorial y ráster. En el modelo vectorial, los hechos espaciales discretos se representan mediante puntos, líneas o áreas, que definen sus límites, en un sistema de coordenadas (X, Y) para localizar cada objeto espacial en una capa (Gómez y Barredo, 2005), y posteriormente asignarle diversas propiedades cualitativas o cuantitativas. En cambio, en el modelo ráster, la realidad se considera un continuo basado en la variación y en el que las fronteras son la excepción. La representación según Llopis (2008) se realiza dividiendo ese continuo en una serie de celdas o píxeles, que representan unidades homogéneas de información espacial, y establecen su localización por un sistema de referenciación en filas y columnas, donde cada celda tiene un valor asignado de acuerdo a cada una de las variables consideradas y posee una localización en un sistema de coordenadas.

Modelo de Datos Vectoriales

Esta estructura utiliza una serie de objetos espaciales (puntos, líneas y polígonos) para describir la información geográfica. Estas entidades indican la localización de los elementos, su trayectoria o límites. Dichas unidades simples son suficientes para un manejo adecuado de los datos. Al respecto, Olaya (2014) menciona que los puntos son el dato vectorial más simple, cuya información sólo requiere una posición (X, Y) y un valor Z opcional para el atributo. Las líneas simples o sueltas, están compuestas por puntos con sus correspondientes coordenadas y con un valor Z global para el atributo de la línea, por su parte los arcos son objetos más complejos y se utilizan para simbolizar líneas curvas.

Es así, que los arcos al unirse, se conectan por un tipo especial de punto llamado nodo, estos últimos se utilizan para establecer los límites de los arcos, que al conectarse forman un polígono y proporcionan información sobre los polígonos vecinos. Ello permite entre otras cosas establecer relaciones topológicas. Ahora bien, la asignación de atributos en el modelo vectorial se realiza tal como lo dice Llopis (2008) a través de una tabla de atributos asociada a cada capa de datos espaciales, donde se identifica cada objeto espacial mediante una etiqueta, con cuya referencia se asignan los atributos temáticos a los objetos en la tabla.

Modelo de Datos Ráster

De acuerdo con Gómez y Barredo (2005), este modelo centra su interés en las propiedades del espacio más que en la representación precisa de los elementos que lo conforman. Para ello estructura el espacio en una serie de elementos discretos por medio de una retícula regular, generalmente compuesta por celdas cuadradas, también llamadas píxel. Cada una de esas celdas se considera como indivisible y es identificable por su número de fila y columna. Olaya (2014) plantea que la representación de los hechos se hace a partir de la distribución de celdas, es decir, un elemento puntal se representa con una celda, un elemento lineal, a través de una secuencia de celdas alineadas y un elemento areal mediante la agrupación de celdas contiguas.

La localización de las entidades en este modelo, según Llopis (2008) se define “con la referencia directa a la matriz de datos en el que cada píxel está asociado con una parcela cuadrada de territorio (p. 15)”. En este sentido, Gómez y Barredo (2005), refieren que cada celda de la matriz tiene un valor o código asignado, correspondiente al tipo de información temática que representa.

Teledetección y Percepción Remota

La teledetección según Chuvieco (2002) surge en la década de los sesenta, para referirse a cualquier medio de observación remota, inicialmente solo aplicada a la fotografía aérea. Con la evolución técnica se utilizó en un sentido más amplio para referirse a los procesos que permiten obtener una imagen utilizando plataformas espaciales para su posterior tratamiento y procesamiento en un software determinado. El funcionamiento de la teledetección viene dado por la interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de una emisión energética artificial, capturada por sensores instalados en diversas plataformas o sobre la superficie del planeta.

Al respecto, Chuvieco (2002) y Martínez y Martín (2010), manifiestan que las tecnologías asociadas a la teledetección y a la percepción remota están constituidas por una serie de elementos que interactúan entre sí para obtener datos de las coberturas. Estos elementos son: la fuente de energía, la cubierta terrestre, el sistema sensor, el sistema de recepción y usuario final.

La Fuente de Energía:

Entendida como el origen de la radiación electromagnética que detecta el sensor, puede ser pasiva si proviene del sol o activa si es emitida por el propio sensor.

La cubierta terrestre:

Formada por las distintas masas de vegetación, suelos, agua, construcciones humanas, que reciben la señal energética y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas.

El sistema sensor:

Compuesto tanto por el sensor, propiamente dicho, como por la plataforma que lo alberga. Tiene como misión captar la energía procedente de las coberturas terrestres, codificarla, grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.

Sistema de Recepción:

Es la infraestructura donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se almacena en los medios adecuados, y tras, las correcciones necesarias, se distribuye para su análisis.

El intérprete

Es el sistema responsable de convertir los datos obtenidos en información temática de interés, ya sea a través de medios analógicos o digitales.

Usuario Final:

Es el encargado de analizar el documento fruto de la interpretación, así como dictaminar las consecuencias que de él se deriven.

Aplicaciones de la Teledetección

La teledetección, cuenta con numerosas aplicaciones, Chuvieco (1996) refiere algunas ventajas de esta tecnología, particularmente, cuando se utilizan plataformas espaciales, dado que permite una cobertura global y periódica de la superficie, lo que facilita la observación de incluso áreas inaccesibles por otros medios, y permite entender: "...los grandes procesos que afectan al medio ambiente de nuestro planeta" (p. 15). (Labrado, Évora, Arbelo; 2012). Del mismo modo, la posibilidad de tener una visión amplia de los hechos geográficos, puesto que permite capturar información de diversas escalas, a partir de la resolución de los sensores utilizados. Igualmente, el formato digital en el que se manejan los productos de la teledetección, permite generar modelos cuantitativos e integrar los resultados con otro tipo de información geográfica (Chuvieco, 1996).

Tratamiento Visual y Digital de Imágenes

La interpretación de las imágenes satelitales, es según Menéndez y Núñez (2012) el proceso mediante el cual se examinan los objetos visualizados, con el propósito de identificarlos, deducir su significado y valorarlos en función de los objetivos perseguidos. En este sentido, Chuvieco (2008) indica que el análisis visual y digital dentro de la teledetección es: "...el proceso de razonamiento correlativo por el cual se obtiene la clasificación de los objetos visibles en imágenes satelitales por medio del conocimiento local o específico, con o sin uso de claves de identificación u otros medios de información" (p. 185).

Criterios de análisis visual

El análisis visual de las imágenes satelitales parte del uso de las tres bandas del espectro visibles que brinda el sensor, es decir, las bandas rojas, verdes y azules (RGB) muestran la imagen en falso color (IGAC, 2008), brindan la posibilidad de desarrollar un primer acercamiento al contenido temático de la imagen, en este examen preliminar se debe empezar por detallar todo aquello que sea relevante y/o efectuar un examen de elementos conocidos, para continuar luego con los menos conocidos. Chuvieco (2008) sugiere interpretar en el siguiente orden: vías, drenajes, formas terrestres, vegetación, agricultura, rasgos rurales no agrícolas y rasgos urbanos.

Una vez que las diferencias son observadas y su distribución aproximada identificada se procede a completar una segunda fase, en la cual se utilizan un conjunto de atributos propios de las imágenes para ir verificando la primera aproximación hecha y tener fundamentos para efectuar una correcta interpretación. Estos atributos son: tono, textura, estructura, sombras, brillo, color, forma-tamaño, contexto espacial, patrón espacial, visión estereoscópica, periodo de adquisición, cada uno de ellos descritos brevemente a continuación.

Brillo

De acuerdo con Chuvieco (2008) el brillo es un atributo que hace referencia a la: “...intensidad de la radiancia recibida por el sensor en un píxel, para una determinada banda del espectro” (p. 191). En función, de él se puede determinar píxeles con baja radiancia lo que se vincula a baja reflectividad y celdas más claras que corresponden a áreas donde los niveles de radiancia son más altos. Por ejemplo, una superficie ocupada por vegetación vigorosa, presentará una baja radiancia, debido a la absorción de energía lumínica que realizan los pigmentos de las hojas en los espectros azul y rojo, en cambio, superficies cubiertas de agua tendrán una mayor radiancia, por su alto índice de reflectividad.

Color

La percepción del ser humano de los colores, es un elemento muy importante en la interpretación de imágenes satelitales, al respecto Chuvieco (2008) plantea el proceso mediante el cual el sentido de la vista captura información de los colores, proceso en el que interviene la reflectividad selectiva de los objetos a diferentes longitudes de onda. Particularmente aquellas superficies con alta reflectividad en azul y baja en el resto, se perciben de ese color; de igual forma ocurre con las longitudes de onda roja y verde. Con base en esto y de la composición en el espectro se identifican objetos a partir de los colores que reflejan en las diferentes longitudes de onda, pudiéndose evidenciar fenómenos mediante combinaciones de bandas apropiadas para resaltarlos. Por ejemplo, una combinación de bandas típica 4, 3, 2, permite interpretar las coberturas de vegetación, debido a la reflectancia que tiene dichas coberturas, del rojo y del infrarrojo, percibiéndose la vegetación en ese color.

Textura

En las técnicas de interpretación, este término se utiliza según el IGAC (2008) para identificar la repetición de tonos en grupos de objetos que son demasiado pequeños para ser discriminados individualmente. Es evidente, que el tamaño del objeto requerido para producir una textura varía de acuerdo a la resolución espacial del sensor

y que es evidenciado el tamaño del píxel en la imagen. Al respecto Chuvieco (2008) explica que en función del tamaño de los objetos que forman una cubierta se suelen distinguir tres tipos: textura grosera (objetos comprendidos entre 0,25 y 1 mm² a la escala de la imagen), textura media (objetos comprendidos entre 0,04 y 0,25 mm²) y textura fina (objetos inferiores a 0,04 mm²).

Forma-Tamaño

La forma y el tamaño de un objeto, son de los criterios más útiles que llevan a identificar una cobertura. Ya que, a partir del contorno, se pueden asociar a patrones que sean familiares. Al respecto, el IGAC (2008), destaca que a partir de estos criterios se puede diferenciar un sendero de un camino, o se puede distinguir un arbusto de un árbol. Igual que en el criterio anterior, Chuvieco (2008) señala que la resolución espacial juega un papel fundamental para poder considerar la forma y el tamaño.

Contexto Espacial

A partir del análisis de las coberturas más próximas, se identifican objetos dentro de una imagen. Por ejemplo, la identificación de un jardín dentro de un área urbanizada, puede tener un color y una textura similar a un bosque natural caducifolio, en esta situación, el mejor criterio para separar una cobertura de otra, es su relación con el entorno geográfico. Considerar este criterio de forma previa a un tratamiento digital permitirá diferenciar una cubierta de otra, puesto que es un elemento que no es considerado por una clasificación digital de píxeles.

Sombras

Son producto del ángulo de interacción de un objeto con la energía lumínica proveniente del sol, puede generar inconvenientes al momento de trazar los límites de una cobertura con otra, debido a los cambios en la reflectividad que origina. Aunque según Chuvieco (2008) también permite identificar la altura de los objetos a partir de simples cálculos trigonométricos, en función de valores conocidos como la longitud de la sombra, el ángulo cenital del sol o en su defecto por la tangente del ángulo de

elevación. Aun así, es recomendable emplear técnicas de mejoramiento visual para disminuir las inexactitudes asociados a las sombras.

Patrón Espacial

Indica según Chuvieco (2008) la organización particular de los objetos que conforman una cobertura, aunque si bien es empleada con mayor frecuencia en el estudio de fotografías aéreas, debido a su alta resolución espacial, con el desarrollo de mejores sensores es algo que se ha ido superando con las plataformas espaciales, puesto que ya se pueden diferenciar patrones asociados a coberturas artificiales como red vial, alternancia entre caminos y vegetación en los cultivos, entre otros.

Visión Estereoscópica

Resulta fundamental para el análisis de elementos geomorfológicos y de coberturas de suelo, pues permite una visualización en tres dimensiones de la información capturada. Aunque requiere un solapamiento de las imágenes, el cuál es cada vez más frecuente en sensores dentro de plataformas espaciales (SPOT-HRV, Terra-Aster, Cartosat, entre otros); se emplea combinando la información espectral de las imágenes con modelos digitales de elevación, lo que ayuda a identificar el comportamiento altitudinal de las coberturas.

Período de Adquisición

Una de las fortalezas de las plataformas espaciales dentro la teledetección, es su capacidad de revisita, por cuanto origina marcos temporales para el análisis de un fenómeno geográfico. En este sentido, Chuvieco (2008) refiere que a partir de esto se generan contrastes temporales y le brinda a la teledetección un enfoque multi-estacional, donde el tiempo, contribuye al perfeccionamiento de la interpretación de la imagen.

Procesamiento Digital de Imágenes Satelitales

El procesamiento digital de imágenes según el IGAC (2008) es una disciplina que desarrolla las bases teóricas y algorítmicas mediante las cuales se puede extraer

información del mundo real, de manera automática a partir de una imagen capturada con un sensor. Tal información, se relaciona con el reconocimiento de objetos, descripciones tridimensionales, posición y orientación de los mismos o la medición de cualquier propiedad espacial (Chuvieco, 2008)

El uso de la informática en diferentes procesos, ha permitido sofisticar la naturaleza del procesamiento de las imágenes, con el propósito de extraer el máximo de información posible. En este sentido, Chuvieco (2008) plantea que, para desarrollar un proceso de interpretación digital de imágenes, se debe cumplir con un proceso previo que conlleva el uso de una serie de herramientas y la aplicación de un conjunto de correcciones de los datos, para conseguir, una imagen que sea correctamente analizada e interpretada.

Este proceso se inicia, con la asignación de unos valores de referencia en un sistema de coordenadas conocido, que ayuda a localizar la información en el contexto planetario, luego se emplean un conjunto de ajustes en el contraste para obtener una mejor visualización de la imagen, construyendo combinaciones de bandas que realcen los datos específicos necesarios para un proyecto de índole ambiental, es decir, ajustar las bandas espectrales de una imagen para resaltar vegetación, áreas urbanas, suelos degradados o erosionados entre otros. Una vez cumplidos estos pasos, se procede a la extracción de la información temática, para lo cual existen un conjunto de procedimientos, pero para este caso particular, se va a hacer referencia particularmente a dos: la clasificación no supervisada y la clasificación supervisada.

Clasificación No Supervisada

Este método está orientado a definir clases espectrales presentes en la imagen. No implica un conocimiento del área de estudio. En esta técnica se asume que los píxeles de la imagen forman una serie de agrupaciones o conglomerados, que equivales a un comportamiento espectral homogéneo, es decir, a la reflectividad propia de una cobertura (Chuvieco, 2008).

En este contexto, el IFFIULA (2007), enuncia que los métodos para definir los agrupamientos espectrales se basan en tres parámetros particulares: un conjunto de variables que intervienen en el análisis (bandas espectrales), una serie de criterios para medir la similitud o distancia en los píxeles de la imagen y unas pautas para agrupar los píxeles similares, lo que define, el algoritmo empleado en la clasificación (ISODATA y K-MEANS).

Ciertamente, en la clasificación no supervisada se utilizan un conjunto de algoritmos de clasificación automática multivariante, en donde los individuos más próximos se agrupan formando clases, a partir de un conjunto de iteraciones, que va clasificando los píxeles dentro de unas categorías, las cuáles fueron establecidas con anterioridad. Los cambios en los mecanismos de análisis son los que definen las diferencias de cada algoritmo de clasificación, en el caso del K-MEANS, se emplea una técnica de mínima distancia, luego se reclasifica cada clase de acuerdo al valor de referencia espectral de cada clase; en cambio, el método ISODATA, ordena los centros de clase en función de una distancia y un tamaño mínimo y una varianza máxima, parámetros que son definidos por el usuario de acuerdo a sus necesidades.

Clasificación Supervisada

Esta clasificación se basa en la disponibilidad de áreas o campos de entrenamiento, los cuáles sirven para guiar al software de clasificación en el reconocimiento de las distintas categorías y clases. Se trata de áreas de las que se conoce con certeza a la clase o categoría a la que pertenecen y que servirán para generar una firma espectral característica para cada clase. En otras palabras, a partir de ellas, se caracterizan cada una de las clases, para agrupar los píxeles similares en una de esas categorías en función de su similitud con los valores espectrales tomados como referencia.

Sistema Global de Navegación Satelital (GNSS)

Según la Organización Internacional para la Aviación Civil (ICAO), los sistemas de navegación satelital son sistemas de cobertura global para determinar la posición y el tiempo, que puede estar formado por una o más constelaciones de satélites, por

receptores aeronáuticos, sistemas de monitoreo y complementado con sistemas de aumentación de la señal (Olmedillas, 2012).

Así pues, el ser humano desde sus inicios en la exploración de nuevos espacios por donde expandir sus dominios, ha necesitado recordar los sitios por donde pasaba, para poder comprender el trayecto que había seguido desde su ubicación original hasta el destino que había alcanzado. De acuerdo a Olmedillas (2012), para esto, empleó diversos métodos de referencia, que le sirvieran de apoyo en su movilidad. En un primer momento en sus travesías en tierra firme, utilizaba marcas en el terreno, sobre rocas o identificaba hitos en el entorno que le permitían orientarse.

Luego, cuando incursionó en los océanos y mares, desarrolló nuevas técnicas de referencia para realizar de forma segura sus incursiones marítimas. Primero, seguía visualmente las líneas de costa luego, referenció el comportamiento de los astros (sol, luna, estrellas) le permitían ubicarse y establecer rutas cercanas, finalmente, con la invención de instrumentos mecánicos y ópticos como astrolabios, sextantes y octantes, pudo medir los ángulos relativos y elaborar complicados cálculos trigonométricos, que le permitían conocer su posición sobre el planeta.

Ya en el siglo XX, con el avance en la aviación, se diseñaron sistemas de orientación a partir de ondas de radio, hasta llegar finalmente a la orientación por vía satélite superando las limitaciones que hasta el momento las condiciones locales del clima y las interferencias de diversa índole le habían impuesto. El primer sistema satelital de navegación, fue el sistema TRANSIT desarrollado por los Estados Unidos en el año 1964, este sistema consistía en un conjunto de seis satélites que orbitaban la Tierra a una altura de 1100 km, dando una vuelta completa en 107 minutos. Conseguía ubicar la posición de cualquier punto en la superficie, con un sistema doppler que se conectaba vía VHF a las estaciones de monitoreo, y en función del tiempo que duraba la señal en ir del punto a referenciar hasta el satélite y de este a la estación se asignaban las coordenadas (Olmedillas, 2012).

Ya en 1978, se pone en marcha el sistema NAVSTAR GPS, que posteriormente se conoció simplemente como GPS, el cual se fue desplegando de forma progresiva hasta alcanzar su total operatividad en el año 1995, al ser lanzado el vigésimo cuarto satélite de la constelación. Cabe destacar, que este sistema cuenta con un conjunto de segmentos que funcionan interconectados entre sí: segmento espacial (formado por los satélites), segmento control (formado por las infraestructuras en tierra, que mantienen y controlan el segmento espacial) y finalmente el segmento usuario (constituido por todos los equipos receptores que utilizan el sistema para posicionarse).

Hoy en día además del sistema GPS, existen otras constelaciones que proveen información posicional al usuario, entre ellos se destacan: el sistema Galileo, desarrollado por la Unión Europea y que inició su despliegue en 2008 y estima lanzar su último satélite en 2020; el sistema BEIDOU II/COMPASS, puesto en marcha por la República Popular China, en el año 2004 y que hasta la fecha ha puesto en funcionamiento quince (15) satélites de treinta y cinco previstos para el año 2020; el sistema ruso GLONASS, que consta de veinticuatro (24) satélites operativos y tres (3) en reserva, que entró en funcionamiento en 1996 y alcanzó su total operatividad en 2014. Actualmente se encuentran en desarrollo el sistema QZSS japonés, el IRNSS indio, entre otros.

Funcionamiento de los GNSS

Un sistema de navegación satelital requiere evidentemente de un conjunto de satélites, denominados constelación, para funcionar. La posición de estos satélites es conocida con suma precisión, lo que permite a partir de una triangulación ubicar la posición de cualquier receptor en la superficie. Este proceso se consigue, con el uso de un sistema de coordenadas que establece las posiciones de los satélites y el receptor, para que, a partir de un sistema para medir distancias, se establezca la posición relativa del receptor respecto a cada satélite, lo que junto a un procesamiento estadístico permite establecer la localización del receptor. Es importante señalar que en este proceso también interviene un conjunto infraestructuras en superficie que ayudan a mejorar la precisión de los cálculos y a establecer el margen de error posicional.

Los WebGIS

Este término deriva del WebMapping, y se refiere al uso de las potencialidades de los Sistemas de Información Geográfica, incorporando el valor colaborativo de la web. Según Alesheikh, Helali y Behroz (2002), describe al conjunto de tecnologías dirigidas a diseñar, aplicar, generar, visualizar u ofrecer datos geoespaciales a través de la World Wide Web (www). Es importante señalar, que hasta hace algunos años los SIG, estaban limitados las computadoras personales o estaciones de trabajo, que empleaban software propietario (ArcGIS, ERDAS, entre otros), cuyas licencias eran sumamente costosas.

Con el surgimiento del Open GML, que es un lenguaje de programación abierto, empiezan a aparecer software SIG de licencia libre, que permitieron una apertura desconocida hasta la fecha, y que favoreció la masificación de la información geográfica digital y el intercambio de capas temáticas. Hoy en día proyectos libres como OpenStreet Maps, o gratuitos como Google Maps y Earth, Bing Maps; junto a diversas plataformas geográficas web como: el Geoportal Simón Bolívar en Venezuela, el SIGOT en Colombia o el ArcGIS Research Center y ArcGIS Online, permiten acceso inmediato a datos espaciales con una alta confiabilidad.

Tipología de los WebGIS

Los WebGIS, se clasifican según Alesheikh et al. (2002) en:

- WebGIS Analíticos: Utilizan servidores de base de datos geoespaciales, contribuyen al acceso a datos generales sobre diversas variables geográficas, entre ellos se encuentran: Google Earth, SIGOT, Geoportal Simón Bolívar.
- WebGIS en tiempo real: Permiten el acceso a información espacial, contenida en bases de datos geoespaciales, que se actualizan permanentemente. Algunos ejemplos son: NOAA GIS, USGS GIS, CartoDB, EarthquakeDB, Google Maps, RADARInameh.

- WebGIS Colaborativos: Permiten la participación de múltiples usuarios al mismo tiempo, que incorporan información geoespacial de acceso libre a todos los usuarios. Entre ellos están: Open Street Maps, Map Maker de Google, Wikimaps.

Bases Legales

La presente investigación se encuentra enmarcada en el régimen jurídico vigente derivado de la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela del año 1999, que en su artículo 128 plantea:

El Estado desarrollará una política de ordenación del territorio atendiendo a las realidades ecológicas, geográficas, poblacionales, sociales, culturales, económicas, políticas, de acuerdo con las premisas del desarrollo sustentable, que incluya la información, consulta y participación ciudadana. Una ley orgánica desarrollará los principios y criterios para este ordenamiento.

Esto se refiere, a la importancia de conocer y comprender las particularidades del espacio geográfico, especialmente las variables físico naturales que afectan a los grupos humanos establecidos en un territorio.

Del mismo modo el artículo 129 de la constitución consagra:

Todas las actividades susceptibles de generar daños a los ecosistemas deben ser previamente acompañadas de estudios de impacto ambiental y socio cultural

De este artículo, se deriva la importancia de analizar los fenómenos que pueden alterar las condiciones de los cuerpos naturales para entender su funcionamiento e identificar las amenazas que se desprenden de los fenómenos asociados a estos cambios. En este sentido, el artículo 55 del texto fundamental del país, garantiza la protección de toda persona por parte del Estado, ante amenazas y vulnerabilidades, particularmente de origen natural

Toda persona tiene derecho a la protección por parte del Estado a través de los órganos de seguridad ciudadana regulados por ley, frente a situaciones que constituyan amenaza, vulnerabilidad o riesgo para la integridad física de las personas, sus propiedades, el disfrute de sus derechos y el cumplimiento de sus deberes.

Este artículo, se relaciona con el 156 de la constitución en su numeral 9, el cual establece que: “es competencia del poder público la administración de riesgos y emergencias” y en su numeral 16: “la conservación, fomento y aprovechamiento de los bosques, aguas y otras riquezas del país”. De estos artículos se derivan dos leyes que norman la gestión y administración del ambiente: la Ley Orgánica del Ambiente y la Ley de Aguas.

La Ley Orgánica del Ambiente (2006) en su artículo 2 establece la gestión del ambiente como:

(...) el proceso constituido por un conjunto de acciones o medidas orientadas a diagnosticar, inventariar, restablecer, restaurar, mejorar, preservar, proteger, controlar, vigilar y aprovechar los ecosistemas, la diversidad biológica y demás recursos naturales y elementos del ambiente, en garantía del desarrollo sustentable

En otras palabras, el desarrollo sustentable será posible sólo a través de un proceso orientado a diagnosticar, inventariar, proteger y vigilar las variables físico-naturales para de esta manera estar en la capacidad de responder a las particularidades que éstas presentan. En este mismo sentido la Ley de Aguas (2007) en su artículo 16 define que:

Las cuencas hidrográficas son unidades espaciales de referencia para la organización institucional y manejo de las aguas superficiales y subsuperficiales.

De lo anterior, se desprende la importancia del conocimiento de las cuencas hidrográficas, en especial las densamente pobladas, porque en ellas se pueden vincular diversas instituciones en la prevención de amenazas y vulnerabilidades a diferentes niveles administrativos del Estado venezolano.

En el marco de estos planteamientos, la Ley de Gestión Integral de Riesgos Socionaturales y Tecnológicos del año 2009, crea un registro nacional de riesgos cuyo objeto de acuerdo al artículo 32 es:

(...) actualizar, recopilar, procesar, registrar, sistematizar la información relacionada con amenazas, vulnerabilidades, riesgos, emergencias, desastres y apoyar al Estado en su divulgación y socialización. La información contenida en el registro es de carácter público y de interés nacional y la misma debe ser considerada en la toma de decisiones. Todas las organizaciones orientadas a la

ciencia y tecnología tienen corresponsabilidad en la actualización e implementación del registro.

Al respecto, es importante señalar que, según lo planteado en las diferentes normativas legales vigentes, es corresponsabilidad de todos los ciudadanos promover la investigación de fenómenos que permitan mejorar los mecanismos de gestión ambiental y prevención del riesgo, y cualquier información que se obtenga al respecto debe ser utilizada por los organismos competentes para ejecutar las actuaciones previstas en las mencionadas leyes.

Por otra parte, la presente investigación está orientada al uso de las Tecnologías de Información y Comunicación, particularmente las Tecnologías de Información Geográfica, que se promueven en la Constitución el artículo 110 donde expresa:

El Estado reconocerá el interés público de la ciencia, la tecnología, el conocimiento, la innovación y sus aplicaciones y los servicios de información necesarios por ser instrumentos fundamentales para el desarrollo económico, social y político del país, así como para la seguridad y soberanía nacional (...) El Estado garantizará el cumplimiento de los principios éticos y legales que deben regir las actividades de investigación científica, humanística y tecnológica. La ley determinará los modos y medios para dar cumplimiento a esta garantía.

En este ámbito, se plantea que cualquier investigación que se realice en el país en el marco de uso de la tecnología va en beneficio de la sociedad, por tanto, es importante su distribución para que pueda ser empleada en acciones concretas para estos fines.

Al respecto los artículos 2 y 5 de la Ley Orgánica de Ciencia y Tecnología e Innovación del año 2005 plantean:

Art. 2: Las actividades científicas, tecnológicas, de innovación y sus aplicaciones son de interés público y de interés general.

Art. 5. Las actividades de ciencia, tecnología, innovación y sus aplicaciones, así como, la utilización de los resultados, deben estar encaminadas a contribuir con el bienestar de la humanidad, la reducción de la pobreza, el respeto a la dignidad, a los derechos humanos y la preservación del ambiente.

Se destaca entonces la relevancia de la investigación científica y la obligación de los entes y personas responsables de la misma de contribuir al bienestar de los

venezolanos y que la orientación temática debe dirigirse a la solución de problemas específicos que aquejan las comunidades.

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

Naturaleza y Tipo de Investigación

La metodología, tiene como fin sistematizar las etapas de una investigación, en ella se detallan los procedimientos, a través de los cuáles se desarrollan los análisis para dar respuesta a los objetivos planteados. Según Ballestrini (2001) el marco metodológico consiste en reconocer los métodos e instrumentos que se emplearán en la investigación que incluye el tipo de estudio y diseño de investigación, su universo o población, su muestra, los instrumentos y técnicas de recolección e incluso el análisis y presentación de los datos.

En este sentido, tomando en cuenta el planteamiento del problema y las particularidades de la presente investigación, está se considera de naturaleza cualicuantitativa, de campo con carácter descriptivo y documental, del mismo modo emplea los métodos propios de la geografía aplicada.

Es importante destacar, que está investigación utiliza el enfoque cualitativo, para el análisis e interpretación de una base de datos cartográfica a partir de la cual fue posible la interpretación y descripción de las características físico naturales del área de estudio, tal y como se plantea en el primer objetivo. En el mismo orden de ideas, para cumplir con el segundo objetivo, se utilizaron criterios predominantemente cualitativos para delimitar las geoformas y se analizaron los factores que inciden en la susceptibilidad a los movimientos en masa.

Este trabajo, también se considera en parte de naturaleza cuantitativa, porque utiliza un conjunto de procesos que permiten medir y estimar la magnitud de los fenómenos investigados (Hernández, Fernández y Baptista, 2014). En este orden de ideas, Palella y Martins (2006) plantean que en esta perspectiva metodológica se emplean instrumentos de medición y comparación que luego de aplicar modelos matemáticos y

estadísticos permiten obtener datos concretos que se pueden vincular a modelos teóricos generales que explican los fenómenos investigados.

En este contexto en la presente investigación, particularmente para cumplir con el tercer objetivo donde se establecen los patrones de sismicidad que inciden en la cuenca del río Torbes, se conformó un catálogo sísmico con datos suministrados por la Fundación Venezolana de Investigación Sísmica (FUNVISIS) y del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), el cual se procesó (fuentes sísmicas, retorno sísmico, aceleración máxima horizontal a nivel de roca) en ambiente SIG para interpretar y reconocer patrones de sismicidad.

Por esta razón, se emplea un enfoque mixto, puesto que según Hernández et al. (2014) los métodos mixtos representan un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos de investigación e implican la recolección y análisis de datos cuantitativos y cualitativos, así como su discusión e integración conjunta. La ventaja de este enfoque radica en la posibilidad de explorar la problemática planteada desde distintas perspectivas, aumentando el abanico de oportunidades y el número de matices, es decir, potencia la riqueza interpretativa a través de la implementación de un proceso de estudio heterogéneo.

Diseño de la Investigación

En la investigación es muy importante conocer cómo se va a recabar la información para dar respuesta a las preguntas planteadas, en este marco de ideas el término diseño según Hernández et al. (2014) se refiere al plan o estrategia concebida para obtener la información. Para Ballestrini (2001) es necesario entender que no existe un solo tipo de diseño para todas las investigaciones y que éste busca dar de manera clara respuestas a las preguntas planteadas.

De acuerdo con los objetivos planteados, el estudio en función al tipo de datos recolectados, se considera de campo, de acuerdo a lo planteado por Arias (2012) cuando dice que este diseño de investigación consiste en: "... la recolección de datos directamente de la realidad donde ocurren los hechos (datos primarios), sin manipular

o controlar variable alguna, es decir, el investigador obtiene la información, pero no altera las condiciones existentes” (p.31), para Ballestrini (2001) en el diseño de campo se identifican los diseños experimentales y lo no experimentales, en este último se ubican los estudios exploratorios, descriptivos, diagnósticos y evaluativos. Según estos planteamientos, este estudio se considera no experimental lo que implica según Hernández et al. (2014): “...observar fenómenos tal y como se dan en el contexto natural para después analizarlos” (p. 184). Asimismo, es descriptivo puesto que según Lerma (2012) en esta perspectiva se busca describir el estado, las características, factores y procedimientos presentes en fenómenos y hechos que ocurren en la realidad.

Del mismo modo, esta investigación es documental ya que utiliza referencias bibliohemerográficas, electrónicas y particularmente cartográficas para comprender e interpretar las particularidades del área de estudio, en este sentido, Bernal (2010) plantea que una investigación es documental cuando: “...depende fundamentalmente de la información que se obtiene o se consulta en documentos de diversa índole, los cuales aportan información o dan testimonio de una realidad” (p. 111).

Debido a que la investigación está enmarcada dentro del paradigma cualicuantitativo, se planteó el uso de un diseño transformativo secuencial (DITRAS) el cual es definido por Hernández et al. (2014) como aquel que: “...incluye dos etapas de recolección de los datos. La prioridad y fase inicial puede ser cuantitativa o cualitativa, o bien, otorgarles a ambas la misma importancia y comenzar por alguna de ellas” (p. 556). En resumen, es indiferente el inicio, secuencia o prioridad entre las etapas cuantitativas y cualitativas.

Este diseño se seleccionó por la libertad y flexibilidad que brinda al investigador al momento de la recolección de datos, además permite incluir un enfoque teórico que oriente la investigación más allá de la metodología tradicional. El DITRAS, se diferencia de otros diseños secuenciales porque lo guía una teoría o marco conceptual que según Hernández et al (2014): “...es más importante para orientar la investigación que el propio método, debido a que determina la dirección en la cual debe enfocarse el investigador al explorar el problema de interés” (p. 557).

En este sentido, las premisas de la Geografía Aplicada con respecto al análisis espacial se consideran fundamentales para la ejecución y logro de los objetivos planteados, por lo que se incluye dentro de la metodología de la investigación las fases o etapas descritas por Buzai y Baxendale (2011).

Fases de la Investigación

Esta investigación, se enmarca dentro de los postulados de la geografía aplicada puesto que busca brindar información cartográfica y análisis interpretativos de las características físico-naturales presentes en la cuenca del río Torbes. Con parte de la información anterior se logró delimitar las geoformas presentes, mediante el sistema de clasificación de formas del relieve propuesto por Zinck (2012).

Posteriormente, se analizó en cada unidad delimitada, los factores que inciden en su susceptibilidad a sufrir movimientos en masa. Información, que luego se vinculó con los patrones de sismicidad obtenidos a partir de un catálogo sísmico, que permitió generar un mapa de susceptibilidad a movimientos en masa asociados a sismicidad en la cuenca, que puede servir de insumo para el diseño de planes de mitigación de riesgos, amenazas y vulnerabilidades que realicen o ejecuten los diferentes organismos responsables de la materia.

La Geografía Aplicada según Pacione (2011) es la aplicación del conocimiento geográfico para la solución de problemas ambientales, económicos y sociales a través del análisis de las causas que los originan para brindar respuestas oportunas. Esta investigación se realizó tomando en consideración las cinco fases planteadas por Buzai y Baxendale (2011) en referencia al empleo de los SIG como herramienta de trabajo en la solución de diversos problemas, que se describen a continuación:

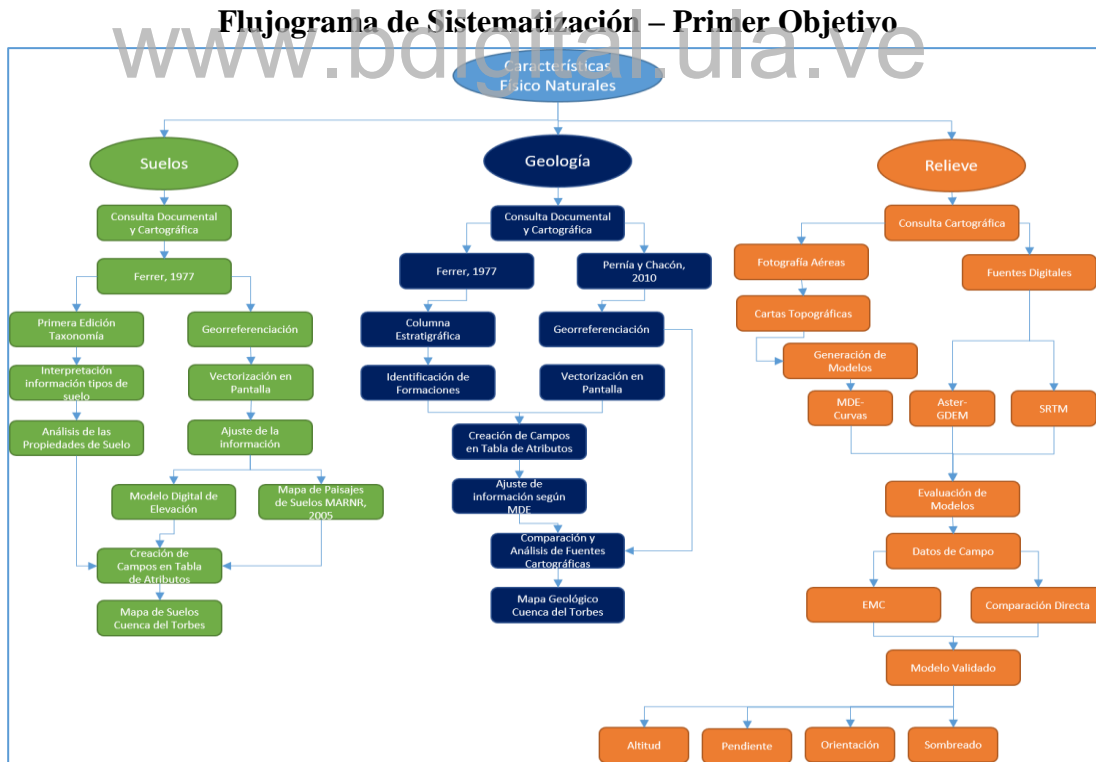
Fase 1: Conceptual

En esta etapa se definieron los límites de la investigación, los cuales a partir de una revisión inicial permitieron establecer una primera aproximación a los objetivos, métodos y teorías a emplear.

Fase 2: Conceptual Metodológica

Se inició con la revisión documental y electrónica en la búsqueda de investigaciones que sirvieran de marco referencial al presente trabajo. Esto permitió generar un soporte conceptual y metodológico que orientó las decisiones sobre el rumbo del estudio. En este sentido, la consulta realizada permitió ajustar los objetivos una vez definida el área de trabajo y reestructurar los planteamientos inicialmente desarrollados sobre todo respecto a la susceptibilidad a los movimientos en masa incorporando los postulados de Zinck (2012) y la importancia de delimitar las geoformas y a partir de estas, relacionar las propiedades que las hacen susceptibles a desplazarse. En esta etapa se elaboró la operacionalización de las variables tal como se muestra en los cuadros 1, 2, 3, 4 y 5, y se generó a partir de este un flujograma de trabajo tal y como se muestra en las figuras 4, 5, 6, 7 y 8.

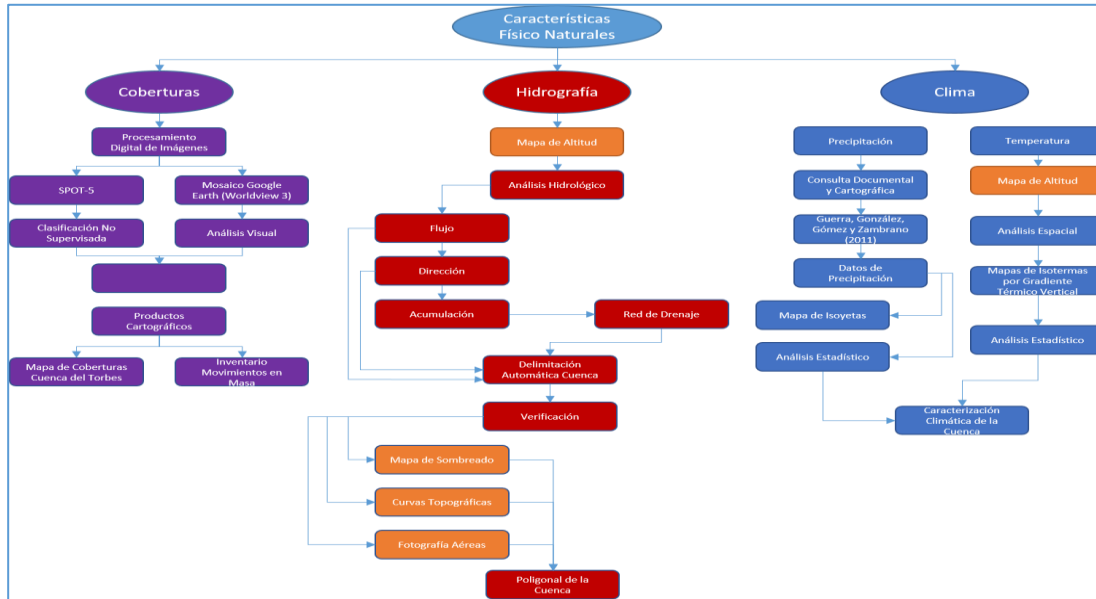
Figura N°: 4



Fuente: Elaboración Propia

Figura N°: 5

Flujograma de Sistematización – Primer Objetivo (Continuación)

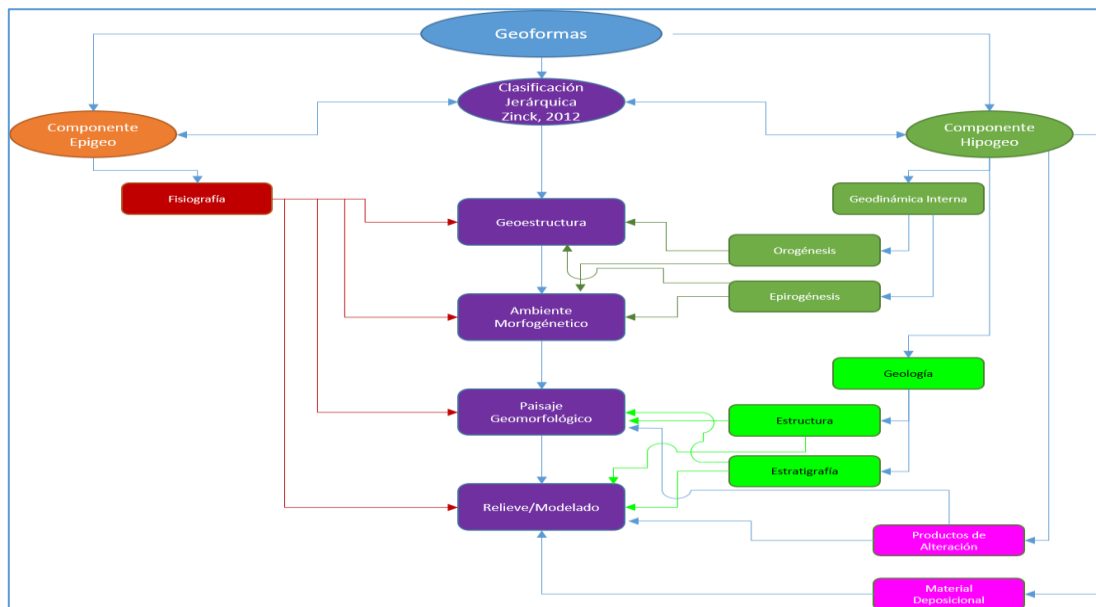


Fuente: Elaboración Propia

www.bdigital.ula.ve

Figura N°: 6

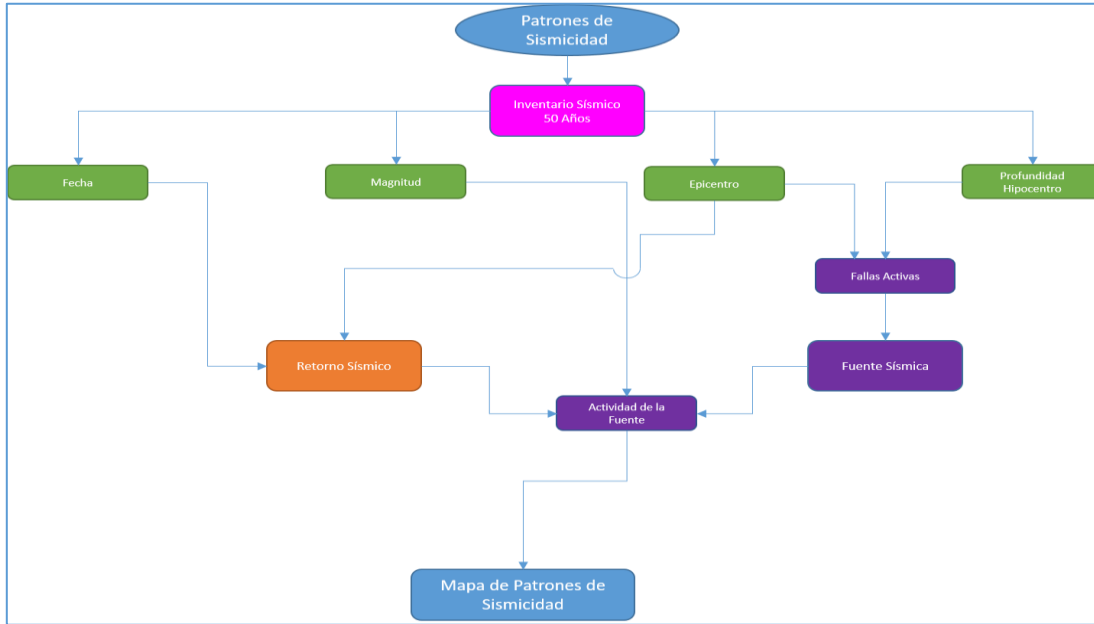
Flujograma de Sistematización – Segundo Objetivo



Fuente: Elaboración Propia

Figura N°: 7

Flujograma de Sistematización – Tercer Objetivo

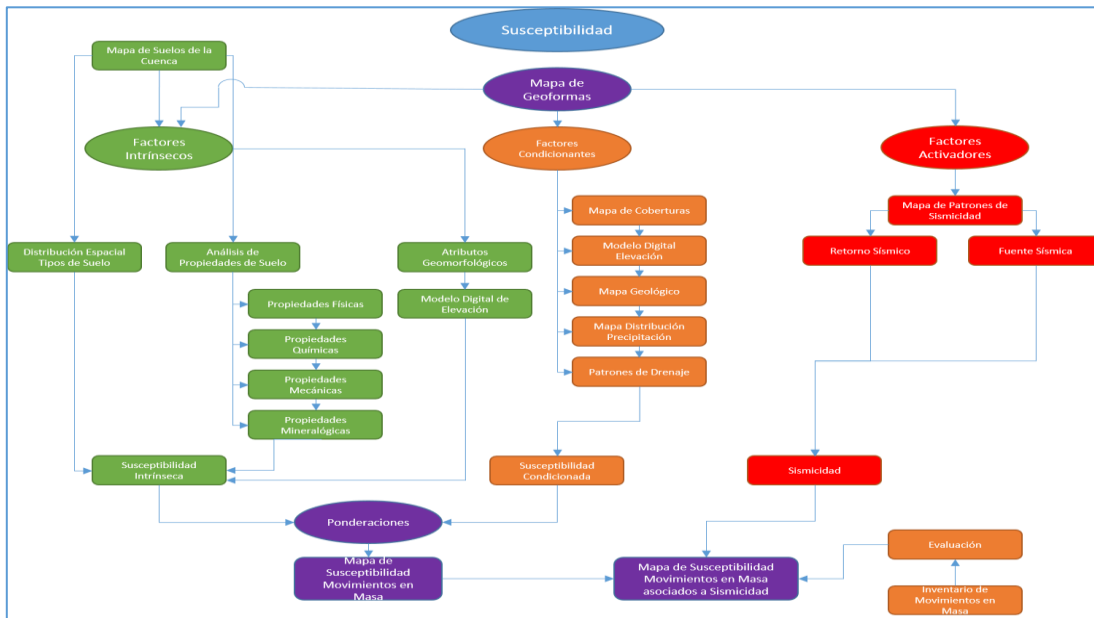


Fuente: Elaboración Propia

www.bdigital.ula.ve

Figura N°: 8

Flujograma de Sistematización – Cuarto y Quinto Objetivo



Fuente: Elaboración Propia

Fase 3: Metodológica – Técnica

En esta fase se procedió a la digitalización de la información cartográfica analógica de la cuenca obtenida en la etapa anterior, que permitieron la sistematización de datos espaciales para su posterior análisis. Es importante señalar que en esta fase se generó información temática a partir del procesamiento de información geográfica mediante las siguientes técnicas:

- Digitalización, análisis e interpretación de mapas (edafológicos, geológicos, estructurales, fuente sísmica y retorno sísmico) con el software SIG: ArcGIS 10.3, ArcGIS 10.4, Qgis 2.12 y Qgis 2.18, para la construcción de una base de información estructurada en capas vectoriales.
- Elaboración de un MDE a partir de curvas de nivel a escala 1:25000, elaboradas por la antigua Dirección de Cartografía Nacional en el año 1989, digitalizadas por los estudiantes de la carrera de Educación, mención: Geografía y Ciencias Tierra de la Universidad de los Andes – Táchira, “Dr. Pedro Rincón Gutiérrez” en el año 2008, con el software MapInfo 7.5, ensamblada y corregidas con el software ArcGIS 10.3.
- Medición de altitud en puntos de control en áreas seleccionadas con un equipo receptor GPS Garmin 78s.
- Evaluación de modelos digitales de elevación de diversas fuentes (cartas topográficas, AsterGDEM y SRTM) utilizando el error medio cuadrático (EMC).
- Análisis de la información climática en formato digital.
- Procesamiento digital de la escena de la imagen satelital 649-334/3 obtenida por el satélite SPOT 5 en el año 2010, lo que origina una clasificación no supervisada de la imagen con el software ENVI 5.0, para su posterior evaluación haciendo uso del mosaico obtenido a través de la API de Google Earth con el software SAS Planet en su versión 15.11, tomando en cuenta los planteamientos de Chuvieco (2010) para el procesamiento visual de las imágenes.

- Elaboración de un inventario de movimientos en masa, a partir del procesamiento visual de la categoría: suelo desnudo del mapa de coberturas del área de estudio, utilizando el software ArcGIS 10.4.
- Estimación de parámetros morfométricos (patrón, densidad y longitud de drenaje) a partir del MDE de la cuenca del río Torbes con el software ArcGIS 10.4.
- Análisis espacial en ambiente SIG de patrones de sismicidad a partir del catálogo sísmico construido con base en la información facilitada por FUNVISIS y el USGS.
- Elaboración, procesamiento y análisis de mapas de geoformas en categoría Facies de Tipos de Paisaje a la escala 1:50000, en ambiente SIG, según la metodología propuesta por Zinck (2012).

Fase 4: Validación y Elaboración Teórica

Durante esta fase, se combinaron los datos espaciales disponibles para el análisis e interpretación de resultados en ambiente SIG, particularmente el software ArcGIS 10.4, Erdas 2015, ENVI 5.5 y Qgis 2.18, para describir las características físico-naturales de la cuenca del río Torbes, delimitar las geoformas presentes en la misma de acuerdo al sistema de clasificación de las formas del relieve propuesto por Zinck (2012), generar un inventario de movimientos en masa, establecer los patrones de sismicidad que inciden en la cuenca y definir la susceptibilidad a movimientos en masa asociados a sismicidad según la metodología propuesta por INGEOMINAS (2001).

Fase 5: Transferencia

En esta etapa, se estructuraron una serie de estrategias con la finalidad de cumplir con los requerimientos de transferencia para la investigación y docencia en el marco de la geografía aplicada según lo planteado por Buzai y Baxendale (2011). En este sentido, se desarrolló un artículo para una revista indexada a fines de divulgar los hallazgos encontrados dentro de la investigación. Asimismo, varias de las capas temáticas generadas en el trabajo y el MDE para el área de estudio, se emplean con fines educativo en las unidades curriculares: Sistemas de Información Geográfica,

Fundamentos del Medio Físico y Espacio Geográfico Venezolano, pertenecientes a la carrera de Educación, mención: Geografía e Historia de la Universidad de los Andes “Dr. Pedro Rincón Gutiérrez” del Estado Táchira. Por otro lado, los resultados del trabajo serán expuestos ante organismos competentes en especial Protección Civil.

Población y Muestra

La población según Lerma (2012) es: “... el conjunto de elementos de la misma categoría que presentan una característica determinada o que corresponden a una misma definición y a cuyos elementos se le estudiarán sus características y relaciones” (p. 72). Para Hernández, Fernández y Baptista (2010) una población es:” ... el conjunto de todos los casos que concuerdan con una serie de especificaciones...” (p. 174).

A diferencia de otros estudios, con enfoque mixto donde la población está definida a niveles diferentes de abstracción, en otras palabras, cambia según el objetivo abordado, en este trabajo los datos e información obtenida corresponden a la cuenca del río Torbes que conforma la totalidad del área de estudio. En relación con la muestra, un subgrupo de la población, en los estudios de naturaleza cualicuantitativa es frecuente que existan diferentes muestras en distintas etapas de la investigación. Sin embargo, en este trabajo, y para responder a las interrogantes, la muestra coincide con la población, es decir, es censal.

No obstante, para el estudio y delimitación de las formas del relieve, mediante cualquiera de los sistemas de clasificación disponible, la información morfográfica y morfométrica derivada a partir de los MDE cada día tiene mayor relevancia, por el avance vertiginoso en la teledetección que ha permitido mayor resolución (espacial y espectral) en grandes superficies a menor costo. Para la cuenca del Torbes, estaban disponibles MDE provenientes de fuentes diferentes, por este motivo, se realizó una evaluación de la calidad de la información altitudinal.

En este marco de ideas, se comparó un MDE derivado a partir de la triangulación (TIN) de curvas de nivel digitalizadas a partir de las cartas a 1:25000, con los MDE

AsterGDEM y SRTM; para ello se utilizó el error medio cuadrático (EMC) y fue necesaria obtener una muestra a partir de un procedimiento de muestreo.

Una muestra es definida por Bernal (2010) como: "...una parte representativa de la población que se selecciona para efectuar la medición y la observación de las variables objeto de estudio" (p. 161). Hernández et al. (2014) definen el muestreo probabilístico por racimos o clústeres como: "...las unidades de análisis que se encuentran encapsuladas o encerradas en determinados lugares físicos o geográficos" (p. 182). En este sentido, es importante señalar que la característica que se tomó en consideración para seleccionar los conglomerados fue la pendiente, ya que según Felicísimo (2007) la configuración del relieve y particularmente su topografía, constituye un factor de control clave de los modelos digitales de elevación.

Para seleccionar los puntos de control, donde se efectuaron las mediciones de altitud, mediante un receptor GPS Garmin 78s, y que luego constituyen la muestra, se tomó en cuenta el concepto de intensidad del muestreo para cada modelo, el cual se define según Mora (1999) como la fracción de muestreo expresada en porcentaje, que se obtiene a partir del tamaño y variabilidad de la población y la precisión requerida. Una vez determinada fue posible calcular el tamaño de la muestra a partir de la fórmula propuesta por Scheaffer en 1987 y expresada por Mora (1999) como:

$$n = \frac{(cv\%)^2}{\frac{(E\%)^2}{t} + \frac{(cv\%)^2}{N}}$$

Donde:

cv%= Coeficiente de variación, calculado a partir de la intensidad de muestreo, el cual varía según el MDE

E%= Error de muestreo prefijado (usualmente 10%)

t= t de Student a p nivel de probabilidad, en el caso de esta investigación el nivel fue de 95% y con un valor t de 1,6449.

N= Número total de elementos de la población, en este caso el total de píxeles de cada modelo que fue 767920

En concordancia con lo anterior, se seleccionaron cuarenta (40) puntos de control distribuidos en toda la cuenca, proporcionalmente para cada clase de pendiente (Ospina, Viloría y Elizalde, 2010) en función del área ocupada por cada clase respecto a la superficie total de la cuenca (Ver Cuadro N° 11)

Cuadro N° 11

Muestreo por clases de pendiente

<i>Clases</i>	<i>Área (Ha)</i>	<i>%</i>	<i># Muestras</i>
<i>Plano/Suavemente Inclinado</i>	3615,75	11,85	5
<i>Inclinado</i>	5951,97	19,51	8
<i>Moderadamente Escarpado</i>	12050,01	39,50	15
<i>Escarpado</i>	4916,34	16,12	7
<i>Muy Escarpado</i>	3969,9	13,01	5

Fuente: Adaptado de Ospina, Viloría y Elizalde (2010)

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Descripción de las Características Físico-Naturales presentes en la cuenca del río Torbes

Geología

Para la descripción y análisis de la información geológica de la cuenca del río Torbes, se utilizó como marco cartográfico referencial, el mapa elaborado por Ferrer (1977) en su estudio geomorfológico detallado de la cuenca media-inferior del río Torbes. Este mapa se encontraba en formato analógico, por tanto, fue necesario llevarlo a formato digital.

Una vez escaneado, se procedió a mejorar la visualización, utilizando el software Corel PaintShop Pro X6, en donde se ajustaron los valores de nitidez, brillo, tono, temperatura del color, para hacer una inversión de color (RGB) a blanco y negro (BN) utilizando el algoritmo de muestreo *JARVIS*, que permite un mayor contraste entre el fondo de la imagen (negro) y las líneas trazadas sobre este (blanco), una vez hechos estos cambios se cortó la imagen, para reducir la información marginal que podría generar errores en la georreferenciación, para esto se empleó la herramienta *LAZO DE RECORTE*, que permite trazar un área de interés a mano alzada, en este caso, para el corte, se utilizó la poligonal de la cuenca, como referencia para efectuar el trazo, finalmente se guardó en formato *.png que permite utilizar un fondo transparente que conlleva la visualización de la información de interés exclusivamente, en este caso el mapa geológico.

Seguidamente, se procedió a realizar la georreferenciación con la herramienta *GEOREFERENCING* de ArcGIS 10.3, cabe señalar, que el mapa de geología de Ferrer (1977), fue elaborado a partir del mapa geológico 1:50000 de la Dirección de Geología del Ministerio de Energía y Minas del año 1969, que utilizó el mapa base de la antigua Creole Petroleum Corporation, cuyo Datum no se identificó en el catálogo EPSG, que

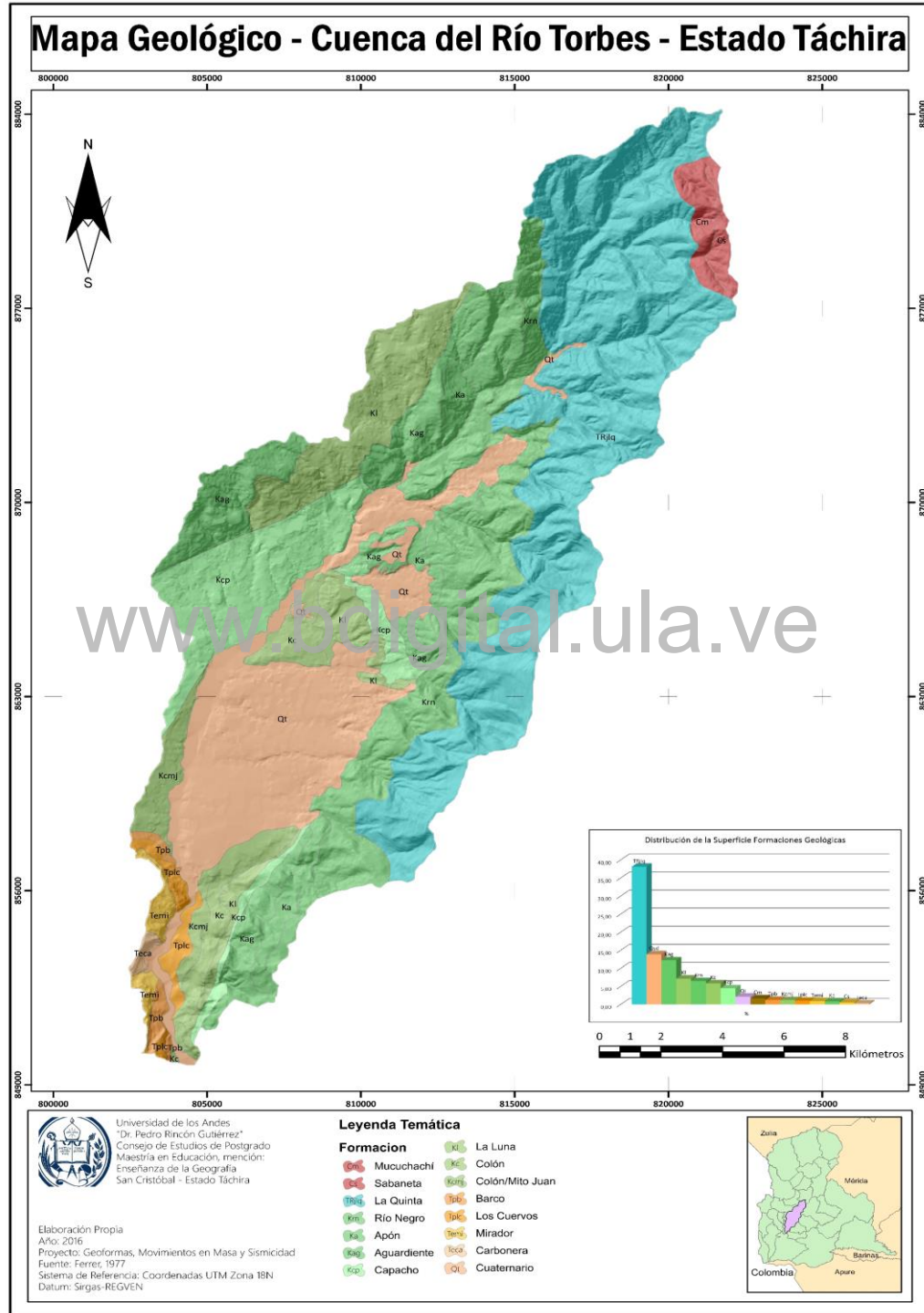
es utilizado por los softwares SIG, para sistematizar los datums a nivel mundial. Ello condujo a utilizar, un proceso de georreferenciación a partir de puntos en un lienzo (capa de referencia), para esto se empleó una escena del satélite SPOT 5 (Escena: 649-334/3 del 10/01/2010) donde se localizaron las desembocaduras de cursos de agua dentro de la cuenca, y que obviamente se encontraban presentes en la imagen digital del mapa geológico a georreferenciar.

Inicialmente, se pudieron seleccionar solo 12 puntos de control, dado que la imagen tenía una resolución espacial de 10 metros, por esta razón, fue necesario utilizar como apoyo a la georreferenciación, un mosaico conformado desde la API de Google Earth con el software SAS Planet 1511, el cual está constituido por imágenes del satélite WorldView-3, con una resolución de 0,31 m, desde donde se seleccionaron 13 puntos de control adicionales, que correspondían a cursos de agua.

Es importante señalar, que ambos productos (SPOT 5 y mosaico) usados para la referencia, tenían un SRC UTM SIRGAS-REGVEN 18N (EPSG: 2201), en este proceso se utilizó el algoritmo de transformación *PCLYNOMIAL 2*, obteniendo un error de 1,01, el cual según Sánchez (2009) y Dávila y Camacho (2012), se considera válido para estos casos; finalmente se guardó el archivo referenciado con extensión *.TIFF. Finalmente se procedió a efectuar la vectorización en pantalla de la información temática presente en el mapa, para esto se creó una nueva capa vectorial en formato *.shp, y con la herramienta *CREATE FEATURES*, se trazaron las distintas formaciones geológicas, asignando para cada formación una entrada en la tabla de atributos en los campos de *FORMACION* y *NOMENCLATURA*, posteriormente se creó un nuevo campo llamado *HA*, en el cuál a partir de la herramienta *CALCULATE GEOMETRY*, se registró la superficie de cada polígono en hectáreas (ha). Este procedimiento se repitió para la información de estructuras geológicas básicas (Ver Figura N°: 9)

Figura N°: 9

Mapa Geológico de la cuenca del río Torbes



Fuente: Elaboración Propia

Geología Regional y Formaciones Geológicas

La cuenca del río Torbes, se enmarca dentro del Sistema Montañoso de los Andes, particularmente entre la Cordillera de Mérida y la Depresión del Táchira, esta región según Fuenmayor, Strauss y Romero (1997) pertenece a una zona de plegamientos terciarios, cuyo origen está en los acontecimientos geológicos que tienen lugar en el occidente de Venezuela, durante el Cenozoico. Vivas (2012) plantea que los Andes venezolanos tuvieron su origen en el Eoceno, a comienzos del Terciario, lo cual coincidió con el inicio del contacto de las placas que dieron origen a su levantamiento, es decir, las placas Nazca, Caribe y Sudamericana. Aunque los mayores esfuerzos tectónicos ocurrieron durante el Mioceno y el Plioceno, este proceso se mantuvo con varios paroxismos tectónicos hasta el Pleistoceno ya en el Cuaternario.

En la cuenca del Torbes, se reconocen rocas del Paleozoico pertenecientes a las formaciones Mucuchachí y Sabaneta, también se encuentran rocas sedimentarias Mesozoicas del Jurásico (La Quinta) y del Cretáceo (Aguardiente, Colón), también rocas de edad Cenozoica (Carbonera, Barco) hasta aluviones constituidos por materiales no consolidados del Cuaternario. En este sentido, Chacón y Pernía (2010), plantean que la secuencia cronoestratigráfica presenta variaciones litológicas a lo largo y ancho del área de estudio, las cuáles son definidas por la estratigrafía propia de los Andes venezolanos, la mayoría de los afloramientos expuestos son areniscas, lutitas y calizas. Al observar la columna estratigráfica del Estado Táchira (MARNR, 1986), complementada con la información del III Léxico Estratigráfico de Venezuela (PDVSA-Intevep, 2011), se aprecia que la Formación Mucuchachí, conforma la base de la columna y está constituida por rocas del carbonífero como las filitas negras y las calizas negras, y sobreyacente a esta, conglomerados y areniscas pertenecientes a la Formación Sabaneta.

Del Mesozoico, afloran rocas sedimentarias del Jurásico, representadas por materiales de la Formación La Quinta, que subyacen de forma discordante con los sedimentos de la Formación río Negro. Según Vivas (1984) y Chacón y Pernía (2010), la primera transgresión marina tiene como evidencia las calizas de la Formación Apón,

que, según los autores, corresponde a una plataforma marina somera, que se considera diacrónica. Posteriormente según el MARNR (1986) ocurre una segunda transgresión marina, cuyo evento inicial se vincula con la Formación Aguardiente y con depósitos marinos litorales. Con la ampliación de este evento transgresivo, se conformaron los depósitos profundos de las formaciones Capacho y La Luna. En la regresión de este evento, se depositan las lutitas de la formación Colón y Colón-Mito Juan que son del período Cretáceo.

Finalmente, durante el Cenozoico, según Chacón y Pernía (2010), se acumulan sedimentos en concordancia sobre los del Cretáceo. En la época del Paleoceno se constituye la formación Barco y Los Cuervos y en el Eoceno y Oligoceno, las formaciones Mirador y Carbonera, por último, los depósitos del cuaternario inferior y los denominados cuaternario sin diferenciar. Cada una de las formaciones presentes en la cuenca del río Torbes se describen en orden cronológico a continuación.

Formación Mucuchachí (Cm):

Está constituida por pizarras, filitas, cuarcitas, areniscas y conglomerados con metamorfismo de mediano a bajo grado, su coloración va de negro a gris verdosa, es común la presencia de piritita y en algunos casos se encuentran estratos de calizas altamente metamorfizadas. Según PDVSA-Intevep (2011) el espesor promedio de esta Formación es de 5000 metros, y se encuentra muy plegada y metamorfizada. Su origen corresponde al eón Fanerozoico, era Paleozoica, período Carbonífero. Se encuentra al Norte, en la vertiente izquierda de la cuenca entre los 2600 y 2900 msnm en las inmediaciones de la fila El Portachuelo, se extiende hasta el fundo Los Cedros cerca de El Zumbador, y su superficie aproximada es de 516,14 ha, que equivale al 1,69% de la superficie de la cuenca.

Formación Sabaneta (Cs):

Esta Formación está constituida principalmente por conglomerados y areniscas; son rocas bastante cuarzosas con intercalaciones de limolitas y lutitas grises oscuras. Se estima tiene unos 500 metros de espesor, y exhibe metamorfismo de bajo grado. Se

originó en el Pérmico, en la era Paleozoica. Se localiza también al Norte de la cuenca en contacto discordante con la Formación Mucuchachí, en las cercanías de la fila El Portachuelo, se extiende por 172,79 ha que corresponde al 0,57% de la cuenca.

Formación La Quinta (TRjlq):

Esta formación tuvo su origen en el Jurásico, durante la era Mesozoica, es de origen continental y ocupa la mayor superficie de la cuenca: 11607,20 ha, es decir, el 38,12%. Según Soulas; Schubert y Rojas (1986), tiene un espesor de 3400 metros. Se caracteriza por presentar areniscas y conglomerados de color rojo con eventuales manchas de coloración verdosa intercaladas con horizontes lutitas y limolitas de coloraciones grises oscuras. De acuerdo con el MARNR (1986) es sumamente susceptible a la erosión. Se extiende desde el Noroeste de la cuenca, en las proximidades de El Zumbador, cerca de las cabeceras del río, hasta el Sureste, principalmente en la vertiente izquierda, en las inmediaciones del cerro Salto del Indio. La altitud promedio de esta unidad es de 2000 msnm.

Formación río Negro (Km):

Esta formación geológica, tiene su origen en el Cretáceo Inferior en la Era Mesozoica, está integrada por areniscas cuarzosas y conglomerados que varían de un color gris claro a blanco, intercaladas con lutitas y limolitas de coloración gris oscura con restos orgánicos. En la cuenca tiene un espesor aproximado de 1450 metros, y presenta altas concentraciones del mineral yeso. Se ubica en la cuenca de forma dispersa con límites discordantes con la formación La Quinta, se identifica al Norte en las inmediaciones de Casa del Padre hasta Sabana Larga, en la vertiente derecha, cerca del sector Monte Carmelo; también se evidencia al oeste de la población de Cordero, en el sector El Tobón y luego se extiende desde el sector Altos de Paramillo en San Cristóbal hasta el cerro Loma de Rosales al Sureste de la cuenca. Ocupa una superficie aproximada de 1972,29 ha, que equivale a un 6,48% del total de la cuenca.

Formación Apón (Ka):

Esta Formación se originó en el período Cretáceo Inferior del Mesozoico, está constituida por calizas fosilíferas, calizas arenáceas, limolitas y areniscas calcáreas interestratificadas con arcillitas y limolitas fosilíferas. Su espesor aproximado es de 200 m, se ubica de forma dispersa en la cuenca, aflorando en las cercanías de Sabana Larga, en la desembocadura de la quebrada La Hoya. También, está presente en el sector El Guamal, cerca de Cordero y al Sur, desde el nacimiento de la quebrada La Potrera, al Este de San Cristóbal hasta el cerro Agua Linda. Ocupa una superficie de 260,98 ha, es decir, el 0,86% del área de estudio.

Formación Aguardiente (Kag):

Está constituida por areniscas cuarzosas blancas en estratos intercalados con limolitas y lutitas carbonáceas, su espesor estimado es de 500 metros. Ocupa 3724,29 ha que corresponde al 12,23% de la cuenca, lo que la hace la tercera formación en extensión dentro de la misma. Se distribuye en tres sectores, el primero al oeste en las inmediaciones del cerro La Mantellina hasta el sector Pueblo Chiquito en Palmira, al Noroeste se extiende desde la Loma de Perro, cerca Casa del Padre por la margen derecha, hasta la población de Cordero, a la altura de la desembocadura de la quebrada La Cordera, finalmente se reconoce esta Formación al Este de San Cristóbal, en las cercanías de Paramillo, donde se extiende hacia el Sur hasta la población de El Corozo.

Formación Capacho (Kcp):

Tiene su origen en el Cretáceo Superior, de la era Mesozoica. Según PDVSA-Intevep (2011), en el área de la cuenca presenta dos miembros, el inferior con un espesor de 75 m, que consiste de lutitas negras mal laminadas y quebradizas, con algunas calizas grises; y el miembro superior con 320 m de espesor, que consiste en calizas grises muy fosilíferas, con intercalaciones de lutitas negras. Esta Formación aflora al oeste de la cuenca, sobre la Serranía de Capacho, desde el trazo principal de la falla del mismo nombre hasta las inmediaciones de la población de Palmira. Luego se identifica su presencia al Sur de la población de Cordero y también al Este de la

población de San Rafael y Capachito, posteriormente aflora desde las inmediaciones de la quebrada La Bermeja, hasta el cauce de la quebrada La Corosita cerca del sector Campo Alegre.

Formación La Luna (Kl):

Esta Formación está conformada típicamente por calizas negras arenáceas, lutitas y limolitas de similar color, denominadas lutitas calcáreas fétidas, con presencia abundante de materia orgánica. Asimismo, presenta ftanitas (cherts) y areniscas calcáreas fosilíferas. Su origen se remonta al Cretáceo Superior de la Era Mesozoica y se estima presenta un espesor de 300 metros. Dentro del área de estudio se encuentra ubicada en la cuenca alta y media, con una extensión considerable hacia el Noroeste, iniciando en las cercanías del sector La Tamoco, concretamente en la fila Pie de Loma de Perro, y desciende en sentido Suroeste hasta el sector La Laguna, en la vertiente derecha. Mientras que en la cuenca media se encuentra dispersa en las inmediaciones de la ciudad de San Cristóbal, de allí, en dirección Sureste hasta llegar a los alrededores del sector Campo Alegre en El Corozo. Ocupa una superficie de 2177,03 ha lo que representa un 7,15% del área analizada.

Formación Colón (Kc):

Esta Formación está conformada por rocas del Cretáceo Superior de la Era Mesozoica, desde el punto de vista de la litología está constituida por lutitas microfósilíferas y arcillitas de color gris oscuro y negras, además de limolitas y estratos pequeños de areniscas de grano de fino en la parte superior de la unidad. El espesor de la Formación varía según su ubicación, sin embargo, se estima en 800 metros. En el área de trabajo es posible ubicarla en el sector medio de la cuenca, desde La Silgará atravesando los municipios Guásimos y Cárdenas, en dirección Suroeste hasta las cercanías de Barrancas, en la vertiente derecha, además, se reconocen pequeñas áreas dispersas en los alrededores de la ciudad de San Cristóbal. Por su parte, en lo que corresponde a la cuenca baja es posible identificar la presencia de la Formación en la vertiente izquierda, desde la urbanización La Victoria en dirección Sureste hasta el

sector Campo Alegre en El Corozo. Se estima que ocupa 1776,32 ha que corresponde al 5,83% de la superficie total de la cuenca.

Formación Mito Juan

Chacón y Pernía (2010), señalan que en esta Formación la litología es similar a la presente en la Formación Colón, salvo por un aumento progresivo de la arena hacia el tope de la formación, y en la fractura de las lutitas, que es de tipo irregular o astillosa, a diferencia de las lutitas de la Formación Colón que es de tipo subconcoidal. Esta formación es de Cretáceo Superior de la Era Mesozoica.

Unidad Cartográfica Colón-Mito Juan (Kcmj)

PDVSA-Intevep (2011) señala que existe dificultad para separar cartográficamente a la Formación Colón de la Formación Mito Juan, por esta razón algunos autores como Ramírez y Campos (1972), Ferrer (1977) y Chacón y Pernía, (2010) utilizan el término combinado Colón-Mito Juan. Este es el caso del mapa geológico de la cuenca del Torbes, que sirve de fuente para esta investigación, el cual muestra esta unidad cartográfica, concentrada en el área Suroeste, en los alrededores del casco central de la ciudad de San Cristóbal, desde el barrio Colinas del Mirador hasta los límites del barrio El río, con una superficie de 367, 31 ha, lo que representa el 1,21 % del área total.

Formación Barco (Tpb):

Su litología se caracteriza por la presencia de areniscas de grano grueso con estratificación cruzada, de colores claros y amarillentos, así como de lutitas y limolitas grises oscuras parcialmente limosas micáceas y carbonáceas. De igual forma, se destacan las areniscas chispeantes que deben su nombre a crecimientos de cuarzo cristalino que brillan al exponerse al sol. Según Fierro y Useche (1985) esta formación tiene un espesor que varía entre 200 y 300 metros cerca de San Cristóbal. Su origen se remonta al Paleoceno de la Era Cenozoica. La Formación Barco se localiza en la cuenca baja distribuida en tres secciones; la primera de ellas se sitúa en parte del sector Rómulo Gallegos en las inmediaciones del cauce principal del río Torbes, la segunda sección va desde el casco central de San Cristóbal en dirección Sur para finalizar en el sector

Campo Alegre de El Corozo, parte de esta sección pasa por las quebradas La Chucurí, La Ortiza, La Blanca y la quebrada La Corosita. La tercera sección, se ubica al Suroeste de la cuenca en la margen derecha del río Torbes. Se calcula que esta unidad ocupa 386,46 ha que corresponde al 1,27% de la superficie total del área de estudio.

Formación Los Cuervos (Tplc):

Tiene su origen en el Paleoceno de la Era Cenozoica, ocupa una superficie aproximada de 320,45 ha lo que representa un 1,05 % de la cuenca. Está constituida principalmente por una secuencia de areniscas, limolitas y arcillitas, que presentan capas de carbón a modo de ciclos repetitivos, además de calizas delgadas. Esta Formación tiene aproximadamente 800 metros de espesor, y es posible ubicarla en el Suroeste de la cuenca baja, en las inmediaciones del barrio Rómulo Gallegos y la urbanización La Victoria hasta la desembocadura del río Torbes en el río Quinimarí.

Formación Mirador (Temi):

En su litología destaca la presencia de areniscas blancas de grano fino, con capas de areniscas cuarzosas en estratos de variable espesor, que se encuentran e intercalan con capas de limolitas y lutitas grisáceas. Chacón y Pernía (2010) describen que la Formación Mirador en el Táchira tiene una presencia particular de areniscas cuarzo friables en colores claros, y con intervalos ocasionales de lutitas y limolitas grises moteadas. Esta Formación tiene su origen en el Eoceno de la Era Cenozoica, y abarca una extensión aproximada de 288,02 ha que corresponde al 0,95 % de la superficie total de área de investigación. Es posible ubicarla en dos segmentos casi contiguos en la parte baja de la cuenca, iniciando en la desembocadura de la quebrada La Montaña y luego en sentido Sur hasta las inmediaciones de la Fila El Silencio.

Formación Carbonera (Teca):

Su litología se compone fundamentalmente de arcillitas y lutitas grisáceas irregularmente estratificadas, que meteorizan en tonos de rojo y amarillo, además, contiene capas de carbón que forman ciclos repetitivos. Esta Formación tiene un espesor variable que puede alcanzar los 400 metros y tiene su origen en el Eoceno

tardío – Oligocena de la Era Cenozoica. En cuanto a su ubicación en la cuenca, se reconoce en la sección baja en dirección Suroeste, específicamente en un segmento que corresponde a la Fila La Tinta, su extensión es de 89,84 ha lo que constituye el 0,30% de la superficie total de la misma.

Cuaternario:

Ferrer (1977) expresa que en la unidad Cuaternario predominan los sedimentos heterométricos, gravas y bloques con una granulometría que varía de arenas a limos finos. Asimismo, Chacón y Pernía (2010) reportan la acumulación de sedimentos de diversa naturaleza en forma de terrazas y abanicos aluviales, entre otros. Los materiales cuaternarios ocupan 4890,64 ha del área de estudio, de estas 654,89 ha corresponden a Cuaternario Inferior, mientras que 4235,75 ha se identifican como Cuaternario sin Diferenciar, en total esta unidad representa aproximadamente el 16,06 % de la extensión de la cuenca. Su localización en el área de estudio se distribuye de Norte a Sur en el sector central de la cuenca alta y media donde se asientan parte de las poblaciones de Cordero, Tariba y San Cristóbal a ambas márgenes del río Torbes.

Fallas

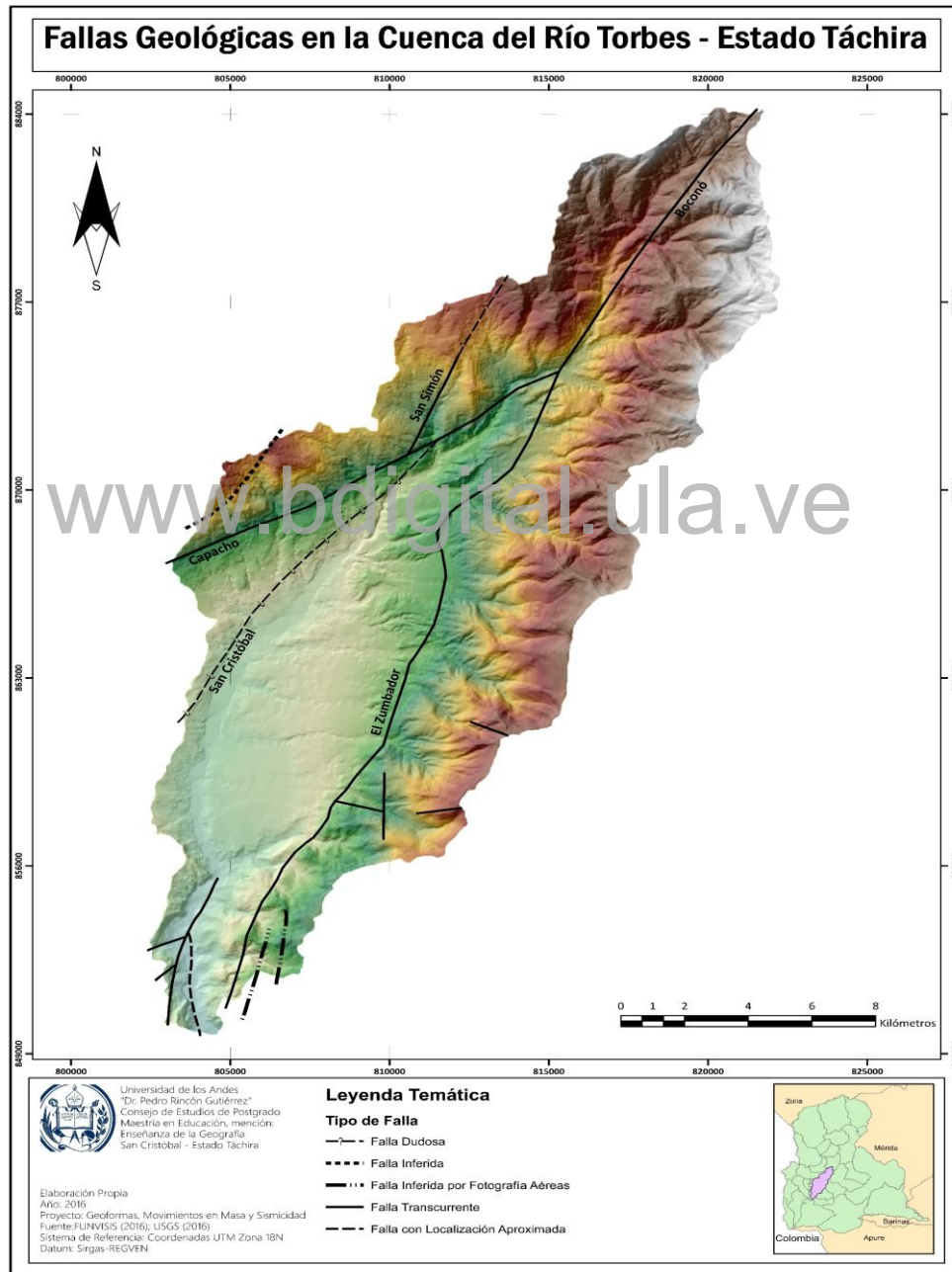
Al igual que con la capa temática de formaciones geológicas, se vectorizaron las líneas que representan las fallas dentro de la cuenca, para esto se creó un archivo vectorial *.shp, el cual contiene además de la representación geométrica, la tabla de atributos donde se crearon dos campos, el primero *TIPOFALLA*, que incluye la información sobre el tipo de falla (normal, dudosa, transcurrente, inferida, con localización aproximada, inferida por fotografía aérea), de acuerdo con en el mapa analógico original de Ferrer (1977); en el segundo campo (*LENGHT*) se almacenó la información sobre la longitud de cada falla.

Es importante señalar que, la cuenca del río Torbes, se encuentra localizada dentro del Sistema de Fallas de Boconó, particularmente la sección 06A, que corresponde al segmento que va desde San Juan de Lagunillas hasta la frontera con Colombia (Audemard, 2002). Una de las características de esta sección, es que debido

a un conjunto de esfuerzos compresionales y de cizalla, el eje principal del sistema de fallas, se deriva en quiebre subsidiarios, lo que conlleva la formación de un conjunto de trazas que se distribuye de forma dispersa en la cuenca (Ver Figura N°: 10).

Figura N°: 10

Fallas Geológicas en la cuenca del río Torbes



Fuente: Elaboración Propia

Al Norte, la traza principal del sistema de Boconó tiene una longitud en la cuenca de 12,7 Km, es de tipo transcurrente dextral, y se extiende según PDVSA-Intevep (2011) desde el norte en El Zumbador, hasta el noroeste de la población de Cordero, según lo planteado por Chacón y Pernía (2010). Allí por una transferencia de movimiento vertical con rumbo oeste, ocasionado según Soulas (1983) por movimientos transcurrentes dextrales de un bloque oblicuo de la falla, se deriva en subsidiarias como la Falla del Zumbador y la Falla de Capacho, esta última, autores como Audemard (2002) y Rodríguez y Singer (2008), identifican como la traza activa del sistema de Fallas de Boconó, al oeste del Estado Táchira. Esta estructura, dentro de la cuenca tiene una longitud de 13,2 Km y se caracteriza por ser de tipo transcurrente dextral, con un rumbo predominante NE-SO, hasta la frontera con Colombia, donde se une al Sistema de Fallas de Chinacotá (Audemard, 2012). La Falla del Zumbador es de tipo transcurrente y su longitud dentro de la cuenca es de 26,2 Km con un rumbo NE-SE, y se extiende fuera del área de estudio hasta unirse con la Falla de Bramón cerca de San Vicente de la Revancha, según Useche (1969).

Se evidencian dentro de la cuenca otro conjunto de trazos de falla, que no pueden ser identificados por su nombre ya que, en la información cartográfica consultada, existían importantes diferencias entre los nombres asignados. Por otro lado, se aprecian en el mapa hacia el Oeste una serie de fallas inferidas por fotografías aéreas identificadas por Ferrer (1977).

Suelos

Para realizar el análisis de la información de suelos de la cuenca del río Torbes, se utilizó la información cartográfica asociada al estudio geomorfológico detallado de la cuenca media-inferior del río Torbes, hecha por Ferrer (1977), estos mapas se encontraban en formato analógico lo que trajo como consecuencia la necesidad de llevarlos a formato digital en ambiente SIG utilizando principalmente, el software ArcGIS 10.3

En este sentido, se utilizó un procedimiento análogo al empleado para georreferenciar el mapa geológico de la cuenca, debido a que en el trabajo de Ferrer (1977) se empleó el mapa base de la antigua Creole Petroleum Corporation, cuyo Datum no se identificó en el catálogo EPSG, por tanto, fue necesario hacer la georreferenciación utilizando el método de selección de puntos en el lienzo (capa de referencia), aunque en este caso no fue necesario utilizar la imagen satelital SPOT 5, ni el mosaico Google Earth, dado que ya se tenía un mapa georreferenciado (mapa de geología), en donde se podían ubicar puntos comunes entre ambos. Cabe mencionar que al igual que en el mapa geológico se utilizó un algoritmo de georreferenciación *POLYNOMIAL 2*, a partir de veinticinco (25) puntos distribuidos uniformemente en el mapa. El EMC obtenido fue de 0,66, lo que sumado al error original del mapa de geología produce un error acumulado de 1,67, que se encuentra todavía dentro de los requerimientos mínimos aceptables para investigaciones en ambiente SIG planteados por Sánchez (2009) y Dávila y Camacho (2012).

Posteriormente, se desarrolló la vectorización en pantalla, utilizando la herramienta *CREATE FEATURES* de ArcGIS 10.3, para generar polígonos por cada delineación de las asociaciones de suelo presentes, los datos relevantes fueron almacenados en una tabla de atributos, donde se crearon campos para identificar los subgrupos de suelos presentes y uno denominado *AREA*, que permitió calcular la superficie de cada unidad cartográfica, empleando para ello, la herramienta *CALCULATE GEOMETRY*.

Finalmente cabe destacar, que el mapa de suelos elaborado a partir de la información suministrada en Ferrer (1977) presenta un total de 15 unidades cartográficas en la leyenda, de las cuáles una agrupa delineaciones que no se encuentran identificadas dentro del mapa, por tanto y ante la imposibilidad de localizar dicha información, se creó una nueva categoría llamada ND, donde se incluyeron los siete polígonos dibujados a los que no se le pudo precisar la unidad cartográfica a la que pertenecen (Ver Figura N°: 11).

Posteriormente, se desarrolló una revisión documental de las diversas versiones de taxonomía de suelos planteadas por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), para precisar la utilizada por Ferrer (1977). Se verificó que el autor empleo la séptima aproximación que data del año 1967, en función de esto y considerando la figura 11 y el cuadro 12, se describen las características de los suelos presentes en la cuenca.

Cuadro N°: 12

Distribución de las diferentes unidades cartográficas de suelo presentes en la cuenca del río Torbes

<i>Nomenclatura</i>	<i>Unidad Cartográfica</i>	<i>Área (ha)</i>	<i>%</i>
<i>IDDA</i>	Typic Eutropepts	9072,32	29,72
<i>FBDA</i>	Typic Tropohumults	4669,54	15,28
<i>IDAA</i>	Typic Humitropepts	2444,95	8,01
<i>IDAF</i>	Oxic Humitropepts	2430,31	7,96
<i>CCCA</i>	Typic Haplumox	2297,82	7,53
<i>IDAH</i>	Ustoxic Humitropepts	2119,53	6,94
<i>JECD</i>	Lithic Troporthent	1303,19	4,27
<i>JECA</i>	Typic Troporthent	1229,45	4,03
<i>HEIA</i>	Tipic Tropudalfs	1182,25	3,87
<i>IDED</i>	Oxic Distropepts	957,29	3,14
<i>FBDJ</i>	Ustoxic Tropohumults	949,83	3,10
<i>ND</i>	No etiquetados	884,68	2,90
<i>JDEA</i>	Typic Tropofluvents	810,57	2,66
<i>GGDA</i>	Typic Hapludolls	138,98	0,46
<i>FBDH</i>	Oxic Tropohumults	42,29	0,14

Fuente: Elaboración Propia

La distribución espacial de los suelos en la cuenca del río Torbes, es resultado de la acción de los factores formadores (material parental, tiempo, organismos, relieve, actividad antrópica y clima), los cuáles han interactuado influenciados por las condiciones locales presentes en la cuenca. En este sentido, es importante señalar que la diversidad de materiales parentales y la variabilidad en el relieve con su influencia

directa sobre los suelos e indirecta sobre el clima y la cobertura vegetal, se ve reflejada en los distintos tipos de suelos presentes, la cuales se describen a continuación:

Typic Eutropepts:

Pertenece al orden Inceptisol, se encuentra distribuido fundamentalmente en la cuenca media a ambos márgenes del río, ocupa aproximadamente 9072,31 ha, lo que corresponde al 29,72% de la extensión de la cuenca. Se ubica desde las inmediaciones de los cerros La Mantellina y La Loma en la Serranía de Capacho, hasta la Serranía de la Maravilla. En esta área se emplazan las poblaciones de Palmira, Táriba y San Cristóbal; también se puede identificar estos suelos en la cuenca alta, hacia el noreste, en las inmediaciones del Pico El Colorado y la Fila Barro Colorado.

Este tipo de suelo se caracteriza según la USDA (1967) por tener una saturación de base mayor al 50%, su contenido de carbono orgánico decrece con la profundidad, presenta contacto lítico o paralítico, del mismo modo, tiene un horizonte cámbico, es decir, tiene un desarrollo moderado y no tiene consistencia quebradiza. Dentro de la cuenca del Torbes, esta unidad cartográfica presenta una clase por tamaño de partículas: franco fina.

Typic Tropohumults:

Es un ultisol, se distribuye de forma dispersa en la cuenca del Torbes; se identifica al Noroeste de la cuenca, en las inmediaciones del cerro El Ceibal, dentro de la Serranía de Capacho; también se ubica hacia el Este, en las cabeceras de la quebrada La Cordera en la Serranía de La Maravilla. Del mismo modo se ha identificado esta unidad cartográfica al Sureste de la cuenca en el sector Loma de Pío y al Sur desde el cerro Alto Viento hasta la desembocadura del río Torbes en el río Quinimarí; ocupa 4669,54 ha lo que corresponde al 15,28% de la extensión de la cuenca.

Se caracteriza por presentar un horizonte argílico y una baja saturación de bases, en el desarrollo de sus horizontes actúa de manera activa la eluviación e iluviación, presentan un elevado contenido de materia orgánica, pero sin hidromorfismo, se

asocian a un régimen de humedad údico (USDA, 1967), en esta unidad pueden diferenciarse las siguientes clases por tamaño de partícula: fino y muy fino.

Typic Humitropepts:

Es un inceptisol, que se distribuye de forma discontinua en la cuenca, se ubica al Norte de la misma, en la vertiente izquierda, en las inmediaciones de Mesa de Aura y El Paramito; también se identifica esta unidad al Sur, en la margen derecha de la quebrada La Bermeja y hasta la quebrada La Parada. Asimismo, está presente, en la cuenca baja, cerca de Loma de Pánaga. Ocupa aproximadamente 2444,95 ha que representa un total de 8,01% de la superficie de la cuenca.

Esta unidad según la USDA (1967), presenta una evolución incipiente y con evidencias de haber sufrido la acción de la meteorización, presentan minerales meteorizables, es decir, no han sido totalmente alterados, tienen una saturación de base baja, no presentan horizonte sómbrico, su contenido de carbono orgánico disminuye con la profundidad, tienen un régimen de humedad údico, habitualmente se asocian a pendientes superiores al 25% y en la cuenca del Forbes, esta unidad cartográfica presenta tres clases por tamaño de partículas: franco fina, limoso fino y arcilloso esquelético.

Oxic Humitropepts:

Es un inceptisol, que se encuentra ubicado en la margen izquierda, en las inmediaciones de la población de Cordero, ocupa 2430,31ha que equivale al 7,96% de la superficie total de la cuenca. Son suelos con baja evolución, con poca diferenciación de horizontes, y según la séptima aproximación (USDA, 1967) tienen una saturación de bases menor al 50%, régimen de humedad údico y su contenido de carbono orgánico disminuye con la profundidad. Pueden diferenciarse en esta unidad dos clases por tamaño de partículas: esquelético franco y esquelético arcilloso.

Typic Haplumox

Estos suelos pertenecen al orden de los Oxisoles, han sufrido intensos y prolongados procesos de meteorización y lavado, por tanto, son suelos altamente desarrollados y evolucionados. Según la USDA (1967) se caracterizan por contener altos niveles de caolinita, hidróxidos y óxidos de hierro y aluminio. Poseen baja capacidad de retención de cationes en el horizonte óxico, el cual tiene profundidades superiores a los 1,25 m. En la cuenca, esta unidad puede diferenciarse en dos clases por tamaño de partículas: franco fino y fino.

Se distribuyen de forma dispersa en la cuenca, siendo reconocido en el área correspondiente a las poblaciones de Cordero y San Rafael, en la vertiente izquierda. Igualmente, en la superficie que va desde la quebrada La Parada hasta la quebrada La Machirí en el Norte de la ciudad de San Cristóbal, finalmente también se ha identificado en la cuenca media entre la margen izquierda de la quebrada La Bermeja y la quebrada La Chucurí. Esta unidad ocupa una superficie aproximada de 2297,82 ha, lo que equivale a 7,53% del área de la cuenca. Es necesario resaltar que en las modificaciones posteriores efectuadas a la taxonomía estos suelos clasifican como ultisoles.

Ustoxic Humitropepts

Pertenece al orden de los Inceptisoles, presentan un débil desarrollo con escasa expresión morfológica, son suelos meteorizados que han perdido parte de su contenido mineral, su nivel de carbono orgánico decrece con la profundidad, su régimen de temperatura es isomésico y el régimen de humedad es ústico (USDA, 1967), esta unidad presenta una clase de tamaño de partículas: limoso fino.

Su presencia en la cuenca se identifica en dos sectores, el primero al Norte entre la divisoria de aguas de la cuenca, en la fila Portachuelo hasta las inmediaciones de la naciente de la quebrada La Lejía, el segundo sector, se ubica al Sur, en las cercanías del páramo La Moraleña, al oeste del cerro La Zeta, cercano al Aeropuerto de Paramillo

en la ciudad de San Cristóbal. Esta unidad cartográfica tiene una extensión aproximada de 2119,53 ha que corresponde al 6,94% de la superficie total de la cuenca.

Lithic Troorthent

Se enmarca en el orden de los Entisoles, se caracterizan por ser suelos muy poco evolucionados, sus propiedades están directamente relacionadas con su material parental, presenta un epipedón ócrico, del mismo modo su régimen de humedad es údico y su amplitud térmica no es mayor de 5 °C durante el año. En la cuenca la unidad se subdivide en dos clases, de acuerdo al tamaño de partículas: esquelético franco y franco fino, la primera tienen un elevado porcentaje de elementos gruesos (superiores a 2 mm), la segunda presenta proporciones superiores al 15% de la fracción arena fina con fragmentos de roca de hasta 7,5 cm de diámetro (USDA, 1967).

Se ubica al Norte, en los sectores Los Ranchos y San Isidro en la Serranía de Capacho, cerca de la cabecera de la quebrada Los Ranchos y se extiende hasta las cercanías de Mesa de Aura, se reconoce su presencia también en las inmediaciones del Barrio La Guayana en San Cristóbal. Ocupa 1303,19 ha lo que equivale al 4,27% del área de trabajo.

Typic Troorthent

Es un Entisol, por tanto, son suelos jóvenes, presentan una escasa diferenciación de horizontes, en la mayoría de los casos se origina de materiales no consolidados, en algunas oportunidades presenta hidromorfismo lo que puede limitar el desarrollo de los horizontes, se asocian a depósitos de materiales aluviales. Según la USDA (1967) las propiedades de estos suelos están ampliamente determinadas por los materiales de partida, presentan un régimen de humedad údico y su amplitud térmica no es mayor de 5 °C al año. Dentro de la cuenca del Torbes, esta unidad cartográfica presenta tres clases por tamaño de partículas:

- Esquelético franco, con un volumen del más de 35% de elementos gruesos

- Limoso grueso, que se caracteriza por tener menos del 15% de arena fina, fragmentos de roca de hasta 7,5 cm de diámetro y menos de 18% de arcilla en la fracción tierra fina.
- Franco fino, suelos con más del 15% de arena fina y con más del 18% de arcilla en la fracción tierra fina.

Su distribución en la cuenca es dispersa, al Norte se identifica cerca de las cabeceras del río Torbes, en los alrededores del fundo Los Cedros, también se ha reportado su presencia desde las cabeceras de la quebrada La Auyamala y hasta el barracón Los Rosales, más al Suroeste; además, se encuentra en las inmediaciones de Las Vegas de Táriba y Arjona donde discurren las quebradas La Chivata y La Charaveca. Su extensión aproximada es de 1229,45 ha que corresponde con el 4,03% del área de estudio.

Typic Tropudalfs

Pertenece al orden de los Alfisoles, presentan un horizonte argílico, desarrollado en condiciones de acidez o de alcalinidad sódica, con un horizonte superficial en general, pobre en materia orgánica, un epipedón ócrico, tienen una elevada saturación de bases y su capacidad de intercambio catiónico es superior a 24 meq/100 g. de arcilla (USDA, 1967). En la cuenca, la unidad presenta una clase por tamaño de partícula: arcillosa fina.

Se reconoce su presencia al Suroeste de la cuenca, en la vertiente derecha, se extiende desde el Barrio Las Margaritas de Táriba hasta la desembocadura del Torbes en el Quinimarí, con una superficie aproximada de 1182,25 ha que equivale al 3,87% del total de la cuenca.

Oxic Distropepts

Es un Inceptisol, presenta una saturación de bases menor al 50%, con elevados contenidos de carbono orgánico que decrece con la profundidad, presenta en general un endopedón cámbico (USDA, 1967). En la cuenca la unidad tiene una clase por

tamaño de partículas: esquelético franca, es decir, un volumen de fragmentos de roca mayor al 35% y su fracción tierra fina es franca. Se ubica al Noreste, en la vertiente izquierda, entre la fila Barro Colorado y el cerro La Palmita en las cabeceras de las quebradas La Ficala y La Palmita, su extensión es de 957,29 ha que corresponde al 3,14% del total del área de estudio.

Ustoxic Tropohumults

Suelos del orden Ultisol, que presentan una baja capacidad de intercambio catiónico y bajos contenidos de bases, están asociados a alta acidez en el suelo, presentan altos contenidos de Caolinita, un régimen de humedad ústico y su régimen de temperatura es isomésico (USDA, 1967). En la cuenca, la unidad tiene una clase por tamaño de partícula: arcillosa fina y se reconoce su presencia al Norte en el nacimiento del río Torbes, en las inmediaciones del Zumbador cerca del fundo El Palmar, también se encuentra, en la cuenca media cerca de las poblaciones de Capachito y El Páramo en el Municipio Andrés Bello. Su extensión aproximada es de 949,83 ha que equivale al 3,10% del área total de la cuenca.

Typic Tropofluvents

Pertencen al orden de los Entisoles, son suelos en las primeras etapas de su evolución pedogenética, sus materiales parentales son de origen aluvial, en algunos casos el desarrollo pedogenético se ve impedido por deposiciones repetidas de sedimentos, pueden tener un régimen de temperatura isomésico, isotérmico o isohipertermico, su régimen de humedad es údico, no ácido (USDA, 1967). En la cuenca, esta unidad presenta una clase por tamaño de partículas: limosa fina; se ubica sobre el lecho del río y en su llanura de inundación a ambos márgenes. Se extiende desde las inmediaciones de la población de Táriba cerca del puente Libertador, hasta el barrio Sabaneta en la ciudad de San Cristóbal, en el sitio donde la quebrada La Ortiza desemboca en el Torbes. Su superficie aproximada es de 810,57 ha que corresponden al 2,66% del área de estudio.

Typic Hapludolls

Del orden Molisol, se caracteriza según la USDA (1967) por ser suelos negros o pardos, su cobertura vegetal característica son las gramíneas, presenta altos contenidos de materia orgánica, su fuerte estructura granular facilita el flujo del agua y del aire por el espacio poroso; tienen un epipedón mólico de más de 60 cm, su contenido de carbono orgánico disminuye con la profundidad. Particularmente en la cuenca, la unidad presenta una clase por tamaño textural: esquelético franco, por tanto, tienen un elevado volumen de material grueso. Se ubica en las inmediaciones de la desembocadura de la quebrada El Fical, entre las poblaciones El Fical y Lourdes, se extiende aproximadamente por 138,98 ha, es decir, un 0,46% de la superficie total de la cuenca.

Oxic Tropohumults

Su presencia en la cuenca es escasa, puesto que ocupan aproximadamente apenas 42,29 ha, lo que corresponde al 0,14% de la superficie. Esta unidad cartográfica, no fue encontrada dentro de la séptima aproximación de la USDA (1967) o posteriores. Se ubica en la cuenca en el sector El Pedregoso, cerca de la desembocadura de la quebrada La Revancha en el Torbes, en las inmediaciones de la aldea La Auyamala.

Altimetría de la cuenca y Modelo Digital de Elevación

El análisis de las características altimétricas de la cuenca, se efectuó sobre de un conjunto de datos e información, que se obtuvo a partir de un modelo digital de elevación (MDE). Es ampliamente reconocido, que la pendiente y la exposición son derivados a partir del MDE, y estos se consideran parámetros importantes para el modelado de procesos hidrológicos y erosivos, como los movimientos en masa. Asimismo, es necesario resaltar que para el área de estudio estaban disponibles tres fuentes diferentes de datos altitudinales: radar, termal emission and reflection radiometry (óptico) y curvas de nivel obtenidas por procedimientos fotogramétricos.

Dada la importancia de seleccionar el modelo que más se ajustara a la realidad, se desarrolló un proceso de evaluación de los MDE disponibles, para de esta forma, tener la mayor confiabilidad de la información, puesto que de ella se derivaría desde la

poligonal de la cuenca hidrográfica (divisoria), hasta la información morfológica y morfométrica básica para delimitar las geofomas, en especial en los niveles superiores del sistema de clasificación, información clave para realizar el análisis de susceptibilidad que se plantea en este trabajo.

Un MDE puede ser generado, mediante una interpolación partiendo de valores altitudinales obtenidos de diversas fuentes, esta interpolación puede realizarse utilizando múltiples métodos disponibles en función del origen de los datos y del software utilizado, un método muy común es la interpolación a partir de isoclinas obtenidas de cartas topográficas, que en Venezuela están disponibles principalmente a escala 1:25000, 1:100000 y 1:250000, elaboradas por la antigua Dirección de Cartografía Nacional, mediante procedimientos fotogramétricos tradicionales. Sin embargo, recientemente se ha popularizado la utilización de datos altitudinales, medidos directamente a partir de sensores activos como radar y lidar, o con el uso de sensores ópticos a bordo de plataformas espaciales como el thermal emission and reflection radiometry. Los datos obtenidos por estas fuentes son de libre consulta en el WebGIS del USGS.

De esta manera está disponible el Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de la NASA y la Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER-GDEM) misión conjunta de la JAXA (Agencia Espacial Japonesa) y de la NASA. La misión SRTM fue lanzada en febrero del año 2000, constaba de un sistema radar especialmente diseñado para adquirir datos de elevación topográfica estereoscópica, utilizando además de las antenas SAR, un software interferométrico (Farr, 2007). Esta misión produjo un MDE con una resolución de 1 arco-segundo (aproximadamente 90 m en el Ecuador) para casi todo el globo terráqueo, entre las latitudes 60 grados Norte y 56 grados Sur con un error de altitud vertical medio de 6,2 m, un nivel de confianza del 90% y un error de posicionamiento horizontal de 9 m para Suramérica. (Rodríguez, Morris, y Belz, 2006).

Asimismo, el modelo ASTER-GDEM, fue derivado a partir de un sistema de observación orbital, activado en 1999, cada escena ASTER muestra casi 4000 km²

(61,5 km. de ancho por 63 km. de largo). Estas imágenes capturan información en quince bandas del espectro electromagnético: las bandas RGB, una banda VNIR (Infrarrojo cercano) con una resolución de 15 metros, seis bandas SWIR (Infrarrojo de onda corta) con 30 metros de resolución, y cinco bandas térmicas (TIR) con una resolución espacial de 90 metros. (Oñate y Bosque, 2007).

Para obtener, estos MDE (SRTM y ASTER-GDEM) fue necesario acceder al catálogo en línea del WebGIS del USGS, disponible en la dirección electrónica: <http://earthexplorer.usgs.gov>, en donde a partir de un AOI (Area of Interest) en formato *.shp, previamente delimitada (inmediaciones de la cuenca del Torbes) usando el software ArcGIS 10.3 de ESRI, se descargó la escena correspondiente, con una resolución para el SRTM de 90,32 m por 90,32 m, y para el ASTER-GDEM de 31,275 m por 31,275 m. Dada la necesidad de efectuar una comparación entre los modelos mencionados con el MDE derivado de curvas topográficas, se decidió ajustar todos los modelos a una resolución espacial de 30 m por 30 m, para poder evaluarlos utilizando los mismos parámetros.

En el caso de los modelos obtenidos del USGS, se procedió entonces, a realizar un remuestreo de los pixeles para darle una resolución espacial de 30 m, utilizando para esto la herramienta *RESAMPLE* dentro del *ARCTOOLBOX* de ArcGIS 10.3 (*ARCTOOLBOX* > *DATA MANAGEMENT TOOLS*> *RASTER* > *RASTER PROCESSING* > *RESAMPLE*). Hecho el procedimiento y dado que los MDE (SRTM y ASTER-GEDM) descargados, utilizaban como sistema de referencia de coordenadas (SRC) el UTM 18N con datum *WGS 1984*, se procedió a reproyectarlo al SRC *SIRGAS-REGVEN UTM 18N*, sistema de coordenadas de referencia para Venezuela, utilizando la herramienta *PROJECT*.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, se utilizó también para la evaluación, un MDE derivado de curvas de nivel, obtenidas a partir de la vectorización en pantalla de cartas topográficas, a escala 1:25000, elaboradas por la antigua Dirección de Cartografía Nacional, hoy Instituto Geográfico Simón Bolívar, correspondiente a la misión 0101289 del año 1987. Dichas cartas fueron vectorizadas de forma separada,

siguiendo los mismos criterios generales, por los estudiantes de Pregrado del Quinto Año, de la Carrera de Educación, Mención: Geografía y Ciencias de la Tierra del año 2008, Universidad de los Andes “Dr. Pedro Rincón Gutiérrez”-Táchira. El trabajo fue realizado por equipos que procedieron a georreferenciar las cartas y posteriormente vectorizar en pantalla las curvas, utilizando el software MapInfo en su versión 7.5.

La información generada por cada equipo fue sometida a evaluación, se revisó la georreferenciación, y luego con un análisis visual de las curvas y la herramienta *DATA REVIEWER* 10 de ArcGis 10.3, se verificaron errores de geometría y topología que pudieran afectar la calidad. Una vez corregidos dichos errores, se procedió a la interpolación mediante la triangulación irregular conocida como TIN del área total, para luego generar el MDE, base para los procesos posteriores que se describen a continuación.

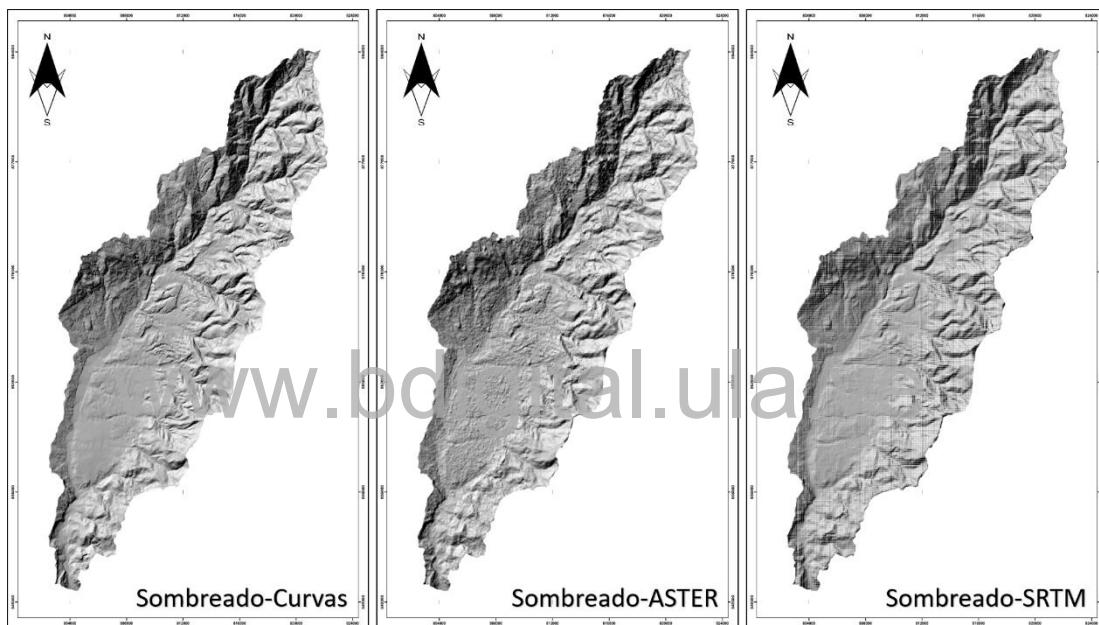
En primer lugar, se realizó una evaluación visual de cada modelo disponible (ASTER-GDEM, SRTM y MDE Curvas). Para esto se procedió a generar un mapa de sombreado utilizando la extensión *SPATIAL ANALYST* de ArcGIS 10.3, específicamente la herramienta *SURFACE* con su módulo *HILLSHADE*, que permite elaborar un mapa tridimensional que resalta los cambios altitudinales en el área de estudio. En este sentido y como se aprecia en la figura 12, es evidente que el mapa de sombreado generado utilizando el MDE Curvas, muestra continuidad visual, con pocas distorsiones en el comportamiento del relieve en el área, en cambio tanto el sombreado del ASTER-GDEM como el del SRTM, presentan algunas distorsiones en forma de retícula, siendo más visibles en este último; además muestran discontinuidades en el comportamiento del relieve.

A este respecto, es ampliamente reportado que los MDE, como el ASTER-GDEM, presentan discontinuidades visuales conocidas como torres y vacíos cuando se visualizan en 3D. Según Roa y Kamp (2008) las torres son errores asociados a superficies de alta reflectancia como nubes o áreas congeladas. Mientras que los vacíos se refieren a pérdida de datos debido a interacciones complejas que incluyen las características técnicas del sensor, la pendiente, la orientación, las formas del terreno y

los cuerpos de agua. En el caso del SRTM por el ángulo de la vista, ocurre una pérdida de datos que no se ha podido corregir en su totalidad. Por tanto y en función de lo anterior se puede aseverar que el modelo que permite una mejor visualización de la dinámica del relieve en la cuenca, es sin duda, el MDE que se obtuvo a partir de la vectorización de las curvas de nivel.

Figura N°: 12

Comparación entre Sombreados derivados del MDE



Fuente: Elaboración Propia

Un segundo análisis, fue efectuado a partir de puntos de control (cuarenta en total) seleccionados mediante un muestreo probabilístico por racimo o clústeres (Hernández et al. (2014), utilizando como referencia y criterio los valores de pendiente planteados por Ospina, Vilorio y Elizalde (2010). Posteriormente se realizaron cuatro visitas al campo, organizadas considerando principalmente la accesibilidad. Para ello se utilizó un vehículo rústico, con tracción en las cuatro ruedas, apropiado para la visita de las áreas con una topografía de difícil acceso.

Para determinar la ruta a seguir, y ubicar los puntos de control en el campo se usó un mosaico preparado usando SAS Planet 1511 que hace uso de la API de Google Earth, para obtener imágenes del satélite WorldView-3, con una resolución espacial de 0,31 m. Además, se empleó el software Garmin BaseCamp 4.6.2, en conjunto con los mapas de vialidad para Venezuela Venrut 15.12. Gracias a esto, fue posible determinar las mejores vías de acceso a los puntos de control seleccionados para efectuar las mediciones altitudinales. La primera visita al campo se efectuó en el mes de diciembre de 2015, la segunda en enero de 2016 y la tercera y cuarta en marzo del mismo año.

Para la medición del valor altitudinal en cada punto, se empleó un receptor GPS GARMIN modelo 78s, el cual cuenta con un sistema de cálculo de waypoint promediado que permite establecer un valor posicional y altitudinal, haciendo uso de cálculos estadísticos con una confiabilidad por encima del 95%, con un margen de error que según el fabricante es de aproximadamente un metro horizontal y de dos metros verticales. (GARMIN, 2013). Una vez capturados todos los datos posicionales y altitudinales, se transfirió la información empleando nuevamente el software BaseCamp 4.6.2, que permite conectar la computadora con el receptor GPS, mediante un cable USB, para descargar eficientemente la data recolectada.

Una vez completado el paso anterior, se empleó la herramienta *CONVERT* de la mencionada aplicación (BaseCamp 4.6.2), para guardar los datos en un archivo de texto separado por coma (*.csv). Ello permitió limpiar la información obtenida eliminando datos innecesarios, y guardar en una tabla Excel (*.xlsx), los datos de fecha, latitud, longitud y altitud para cada punto de control, finalmente se guardó una copia de estos datos en formato *.csv, el cual también puede ser desplegado en ambiente SIG.

Cabe señalar, que para una mayor precisión de la información recolectada en el campo y según la recomendación de Fallas (2007), el SRC utilizado en el receptor GPS fue de coordenadas geográficas, específicamente el datum WGS 1984, en este sentido, y para mantener la confiabilidad en el tratamiento de la información, se cargó el archivo *.csv mencionado anteriormente, con el software QGIS 2.16, lo que permitió construir un mapa de puntos, que posteriormente se guardó en formato vectorial *.shp,

asignándole en este paso, un nuevo SRC, en este caso SIRGAS-REGVEN UTM 18N, dado que los MDE, se encontraban en este datum.

Seguidamente, para calcular los valores altitudinales que estima cada modelo en los puntos de control, se abrió el mapa de puntos creado anteriormente, junto con los archivos ráster de cada modelo digital de elevación en ArcGIS 10.3, y utilizando la extensión *3D ANALYST TOOLS*, y su herramienta *FUNCTIONAL SHAPE > INTERPOLATE SHAPE*, se intersectó el mapa de puntos de la salida de campo con cada modelo, generando tres archivos vectoriales, que contenían en sus respectivas tablas de atributos los valores altitudinales por modelo y para cada punto de control.

Posteriormente, se efectuó un geoprocésos vectorial, en el que se logró unificar en una misma capa, los datos de cada punto. Esto se consiguió mediante la herramienta *GEOPROCESSING > BATCH INTERSECT*, que permitió intersectar las tres capas al mismo tiempo, para luego exportar la tabla de atributos del archivo *.shp, a una tabla de base de datos (*.dbf), que podía ser abierta usando Excel 2016, almacenada en formato *.xlsx lo que facilitó su manejo y análisis.

A continuación, se calculó el error medio cuadrático (EMC), haciendo uso de las funciones y fórmulas que Excel 2016, dispone para ello (Ver Figura N°: 13). Se estimó para cada punto la diferencia aritmética entre el valor obtenido en el campo y el valor estimado por el modelo, este resultado se elevó al cuadrado, posteriormente se hizo una sumatoria de los cuadrados de cada punto y este valor se dividió entre el número de puntos de control, la raíz cuadrada de este resultado permitió obtener el EMC para cada modelo (Ver Cuadro N°: 13).

A partir de los resultados obtenidos en los dos procesos de evaluación de los modelos digitales de elevación (visual y EMC), se pudo determinar que para el caso de la cuenca del río Torbes, el modelo que produjo la menor inconsistencia visual y el menor error entre el valor estimado en el modelo y el medido en el campo, fue el MDE generado a partir de la vectorización de las curvas de nivel.

Figura N°: 13

Captura de pantalla con fórmulas y datos para obtener EMC

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
pto	lat	long	altitud	date	salida	AltitudSRTM	AltitudASTER	AltitudDEMCurvas	SumatoriaSRTM	SumatoriaAster	SumatoriaCurvas	CuadradoSRTM	CuadradoAster	CuadradoCurvas	
1	7.939977196	-72.081577	3015.71069	11/12/2015	1	3046.00000	2992.00000	3009.13208	-30.28931	23.71069	6.57861	917.44212	562.19696	43.2781480	
2	7.92003003	-72.080027	3079.37693	11/12/2015	1	2912.00000	2929.00000	2911.88916	163.21695	150.37693	147.48779	36366.24807	22613.22799	21751.6400860	
3	7.938891104	-72.080293	3106.5376	11/12/2015	1	3082.00000	3073.00000	3080.00000	34.53760	33.53760	36.53760	602.09372	1124.77048	704.2441076	
4	7.924878102	-72.080461	3203.78247	11/12/2015	1	3184.00000	3177.00000	3180.00000	19.78247	26.78247	23.78247	391.34616	717.30075	565.6059269	
5	7.924878102	-72.079072	3358.38672	11/12/2015	1	3347.00000	3344.00000	3320.00000	11.38672	14.38672	38.38672	129.65737	206.97768	1473.5401956	
6	7.97449197	-72.08693	2567.95044	11/12/2015	1	2567.00000	2554.00000	2556.06030	0.95044	13.95044	11.89014	0.90333	194.61475	141.3754054	
7	7.94533623	-72.102039	2282.23983	11/12/2015	1	2281.00000	2278.00000	2287.71948	1.23983	4.23983	-5.47965	1.53717	17.97613	30.0269970	
8	7.92855395	-72.100178	2548.66867	11/12/2015	1	2566.00000	2548.00000	2577.78813	2.66867	20.66867	-9.11746	7.12177	427.19371	83.1281680	
9	7.960505	-72.109203	2228.95239	27/1/2016	2	2203.00000	2216.00000	2226.59277	25.95239	12.95239	2.35962	673.52670	167.16448	5.5678207	
10	7.93699998	-72.1254	1810.07385	27/1/2016	2	1777.00000	1811.00000	1779.96352	33.07385	-0.92615	80.11133	1093.87975	0.85775	906.6923750	
11	7.934475	-72.121839	1884.18469	27/1/2016	2	1882.00000	1872.00000	1851.85754	2.18469	12.18469	32.32715	4.77288	148.46672	1045.0447564	
12	7.92505802	-72.12098	1870.73633	27/1/2016	2	1870.00000	1870.00000	1858.43420	0.73633	0.73633	12.30213	0.54218	151.3423533		
13	7.92417297	-72.122955	1829.8457	27/1/2016	2	1837.00000	1819.00000	1826.40576	-7.15430	10.84570	4.39994	51.18997	117.62927	11.8320278	
14	7.93588296	-72.125508	1690.5863	27/1/2016	2	1723.00000	1708.00000	1700.00000	-92.41370	-17.41370	1050.64769	303.33681	88.6176724	88.6176724	
15	7.855609	-72.143874	1876.12317	27/1/2016	2	1882.00000	1887.00000	1855.63442	-5.87683	-10.87683	20.46875	34.53714	118.90545	418.9696858	
16	7.97647697	-72.111739	2774.74023	27/1/2016	2	2710.00000	2764.00000	2755.27254	64.74023	10.74023	19.01269	4191.29790	115.35263	361.4825331	
17	7.969235	-72.102152	2315.81934	27/1/2016	2	2352.00000	2310.00000	2320.91577	-36.18066	5.81934	-5.09643	1309.04045	33.86467	25.9736395	
18	7.89901011	-72.124393	1847.84204	27/1/2016	2	1863.00000	1908.00000	1899.21289	-15.15796	-60.15796	-51.37085	229.76372	3618.98003	2638.9641270	
19	7.86837025	-72.160391	1355.6689	27/1/2016	2	1349.00000	1423.00000	1340.00000	6.66890	-67.33111	15.66890	44.47416	4533.47770	245.5142705	
20	7.9229403	-72.20038	1050.85034	20/2/2016	3	1043.00000	1047.00000	1044.84302	7.85034	3.85034	6.00734	61.42787	14.82513	36.0879116	
21	7.89141418	-72.243382	660.630315	20/2/2016	3	650.00000	658.00000	664.59294	10.63031	2.63031	-3.56063	113.90359	6.91855	15.6865544	
22	7.70728007	-72.216355	1290.92159	20/2/2016	3	1285.00000	1291.00000	1296.76477	5.92159	-0.07841	-5.84318	95.06523	0.00615	34.1427525	
23	7.74243523	-72.223963	792.105082	20/2/2016	3	792.00000	801.00000	785.31523	0.10508	-8.89491	8.78983	0.01104	79.11956	17.2611813	
24	7.77721123	-72.225536	851.789286	20/2/2016	3	860.00000	860.00000	841.36786	-6.21071	12.42143	38.57296	38.57296	154.2918319		
25	7.93954612	-72.18657	1226.79521	20/2/2016	3	1230.00000	1227.00000	1223.38562	-3.20479	-0.20479	3.40959	10.27070	0.04194	11.6252853	
26	7.9917041	-72.17833	1279.86262	20/2/2016	3	1284.00000	1276.00000	1279.94785	-4.31786	3.68262	0.62477	18.83980	13.56167	0.4029291	
27	7.83100195	-72.22829	977.836507	20/2/2016	3	970.00000	986.00000	977.59292	7.83651	-8.16349	0.32699	65.81084	66.64262	0.1069206	
28	7.81939769	-72.238158	980.114421	20/2/2016	3	979.00000	983.00000	980.00000	1.11442	-2.88558	0.11442	1.24193	8.32657	0.0130922	
29	7.83699127	-72.245586	1238.11254	20/2/2016	3	1230.00000	1245.00000	1240.00000	8.11254	-6.88746	-1.88746	65.81337	47.43705	3.5624902	
30	7.950323	-72.133939	2372.52237	16/4/2016	4	2349.00000	2369.00000	2380.00000	23.52236	3.52236	-7.47764	553.30166	12.40706	55.9150252	
31	7.93699684	-72.127487	1826.98779	16/4/2016	4	1804.00000	1820.00000	1804.24963	22.98779	6.98779	22.73816	528.43863	48.82925	517.0240566	
32	7.89722851	-72.190071	167.31755	16/4/2016	4	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000000	
33	7.83100195	-72.22829	977.836507	20/2/2016	3	970.00000	986.00000	977.59292	7.83651	-8.16349	0.32699	65.81084	66.64262	0.1069206	
34	7.82494851	-72.203723	935.178284	16/4/2016	4	936.00000	934.00000	935.53485	-0.82172	1.17828	-0.35657	0.67522	1.38835	0.1271398	
35	7.8250681	-72.193033	1070.32336	16/4/2016	4	1080.00000	1071.00000	1060.00000	-9.67664	-0.67664	10.32336	83.97228	0.45784	106.5718443	
36	7.85013319	-72.224249	1272.09204	16/4/2016	4	1251.00000	1278.00000	1278.27612	21.09204	-5.90796	-6.18408	444.87419	34.90398	38.2428331	
37	7.85842241	-72.223794	1416.77633	16/4/2016	4	1449.00000	1420.00000	1425.35608	-32.22367	-3.22367	-8.57975	1038.36517	10.39207	73.6121787	
38	7.86074955	-72.228455	1565.18112	16/4/2016	4	1587.00000	1547.00000	1555.54533	-23.81888	16.18112	7.85779	567.35919	261.82855	58.3357963	
39	7.9417382	-72.20157	1051.49941	5/11/2015	PG-UNET	1035.00000	1054.00000	1029.49694	16.49941	-2.51059	18.99307	271.90068	6.30096	360.737460	
40	7.78685691	-72.209133	986.888441	5/11/2015	PG-Redoma	987.00000	993.00000	983.73883	-0.01156	-6.01156	3.24961	0.00013	36.13884	10.5599730	
41												Sumatoria	41126.28754	35746.26543	32274.1227271
42												Division	1028.15719	893.65664	806.85307
43												EMC	32.06489	29.89409	28.40516
44												SRTM			
45												ASTER			
												DEM Curvas			

Fuente: Elaboración Propia

Cuadro N°: 13

Valores del Error Medio Cuadrático (EMC) para cada MDE

Modelo	EMC
SRTM	32,06489
Aster GDEM	29,89409
MDE Curvas	28,40516

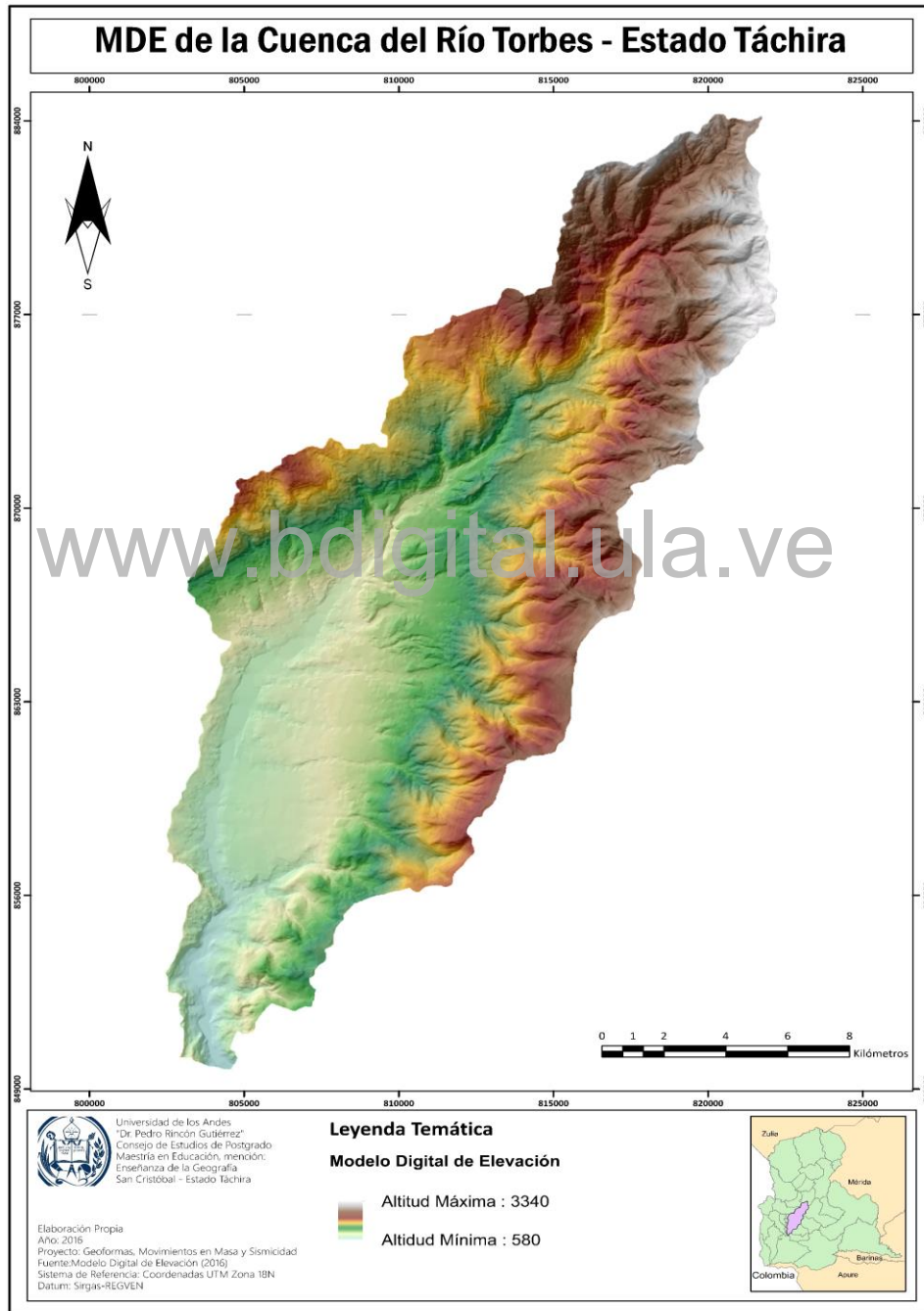
Fuente: Elaboración Propia

A partir, del MDE derivado de la vectorización de las curvas (Ver Figura N° 14), es posible describir el comportamiento altitudinal en la cuenca, donde las mayores altitudes se encuentran en la margen derecha del río Torbes, sobre la Serranía de La Maravilla, siendo el Pico Colorado ubicado al Noreste de la con 3340 msnm el punto más alto de la cuenca. Cabe señalar que desde el Páramo el Zumbador y siguiendo

hacia el Sureste la divisoria de aguas del río, se encuentran el Páramo Portachuelo con 2800 msnm, el Cerro La Palmita con 2620 msnm, Loma de Buey con 2500 msnm.

Figura N° 14

Modelo Digital de Elevación de la cuenca del río Torbes



Fuente: Elaboración Propia

Al Oeste las altitudes promedias en la cuenca se ubican entre los 890 msnm, en las cercanías del barrio El río en San Cristóbal y los 1100 cerca del sector La Cueva del Oso. Hacia el Noroeste, las elevaciones más prominentes son el Cerro Almorzadero con 2740 msnm, Cerro Loma de Piedra con 2340 msnm, Cerro La Mantellina con 1900 msnm. En el Sur de la cuenca la Fila El Silencio con 980 msnm, la Fila La Tinta con 860 msnm y el Cerro Gritón también con 860 msnm, son las elevaciones máximas hasta llegar a las inmediaciones del Sector Santa Teresa, en la desembocadura del río Torbes en el río Quinimarí, punto con la menor altitud de la cuenca, con 580 msnm.

Delimitación de la Poligonal

Un producto, que se deriva del MDE seleccionado, es la delimitación de la poligonal (divisoria de aguas) de la cuenca hidrográfica del río Torbes, en este sentido, se siguió el procedimiento establecido en el Manual de Herramientas de Hidrología de ArcGIS (ESRI, 2015). El primer paso, una vez cargado el MDE, es utilizar la extensión *SPATIAL ANALYST TOOLS* y la herramienta *HIDROLOGY > FILL*, con la cual se crea un archivo ráster donde se eliminan las distorsiones (huecos y sumideros), posteriormente se establece la dirección del flujo hidrológico de la pendiente, con la secuencia *SPATIAL ANALYST TOOLS > HIDROLOGY > FLOW DIRECTION*, sobre el ráster *FILL* creado en el paso anterior.

Luego, es necesario determinar la acumulación probable del flujo hídrico en las celdas, descendiendo de acuerdo con el gradiente de la pendiente, lo que se logra aplicando al ráster *FILL* creado en el primer paso, la herramienta *SPATIAL ANALYST TOOLS > HIDROLOGY > FLOW ACCUMULATION*. Esto genera un archivo ráster que junto a un condicional incorporado con la herramienta *SPATIAL ANALYST TOOLS > CONDITIONAL > CON*, permite construir la red de drenaje de la cuenca. Es importante señalar que según el manual de hidrología de ArcGIS (ESRI, 2015), se requiere modificar el valor de la condición de acumulación de flujo hasta conseguir el producto deseado, es decir, el valor de pixeles que se acumulan en otro pixel para formar el flujo hídrico. El valor condicional puede ser modificado desde un valor máximo de referencia de 400, en forma decreciente, hasta conseguir la red hídrica.

Cabe señalar que en el caso de la cuenca del Torbes, el valor de acumulación después de una serie de pruebas fue 150.

Una vez generado el ráster de la red hídrica, se convierte en un archivo vectorial, empleando la herramienta *SPATIAL ANALYST TOOLS > HIDROLOGY > STREAM TO FEATURE*, con lo que se obtiene un archivo en formato *.shp de la red de drenaje. Para continuar con la delimitación es necesario identificar el punto de desfogue (exutorio) de la cuenca, es decir, el punto donde el curso de agua principal desemboca en otro de mayor nivel jerárquico, en este caso, el sitio donde el río Torbes desemboca en el río Quinimarí; para esto se crea un archivo vectorial *.shp con una representación geométrica puntual de la desembocadura, ubicada a partir de la capa temática de la red hídrica generada anteriormente.

El siguiente paso, es el de intersectar el punto de desfogue con el MDE, puesto que es necesario estimar el valor altitudinal del punto exutorio; para esto se emplea la herramienta *3D ANALYST TOOLS > FUNCTIONAL SHAPE > INTERPOLATE SHAPE*, luego se utiliza la herramienta *SPATIAL ANALYST TOOLS > HIDROLOGY > WATERSHEED*, que a partir del ráster creado con *FILL* y con el punto de desfogue intersectado, permite delimitar la cuenca en formato ráster. Finalmente, para concluir este proceso, se convierte el ráster a *.shp, con la herramienta *CONVERSION TOOLS > FROM RASTER > RASTER TO POLYGON*.

Es importante destacar, lo planteado por Burns (2013) y Castillo (2015), sobre la necesidad de realizar una verificación visual de las divisorias de aguas en las cuencas delimitadas automáticamente en ambiente SIG. En este sentido, se cumplió con una primera revisión de la divisoria de aguas de la cuenca, considerando las curvas de nivel vectorizadas para generar el MDE, ello permitió efectuar un conjunto de correcciones menores en los límites de la cuenca, particularmente, al Este en la Serranía de la Maravilla y al oeste, en las cercanías de Palmira, sobre la Serranía de Capacho. Sitio donde por acción de la traza principal de la falla de Capacho, se formó un ensillamiento (Chacón y Pernía, 2010), que altera la dirección de la divisoria de aguas de la cuenca, hacia el Sureste.

Un segundo proceso de revisión, se efectuó en la desembocadura del río, puesto se tenían dudas sobre la dirección que asumía el límite en su descenso por el cerro El Gritón, fila el Silencio hacia el Sureste y en su ascenso por el sector Campo Alegre, en sentido Noreste hasta la Serranía de la Maravilla. Para esto se emplearon fotografías áreas del área, disponibles en la Mapoteca de la Sala de Geografía de la Universidad de los Andes “Dr. Pedro Rincón Gutiérrez”, Núcleo Táchira. Cabe señalar que estas fotografías son de la misión 010480 del año 1989, en sus escenas 12, 13, 14, 15, 16 y 98, 99, 100, 101 y 102, que cubren el área de interés.

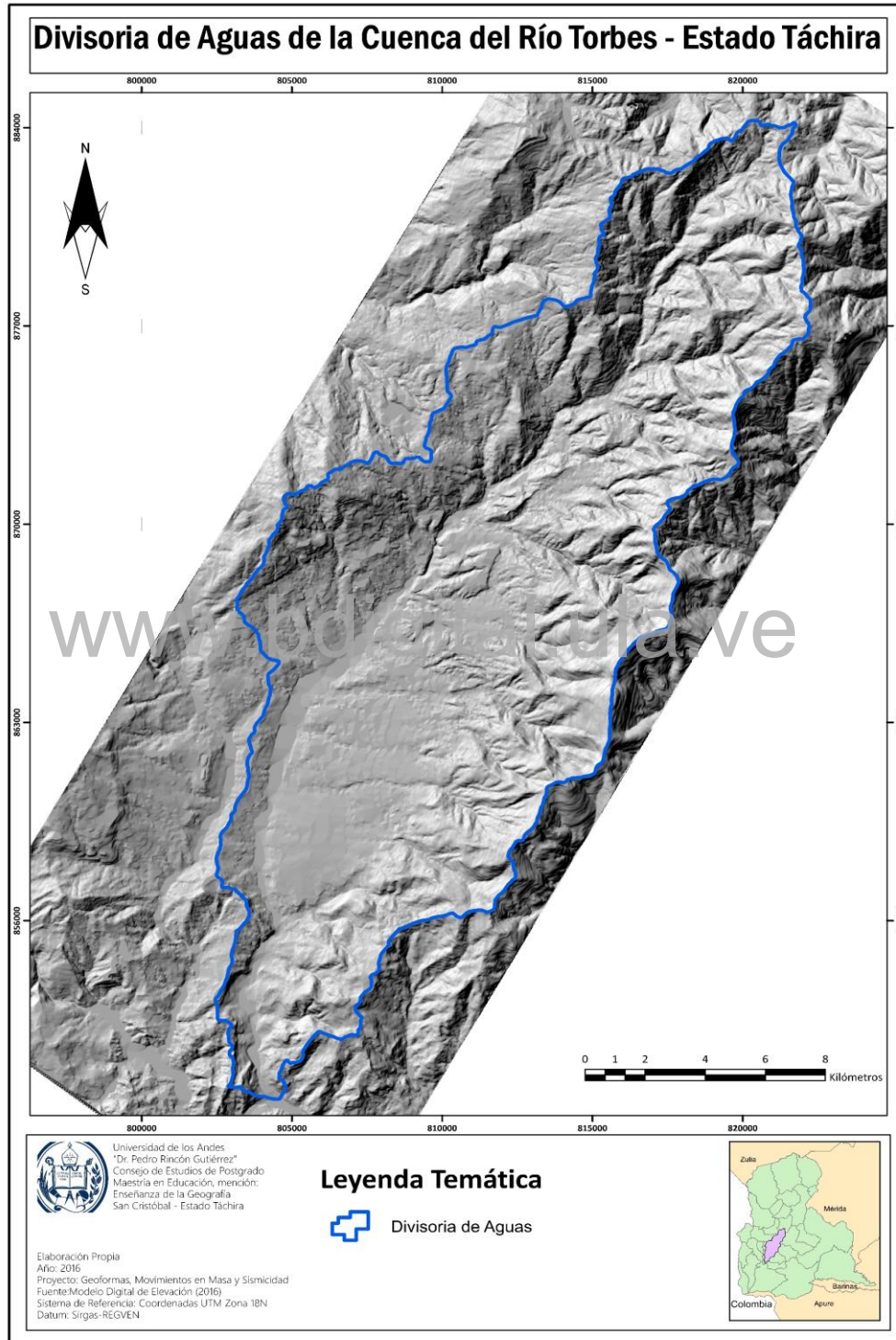
Este procedimiento se desarrolló con un par estereoscópico, que permitió la ubicación de los límites de la divisoria de aguas en las fotografías de la desembocadura, y contrastarlos con el mapa de curvas de nivel y el sombreado obtenido del MDE (Ver Figura N°: 15). Es necesario resaltar, que no se efectuó un trabajo de campo exhaustivo en esta delimitación.

Pendiente

Un segundo producto que se puede derivar del MDE, es el mapa de pendiente, este se obtiene utilizando la secuencia de comandos *SPATIAL ANALYST > SURFACE > SLOPE*, con la cual, se crea un archivo ráster (*.vat) que muestra la información de la pendiente, en este paso, se puede modificar para que muestre los valores en porcentaje (%). Una vez hecho esto, se efectúa una reclasificación del ráster, empleando la herramienta *SPATIAL ANALYST > RECLASSIFICATION > RECLASS*, que permite establecer etiquetas según los intervalos de pendiente deseados. Al respecto, se utilizaron los rangos de pendiente sugeridos por Zinck (2012) manteniendo las últimas clases propuestas por la FAO (2009), puesto que en este trabajo se utilizó el sistema de clasificación de las geoformas propuesto por este autor, luego se asignaron los rangos, y a cada uno de ellos el software le asigna un *VALUE*, que funciona como un identificador. (Ver Figura N°: 16).

Figura N°: 15

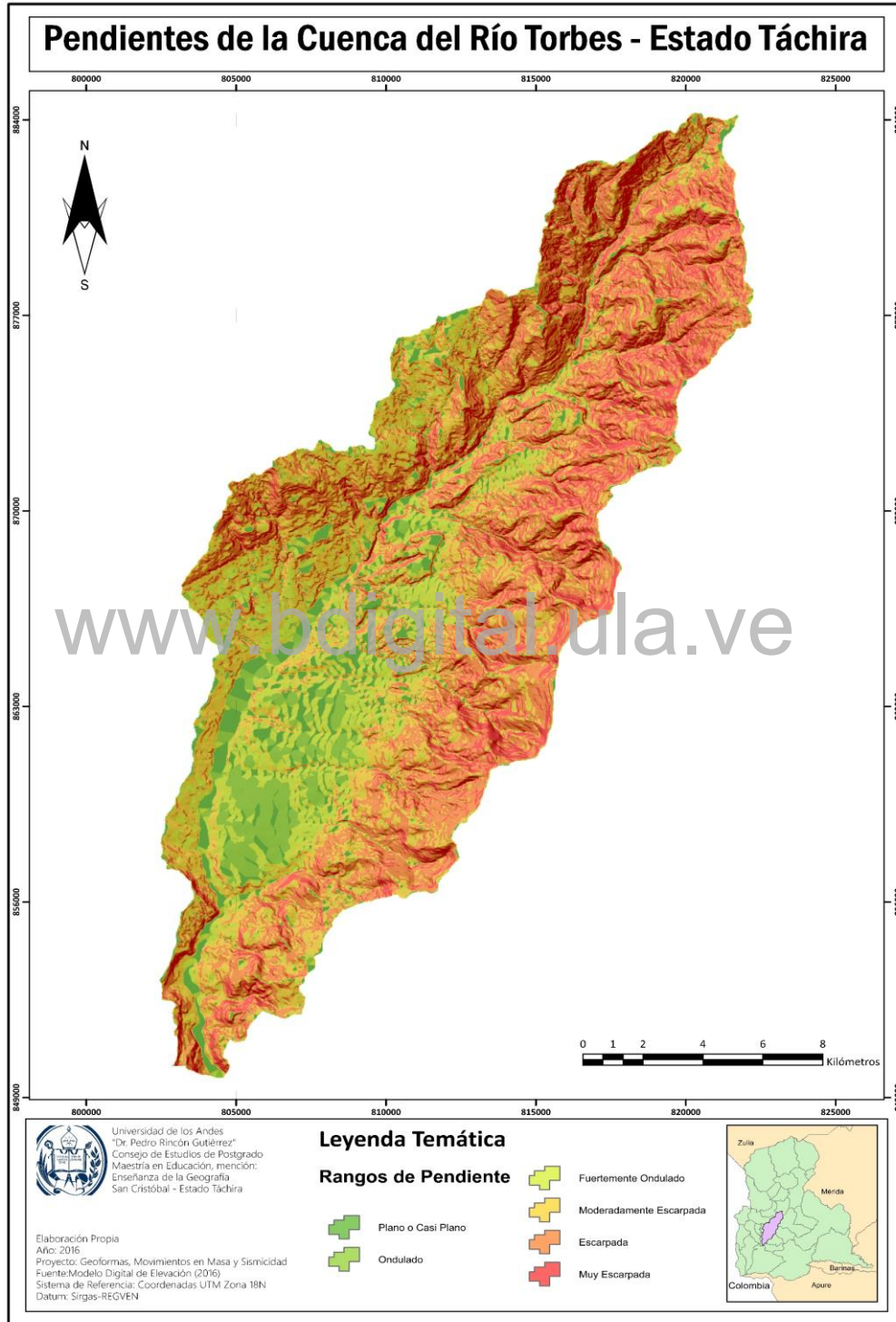
Poligonal de la Divisoria de Aguas de la cuenca del río Torbes



Fuente: Elaboración Propia

Figura N°: 16

Mapa de Pendiente de la cuenca del río Torbes



Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, siguiendo los planteamientos de López (2012) sobre la unidad mínima cartografiable (UMC), se procedió a realizar una generalización cartográfica que permitiera visualizar apropiadamente el comportamiento de la pendiente. Inicialmente, se convirtió el archivo ráster reclasificado en formato virtualraster (*.ovr) con valores de pendiente, a formato vectorial (*.shp), luego en la tabla de atributos se creó un nuevo campo denominado *SUPERFICIE*, y con la herramienta *CALCULATE GEOMETRY*, se calculó el área de cada rango de pendiente, después, se hizo una consulta espacial por atributos y se seleccionaron aquellos polígonos con una superficie menor o igual a 2,5 ha, luego se empleó la extensión *DATA MANAGEMENT TOOLS > GENERALIZATION > ELIMINATE POLYGON PART*, en un conjunto de pasos sucesivos, para eliminar los polígonos que cumplan con las condiciones descritas, en el caso particular del presente trabajo, este procedimiento se cumplió en tres ocasiones.

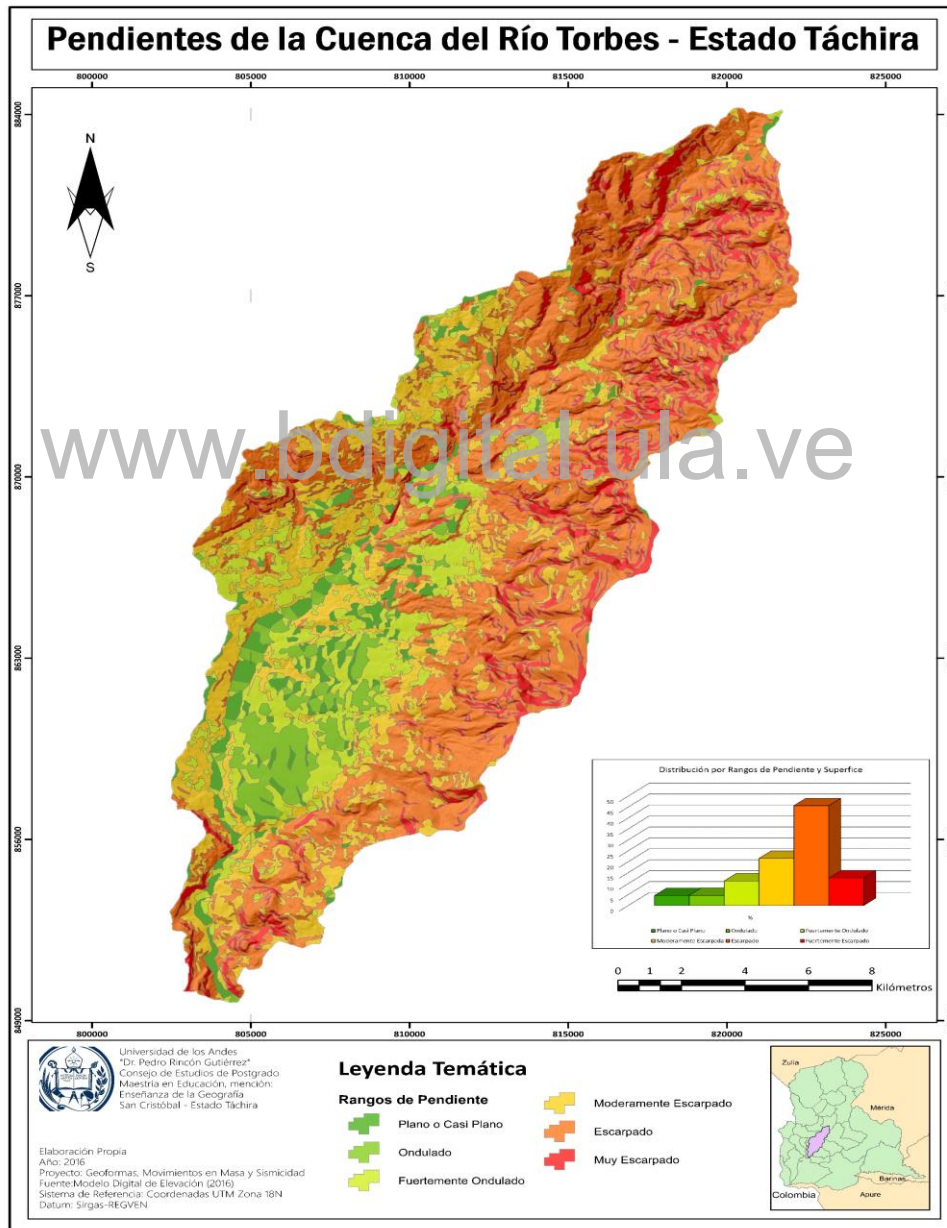
Finalmente, se obtuvo el mapa de pendientes de la cuenca del Torbes (Ver Figura N°: 17), donde se puede apreciar que, al Este, en la Serranía de la Maravilla y al oeste en la Serranía de Capacho, la cuenca presenta una clase de pendiente considerada escarpada, con valores entre 30% y 60% que ocupan el 45,6% del área de estudio, igualmente en esta misma sección hay una presencia marcada de la clase muy escarpada, que ocupa un 12,6% de la superficie. Por tanto, se evidencia que la mayor parte de la cuenca tiene una energía potencial de relieve muy alta (Zinck, 2012), esto permite inferir que puede ser afectada por procesos morfogenéticos, asociados a la pendiente.

Igualmente se aprecia que, desde la base de la Serranía de la Maravilla, en las inmediaciones de Cordero y hasta el extremo occidental de la cuenca, predominan pendientes más suaves que las descritas en el párrafo anterior. La clase de relieve moderadamente escarpada (entre 16% y 30%) ocupa un 21,5% de la superficie, se presenta en el área transicional entre las pendientes más altas al Este y las presentes en los alrededores del cauce principal del río Torbes, donde se emplazan varios de los centros poblados más importantes de la cuenca. Esta área alledaña al cauce principal, que se vincula a los aportes transversales de los cursos de agua que drenan al río Torbes,

y en menor proporción a aportes longitudinales de este mismo cuerpo de agua; presenta clases de pendientes entre fuertemente ondulada (8%-16%) con una superficie del 11,2% del total, y pendientes onduladas (2%-8%) y planas o casi planas (0%-2%), que ocupan el 4,6% y el 4,5% del área total de la cuenca respectivamente.

Figura N°: 17

Distribución por Rango y Superficie de la Pendiente en la cuenca del río Torbes



Fuente: Elaboración Propia

Esta distribución de las clases de pendiente, se puede asociar a las características propias de los ambientes de montaña, los cuáles habitualmente en su cuenca alta presentan un gran potencial de separación y transporte de materiales; Asimismo, presentan un área donde se propicia la deposición de sedimentos que pueden ser transversales (conos y abanicos aluviales) o longitudinales como las terrazas. La cuenca del Torbes se encuentra en un área de transición entre la Cordillera de Mérida y la Depresión del Táchira, cabe señalar que Freile (1962) precisa que la Serranía de la Maravilla es el límite entre estas dos grandes unidades geomorfológicas. Esta es en parte la explicación de la distribución de las clases de pendiente antes descritas.

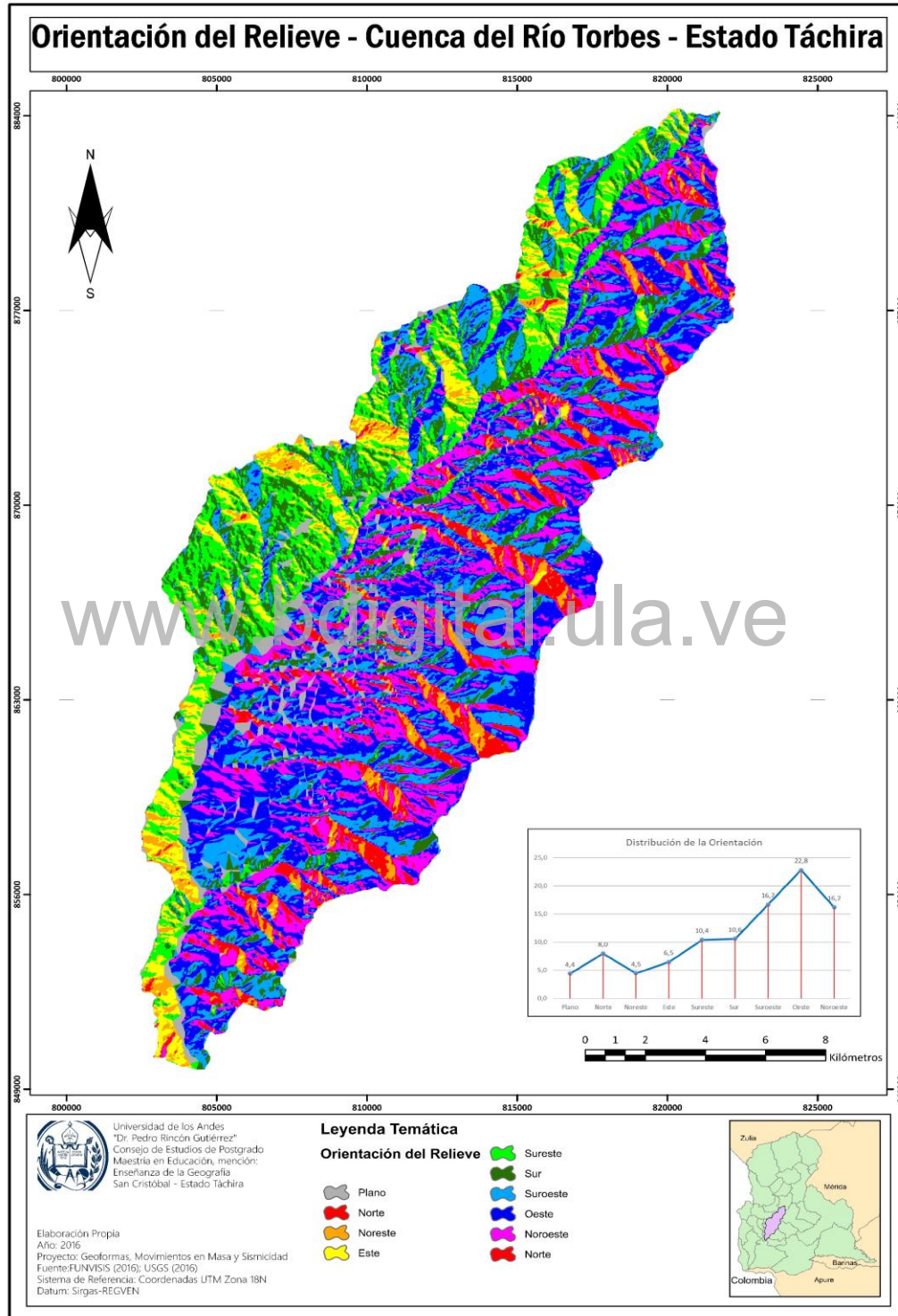
Orientación

El tercer producto derivado del MDE es la orientación del relieve, que se genera en grados y en un ráster (*.ovr) utilizando para ello la secuencia *SPATIAL ANALYST > SURFACE > ASPECT*. Seguidamente, se efectuó una reclasificación para mostrar la información en diez (10) clases de orientación. Esta reclasificación, se hizo considerando las categorías establecidas por Kathryn Keranen (2016), en base a información azimutal; a continuación, y empleando los comandos *SPATIAL ANALYST > ZONAL > ZONAL GEOMETRY AS TABLE*, se calcularon los valores de superficie en hectáreas (ha) para cada una de las clases establecidas.

Con el procedimiento anterior, se obtuvo el mapa de orientación del relieve para la cuenca del Torbes (Ver Figura N°: 18), en el que se aprecia que el 55,7% de la cuenca tiene relieves con una orientación predominante al oeste, al Noroeste y al Suroeste. El cauce del río Torbes, separa y sirve de límite físico con las orientaciones al Este, Noreste y Sureste que ocupan el 39,3%. Esta distribución, tiene su origen en la dirección del eje de la Serranía de la Maravilla SO-NE que es oblicuo respecto al eje principal de la Cordillera de Mérida, por ello sus vertientes tienen orientaciones contrastantes que influyen en el número de horas/luz que reciba la superficie y que sustenta conceptos como el de solana y umbría.

Figura N°: 18

Mapa de Orientación del Relieve – cuenca del río Torbes



Fuente: Elaboración Propia

Estas condiciones, influyen en algunas particularidades relacionadas con las variables climáticas locales de la cuenca, así como en las coberturas, puesto que, al tener una orientación predominante al oeste o noroeste en el hemisferio norte, se infiere, que se encuentra en el área de umbría, lo que influye en el aumento de la humedad y el contenido de materia orgánica en los suelos y la disminución del número de horas luz, temperatura superficial y evapotranspiración, entre otros; que inciden directamente en las características de la vegetación y en el uso de la tierra. Este planteamiento es una simplificación debido a que el número de horas luz se encuentra también determinado por la posición de la superficie respecto a relieves de mayor altitud, la humedad del aire y nubosidad, por mencionar algunos elementos importantes.

En el caso de la vertiente derecha de la cuenca, sección que en parte corresponde a la Serranía de Capacho, se aprecia el fenómeno contrario, ya que se evidencia, que las condiciones son relativamente más cálidas, puesto que las superficies reciben un mayor número de horas de luz, lo que aumenta la temperatura superficial y favorece la evapotranspiración, hecho que se refleja en la cobertura vegetal y en las formas de vida dominantes.

Sistema de Drenaje

La distribución superficial de los cursos de agua presentes en la cuenca del río Torbes, fue generada a partir del MDE. Dentro del proceso de delimitación automática de la cuenca, se crean un conjunto de archivos ráster que permiten a la extensión *SPATIAL ANALYST*, establecer la red de drenaje. En este marco de ideas, se procesó el ráster *FLOW ACCUMULATION*, previamente elaborado, con la herramienta *SPATIAL ANALYST > HIDROLOGY > STREAM LINK*, que genera un ráster (*.ovr), el cual al ser sometido a la secuencia *SPATIAL ANALYST > HIDROLOGY > STREAM ORDER*, define el orden del cauce de la red hídrica.

El ráster (*.ovr) obtenido con los cursos de agua, se convierte a polilíneas con los comandos *CONVERSION TOOLS > FROM RASTER > TO POLYLINES* y luego se

suavizan los trazos usando *CARTOGRAPHY TOOLS > GENERALIZATION > SMOOTH LINE*. Cabe mencionar que si bien la capa temática derivada, representa la red de drenaje de la cuenca considerando las variaciones que se identifican en el MDE, la misma presenta algunas inconsistencias que deben ser verificadas en campo o con el apoyo de otros sensores remotos. Por ejemplo, no se reconoce, el carácter permanente o intermitente de los cursos de agua.

La forma del sistema hídrico de la cuenca corresponde a la distribución o arreglo geométrico de los tributarios, y para su caracterización se utilizaron los criterios sugeridos por Alcántara (2005) y Zinck (2012). Es importante señalar que la red de drenaje de la cuenca del río Torbes, tiene una configuración o patrón de drenaje dendrítico, es decir, la corriente principal fluye en el centro de la red y los tributarios drenan hacia ella formando diversos ángulos agudos, pero sin llegar nunca a ser rectos. (Ver Figura N°: 19). En este sentido, Alcántara (2005) indica que esta configuración se asocia con frecuencia a la acción de eventos tectónicos, lo que se corresponde a la génesis estructural de la cuenca, principalmente hacia el este en la Serranía de la Maravilla y al noreste en las inmediaciones de la Serranía de Capacho.

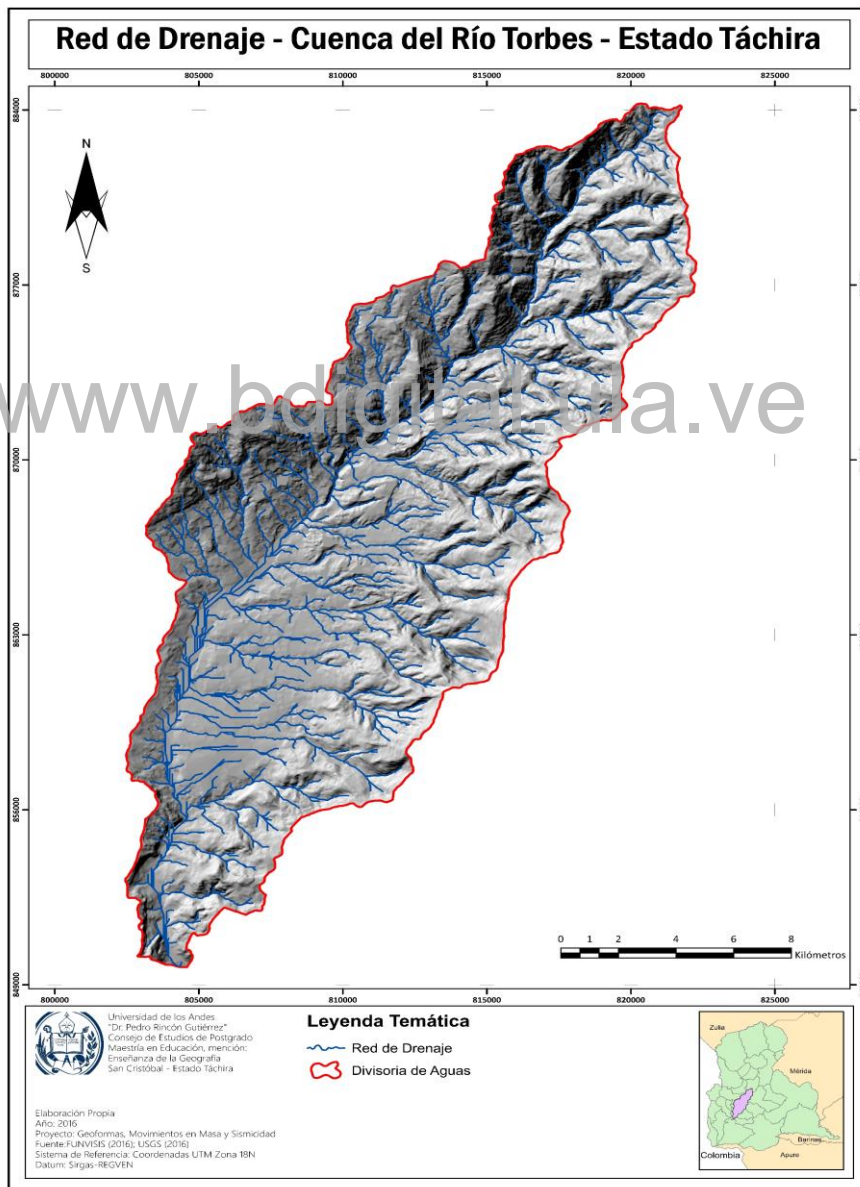
Asimismo, según Alcántara (2005) en muchas ocasiones un patrón dendrítico se presenta, cuando los materiales sobre los que fluyen los cursos de agua, son de origen sedimentario, afirmación que coincide con el marco geológico de la cuenca del Torbes donde afloran de manera predominante litotipos sedimentarios (areniscas, lutitas, entre otros). Los cursos de agua han cumplido dos funciones: la primera, la separación y transporte de materiales desde las áreas montañosas al Este y Noreste, que se han ido depositando en forma longitudinal y transversal, a las márgenes de dichos cauces; la segunda, la disección y entalle de tales depósitos, lo que ha coadyuvado a profundizar el comportamiento dendrítico de la red de drenaje.

En lo que respecta al grado de integración, se evidencia que en la red de drenaje de la cuenca del Torbes, los cursos de agua se unen entre sí de una forma continua, por tanto, tienen un alto grado de integración. Al analizar el grado de uniformidad, se aprecia claramente que la conexión de los cursos de agua es uniforme, es decir, todas

las microcuencas presentes tienen un patrón de drenaje dendrítico al igual que el sistema principal. En cuanto a la angularidad de la red de drenaje, se puede establecer que es alta, puesto que se aprecia que los cambios en el rumbo de los flujos de agua, son resultado de la presencia de materiales heterogéneos, así como de la acción permanente de esfuerzos compresionales y de cizalla que aún actúan en el área.

Figura N°: 19

Red de Drenaje – cuenca del río Torbes



Fuente: Elaboración Propia

Según Zinck (2012) la densidad de drenaje se refiere la longitud de los cauces presentes en la cuenca y su relación con la superficie ocupada, Meijerink (1988) plantea que la densidad de drenaje se define como el cociente entre la longitud total de los cauces y el área de la cuenca. En este sentido, la longitud total de los drenajes en la cuenca del Torbes es de 621,36 Km y el área es de 304,529 Km², por tanto, la densidad de drenaje es de 2,04 km/km². Según Strahler (2005) y Delgadillo y Moreno (2015), esta densidad se puede considerar alta, en consecuencia, se infiere que el transporte aguas abajo de los materiales erosionados es elevado. En general, elevados valores de la densidad de drenaje se asocian a la presencia de materiales impermeables, que limitan la infiltración.

Coberturas

Para el análisis de las coberturas en la cuenca del río Torbes, se desarrolló una clasificación no supervisada, por el método *ISODATA*, que luego fue interpretada, empleando el software ENVI 5.0, ERDAS 2015 y ArcGIS 10.4, posteriormente se completó un segundo análisis de interpretación visual de la imagen, comparándola con un mosaico obtenido a partir de la API de Google Earth, con el software SAS Planet 1511, lo que permitió generar un mapa de coberturas.

Se utilizaron dos imágenes del satélite SPOT 5, una multiespectral, capturada el día 10 de enero de 2010, con ángulo de incidencia de 10,7266 grados, la escena presentó una cobertura nubosa del 27%, una resolución espacial de 10 metros y fue obtenida utilizando el sensor *HRS* en cuatro bandas espectrales: Verde (B1), Rojo (B2), Infrarrojo cercano (B3) e Infrarrojo medio (B4). La segunda imagen es pancromática, capturada en la misma fecha y con los mismos parámetros, pero con una resolución de 2,5 m, y fue obtenida utilizando el sensor *HRG*.

Estas imágenes fueron facilitadas por el Laboratorio de Ecología del Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (IVIC), las cuales habían sido procesadas digitalmente por el Centro de Procesamiento Digital de Imágenes (CPDI) de la Fundación Instituto de Ingeniería para el Desarrollo Tecnológico (FIIDT),

utilizando un nivel de procesamiento 1A, es decir, una corrección radiométrica, con asignación de un sistema de coordenadas (UTM 18N, datum WGS 1984), con una ortorectificación utilizando el modelo de coeficientes de polinomios racionales, a partir del SRTM para Venezuela con una resolución de 30 metros. Esta información fue obtenida a partir de los metadatos facilitados por el CPDI.

Es importante señalar que, dada la necesidad de elaborar un inventario de movimientos en masa, se consideró importante efectuar una fusión de datos radiométricos entre la imagen multiespectral y la pancromática. Para esto se empleó el software ERDAS 2015, utilizando la secuencia de comandos *PAN SHARPEN > RESOLUTION MERGE*, mediante el algoritmo IHS (Intensity-Hue-Saturation), que asigna a los píxeles de la imagen pancromática los valores radiométricos de la imagen multiespectral.

Posteriormente, con el software ENVI 5.0, se completó una clasificación no supervisada por el método *ISODATA*, seleccionando un rango de clases entre 15 y 20, con un valor de iteraciones de 10, es decir, el software realizó el análisis diez veces; también se asignó un mínimo de píxeles con valor de tres y una referencia de convergencia igual al 0.95%. Obtenido el ráster de la clasificación, se observaron algunas limitaciones en la imagen, por ello, se decidió aplicar un realce mediante el software ERDAS 2015; para esto se empleó la herramienta *RADIOMETRIC > HISTOGRAM MATCH* y luego el realce de *RADIOMETRIC > NOISE REDUCTION*, finalmente se alcanzó un mapa de coberturas en formato *.img, que fue interpretado mediante el software ArcGIS 10.4.

Fue utilizado el sistema de clasificación de coberturas *CORINE LANDCOVER* propuesto (Copernicus – EEA, 2012) y adaptado por el IGAC (2014) para el análisis de áreas montañosas de Colombia, por dos razones: la primera dada la necesidad de utilizar una nomenclatura estandarizada para las coberturas que orientará la asignación de clases, la segunda, lo importante de aplicar un sistema de clasificación que se ajustara a las condiciones propias de los espacios andinos y tropicales.

Limitaciones de la Imagen Satelital Empleada

El procedimiento estándar para efectuar un procesamiento digital de imágenes con fines de generar un mapa de coberturas, según lo establecido por IFFIULA (2007) y el IGAC (2014), requiere la transformación de la imagen de niveles digitales (ND) a valores de reflectancia, a partir de una serie de criterios que son propios para cada sensor. La imagen disponible para la cuenca del río Torbes, presenta limitaciones en este aspecto, porque había sido postprocesada, es decir, además de la corrección radiométrica y ortorectificación, se había establecido una composición en bandas (layer stack) que no permitía entre otras cosas, la manipulación de la mismas en la combinación pertinente para la interpretación de las coberturas y su conversión a valores de reflectancia.

Por tanto, aunque la imagen no se ajustaba a los parámetros necesarios, se hizo el esfuerzo para su análisis apoyado en técnicas de interpretación visual de coberturas y con el empleo del mosaico Google Earth como herramienta de apoyo a la interpretación.

Interpretación del Mapa de Coberturas

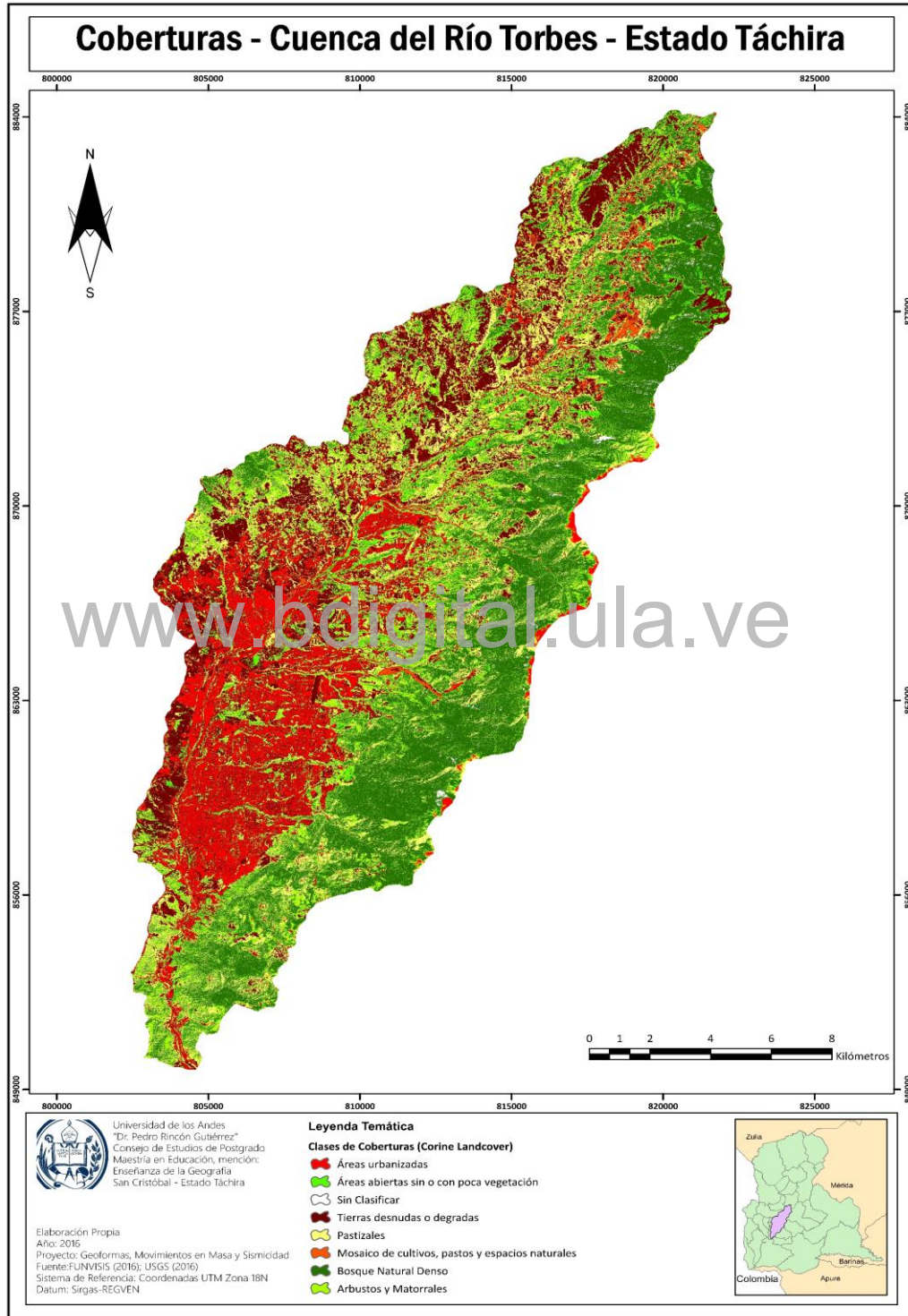
Una vez obtenido, el ráster (*.img) con las quince (15) clases de cobertura, se procedió a cargar, el ráster (*.img) resultante de la fusión de la escena multispectral y pancromática y el mosaico Google Earth. Utilizando la herramienta *IMAGE ANALYSIS*, que permite un barrido (*SWIPE*), se identificaron y agruparon ocho (8) coberturas que se describen a continuación, a partir de la clasificación planteada por el IGAC (2014) (Ver Figura N°: 20)

Bosque Natural Denso:

Es una comunidad vegetal donde predomina la vegetación arbórea, con un dosel superior a los cinco metros, que han sido poco o nada intervenido. Predomina hacia el este de la cuenca, de Norte a Sur en la Serranía de la Maravilla, con focos dispersos en la cuenca media hacia el Oeste sobre la Serranía de Capacho y en la parte baja en la Fila El Silencio. Ocupa el 27,80% de la cuenca, es decir, un total de 8464.94 ha.

Figura N°: 20

Mapa de Coberturas – cuenca del río Torbes



Fuente: Elaboración Propia

Tierras desnudas o degradadas:

Hace referencia a coberturas desprovistas o con escasa vegetación, por la acción de procesos erosivos y actividades antrópicas. En la cuenca alta, se evidencia con facilidad que esta cobertura se corresponde a suelos descubiertos y a posibles huellas de movimientos en masa. Sin embargo, en la cuenca media y baja, debido a la presencia de áreas urbanizadas y dado los problemas con la composición de la imagen, el software asume algunos píxeles correspondientes a la red vial y a las infraestructuras de los espacios urbanos como tierras desnudas o degradadas. Esta clase, se extiende por el 22,98% de la superficie de la cuenca, lo que corresponde a 6999,28 ha.

Pastizales

Es una cobertura constituida fundamentalmente por gramíneas, con participación de elementos arbóreos escasos o inexistentes y que en algunos casos se corresponde a parcelamientos para uso agrícola. Se distribuye uniformemente por toda la cuenca, a excepción de los emplazamientos urbanos y sus inmediaciones en la cuenca media. Abarca el 14,46% del área de estudio, que equivale a 4401,98 ha.

Arbustos y Matorrales

Se corresponde con áreas con vegetación arbustiva de baja altura, que pueden presentar ocasionalmente elementos arbóreos, puede ser el resultado de las condiciones naturales o por la acción antrópica. Al igual que la cobertura anterior se encuentra dispersa en toda la cuenca, exceptuando las áreas urbanas. Ocupa una superficie aproximada de 4333,37 ha, que corresponde al 14,23% de la cuenca.

Áreas Urbanizadas:

Se refiere a aquellas áreas ocupadas por infraestructura urbana o estructuras asociadas al tejido urbano. Sin embargo, en el mapa de coberturas interpretado se identificaron agrupaciones de píxeles que, al detallarlos, por análisis visual se infiere son depósitos de materiales propios de las márgenes de los cursos de agua, pero fueron asumidos por el software como áreas urbanizadas. Asimismo, algunas nubes fueron

identificadas dentro de esta clase. Esta cobertura, se encuentra especialmente en la cuenca media como mancha urbana continúa correspondiente al área de expansión de la zona metropolitana de San Cristóbal. Esta clase ocupa 3112,69 ha de la cuenca, que representa el 10,22%.

Áreas abiertas sin o con poca vegetación

En esta cobertura la vegetación es escasa o no existe, incluye áreas quemadas o degradadas por acción antrópica. En algunos casos el software asignó esta clase para áreas que se deberían clasificar en la categoría tierras desnudas o degradadas, posiblemente a causa de la sombra del relieve, por ejemplo, en la cuenca alta, en las inmediaciones del Pico Colorado en la fila El Portachuelo. Esta clase se distribuye de forma dispersa por toda la cuenca, su superficie aproximada es de 1562,13 ha, que equivale al 5,13% del total.

Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales

Se refiere a una combinación de segmentos de uso agrícola, áreas con escasa cobertura vegetal y espacios naturales moderadamente intervenidos. Se encuentra dispersa en la totalidad de la cuenca, no obstante, es necesario mencionar que el software categorizó dentro de esta clase a píxeles que representan depósitos de sedimentos de diversa índole, se presume que este error, es causado por la similitud en el color de los mismos con el de las coberturas identificadas en esta clase. Se extiende por el 1431,68 ha, es decir, 4,70% de la superficie de la cuenca.

Sin Clasificar

Son píxeles que el software no identificó con ninguna clase por las particularidades de la imagen o por ser sombras de nubes. Sin embargo, su porcentaje no se considera significativo ni limitante para el análisis, puesto que ocupa solamente el 0,48% de la cuenca, que equivale a 146,83 ha.

Clima

Precipitación

El análisis del elemento precipitación en la cuenca hidrográfica del río Torbes, se realizó de acuerdo con información reportada por Guerra, González, Gómez y Zambrano (2011). Este trabajo plantea, que la cuenca recibe la influencia de patrones meteorológicos sinópticos propios de la franja intertropical, que inciden en el desarrollo de un período de lluvias que se extiende entre los meses de abril y noviembre, resultado de la influencia de la zona de convergencia intertropical; y un periodo seco en el año asociado principalmente a las condiciones anticiclónicas en el Mar Caribe, que se extiende entre los meses de diciembre y marzo. Sin embargo, durante este periodo es posible el desarrollo de eventos lluviosos de importante magnitud vinculados a algunos episodios de inestabilidad atmosférica.

Por otra parte, los ya mencionados autores destacan la influencia del relieve regional particularmente montañoso en las condiciones pluviométricas específicamente cuando actúan como factor determinante en la circulación general de los vientos locales y regionales. De allí, que se encuentren dentro de la cuenca distintos ambientes pluviométricos vinculados a los patrones de ascenso orográfico, convección local y efectos de sobrepeso o invasión de aire provenientes del Norte y Sur de la cuenca. De igual forma Guerra et al. (2011) explican que:

La orientación de la cuenca en sentido NE – SW, hacia su parte superior y media, y con gradual cambio a orientación N – S, en la parte media e inferior de la cuenca, puede generar cambios en la circulación de los vientos locales a través del valle y las laderas de la cuenca (p.105)

Esto incide en las condiciones de humedad en ambas vertientes, siendo la vertiente izquierda más húmeda que la vertiente derecha. Por otra parte, a partir de la interpretación de los datos generales presentes en las estaciones pluviométricas (Ver Cuadro N°: 14) los autores establecieron que la precipitación media anual en el área objeto de estudio es de 1454,7mm con una disminución de la pluviosidad en sentido

SO-NE y SO-N. De este modo, y tomando como punto de partida el cuadro de promedios mensuales y anuales de precipitación para las estaciones meteorológicas consideradas para la cuenca (Ver Cuadro N°: 15) se identifican cuatro sectores que se describen a continuación.

Cuadro N°: 14

Datos Estaciones Pluviométricas

<i>Estación</i>	<i>Serial</i>	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>	<i>Altitud (msnm)</i>
<i>Los Laureles</i>	4018	7,92	-72,12	1520
<i>Capacho</i>	4020	7,82	-72,30	1264
<i>Zorca</i>	4026	7,83	-72,17	850
<i>Palmira</i>	4027	7,80	-72,27	1100
<i>El Junco</i>	4028	7,84	-72,23	1280
<i>San Cristóbal-Estanque</i>	4037	7,73	-72,25	992
<i>Sabaneta del Táchira</i>	4039	7,78	-72,21	680
<i>El Ron</i>	4040	7,72	-72,22	1320
<i>La Copé</i>	4045	7,67	-72,20	500
<i>Borotá</i>	4071	7,90	-72,23	1380
<i>Páramo El Zumbador</i>	4072	7,98	-72,10	2570
<i>La Poireva</i>	4097	7,85	-72,15	1440
<i>San Cristóbal – Torbes</i>	4098	7,76	-72,24	760

Fuente: Guerra et al. (2011)

Un primer sector ubicado al norte de la población de Palmira y hasta El Zumbador, con unos montos medios anuales de precipitación entre 1040 y 1200 mm. Un segundo sector, El Ron, con promedios anuales entre 2200 y 2300 mm, ubicado en el extremo sur en la vertiente izquierda. Una tercera área en las inmediaciones de las estaciones Sabaneta, San Cristóbal – Estanque y El Junco con medias anuales entre 1700 y 2000 mm, y finalmente un cuarto sector, en el extremo oeste de la cuenca, en la vertiente derecha, con los menores promedios anuales de precipitación que varían entre 800 y 1000 mm.

Cuadro N°: 15

Promedios Mensuales Estaciones Pluviométricas

<i>Estación</i>	<i>ENE</i>	<i>FEB</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAY</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SEP</i>	<i>OCT</i>	<i>NOV</i>	<i>DIC</i>	<i>Anual</i>
<i>Los Laureles</i>	29,40	32,20	50,90	118,90	121,70	135,70	165,10	125,40	118,60	141,70	115,50	66,40	1221,50
<i>Capacho</i>	20,30	21,30	32,70	100,70	101,30	107,70	107,90	85,90	85,90	101,40	99,60	43,10	907,70
<i>Zorca</i>	29,30	35,90	45,10	130,90	157,70	159,80	172,70	141,30	136,50	143,70	117,70	68,40	1338,90
<i>Palmira</i>	26,00	23,90	37,30	92,80	119,20	134,90	144,80	129,40	132,90	134,50	98,40	72,10	1146,20
<i>El Junco</i>	20,00	17,90	22,50	104,00	98,30	100,10	106,20	97,40	117,00	110,20	81,70	44,00	919,30
<i>SC Estanque</i>	30,40	26,70	50,80	113,40	181,50	247,30	234,50	195,40	175,40	173,10	150,60	77,60	1656,70
<i>Sabaneta del</i>	36,70	28,60	43,90	98,20	169,70	233,50	246,90	204,90	166,30	168,20	131,90	94,80	1623,60
<i>Táchira</i>													
<i>El Ron</i>	42,00	41,20	64,40	176,30	262,10	356,00	348,90	282,40	259,30	248,10	188,70	104,60	2374,00
<i>La Copé</i>	41,00	45,50	63,30	167,50	262,70	322,40	326,60	288,20	284,80	259,10	183,50	108,60	2353,20
<i>Borotá</i>	27,90	33,60	36,10	122,80	73,60	63,10	49,90	55,10	84,60	126,80	108,50	59,40	841,40
<i>Páramo</i>													
<i>El Zumbador</i>	26,60	32,80	46,20	111,50	101,30	93,40	113,00	101,70	103,30	130,30	104,90	55,40	1020,40
<i>La Potrera</i>	32,60	27,50	47,80	131,40	155,40	179,20	214,30	170,70	157,30	158,70	106,30	82,40	1463,60

Fuente: Guerra et al. (2011)

Por otra parte, tal como lo explican Guerra et al. (2011) en la cuenca prevalece un régimen de tipo unimodal con valor máximos de precipitación en los meses de Junio y Julio, y un mínimo para los meses de Enero y Febrero. Sin embargo, los datos aportados por las estaciones reflejan una variación durante el periodo lluvioso con la tendencia a mostrar dos máximos. Esto se explica por la presencia de una franja de transición entre el régimen llanero unimodal y el régimen lacustre bimodal producto de los cambios en velocidad y dirección de los flujos N- NE y S- SE que convergen temporalmente en la cuenca.

Temperatura

Para el análisis y descripción del comportamiento de la temperatura en la cuenca, se utilizó el método del gradiente térmico altitudinal, considerando los planteamientos hechos por Tovar (2013), que hace uso de los datos de un MDE y de una ecuación de regresión lineal desarrollada a partir de datos de temperatura y altitud disponibles en las estaciones meteorológicas del Estado Táchira, para evaluar el comportamiento de la temperatura en la cuenca del río Grita. En este sentido, para describir y analizar las variaciones de temperatura en la cuenca del río Torbes se utilizó la siguiente ecuación de regresión que relaciona la altitud con la temperatura:

$$Y = X_0 - r(X_i)$$

Donde:

Y= Temperatura media en °C.

X₀= Valor de temperatura referencial, según Tovar (2013) para el Táchira es de 27,615 °C.

r= Dispersión térmica vertical, es decir, la pendiente de la línea de la ecuación de regresión lineal, de acuerdo con Tovar (2013) es de 0,0056.

X_i= El valor altitudinal en msnm, para este caso, los valores son estimados a partir del MDE elaborado para la cuenca del Torbes.

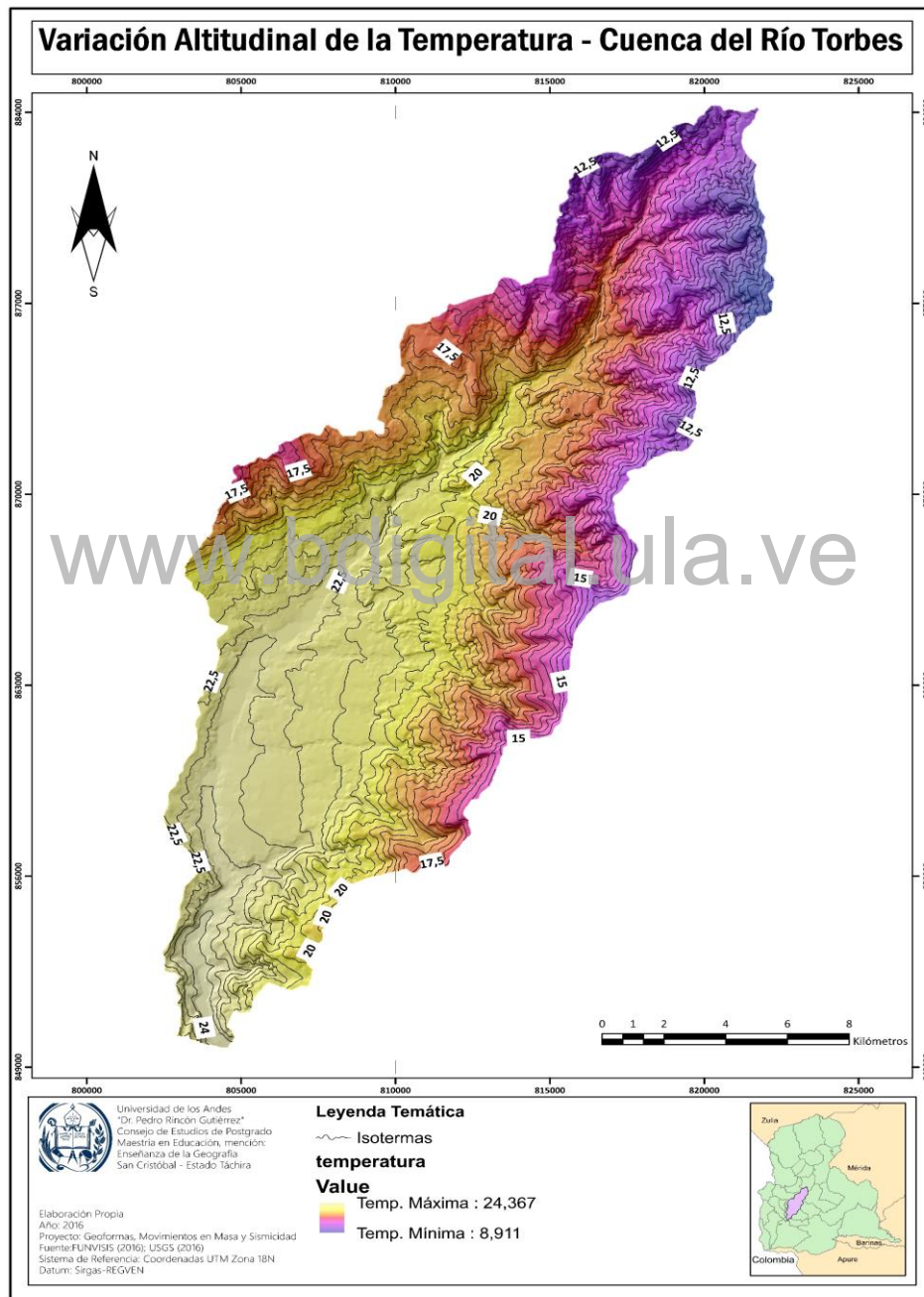
Para construir el mapa de temperatura, se incorporaron los valores señalados en una operación de álgebra de mapas, la cual permite en ambiente SIG, efectuar operaciones de análisis espacial, combinando diversos datos temáticos contenidos en archivos ráster. Cabe señalar, que la operación se completó usando ArcGIS 10.4, recurriendo a la secuencia *SPATIAL ANALYST TOOLS > MAP ALGEBRA > RASTER CALCULATOR*, que despliega una ventana donde se seleccionan los operadores algebraicos que permiten ejecutar la operación requerida, esto genera un archivo ráster en formato ArcInfo Binary Grid (*.adf). Una vez obtenido este producto, se generaron las isotermas que permiten ubicar espacialmente los intervalos de cambio de temperatura, para esto se ejecutó el conjunto de comandos *SPATIAL ANALYST TOOLS > SURFACE > CONTOUR*, donde se seleccionó el intervalo de 0,5 °C. Finalmente se obtuvo un archivo vectorial (*.shp) con isotermas para el área de estudio (Ver Figura N°: 21)

En función del mapa de isotermas, se evidencia que la temperatura media anual de la cuenca presenta una variación espacial importante, con valores mínimos de aproximadamente 9 °C, hacia el extremo más septentrional y valores máximos en la cuenca baja, al sur del área de estudio donde se alcanzan los 24°C. El pico El Colorado al Noreste de la cuenca es donde se calculan los promedios más bajos de temperatura

(9 °C), a partir de allí en la medida en que se desciende altitudinalmente, los valores de temperatura aumentan.

Figura N°: 21

Variación Altitudinal de la Temperatura – cuenca del río Torbes



Fuente: Elaboración Propia

A partir de la interpretación del mapa de Isotermas es posible señalar que hacia el sector Este de la cuenca, existe una franja donde predominan temperaturas entre los 13,5 °C y los 16°C, extendiéndose espacialmente por la vertiente izquierda tanto en la cuenca alta, como en la media y en la baja; mientras que hacia la vertiente derecha, es decir, hacia su extremo Oeste solo el área más al norte presenta valores análogos de temperatura, por ello se puede afirmar que a nivel de la cuenca media las condiciones térmicas son diferentes en ambas vertientes, lo que podría ser el reflejo de diferencias contrastantes en la exposición que presentan las superficies.

En la medida en que se desciende desde la cuenca media es posible encontrar un sector de Este a Oeste en la vertiente izquierda, con promedios de temperatura que alcanzan los 19 °C, en las inmediaciones de Loma de Pío, pasando por Angostura, el cerro El Ceibal hasta el sector La Montaña. A partir de este sector y en dirección Sur, tal y como lo refleja el mapa de variaciones de temperatura, esta experimenta un progresivo aumento en las inmediaciones de los principales centros poblados de la cuenca, con estimaciones de 20,5 °C para la ciudad de Cordero, 22 °C para Palmira, 22,5 °C para Táriba, mientras que en San Cristóbal y sus alrededores la temperatura varía entre los 22,5 °C y los 24 °C. Las máximas temperaturas estimadas se ubican en el borde meridional de la cuenca en las adyacencias de El Corozo, área donde converge el Río Torbes con el Quinimarí, sitio donde se presentan los valores altitudinales mínimos (580 msnm), lo que nuevamente evidencia la estrecha relación entre los valores altitudinales y las variaciones de temperatura en el área de trabajo.

Evapotranspiración Potencial

Para la cuenca del Torbes se cuenta con limitada información sobre datos las variables climáticas. En este sentido, para describir el comportamiento de la evapotranspiración se utilizaron datos no publicados suministrados por el personal del Instituto Nacional de Tierras (INTI) – Bramón en el año 2014, quienes estimaron valores medios de evapotranspiración de 42 estaciones meteorológicas del Estado Táchira, a partir de un modelo matemático en proceso de validación.

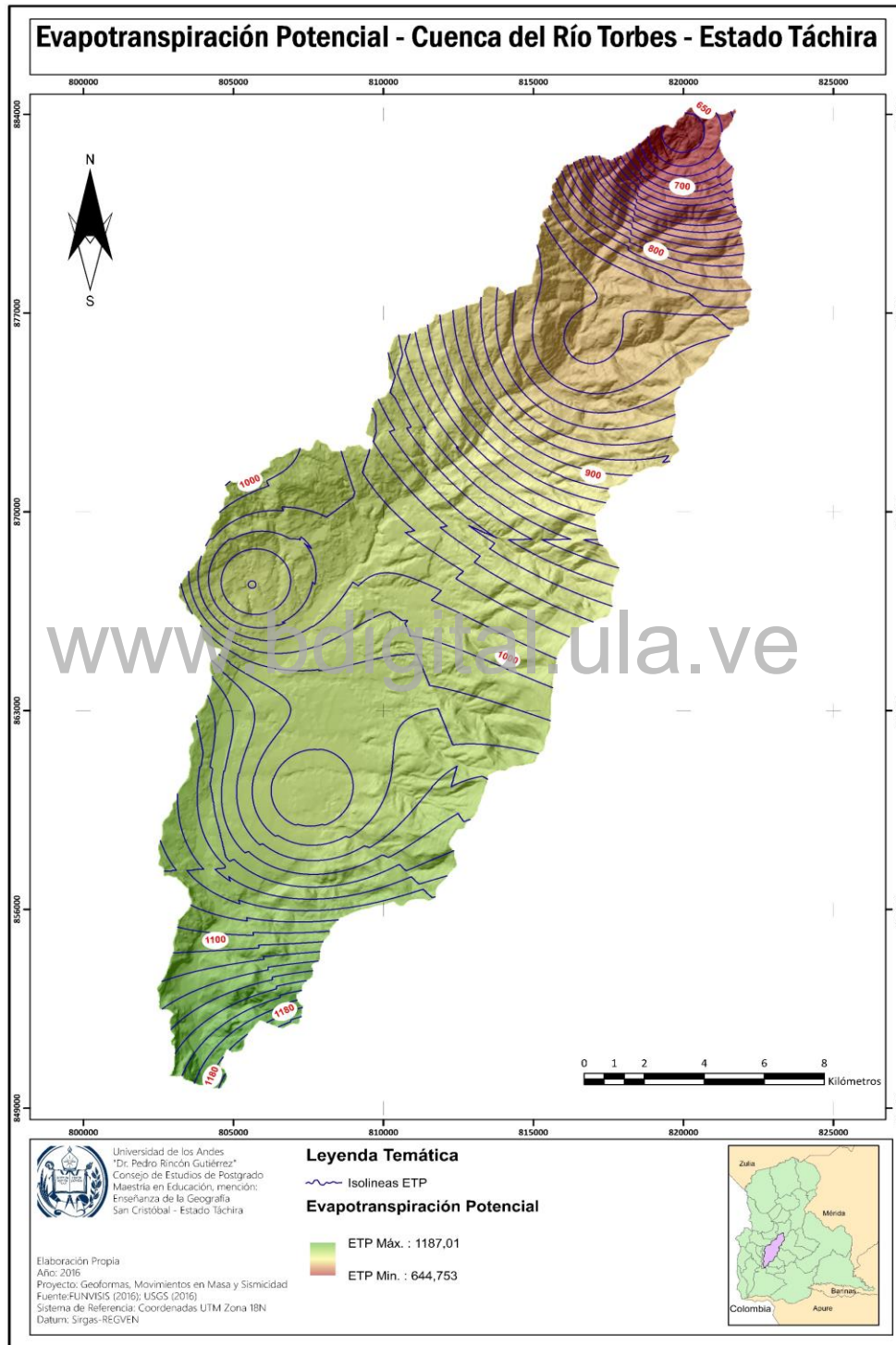
Una vez sistematizados los datos de evapotranspiración potencial (ETP) para las estaciones meteorológicas disponibles en una tabla de Excel 2016, se intentó generar un mapa de puntos, para interpolar el comportamiento de la ETP para el área de estudio, pero los datos no contenían información de la localización absoluta de las estaciones. Por esta razón, y a partir de capas temáticas facilitados por el Laboratorio de Ecología del IVIC, se obtuvo utilizando la secuencia de comandos DATA MANAGEMENT TOOLS > FEATURES > ADD XY COORDINATES, la información posicional (latitud y longitud) de 27 de las 42 estaciones meteorológicas con información de ETP suministrada por el INTI, que fue almacenada en una tabla (*.xlsx). Seguidamente, esta tabla, se guardó en formato *.csv, con el cual se construyó un mapa de puntos con el software ArcGIS 10.4, que una vez exportado en formato *.shp, fue interpolado utilizando la secuencia SPATIAL ANALYST TOOLS > INTERPOLATE > IDW, que generó un archivo ráster (*.adf) para todo el Estado Táchira.

Finalmente, para obtener el mapa de evapotranspiración de la cuenca del río Torbes, se empleó la herramienta SPATIAL ANALYST TOOLS > EXTRACTION > EXTRACT BY MASK, que permitió a partir del ráster (*.adf) que se obtuvo en el paso anterior y con el archivo vectorial (*.shp) de la divisoria de la cuenca, generar el mapa de ETP para el área de trabajo en formato (*.adf). A partir de este mapa, se derivaron un conjunto de isoclinas de ETP, empleando los comandos SPATIAL ANALYST TOOLS > SURFACE > CONTOUR, con un intervalo de 5 mm (Ver Figura N°: 22).

En relación a las condiciones ETP tal como se refleja en el mapa, los promedios anuales más bajos se encuentran ubicados en el sector norte de la cuenca, en las proximidades del Fundo El Palmar, con un promedio de 650 mm anuales. En la cuenca media los valores de ETP mantienen su ascenso hasta los 1050 mm anuales y finalmente en el extremo Sur del área de estudio presenta los promedios más altos alcanzando valores 1180 mm anuales.

Figura N°: 22

Evapotranspiración Potencial – cuenca del río Torbes



Fuente: Elaboración Propia

Delimitación de las Unidades Geomorfológicas en la cuenca del río Torbes

Unidades Geomorfológicas

Para el análisis de las Geoformas siguiendo el sistema de clasificación propuesto por Zinck (2012), es necesario utilizar un conjunto de atributos de naturaleza morfométrica, morfográfica, morfogenética y morfocronológica. El sistema es multicategorico, es decir, está organizado en seis niveles de abstracción creciente en escala y en información. Las tres primeras categorías (Geoestructuras, Ambientes Morfogenético y Tipo de Paisaje) se consideran niveles superiores del sistema y en su diferenciación se utilizan entre otros, atributos morfográficos y morfométricos, que en la actualidad son extraídos principalmente a partir de un MDE. Las tres últimas categorías (Relieve/Modelado, Litología/Facies, Forma de Terreno) son también denominadas categorías inferiores y requieren para su implementación de atributos morfogenéticos y morfocronológicos que necesitan un extenso trabajo de campo y laboratorio.

El sistema propuesto por Zinck (2012), es considerado natural, ello implica que se utilizan propiedades de las geoformas para su clasificación. Además, es jerárquico, en otras palabras, funciona como un árbol genealógico, donde el número de clases aumenta a medida que se pasan de las categorías superiores a las categorías inferiores. A continuación, se describen las geoformas para el área de estudio por niveles, llegando al final hasta una aproximación de la categoría facies de tipo de tipos de paisajes.

Como se mencionó, en las primeras categorías del sistema se utilizó en parte información generada a partir del MDE; para este trabajo los datos e información fueron extraídos empleando diversas herramientas disponibles en el software ArcGIS 10.4. Del mismo modo, es importante señalar que se utilizó además del MDE derivado a partir de las curvas de nivel, el sombreado construido a partir del SRTM y diversas fuentes cartográficas con información sobre Geoformas para Venezuela.

A continuación, se describen las geoformas presentes en el área de estudio para cada una de las categorías propuestas por Zinck (2012), iniciando por Geoestructuras:

Geoestructuras

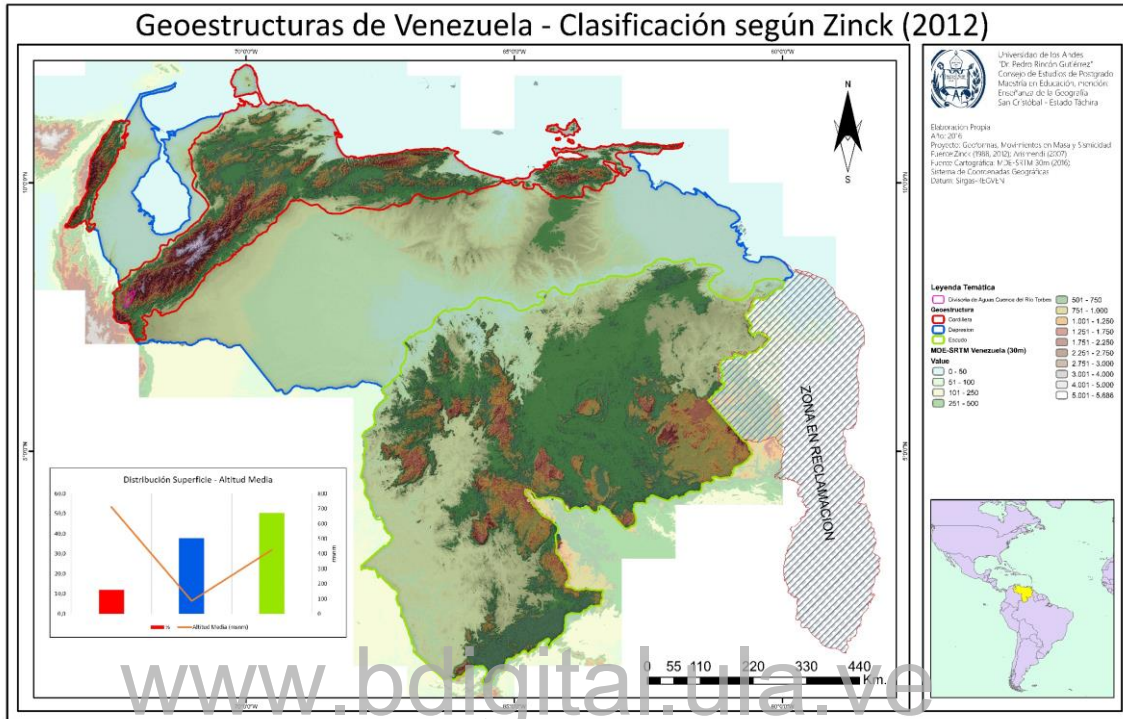
De acuerdo con Zinck (2012) esta categoría está conformada por tres clases: Cordilleras, Escudos y Geosinclinales. Para delimitar cada una de éstas en el territorio nacional se partió del mapa de grandes unidades físico naturales de Arismendi (2007) el cual fue digitalizado y georreferenciado con el software ArcGIS 10.4, y la herramienta *GEORREFERENCING*, para posteriormente vectorizarlo en pantalla, delineando cada una de las grandes unidades geoestructurales de Venezuela. Es importante señalar que Arismendi (2007) basó su delimitación en los criterios propuestos por Zinck (1988).

Con los polígonos delimitados, se procedió a una superposición y ajuste de límites con el mapa de sombreado derivado a partir de los datos altitudinales del modelo SRTM para toda Venezuela, descargado en el WebGIS del USGS. Las unidades físico-naturales delimitadas en Arismendi (2007), son equivalentes a las provincias fisiográficas definidas en el sistema de clasificación de las formas del relieve propuesto por Zinck (1980), por ello implican una escala de análisis mayor que la planteada para la categoría Geoestructura en Zinck (2012). Por esta razón, para obtener el mapa de Venezuela a este nivel categórico (Ver Figura N°: 23), fue necesario agrupar la información utilizando la secuencia *SPATIAL ANALYST TOOLS > EXTRACT > EXTRACT BY MASK*, obteniendo un archivo ráster (*.img).

A partir de la Figura 23 se puede señalar, que el área de estudio en la categoría Geoestructura pertenece a la clase Cordillera, que ocupa una superficie aproximada 110210,6 Km², está constituida principalmente por Rocas Metamórficas y se encuentra intensamente plegada, fallada y fracturada, lo que se explica en parte según Elizalde (1983) a intrusiones ígneas plutónicas. Es necesario destacar que la unidad tiene un origen asociado a una potente orogénesis por las interacciones transpresivas complejas entre la placa de Nazca, la placa Sudamericana y la placa Caribe.

Figura N°: 23

Geoestructuras de Venezuela



Fuente: Zinck (1988, 2012) Arismendi (2007).

Simultáneamente, procesos recurrentes de erosión, principalmente hídrica, removieron decenas de kilómetros de coberturas y ocasionaron un ascenso relativo de los materiales geológicos formados durante los ciclos profundos y su exposición en superficie (Ospina; Vilorio y Elizalde, 2010). Es necesario indicar, que en esta unidad también se encuentran rocas sedimentarias fuertemente plegadas y con evidencias de metamorfismo incipiente. Estos procesos se mantienen actualmente y son los que controlan la dinámica morfogénica de la mayor parte de las formas del relieve que se encuentran en ella.

Por otro lado, la escala de abstracción a este nivel de acuerdo con Elizalde (2012) estaría alrededor de 1:30000000, por ello, es de esperar exista una alta variabilidad interna de los factores clima, relieve, materiales geológicos, cobertura vegetal, suelos y tiempo de evolución. Por ejemplo, estructuras como los valles intermontanos, con

una génesis deposicional y gran importancia económica y social no pueden ser observadas y representados a esta escala de análisis. En el cuadro N°: 16, se muestran un resumen de algunas variables que caracterizan a esta clase de geoestructuras, extraídas a partir del MDE SRTM.

La próxima categoría en el sistema de clasificación, se denomina Ambiente Morfogénético, de acuerdo con Zinck (2012) es una categoría análoga a la región natural propuesta por Zinck (1980), que en general se representa a escala 1:2000000 tal y como lo plantea Elizalde (2012). Este cambio brusco en la escala de trabajo y el nivel de análisis, al pasar de la categoría Geoestructura a la categoría Ambiente Morfogénético es reportado como una discontinuidad en el sistema de clasificación propuesto por Zinck (2012) que afecta su implementación (Elizalde, 2012), por esta razón, en este trabajo la clase Cordilleras fue subdividida en Facies considerando los criterios propuestos por Zinck (1980) para diferenciar Provincias Fisiográficas, es decir, una configuración predominante que puede recibir una designación específica (sistema montañoso, zócalo, escudo, cuenca, llanos, depresión).

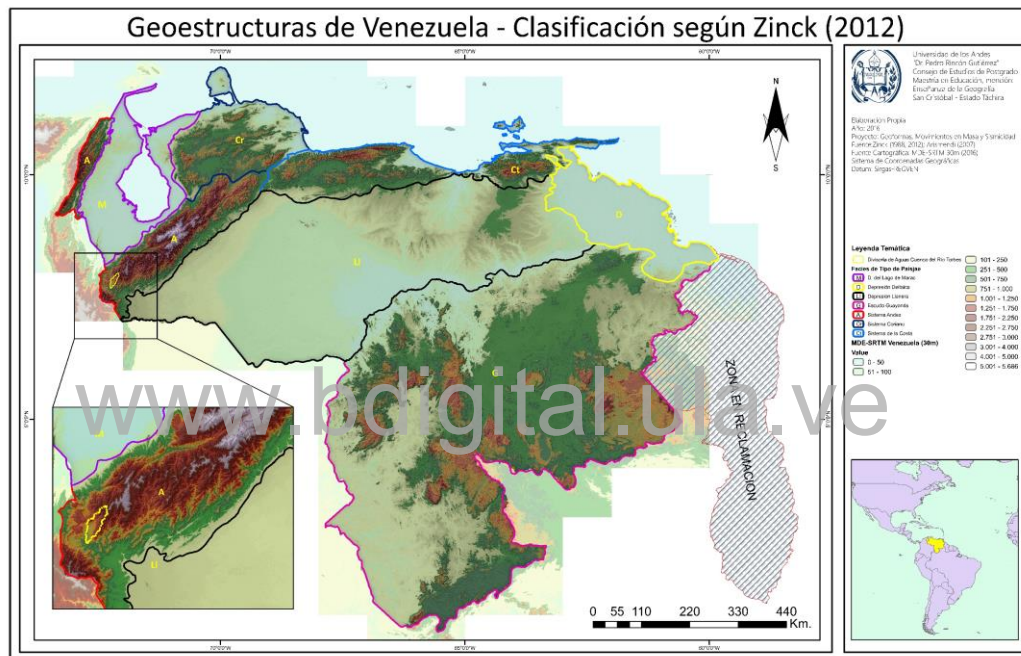
Estas son facies de esta clase, que constituyen amplios sectores con una ubicación geográfica precisa, resultantes de la ocurrencia de un conjunto de acontecimientos geológicos y geomorfológicos que le son propios. Las características geológicas (grupos de roca, estructura, edad), condiciones climáticas, asociaciones de cobertura vegetal y los parámetros del relieve, corresponden a las peculiaridades propias de la geoestructura a la cual pertenece, pero dada su menor extensión presenta menor variabilidad.

Zinck (1988) a este nivel plantea siete clases (Ver Figura N°: 24) y por su ubicación la cuenca del río Torbes pertenece al Sistema de los Andes, que según Vivas (1984) y Arismendi (2007), es un relieve alargado y con altitudes sostenidas por encima de los 3000 msnm, en casi toda su longitud. Es una estructura masiva con una dinámica asociada al relieve muy activa. Se inicia en la cordillera Oriental de Colombia y según Schargel (2011), se bifurca en dos cordilleras en el inductor de Pamplona, debido a procesos tectónicos asociados al contacto de las placas Sudamericana, Nazca y Caribe.

La Cordillera de Mérida, con una orientación SO-NE que se extiende hasta la Depresión de Barquisimeto y la Cordillera de Perijá, con orientación SO-N, cabe señalar, que ambas cordilleras se encuentran separadas por la depresión del Lago de Maracaibo. Asimismo, se presentan un conjunto de depresiones tectónicas como la del Táchira, Chama y Valera.

Figura N°: 24

Facies de las Geoestructuras Venezuela



Fuente: Elaboración Propia

Según Audemard (2001), este sistema sufrió un levantamiento previo, sin mucha prominencia altitudinal en el Mioceno, asociado a las primeras etapas de la colisión entre el Arco de Panamá y la placa Sudamericana, lo que originó un conjunto de depósitos molásicos desde el Suroeste hasta el Noreste, posteriormente el modelado actual fue producto de la transpresión en el Plioceno – Cuaternario, debido a la convergencia oblicua entre dos bloques continentales. Esta compresión se superpuso a la primera del Mioceno, invirtiendo los Grabens de origen Jurásico, lo que derivó en la exposición de rocas del Precámbrico y del Paleozoico en la corteza continental.

Según Arismendi (2007) el modelado actual del Sistema de los Andes tiene una forma estructural derivada del levantamiento de grandes bloques tectónicos (horst), separados por hendiduras longitudinales o fosas tectónicas (grabens), lo que origina según Audemard (2001) complejos campos de fallas normales y paralelas en conjunto con múltiples pliegues anticlinales y sinclinales, en muchos casos dislocados. Arismendi (2007) plantea que, debido a su evolución geológica, este sistema presenta un amplio mosaico litológico, puesto que afloran rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias y se encuentran muchos de los períodos geológicos desde el Precámbrico hasta el Cenozoico.

Cuadro N° 16:

**Algunos atributos Morfométricos de la clase Cordillera en la categoría
Geoestructuras**

<i>Nombre de la Geoforma</i>	<i>Cordillera</i>
<i>Superficie (Km²)</i>	151369,15
<i>Pendiente Media</i>	32,53%
<i>Altitud Media</i>	710,63 msnm

Fuente: Elaboración Propia

Ambientes Morfogénéticos

El segundo nivel jerárquico del sistema de clasificación de las geoformas propuesto por Zinck (2012), son los ambientes morfogenéticos, el autor plantea seis clases:

- Ambiente Estructural
- Ambiente Deposicional
- Ambiente Erosional
- Ambiente Disolucional
- Ambiente Residual
- Ambiente Mixto

Esta categoría, es análoga a la región natural planteada en el sistema de clasificación de las formas de relieve de Zinck (1980), donde se diferencian doce regiones naturales

para el territorio nacional. Para el Sistema de los Andes, se plantean tres grandes regiones: Cordillera de Mérida, Cordillera de Perijá y Depresiones Intermontanas. La cuenca del Torbes se emplaza dentro de esta última región, la cual se caracteriza según Vivas (1984) por tener un origen estructural, originado en el hundimiento de uno o más bloques, formando un graben que fue rellenado total o parcialmente por sedimentos. Cabe señalar, que particularmente el área de estudio se encuentra dentro de la Depresión del Táchira (Ver Figura N°: 25).

La Depresión del Táchira, según autores como González de Juana (1980); Macellari (1982); Vivas (1984); Singer, Audemard y Soulas (1997); Prado (2007) y Chacón y Pernía (2010), se encuentra ubicada entre la Falla de Capacho al norte y la Falla de Bramón al Suroeste. Por su parte Vivas (1992) plantea que desde una perspectiva fisiográfica, ésta depresión limita por el Oeste con el Valle del río Táchira; al Sur por los relieves asociados al Macizo de Tamá, identificados como el Páramo Revancha y las Serranías de Santa Bárbara y Vargas, las filas Buena Vista y El Pedregal; al Este, su límite es la Serranía de La Maravilla y los Páramos Colorado, Portachuelo, El Zumbador y Almorzadero; al Norte y Noreste por el Páramo Angaraveca y los límites entre las cuencas de los ríos Lobaterita y Torbes, en el sector Palo Grande, en las inmediaciones de la Serranía de Capacho. (Ver Cuadro N°: 17).

Cuadro N°: 17

Algunos atributos morfométricos de la Depresión del Táchira

<i>Nombre de la Geoforma</i>	<i>Depresión del Táchira</i>
<i>Superficie (Km²)</i>	916,31
<i>Pendiente Media</i>	30,28%
<i>Altitud Media</i>	1234,8 msnm

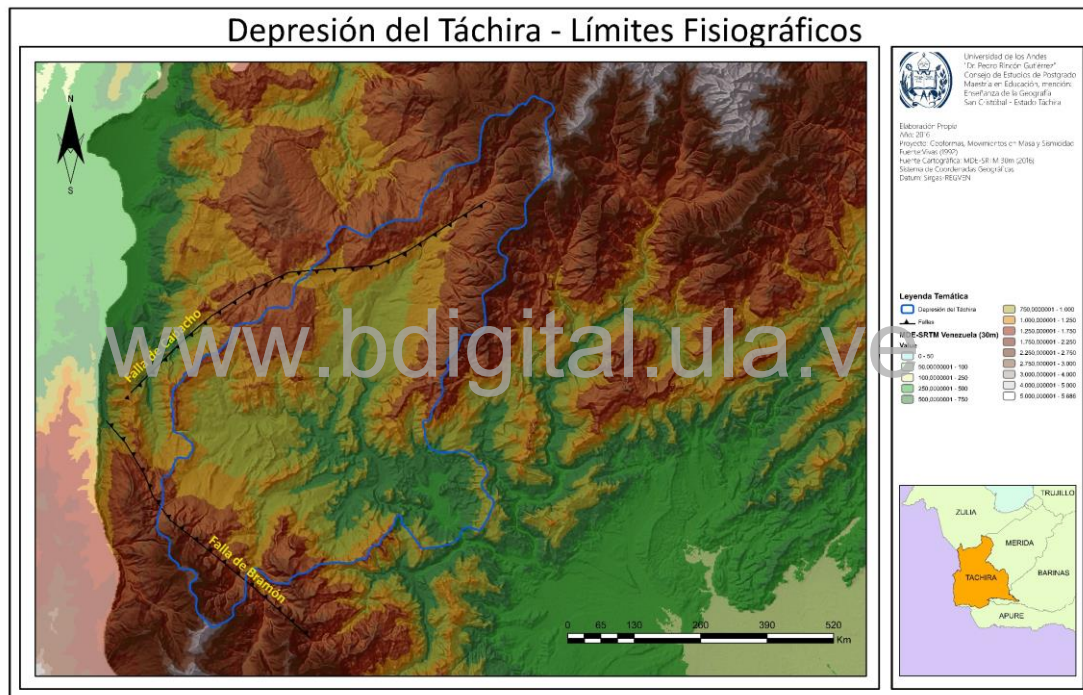
Fuente: Elaboración Propia

Una vez definidos los límites fisiográficos, se emplearon cartas topográficas, elaboradas por la antigua Dirección de Cartografía Nacional a escala 1:25000, pertenecientes a la misión 024589 del año 1987, en conjunto con el sombreado obtenido a partir del MDE-SRTM de Venezuela con una resolución de 30m, para identificar los

sectores antes mencionados. Cabe señalar, que fue complejo ubicar los sitios de referencia por no aparecer dentro de la toponimia de las cartas consultadas, en este sentido se emplearon diversos criterios cartográficos para la delimitación de unidades fisiográficas, como los planteados por Sanz (1996), Sánchez, Rubio y Blanco (2004), SEAM (2011) y el INCODER (2013), los cuales permitieron completar la delimitación en el área señalada por Vivas (1992).

Figura N°: 25

Depresión del Táchira



Fuente: Elaboración Propia

Para esto se creó un nuevo archivo vectorial *.shp, en el software ArcGIS 10.4, lo que permitió delinear los límites mediante la herramienta *CREATE FEATURE>POLYLINE* y vectorizando en pantalla siguiendo la divisoria de aguas indicadas por las curvas de nivel y el sombreado. En este sentido, es importante señalar que se tomó también como referencia la poligonal de la divisoria de aguas de la cuenca del río Torbes, la cual funge como límite al Norte de la Depresión del Táchira.

Según Vivas (1992), esta depresión se formó por una tectónica de bloques compleja e intensa, asociado a una multiplicidad de fallas simples y compuestas en escalón que originaron el hundimiento de esta área. En la depresión, según Meier, Schwander, Laubscher (1987) “desde el Jurásico y hasta el Cuaternario, se han ido acumulando potentes secuencias sedimentarias (p. 230)”, las cuales, a su vez, según Audemard (2002), se han visto plegadas y deformadas por una continuidad de esfuerzos transpresionales. En este sentido, y dadas las particularidades del área se puede establecer que a este nivel de abstracción (Ambiente Morfogénico), el área de estudio se encuentra en un Ambiente Mixto.

Los Ambientes Mixtos, según Zinck (2012) son ambientes que comparten geformas de diverso origen, particularmente en el área correspondiente a la cuenca del río Torbes, por encontrarse en el límite Noreste de la Depresión del Táchira, se evidencia la presencia de geformas originadas por procesos geodinámicos estructurales (Montañas) y a su vez se identifican formas del relieve cuyo origen está asociado a la deposición de materiales (Piedemonte y Valles). Del mismo modo se evidencia unidades geomorfológicas de origen erosional (Lomerío).

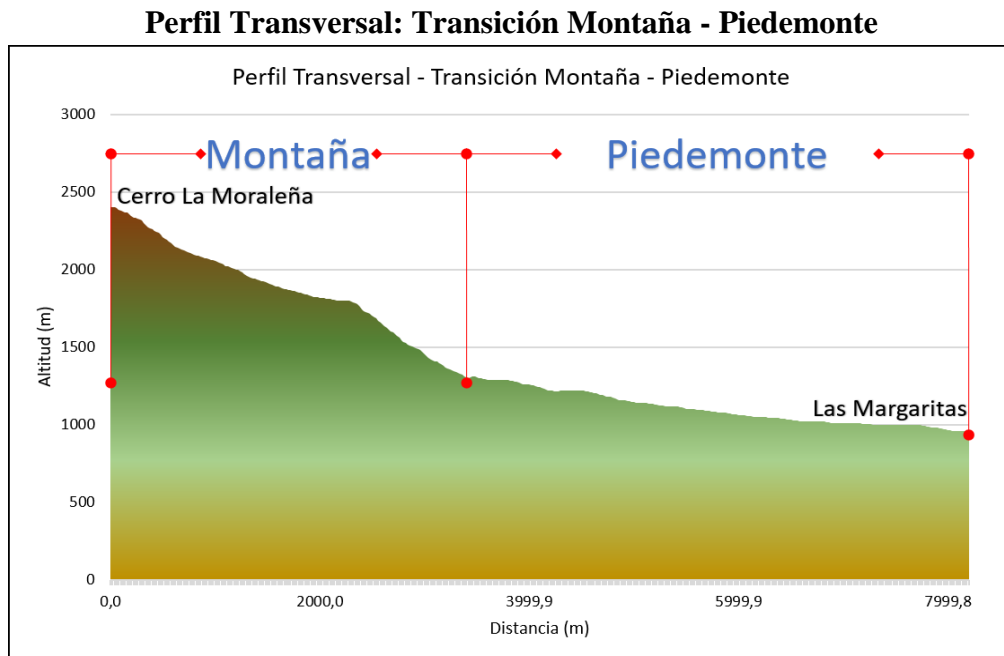
Tipo de Paisaje

La categoría Tipo de Paisaje, de acuerdo con Zinck (2012) está conformada por siete clases, y se definen como una porción caracterizada por sus rasgos fisiográficos. Corresponde con una repetición de tipos de relieve similares o una asociación de tipos de relieve disimiles, por ejemplo: valles, planicies. Para identificar los paisajes geomorfológicos en la cuenca del río Torbes, se emplearon fundamentalmente atributos morfométricos y algunos morfográficos, que se derivaron a partir de imágenes satelitales y del MDE. La delimitación se efectuó en pantalla con herramientas disponibles en el software ArcGIS 10.4. En este sentido, se empleó el MDE generado para la cuenca del Torbes, del cual se derivó un mapa de sombreado con la secuencia de comandos *SPATIAL ANALYST TOOLS > SURFACE > HILLSHADE*, obteniendo así un archivo ráster (*.ovr).

Como se expresó anteriormente en la delimitación de las unidades, se utilizan atributos morfológicos y morfométricos; los primeros son considerados descriptivos y de naturaleza altimétrica (forma topográfica y perfiles) y planimétrica (configuración, contorno, patrón de drenaje y vecindad). Mientras los segundos se miden directamente sobre la geofoma delimitada (gradiente de la pendiente, altura relativa y densidad de drenaje).

Los perfiles topográficos transversales, aunque son atributos utilizados principalmente en la categoría Relieve/Modelado, se realizaron en diferentes sectores de la cuenca para mejorar la ubicación de los límites entre clases, como se muestra en la figura N°: 26. Esta operación se efectuó con la barra de herramientas *3D ANALYST*, y el botón *INTERPOLATE LINE*, que permitió trazar líneas sobre el mapa de sombreado, teniendo activo al MDE, obteniendo así el perfil topográfico. Este proceso se realizó varias veces, identificando límites y transiciones a otras geofomas, hasta obtener el mapa a nivel de tipo de paisaje (Ver Figura N°: 27). Además, se calculó el área de cada unidad con la herramienta *CALCULATE GEOMETRY*.

Figura N°: 26



Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se describen las unidades de paisaje identificadas en la cuenca del río Torbes:

Montañas

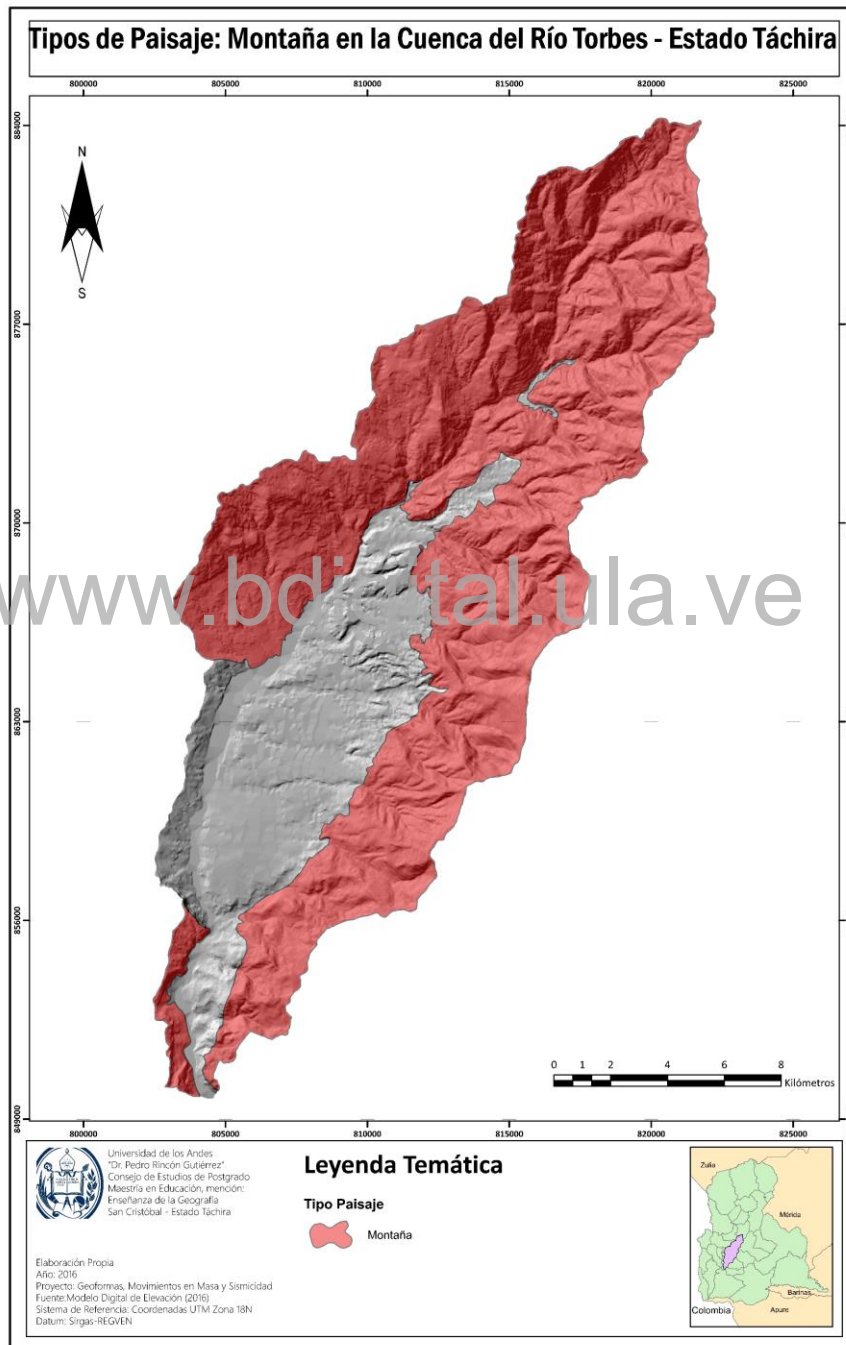
Es el tipo de paisaje predominante en la cuenca del río Torbes, ocupa aproximadamente 21958,3 ha, que equivalen al 72,1% del total de la cuenca (Ver Figura N°: 28). Se identifican dos delineaciones de este tipo de paisaje: la primera que corresponde a la Serranía de la Maravilla al Este de la cuenca desde el Zumbador hasta la desembocadura del río Torbes en el Quinimarí y la Serranía de Capacho en el Noroeste, desde las inmediaciones de la población de Palmira hasta el Zumbador; la segunda delineación se ubica al Sur de la cuenca, en las estribaciones de la Serranía El Tama, desde el sector El Paraíso en las inmediaciones de la desembocadura de la quebrada La Chucurí hasta el sector Santa Teresa en la desembocadura del Torbes en el Quinimarí.

Según Zinck (2012), uno de los atributos vinculados al nivel de Tipo de Paisaje, son las relaciones de vecindad, en este sentido, el paisaje Montañas dentro de la cuenca del Torbes, es dominante con respecto al Piedemonte que se encuentra al Oeste de la Serranía de la Maravilla y al Este de la Serranía de Capacho, y en algunos casos es dominante directamente sobre el Valle, al Suroeste de la Serranía de Capacho en las inmediaciones del cauce del río Torbes, igualmente domina al Lomerío al Sur de la cuenca. Al observar la Figura N°: 29, se aprecia claramente que la forma topográfica montaña y fuertemente disectada, ocupa una superficie aproximada 16469,61ha corresponde al 63,9% de la unidad, presenta pendientes por encima del 30% y con amplitudes de relieve de moderadas a altas.

Las altitudes promedio de esta unidad están en el orden de los 1850 msnm, su altitud máxima corresponde a 3340 msnm en el Pico Colorado al Noreste, su altitud mínima es de 600 msnm, en las cercanías de la desembocadura del río Torbes. Su amplitud de relieve estimada, es decir, la diferencia altitudinal promedio entre la base y la altura de la geoforma es cercana a los 700 m (Ver Figura N° 30).

Figura N°: 28

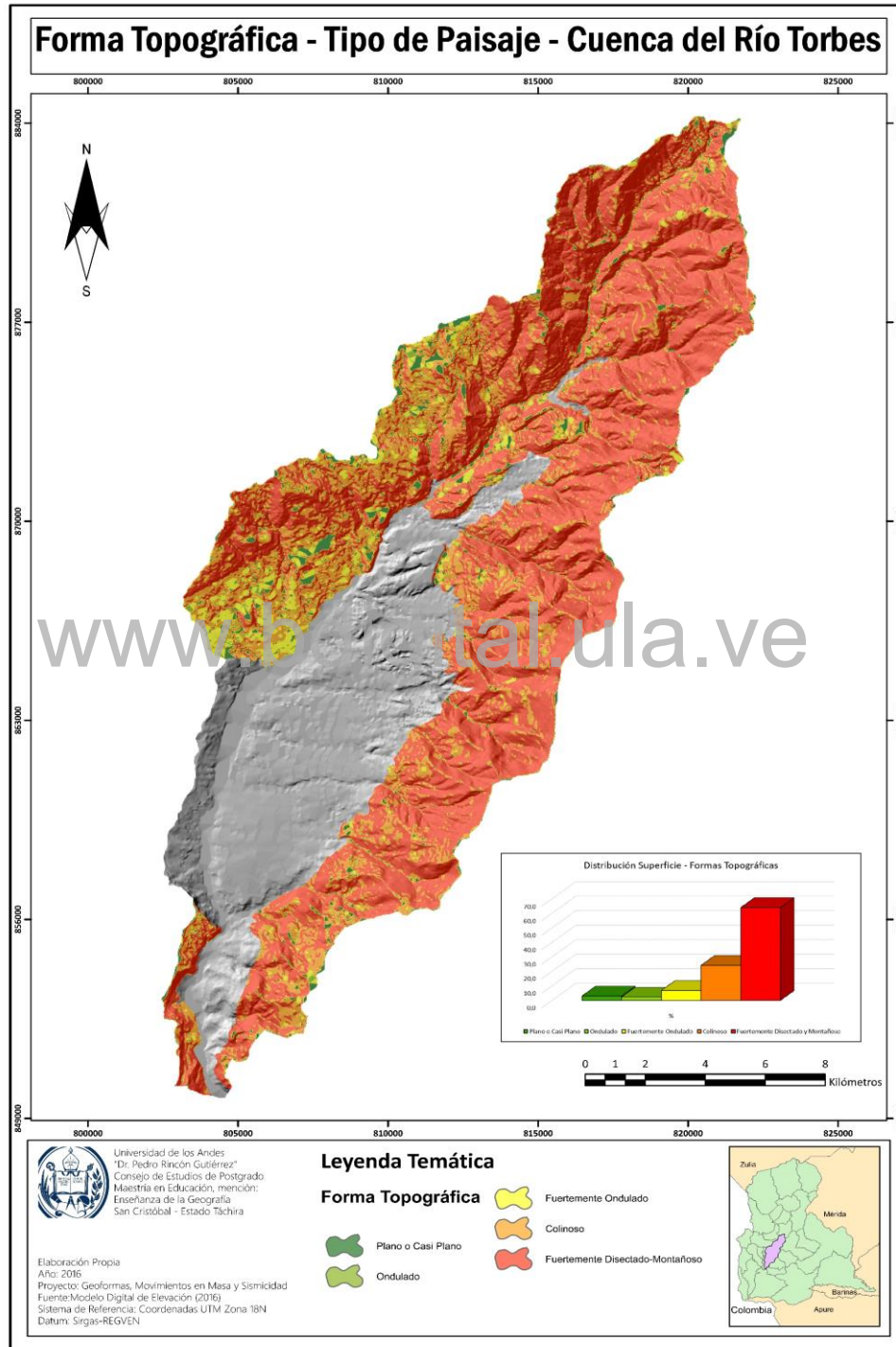
Tipo de Paisaje: Montaña – cuenca del río Torbes



Fuente: Elaboración Propia

Figura N°: 29

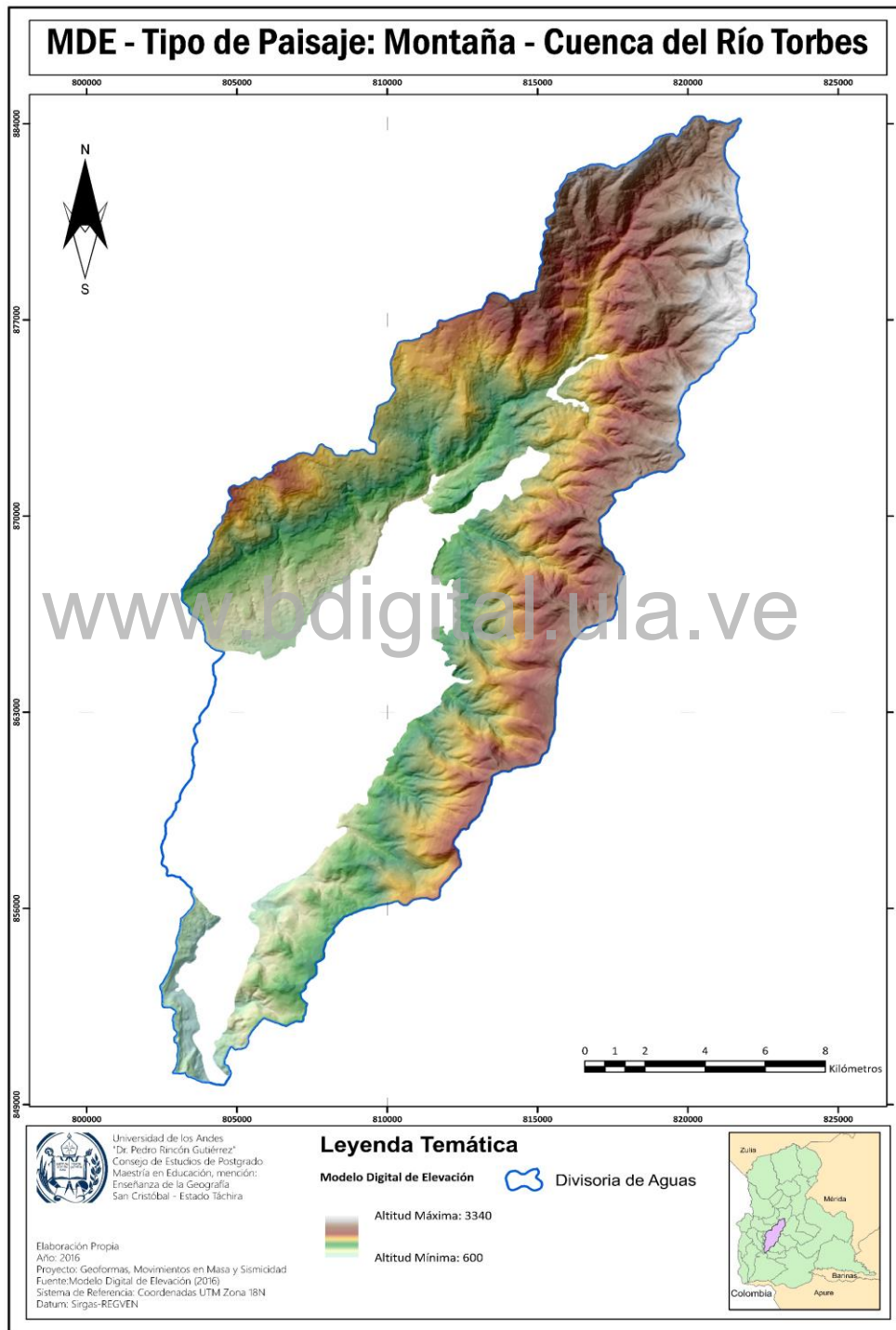
Forma Topográfica – Tipo de Paisaje: Montaña



Fuente: Elaboración Propia

Figura N°: 30

Modelo Digital de Elevación – Tipo de Paisaje: Montaña



Fuente: Elaboración Propia

En lo concerniente a la densidad de drenaje, tiene un valor de 0,82 Km/Km², por tanto, según Delgadillo y Páez (2008) es Baja, lo que sugiere según Linsley (1977) y Strahler (2005). Al respecto, es importante que los resultados obtenidos no son los que se esperaban, puesto que autores como Strahler (2005) y Zinck (2012), plantean que, en la mayoría de los casos, geoformas de montaña presentan densidades de drenaje altas por los elevados valores de energía cinética potencial, asociados a atributos como pendientes, formas topográficas, entre otros. Se considera probable que errores derivados de las fuentes de datos disponibles hayan generado estas discrepancias.

Piedemonte

Es el segundo tipo de paisaje más extenso en la cuenca, su superficie aproximada es de 5301,67 ha, que corresponde al 17,4% del área de estudio. Zinck (2012) plantea que es una porción de terreno inclinada al pie de unidades de paisaje más elevadas, que se diferencia de los Lomeríos, por estar compuestas fundamentalmente por materiales de origen Cuaternario. Se ubica como relieve transicional entre las montañas al Este y Noroeste y el valle del río Torbes, constituidos por sedimentos coluvio-aluviales. Se extiende al Este desde el Reventón de las Culebras cerca de Mesa de Aura al Norte, hasta la desembocadura de la quebrada La Blanca en la vertiente izquierda. Presenta una posición dominante con respecto al Valle, aunque es dominado por el paisaje Montañoso al Este de la unidad. Presenta una forma topográfica entre plana y fuertemente ondulada con pendientes que van desde el 2% hasta el 16%, en dirección perpendicular al cauce principal.

Su altitud promedio es de 1002,4 msnm, su altitud máxima 1700 msnm cerca de Mesa de Aura, la mínima 620 msnm en las cercanías del cauce del río Torbes al Sur y la amplitud del relieve es de 73,52 m/Km. Su pendiente promedio es de 10,23%, lo que quiere decir, que es una unidad relativamente plana con pendiente entre onduladas y suaves, tal y como se muestra en la distribución de frecuencia de las formas topográfica de la Figura N°: 31. Su densidad de drenaje es de 1,02 Km/Km², por tanto, es moderada, lo que implica que la acción erosiva es de mediana intensidad, asimismo, se puede inferir condiciones de permeabilidad intermedias, que favorecen mayores contenidos

de humedad en los suelos, al igual que la disminución de energía del relieve lo que conlleva a la deposición de materiales.

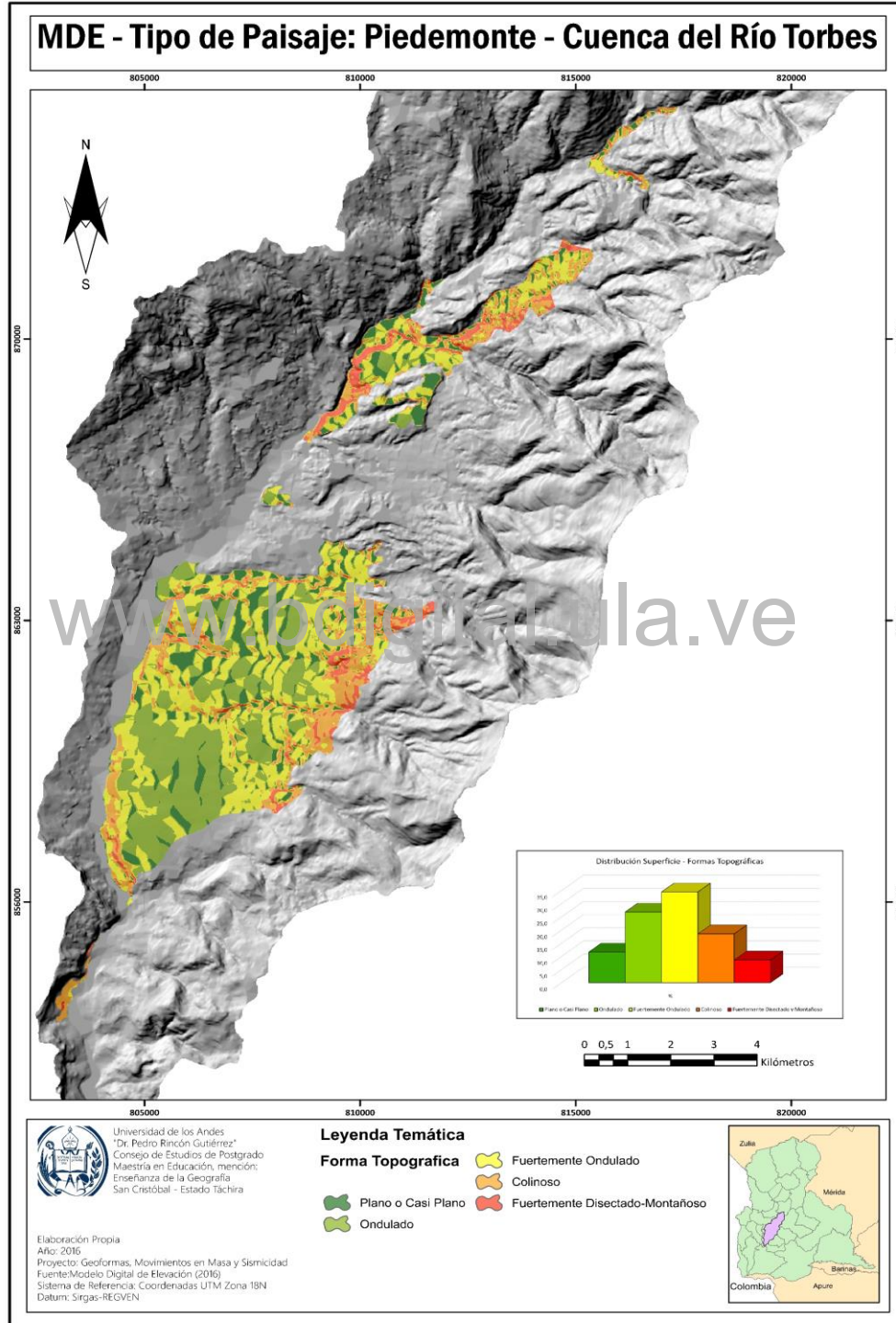
Lomerío

Este Tipo de Paisaje ocupa aproximadamente 3566,06 ha, que corresponde al 11,7% de la superficie total, Zinck (2012) lo define como una porción de terreno quebrada, Schargel (2011), plantea que esta unidad presenta desniveles entre las cimas y los valles adyacentes desde 10 m hasta los 300 m. Ambos autores coinciden que es una combinación de colinas redondeadas y lomas alargadas. En la cuenca, se ubica al Noreste, desde la población de San Rafael de Cordero y Capachito, hasta las Vegas de Táriba, al Oeste de la cuenca en la vertiente izquierda, desde la divisoria de aguas hasta el cauce del río Torbes y se extiende desde el barrio Las Margaritas de Táriba hasta las cercanías del sector Cuesta del Trapiche en los alrededores de la desembocadura de la quebrada La Chucurí, al Sureste, en la margen derecha, desde la desembocadura de la Quebrada La Chucurí hasta la desembocadura del río Torbes.

Su altitud promedio es de 958,8 msnm, su altitud máxima es de 1528,3 msnm y la mínima es de 598,7 msnm, la amplitud del relieve es de 95,54 m/km. Tiene una posición dominante sobre la unidad de paisaje Piedemonte en la margen derecha, en las cercanías de San Cristóbal, también domina al Valle al Este, sobre el cauce del río Torbes. Sin embargo, es dominada por la Montaña al Norte y al Este de la cuenca. Su forma topográfica es colinosa, con pendientes que no superan el 16% (Ver Figura N°: 32). Presente una densidad de drenaje de 2,8 Km/Km², que según Strahler (2005), están asociados a buen drenaje, con una respuesta hidrológica rápida, vinculados a materiales blandos y poco resistentes desde el punto de vista litológico

Figura N°: 31

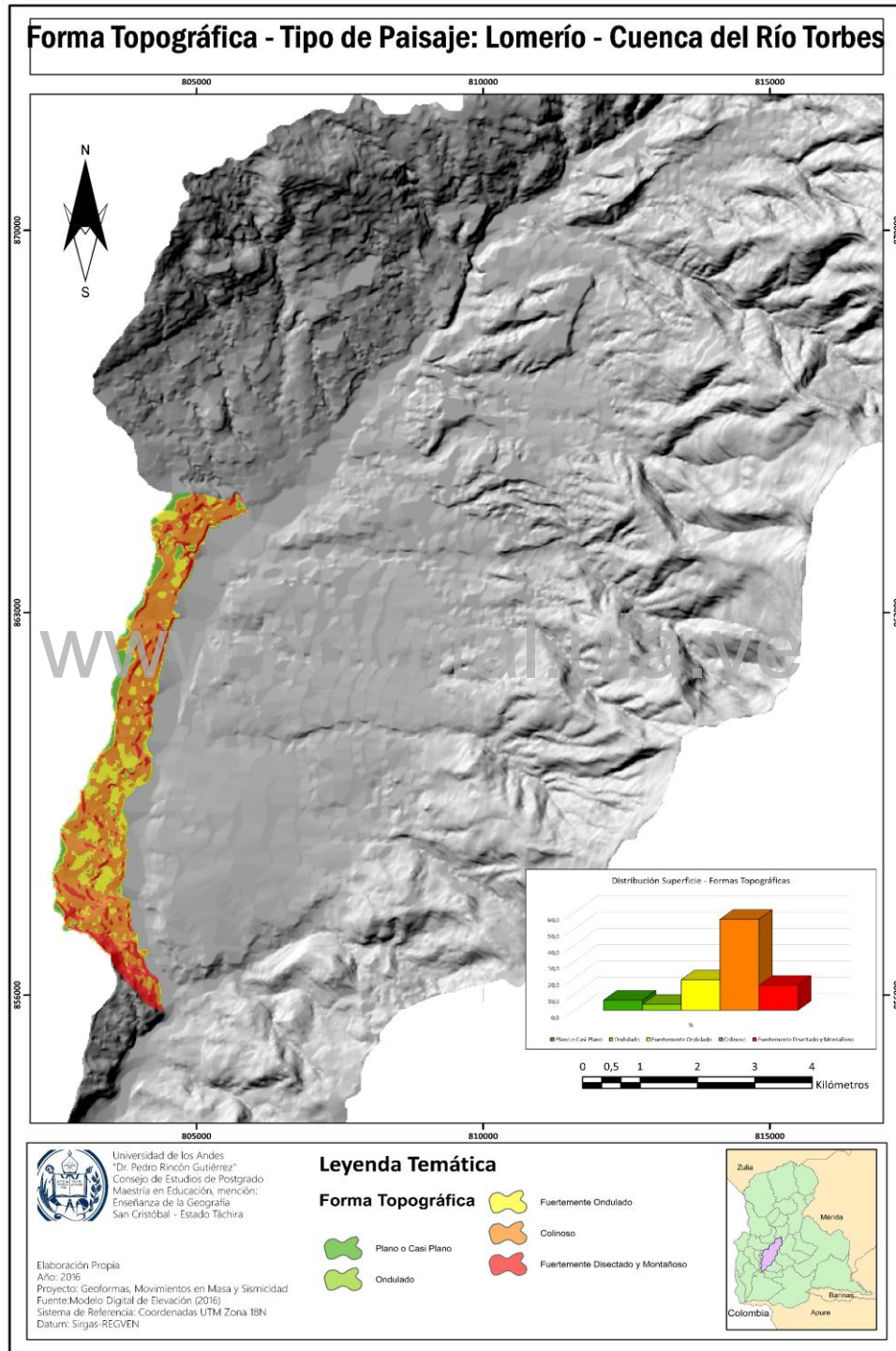
Forma Topográfica – Tipo de Paisaje: Piedemonte



Fuente: Elaboración Propia

Figura N°: 32

Forma Topográfica – Tipo de Paisaje: Lomerío



Fuente: Elaboración Propia

Valle

Es el tipo de paisaje presente en las inmediaciones del cauce del río Torbes, se extiende desde la desembocadura del río en el Quinimarí hasta la población de Cordero. Aguas arriba de esta población no se identifica un valle, sino más bien un entalle fluvial, asociado al trazo principal del Sistema de Fallas de Boconó. Su superficie aproximada es de 644,2 ha, lo que equivale al 2,1% del total del área de estudio. Presenta una altitud promedio de 753,2 msnm, con una máxima de 949 msnm al Norte y una altitud mínima de 580 msnm en la desembocadura del río Torbes al Sur, su amplitud de relieve es de 56 m/Km. Presenta una pendiente promedio de 2,96%, por tanto, se evidencia, que en general es una pendiente plana o casi plana. Se identifica mediante el mapa de sombreado y visitas al campo (Anexo 01) y una terraza baja y una vega.

Es una unidad de paisaje que es dominada por las Montañas al Oeste sobre la Serranía de Capacho y el Piedemonte al Este, y por el Lomerío al Sur de la cuenca, tanto en la margen derecha como izquierda. Su forma topográfica predominante es plana o casi plana con una pendiente máxima del 8%. Su densidad de drenaje es de 3,83 Km/Km², por tanto, se considera alta. Es importante resaltar que, dado que el cauce principal del río Torbes se encuentra en esta unidad, aunado al hecho de ocupar una menor superficie, podría influir en los valores calculados de la densidad de drenaje.

Facies de Tipo de Paisaje

Considerando la escala de información geológica y edafológica disponible, aunado a la importancia de identificar las condiciones locales de las geoformas con la finalidad de comprender sus propiedades y la vinculación de estas con los movimientos en masa. Se dividieron las diversas unidades geomorfológicas a nivel de tipos de paisajes considerando las unidades geológicas delineadas en el mapa geológico de la cuenca y a partir de allí relacionar las delineaciones resultantes con índices de curvatura, características de suelo a nivel de subgrupos y diversos atributos morfométricos.

Siguiendo el planteamiento y secuencia descrita en el párrafo anterior, se combinó la delimitación hecha a nivel de tipos de paisajes con la información a escala 1:50000 de geología disponible. Para este procedimiento, se empleó el geoproceso vectorial intersección en el software ArcGIS 10.4. En la capa vectorial (*.shp) resultante se eliminaron de la tabla de atributos campos que no serían utilizados para el análisis, solamente quedando la información de unidad de tipo de paisaje, formación y nomenclatura geológica, adicionalmente se creó un nuevo campo donde utilizando la herramienta *CALCULATE GEOMETRY*, se calculó el área de cada delineación en hectáreas. Seguidamente, se procedió a aplicar una generalización cartográfica, considerando como unidad mínima cartografiable (UMC), lo planteado por López (2012), quien señala que para un mapa a escala 1:50000 la UMC es de 4 ha, en este sentido y tomando en cuenta que la información base obtenida a partir de Ferrer (1977) se encontraba a esta escala, se empleó la secuencia de comandos *DATA MANAGEMENT TOOLS>GENERALIZATION>ELIMINATE*, que permite agregar polígonos de una superficie determinada a otros a partir del relaciones de vecino más próximo.

A la capa vectorial resultante, se le aplicó un suavizado de bordes con la herramienta *CARTOGRAPHY TOOLS>GENERALIZATION>SMOOTH POLYGON*, una vez cumplidos estos procedimientos se volvió a calcular el área para cada una de las delineaciones, posteriormente se aplicaron los comandos *DATA MANAGEMENT TOOLS>FEATURES>MULTIPART TO SINGLEPART*, para generar un polígono por cada delineación. Una vez se obtuvo la capa, se procedió a generar una máscara por cada delineación para poder extraer la información de la capa Ráster (*.ovr) que contenía los valores de curvatura, la cual se generó aplicando al Ráster del MDE, la función *CURVATURE FUNCTION* a partir de la herramienta *IMAGE ANALYSIS* del software ArcGIS 10.4. Para cortar el ráster se utilizó la secuencia de comandos *SURFACE ANALYST>EXTRACTION>BATCH> EXTRACT BY MASK*, una vez obtenidas las capas Ráster (*.vat) para cada delineación, a cada uno se le calculó el área para cada configuración (Cóncavo – Cóncavo, Cóncavo – Convexo, Cóncavo –

Rectilíneo, Convexo – Cóncavo, Convexo – Convexo, Convexo – Rectilíneo), asignando a cada unidad la configuración predominante.

Una vez completado este paso, se vinculó la información de suelos a cada delineación, generando una capa Ráster (*.ovr) a la que luego se le extraería a nivel de subgrupos los suelos presentes. Para esto se empleó la secuencia de comandos *SURFACE ANALYST>EXTRACTION>BATCH> EXTRACT BY MASK*, que permitió obtener las capas de suelo que luego se vincularon con la capa vectorial (*.shp) que contenía la información de tipo de paisaje, formación geológica e índice de curvatura. En este sentido se consideraron los planteamientos de Barahona (2015) y Peña (2015) respecto a la conformación de las unidades cartográficas: consociación, asociación y unidad indiferenciada de suelos.

Seguidamente se creó una nomenclatura para identificar cada una de las unidades obtenidas, para este sistema se utilizó una combinación de letras mayúsculas y minúsculas para relacionar la unidad según las taxas a la que pertenece de acuerdo a los niveles jerárquicos del sistema de clasificación de las geoformas propuesto por Zinck (2012), igualmente se incorporó en el código información sobre la formación geológica y los suelos presentes en cada delineación tal y como se muestra en el Cuadro N°: 18. Adicionalmente en el Anexo N°: 2, se pueden evidenciar el significado de cada una de las partes del código de nomenclatura. Una vez completado esto, se obtuvo la capa final de facies (Ver Figura N°: 37 y Cuadro N°: 19).

Cuadro N°: 18

Ejemplo de conceptualización del Código de Nomenclatura Facies de Tipo de Paisaje

Código	ADtMFQCvCxGiUhtTepTthTtn	
Geoestructura	A	Cordillera – Sistema Andes
Ambiente	Dt	Mixto – Región Natural: Depresión del Táchira
Tipo de Paisaje	M	Montaña
Formación Geológica	FQ	Formación La Quinta
Curvatura	CvCx	Cóncavo – Convexo
Suelos	GiUhtTepTthTtn	Grupo Indiferenciado Ustoxic Humitropepts, Typic Eutropepts, Typic Tropohumults, Typic Troporthent

Fuente: Elaboración Propia

Cuadro N°: 19

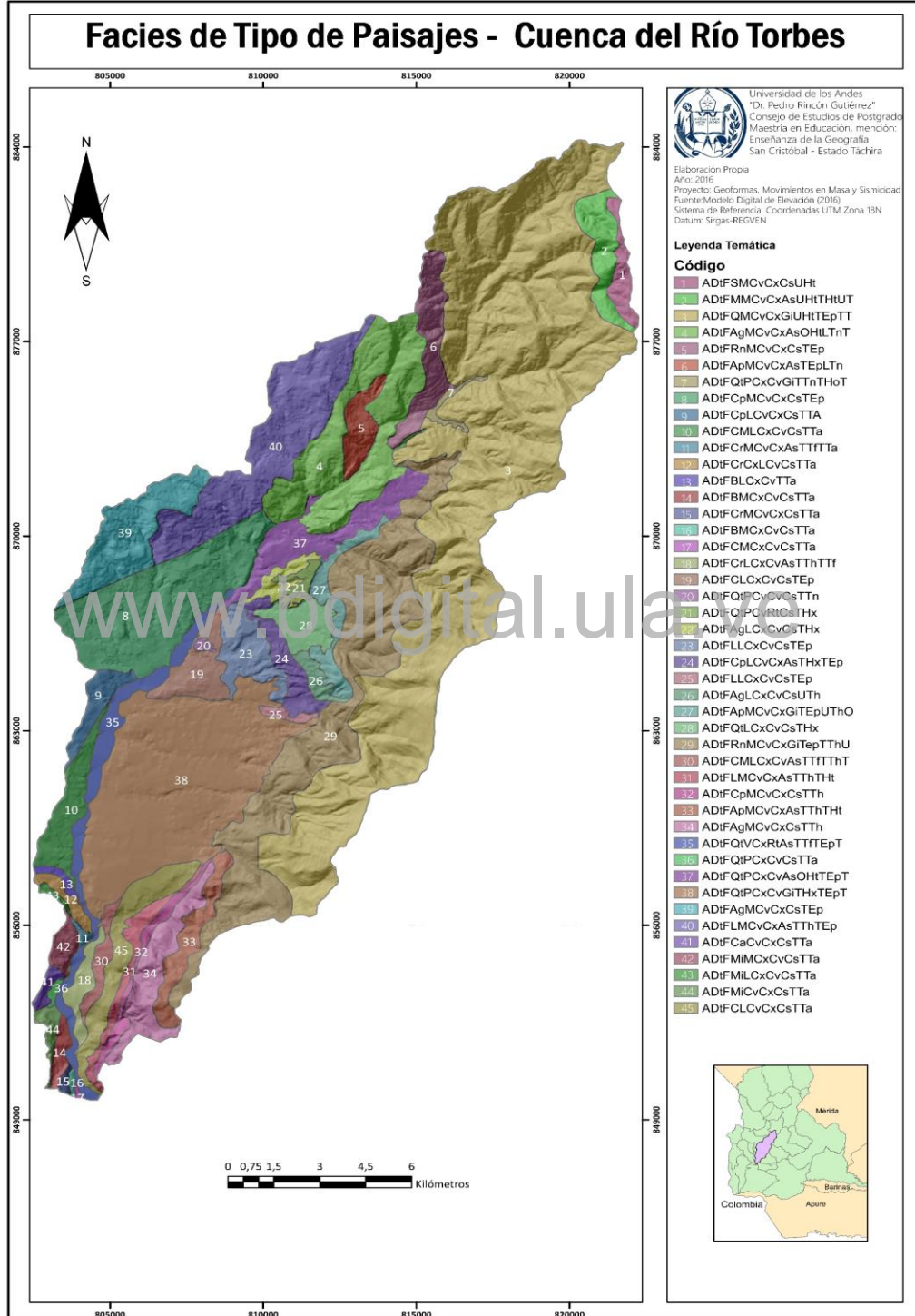
Distribución de Superficie por Facie de Tipo de Paisaje

<i>Facie</i>	<i>Área (ha)</i>	<i>%</i>
ADtFCMLCxvCsTTa	430,809	1,4
ADtFCrCxLCvCsTTa	106,054	0,3
ADtFBLCxvTTa	51,5383	0,2
ADtFCrLCxvAsTThTTf	185,424	0,6
ADtFCLCxvCsTEp	394,35	1,3
ADtFagLCxvCsTHx	167,654	0,6
ADtFLLCxvCsTEp	428,399	1,4
ADtFCpLCvCxAsTHxTEp	317,25	1,0
ADtFLLCxvCsTEp	56,4463	0,2
ADtFagLCxvCsUTh	114,313	0,4
ADtFQtLCxvCsTHx	321,291	1,1
ADtFCMLCxvAsTTfTThTEp	156,644	0,5
ADtFMiLCxvCsTTa	26,5581	0,1
ADtFCLCxvCsTTa	583,292	1,9
ADtFCpLCvCxCsTTa	225,797	0,7
ADtFSMCvCxCsUHT	192,421	0,6
ADtFCrMCvCxAsTTfTTa	28,3069	0,1
ADtFBMCxvCsTTa	105,393	0,3
ADtFCrMCvCxCsTTa	25,0198	0,1
ADtFBMCxvCsTTa	20,2988	0,1
ADtFCMxCvCsTTa	7,85936	0,0
ADtFMMvCxAsUHTThUTh	392,068	1,3
ADtFapMCvCxGiTEpUThOHT	332,542	1,1
ADtFRnMCvCxGiTEpTThUThOHT	3047,96	10,0
ADtFQMvCxGiUHTTEpTThTTn	9282,36	30,5
ADtFLMCvCxAsTThTHT	249,073	0,8
ADtFCpMCvCxCsTTh	194,643	0,6
ADtFapMCvCxAsTThTHT	383,013	1,3
ADtFagMCvCxCsTTh	568,396	1,9
ADtFagMCvCxCsTEp	831,096	2,7
ADtFagMCvCxAsOHTLTnTTh	1740,82	5,7
ADtFLMCvCxAsTThTEp	1652,03	5,4
ADtFCaCvCxCsTTa	65,382	0,2
ADtFMiMCvCxCsTTa	126,459	0,4
ADtFMiCvCxCsTTa	90,2517	0,3
ADtFapMCvCxAsTEpLTn	268,237	0,9
ADtFRnMCvCxCsTEp	510,025	1,7
ADtFCpMCvCxCsTEp	1844,51	6,1
ADtFQtPCvCvCsTTn	23,5878	0,1
ADtFQtPCvRtCsTHx	81,2996	0,3
ADtFQtPCxvCsTTa	29,9413	0,1
ADtFQtPCxvCsAsOHTTEpTHx	663,061	2,2
ADtFQtPCxvCsGiTHxTEpTThTTf	3421,27	11,2
ADtFQtPCxvCsGiTTnTHoTEp	65,8113	0,2
ADtFQtVCxRtAsTTfTEpTTh	643,821	2,1

Fuente: Elaboración Propia

Figura N°: 33

Facies de Tipo de Paisaje



Fuente: Elaboración Propia

Al analizar la información de facies de Tipo de Paisaje, se puede señalar que la delineación que ocupa una mayor extensión en la cuenca del río Torbes es la unidad ADtFQMCvCxGiUHtTEpTThTTn, la cual está constituido por materiales de la Formación La Quinta en paisajes de Montaña, con un perfil topográfico Convexo-Cóncava y compuesto por un Grupo Indiferenciado Ustoxic Humitropepts, Typic Eutropepts, Typic Tropohumults, Typic Troporthent, que ocupa aproximadamente el 30,5% de la superficie total. Igualmente, la unidad ADtFQtPCxCvGiTHxTEpTHtTTf, en un paisaje de Piedemonte, conformada por materiales coluvio-aluviales de origen Cuaternario, con un perfil topográfico Convexo-Cóncavo, formado por un Grupo Indiferenciado Typic Haplumox, Typic Eutropepts, Typic Humitropepts, Typic Tropofluvents, con una superficie estimada de 3421,27 ha, que corresponde al 11,2% del total de la cuenca.

La tercera facie más extensa, corresponde a la unidad ADtFRnMCvCxGiTepTThUThOht, que se asienta sobre materiales de la Formación río Negro en paisaje de Montaña, con un perfil Cóncavo-Convexo y con unas características edáficas correspondientes a un Grupo Indiferenciado Typic Eutropepts, Typic Tropohumults, Ustoxic Tropohumults, Oxic Humitropepts, su superficie aproximada es de 3047,96 ha, que equivalen al 10% del área de estudio. El resto de facies de Tipo de Paisaje, ocupa superficies menores al 6% de la cuenca del río Torbes, sus características se describen en detalle en el Anexo N°: 2.

Patrones de Sismicidad que inciden en la cuenca del río Torbes

Para identificar los patrones de sismicidad que inciden en la cuenca del río Torbes, fue necesario generar un catálogo sísmico para un área de 200 Km alrededor de la cuenca, siguiendo las recomendaciones indicadas en INGEOMINAS (2001), donde plantea que para estudios a nivel semidetallado, es necesario establecer, a partir de datos históricos e instrumentales de localización y magnitud de sismos dentro del área de interés, para precisar las fuentes sismogénicas, el tiempo de retorno y la atenuación sísmica. El área de 200 km alrededor de la cuenca (Area of Interest AOI), valor

sustentado en la atenuación de las ondas sísmicas con la distancia se generó con el software ArcGIS 10.4, utilizando el geoprocso vectorial *BUFFER*, partiendo de la poligonal de la divisoria de aguas obtenida a partir del MDE.

Para la presente investigación, se solicitó a la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), los datos de localización, fecha, magnitud y profundidad del área de influencia delimitada. La información, contenía sismos de magnitudes superiores a 4, lo que implicaba la búsqueda de información adicional para sismos de menor magnitud, para esto se acudió a la base de datos del WebGIS del USGS, donde a partir del mismo AOI anterior, se identificaron sismos con magnitudes entre 2.5 y 4. Cabe señalar que ambos catálogos sísmicos, fueron entregados en formato *.csv, lo que hizo necesario su conversión a capas vectoriales *.shp, para ello se empleó el software ArcGIS 10.4, mediante el menú *DISPLAY XY DATA* que, a partir de las coordenadas tanto de Longitud como de Latitud, fue posible ubicar los epicentros espacialmente.

La información suministrada tenía SRC diferentes, SIRGAS-REGVEN Geográficas para para los datos suministrados por FUNVISIS y Geográficas WGS 1984 para los datos proporcionados por el USGS, este último fue reproyectado también a SIRGAS-REGVEN Geográficas, para luego a partir del geoprocso vectorial *UNION*, generar una única capa *.shp, para los datos del catálogo sísmico en el área de estudio tal y como se muestra en el anexo N°: 4. Seguidamente, se siguieron los procedimientos sugeridos por INGEOMINAS (2001) y van Westen, Slob, Montoya, Boerboom y Vargas (1997) quienes plantean que para establecer la actividad de la fuente es necesario aplicar la fórmula

$$\log N = A - B \times Ms$$

Donde:

N= Número de sismos anuales que igualan o superan el nivel de referencia de Ms.

A= Parámetro de Tasa Sísmica

B= Parámetro de Tasa Sísmica que indica la actividad sísmica promedio

Ms= Magnitud evaluada de ondas superficiales.

Para obtener los valores de cada una de las variables enumeradas se desarrolló un análisis numérico con el software ILWIS 3.8.5, que inicialmente organiza los sismos de acuerdo con su magnitud y frecuencia para obtener un conjunto de datos que en resumen muestran en el Cuadro N°: 20. Con la totalidad de los datos se calculó una ecuación de regresión utilizando el procedimiento de mínimos cuadrados obteniendo la ecuación de recurrencias de magnitudes: $\text{Log}(N) = 7,14 - 1,06 (M_s)$ con un $R^2 = 0,94$.

Al respecto Sarria (2008) plantea que ésta ecuación permite estimar la recurrencia de las magnitudes, necesaria para la evaluación de la amenaza sísmica local, en este sentido plantea que la variable A, hace referencia al valor máximo de la magnitud esperado localmente. Por su parte B, indica la pendiente de la recta regresión, que representa la proporción entre el número de sismos de magnitud mayor y menor en el área, la cual entre otras cosas permiten identificar la predominancia sísmica y por ende estimar la peligrosidad sísmica.

A partir de esta fórmula y considerando lo planteado por Sarria (2008) y Obregón (2013), se seleccionó como magnitud de ondas superficiales a evaluar el valor de 4,0 ($M_s = 4,0$) ya que habitualmente es a partir de esta magnitud que un sismo, de acuerdo con los autores antes citados, puede generar movimientos en masa. En este sentido, al analizar la ecuación de regresión planteada, se evidencia (Ver Figura N°: 34) que para el período estudiado (1966-2016), hubo un mayor número de eventos sísmicos de magnitudes mayores a 4.0 (1482), que eventos de menor magnitud (247).

Con la fórmula de recurrencias de magnitudes obtenida se estimó el número de sismos con magnitud superior a $M_s = 4$ para el lapso de tiempo que contempla el catalogo elaborado. Con esta información se estimó el número de sismo anuales con una magnitud superior a 4,0 ($M_s = 4,0$) que se estima en 29 eventos. En la Figura N°: 35, se aprecia la variación en el tiempo del número de sismos por encima de $M_s = 4,0$, al respecto se observa que entre la década de los sesenta y setenta, el número de eventos sísmicos fue menor que al resto del período analizado, siendo el año 1969, el que

presentó menor número de eventos superiores a magnitud 4, igualmente durante los años 1992, 2003 y 2015 se presentaron picos de eventos sísmicos de magnitudes altas.

Cuadro N°: 20
Eventos Sísmicos Período 1966-2016

<i>Magnitud</i>	<i>Eventos</i>	<i>Log(N)</i>
3,1	3	3,2370
3,2	4	3,2360
3,3	3	3,2353
3,4	9	3,2330
3,5	19	3,2281
3,6	39	3,2180
3,7	41	3,2071
3,8	61	3,1903
3,9	68	3,1708
4,0	117	3,1351
4,1	161	3,0806
4,2	149	3,0233
4,3	173	2,9455
4,4	166	2,8549
4,5	229	2,6875
4,6	128	2,5551
4,7	114	2,3892
4,8	76	2,2279
4,9	58	2,0453
5,0	37	1,8692
5,1	18	1,7482
5,2	15	1,6128
5,3	12	1,4624
5,4	9	1,3010
5,5	8	1,0792
5,6	2	1,0000
5,7	3	0,8451
5,8	0	0,0000
5,9	1	0,7782
<i>Mayores a 6</i>	6	0,1000

Fuente: FUNVISIS (2016); USGS (2016)

Con la fórmula de recurrencias de magnitudes obtenida se estimó el número de sismos con magnitud superior a $M_s=4$ para el lapso de tiempo que contempla el catalogo elaborado. Con esta información se estimó el número de sismo anuales con

una magnitud superior a 4,0 ($M_s=4,0$) que se estima en 29 eventos. En la Figura N°: 35, se aprecia la variación en el tiempo del número de sismos por encima de $M_s=4,0$, al respecto se observa que entre la década de los sesenta y setenta, el número de eventos sísmicos fue menor que al resto del período analizado, siendo el año 1969, el que presentó menor número de eventos superiores a magnitud 4, igualmente durante los años 1992, 2003 y 2015 se presentaron picos de eventos sísmicos de magnitudes altas.

Igualmente, INGEOMINAS (2001) plantea que, se puede establecer el denominado período de retorno a partir de la fórmula:

$$T = \frac{1}{N}$$

Donde,

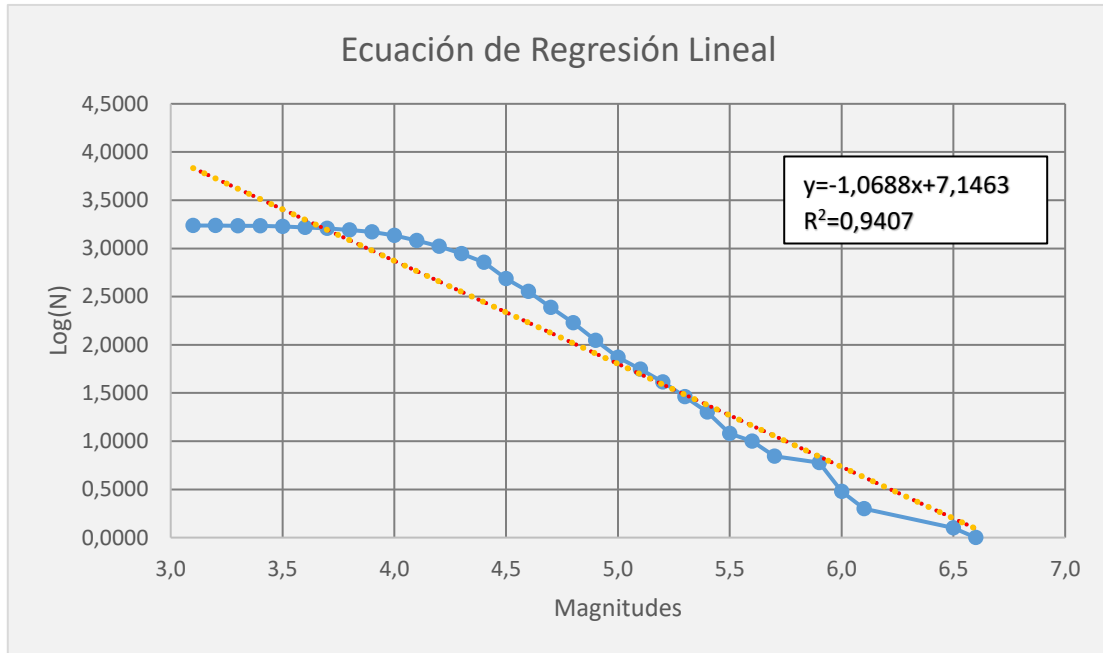
T= Inverso de la Frecuencia Anual y representa el tiempo promedio entre eventos ($M > M_s$)

N= Número de sismos anuales con magnitud superior a M_s .

Utilizando como valor $N=29$ se calculó un período de retorno de 0,03, lo que se interpreta como un lapso corto entre eventos. En función de esto se estimó que en un radio de 200 Km alrededor de la cuenca del río Torbes cada 11 días ocurre un evento sísmico con una magnitud de 4.0 o superior. En este sentido González, Molina, Cedeño y Audemard (2001) plantean que un período de retorno sísmico bajo se puede relacionar con mayor número de eventos en menor tiempo, lo que se asocia habitualmente con menor nivel de riesgo, entendido este como el nivel de daño esperado para un evento destructivo (UNDRO, 1984). Evidentemente, es necesario considerar que en muchos casos estos sismos pueden ser profundos, lo que disminuye sus consecuencias en superficie.

Figura N°: 34

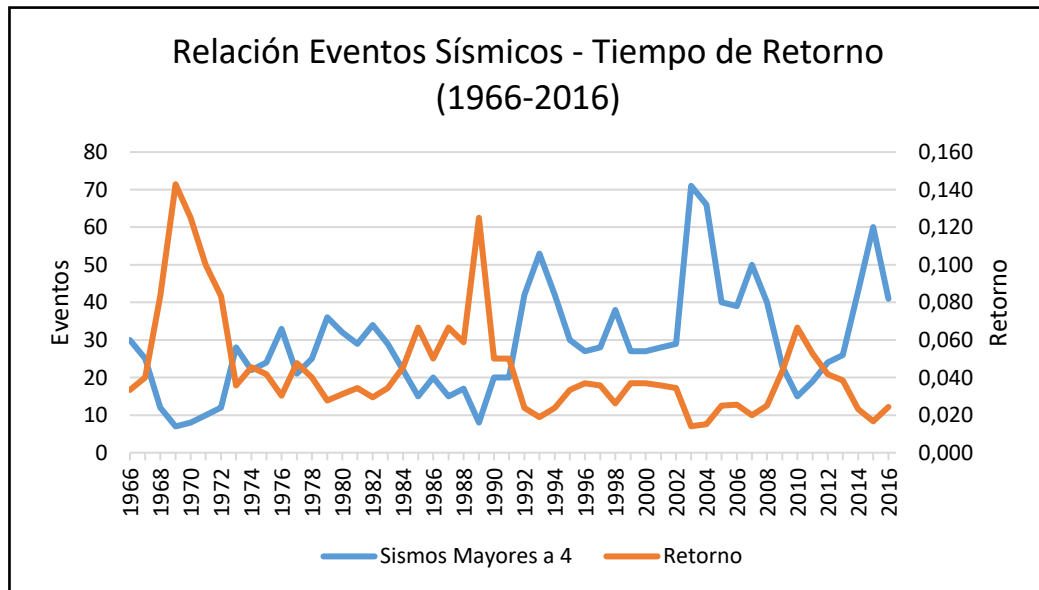
Ecuación de Regresión Sísmica



Fuente: Elaboración Propia

Figura N°: 35

Distribución Temporal Eventos Sísmicos – Tiempo de Retorno (1966-2016)



Fuente: Elaboración Propia

Una vez obtenidos estos datos se pudo establecer la probabilidad de excedencia, es decir, la probabilidad que, a futuro en un número dado de años, ocurra un evento con magnitudes iguales o superiores a Ms, que para el área de estudio es de 4.0 En este sentido, INGEOMINAS (2001) plantea la siguiente fórmula:

$$P = 1 - e^{-\frac{L}{T}}$$

Donde,

P= Probabilidad de Excedencia

L= Período de Diseño

T= Período de Retorno del Evento (Promedio)

Al respecto se obtiene los valores expresados en el Cuadro N°: 21

Cuadro N°: 21

Probabilidad de Excedencia

<i>Período de Diseño</i>	<i>Tiempo de Retorno</i>	<i>Excedencia</i>	<i>Probabilidad de Excedencia (%)</i>
3 Años	0,0300	0,0873	8,73
5 Años	0,0300	0,1413	14,13
10 Años	0,0300	0,2626	26,26
15 Años	0,0300	0,3667	36,67
20 Años	0,0300	0,4562	45,62
30 Años	0,0300	0,5990	59,90
40 Años	0,0300	0,7043	70,43
50 Años	0,0300	0,7819	78,19

Fuente: Elaboración Propia

Al respecto de estos datos, se puede señalar que a medida que el marco temporal a considerar la posibilidad de que ocurra un evento sísmico con una magnitud mayor a 4.0 aumenta. Según autores como Benito (2014) y FUNVISIS (2016), estos cálculos deberían incorporar datos de sismicidad histórica y con retornos promedios de eventos de al menos 200 años, para precisar con mayor eficacia las probabilidades de

excedencia. Del mismo modo, Caturla (2011) sugiere que los cálculos de excedencia deberían realizarse con eventos sísmicos por encima de magnitudes de 6.0, precisa también, que hay que considerar las particularidades de cada región.

En lo concerniente a la atenuación sísmica, según INGEOMINAS (2001) es de suma importancia porque permite identificar las fuentes sismogénicas y además establecer estimados de amenaza sísmica al facilitar el cálculo de los valores de aceleración máxima horizontal a nivel de roca, es decir, estima la velocidad con las que las ondas sísmicas interactuarán con los materiales, estableciendo una relación directamente proporcional entre la velocidad y el nivel de amenaza sísmica. Para Venezuela según FUNVISIS (2016) no existe una fórmula de atenuación generalizada, de allí que sea necesaria calcularla, o utilizar alguna otra desarrollada para condiciones similares, tal es el caso de la planteada por INGEOMINAS (2001).

Por su parte INGEOMINAS (2014), plantea que según los postulados de Donovan y MacGuire, se pueden estimar aceleraciones máximas esperadas a nivel de roca para el área de interacción que corresponde a las Placas Sudamericana, Nazca y Caribe, mediante el procedimiento:

$$a = 1320 e^{0.58(m)} * (r + 25)^{-1.520}$$

Donde,

a= Aceleración Máxima Horizontal a nivel de roca (cm/seg²)

m= Magnitud de Onda Superficial (Ms)

r= Distancia a la falla (Km)

A diferencia de los patrones de sismicidad anteriores, la aceleración máxima horizontal (AMH) puede representarse espacialmente a partir de una serie de procedimientos de interpolación. Para esto fue necesario primero elaborar una capa vectorial (*.shp) de las estructuras geológicas (fallas) presentes en un radio de 200 Km alrededor del área de estudio. Esta capa se generó a partir de dos fuentes de datos. La primera fue una capa vectorial facilitada por el IVIC, que contenía la vectorización de

la Hoja Norte del Mapa Geológico de Venezuela a escala 1:750000 realizado por el USGS, en colaboración con la Escuela de Geología y Minas de la Universidad Central de Venezuela y FUNVISIS. La segunda fuente, fue la base de datos del WebGIS del Servicio Geológico Colombiano, donde se obtuvo la capa vectorial de las estructuras geológicas de Colombia a escala 1:5000. Ambos mapas fueron reproyectados al SRC UTM SIRGAS-REGVEN 18N, luego se unieron mediante el geoprocso vectorial *UNION* del software ArcGIS 10.4, generando una nueva capa vectorial de fallas en formato (*.shp)

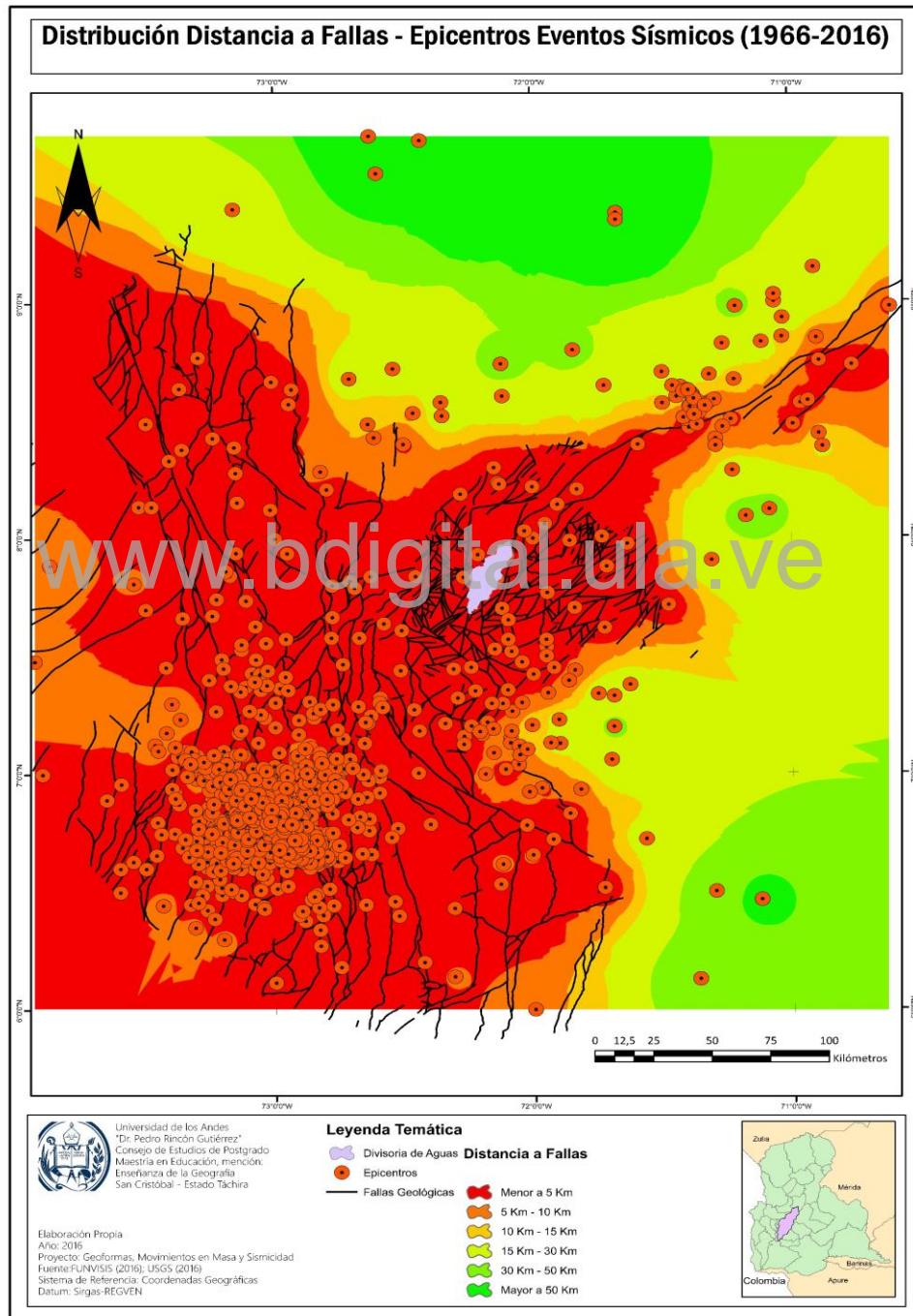
Posteriormente, se cargó el mapa de puntos en formato vectorial (*.shp), que contenía la información de localización de epicentros y magnitudes del catálogo sísmico del área alrededor de la cuenca (200 Km). Seguidamente y mediante la secuencia *ARCTOOLBOX > ANALYSIS > PROXIMITY > NEAR*, se calculó la distancia de cada epicentro a la falla más cercana de la capa de estructuras geológicas, generando un campo en la tabla de atributos de la capa del catálogo, éste valor se encontraba en m y posteriormente se convirtió a Km, empleando la herramienta *FIELD CALCULATOR*. Una vez hecho esto, se interpolaron estas distancias para obtener un Ráster (*.ovr) (Ver Figura N°: 36), mediante las herramientas *SPATIAL ANALYST TOOLS > INTERPOLATE > IDW*, seleccionando como tamaño de la celda de salida 20. Con este ráster se obtuvo la información de distancia a la falla (r), necesaria para el cálculo de la AMH.

Asimismo, se generó mediante la secuencia *SPATIAL ANALYST TOOLS > INTERPOLATE > IDW* un mapa interpolado de las magnitudes para el área de estudio, a partir de la capa de puntos del catálogo sísmico (Ver Figura N°: 37); con esto se obtuvo la variable (m) de la fórmula de AMH. Posteriormente, mediante la herramienta *MAP ALGEBRA > RASTER CALCULATOR*, se aplicó la fórmula de aceleración máxima horizontal, obteniendo un ráster (*.ovr) con la información de la aceleración máxima horizontal a nivel de roca (AMH) para el búfer alrededor de la cuenca (Ver Figura N°: 38). Los resultados de este proceso muestran que para el área de estudio las

aceleraciones mínimas están en el orden de los 15 cm/seg², y las máximas están aproximadamente en 393,1 cm/seg².

Figura N°: 36

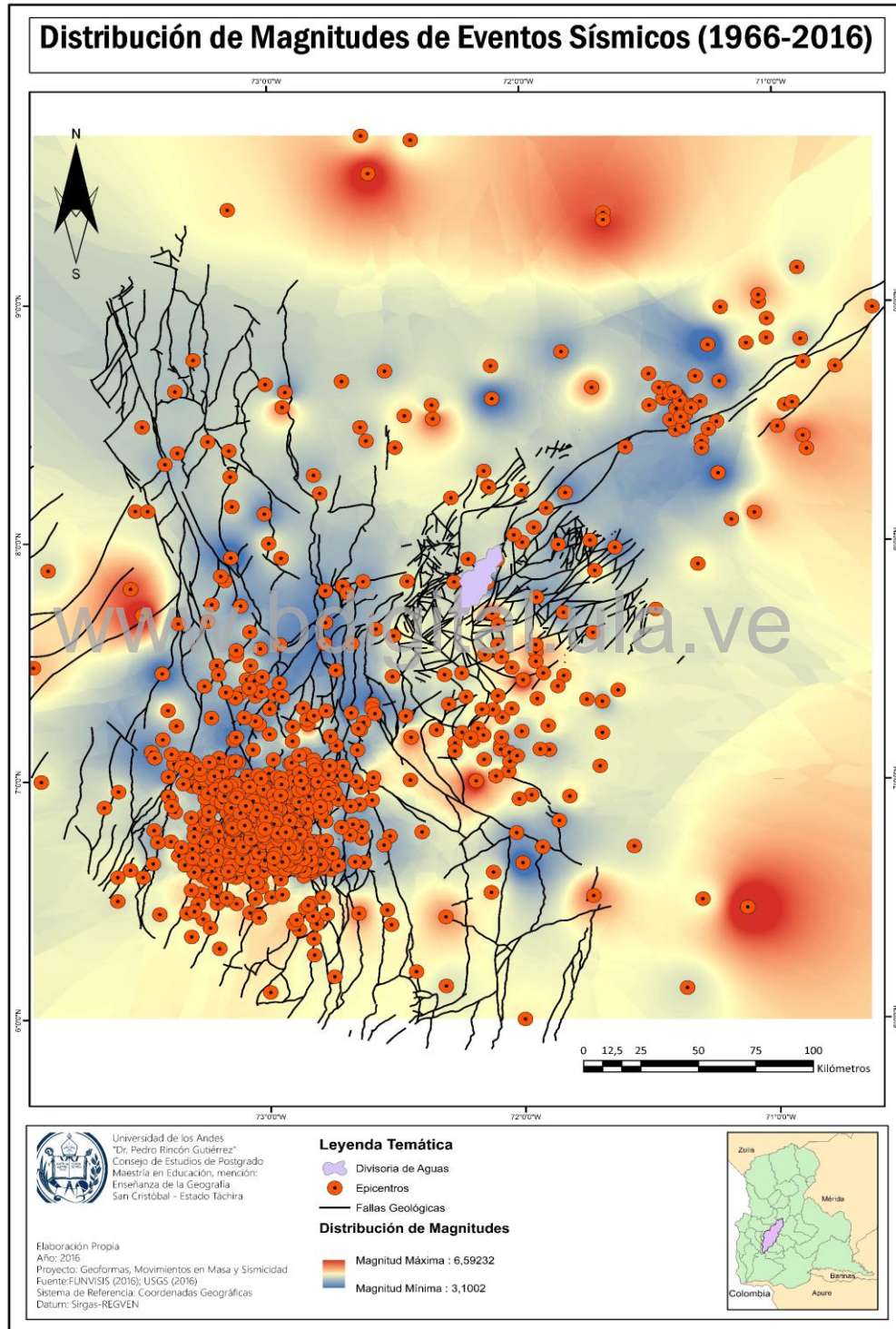
Relación Distancia a Fallas – Epicentro – Catálogo Sísmico (1966-2016)



Fuente: FUNVISIS (2016); USGS (2016)

Figura N°: 37

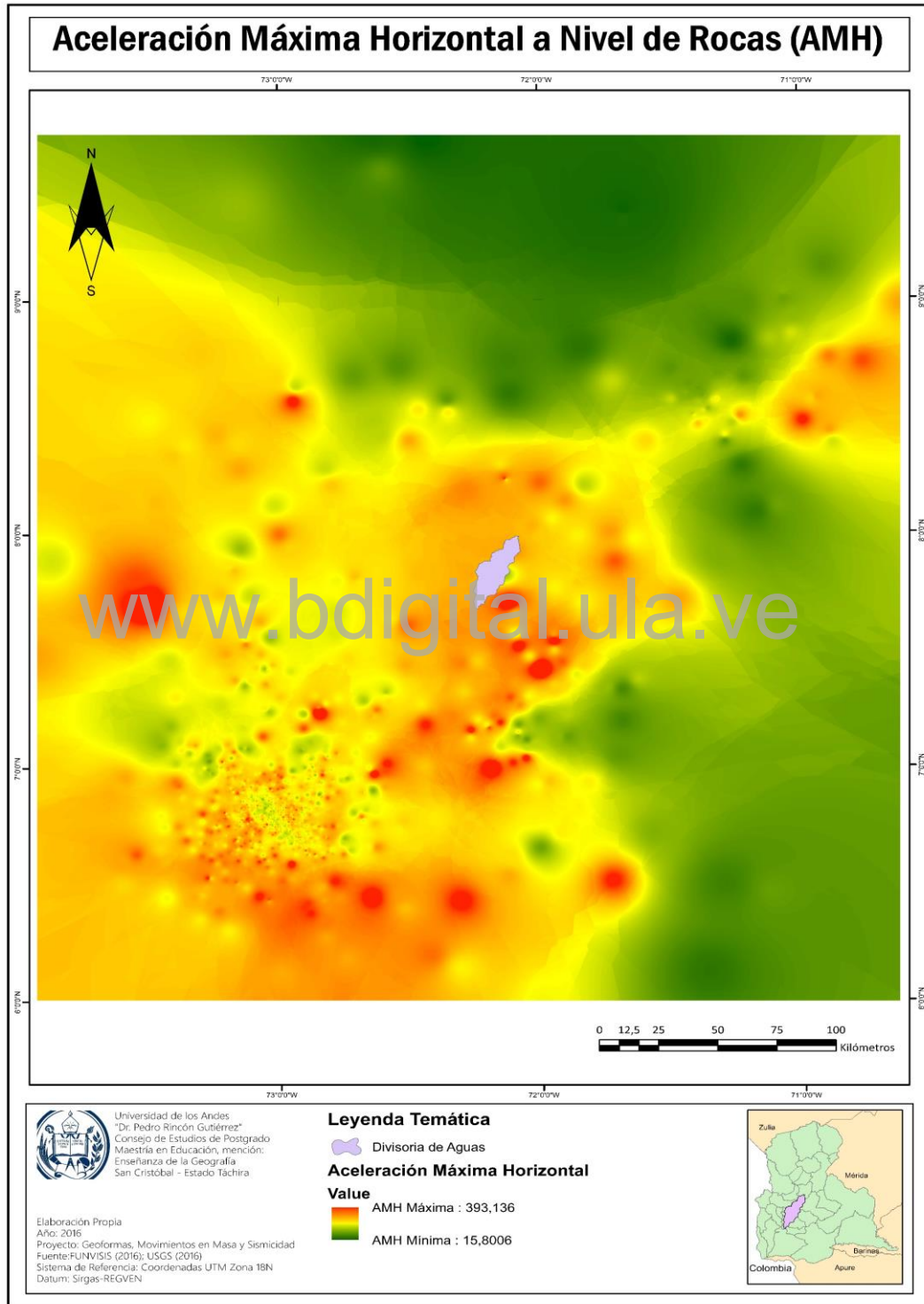
Distribución de Magnitudes de Eventos Sísmicos (1966 – 2016)



Fuente: Elaboración Propia

Figura N°: 38

Distribución de la Aceleración Máxima Horizontal a Nivel de Roca



Fuente: Elaboración Propia

Al analizar estos resultados para la cuenca del Torbes (Ver Figura N°: 39), se evidencia que las áreas con mayor aceleración, se encuentran hacia el Norte y al Sur de la cuenca. En las isosistas de aceleración se aprecia que, en las cercanías de la población de Cordero, en el área en que el trazo principal de la Falla de Boconó cruza en sentido SE-NO, presentan aceleraciones cercanas a los 140 cm/seg². Igualmente, al Sur de la cuenca, se presenta este rango de aceleración, en las inmediaciones del nacimiento de la Quebrada Chucurí sobre la Serranía de la Maravilla. Finalmente, al Este de la cuenca, cerca de la población de Capachito, se encuentran los menores valores de aceleración máxima horizontal sobre los 60 cm/seg².

Amenaza Sísmica

INGEOMINAS (2001), plantea que el término amenaza sísmica se refiere al nivel de probabilidad de ocurrencia de un evento con una magnitud que pueda causar daño. Por tanto, se debe estimar de manera cualitativa esta probabilidad, lo cual se obtiene a partir del análisis de los datos de la aceleración máxima horizontal. Estos datos, permiten inferir isocintas de aceleración que muestran zonas homogéneas de AMH que permitió generar análisis posteriores a susceptibilidad a movimientos en masa asociados a sismicidad. Al respecto INGEOMINAS (2011), plantea que, para estimar la amenaza sísmica, se debe utilizar una escala que use como referencia la gravedad terrestre, por tanto, fue necesario convertir los valores de cm/seg² a m/seg², para de esta forma calcular la aceleración como fuerzas G, (Ver Cuadro N°: 22).

Cuadro N°: 22

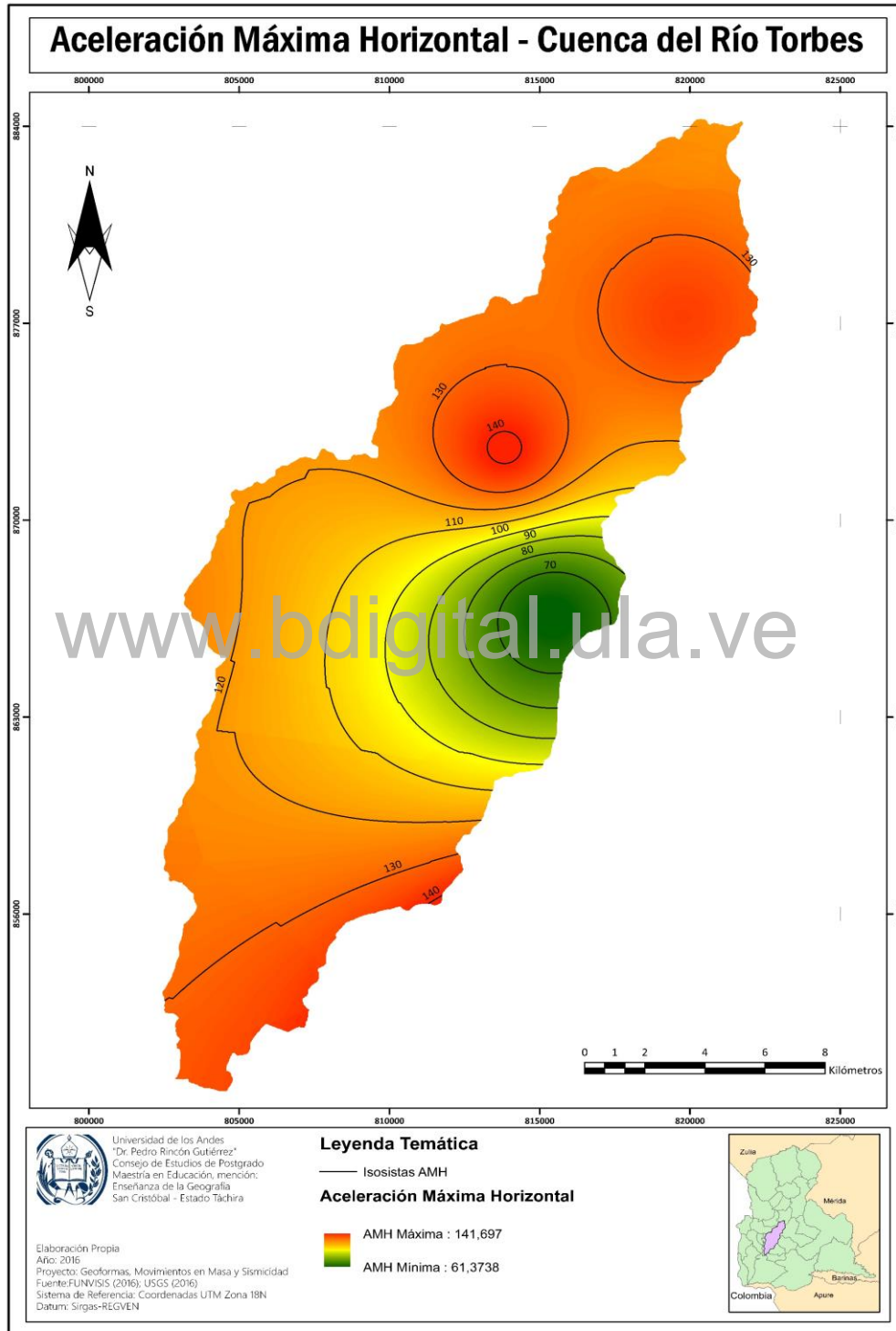
Distribución de la Amenaza Sísmica según la Fuerza de Gravedad

<i>Nivel de Amenaza</i>	<i>Velocidad Máxima Horizontal (m/s²)</i>	<i>Fuerza G</i>
<i>Muy Alta</i>	Mayor a 2,47	0.3
<i>Alta</i>	Entre 0,98 y 1,96	0.2
<i>Moderada</i>	Entre 0,5 y 0,98	0,1
<i>Baja</i>	Entre 0,09 y 0,5	0,05
<i>Muy Baja</i>	Menor a 0,09	0,01

Fuente: INGEOMINAS (2011)

Figura N°: 39

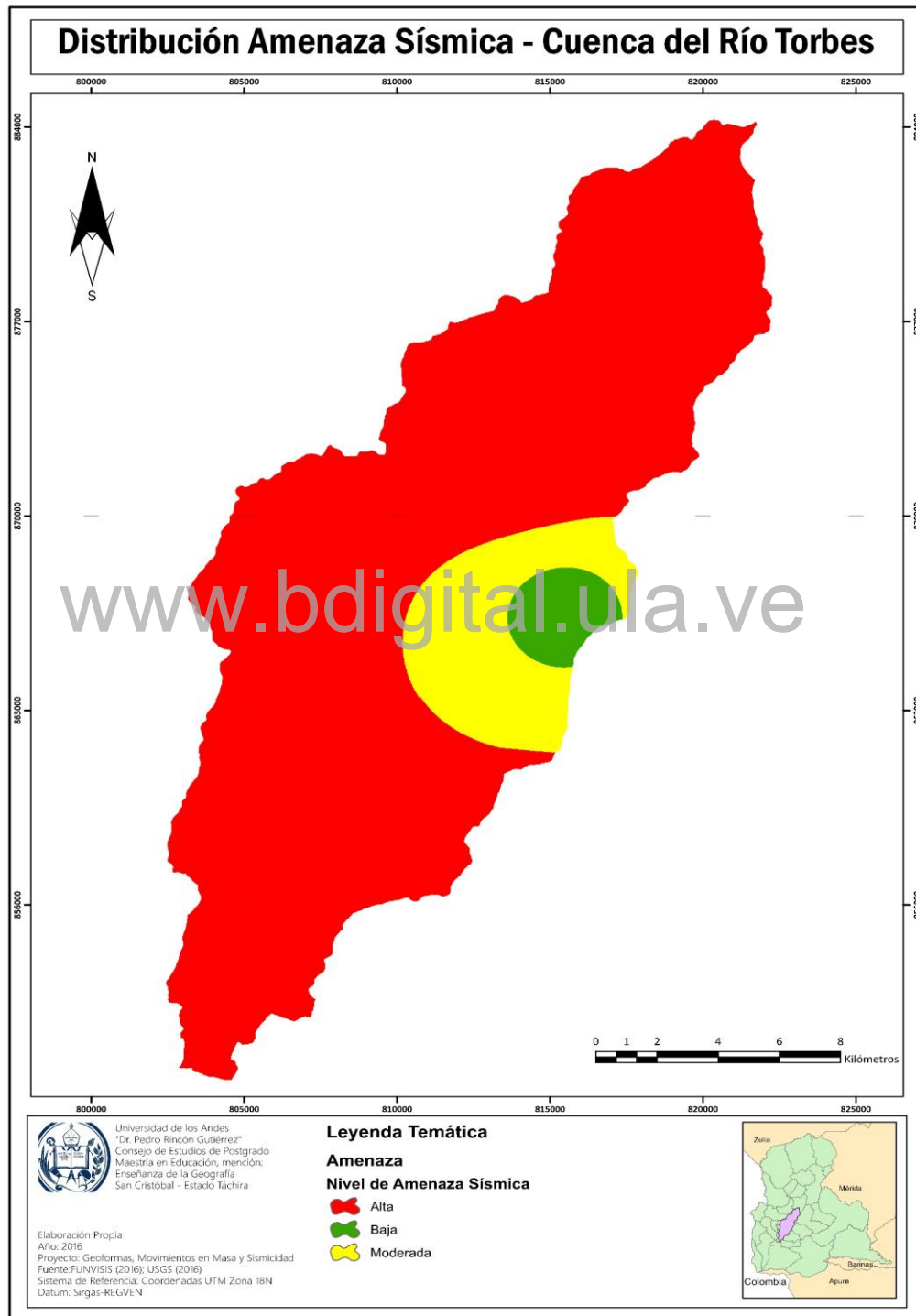
Distribución Máxima Horizontal a Nivel de Roca – cuenca del río Torbes



Fuente: Elaboración Propia

Figura N°: 40

Nivel de Amenaza Sísmica de la cuenca del río Torbes



Fuente: Elaboración Propia

Para establecer estos valores de referencia en el área de estudio, se utilizó la herramienta *MAP ALGEBRA > RASTER CALCULATOR* sobre el Ráster (*.ovr) de Atenuación Sísmica, dividiendo los valores por 100 para obtener la AMH en m/seg^2 , seguidamente, mediante la secuencia *SPATIAL ANALYST TOOLS > RECLASS > RECLASSIFY*, se generó el Ráster en formato (*.vat) del nivel de Amenaza Sísmica para la cuenca del río Torbes (Ver Figura N°: 40). En este mapa se evidencia que el área de estudio tiene un nivel de amenaza alto, excepto al Oeste donde se concentra los niveles de Amenaza Moderado y Bajo, por tanto, se infiere que la cuenca puede sufrir daños a causa de eventos sísmicos y por asociación su nivel de riesgo sísmico (Pérdidas materiales, humanas y ambientales) es elevado.

Inventario de Movimientos en Masa

Para generar un inventario de movimientos en masa, se requiere un conjunto de datos cartográficos que permitan la identificación y ubicación de las cicatrices que dejan en la superficie el desplazamiento de los materiales. En este sentido, la fuente más común de estos datos, son las imágenes satelitales las cuales permiten, desarrollar una serie de análisis a partir de la longitud de onda que reflejan o emiten los materiales de la superficie, al interactuar con la energía lumínica que proviene del sol o del propio sensor. Para el presente trabajo, a partir de una clasificación No Supervisada, elaborada con el software ERDAS 2015, ENVI 5.0 y ArcGIS 10.4 se identificaron coberturas considerando los criterios planteados por el Sistema CORINE LANDCOVER (Copernicus – EEA, 2012), tal como fue planteado y discutido en la descripción físico-natural.

Al procesar la imagen del satélite SPOT 5 del 10 de Enero de 2010 suministrada por el IVIC, una de las coberturas obtenidas fue la de tierras desnudas o degradadas (Ver Figura N°: 41), la cual, al ser interpretada, mostró evidentes imprecisiones y errores en la clasificación de los píxeles lo que limitó diferenciar y discriminar los movimientos en masa. Esta situación tiene su origen en el análisis digital previo de la imagen, que dificultó obtener para cada pixel el valor de reflectancia debido a la composición de bandas (*Layer stack*) de la imagen SPOT disponible.

Utilizando como soporte esta primera delimitación y dada la importancia de generar un inventario de movimientos en masa, se profundizó el análisis, empleando imágenes con mayor resolución espacial (0,5 m). En este sentido, se consideró oportuno utilizar el procesamiento visual y desarrollar una vectorización en pantalla de las cicatrices utilizando como referencia un mosaico de imágenes capturadas entre el año 2014 y 2016, por el satélite WorldView-3, sin información espectral, elaborado a partir de la API de Google Earth, mediante el programa SAS Planet 1511.

Para este proceso, se creó una capa vectorial, y empleando criterios visuales de interpretación de imágenes satelitales postulados por Chuvieco (2005), así como las pautas sugeridas por Vargas (1997) y Rodríguez (2005) para la identificación de movimientos en masa en fotografías aéreas (color, forma, textura, entre otros), fue posible completar una primera aproximación al inventario de movimientos en masa. Posteriormente, y según lo planteado por Zinck, López, Metternitch, Shresta y Vázquez-Selem (2001), se evaluaron las delineaciones realizadas, con el mapa de pendientes de la cuenca obtenido a partir del MDE.

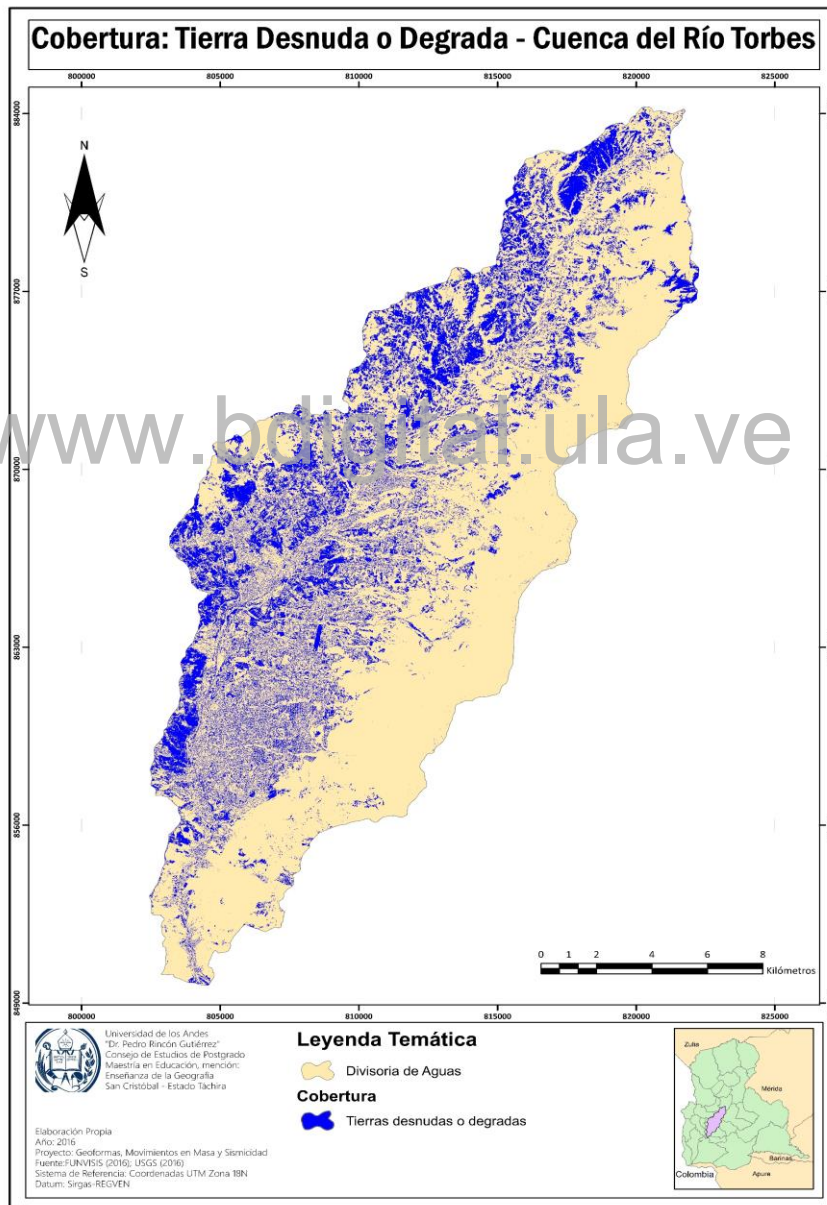
La pendiente regula la actuación de la energía potencial gravitatoria, facilitando o limitando su transformación en energía cinética, por ello influye de manera significativa en la redistribución de la materia en superficie. Cuando los materiales pierden su resistencia y cohesión se desplazan ladera abajo, por este motivo se deduce, que en un movimiento en masa los materiales que se desplazan, deben encontrarse en cierto nivel de pendiente. Al respecto Zinck (2012), considera que, a partir de la categoría de pendiente fuertemente ondulado, la acción de la fuerza de gravedad en conjunto con otros procesos puede originar un movimiento en masa.

Seguidamente, y empleando el modo de visualización análogo del software ArcScene 10.4, en conjunto con lentes 3D, se completó una tercera y última revisión superponiendo la capa vectorial del inventario, al mosaico Google Earth, visualizando el comportamiento altitudinal de la cuenca a partir del MDE, lo que permitió ajustar los límites de los movimientos en masa. Una vez generado y evaluado el inventario de movimientos en masa, es evidente (Ver Figura N°: 42), que su distribución no es

uniforme dentro del área de estudio, se aprecia una concentración al Norte de la cuenca en dos secciones, una en la margen derecha, entre los sectores Loma de los Negros y Casa del Padre, la otra entre Mesa de Aura y el Barrancón de los Rosales en la margen izquierda.

Figura N°: 41

Mapa de Cobertura: Tierra desnuda o degradada – cuenca del río Torbes



Fuente: Elaboración Propia

Una segunda área donde se concentran los procesos de remoción en masa, es al Este de la cuenca, entre el Sector las Guamas prolongándose hacia el Sur en una franja que se extiende con una alta densidad de eventos hasta el sector El Rodadero. Hacia el Oeste y al Sur de la cuenca se encuentran de forma dispersa algunos movimientos, resaltando por su extensión, los que se encuentran en la cercanía de la desembocadura de la Quebrada La Chucurí, hacia la vertiente derecha de la cuenca, cerca de los sectores Sabaneta y El Paraíso, así como uno al Este en las cercanías del Sector Loma de Pánaga y otro movimiento en las inmediaciones del Barrio La Invasión, en el Sector El Cúcharo.

Es importante señalar que, para efectos del presente trabajo, se consideró la posibilidad de completar un conjunto de salidas al campo, para verificar los movimientos en masa identificados a partir de herramientas de percepción remota. En este sentido, no fue posible completarlas dada los inconvenientes logísticos presentadas, lo que impidió identificar su condición (activo, suspendido o inactivo), igualmente por las limitaciones (resolución espectral, valores de reflectancia, entre otros) que presentaron los productos de teledetección, no se desarrolló tampoco una aproximación a la tipología.

Una vez generado el inventario de movimientos en masa se procedió, a evaluar la susceptibilidad de las unidades geomorfológicas presentes en la cuenca del río Torbes, a partir de los criterios planteados por Pineda (2008) y Pineda, Elizalde y Vilorio (2011). Para esto se aplicó la fórmula del Índice de Densidad de Cicatrices de Movimientos en Masa, que permite evaluar el nivel de susceptibilidad de cada unidad geomorfológica a desplazarse (Ver Cuadro N°: 23).

$$IDM = \left[\frac{\left(\frac{Nd}{NT} \right)}{\left(\frac{S_{ftp}}{S_{ae}} \right)} \right]$$

Donde,

IDM= Índice de densidad de cicatrices de Movimientos en Masa

N_d = Número de cicatrices en la facie de Tipo de Paisaje

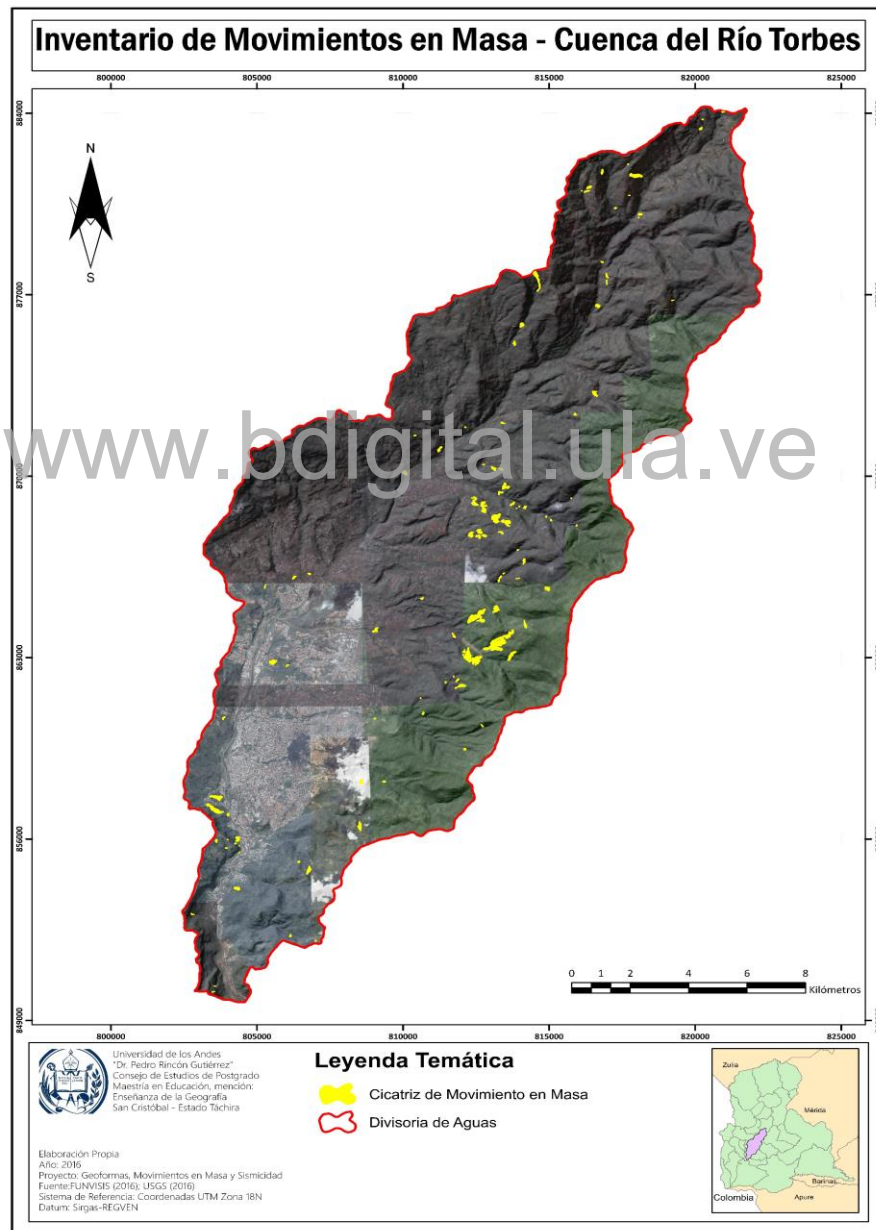
N_T = Número total de cicatrices en el área de estudio

S_{Ftp} = Superficie de la facie de Tipo de Paisaje

S_{ae} = Superficie total del área de estudio.

Figura N°: 42

Inventario de Movimientos en Masa



Fuente: Elaboración Propia

Para obtener, el número de cicatrices en la facie de Tipo de Paisaje, se utilizó la herramienta *JOIN* del software ArcGIS 10.4, donde se relacionó la localización espacial del movimiento en masa con las unidades geomorfológicas delimitadas, igualmente se seleccionó la utilidad de efectuar un conteo de eventos, que permitió obtener el número de movimientos en masa por cada por cada unidad cartográfica. Cabe mencionar que según lo planteado por Pineda (2008) en los casos donde un movimiento en masa este sobre dos unidades geomorfológicas distintas, el procedimiento para el conteo fue “incorporar la cicatriz a aquella unidad donde ocupe una mayor superficie (p. 92)”, en función de esto, se le indicó al software que en estos casos no contar la cicatriz dentro del campo *COUNT*, y posteriormente se efectuar un control visual por cada uno de los movimientos en masa que se encontraban en esta situación, sumando manualmente cada uno a la facie correspondiente.

Cuadro N°: 23

Clases de Susceptibilidad en función del Índice de Densidad de Movimientos en Masa (IDM)

<i>Susceptibilidad</i>	<i>IDM</i>
<i>No Susceptible</i>	< 0,65
<i>Ligeramente Susceptible</i>	0,65 – 1
<i>Moderamente Susceptible</i>	1 – 1,75
<i>Altamente Susceptible</i>	1,75 – 2,5
<i>Muy Altamente Susceptible</i>	> 2,5

Fuente: Pineda (2008; p. 145)

Seguidamente, dentro de la tabla de la capa vectorial (*.shp) de facies de Tipo de Paisaje se creó un campo denominado *IDM*, y a partir de la herramienta *FIELD CALCULATOR* se calculó el valor del índice para cada delineación, para luego identificar cualitativamente el nivel de susceptibilidad de cada facie (Ver Cuadro N°: 24). Es importante señalar, que el índice establece una relación entre el número de cicatrices y la superficie de cada unidad con el total de movimientos en masa y el área que ocupa, al respecto Pineda, Elizalde y Vilorio (2011) infieren que aquellas unidades

que presentan mayor densidad de cicatrices son más susceptibles a experimentar movimientos en masa, hecho que se evidencia al observar la Figura N°: 43.

Cuadro N°: 24

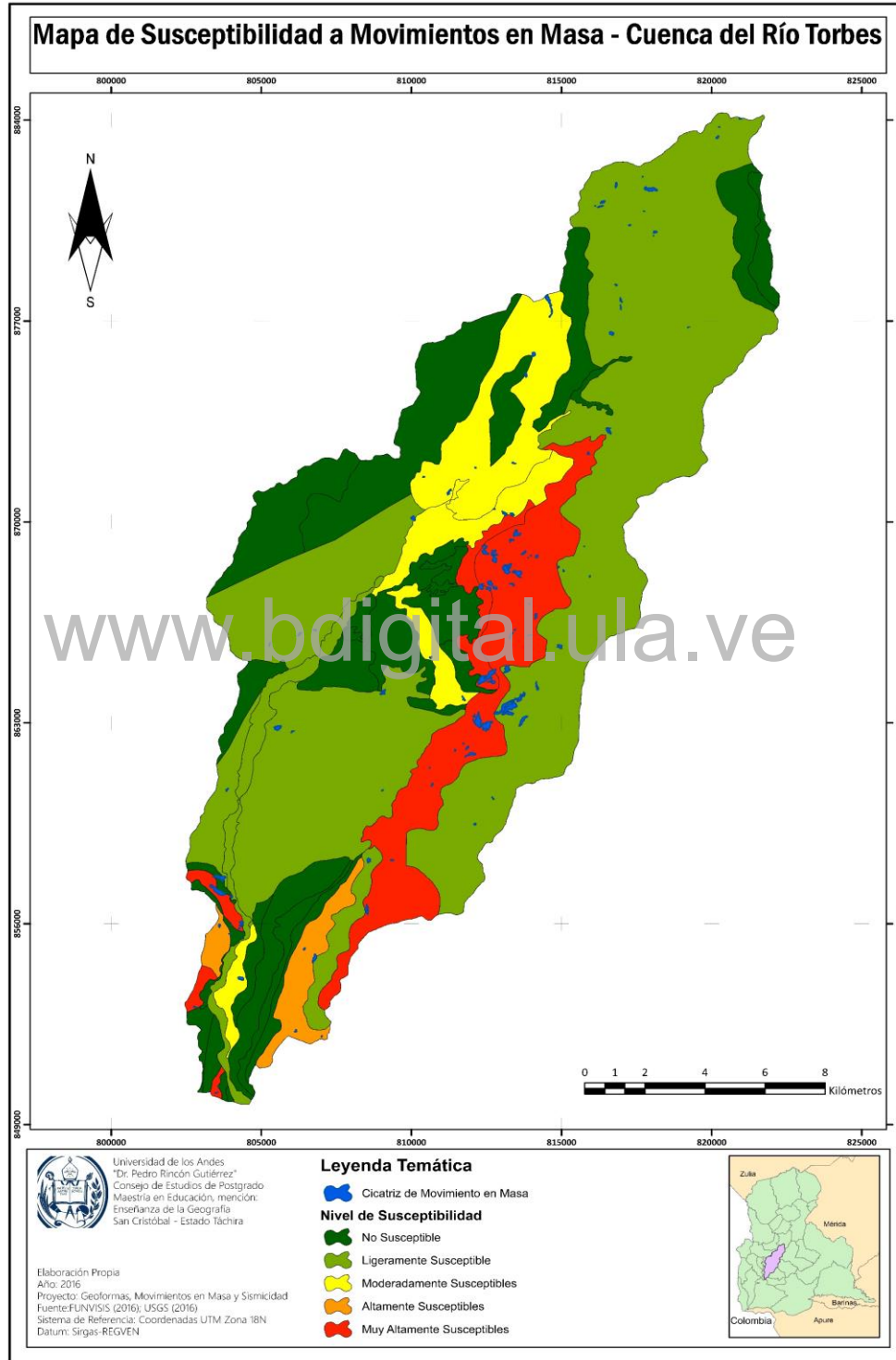
Índice de Densidad de Movimientos en Masa – Facies de Tipo de Paisaje de la cuenca del río Torbes.

<i>Código Unidad</i>	<i>Conteo</i>	<i>IDM</i>	<i>Nivel de Susceptibilidad</i>
ADtFCrMCvCxCsTTa	2	20,29	Muy Altamente Susceptibles
ADtFCrCxLCvCsTTa	6	14,36	Muy Altamente Susceptibles
ADtFCaCvCxCsTTa	1	3,88	Muy Altamente Susceptibles
ADtFApMCvCxGiTEpUThO	5	3,82	Muy Altamente Susceptibles
ADtFRnMCvCxGiTEpTThU	39	3,25	Muy Altamente Susceptibles
ADtFMiMCvCxCsTTa	1	2,01	Altamente Susceptibles
ADtFAgMCvCxCsTTh	4	1,79	Altamente Susceptibles
ADtFCpLCvCxAsTHxTEp	2	1,60	Moderadamente Susceptibles
ADtFQtPCvCxAsOHITepT	4	1,53	Moderadamente Susceptibles
ADtFCrLCxvAsTThTf	1	1,37	Moderadamente Susceptibles
ADtFAgMCvCxAsOHILTnT	8	1,17	Moderadamente Susceptibles
ADtFQMCvCxGiUHITepTT	36	0,98	Ligeramente Susceptible
ADtFApMCvCxAsTThTTh	1	0,66	Ligeramente Susceptible
ADtFCMLCxvCsTTa	1	0,59	Ligeramente Susceptible
ADtFCpMCvCxCsTEp	4	0,55	Ligeramente Susceptible
ADtFQtVCxRtAsTTfTEpT	1	0,39	Ligeramente Susceptible
ADtFQtPCvCxGiTHxTEpT	4	0,30	Ligeramente Susceptible
ADtFSMCvCxCsUHT	0	0,00	No Susceptible
ADtFMMcvCxAsUHITHTUT	0	0,00	No Susceptible
ADtFApMCvCxAsTEpLTn	0	0,00	No Susceptible
ADtFRnMCvCxCsTEp	0	0,00	No Susceptible
ADtFQtPCvCxGiTThTHoT	0	0,00	No Susceptible
ADtFCpLCvCxCsTTa	0	0,00	No Susceptible
ADtFCrMCvCxAsTTfTTa	0	0,00	No Susceptible
ADtFBLCxvCsTTa	0	0,00	No Susceptible
ADtFBMCxvCsTTa	0	0,00	No Susceptible
ADtFBMCxvCsTTa	0	0,00	No Susceptible
ADtFCMCxvCsTTa	0	0,00	No Susceptible
ADtFCLCxvCsTEp	0	0,00	No Susceptible
ADtFQtPCvCxCsTTh	0	0,00	No Susceptible
ADtFQtPCvRtCsTHx	0	0,00	No Susceptible
ADtFAgLCxvCsTHx	0	0,00	No Susceptible
ADtFLLCxvCsTEp	0	0,00	No Susceptible
ADtFLLCxvCsTEp	0	0,00	No Susceptible
ADtFAgLCxvCsUTh	0	0,00	No Susceptible
ADtFQtLCxvCsTHx	0	0,00	No Susceptible
ADtFCMLCxvAsTTfTThT	0	0,00	No Susceptible
ADtFLMCvCxAsTThTTh	0	0,00	No Susceptible
ADtFCpMCvCxCsTTh	0	0,00	No Susceptible
ADtFQtPCvCxCsTTa	0	0,00	No Susceptible
ADtFAgMCvCxCsTEp	0	0,00	No Susceptible
ADtFLMCvCxAsTThTEp	0	0,00	No Susceptible
ADtFMiLCxvCsTTa	0	0,00	No Susceptible
ADtFMiCvCxCsTTa	0	0,00	No Susceptible
ADtFCLCxvCsTTa	0	0,00	No Susceptible

Fuente: Elaboración Propia

Figura N°: 43

Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en Masa – cuenca del río Torbes



Fuente: Elaboración Propia

Al observar los datos, es evidente que la mayoría de las facies de Tipo de Paisaje, presentan una susceptibilidad muy baja o nula. Entre las unidades con mayor susceptibilidad se encuentra ADtFCrMCvCxCsTTa, la cual se encuentra al Sur de la cuenca, con una superficie de 20,01 ha; muy altamente susceptible también es la unidad ADtFCrCxLCvCsTTa, que se encuentra al Oeste, en las inmediaciones de la desembocadura de la quebrada La Chucurí, en donde se presenta uno de los movimientos en masa más extensos del área de estudio. Una unidad que ocupa gran cantidad de superficie de la cuenca y que también es muy altamente susceptible es ADtFRnMCvCxGiTepTThU, la cual ocupa 3047,9 ha, que se ubica en una franja al Este de la cuenca, desde las cercanías de Sabana Larga hasta el sector Agua Linda al Sur de la cuenca.

Al Sur, en la margen izquierda del río Torbes se ubica la unidad cartográfica identificada como ADtFAGMCvCxCsTTh, también con una alta susceptibilidad a movimientos en masa, con una superficie de 568,39 ha que se extiende desde Loma de Pío hasta el sector Campo Alegre. La unidad geomorfológica más extensa de la cuenca ADtFQMCvCxGiUHtTEpTT, es ligeramente susceptible, aunque concentra cerca de 36 cicatrices de movimientos en masa. Igualmente, se evidencia que las unidades ubicadas hacia el centro de la cuenca, en las inmediaciones de las poblaciones de Cordero, San Rafael y Las Vegas de Táriba, presentan una susceptibilidad moderada.

Al profundizar en el análisis de las características hipogeas de las unidades, particularmente sus características geológicas se evidencia que en general las unidades geomorfológicas con los materiales Cuaternarios, tienen una menor susceptibilidad que los materiales Jurásicos y Terciarios más antiguos, asimismo, al observar las cobertura edáfica de las unidades geomorfológicas, gran parte de las facies susceptibles tienen presencia de suelos clasificados como Alfisoles en los que existe un endopedón argílico, que podría favorecer el desplazamiento de los materiales. También se encuentran abundantes Inceptisoles, que son suelos pocos evolucionados, que según autores como Pineda (2008), favorecen la ocurrencia de procesos erosivos.

En cuanto a las características epigeas de las formas del relieve, se evidencia que la mayoría de las facies de Tipo de Paisaje susceptibles a los movimientos en masa, se encuentran en paisajes de Montañas y Lomeríos, los cuales presentan en su mayoría formas topográficas fuertemente disectadas asociadas a pendientes por encima del 30%. Sin embargo, también se presenta susceptibilidad a movimientos en masa en paisajes de Piedemonte que, presentan formas topográficas colinosa con pendientes por debajo del 30%.

Unidades Geomorfológicas con mayor Susceptibilidad a Movimientos en Masa Asociados a Sismicidad

Una vez obtenidos los niveles de susceptibilidad a movimientos en masa, se combinaron estos resultados con los niveles de amenaza sísmica. Para esto, convirtió en Ráster (*.vat) la capa de facies de Tipo de Paisaje, utilizando como *VALUE* los niveles de susceptibilidad, para esto se utilizó la secuencia de comandos en ArcGIS 10.4, *CONVERSION TOOLS > TO RASTER > POLYGON TO RASTER*, seguidamente empleando la secuencia *MAP ALGEBRA > RASTER CALCULATOR*, se combinó la información de susceptibilidad con la amenaza sísmica, obteniendo para el área de estudio once categorías (Ver Figura N°: 44).

Estas categorías muestran el nivel de susceptibilidad a movimientos en masa en conjunto con la amenaza sísmica. En este sentido se aprecia que, a excepción de algunas áreas al Este de la cuenca, donde se presenta una amenaza sísmica baja, en general las facies de Tipo de Paisaje, son altamente vulnerables a la acción de las ondas sísmicas y que esta situación sumado a los niveles de susceptibilidad obtenidos mediante el Índice de Densidad de Cicatrices, podría potenciar la ocurrencia de movimientos en masa. Igualmente se observa, que el área de menor amenaza sísmica se encuentra con facies que son muy altamente susceptibles a movimientos en masa, por tanto, se puede inferir que la sismicidad es un factor condicionante sobre los materiales de estas unidades y que facilita la preparación de los materiales a desplazarse ladera abajo. A partir de lo anterior, se puede inferir que unidades como ADtFCrMCvCxCsTTa, en paisaje de Montaña en materiales de la Formación Los

Cuervos, con suelos Alfisoles, y un perfil Cóncavo-Convexo, que se encuentra en la vertiente izquierda en el extremo Sur de la cuenca, cerca de la desembocadura del río Torbes, es muy altamente susceptible a movimientos en masa y presenta una amenaza sísmica elevada.

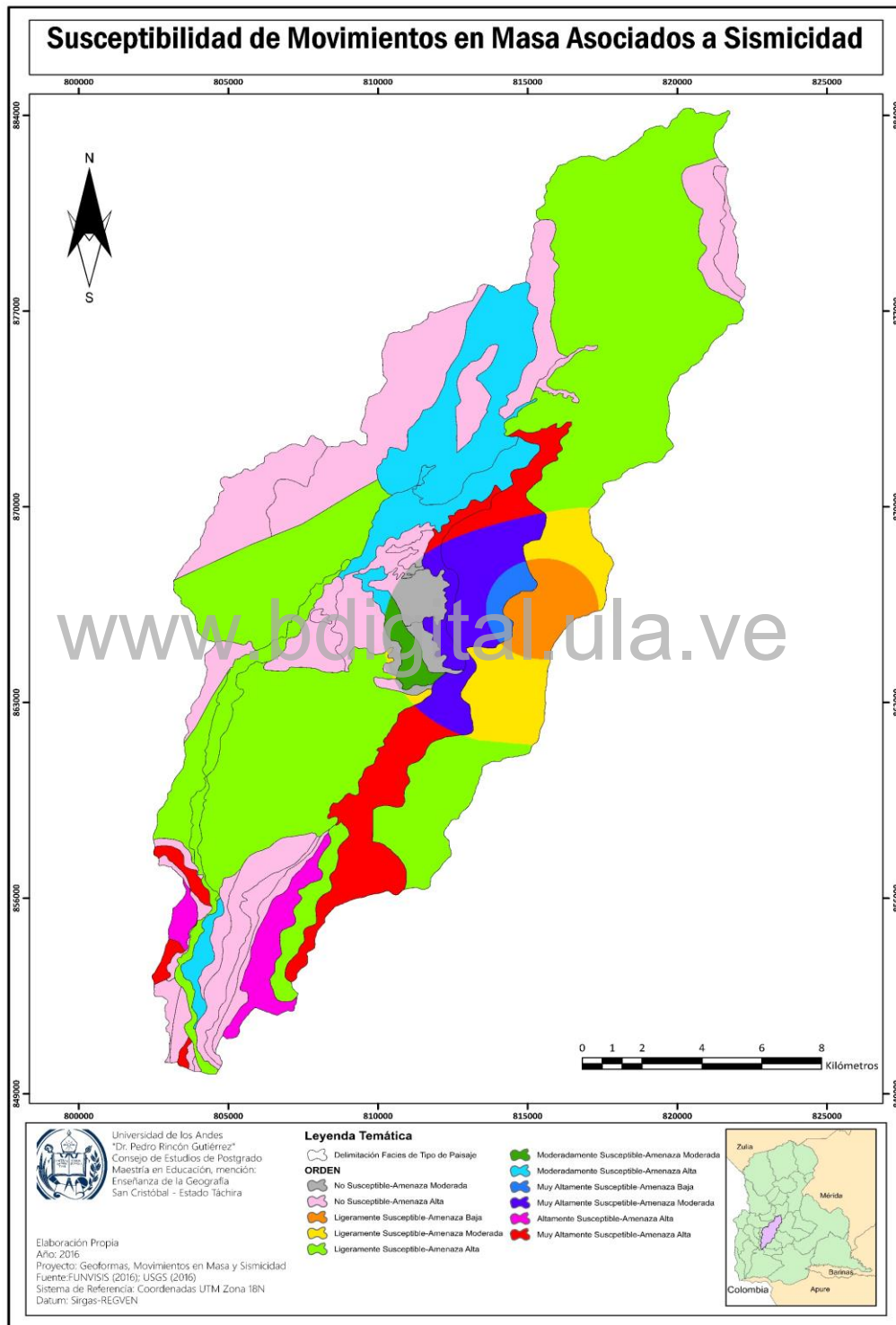
Del mismo modo la unidad ADtFCrLCxCvCsTTa, que se encuentra en paisaje de Lomerío, también sobre materiales de la Formación los Cuervos y suelos Alfisoles, con un perfil Cóncavo Convexo, localizada en la vertiente izquierda al Oeste de la cuenca, en las inmediaciones del Barrio Rómulo Gallegos de la ciudad de San Cristóbal, presenta una muy alta susceptibilidad a movimientos en masa y un nivel alto de amenaza sísmica. Por su parte, la unidad ADtFCaMCvCxCsTTa, con el tercer mayor Índice de Densidad de Cicatrices de Movimientos en masa, que se ubica en paisaje de Montaña y suelos Alfisoles, con un perfil Convexo-Cóncavo, ubicada al Suroeste de la cuenca, en la vertiente izquierda, cerca del Sector El Corozo, presenta también una muy alta susceptibilidad a movimientos en masa y elevado nivel de amenaza sísmica.

En la vertiente derecha, una de las unidades más susceptibles y con una amenaza sísmica alta es ADtFRnMCvCxGiTepTThUThOHt, que se sitúa en paisaje de Montaña, sobre materiales de la Formación río Negro, con suelos indiferenciados Typic Eutropepts, Typic Tropohumults, Ustoxic Tropohumults, Oxic Humitropepts, con un perfil Cóncavo-Convexo, que se extiende desde el Sureste de la cuenca, desde el sector Agua Linda hasta el Norte, cerca de Mesa de Aura.

Es importante señalar que, según los valores de IDM calculados, hay varias facies de Tipo de Paisaje con una superficie de 7268,63 ha, que corresponde al 23% del total de la cuenca, que no son susceptibles a desarrollar movimientos en masa, que muestran moderada o alta amenaza sísmica. Finalmente se puede establecer que existen tres áreas, en paisajes de Lomerío y Montaña, que ocupan una superficie aproximada de 5369,52, que corresponde al 17% del área de estudio, donde el nivel de amenaza sísmica coincide con altos niveles de susceptibilidad a desarrollar movimientos en masa.

Figura N°: 44

Susceptibilidad a Movimientos en Masa asociados a Sismicidad



Fuente: Elaboración Propia

La primera de ellas está en paisaje de Montaña, sobre materiales de la Formación río Negro, se encuentra en la sección central de la cuenca desde Sabana Larga hasta La García cerca de la población de Cordero; la segunda área se encuentra al Sureste de la cuenca, cerca del sector Cueva del Oso en la ciudad de San Cristóbal, en paisaje de Montaña y sobre materiales de la Formación Apón y se extiende hasta el Sector Campo Alegre al Sur de la cuenca; finalmente la tercera área se ubica al Suroeste de la cuenca, desde el Barrio Rómulo Gallegos en San Cristóbal hasta el sector El Guayabal en la población de El Corozo, en paisajes de Lomeríos en la sección Norte y Montaña en la sección Sur, sobre materiales predominantemente terciarios (Formación Los Cuervos, Carbonera, Mirador, entre otros) con suelos principalmente Alfisoles.

www.bdigital.ula.ve

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

En función de los objetivos propuestos y conforme a los resultados obtenidos durante la fase de investigación se concluye:

La cuenca del río Torbes, ubicada en el occidente de Venezuela presenta una amplia diversidad de características físico naturales, las cuáles responden a las particularidades propias del entorno natural en que se enmarca. Desde la perspectiva geológica una amplia gama de materiales, desde algunos que tuvieron su origen en el Paleozoico, hasta materiales más recientes pertenecientes al Cenozoico, los cuales son evidencias de las transformaciones que ha presentado la superficie terrestre y los diversos procesos que han influido en éstas. Del mismo modo, los suelos predominantes en la cuenca, presentan desarrollo reciente.

Otra particularidad desde la perspectiva físico natural de la cuenca, es el hecho de presentar una amplia variabilidad tanto temporal como espacial de ambientes pluviométricos, evidenciado en los datos de precipitación disponibles para la cuenca. En cuanto al comportamiento altitudinal de la cuenca, debido a su extensión se pueden encontrar altitudes por encima de los 3000 msnm, con características de vegetación, temperatura y evapotranspiración vinculadas con pisos microtéricos y del mismo modo altitudes por cercanas a los 600 msnm, con características macrotéricas con temperaturas por encima de los 25° C y con altos contenidos de humedad en el aire.

La evaluación de MDE de distintas fuentes (Cartas Topográficas, ASTER-GDEM y SRTM), permitió identificar que, para las condiciones locales de la cuenca y la escala de análisis, el modelo derivado de la vectorización de las curvas de nivel, representó de forma más cercana la realidad de las variaciones altitudinales presentes en el área de estudio, obteniendo el menor EMC (26,11); mientras que los demás modelos evaluados presentaron mayor EMC con valores cercanos a 30. En este sentido cabe

destacar, que dada la complejidad de acceso a MDE con mayores resoluciones espaciales, las cartas topográficas, aunque requieren un proceso complejo para convertirla en información digital, permiten elaborar MDE con una precisión aceptable, que pueden ser utilizados a nivel de estudios semidetallado. Sin embargo, el MDE derivado del ASTER, también se ajusta a las particularidades del mundo real y se puede acceder a él de forma rápida y precisa empleando los diversos WebGIS disponibles.

En lo concerniente a las delimitaciones de las unidades geomorfológicas, es importante destacar que el área de estudio, se encuentra enmarcada dentro de la Geoestructura Cordillera, particularmente en el Sistema Andes y dentro de éste, a nivel de Ambiente Morfogénéticos en la Depresión del Táchira, lo que confiere peculiaridad a la cuenca del Torbes, al encontrarse en un ambiente mixto, es decir de tipo estructural, deposicional y erosivo. La Depresión del Táchira presenta características estructurales, en especial heredadas de la cercanía a la Cordillera de Mérida, por ser una depresión de origen tectónico, es propicia para la deposición de sedimentos arrastrados por las corrientes que provienen de las montañas circundante y este proceso deriva también en la presencia de características erosivas por la compleja interacción de estas corrientes con los materiales que se encuentran en depósitos dentro de la cuenca.

En la categoría Tipo de Paisaje, la cuenca del Torbes, presenta una amplia variedad de unidades tal y como lo refleja la diversidad de atributos morfométricos y morfográficos calculados. En este sentido, predomina el paisaje montañoso, con formas topográficas fuertemente disectadas y con pendientes en general por encima del 30%, sin embargo, se evidencian también paisajes de piedemonte, con formas topográficas en general colinosas o fuertemente onduladas y con pendientes que no sobrepasan el 16%.

Se aspiraba a desarrollar una delimitación de geoformas en la categoría Relieve/Modelado, pero dada la resolución y escala de las fuentes cartográficas disponibles, no fue posible completar este nivel jerárquico, a pesar de esto, se

delimitaron facies de tipos de paisaje utilizando como criterios la información geológica y edáfica disponible, lo que permitió profundizar en la dinámica de las formas del relieve, y en el conocimiento de las propiedades hipogeas y epigeas.

Un aspecto relevante que se concluye de la experiencia de la delimitación, empleando el Sistema Jerárquico de Clasificación de las Geoformas propuesto por Zinck (2012), es que los cambios en escala, al pasar de una categoría a otra, generan discontinuidades en el análisis con algunas dificultades para definir las diferentes clases. Asimismo, al ser un sistema pensado inicialmente para ambientes deposicionales, aspectos particulares de los ambientes estructurales son más complejos de sistematizar e incorporar en la delimitación.

Con respecto, a la ocurrencia de movimientos en masa dentro de la cuenca del río Torbes, es evidente que, por sus características físico-naturales, es un área que se encuentra expuesta a diversos factores activadores, sin embargo, se pudo precisar aquellas unidades geomorfológicas que por sus atributos intrínsecos son más susceptibles a sufrir la acción de estos procesos erosivos. Estas unidades representan una amplia mayoría de las facies de Tipo de Paisaje presentes, y al respecto se puede comentar, que aquellas delineaciones con formas topográficas asociadas a pendientes por encima del 16% son más susceptibles que el resto, y espacialmente se concentran, en una amplia franja longitudinal que discurre de Noroeste a Sureste en el área central de la cuenca.

Igualmente es importante destacar que el uso del índice de densidad de cicatrices de movimientos en masa, es una metodología apropiada para identificar los niveles de susceptibilidad, ya que relaciona la superficie de las unidades afectadas con el número de cicatrices de procesos de remoción de masas, lo que discrimina adecuadamente y asigna valores de acuerdo al nivel de afectación y no al número de cicatrices.

En lo concerniente a los patrones de sismicidad y amenaza sísmica, la cuenca del río Torbes, y en general la Depresión del Táchira, debido a los complejos procesos tectónicos y estructurales que dieron origen a su formación, se encuentra en un área

con una amenaza sísmica alta, lo que invita a generar planes de contingencia necesarios para mitigar las diversas vulnerabilidades presentes y de esta forma disminuir el riesgo para la población asentada en esta región. En general el tiempo de retorno sísmico en un radio de 200 Km alrededor de la cuenca, para sismos iguales o superiores a magnitud 4.0, es de 11 días lo que, según diversos autores, ayuda a disminuir el impacto que un evento de magnitudes superiores pueda originar.

Se corroboró lo planteado por autores como Audemard (2002), Rodríguez (2005) entre otros, cuando manifiestan que debido a la fuerte ramificación que presenta el Sistema de Fallas de Boconó en el Táchira, existen múltiples fuentes sismogénicas, que en su mayoría generan sismos de magnitudes intermedias (Entre 4.0 y 5.5). Sin embargo, la probabilidad de excedencia para el área aumenta con el paso del tiempo y hay casi un 80% de probabilidades que un evento sísmico de magnitudes altas afecte al área en los próximos 50 años.

Al cruzar la información de la susceptibilidad a movimientos en masa y los niveles de amenaza sísmica, se evidencia que gran parte de la cuenca ve incrementado su nivel de susceptibilidad a movimientos en masa por encontrarse en su mayoría sobre un nivel de amenaza alto. Al respecto se evidencia que las áreas hacia el Noroeste y Sureste de la cuenca tienen un nivel alto de amenaza sísmica y un nivel muy alto de susceptibilidad, lo que en conjunto es un indicador de que son áreas propicias a aumentar la probabilidad de desplazamiento de los materiales, puesto que en estos casos la acción como factor condicionante de la sismicidad es mayor.

En virtud de los datos alcanzados y analizados en el presente trabajo, es de suma importancia destacar la necesidad de planificar, diseñar y ejecutar diversos planes que coadyuven a las áreas que pueden resultar más afectadas por los fenómenos analizados. Es así que se considera que la información encontrada puede servir de base para estos planes y para futuras investigaciones que pretendan profundizar en temáticas relacionadas con las aquí tratadas.

Recomendaciones

Dadas las particularidades observadas en las fuentes cartográficas de información de suelos disponibles, es necesario actualizar el mapa de estos cuerpos naturales en la cuenca, para precisar los límites de las unidades.

Mejorar el mapa de coberturas de la cuenca del río Torbes, empleando imágenes satelitales de mayor resolución espacial que permitan generar los niveles de reflectancia, para de esta forma mejorar la identificación de las distintas coberturas, así como completar los distintos índices de vegetación disponibles.

Desarrollar una delimitación en los niveles inferiores del Sistema de Clasificación de las Geoformas, acompañándolo de identificación en el campo, para caracterizar a mayor detalle la distribución y atributos de las geoformas en la cuenca.

Profundizar en la delimitación de la Depresión del Táchira, a partir del análisis de los criterios geológicos y estructurales que la definen en conjunto con aspectos fisiográficos que permitan identificar claramente sus límites.

Analizar la sistematización del Sistema de Clasificación de las Geoformas, para corregir los errores que se presentan en los niveles superiores a causa de las discontinuidades originadas por los cambios abruptos en la escala de análisis.

Es necesario profundizar en el inventario de movimientos en masa, a partir de salidas al campo para caracterizar la tipología de cada uno y de esta manera relacionarlos con los agentes que los desencadenan y de esta forma poder precisar de manera más exacta el nivel de susceptibilidad.

Referencias

- Aguilera, M.; Borderías, P.; González, P.; Santos, J. (2004). Geografía General y Geografía Física. Madrid: UNED Publicaciones.
- Ahnert, F. (1996). Introduction to Geomorphology. Londres: Editorial Arnold.
- Alcántara, D. (2005). Topografía. México: Editorial McGraw Hill.
- Alcántara, I. (2000). Landslides: ¿Deslizamientos o movimientos de terreno? Definición, clasificaciones y terminología. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM, número: 41. Ciudad de México
- Alesheikh, A.; Helali, H.; Behroz, H. (2002). Web GIS: technologies and its applications. In Symposium on geospatial theory, processing and applications (Vol. 15).
- Alvarado, M.; Cantos, G.; Pérez, E.; Audemard, F. (2015). Cartografía Neotéctonica de la Falla de Boconó entre Tabay y la Toma. Boletín de Geología Volumen 37. pp. 47-56.
- Andes, D. (2006). The Components of GIS Evolve. (On Line). Disponible en: <https://www.gislounge.com/the-components-of-gis-evolve/>. [Consulta agosto 16 2016].
- Aneas, S. (2004). Riesgos y Peligros: Una visión desde la Geografía. Revista Scripta Nova N° 60. pp. 45-61.
- Arias, F. (2012). El Proyecto de Investigación: Introducción a la metodología científica. Caracas: Editorial Episteme.
- Arias, F. y Duque, M. (1992). La cuenca Hidrográfica como unidad de análisis y planificación territorial. Medellín: Editorial UNAL.
- Arismendi, J. (2007). Presentación Geográfica de las Formas del Relieve. En Enciclopedia GeoVenezuela Tomo: II pp. 128-182. Fundación Polar: Caracas.
- Aristizábal, E; Martínez, H.; Vélez, J. (2010). Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. Revista Academia Colombiana de las Ciencias. Volumen 34. pp. 209-227.
- Audemard, F. (2000). Map and Database of Quaternary Faults in Venezuela and its Offshore Regions. USGS: Denver

- _____ (2001). Structure of the Mérida Andes, Venezuela: relations with the South America-Caribbean geodynamic interaction. *Revista Tecnophysics* N°: 345. pp. 299-327.
- _____ (2002). Ruptura de los grandes sismos históricos venezolanos de los siglos XIX y XX revelados por la sismicidad instrumental contemporánea. En *Memorias del XI Congreso Venezolano de Geofísica*. pp. 45-53. Sociedad Venezolana de Ingenieros Geofísicos: Caracas.
- _____ (2010). Deep-seated gravitational slope deformations along the active Boconó Fault in the central portion of the Mérida Andes, western Venezuela. *Geomorphology* 124(3). pp. 164-177.
- _____ (2012) New focal mechanism solutions for Venezuela and neighbouring areas 2005-2008: importance of the National Seismological Network's density and distribution. *Revista Técnica de la Universidad del Zulia*. 33(2). pp. 96-112.
- _____ (2014). Segmentación sismogenética de la Falla de Boconó a partir de Investigaciones Paleosísmicas por Trincheras, Venezuela Occidental: ¿Migración de la ruptura hacia el Noreste en tiempos históricos? *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71(2). pp. 247-259.
- Ayala, F. (2009). *Introducción al Análisis y Gestión del Riesgo*. Madrid: Editorial Ariel.
- Ayala, F.; Andreu F.; Ferrer, M.; Fernández I.; Olalla, C.; Gómez, J. y San Pedro, J. (1987). *Manual de Taludes*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Babín, R. y Gómez, D. (2010). Problemas de Geología Estructural: fallas. (On Line) *Revista Reduca Geología*. Volumen 2. 124-147. Disponible en: <http://eprints.ucm.es/10025/1/141-287-1-PB.pdf>. [Consulta diciembre 13 2015]
- Balestrini, M. (2001). *Cómo se elabora un Proyecto de Investigación*. Venezuela: Editorial Consultores Asociados.
- Barahona, I. (2015). *Estudio de Comunicación Vial Entre las comunidades La Encañada – Chuva Urku, perteneciente a la Parroquia Tarqui, Cantón Pastaza, Provincia Pastaza para mejorar la calidad de vida de los pobladores de la zona*. Universidad Técnica de Amabato. Tesis de Grado
- Barranco, A. (2012). *Evaluación de Riesgo de Desastre Urbano en Materia de Vivienda y Construcción y Saneamiento de la Zona Monumental de Lima*. Municipalidad de Lima, Perú.

- Beltrán, J.; Castiblanco, W.; Alfaro, A. (2006). Evaluación de efectos sísmicos asociados mediante la utilización de SIG en Ibagué-Colombia. *Revista Épsilon* N°: 6. pp. 52-61.
- Benito, B. (2014). Peligrosidad Sísmica. *Revista Física de la Tierra* N°: 11. pp. 13-47.
- Bernal, C. (2010). *Metodología de la Investigación: Administración, Economía, Humanidades y Ciencias Sociales*. Bogotá: Editorial Pearson.
- Blaikie, P. (1996). *Vulnerabilidad: El Entorno Social, Político y Económico de los Desastres*. Tercer Mundo. Bogotá: Editores.
- Bolt, B. (2003). *Terremotos*. Madrid: Editorial Reverté.
- Bosque, J. (2007). Localización, Justicia y Equidad Espacial con Sistemas de Información Geográfica. En *Memorias XI Conferencia Iberoamericana de SIG*. pp. 95-115.
- Burns, I. (2013). *Automated Geospatial Watershed Assessment – A GIS Based Hydrologic Modeling Tool*. New York: ESRI-Press.
- Buzai, G. y Baxendale, C. (2011). *Análisis Socioespacial con Sistemas de Información Geográfica*. Buenos Aires: Editorial Lugar.
- Calvo, F. (2001). Riesgos y Vulnerabilidades en Espacios Urbanos. *Revista Mediterráneo Económico* N°: 3. pp. 425-443.
- Cardona, O. (1996). *Diagnóstico Local de Riesgos Naturales*. Bogotá: Editorial Panamericana.
- Carson, M; Kirkby, M. (1972). *Hillslope form and process*. New York: FAO Press
- Cartaya S.; Méndez, W.; Pacheco, H. (2006). Modelo de Zonificación de la Susceptibilidad a los procesos de remoción de masas a través de un Sistema de Información Geográfica. *Revista Iterciencia* 9(31). pp. 638-646.
- Castillo, L. (2015). *Metodología para la Extracción Automática de cuencas y Elaboración de una Mapa de Salida con Isoyetas en ArcGIS 10.1*. Tesis de Grado.
- Castro, E.; Ojeda, J. (2001). *Evaluación de Riesgos por Fenómenos de Remoción en Masa: Guía Metodológica*. Bogotá: Editorial Ingeominas.
- Caturla, J. (2011). A program for analysis of Seismic Risk. In *applications of personal computers in seismology*. *Proceedings of the XXII General Assembly of the European Seismological Commission*. pp 55-58.

- Cebrián, J. (1984). *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid: Editorial Síntesis.
- Chacón, J. y Pernía I. (2010). *Análisis Morfoestructural y Microtectónico de la Falla de Capacho, Estado Táchira, Venezuela*. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Chirinos, Infante, Montoya y Figueroa (2009)
- Chirinos, Z.; Infante, J.; Dan, M.; Figueroa, M. (2009). Aplicación de la teoría de Ondículas para analizar señales sísmicas en el espacio tiempo-frecuencia. *Revista técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia*, 32(1). pp. 14-21
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de Teledetección*. Madrid: Editorial Rialp.
- _____ (2002). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid: Editorial Ariel.
- _____ (2008). *Teledetección ambiental*. Barcelona: Editorial Ariel.
- Conesa, C. (2004). *Tecnologías de Información Geográfica: Territorio y Medio Ambiente*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Murcia
- Constitución de la República Bolivariana de Venezuela. CRBV (1999). *Gaceta Oficial N° 5.453. Extraordinaria, 24 de marzo de 2000*. Ediciones del Servicio Autónomo Imprenta Nacional y Gaceta Oficial. Caracas-Venezuela.
- Copernicus – EEA, (2012). *Manual of CORINE Land Cover Changes*. European Enviromental Agency.
- Cruden D.; Varnes, D. (1996). *Landslides types and processes in: Landslides investigation and mitigations*. Transportation Research Board Special Report 24 (Turner and Schuster Eds.). 36-75.
- Cruden, D. (2001). A simple definition of a landslide. *Bulletin International Association of Engineering Geological*. Volume 43. 27-29.
- Davila, F. y Camacho, E. (2012). *Georreferenciación de documentos cartográficos para la gestión de Archivos y Cartotecas: Propuesta Metodológica*. *Revista Vibercarto* N°: 5. pp.34-43.
- Delgadillo, A. y Moreno, A. (2015). *Morfometría de cuencas*. Documento Informativo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes.
- Delgadillo, A. y Páez, G. (2008). *Aspectos Hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas, escenarios de riesgo por crecidas*. Plan de Desarrollo Urbano del Municipio Antonio Pinto Salinas – Estado Mérida.

- Dourojeanni, A. (1994). Gestión del Agua a nivel de cuencas: Teoría y Práctica. Santiago de Chile: Editorial CEPAL.
- Durán, I.; Escolero, O.; Muñoz, E.; Castillo, M.; Silva, G. (2014). Cartografía Geomorfológica a escala 1:50000 del Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Vol. 6 Número: 2. pp. 263-277.
- Elizalde, G. (1983). Ensayo de clasificación sistemática de categorías de paisajes. Primera Aproximación. Instituto de Edafología. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela: Maracay.
- _____ (2012). Clasificación Sistemática de los Paisajes: Propuesta de un marco conceptual. Revista Venesuelos, Volumen 19, número 1. 23-43.
- Elizalde, G. y Daza, M. (2000). Evaluación de Amenazas de Movimientos en Masa en Paisajes Montañosos: Ejemplos en el Estado Vargas. Revista Venesuelos, Volumen 8, número: 1 y 2. Caracas.
- ESRI (2015). Manual de Hidrología de ArcGIS 10.x. (On Line) Disponible en: desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.x/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-of-the-hydrology-tools.htm. [Consulta: Abril 2015]
- FAO (2009). Guía para la Descripción de Suelos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación. Roma
- Fallas, J. (2007). Modelos digitales de elevación: Teoría, métodos de interpolación y aplicaciones. Escuela de Ciencias Ambientales. Universidad Nacional, Costa Rica.
- Farr, T. (2007) The shuttle radar topography mission. Reviews of geophysics, 45(2). pp. 145-186.
- Felicísimo, A. (2007). Modelos digitales del terreno: principios y aplicaciones en las ciencias ambientales. Madrid: Editorial Pentalfa.
- Ferrer, C. (1977). Caracterización Geomorfológica de la cuenca del río Torbes, Estado Táchira. Revista Geográfica Venezolana. Volumen: 22, número: 1.
- _____ (1999). Represamientos y Rupturas de Embalses Naturales (Lagunas de Obturación) como Efectos Cosmicos: Algunos Ejemplos en los Andes venezolanos. Revista Geográfica Venezolana 40(1)

- _____ (2005). La Sismicidad Histórica de los Andes Venezolanos en Memorias de la V Jornada Venezolana de Sismicidad Histórica y Sexto Simposio Venezolano de Historia de la Geociencias. Revista Geográfica Venezolana, Número Especial. (89-97)
- Fierro, I.; Useche, C. (1985). Geología del Nula-Sarare, estados Táchira y Apure. VI Congreso Geológico Venezolano. pp. 654-702.
- Fowler, C. (2005). The Solid Earth. Cambridge University Press.
- Freile, A. (1962). Fisiografía de Venezuela. Mapa incluido en el “Atlas de Venezuela”. Dirección de Cartografía Nacional. Caracas-Venezuela: Editorial MARNR.
- Fuenmayor, W.; Strauss, E.; y Romero, J. (1997). Geografía Física de Venezuela. Maracaibo: Editorial Ediluz.
- FUNVISIS (2008). La Investigación Sismológica en Venezuela. Caracas: Ministerio de Ciencia y Tecnología.
- _____ (2011). Análisis de los problemas de Estabilidad Geológica confrontados por la vialidad y poblaciones del Estado Táchira, a raíz de las lluvias 2010. Informe Técnico. Caracas: Ministerio del Poder Popular para Ciencia, Tecnología e Industrias Intermedias.
- _____ (2014). Glosario Sísmico de Venezuela. Ministerio de Ciencia y Tecnología: Caracas.
- _____ (2015). Boletín Sismológico de Venezuela Período 1950-2014. Caracas: Ministerio de Ciencia y Tecnología.
- _____ (2016). Documento de Prevención de Amenaza Sísmica. Caracas: Ministerio de Ciencia y Tecnología.
- García, M.; Puente, F. (2010). Estudio de Amenaza Sísmica de la Ciudad de San Cristóbal. Tesis de Maestría Publicada. Caracas: Universidad Católica Andrés Bello.
- García, W. (2008). Planificación de cuencas Hidrográficas bajo la perspectiva de los sistemas complejos. Tesis Posgrado (Especialista en Gestión Agroambiental). Universidad Nacional de Colombia: Medellín.
- GARMIN (2013). Manual de Usuario GPSMAP 78S.

- Gil, V. (2009). Hidrogeomorfología de la cuenca alta del río Sauce Grande aplicada al análisis de crecida. Tesis Doctoral en Geografía, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.
- Gómez, Guerra y González, (2003). Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la detección de áreas inestables. *Revista Geoenseñanza* Vol. 8. pp. 33-48.
- Gómez, M.; Barreda, J. (2005). *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio*. Madrid: Editorial RA-MA.
- González de Juana, C. (1980). *Geología de Venezuela y de sus cuencas Petrolíferas*. Caracas: Ediciones FONINVES
- González de Vallejo, L. (2000). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Editorial Pearson.
- González, J.; Molina, A.; Cedeño, F.; Audemard, F. (2001). Evaluación de la amenaza sísmica del estado Vargas y algunas localidades de la Zona Metropolitana. Taller Internacional "Estudios de Métodos y Acciones para Contrarrestar los Efectos Producidos por Terremotos en Caracas (1999-2001)". pp. 74-83
- Guerra, F; Gómez, H.; González, J.; Zambrano, Z. (2011). Distribución Espacial de la precipitación en la cuenca del río Torbes, estado Táchira. *Revista Geoenseñanza* Vol. 16(1), pp. 97-117.
- Guerra, F; González, J. (2006). Caracterización Morfométrica de la cuenca de la Quebrada La Bermeja. *Geoenseñanza* Vol. 7(2). pp. 88-108.
- Gutiérrez, J. y Gould, M. (2009). *SIG: Sistemas de Información Geográfica*. Madrid: Editorial Síntesis.
- Gutiérrez, M. (2009). *Geomorfología*. Madrid: Editorial Pearson – Prentice Hall.
- Haakon, F. (2010). *Structural Geology*. Cambridge University Press.
- Hanks TC, Kanamori H (1979). "A moment magnitude scale". *Journal of Geophysical Research* 84 (B5): 2348-50.
- Hernández R; Fernández, C; y Baptista, L. (2010). *Metodología de la investigación*. (5ta. Ed.) México: Editorial McGraw Hill.
- _____ (2014). *Metodología de la investigación*. (6ta. Ed.) México: Editorial McGraw Hill.
- Herráiz, M. (1996). *Conceptos Básicos de Sismología para Ingenieros*. Lima: Editorial Guzlop.

- Hutchinson, M. (1988). Development of a continent-wide DEM with applications to terrain and climate analysis. *Environmental modeling with GIS*. pp. 392-399
- Ibañez, D. (2004). *Movimientos en Masa*. México: Publicaciones de la UNAM.
- IFFIULA (2007). *Manual Introductorio de Procesamiento Digital de Imágenes de Satélites con ENVI*. Mérida: Universidad de los Andes.
- IGAC (2008). *Manual de Procedimientos de Producción de Ortoimágenes de satélite ópticas usando MDT*. División de Fotogrametría. Bogotá: Editorial IGAC Publicaciones.
- _____ (2014). *Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia*. Bogotá: Editorial IGAC Publicaciones.
- INCODER (2013). *Metodología para la Definición de Zonas Relativamente Homogéneas, para la Determinación de las Unidades Agrícolas Familiares*. Bogotá: Editorial Publicaciones del Instituto Colombiano de Desarrollo Rural.
- INE (2012). *XIV Censo Nacional de Población y Vivienda: Resultados por Entidad Federal y Municipio del Estado Táchira*. Caracas: INE.
- INGEOMINAS (2001). *Evaluación de Riesgos por Fenómenos de Remoción en Masa: Guía Metodológica*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- _____ (2011). *Zonificación integral por amenazas naturales para la ciudad de Villavicencio, Meta: zonificación de la amenaza por movimientos en masa*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- _____ (2014). *Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa*. Bogotá: Editorial Imprenta Nacional de Colombia.
- Kanamori, H.; Hanks, T. (1979). A Moment Magnitude Scale. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 84. N°: 85. pp. 2338- 2350.
- Keller, E. (2007). *Riesgos naturales: procesos de la tierra como riesgos, desastres y catástrofes*. Madrid: Editorial Pearson Prentice Hall.
- Keranen, K. (2016). *Instructional Guide for ArcGIS Book*. New York: Editorial ESRI Press.
- Labrado, M.; Évora, J.; Arbelo, M. (2012). *Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio*. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del Gobierno de Canarias. pp. 13-21.

- Lerma, H. (2012). Metodología de la Investigación: Propuesta, Anteproyecto y Proyecto. Bogotá: Ediciones Ecoe.
- Ley de Aguas de Venezuela. Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela. Número: 35595, martes 2 de enero de 2007.
- Ley de Gestión Integral de Riesgos Socionaturales y Tecnológicos. Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela. Número 39095, viernes 9 de enero de 2009
- Ley Orgánica de Ciencia Tecnología e Innovación. Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela Número: 38342, miércoles 3 de agosto de 2005
- Ley Orgánica del Ambiente. Gaceta Oficial Extraordinaria de la República bolivariana de Venezuela. Número: 5833, viernes 22 de diciembre de 2006.
- Linsley, K. (1977). Hidrología para Ingenieros. New York: McGraw Hill.
- Llopis, J. (2008). Sistemas de Información Geográfica aplicados a la Gestión del Territorio. Alicante: Editorial Club Universitario.
- Lobo, D. (2006). Métodos e Índices para Evaluar la estabilidad estructural de los Suelos. Revista Venesuelos Vol. 14(1). pp. 22-37.
- Londoño, L. (2001). La deuda ecológica por la contaminación del río Aburrá – Porce –Nechí. Monografía de grado (Posgrado en Planeación Urbano Regional). Facultad de Arquitectura. Universidad Nacional de Colombia: Medellín.
- Longley, P.; Goodchild, M.; Maguire, D.; Rhind, D. (2004). Geographic Information Systems and Science. Santa Bárbara: Editorial Wiley.
- López, M. (2012). Unidad Mínima Cartografiable: Aplicaciones Prácticas en SIG. México: Universidad Autónoma de México.
- Maas, M. (2005). Principios Generales sobre Manejo de Ecosistemas. México DF: Centro de Investigaciones en Ecosistemas de la UNAM.
- Macellari, C. (1982). El Mio-Plioceno de la depresión del Táchira (Andes venezolanos): Distribución paleogeográfica e implicaciones tectónicas. Revista GEOS Vol. 27. pp. 3-14.
- MARNR (1986). Atlas del Estado Táchira. Caracas: Imprenta de la Dirección de Cartografía Nacional.
- Martínez, J.; Martín, P. (2010). Guía Didáctica de Teledetección y Medio Ambiente. Madrid: Editorial CSIC.

- Meier, B.; Schwander, M.; Laubscher, H. (1987). The Tectonics of Táchira: A sample of North Andean Tectonics. In the Anatomy of Mountain Ranges. pp. 229-237.
- Meijerink, A. (1988). Data acquisition and data capture through terrain mapping units. ITC-Journal (Netherlands)
- Méndez, E. (1990). Ordenamiento Territorial-Ambiental: Desarrollo responsable y sostenible. Revista Geográfica Venezolana. Volumen 41. Número 2. 281-301.
- Menéndez, A.; Núñez, F. (2012). Manual para el Procesamiento de Imágenes Satelitales Obtenidas por Sensores Remotos, aplicados en Estudios de Ingeniería Civil. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Monzón, H. (2010). Vulnerabilidad Sísmica de Guatemala. Revista de la Asociación de Ingenieros Estructurales de Guatemala Vol. VII. pp. 32-75.
- Mora, E. (1999). Algunas Consideraciones sobre el Muestreo. Revista Geográfica Venezolana Volumen 4(1). pp. 31-46.
- Muñoz, C. (1997). Nuevas Fronteras del Riesgo. Estocolmo: Centro Europeo de Riesgos.
- Muñoz, J. (2000). Geomorfología General. Madrid: Editorial Síntesis
- Nava, A. (2008). Terremotos. México: Fondo de Cultura Económica.
- Obregón, J. (2013). El mapa de susceptibilidad a movimientos en masa: una herramienta para la gestión sostenible del territorio. Revista Espacio y Desarrollo Núm. 25. pp. 45-62.
- Olaya, V. (2014). Sistemas de Información Geográfica. Libro Electrónico Libre. Disponible en: <http://volaya.github.io/libro-sig/>.
- Olmedillas, J. (2012). Introducción a los Sistemas de Navegación por Satélite. Barcelona: Editorial UOC.
- Omaña, R.; Dal Pozzo, F.; Sánchez, D. (2015). Zonificación de la Susceptibilidad a la Ocurrencia de Movimientos en Masa. Microcuencas Agua Blanca y La Laja. Andes Venezolanos. Revista Geográfica Venezolana, Vol. 56(2). pp. 221-247.
- ONU (1978). Calidad ambiental y desarrollo de cuencas hidrográficas: Un modelo para planificación y análisis integrados. New York: Editorial ONU Press.
- Oñate, V.; Bosque, J. (2007). Extracción de modelos digitales de elevación a partir de imágenes Aster para la determinación de características morfométricas de cuencas hidrográficas. Universidad de Alcalá de Henares.

- Ordaz, M. (1999). Sismos, sismicidad: Diseño y construcción sismorresistente de estructuras. Centro Nacional de Prevención de Desastres de México.
- Orihuela, N. (2007). Sismicidad y evolución geológica de Venezuela. Enciclopedia GeoVenezuela. Tomo 2. Fundación Polar. 36-74.
- Oropeza, J.; Zambrano, A. (2007). Elaboración de una base de datos de geología urbana para fines de microzonificación sísmica para la ciudad de Caracas. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Geología Universidad Central de Venezuela: Caracas
- Ospina, A; Viloría, J.; Elizalde, G. (2010). Guía Práctica para la descripción de suelos en el campo. Facultad de Agronomía de la UCV: Maracay.
- Pacione, M. (2011). Applied Geography. Boston: International Journal of Human Geography.
- Palacios, D.; De Marcos, J. (1996). La Elaboración de Cartografía de Riesgos Geomorfológicos y su Aplicación en Áreas de Alta Montaña. Revista Serie Geográfica Vol. 6. pp. 59-97.
- Palella, S, y Martins, F. (2006). Metodología de la investigación cuantitativa. Venezuela: Fondo Editorial de la UPEL.
- Palme, C. y Altéz, R. (2010). Sismología Histórica de Venezuela. (On Line). Revista Investigación, volumen 9, pág. 39-42. Disponible en: http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/21344/1/christl_palme.pdf. [Consulta 2 diciembre 2014]
- PDVSA-Intevep (2011). Léxico Estratigráfico de Venezuela. Disponible en: www.pdvsa.com/lexico/
- Peña, C. (2015). Levantamiento y Cartografía de Suelos. Manual Técnico Escuela de Ingeniería Forestal. Mérida: Universidad de los Andes
- Pineda, M. (2008). Determinación de Áreas Susceptibles a Movimientos en Masa y Erosión Laminar en Unidades de Paisaje de la Subcuenca de río Caramacate, localizada en la cuenca Alta del río Guárico. Trabajo de Ascenso. Universidad Central de Venezuela.
- Pineda, M.; Elizalde, G.; Viloría, J. (2011). Determinación de áreas susceptibles a deslizamientos en un sector de la Cordillera de la Costa Central de Venezuela. Revista Interciencia Vol. 36(5). pp. 370-377.

- Porta, J; López, M.; Roquero, C. (2003). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Prado, E. (2007). Evaluación Ambiental de la Invasión de Tierras en El Poblado, Sector Los Pozos, Rubio, Estado Táchira. Tesis de Maestría Publicada, Universidad de los Andes (ULA), San Cristóbal.
- Ramírez, C.; Campos, D. (1972) Geología de la región de la Grita-San Cristóbal, Estado Táchira. Memorias IV Congreso Geológico Venezolano Vol. 2. pp. 861 - 893
- Roa, J.; Kamp, U. (2008). Modelos de elevación digital (MED) a partir de sistemas satelitales. Una introducción y análisis comparativo en la cordillera de Mérida-Venezuela. Revista Geográfica Venezolana, 49(1). pp. 11-42.
- Rodríguez, E.; Morris, C.; Belz, J. (2006). A global assessment of the SRTM performance. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing Vol. 72(3). pp. 249-260.
- Rodríguez, L. (2008). Evaluación de Geoamenazas con fines de Microzonificación Sísmica en las ciudades de Barquisimeto y Cabudare, Estado Lara. Tesis de Maestría Publicada, Universidad Simón Bolívar.
- Rodríguez, L.; Audemard, F. (2001). Descripción de los fenómenos de inestabilidad de laderas ocurridos en Venezuela en diciembre de 1999. V Simposio Nacional Sobre Taludes y Laderas Inestables. Vol. 2. pp. 809-820.
- _____ (2006). Casos Históricos de Licuación de Sedimentos inducidos por sismos en Venezuela desde 1530. Revista de la Facultad de Ingeniería de la UCV 21, (5-33).
- Rodríguez, L.; Singer, A. (2008). Análisis de tres casos representativos de vulnerabilidad de obras de infraestructura ante movimientos de masa de origen climático y/o cosísmicos en el Estado Táchira. Geología Colombiana Número: 38(1). pp. 89-97.
- Rodríguez, O. (2005). Manual para el manejo y procesamiento de Imágenes Satelitales a fines de identificación de Coberturas para Ingeniería Civil. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Sala, M. (2004). Geomorfología Actual: Guía conceptual, temática y bibliográfica. Madrid: Síntesis.

- Sánchez, F. (2009). Georreferenciación de Cartografía: Datos Ráster y Vectoriales. Madrid: EOSGIS.
- Sánchez, P.; Rubio, A.; Blanco, A. (2004). Definición y cartografía de las áreas potenciales fisiográfico-climáticas de hayedo en España. Revista Investigación Agraria Vol. 3. pp. 13-62.
- Sanz, F. (1996). Cartografía de la Calidad Visual del Paisaje: Reflexiones Teóricas y Ejemplo de Aplicación. Revista Serie Geográfica Vol. 6. pp. 115-129.
- Sarria, A. (2008). Terremotos e Infraestructura. Bogotá: Ediciones UniAndes.
- Sauter, F. (1989). Introducción a la Sismología. San José de Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Schargel, R. (2011). Una reseña de la geografía física de Venezuela, con énfasis en los suelos. Revista BioLlanía Edición Especial 10. pp. 11-26
- Scheerer, P. (2009). Introduction to Seismology. Cambridge University Press.
- Schubert, C. y Costa, A. (1986). Movimiento holoceno a lo largo de la Falla de Boconó. CDCHT ULA: Mérida.
- Schubert, C., Vivas, L., Estévez P. (1993). El Cuaternario en la Cordillera de Mérida. Fundación Polar: Mérida.
- SEAM (2011). Criterios Técnicos de Delimitación y Codificación de cuencas. Asunción: Secretaria de Ambiente.
- Sieh, K (2001). A review of geological evidence for recurrence times of large earthquakes. Earthquake Prediction, Maurice Ewing Series 4, D. Simpson y P. Richards (comps.), Am. Geophys. Union, pp. 181-207.
- Sieron, K. (2006) Mecanismos Asociados a la Inestabilidad de Laderas: Factores que Condicionan y Desencadenan los Deslizamientos. Memorias del Primer Foro de Inestabilidad de Laderas del Estado de Veracruz. pp. 85-102.
- Singer, P.; Audemard, F.; Soulas, J. (1997). Quaternary Faults and Stress Regime of Venezuela. Revista de la Asociación Argentina de Geología Vol. 61. pp. 23-49.
- Smiles, S; Keefer, D. (1999) Comparison of Seismic Slope-Performance Models – Case Study of the Oakland East Quadrangle, California, U.S. Geological Survey: Open-File Report 99-137
- Soulas, J. (1983). Geología de fallas activas. Estudio de riesgo sísmico, Proyecto Uribante-Caparo. Informe Final. Caracas: Funvisis.

- Soulas, P.; Schubert, C.; Rojas, C. (1986). Neotéctonica de las fallas de Boconó, Valera, Tuñame y Mene Grande. *Journal*, 10. pp. 6961-6999.
- Steegmayer, P.; Bustos, R. (1980). Proposición metodológica para estudios de suelos en cuencas Altas. División Informes Ambientales. MARNR. Serie Informes Técnicos. Zona, 6
- Stein, S.; Wysession, M. (2003). *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*. Blackwell Publishing: Great Britain.
- Strahler, A. (2005) *Geografía Física*. Barcelona: Editorial Omega.
- Suárez, J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Tapia, M. (2005). *Conceptos sobre cuencas Hidrográficas*. Bogotá: Editorial CONDESAN.
- Tarbuck E. y Lutgens F. (2005). *Ciencias de la tierra: Una introducción a la Geología Física*. Madrid: Editorial Prentice Hall.
- Tavera, H. (2001). *El Terremoto de la región Sur del Perú del 23 de junio de 2001. Informe Técnico*. Lima: Sociedad Geológica del Perú.
- Tomlinson, R. (2013) *Pensando sobre los SIG: Sistemas de Información Geográfica para la toma de decisiones*. Madrid: ESRI Press España.
- Tovar, W. (2013). *Propuesta de Clasificación de Cobertura/Uso de la Tierra en los Andes. Caso: cuenca del río Grita, Venezuela*. Tesis de Maestría Publicada. Universidad de los Andes.
- Trigo, T. (2012). *Influencia de la Ampliación Local de las Ondas Sísmicas y la Interacción Suelo*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Turcotte, D.; Schubert, G. (2014). *Geodynamics*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- UNDRO (1984). *Manual de Manejo de Desastres. Directrices para la prestación de asistencia*. Nueva York: Oficina del Coordinador de las Naciones unidas para el socorro en caso de desastres.
- USDA (1967). *Soil Survey, Classification and Correlation*. Washington: Soil Conservation Service.
- Useche (1969). *Geología de la Región de Pregonero, Estado Táchira*. Memorias del Cuarto Congreso Geológico Venezolano. Tomo: II. pp. 963-995

- USGS, (2008). Manual para la Evaluación de cuencas Hidrológicas. Versión en español.
- van Westen, C.; Slob, A.; Montoya, L.; Boerboom, L.; Vargas, R. (2012) Aplicación de SIG para la evaluación de la amenaza sísmica y el riesgo asociado: Katmandú, Nepal. New York: Editorial ONU.
- Vargas, G. (1997). Guía Técnica para la Zonificación de la Susceptibilidad y Amenaza por Movimientos en Masa. Bogotá: Editorial UNAL.
- Varnes (1978). Slope movement types and processes. National Academy of Science, National 28(3). pp. 11-33
- Verstappen, H.; Van Zuidam, R. (1991) El sistema ITC para levantamientos geomorfológicos: una base para la evaluación de recursos y riesgos naturales. Holanda: ITC Publicaciones.
- Vivas, L. (1984). El Cuaternario. Mérida: Universidad de los Andes.
- _____ (1992). Los Andes Venezolanos. Caracas: Academia de Historia de Venezuela.
- _____ (2012) Geotemas. Mérida: Fondo Editorial Simón Rodríguez.
- Woolsink, M. (2013). River basin approach and integrated water management: Governance pitfalls for the Dutch Space-Water-Adjustment Management. Geoforum. Volume 4, Issue 4. 473-487.
- Zinck, A. (1980). Valles de Venezuela. Cuadernos Lagoven.
- _____ (1987). Aplicación de la Geomorfología al Levantamiento de Suelos en Zonas Aluviales y Definición del Ambiente Geomorfológico con Fines de Descripción de Suelos. Mérida: CIDIAT.
- _____ (1988). Physiography and Soils. ITC Lecture Notes SOL.
- _____ (1996). Susceptibilidad de los Suelos a la Remoción en Masa, con referencia especial a las Montañas húmedas tropicales. En: Evaluación y Manejo de Suelos. Granada: Universidad de Granada.
- _____ (2012). Geopedología: Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales. Faculty Geo-Information Science and Earth observation Enschede. Netherlands.

Zinck, A.; López, J.; Metternitch, G; Shresta, D.; Vázquez-Selem, L. (2001). Mapping and modelling mass movements and gullies in mountainous areas using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*. Volume 3. Issue 1. 43-53.

Zúñiga, F. (2011). *Notas Introductorias de la Sismología*. Centro de Geociencias de la UNAM: México D.F.

www.bdigital.ula.ve

ANEXOS

www.bdigital.ula.ve

Anexo N°: 1 – Evidencias fotográficas de terrazas en el Tipo de Paisaje Valle de la cuenca del río Torbes.



Fuente: Elaboración Propia



Fuente: Elaboración Propia

Anexo N°: 2 – Cuadro Explicativo Código Facies de Tipo de Paisaje de la cuenca del río Torbes

<i>Código</i>	<i>Formación</i>	<i>Tipo de Paisaje</i>	<i>Perfil Topográfico</i>	<i>Suelos</i>	<i>Pendiente</i>	<i>Forma Topográfica</i>	<i>Amplitud</i>	<i>Longitud Drenaje</i>	<i>Area (Km2)</i>	<i>Densidad (N)</i>	<i>Densidad (C)</i>	<i>Cicatrices</i>	<i>IDC</i>	<i>Cualitativo</i>
ADtFCrMCvCxCsTTa	Los Cuervos	Montaña	Cóncavo-Convexo	Consociación Typic Tropudalfs	Fuertemente Escarpado	Montañoso	Alta	0,00	0,25	0,00	Baja	2	20,29	Muy Altamente Susceptibles
ADtFCrLCxvCxTTa	Los Cuervos	Lomerío	Convexo-Cóncavo	Consociación Typic Tropudalfs	Moderadamente Escarpado	Colinoso	Moderada	0,00	1,06	0,00	Baja	6	14,36	Muy Altamente Susceptibles
ADtFCaMCvCxCsTTa	Carbonera	Montaña	Cóncavo-Convexo	Consociación Typic Tropudalfs	Escarpado	Fuertemente Disectado	Alta	0,00	0,65	0,00	Baja	1	3,88	Muy Altamente Susceptibles
ADtFApMCvCxGiTEpUThOHT	Apón	Montaña	Cóncavo-Convexo	Grupo Indiferenciado Typic Eutropepts, Ustoxic Tropohumults, Oxic Humitropepts	Escarpado	Fuertemente Disectado	Alta	4,90	3,33	1,47	Moderada	5	3,82	Muy Altamente Susceptibles
ADtFRnMCvCxGiTEpTThUTHOHT	río Negro	Montaña	Cóncavo-Convexo	Grupo Indiferenciado Typic Eutropepts, Typic Tropohumults, Ustoxic Tropohumults, Oxic Humitropepts	Escarpado	Fuertemente Disectado	Alta	28,09	30,48	0,92	Baja	39	3,25	Muy Altamente Susceptibles
ADtFMiMCxvCxCsTTa	Mirador	Montaña	Convexo-Cóncavo	Consociación Typic Tropudalfs	Escarpado	Fuertemente Disectado	Moderada	0,00	1,26	0,00	Baja	1	2,01	Altamente Susceptibles
ADtFAgMCvCxCsTTh	Aguardiente	Montaña	Cóncavo-Convexo	Consociación Typic Tropohumults	Escarpado	Fuertemente Disectado	Alta	4,72	5,68	0,83	Baja	4	1,79	Altamente Susceptibles
ADtFCpLCvCxAsTHxTEp	Capacho	Lomerío	Convexo-Cóncavo	Asociación Typic Haplumox, Typic Eutropepts	Escarpado	Fuertemente Disectado	Baja	3,12	3,17	0,98	Baja	2	1,60	Moderadamente Susceptibles
ADtFQtpCxCvAsOHtTEpTHx	Coluvio-Aluvial	Piedemonte	Convexo-Cóncavo	Asociación Oxic Humitropepts, Typic Eutropepts, Typic Haplumox	Fuertemente Ondulado	Fuertemente Ondulado	Moderada	14,41	6,63	2,17	Alta	4	1,53	Moderadamente Susceptibles
ADtFCrLCxvCxAsTThTf	Los Cuervos	Lomerío	Convexo-Cóncavo	Asociación Typic Tropohumults, Typic Tropofluvents	Moderadamente Escarpado	Colinoso	Moderada	0,97	1,85	0,52	Baja	1	1,37	Moderadamente Susceptibles
ADtFAgMCvCxAsOHtLTnTTh	Aguardiente	Montaña	Cóncavo-Convexo	Asociación Oxic Humitropepts, Lithic Troporthent, Typic Tropohumults	Escarpado	Fuertemente Disectado	Alta	19,78	17,41	1,14	Moderada	8	1,17	Moderadamente Susceptibles

ADtFQMCvCxGiUHtEpTThTn	La Quinta	Montaña	Cóncavo-Convexo	Grupo Indiferenciado Ustoxic Humitropepts, Typic Eutropepts, Typic Tropohumults, Typic Troporthent	Escarpado	Fuertemente Disectado	Alta	90,92	92,82	0,98	Baja	36	0,98	Ligeramente Susceptible
ADtFAPMCvCxAsTThTHT	Apón	Montaña	Cóncavo-Convexo	Asociación Typic Tropohumults, Typic Humitropepts	Escarpado	Fuertemente Disectado	Alta	1,73	3,83	0,45	Baja	1	0,66	Ligeramente Susceptible
ADtFCMLCxvCsTTa	Colón/Mito Juan	Lomerío	Convexo-Cóncavo	Consociación Typic Tropudalfs	Moderadamente Escarpado	Colinoso	Baja	0,20	4,31	0,05	Baja	1	0,59	Ligeramente Susceptible
ADtFCpMCvCxCsTEp	Capacho	Montaña	Cóncavo-Convexo	Consociación Typic Eutropepts	Moderadamente Escarpado	Colinoso	Moderada	13,93	18,45	0,76	Baja	4	0,55	Ligeramente Susceptible
ADtFQIVCxRtAsTtTfEpTTh	Aluvial	Valle	Convexo-Rectilíneo	Asociación Typic Tropofluents, Typic Eutropepts, Typic Tropohumults	Plano o Casi Plano	Plano o Casi Plano	Baja	24,71	6,44	3,84	Muy Alta	1	0,39	Ligeramente Susceptible
ADtFQIPCxvGiTHxTEpThTTF	Coluvio-Aluvial	Piedemonte	Convexo-Cóncavo	Grupo Indiferenciado Typic Haplumox, Typic Eutropepts, Typic Humitropepts, Typic Tropofluents	Fuertemente Ondulado	Fuertemente Ondulado	Muy Baja	35,44	34,21	1,04	Moderada	4	0,30	Ligeramente Susceptible
ADtFSMCvCxCsUHT	Sabaneta	Montaña	Cóncavo-Convexo	Consociación Ustoxic Humitropepts	Escarpado	Fuertemente Disectado	Alta	1,95	1,92	1,02	Moderada	0	0,00	No Susceptible
ADtFMCCvCxAsUHtThTUTH	Mucuchachí	Montaña	Cóncavo-Convexo	Asociación Ustoxic Humitropepts, Typic Humitropepts, Ustoxic Tropohumults	Escarpado	Fuertemente Disectado	Alta	6,21	3,92	1,58	Moderada	0	0,00	No Susceptible
ADtFAPMCvCxAsTEpLTn	Apón	Montaña	Cóncavo-Convexo	Asociación Typic Eutropepts, Lithic Troporthent	Escarpado	Fuertemente Disectado	Alta	1,77	2,68	0,66	Baja	0	0,00	No Susceptible
ADtFRnMCvCxCsTEp	río Negro	Montaña	Cóncavo-Convexo	Asociación Oxic Humitropepts, Lithic Troporthent	Escarpado	Fuertemente Disectado	Alta	3,56	5,10	0,70	Baja	0	0,00	No Susceptible
ADtFQIPCxvGiTTnThTEp	Coluvio-Aluvial	Piedemonte	Convexo-Cóncavo	Grupo Indiferenciado Typic Troporthent, Typic Hapludolls, Typic Eutropepts	Moderadamente Escarpado	Colinoso	Alta	3,76	0,66	5,71	Muy Alta	0	0,00	No Susceptible

ADtFCpLCvCxCsTTA	Capacho	Lomerío	Cóncavo-Convexo	Consociación Typic Tropudalfs	Moderadamente Escarpado	Colinoso	Baja	0,40	2,26	0,18	Baja	0	0,00	No Susceptible
ADtFCrMCvCxAsTTfTTa	Los Cuervos	Montaña	Cóncavo-Convexo	Asociación Typic Tropofluvents, Typic Tropudalfs	Escarpado	Fuertemente Disectado	Moderada	0,45	0,28	1,59	Moderada	0	0,00	No Susceptible
ADtFBLCxvTTa	Barco	Lomerío	Convexo-Cóncavo	Consociación Typic Tropudalfs	Moderadamente Escarpado	Colinoso	Moderada	0,00	0,52	0,00	Baja	0	0,00	No Susceptible
ADtFBMCxvCxCsTTa	Barco	Montaña	Convexo-Cóncavo	Consociación Typic Tropudalfs	Escarpado	Fuertemente Disectado	Alta	0,00	1,05	0,00	Baja	0	0,00	No Susceptible
ADtFBMCxvCxCsTTa	Barco	Montaña	Convexo-Cóncavo	Consociación Typic Tropudalfs	Escarpado	Fuertemente Disectado	Alta	0,00	0,20	0,00	Baja	0	0,00	No Susceptible
ADtFCMCxvCxCsTTa	Colón	Montaña	Convexo-Cóncavo	Consociación Typic Tropudalfs	Escarpado	Fuertemente Disectado	Alta	0,00	0,08	0,00	Baja	0	0,00	No Susceptible
ADtFCLCxvCxCsTEp	Colón	Lomerío	Convexo-Cóncavo	Consociación Typic Eutropepts	Moderadamente Escarpado	Colinoso	Baja	2,20	3,94	0,56	Baja	0	0,00	No Susceptible
ADtFQtiPCvCxCsTTn	Coluvio-Aluvial	Piedemonte	Convexo-Cóncavo	Consociación Typic Tropophent	Ondulado	Ondulado	Baja	0,47	0,24	2,00	Alta	0	0,00	No Susceptible
ADtFQtiPCvRtCsTHx	Coluvio-Aluvial	Piedemonte	Convexo-Rectilíneo	Consociación Typic Haplumox	Plano o Casi Plano	Plano o Casi Plano	Baja	0,00	0,81	0,00	Baja	0	0,00	No Susceptible
ADtFAgLCxvCxCsTHx	Aguardiente	Lomerío	Convexo-Cóncavo	Consociación Typic Haplumox	Escarpado	Fuertemente Disectado	Moderada	0,57	1,68	0,34	Baja	0	0,00	No Susceptible
ADtFLLCxvCxCsTEp	La Luna	Lomerío	Convexo-Cóncavo	Consociación Typic Eutropepts	Escarpado	Fuertemente Disectado	Baja	2,48	4,28	0,58	Baja	0	0,00	No Susceptible
ADtFLLCxvCxCsTEp	La Luna	Lomerío	Cóncavo-Convexo	Consociación Typic Eutropepts	Escarpado	Fuertemente Disectado	Moderada	0,23	0,56	0,40	Baja	0	0,00	No Susceptible
ADtFAgLCxvCxCsUTH	Aguardiente	Lomerío	Convexo-Cóncavo	Consociación Ustoxic Tropohumults	Escarpado	Fuertemente Disectado	Moderada	2,02	1,14	1,77	Moderada	0	0,00	No Susceptible
ADtFQtiLCxvCxCsTHx	Coluvio-Aluvial	Lomerío	Convexo-Cóncavo	Consociación Typic Haplumox	Fuertemente Ondulado	Fuertemente Ondulado	Baja	6,17	3,21	1,92	Moderada	0	0,00	No Susceptible
ADtFCMLCxvCxAsTTfTTHEp	Colón/Mito Juan	Lomerío	Convexo-Cóncavo	Asociación Typic Tropofluvents, Typic Tropohumults, Typic Eutropepts	Moderadamente Escarpado	Colinoso	Moderada	1,69	1,57	1,08	Moderada	0	0,00	No Susceptible

ADtFLMCvCxAsTThTht	La Luna	Montaña	Cóncavo-Convexo	Asociación Typic Tropohumults, Typic Humitropepts	Escarpado	Fuertemente Disectado	Alta	2,53	2,49	1,01	Moderada	0	0,00	No Susceptible
ADtFCpMCvCxCsTTh	Capacho	Montaña	Cóncavo-Convexo	Consociación Typic Tropohumults	Escarpado	Fuertemente Disectado	Alta	1,77	1,95	0,91	Baja	0	0,00	No Susceptible
ADtFQtPCxCvCsTTa	Coluvio-Aluvial	Piedemonte	Convexo-Cóncavo	Consociación Typic TropudalFs	Moderadamente Escarpado	Colinoso	Moderada	0,10	0,30	0,35	Baja	0	0,00	No Susceptible
ADtFAGMCvCxCsTEp	Aguardiente	Montaña	Cóncavo-Convexo	Consociación Typic Eutropepts	Escarpado	Fuertemente Disectado	Alta	5,01	8,31	0,60	Baja	0	0,00	No Susceptible
ADtFLMCvCxAsTThTEp	La Luna	Montaña	Cóncavo-Convexo	Asociación Typic Tropohumults, Typic Eutropepts	Moderadamente Escarpado	Colinoso	Moderada	7,72	16,52	0,47	Baja	0	0,00	No Susceptible
ADtFMiLCxCvCsTTa	Mirador	Lomerío	Convexo-Cóncavo	Consociación Typic TropudalFs	Escarpado	Fuertemente Disectado	Moderada	0,00	0,27	0,00	Baja	0	0,00	No Susceptible
ADtFMiCvCxCsTTa	Mirador	Montaña	Cóncavo-Convexo	Consociación Typic TropudalFs	Escarpado	Fuertemente Disectado	Alta	0,00	0,90	0,00	Baja	0	0,00	No Susceptible
ADtFCLCvCxCsTTa	Colón	Lomerío	Convexo-Cóncavo	Grupo Indiferenciado Typic Tropohumults, Typic Eutropepts, Typic Humitropepts	Moderadamente Escarpado	Colinoso	Alta	3,63	5,83	0,62	Baja	0	0,00	No Susceptible

Fuente: Elaboración Propia

Anexo N°: 3 – Muestra del Catálogo Sísmico facilitado por FUNVISIS (2016) y el USGS (2016).

<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>	<i>Año</i>	<i>Mes</i>	<i>Día</i>	<i>Hora</i>	<i>Minuto</i>	<i>Segundo</i>	<i>Profundidad (Km)</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Tipo Magnitud</i>
7.2	-73	1966	1	4	20	50	35.3	40.0	4.5	mb
6.79	-72.99	1966	1	6	4	19	59	167	5.2	mb
7.53	-72.15	1966	1	10	11	13	7	55	4.9	mb
7.3	-73.4	1966	1	29	3	29	43	116	4.8	mb
6.81	-72.95	1966	1	29	16	53	38.2	155	4.5	mb
6.8	-73.2	1966	1	30	3	17	43.6	166	4.5	mb
6.84	-73.11	1966	2	1	9	7	56	160	4.6	mb
6.94	-73.09	1966	2	20	4	10	27.6	151	4.7	mb
7.2	-71.69	1966	3	6	21	4	19	36	4.6	mb
7.06	-71.7	1966	3	6	21	4	21	42	4.6	mb
6.73	-73.09	1966	3	18	4	59	28.1	168	4.7	mb
6.91	-73.09	1966	3	26	2	14	10.3	159	4.7	mb
6.89	-73.16	1966	4	2	18	16	56.6	163	4.7	mb
6.83	-72.95	1966	4	9	15	49	54.9	159	5.2	mb
6.82	-73.01	1966	4	10	10	33	35.7	163	5	mb
6.87	-73.08	1966	4	21	8	18	25.1	162	4.7	mb
6.77	-73.18	1966	4	29	6	45	22.3	169	4.7	mb
6.86	-73.26	1966	5	23	6	6	5.2	150	4.6	mb
6.77	-73.12	1966	6	12	3	56	24.8	170	4.6	mb
6.87	-73.08	1966	6	24	20	0	8.3	158	4.6	mb
6.78	-72.97	1966	7	1	6	33	12.3	175	4.5	mb
6.79	-73.04	1966	7	7	0	10	31.6	164	4.6	mb
6.83	-73.04	1966	7	11	7	28	18.5	168	4.5	mb
6.79	-73.24	1966	7	11	9	29	55.8	180	4.6	mb
6.93	-73.2	1966	8	7	8	20	59.6	149	4.5	mb
6.84	-73.04	1966	9	11	3	20	53.1	158	4.6	mb
6.78	-72.95	1966	9	11	17	38	4.2	168	5.7	mb
6.84	-73.02	1966	11	27	1	10	39.5	169	4.5	mb
7	-73	1966	11	27	11	18	17.5		4.6	
6.5	-71.3	1966	12	17	9	16	17.1	33	4.6	mb

6.79	-73.02	1967	1	3	17	21	42.1	163	4.7	mb
6.8	-72.98	1967	1	22	8	18	15.1	168	4.7	mb
8	-73	1967	3	1	0	10	6		4.7	
6.94	-73.01	1967	3	19	21	29	25.4	165	4.5	mb

Fuente: FUNVISIS (2016); USGS (2016)

www.bdigital.ula.ve

C.C.Reconocimiento