



Universidad Autónoma del Estado de México



Facultad de Geografía

**Tesis para obtener el grado de:
Licenciado en Geología Ambiental y Recursos Hídricos**

Tesis

***IDENTIFICACIÓN DE ZONAS SUSCEPTIBLES A
DESLIZAMIENTOS EN EL MUNICIPIO DE VALLE DE
BRAVO, ESTADO DE MÉXICO.***

Presenta:

Flores de la Maza Daniel Alejandro

Asesor: Dr. En C.T. Alexis Ordaz Hernández

Revisor: Dr. José Emilio Baro Suarez

Revisor: M. en G. Juan Carlos Garatachia Ramírez

Valle de Bravo, Estado de México, 01 de Junio del 2020

ÍNDICE

RESUMEN	10
ABSTRACT.....	10

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN	11
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	15
1.4. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS	17
1.5. Antecedentes	18
1.5.1. Antecedentes globales.....	18
1.5.2. Antecedentes Regionales.....	20
1.5.3. Antecedentes Locales	21

CAPÍTULO II MARCO LEGAL E INSTITUCIONAL

2.1. Marco legal.....	22
2.1.1. Ley General de Protección Civil.....	22
2.1.2. Ley Estatal de Protección Civil	22
2.1.3. Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente	23
2.1.4. Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano	24
2.1.5. Ley de Cambio Climático	24
2.2. Marco Institucional	25
2.2.1. Dirección General de Protección Civil del Estado de México.....	25
2.2.2. Centro Nacional de Prevención de Desastres.....	25

CAPÍTULO III MARCO TEÓRICO - CONCEPTUAL

3.1. GEOLOGÍA AMBIENTAL.....	26
3.2. RIESGOS SOCIO-NATURALES.....	27
3.3. RIESGOS GEOLÓGICOS	28
3.4. MOVIMIENTOS DE LADERA.....	30

3.5. FACTORES CONDICIONANTES Y DESENCADENANTES	32
3.6. TIPOS DE MOVIMIENTO.....	34
3.6.1. Caída de Rocas (Falls, Rocfalls).....	36
3.6.2. Vuelcos (Topples).....	37
3.6.3. Deslizamientos	38
3.6.3.1. Deslizamientos Rotacionales (Slumps)	39
3.6.3.2 Deslizamientos Traslacionales	43
3.6.3.3 Deslizamientos Rocosos	44
3.6.3.4 Deslizamientos de Suelos y Detritos.....	44
3.6.3.5. Grandes Deslizamientos	45
3.4.4. Extensiones Laterales (Lateral Spreading).....	46
3.6.4.1. Extensiones Laterales en Rocas	46
3.6.4.2. Extensiones Laterales en Suelos	48
3.6.5 Flujos	48
3.6.5.1 Coladas de Barro o tierra	49
3.6.5.2. Flujos de Detritos.....	49
3.6.5.3 Rock Flows	50
3.7. ANÁLISIS MULTICRITERIO	51

CAPÍTULO IV METODOLOGÍA Y MATERIALES

4.1. METODOLOGÍAS	55
4.2. MATERIALES	64
4.2.1. Herramienta de Trabajo.....	64
4.3. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO MEDIANTE LA INVESTIGACIÓN DE INFORMACIÓN PARA ELABORAR CARTOGRAFIA.	65
4.3.1. Escala de Trabajo	65
4.3.2. Sistema de Referencia	65
4.3.3. Localización	65
4.3.4. Geología	66
4.3.5. Topografía e Hipsometría	69
4.3.6. Edafología	70
4.3.7. Uso de Suelo y Vegetación.....	72
4.3.7.1. Uso de Suelo	72

4.3.7.2. Vegetación.....	72
4.3.8. Clima.....	74
4.3.9. Hidrología.....	75
4.4. FACTORES CONDICIONANTES Y DESENCADENANTES DE LOS DESLIZAMIENTOS Y SU PONDERACION PARA EL ÁREA DE ESTUDIO.	76
4.4.1. Factores Condicionantes.....	79
4.4.1.1. Factor Geología.....	79
4.4.1.2. Factor Edafología.....	80
4.4.1.3. Factor Uso de Suelo y Vegetación.....	82
4.4.1.4. Factor Pendientes.....	83
4.4.2. Factores Desencadenantes.....	85
4.4.2.1. Factor Precipitación.....	85
4.5. ANÁLISIS FINAL MEDIANTE ARCMAP 10.1 PARA LA ELABORACIÓN DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS.	87

CAPÍTULO ANÁLISIS DE RESULTADOS, RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

5.1. RESULTADOS.....	89
5.2. RECOMENDACIONES Y MEDIDAS PREVENTIVAS.....	92
5.2.1. Recomendaciones.....	93
5.2.2. Medidas Preventivas.....	94
5.2.2.1. Control de Drenaje.....	94
5.2.2.2. Nivelación.....	95
5.2.2.3. Control de Drenaje.....	95
5.2.2.4. Sistemas de alerta de deslizamientos.....	96
5.2.2.5. La vegetación.....	96
5.2.2.6. Adaptación al peligro de deslizamiento.....	97
5.3. CONCLUSIONES.....	99
6. BIBLIOGRAFÍA.....	103
ANEXOS.....	111

Índice de Figuras

FIGURA 1.0 Ubicación del municipio, Valle de bravo.....	12
FIGURA 2.0 Principales tipos de movimientos en masa.....	35
FIGURA 3.0 Caída de rocas.....	37
FIGURA 4.0 Vuelco en areniscas.....	38
FIGURA 5.0 Principales características de un deslizamiento rotacional.....	40
FIGURA 6.0 Deslizamiento Rotacional.....	41
FIGURA 7.0 Deslizamiento rotación múltiple en materias Yesíferos.....	42
FIGURA 8.0 Deslizamientos rotacionales múltiples en yesos.....	42
FIGURA 9.0 Deslizamiento translacional de detritos.....	44
FIGURA 10.0 Bloque diagrama de un típico flujo deslizante.....	49
FIGURA 11.0 Mapa de Ubicación de Valle de Bravo.....	66
FIGURA 12.0 Mapa de Geología de Valle de Bravo.....	68
FIGURA 13.0 Mapa de Pendientes de Valle de Bravo.....	69
FIGURA 14.0 Mapa de Edafología de Valle de Bravo.	71
FIGURA 15.0 Mapa de Uso de Suelo y Vegetación de Valle de Bravo.....	73
FIGURA 16.0 Mapa de Precipitación de Valle de Bravo.....	75
FIGURA 17.0 Mapa de Geología de Valle de Bravo reclasificado.....	80
FIGURA 18.0 Mapa de Edafología de Valle de Bravo reclasificado.....	81
FIGURA 19.0 Mapa de Uso de Suelo y Vegetación de Valle de Bravo reclasificado.....	83
FIGURA 20.0 Mapa de Pendientes de Valle de Bravo reclasificado	85
FIGURA 21.0 Mapa de Precipitación de Valle de Bravo reclasificado.....	86
FIGURA 22.0 Mapa de Susceptibilidad a deslizamientos de Valle de Bravo clasificado...88	
FIGURA 23.0 Mapa de Susceptibilidad a deslizamientos de Valle de Bravo con localidades, clasificado en tres rangos.....	90

Índice de Tablas

TABLA 1.0 Tabla de procesos geológicos y meteorológicos.....	29
TABLA 2.0 Tabla de Factores condicionantes y desencadenantes.....	32
TABLA 3.0 Factores influyentes en la inestabilidad de laderas.....	34
TABLA 4.0 Clasificación de procesos.....	36
TABLA 5.0 Factores influyentes en la inestabilidad de laderas.....	77
TABLA 6.0 Metodología para el análisis de la susceptibilidad a deslizamientos.....	78
TABLA 7.0 Clasificación de geología.....	79
TABLA 8.0 Clasificación de edafología.....	81
TABLA 9.0 Clasificación de Usos de Suelo.....	82
TABLA 10.0 Clasificación de pendientes.....	84
TABLA 11.0 Clasificación precipitación.....	86
TABLA 12.0 Clasificación de la Susceptibilidad a deslizamientos.....	91

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objetivo principal identificar las zonas susceptibles a deslizamientos de ladera en el municipio de Valle de Bravo, Estado de México, donde para ello se conceptualizó la teoría relacionada con los deslizamientos y posteriormente se realizó una caracterización físico – geográfica de la zona para determinar los factores que tendrán influencia en los deslizamientos. La información recopilada se procesó en un Sistema de Información Geográfica (ArcMap 10.1) para obtener mapas temáticos de la zona de estudio. Por último, se obtuvo el resultado final consistente en un mapa donde se pueden visualizar tres rangos de susceptibilidad a los deslizamientos, bajo, medio y alto. Resulta importante destacar que existen localidades en el municipio con un alto grado de susceptibilidad a los deslizamientos como lo son Tiloxtoc, San Nicolas, Cerro Gordo, La Candelaria, Loma de Chihuahua, Amatitlán, Los Álamos, El Naranjo, Las Agujas, Cuadrilla de Dolores, Atezcapan y Mesa Rica.

ABSTRACT

The main objective of this work is to identify the areas susceptible to landslides in the municipality of Valle de Bravo, State of Mexico, where the theory related to landslides was conceptualized and subsequently a physical-geographical characterization of the area was carried out. to determine the factors that will influence landslides. The collected information was processed in a Geographic Information System (ArcMap 10.1) to obtain thematic maps of the study area. Finally, the final result was obtained, consisting of a map where three ranges of landslide susceptibility can be visualized, low, medium and high. It is important to note that there are towns in the municipality with a high degree of susceptibility to landslides such as Tiloxtoc, San Nicolas, Cerro Gordo, La Candelaria, Loma de Chihuahua, Amatitlán, Los Álamos, El Naranjo, Las Agujas, Cuadrilla de Dolores, Atezcapan y Mesa Rica.

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Desde los albores de la historia, el hombre ha sido víctima constante de las inclemencias del tiempo, de la transformación y modelado de la corteza terrestre, donde la mayor parte de esta superficie está formada por laderas (Young, 1972) y pueden considerarse como componentes fundamentales del relieve. El estudio de su forma, significado y evolución constituye una de las materias básicas de la geomorfología (Douglas, 1977).

No obstante, la investigación de los deslizamientos resulta difícil debido a la complejidad del fenómeno cuyos mecanismos de funcionamiento no se conocen en general de manera detallada (Carson y Kirkby 1972). Además, en los climas húmedos, los rasgos que permiten el conocimiento de los deslizamientos se colonizan rápidamente por vegetación, lo que dificulta su identificación.

El funcionamiento complejo de los sistemas terrestres, expresados en la ocurrencia de eventos naturales como los movimientos de ladera en el municipio de Valle de Bravo son el resultado de mecanismos de ajuste y auto organización de nuestro planeta, estos mecanismos en su interacción generan interés para la geología ya que es el tercer riesgo socio-natural por víctimas, tras terremotos e inundaciones, por lo cual desde este punto de vista es importante la prevención, siendo esta más efectiva cuando los procesos ocurren a escala geotécnica, es decir, con dimensiones que permitan abordar su control, ya que los grandes deslizamientos a escala geológica son, por lo general, imposibles de controlar y en estos casos una de las pocas medidas posibles es la prevención.

Así mismo, también genera gran interés para las ciencias sociales en cuanto a que existen grupos humanos que en su construcción de espacios para la vida ocupan zonas expuestas o propicias para la ocurrencia de los movimientos gravitacionales. Así la regulación del sistema terrestre se convierte en desastre social, ante ellos es de vital importancia el ordenamiento territorial, es decir, evitar que la población

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Surge a partir de la búsqueda y revisión de documentos (Atlas de Riesgo, Plan de Desarrollo Urbano y Ordenamientos Territoriales) enfocados a identificar zonas susceptibles a los deslizamientos, considerados estos como procesos geodinámicos que afectan a la superficie terrestre y dan lugar a movimientos del terreno de diversas características, magnitudes y velocidades.

Los movimientos de ladera según la OEA, para América Latina y el Caribe han provocado daños medios anuales en el periodo de 1960-1989, los cuales fueron de unos 100 millones de USD. La reparación de las autopistas estatales y federales en EE.UU., representa 115 millones de USD al año; en Canadá los daños anuales son de 50 millones de USD, 6 en Suecia, unos 20 en Noruega y 15 en Nueva Zelanda (Schuster, 1996). Según este mismo autor la catástrofe de Vajont citada produjo pérdidas materiales en el embalse (el más alto del mundo en 1963) de 425 millones de USD, 100 millones en propiedades y 68 por daños personales. Los datos existentes sobre daños económicos son de fiabilidad problemática y muy incompletos, debido a la gran dispersión de sucesos y la falta de una metodología común.

La acción de la gravedad, el debilitamiento progresivo de los materiales, debido principalmente a la meteorización, y la actuación de otros fenómenos naturales y ambientales, hacen que los movimientos del terreno sean relativamente habituales en el medio geológico.

En cuanto al Atlas de Riesgo se determinó que, respecto a los riesgos geológicos, en su apartado de deslizamientos habla de dichas zonas con altas pendientes (30° a 90°), de las cuales se tiene registro y documentadas mediante un catálogo fotográfico con datos de la zona, sin embargo, ni en el Plan de Desarrollo Urbano ni en el Atlas de Riesgo existe un mapa que coadyuve y apoye a identificar zonas consideradas susceptibles a deslizamiento del terreno.

Con esta tesis se pretende beneficiar en distintos ámbitos al municipio de Valle de Bravo, considerando entre ellos la actividad turística, ya que este lugar es uno de

los principales destinos turísticos del Estado de México y es decretado como un Pueblo Mágico en el 2005 por la Secretaría de Turismo Federal, este destino cuenta con miles de visitantes los fines de semana y es por ello que a través de esta tesis se pretende coadyuvar a otros estudios, programas, planes entre otros, los cuales podrán evitar que se construyan emplazamientos turísticos, ya sean hoteles, locales comerciales, escuelas, hospitales, viviendas, calles entre otros en zonas susceptibles a deslizamientos para así evitar una posible situación de riesgo o de desastre.

Esto permitirá regular los asentamientos humanos, con lo cual se podrán evitar asentamientos en zonas susceptibles a deslizamientos y futuros eventos de desastre que afecte la integridad de las familias que se ubiquen en dichas zonas expuestas, así como también se podrán evitar daños y pérdidas estructurales de sus casas, lo que se traduce en evitar pérdidas económicas para el municipio de Valle de Bravo.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Es importante realizar este proyecto debido a que en el municipio de Valle de Bravo, Estado de México existe un aumento constante de la población que se asienta en zonas con susceptibilidad a deslizamientos de tierra, con lo cual dicho proyecto pretende apoyar a los instrumentos regulatorios (Plan de Desarrollo Urbano, Atlas de Riesgos, Ordenamientos territoriales entre otros) encargados de planificar y zonificar los asentamientos humanos en zonas que no exista susceptibilidad a dichos procesos partiendo del análisis de estudio realizados.

Estos procesos llegan a construir desastres geológicos potenciales, ya que pueden causar daños económicos y sociales al afectar las actividades y construcciones humanas por lo que evitar estos efectos es de suma importancia para los gobiernos.

Resulta de gran relevancia dado que estas catástrofes en el mundo han causado múltiples víctimas mortales (Ayala-Carcedo, 1994). Entre esas víctimas desde el año 1000, han muerto al menos 280,135 personas ya que estas cifras convierten a los movimientos de ladera en el tercer riesgo socio-natural por víctimas, tras los terremotos e inundaciones, los daños económicos producidos por los movimientos de ladera pueden ser directos (casas o infraestructuras dañadas) o indirectos (pérdida por lucro constante, costes de corrección).

El municipio de Valle de Bravo se encuentra formado principalmente por montañas con relieves accidentados (pendientes) cuyas zonas abarcan hasta un 50% de la superficie total del municipio, la cual está constituida por rocas metamórficas (esquistos), ígneas (toba, extrusiva intermedia, andesita y basalto) y sedimentarias. De éstas, solamente las áreas donde se localizan rocas ígneas de toba y andesita son aptas para uso urbano sin restricción (Atlas de Riesgos, 2016)

Aunado a lo anterior hay fallas geológicas en la mayor parte del territorio que rodea el área urbana actual de la Cabecera Municipal, por lo que es indispensable considerar este aspecto para las zonas de futuro crecimiento a fin de no proponer áreas urbanizables en zonas que representen algún riesgo para la población.

Dado que en Valle de Bravo se han registrado deslizamientos que afectan a la población tales como: el deslizamiento ocurrido el 26 de agosto del 2010 en el paraje de la carretera conocido como El Rostro, donde autoridades de Protección Civil informaron que después de permanecer cerrada la circulación por tres días pudo ser reabierto. Otro caso conocido es el deslizamiento ocurrido el 2 de octubre del 2013 en la sublocalidad de Santa María Ahuacatlán (Ceiba) que afecto a múltiples viviendas provocando damnificados en la zona por mencionar algunos, por ello es importante que para resolver esta problemática exista un mapa que logre identificar las zonas susceptibles a dicho procesos y con ello poder establecer de manera clara las zonas que se deben evitar para desarrollos urbanos.

Con base en lo anterior y con el fin máximo que se apoye a la salvaguardia de la persona y la sociedad, así como sus bienes y entorno ante la eventualidad de un desastre, es importante que en el municipio cuente con un mapa de susceptibilidad a deslizamientos que identifique y analice estas zonas para con ello aportar información para un futuro plan de gestión que pueda prevenir y minimizar riesgos.

1.4. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS

Objetivo General:

- Analizar la susceptibilidad a deslizamientos en el municipio de Valle de Bravo para obtener un mapa de las zonas susceptibles y su representación cartográfica.

Objetivos específicos:

- Establecer la caracterización físico-geográfica de la zona de estudio mediante la investigación de información para elaborar cartografía.
- Identificar y analizar los factores condicionantes y desencadenantes de los deslizamientos y ponderarlos para el área de estudio.
- Realizar un análisis final mediante ArcMap 10.1 para la elaboración del mapa de susceptibilidad a deslizamientos.

1.5. Antecedentes

Los deslizamientos han ocurrido desde hace miles de millones de años, sin embargo los últimos años ha crecido la preocupación por estudiar estos movimientos, sus causas y sus comportamientos, ya que han afectado al mundo de forma importante y han causado cientos de muertes, por ello diversos especialistas en el tema han llevado a cabo cientos de pruebas y análisis para entenderlos para lograr determinar zonas con un alto grado de susceptibilidad a que ocurran dichos movimientos y de cierta forma mitigarlos.

Las laderas han sido poco estudiadas hasta las últimas tres décadas en las que ha proliferado la investigación sobre los procesos tanto en parcelas experimentales de campo como el laboratorio se han desarrollado modelos de peligrosidad y procedimientos de análisis de la estabilidad de laderas no obstante su investigación resulta difícil debido a la complejidad del fenómeno cuyos mecanismos de funcionamiento no se conocen en general de manera detallada (Carson y Kirkby 1972).

1.5.1 Antecedentes globales

Los deslizamientos y otros tipos de rupturas del terreno son fenómenos naturales que ocurrirían con o sin la actividad humana en todo el mundo. Sin embargo, en muchos casos la expansión de las zonas urbanas, las redes de transporte y el uso de los recursos naturales ha aumentado el número y frecuencia de los deslizamientos en todos los continentes (Keller y Blodgett, 2004).

Periódicamente se publican noticias que relatan los detalles terroríficos y a veces siniestros de los deslizamientos de tierra. El 31 de mayo de 1970 se produjo uno de estos sucesos cuando una avalancha gigantesca de rocas enterró a más de 20,000 personas en Yungay y Ranrahirca Perú pero el desastre fue inminente (Tarbuck, y Lutgens, 1999).

Los deslizamientos son una amenaza para la vida y la propiedad en los 50 estados que componen Estados Unidos. Para reducir el riesgo procedente de los

deslizamientos activos, el U. S. Geological Survey (USGS) desarrolla y utiliza sistemas de control en tiempo real de los deslizamientos. El control puede detectar las indicaciones iniciales del movimiento catastrófico rápido.

Los deslizamientos de tierra de Portuguese Bend en la costa sur de California en Los Ángeles es un ejemplo famoso de cómo las personas pueden incrementar el riesgo de movimientos en masa. Este deslizamiento, que destruyó más de 150 viviendas, es parte de un antiguo deslizamiento más grande. La construcción de carreteras y los cambios en el drenaje subterráneo asociado con el desarrollo urbano reactivaron el antiguo deslizamiento (Tarbuck,y Lutgens, 1999).

Los deslizamientos de tierra y fenómenos relacionados tienen capacidad para causar un daño y pérdida de vidas considerable. Sólo en Estados Unidos una media de 25 personas mueren cada año como consecuencia de los deslizamientos y esta cifra aumenta hasta 100-150 si se incluye el derrumbamiento de zanjas y otras excavaciones. El coste total anual de los daños pasa de los 1 000 millones de dólares y puede llegar a los 3 000 millones de dólares.¹² Los efectos directos de los deslizamientos en personas y propiedades incluyen el ser golpeados o sepultados por los materiales movilizados. Los deslizamientos pueden dañar también viviendas, carreteras e instalaciones construidas en la cumbre o ladera de un monte. A menudo bloquean carreteras y ferrocarriles retrasando los viajes durante días o semanas. Un deslizamiento masivo, el de 1983 ocurrido en Thistle que veremos a continuación, bloqueó la circulación durante meses en las principales autopistas y una línea de ferrocarril transcontinental. La desviación del tráfico aumentó considerablemente los costes de transporte en la parte central del sur de Utah y tuvo como resultado el cierre temporal o permanente de minas de carbón, compañías petroleras, hoteles y otros negocios. Los deslizamientos pueden incluso bloquear rutas de navegación. En 1980 un flujo de detritos del volcán monte Santa Helena llenó el río Columbia con más de 34 millones de metros cúbicos de sedimento (Tarbuck y Lutgens, 1999).

En diciembre de 1999, las fuertes lluvias desencadenaron miles de deslizamientos a lo largo de la costa de Venezuela. Los flujos de derrubios provocaron grandes

daños a las propiedades y la trágica pérdida aproximada de 19.000 vidas (Keller y Blodgett 2004).

1.5.2. Antecedentes Regionales

De acuerdo con Schuster (1996) y otros investigadores y especialistas, los deslizamientos constituyen una de las causas más frecuentes de pérdidas humanas y económicas alrededor del mundo (Sidle y Ochiai, 2006, Alcántara-Ayala I., 2002, Domínguez L., 2015); y México es uno de los países que presenta una alta incidencia a la ocurrencia de éstos, por lo que la evaluación de la amenaza por deslizamientos y la capacidad de predecir dichos movimientos ha sido un tema de gran interés para la comunidad científica (Aleotti y Chowdhry, 1999; Chacón et al., 2006) y para las instituciones relacionadas con la Protección Civil, así como de las encargadas del ordenamiento del territorio y del uso del suelo.

México es un país cuyo territorio está conformado en dos terceras partes por sistemas montañosos donde se conjugan factores geológicos, geomorfológicos, estructurales y climáticos que definen zonas geológicamente inestables. Existen sobre ellos desarrollos urbanos y rurales, así como infraestructura civil. Esto coloca a un gran número de habitantes y bienes expuestos en una situación de riesgo potencial ante la generación de deslizamientos y derrumbes de roca, flujos de lodos y detritos, así como otros procesos destructivos asociados a zonas montañosas. (Domínguez., et al 2015).

El 08 de agosto del 2016 en Huachinango Puebla ocurrió un deslizamiento de tierra desencadenado por fuertes lluvias, lo cual provocó la pérdida de al menos 29 personas y el derrumbe de casas (Martínez, 2016).

Uno de los casos más relevantes de deslizamiento ocurridos en México, es el de la comunidad La Pintada, en el municipio de Atoyac de Álvarez en el estado de Guerrero, acontecido el 16 de septiembre de 2013. La masa deslizada impactó, destruyó y sepultó a prácticamente la mitad de las viviendas del poblado, 71 personas perdieron la vida (CENAPRED, 2019).

La Coordinación Nacional de Protección Civil expone que el deslizamiento de laderas más grave en la historia de Puebla ocurrió en Teziutlán durante octubre de 1999, esto por las altas precipitaciones que se dieron a finales de septiembre de ese año y generaron inestabilidad en la zona, la cual provocó la muerte de 110 personas en la colonia la Aurora Teziutlán, Puebla (CENAPRED, 2019).

1.5.3. Antecedentes Locales

El 5 de febrero del 2010 ocurrió un deslizamiento de tierra en la carretera que va a Valle de Bravo a la altura del municipio de Zinacantepec, Estado de México, el cual movilizó toneladas de tierra, árboles y rocas que sepultaron al menos 20 carros y cobraron la vida de 10 personas (Dávila, 2010).

El 26 de agosto del 2010 ocurrió un deslizamiento de tierra en la carretera que va del paraje conocido como el arco a la cabecera municipal de Valle de Bravo, Estado de México, el cual afectó la circulación por algunos días y afectó algunas viviendas sin que se reportaran pérdidas de vida (El universal, 2010).

El 26 de octubre del 2018 ocurrió un deslizamiento de parte de un cerro a consecuencias de las lluvias intensas el cual provocó daños en una vivienda y un vehículo sin que existan reportes de personas heridas en la comunidad de Rincón de Estradas en el municipio de Valle de Bravo (Juárez, 2018).

Es importante señalar que el Atlas de riesgos del municipio de Valle de Bravo, (2016) establece que existen múltiples zonas de riesgo por deslizamientos.

Al final de esta tesis se incorporan algunas fotografías (anexos) que ilustran algunos deslizamientos ocurridos en el municipio de Valle de Bravo, Estado de México.

Como puede uno imaginarse, los deslizamientos ocurren en cualquier parte donde haya pendientes importantes y las áreas montañosas tienen un riesgo más elevado de deslizamientos que la mayor parte de las zonas de bajo relieve por ello es de suma y vital importancia realizar la mayor cantidad de estudios que puedan identificar estas zonas susceptibles a los deslizamientos (Keller y Blodgett 2006).

CAPÍTULO II MARCO LEGAL E INSTITUCIONAL

2.1. Marco legal

2.1.1. Ley General de Protección Civil

Esta ley incluye consideraciones a las cuestiones asociados a los riesgos y se divide en 7 capítulos, el primer capítulo se enfoca a las disposiciones y acciones orientadas a la prevención y actividades administrativas acerca del riesgo. El segundo capítulo nos habla de la organización del Sistema Nacional de Protección Civil y la estructura de las dependencias que trabajan en conjunto ante los riesgos (transporte ante los desastres, emitir normas oficiales, política y acciones de probabilidad de desastre). El capítulo tercero y cuarto se refiere a disposiciones del concejo nacional y la coordinación de la participación de cada una de las entidades por medio de la gestión de las autoridades correspondientes para los trabajos específicos que se tienen que realizar. En el capítulo quinto y sexto se establecen los objetivos, políticos y estrategias para salvaguardar a la población, por tanto, se solicitará apoyo al gobierno federal cuando ya se tenga la declaratoria de emergencia de desastre; por último, en el capítulo 7 se establecen las medidas de seguridad que debe de tomar cada comunidad.

La relevancia de la ley general radica en las medidas de mitigación que puede establecer un ente local, por medio de las estrategias integrales además de la asignación de recursos para la inversión preventiva. Además de generar medidas tácticas y estrategias para que se llegue a una buena coordinación de las actividades de gestión del riesgo con las distintas instituciones.

2.1.2. Ley Estatal de Protección Civil

La Ley Estatal de Protección Civil es el instrumento normativo por el que se da certeza jurídica a las actividades que realiza el poder público para proteger a la población de aquellos hechos que por acción del hombre o por fuerzas de la naturaleza ponen en peligro la vida, la integridad física y los bienes de las personas,

y tiene como prioridad generar programas de prevención, auxilio y restablecimiento de las zonas donde fueron afectadas por cualquier desastre ya sea antrópica o natural.

Por lo tanto, se debe mantener un monitoreo constante de las áreas vulnerables por medio de la coordinación de las instituciones federales, estatales y municipales, además de elaborar lineamientos en los manuales para capacitar a la población de cómo prevenir los riesgos y la práctica de simulacros. También se tiene como prioridad la difusión de los eventos catastrofistas a por medio de los sistemas de telecomunicación ya que es de gran importancia que toda la población este enterado de las situaciones que ocurren en los lugares y por tanto se deben de tener los atlas de riesgos actualizados para conocer como ha sido el comportamiento de los riesgos, en cuanto a su origen, causas y mecanismos de formación de desastre Al igual que La ley general, este apartado legal ayuda a las estrategias establecidas en la función del riesgo, ya que a partir de esto se puede tener una buena administración en las actividades de emergencia y por tanto establecer un control en: Asentamiento descontrolado en áreas inapropiadas. Cambio de uso de suelo (deforestación y degradación de suelos). Pobreza y falta de empleo.

Además de sentar las bases para la capacitación a la población ante escenarios de riesgo, siempre se debe de tomar como eje principal la sensibilidad de la población para que tengan mejores conocimientos y estrategias en la educación sobre el riesgo, y por tanto conocer las medidas de acción necesaria ante un evento de esta categoría

2.1.3. Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente

Esta ley permite conocer las disposiciones generales para salvaguardar las zonas ubicadas en riesgo y manejar las contingencias ambientales que susciten derivados del riesgo. También pretende cuidar las áreas no viables para la construcción a fin de reducir el riesgo y la secretaria de economía deberá de clasificar las actividades que sean riesgosas además de coordinar en el monitoreo de riesgos que afecten a la ecología de la nación. Esta ley tiene estrecha relación con la función del territorio,

ya que pretende que las actividades económicas y por tanto llegar al equilibrio ambiental.

2.1.4. Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano

Esta ley fija normas básicas e instrumentos de gestión observancia general para ordenar el uso del territorio y los asentamientos humanos a las obligaciones que tiene el Estado para promoverlos, respetarlos, protegerlos y garantizarlos plenamente.

Esta ley la cual tenía una vigencia de hace más de 40 años establece la concurrencia de la Federación, de las entidades federativas los municipios y las demarcaciones territoriales para la planeación, ordenación y regulación de los asentamientos humanos en el territorio nacional y fija Los criterios para que sus respectivas competencias existe una efectiva congruencia coordinación y participación para la planeación de las ciudades garantizando la protección, integridad física y el acceso equitativo a los espacios públicos, la cual busca evitar los asentamientos humanos en zonas expuestas a todos los distintos riesgos.

2.1.5. Ley de Cambio Climático

Debido al cambio climático que afecta a los ecosistemas de la república es necesario tomar en cuenta las disposiciones de la Ley de Cambio Climático, en donde se establece mitigación y adaptación al cambio climático a través del desarrollo de programas y estrategias en los proyectos de cada entidad, todos bajo un enfoque de sustentabilidad y monitoreo de los programas aplicados al ambiente, supervisados para el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. La aplicación de esta ley se enfoca en la salud de la vegetación que debido al aumento de la temperatura del ambiente provoca que la vegetación disminuya su masa forestal, y por consecuencia deja suelo desnudo susceptible a erosionarse y posteriormente a deslizarse.

Esta ley habla también del Ordenamiento territorial de los asentamientos humanos y desarrollo urbano de los centros de población en coordinación con sus municipios o delegaciones.

2.2. Marco Institucional

2.2.1. Dirección General de Protección Civil del Estado de México

En el Estado de México la institución encargada de realizar, elaborar y difundir la información competente a los riesgos es la Dirección General de Protección Civil por medio de la elaboración de Atlas de Riesgos Municipales, Base de Datos, inventario de recursos y directorios de emergencia. A pesar de tener estos avances en los riesgos en el Estado de México la población vive y construye en zonas de riesgo, es decir se tiene una tendencia de crecimiento urbano hacia los lugares en situación de riesgo, como pie de monte, zonas inestables, escarpe de falla, zonas de ladera. Además de los anterior la deforestación va en aumento en donde el material rocoso es poco consolidado y por consecuencia deleznable. Sin embargo, es importante resaltar que los medios geo tecnológicos pueden ayudar a establecer nuevas estrategias de gestión ante los desastres debido a la contundente dimensión espacial que abre posibilidades para mejorar su gestión.

2.2.2. Centro Nacional de Prevención de Desastres

La responsabilidad principal del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) consiste en apoyar al Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC) en los requerimientos técnicos que su operación demanda. Realiza actividades de investigación, capacitación, instrumentación y difusión acerca de fenómenos naturales y antropogénicos que pueden originar situaciones de desastre, así como acciones para reducir y mitigar los efectos negativos de tales fenómenos, para coadyuvar a una mejor preparación de la población para enfrentarlos.

CAPÍTULO III MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL

3.1. GEOLOGÍA AMBIENTAL

La geología definida como la ciencia de la Tierra que tiene por objeto entender la evolución del planeta y sus habitantes, desde los tiempos más antiguos hasta la actualidad mediante el análisis de las rocas. Es considerada como una ciencia histórica ya que parte de la premisa de que el relieve actual de la Tierra es el resultado de una larga y variada evolución, por ello analiza este desarrollo espacial y temporal para señalar los factores y fuerzas que actuaron en el proceso y que le han dado la forma que actualmente conocemos, tanto en el exterior como en el interior de nuestro planeta (Vallejo et al., 2002).

En Geología se parte de una visión espacial de los fenómenos físicos de la Tierra, con escalas que van desde lo cósmico hasta lo microscópico, y el tiempo se mide en cientos de millones de años, en este sentido los procesos geológicos se adaptan las escalas espaciales y temporales a la actividad humana. Gran parte de los procesos geológicos, como la orogénesis, litogénesis, etc., tienen lugar a lo largo de millones de años pues condicionan los factores tan diferentes como las propiedades y características de los materiales (CENAPRED, 2014).

La Geología Ambiental emplea los conocimientos geológicos en la investigación del medio ambiente, contribuyendo al diagnóstico (geológico de las relaciones causa-efecto de los procesos actuales, originados en el medio geológico por las actividades humanas) y corrección sobre la problemática de la contaminación. Es decir, se ocupa del estudio de los riesgos geológicos y antropogénicos. Así mismo tiene contribuciones tales como reconocer y caracterizar los procesos que corresponden a la continua modificación de la tierra, considerando al ser humano como agente de transformación. Ciencia de gran utilidad para lograr la disminución de los efectos peligrosos de fenómenos socio-naturales en las personas (Keller, 1988).

El mismo autor señala que en la Geología Ambiental unos de sus principales objetivos son: Reconocer y caracterizar las formas y los procesos que corresponden a la continua transformación del planeta, considerando al hombre como uno de los principales agentes de transformación. Otro es realizar diagnósticos geológicos de las relaciones de y cambios de los procesos actuales desencadenados en el medio geológico por las actividades humanas. Por último, busca contribuir y participar en la elaboración de instrumentos de gestión ambiental.

3.2. RIESGOS SOCIO-NATURALES

Los fenómenos naturales por si mismos no son un riesgo, el riesgo tiene lugar cuando las personas sufren daños o pérdidas (Selby, 1993) por lo que necesariamente tiene que haber exposición. Es conveniente saber lo que se entiende por peligrosidad, exposición, vulnerabilidad y riesgo (Varnes, 1984; Panizza, 1988; Crozier y Glade 2005). Peligrosidad o amenaza en Iberoamérica, es la probabilidad de que un fenómeno natural o inducido por el hombre se manifieste en un territorio y en un intervalo de tiempo. Por vulnerabilidad se entiende el grado potencial de pérdidas resultantes de la actuación de un fenómeno de magnitud determinada. Exposición son los elementos amenazados: población, propiedades, actividades económicas, etc. Expuestos a una determinada amenaza. El riesgo es el número de vidas perdidas, personas perjudicadas, propiedades o perturbaciones de la actividad económica, causado por un fenómeno natural, el riesgo es el producto de la peligrosidad por la vulnerabilidad y la exposición. Cuando se habla de susceptibilidad se trata de la posibilidad de que se genere en un territorio un determinado proceso geológico como movimiento en masa (Cartaya et al., 2006; Roa, 2006; Villacorta et al., 2012).

Los riesgos geológicos son los generados por causas naturales como erupciones volcánicas, actividad sísmica, inundaciones, deslizamientos de tierra, avalanchas de barro, erosión, incendios provocados por rayos, u otros eventos de origen natural.

Los riesgos antropogénicos son los causados por las actividades humanas, aquéllos que entran en el campo de la geología ambiental, están relacionados con la mayor o menor vulnerabilidad de terrenos y del nivel freático de aguas subterráneas susceptibles de contaminación. Esta contaminación puede estar causada por productos químicos (fertilizantes y plaguicidas u otros productos tóxicos), por aguas cloacales, desechos industriales, actividad minera o manufacturera y, en general, por un mal uso de las tecnologías.

Cada uno de los riesgos se estudia con el propósito de determinar sus causas, su alcance y evaluar su peligrosidad; herramientas que permitirán efectuar una ordenación adecuada de las actividades a realizar en territorios afectados por estos fenómenos, estableciendo medidas preventivas o correctivas para evitar y/o minimizar el riesgo (Keller, 1988).

En resumen, el riesgo socio-natural es la probabilidad de que una amenaza natural se transforme en desastre debido a la presencia de estos dos parámetros: una amenaza natural y un sistema social frágil.

3.3. RIESGOS GEOLÓGICOS

Los procesos geodinámicos que afectan a la superficie terrestre dan lugar a movimientos del terreno de diferente magnitud y características, que pueden constituir riesgos geológicos (Tabla 1.0) al afectar, de una forma directa o indirecta, a las actividades humanas (Vallejo et al., 2002).

TABLA 1.0 Tabla de procesos geológicos y meteorológicos que pueden causar riesgos
(Vallejo et al., 2002).

Riesgos		
Procesos externos	geodinámicos	-Deslizamientos y desprendimientos -Hundimientos y Subsidiencias -Erosión -Expansividad y colapsibilidad de suelos
Procesos internos	geodinámicos	Terremotos y tsunamis -Vulcanismo -Diapirismo
Procesos Meteorológicos		-Lluvias torrenciales y precipitaciones intensas -Inundaciones y avenidas --Procesos de arroyada -Huracanes -Tornados

Fenómenos como la erosión, disolución, movimientos sísmicos, erupciones volcánicas y precipitaciones pueden producir deslizamientos y desprendimientos en las laderas, coladas de tierra y derrubios, aterramientos, hundimientos, subsidencias. Estos movimientos del terreno son el reflejo del carácter dinámico del medio geológico y de la evolución natural del relieve, pero también pueden ser provocados o desencadenados por el hombre al interferir con la naturaleza y modificar sus condiciones. Los movimientos del terreno, desde un deslizamiento de cierta magnitud hasta un terremoto de gran intensidad, causan en ocasiones cifras muy elevadas de víctimas y pérdidas económicas. Considerando también las inundaciones y ciclones, en las dos últimas décadas los muertos en el mundo han superado los 3 millones, con más de 800 millones de damnificados; según el Banco Mundial, entre los años 90 y 96 los desastres socio-naturales han superado los 40.000 millones de dólares en pérdidas (Murck et al., 1996).

Los daños asociados a un determinado proceso geológico dependen de: (Vallejo et al., 2002).

-La velocidad, magnitud y extensión del mismo; los movimientos del terreno pueden ocurrir de forma violenta y catastrófica (terremotos grandes deslizamientos repentinos, hundimientos) o lenta (flujos y otros movimientos de laderas, subsidencias, etc.).

-La posibilidad de prevención y predicción y el tiempo de aviso; algunos procesos, como terremotos o avenidas repentinas (flash floods) no pueden ser previstos, disponiéndose de muy poco o ningún tiempo para alertas.

-La posibilidad de actuar sobre el proceso y controlarlo o de proteger los elementos expuestos a sus efectos.

Los efectos de los movimientos del terreno pueden ser directos o indirectos, a corto plazo o permanentes. La escala de tiempo geológico en el que se desarrollan determinados procesos, como los tectónicos o isostáticos, hace que sus efectos no sean considerables a escala humana.

Solo determinados procesos, cuando ocurren a escala geotécnica o ingenieril, son controlables mediante actuaciones antrópicas, como los deslizamientos y desprendimientos, los procesos erosivos, las subsidencias y las inundaciones. Los terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas y grandes deslizamientos y avalanchas de millones de metros cúbicos en zonas montañosas quedan fuera del alcance y control humano (Vallejo et al., 2002).

3.4. MOVIMIENTOS DE LADERA

En las primeras etapas de la geomorfología se hizo un énfasis especial en la evolución a largo plazo de las laderas según Davis, analizada en diferentes contribuciones sobre todo en lo que ha sido la primera teoría de evolución general del relieve (Davis, 1899), consistía en una disminución paulatina del ángulo de las laderas en los valles.

Los procesos geológicos y climáticos que afectan a la superficie recrean el relieve y definen la morfología de las laderas, que va modificándose a lo largo del tiempo para adaptarse a nuevas condiciones geológicas o climáticas. Por lo general las laderas adoptan pendientes naturales cercanas al equilibrio; ante el cambio de condiciones, su morfología se modifica buscando el nuevo equilibrio. En este contexto los movimientos de ladera pueden entenderse como los reajustes del

terreno para conseguir el equilibrio ante un cambio de condiciones (Vallejo et al., 2002).

El mismo autor señala que las áreas más propensas a la inestabilidad, bajo un punto de vista global, están las zonas montañosas y escarpadas, zonas de relieve con procesos erosivos y de meteorización intensos, laderas de valles fluviales, acantilados costeros, zonas con materiales blandos y sueltos, con macizos rocosos arcillosos, esquistos y alterables, zonas sísmicas, zonas de precipitación elevada, etc.

El estudio de los movimientos de ladera con frecuencia englobados bajo el término general de deslizamientos. Destaca que pueden ser profundos y movilizar millones de metros cúbicos de material; los mecanismos suelen ser complejos, estando condicionados por factores o procesos a escala geológica (Bromhead, 1986).

La inestabilidad en laderas se debe al desequilibrio entre las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno, de tal forma que las fuerzas desestabilizadoras superan a las fuerzas estabilizadoras o resistentes. Este desequilibrio puede ser a una modificación de las fuerzas existentes o la aplicación de nuevas fuerzas externas estáticas o dinámicas (Vallejo et al., 2002).

En muchas de las actividades llevadas a cabo por el hombre, tales como la agricultura, prácticas forestales, construcción de obras lineales (carreteras, canales y ferrocarriles), construcción de viviendas y otras, deben conocerse los procesos de desarrollo de laderas y, por consiguiente, construyen una tarea fundamental para los geomorfólogos e ingenieros (Dunne y Leopold, 1978; Clark y Small, 1982).

Por otro lado, los deslizamientos son quizá los procesos naturales más previsible y más sensibles a las medidas de corrección y mitigación para la prevención de daños que conllevan. Incluso a las predicciones de su ocurrencia se pueden llevar a cabo en los casos en que los movimientos estén asociados a factores conocidos, por ejemplo, las lluvias intensas entre otros. Además, en los climas húmedos, los rasgos que permiten el conocimiento de los deslizamientos se colonizan

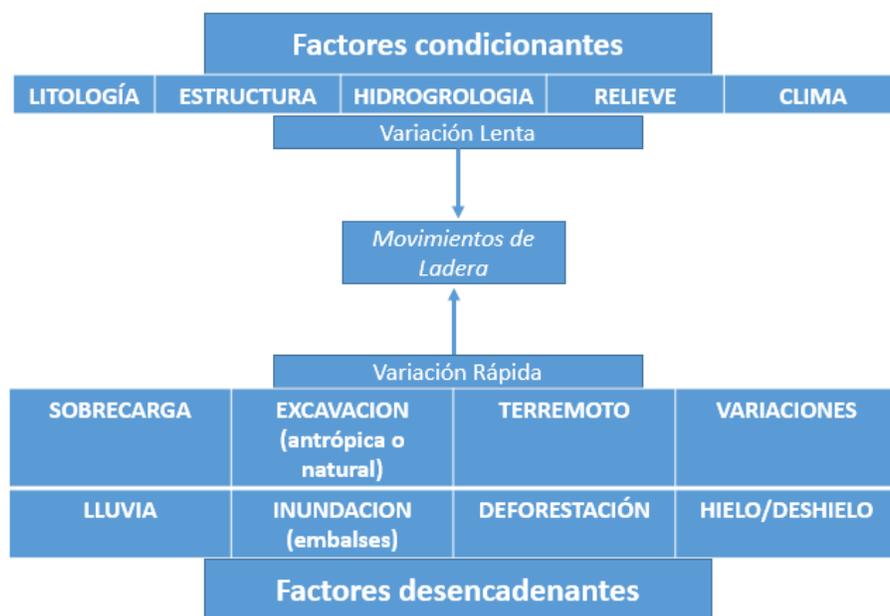
rápidamente por vegetación, lo que dificulta su identificación. (Carson y Kirkby, 1972).

3.5. FACTORES CONDICIONANTES Y DESENCADENANTES

Gran parte de los estudios de movimientos de ladera necesitan algún tipo de clasificación. Ya desde los primeros estudios de Heim sobre el desastre de Elm en 1882 se han realizado diversas clasificaciones. Sin ánimo exhaustivo pueden citarse las de Almagia (1910), Terzaghi (1952), Zaruba y Mencl (1969), Varnes (1958, 1978), Hutchinson (1988), EPOCH (1993) y Cruden y Varnes (1996), así como en España, los trabajos de García Yague sobre clasificación (1966) y de Corominas y García Yague sobre terminología (1977).

En relación con la clasificación debe hablarse también de factores condicionantes y desencadenantes de estos movimientos. Los primeros son aquellos que evolucionan lentamente como el relieve, la litología en su dimensión resistente, la estructura tectónica a diferentes escalas, la hidrogeología (ligada al cambio climático) y el clima. Los factores desencadenantes varían con mayor rapidez, incluso instantáneamente, como sucede en el caso de un terremoto (Ayala, 1990).

TABLA 2.0 Tabla de Factores condicionantes y desencadenantes (Ayala, 1994).



La estabilidad de una ladera está determinada por factores geométricos (altura e inclinación), factores geológicos (que condicionan la presencia de planos y zonas de debilidad y anisotropía en la ladera) y factores hidrogeológicos (presencia de agua).

La combinación de los factores citados puede determinar la condición de rotura a lo largo de una o varias superficies, y que sea cinemáticamente posible el movimiento de un cierto volumen de masa de suelo o de roca. La posibilidad de rotura y los mecanismos y modelos de inestabilidad de laderas están controlados principalmente por factores geológicos y geotécnicos (Vallejo et al., 2002).

Los factores geológicos e hidrogeológicos se consideran factores condicionantes, y son intrínsecos a los materiales naturales (Tabla 2.0). En los suelos, la litología, estratigrafía y las condiciones hidrogeológicas determinan las propiedades resistentes y el comportamiento del talud.

En el caso de macizos rocosos competentes el principal factor condicionante es la estructura geológica: la disposición y frecuencia de las superficies de discontinuidad y el grado de fracturación; en materiales blandos, como los lutíticos o pizarrosos, la litología y el grado de alteración juegan también un papel predominante. Junto a los factores condicionantes de la estabilidad de laderas (también denominados <«pasivos»>), los factores desencadenantes o «activos» provocan la rotura una vez que se cumplen una serie de condiciones. Estos últimos son factores externos que actúan sobre los suelos o macizos rocosos, modificando sus características y propiedades y las condiciones de equilibrio del talud (Figura 2.0). El conocimiento de todos ellos permitirá un correcto análisis del talud, la evaluación del estado de estabilidad del mismo y, en su caso, el diseño de las medidas que deberán ser adoptadas para evitar o estabilizar los movimientos (Vallejo et al., 2002)

TABLA 3.0 Factores influyentes en la inestabilidad de laderas (Vallejo et al., 2002).

Factores Condicionantes	Factores Desencadenantes
<i>-Estratigrafía y litología.</i>	<i>-Sobrecargas estáticas.</i>
<i>-Estructura geológica.</i>	<i>-Cargas dinámicas.</i>
<i>-Condiciones hidrogeológicas y comportamiento hidrogeológico de los materiales.</i>	<i>-Cambios en las condiciones hidrogeológicas.</i>
<i>-Propiedades físicas resistentes y deformacionales.</i>	<i>-Factores climáticos</i>
<i>-Tensiones naturales y estado tenso-deformacional.</i>	<i>-Variaciones en la geometría.</i>
	<i>-Reducción de parámetros resistentes.</i>

3.6. TIPOS DE MOVIMIENTO

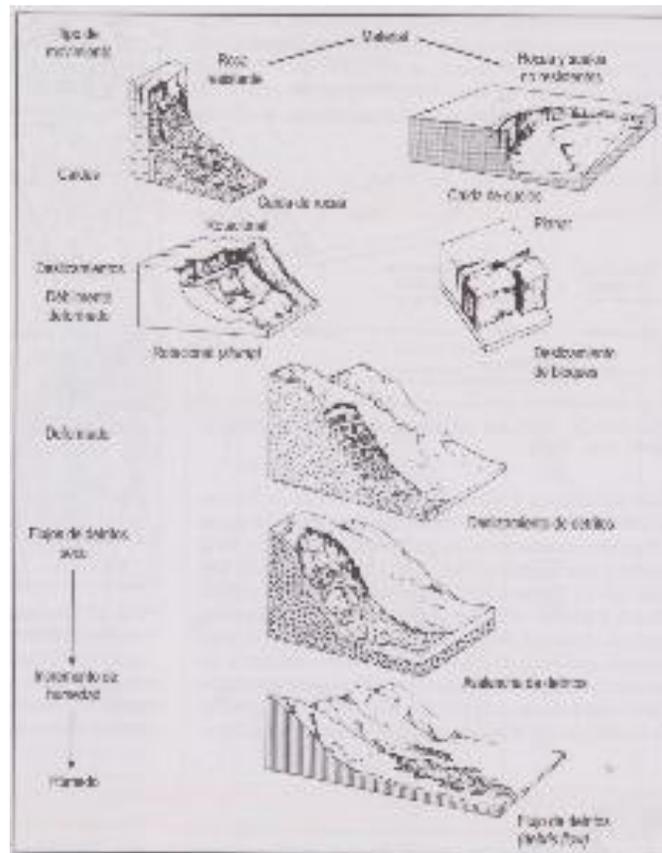
Los diferentes tipos implican tal cantidad de procesos y factores que ofrecen ilimitadas posibilidades de clasificación (Hansen, 1984a). Pueden diferenciarse en función del tipo de material movilizado, según su estado de actividad, velocidad de movimiento y etapa de desarrollo, entre otros (Cruden y Varnes, 1996).

Una clasificación que es adecuada para una región puede tener ambigüedades cuando se intenta utilizar en otra, por ejemplo: Varnes (1958) los describe como landslides, sin embargo, hay otros autores como Hutchinson (1968) que los describe como mass movement o Yatsu (1966) que utiliza el término hing. Cabe mencionar que en algunas regiones los deslizamientos son muy raros, mientras que en otras son tan frecuentes que representan un factor importante en la construcción de los modelados Zaruba y Mencl (1969 y 1982).

Hay clasificaciones que han tenido acogida en la época en la que fueron publicadas Terzaghi (1943) está basada en las propiedades físicas de las rocas afectadas, Sharpe (1938) clasifica los movimientos de masa en función del material movilizado, tipo y velocidad del movimiento Varnes (1958), con criterios similares a los de Sharpe, propuso una clasificación que mejoró considerablemente más tarde

(Varnes, 1978). En la figura 1.0 se pueden observar los distintos tipos de movimientos (caídas, deslizamientos y flujos) diferenciados por Varnes. Zaniba y Mencl (1969) basan su clasificación en el carácter de las rocas afectadas y en los tipos de movimiento.

FIGURA 2.0 Principales tipos de movimientos en masa (Varnes 1958).



La clasificación geotécnica de Skempton y Hutchinson (1969) toma como principios la fábrica del suelo y la presión de los fluidos en los poros. Crozier (1975) se fundamentó en índices morfométricos y en grupos de procesos. La EPOCH (1993) está basada en el tipo de movimiento y en los materiales afectados. Así como Brunsdén (1993) se fundamentó en los procesos que causan deslizamientos.

No hay consenso en cuanto al sistema de clasificación de movimientos en masa a utilizar, puesto que todas las clasificaciones existentes tienen sus limitaciones. Por ello es recomendable utilizar una terminología, de las existentes, para clasificar y, a

la vez describir con detalle los movimientos que se están estudiando. Actualmente, las clasificaciones más consistentes son las de Varnes (1978), Hutchinson (1988) y Cruden y Varnes (1996).

TABLA 4.0 Clasificación de procesos (EPOCH 1993).

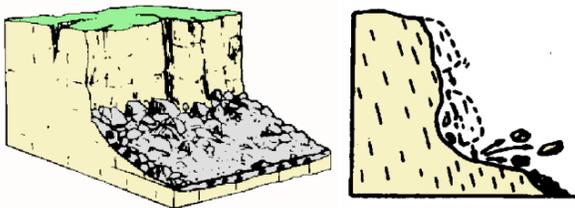
Mecanismos de movimiento	Tipo de material involucrado			
	Tipo	Roca (rock)	Derrubios (debris)	Suelo (soil)
Desprendimientos (<i>fall</i>)		Caída o desprendimiento de rocas (<i>rockfall</i>)	Caída o desprendimiento de derrubios (<i>debris fall</i>)	Caída o desprendimiento de suelos (<i>soil fall</i>)
Vuelco o desplome (<i>topple</i>)		Vuelco o desplome de rocas (<i>rock topple</i>)	Vuelco o desplome de derrubios (<i>debris topple</i>)	Vuelco o desplome de suelos (<i>soil topple</i>)
Deslizamiento rotacional simple (<i>rotational slide</i>)		Individual (<i>simple</i>) Múltiple (<i>multiple</i>) Sucesivo (<i>successive</i>)	Individual (<i>simple</i>) Múltiple (<i>multiple</i>) Sucesivo (<i>successive</i>)	Individual (<i>simple</i>) Múltiple (<i>multiple</i>) Sucesivo (<i>successive</i>)
Deslizamiento translacional o de bloques-no rotacional (<i>translational slide, non-rotational</i>)		Deslizamiento de roca en bloque (<i>block slide</i>)	Deslizamiento de derrubios en bloque (<i>block slide</i>)	Deslizamiento translacional de suelos (<i>slab slide</i>)
Deslizamiento planar		Deslizamiento de rocas (<i>rock slide</i>)	Deslizamiento de derrubios (<i>debris slide</i>)	Coladas de barro (<i>mudslide</i>)
Flujos (<i>flow</i>)		Flujo de rocas (<i>rock flow</i>)	Corrientes de derrubios (<i>debris flow</i>)	Flujos de tierra, arena o suelo (<i>soil flow</i>)
Expansión lateral (<i>lateral spreading</i>)		Expansiones laterales en rocas (<i>rock spreading</i>)	Expansiones laterales en derrubios (<i>debris spread</i>)	Expansiones laterales en suelos (<i>soil spreading</i>)
Complejo (<i>complex</i>)		Ejemplo: Alud de rocas (<i>rock avalanche</i>)	Ejemplo: Flujo deslizando (<i>flow slide</i>)	Ejemplo: Rotación con flujo de tierras (<i>slump-earthflow</i>)

3.6.1. Caída de Rocas (Falls, Rocfalls)

Se definen como una masa generalmente de rocas que se desprende de un talud abrupto (cantil, desmonte) mediante una superficie de corte normalmente pequeña (Ayala et al., 1987b). Los materiales descienden por caída libre si la ladera es subvertical y cuando el ángulo es menor las partículas saltan en laderas con inclinaciones menores de 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 suelen subdividirse en caídas de rocas, detritos y suelos, si bien la mecánica de los procesos es muy similar. La forma de la superficie inicial de rotura puede ser planar, en cuña, escalonada o vertical (Flageollet y Weber, 1996).

Las causas son muy variadas y una de las más importantes se debe a la formación de hielo en las diaclasas, cuyo aumento de volumen del 9% pueden conducir al ensanchamiento de las mismas pues los sucesivos ciclos de hielo y deshielo producen la fragmentación de la roca. Las lluvias intensas también suelen constituir un importante factor desencadenante y otro factor muy frecuente lo constituye la socavación de la ladera producida por erosión fluvial y marina. Un ejemplo de esta causa la tenemos en las Cataratas del Niágara en las que grandes bloques de dolomía masiva se apilan en la base del cantil (Bromhead, 1986). También las sacudidas sísmicas pueden ser un factor desencadenante, como el desprendimiento de Huascarán (Perú). Algunas poblaciones como Andorra la Vella (Pirineos centrales) situada en un estrecho valle, (Copons et al., 2005) están sometidas a un importante riesgo de desprendimientos, facilitado por las fuertes pendientes y la fracturación de las rocas en un clima de montaña.

FIGURA 3.0 Caída de rocas (Varnes, 1978).



3.6.2. Vuelcos (Topples)

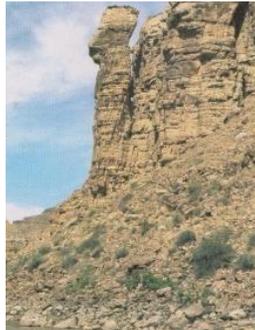
Consiste en una rotación hacia fuera de la de roca o suelo, en torno a un punto o eje por debajo del centro de gravedad de la masa desplazada (Cruden y Varnes, 1996). Los vuelcos son roturas que se desarrollan sobre materiales con estructuras verticales, formada por planos de discontinuidad de la roca. (El despegue de las columnas puede realizarse sobre una o varias superficies y la descompresión suele ser un requisito esencial.

Un vuelco puede movilizar hasta mil millones de metros cúbicos (Dikau et al., 1996b). Se distinguen varios tipos de vuelcos (Goodman y Bray, 1916; Cruden y

Varnes, 1996): por flexión se encuentra frecuentemente en pizarras, filitas y esquistos. El de bloques presenta columnas con diaclasas muy espaciadas, típicos de calizas y areniscas masivas y rocas volcánicas columnares. Finalmente, movimientos de bloques flexionados se caracterizan por flexiones falsamente continuas de largas columnas afectadas por movimientos a lo largo de numerosas diaclasas.

Los factores que influyen en los vuelcos son los ciclos de hielo y deshielo, meteorización salina en areniscas y disolución en calizas. Estos procesos de meteorización debilitan la roca, profundizan las grietas y facilitan la socavación basal. Por otra parte, los vuelcos de rocas se producen en grandes escarpes, mientras que los vuelcos en detritos se encuentran en pequeños escarpes (Dikau et al., 1996b, Dikau, 2004).

FIGURA 4.0 Vuelco en areniscas, denominado Nefertiti Green River. Gray Canyon. Utah. Estados Unidos Foto F. Gutiérrez



3.6.3 Deslizamientos

Es un movimiento de ladera de una masa de suelo o roca que tiene lugar fundamentalmente sobre superficies de rotura o sobre estrechas zonas de intensa deformación por cizallamientos (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 deslizar más allá de la superficie original de rotura sobre la superficie del

terreno original, que constituye entonces una superficie de separación (Varnes, 1978). Una vez producido el deslizamiento se puede observar en los escarpes y flancos estrías indicadoras de la dirección del movimiento (Ayala et al., 1987b).

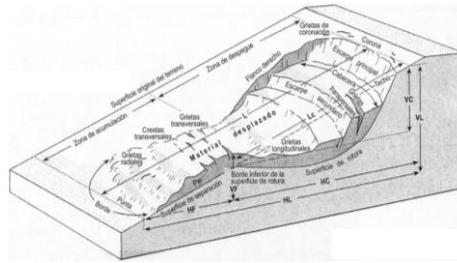
Los deslizamientos pueden ser diferenciados, en función del grado de actividad: activos (con movimiento actual), durmientes o latentes (sin movimiento en el último año pero que pueden reactivarse) y relictos o estabilizados (sin capacidad de reactivación) Zaruba y Mencl, 1969; Cruden y Varnes. 1969; Crozier, 2004a). Zaruba y Mencl (1982) diferencian los deslizamientos, según su edad, en contemporáneos y fósiles y, estos mismos autores, distinguen, según su desarrollo, en deslizamientos iniciales, avanzados y acabados.

3.6.3.1. Deslizamientos Rotacionales (Slumps)

Son movimientos alrededor de un eje que es paralelo a las curvas de nivel de la ladera, y que implica un desplazamiento de cizalla (deslizamiento) a lo largo de una superficie cóncava, que es visible o puede reconocerse sin dificultad (Varnes, 1978), La superficie de cizalla puede tener forma circular o de cuchara. Los deslizamientos rotacionales pueden producirse en rocas, detritos y suelos. Presentan un pequeño grado de deformación interna en el material desplazado, que lo distingue de los flujos (Buma y van Asch, 1996a).

En un deslizamiento se suelen distinguir varias partes y rasgos característicos, aunque el desarrollo de los mismos difiere en función del tipo de movimiento de masa. El esquema desarrollado por Varnes (1958) para un deslizamiento rotacional con flujo es bastante representativo (Figura 1.4). En esta figura se propone una serie de términos de fácil comprensión.

FIGURA 5.0 Principales características de un deslizamiento rotacional con flujo (slump-earthflow). Nota: H es la distancia horizontal y V es la distancia vertical en las distintas partes del deslizamiento (Modificado de Varnes, 1958).



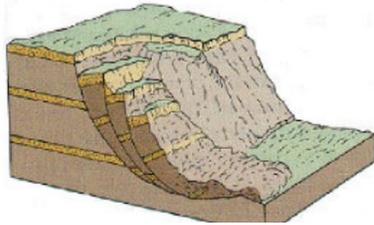
En la determinación de los diferentes tipos de movimientos de masa lo importante es conocer el tipo de rotura, mecanismos y causas (Dikau et al., 1996a) de cada movimiento en masa, para, de este modo, diferenciarlos e investigarlos, e incluso posteriormente evaluar la estabilidad de la ladera y aplicar las medidas correctoras oportunas, Además, es difícil adscribir un deslizamiento a un tipo determinado. Por lo general, los deslizamientos son complejos y su complejidad aumenta cuando varios tipos de materiales están involucrados simultáneamente en un único deslizamiento (Glade y Crozier, 2005)

Después de iniciarse la rotura, la masa deslizada comienza a rotar y puede desintegrarse en varios bloques a partir de las grietas transversas desarrolladas en el área de cabecera los bloques basculan contra la pendiente (Bromhead, 1979), en los que se pueden situar lagunas, que posteriormente se colmatan y evolucionan a zonas pantanosas con turba. Se pueden reconocer estrías en la superficie de deslizamiento y las grietas en planta y cóncavas hacia la dirección de movimiento. En los escarpes, la impermeabilidad del material puede dar lugar a regueros y barrancos (gullies). En la zona frontal de los deslizamientos de detritos o suelos, pueden desarrollarse lóbulos y sistemas grietas de tensión radiales.

Los deslizamientos rotacionales se originan en un amplio tipo de materiales con propiedades geotécnicas muy diferentes. En general, los deslizamientos rotacionales producen superficies onduladas (hummocky) y anomalías en la red de drenaje. Según Varnes (1958), los deslizamientos rotacionales de rocas se mueven a velocidades desde unos pocos centímetros al año o varios metros por mes, mientras los que afectan a suelos pueden alcanzar velocidades de hasta 3m/seg.

En cuanto a su tamaño, varían desde algunos metros a grandes complejos de varias hectáreas.

FIGURA 6.0 Deslizamiento Rotacional (Skinner y Porter, 1992).



Los condicionantes que favorecen la existencia de deslizamientos rotacionales (Buma y van ASCH, 1996) son: laderas con bloques muy fracturados (deslizamientos rotacionales de rocas); laderas con potentes regolitos o depósitos morrenicos (suelos, detritos); laderas sin vegetación; laderas de margas y arguilitas (Selby, 1985) y subtratos rocosos con estratificación horizontal (Young, 1972; Gracia, 1985). A estas hay que añadir las socavaciones basales producidas por los ríos y la acción del oleaje (Varnes, 1978; Bromhead, 1979), junto con actividades antrópicas de excavación y construcción.

También los terremotos, explosiones, sobrecargas súbitas y ascenso de los niveles freáticos, como consecuencia de lluvias y fusiones rápidas de nieve. Los deslizamientos rotacionales múltiples se desarrollan con dos o más unidades de deslizamiento y muestran una morfología compleja en la cabecera el movimiento comienza con la formación de grietas de tensión debidas a la descompresión, estas grietas abiertas se ensanchan paulatinamente, a la vez que la masa descende lentamente y se origina una morfología escalonada producida por la generación de una nueva grieta. El desplazamiento es mayor en el centro del movimiento de masas y durante el descenso la masa sufre rotaciones a través de su superficie de cizallamiento, las velocidades no son peligrosas, debido a que la rotación es lenta.

Además de las causas aducidas para los deslizamientos rotacionales simples, Buma y van Asch (1996) señalan que los deslizamientos múltiples se pueden

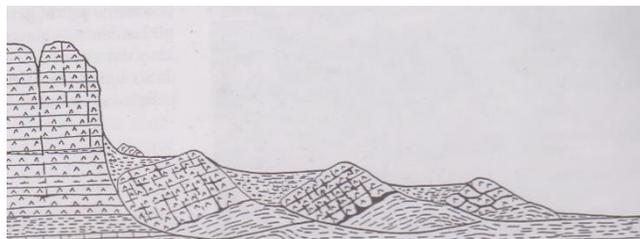
originar a partir de un ensanchamiento de un deslizamiento simple que suele producirse por la erosión de los materiales basales.

Un ejemplo de este proceso es el presentado por Gutiérrez et al. (1994) en el escarpe de yesos de unos 100 m de Alfajarín, cerca de Zaragoza. Señalan que el escarpe origina por migración lateral hacia el Norte del río Ebro. La descarga del macizo produce diaclasas verticales abiertas, paralelas al escarpe (figuras 1.6 y 1.7). El agua que penetra por las fracturas disuelve los yesos y los ensancha, penetrando hacia la base arcillosa impermeable. La karstificación en los yesos basales conduce a la subsidencia de los bloques. Estos bloques individualizados deslizan rotacionalmente (presumiblemente de forma retrogresiva) generando depresiones cerradas.

FIGURA 7.0 Deslizamiento rotación múltiple en materias Yesíferos. Alfajarín .
Provincia de Zaragoza. España.



FIGURA 8.0 Deslizamientos rotacionales múltiples en yesos, en los que la base arcillosa facilita el deslizamiento Provincia de Zaragoza. España. (Gutierrez et al., 1994).



Las terracettes son aterramientos regularmente espaciados constituidos por pequeños deslizamientos rotacionales sobre laderas de hierba, cuyo salto es por lo general del orden del decímetro. Algunos autores las interpretan como producidas

por el pisoteo del ganado (Higgins, 1982). Se desarrollan mejor en laderas abruptas de suelos (Hutchinson, 1968). Selby (1993) indica que son las características superficiales más prominentes atribuidas al creep del suelo.

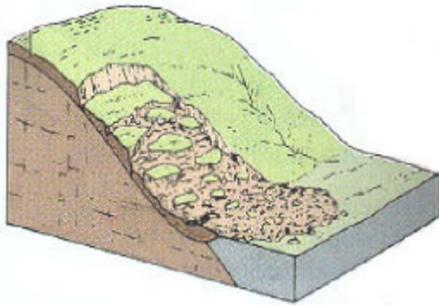
Este autor diferencia dos tipos de terracettes, los desarrollados en laderas de bajo ángulo cuyas velocidades son lentas y la hierba cubre todas las laderas, mientras que en laderas de mayor inclinación aumenta la velocidad y el agrietamiento en el frente de cada escalón; también pueden producirse pequeños deslizamientos. Según Vincent y Clarke (1980) las terracettes con bajos ángulos de peldaño están asociadas a elevados límites líquidos, bajos límites plásticos y poco contenido de arcilla. Cuando el peldaño es más ancho, los suelos tienen límites líquidos relativamente bajos y altos límites plásticos.

3.6.3.2 Deslizamientos Traslacionales

La masa progresa hacia fuera y abajo, a lo largo de una superficie más o menos plana o ligeramente ondulada y la componente rotacional es mínima (Varnes, 1978) deslizada se desplaza sobre la superficie del terreno. El deslizamiento se produce a favor de planos de discontinuidad de las rocas (estratificación, pizarrosidad, fallas, diaclasas) y en depósitos con variaciones claras en la resistencia al cizallamiento (Dikau et al., 1996a). Los deslizamientos traslacionales se pueden originar en rocas, detritos y suelos.

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 la zona de arranque del deslizamiento de bloques se suele desarrollar una pequeña fosa (graben), que forma una depresión.

FIGURA 9.0 Deslizamiento translacional de detritos (Skinner y Porter, 1992).



El movimiento de los deslizamientos de bloques se lleva a cabo por impulsos y los grandes deslizamientos incrementan su velocidad con grandes precipitaciones (Ibsen et al., 1996a). Las causas fundamentales son la existencia de un cambio brusco del tipo roca, con marcadas diferencias en la resistencia al cizallamiento. Las socavaciones basales y las abundantes lluvias son los principales agentes desencadenantes de estos procesos.

3.6.3.3 Deslizamientos Rocosos

Son típicos de laderas de montaña o de afloramientos rocosos en los que el ángulo de los planos de discontinuidad de las rocas es aproximadamente igual al de la ladera triturada (Müller, 1964b; Kiersch, 1983).

3.6.3.4 Deslizamientos de Suelos y Detritos

También llamados deslizamientos en placas (slab slide) tienen muchas otras denominaciones (Ibsen et al., 1996b). Son frecuentes en suelos meteorizados, sobre todo los regolitos de arcillas. Estos se movilizan por una cizalla próxima a la superficie. El ángulo de deslizamiento está relacionado con el grado y la profundidad de meteorización. Cuando la superficie de deslizamiento es irregular se desarrollan grabens y bloques girados (Zaruba y Mencl, 1969). Los deslizamientos en placas se caracterizan por su desarrollo superficial, con una longitud y anchura mucho mayor que la potencia del material deslizado. En cabecera presentan una grieta vertical arqueada y se desencadenan fundamentalmente con grandes

precipitaciones: con la fusión del permafrost se moviliza la capa activa o mollisol (Ibsen et al., 1996b)

Los deslizamientos de detritos (debris slide) son roturas en material no consolidado que en su avance se rompe en pequeñas partes (Varnes, 1978). La geometría del deslizamiento se caracteriza por ser poco profunda y tener una elevada relación entre la longitud y la anchura (Hutchinson, 1988). El material afectado suele ser coluviones o mantos de alteración, la rotura con frecuencia se origina a favor del contacto roca-regolito (Corominas, 1996). La velocidad y el recorrido aumenta con la pendiente y disminuye con el contenido de arcilla (Hutchinson, 1988). Los deslizamientos de detritos desencadenan por terremotos e intensas precipitaciones que aumentan la presión de agua en los poros y reduce la resistencia al cizallamiento (Caine, 1980). Los deslizamientos de detritos pueden ser el origen del desarrollo de avalanchas de detritos (debris avalanche) (Guadagno et al., 2005) y de debris flows (Corominas et al. 1996).

Un tipo de deslizamiento, que también podría incluirse en la categoría de los flujos es el deslizamiento con colada de barro (dlump-earthflow) (Sharpe, 1938). También suele considerarse un deslizamiento complejo. El movimiento de las coladas de barro es lento y fluctúa entre 1 y 25 m/año aunque puede alcanzar valores mucho más altos. Suele producirse por intensas lluvias o fusión rápida de nieve. (Gutiérrez et al., 1995).

3.6.3.5. Grandes Deslizamientos

Además de los deslizamientos a lo largo de superficies predeterminadas de la clasificación de Zaruba y Mencl (1982), como el deslizamiento intracuatenario de Flims (Suiza), se reconocen otros movimientos antiguos de rocas sobre planos de estratificación o sobre argilitas, filitas y micasquitos. Estas deformaciones de grandes dimensiones en de montaña se conocen como deslizamientos gravitacionales y son movimientos complejos. Se producen en conjuntos sedimentarios levantados tectónicamente formando una estructura plegada. Los complejos de capas levantadas deslizan ladera abajo a favor de materiales de

coeficiente de fricción bajo. Estos deslizamientos suelen ser de gran extensión (Zaruba y Mencl, 1982).

Se han descrito, en el ámbito de la tectónica, en relación con los mantos de corrimiento, numerosos deslizamientos gravitacionales en las montañas alpinas europeas.

3.4.4. Extensiones Laterales (Lateral Spreading)

El término extensión (spread) fue introducido por Terzaghi y Peck (1948) para describir movimientos súbitos en arenas y limos con agua intersticial. La superficie de rotura no es una superficie de cizallamiento rápido. Pueden deberse a licuefacción o flujo (y extrusión) de material más blando (Cruden y Varnes, 1996). Por otra parte, Dikau et al., (1996a) y Dikau (2004) señalan que la expresión extensiones laterales se utiliza fundamentalmente para describir el desplazamiento lateral de una roca o masa de suelo sobre un material infrayacente más blando, en el que la superficie de cizallamiento basal no suele estar bien definida. Algunos autores señalan que el fenómeno denominado sackung se trata de una extensión lateral (Jahn, 1964).

3.6.4.1. Extensiones Laterales en Rocas

El término fue introducido por Zischinsky (1966) para designar manifestaciones superficiales de creep profundo en laderas de substratos de rocas laminadas. El sackung (en plural sackungen) es una palabra de origen alemán, que típicamente presenta unos escarpes en la parte superior de la ladera (también llamados escarpes antiladera), contrarios y antitéticos y asociados a depresiones lineales, que tienen el aspecto de fosa (graben). Las pequeñas fosas, paralelas a las curvas de nivel, están rellenas de detritos con charcas efímeras (Gutiérrez et al., 2005). Las dimensiones son de 15-300 m de longitud y de 1-9 m de altura. En algunos casos, el escarpe es cóncavo y parece la cabecera de un deslizamiento (Bordonau y Vilaplana, 1986)

Consiste en desplazamientos laterales, bien de masas rocosas homogéneas o bien de rocas cohesivas que yacen sobre materiales dúctiles (Pasuto y Soldati, 1996; Borgatti y Soldati, 2005). La extensión lateral en rocas homogéneas, suele ser de comportamiento frágil y no presenta una superficie o zona de deformación plástica muy definida. Su morfología se caracteriza por presentar doubles crestas, depresiones (Zanjas o fosas) y escarpes orientados ladera arriba (Pausto y Soldati, 1996; Borgatti y Soldati, 2005). El origen de las extensiones laterales en rocas no es muy conocido, aunque pueden ser sensibles a los terremotos.

Estos movimientos pueden extenderse muchos kilómetros desde los bordes escarpados de plataformas estructurales. McGill Stromquist (1979) señalan la existencia de fosas de 600 m de anchura, 300 m de profundidad y 20 km de longitud a lo largo de la zona oriental de Cataract Canyon, en el Río Colorado.

Otro tipo de extensión lateral en rocas es el que afecta a formaciones cohesivas frágiles que se superponen a unidades dúctiles, debidas generalmente a deformaciones por extrusión del material subyacente (Pasuto y Soldati, 1996). Se producen fosas (grabens), grietas rellenas (gulls), fosos (trenchs), depresiones pseudokárticas y flujos laterales (bulges) de material dúctil hacia el valle. Estas extensiones se producen lentamente a partir de grietas que se abren paulatinamente y, en las etapas finales, los bloques deslizan por la ladera. (Cancelli et al., 1987).

Cando el proceso afecta a varios bloques se considera un deslizamiento causado por extrusión de rocas dúctiles (Zaruba y Mencl. 1982). La movilización por extrusión del material dúctil en la extensión lateral se estima que se deben comportamiento viscoelástico y la deformación se produce por pequeños desplazamientos. Estos deslizamientos parciales pueden unirse y formar una superficie de deslizamiento bien definida. Los movimientos de ladera producidos por extrusiones de rocas dúctiles, Zaruba y Mencl (1982) los denominan bloques deslizados (block slides).

3.6.4.2. Extensiones Laterales en Suelos

Se pueden definir por el asentamiento de bloques de suelo sobre una capa de suelo sensible, o también por una rotura progresiva de toda la masa deslizada (Buma y van Asch, 1996b). Las deformaciones del terreno que acompañan a la extensión pueden producir pérdidas de vidas e importantes daños a edificios, obras lineales y otras estructuras.

Las arcillas rápidas (quick clays) se encuentran en ambientes costeros que han estado próximos a los márgenes del hielo durante el Cuaternario (Alaska, Canadá oriental y fiordos de Noruega y Suecia). Pueden sufrir importantes extensiones, ya que al disolverse el sodio que contienen estas arcillas cohesivas las convierte en arcillas dispersas de fácil movilidad. Los deslizamientos de arcillas rápidas comienzan en las áreas de menor pendiente y se extienden ladera arriba por retroceso. En la primera etapa, se origina un deslizamiento rotacional, estando la superficie de deslizamiento en la capa de arcillas plásticas. Debido a la pérdida de soporte horizontal se desencadena rápidamente el retroceso, ladera arriba y hacia los flancos (Buma y van Asch, 1996b).

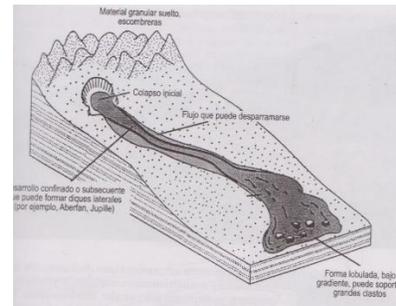
3.6.5 Flujos

Constituyen un tipo de movimiento en masa fluidificada por el agua o aire. El flujo implica una mayor deformación interna que un deslizamiento. Los movimientos tienen lugar sobre un gran número de pequeñas superficies de cizalla o porque el contenido en agua en la masa es tan alto, que llega a comportarse como un fluido (Bromhead, 1986).

Los flujos pueden subdividirse en varios tipos en función del material al que afectan suelo (flujos de barro o tierra), derrubios (coladas de derrubios o debris flow) o bloques rocosos (coladas de fragmentos rocosos) con abundante presencia de agua, donde el material está disgregado y se comporta como un fluido, sufriendo una deformación continua, sin presentar superficies de rotura definidas. El agua es

el principal agente desencadenante, por la pérdida de resistencia que da lugar en materiales poco cohesivos. Principalmente afecta a suelos arcillosos susceptibles que sufren una considerable pérdida de resistencia al ser movilizados; estos movimientos, poco profundos en relación a su extensión, presentan una morfología tipo glaciar y pueden tener lugar en laderas de bajas pendientes (incluso menores de 10°).

FIGURA 10.0 Bloque diagrama de un típico flujo deslizante (Ibsen, 1996c).



3.6.5.1 Coladas de Barro o tierra

Este tipo también conocido mudslide o mudflow en Europa y earthflow en América son un tipo de movimiento en masa, en el que los detritos arcillosos, limosos o de arena muy fina se movilizan, fundamentalmente por deslizamiento sobre superficies de cizallamiento, con un movimiento relativamente lento, dando lugar a formas lobuladas o alargadas (Brunsden, 1984).

En las coladas de barro pueden distinguirse tres partes: área fuente, trayectoria y lóbulo o zona de acumulación. El área fuente suele tener forma de anfiteatro. La longitud de la trayectoria depende de la pendiente y de la longitud de la ladera. La zona de acumulación lobulada se desarrolla en la base de la ladera y tiene un ángulo bajo y grietas radiales (Brunsden e Ibsen, 1996).

3.6.5.2. Flujos de Detritos

Este tipo también conocido como debris flows constituyen un flujo de sedimentos tomado por una mezcla de fragmentos gruesos empastados en una matriz de partículas finas con un contenido de agua y aire en su interior Johnson, 1970; Innes,

1983: Costa, 1984, 1988a: Johnson y Rodine, 1984; Takahashi, 1901: Coussot y Meunier, 1996: Corominas et al., 1996 Dikau. 2004). Los debris flows se localizan en la mayoría de las zonas morfoclimáticas y pueden desplazarse grandes distancias y ser muy destructivos. La fuente de material se encuentra en los depósitos de ladera y de alteración. En las montañas podemos tener otra de las áreas de alimentación que son los depósitos aluviales correspondientes a anteriores etapas de actividad fluvial.

El agua necesaria para generar un debris flow suele proceder de tormentas de alta intensidad o a veces de deshielos rápidos o precipitaciones pluviales sobre un manto de nieve en las laderas. Estas circunstancias producen una esorrentía rápida, que al mezclarse con sedimentos heterométricos con abundantes partículas arcillosas, dan lugar a los debris flows. Estos se comportan como un fluido viscoso al aumentar la velocidad y disminuir la resistencia al cizallamiento (Johnson, 1970). La viscosidad de los debris flows varía considerablemente, de tal manera que cuando son muy viscosos y de gran volumen erosionan los canales y producen levees (diques) netos en sus bordes por desbordamiento del canal. Por el contrario, si la viscosidad es muy elevada, al desplazarse por laderas de prados apenas erosionan y los levees son muy pequeños (Selby, 1993). Todo ello conforma una oleada de detritos humedecidos que se desplazan por gravedad a lo largo de un canal.

La morfología de los debris flows es variable, aunque con rasgos comunes, las formas más frecuentes de estos depósitos de flujo son las lobuladas en la zona frontal, junto con ondulaciones en las partes anteriores, que son el resultado de sucesivas oleadas de material. En los debris flows se diferencian unos depósitos laterales y centrales que acaban en un talud frontal (Johnson y Rodine, 1984). Los debris flows inciden considerablemente en el canal de desagüe e incluso pueden desbordarlo dejando depósitos en los márgenes.

3.6.5.3 Rock Flows

A diferencia de los tipos de flujo anteriormente descritos, que se desarrollan sobre materiales no consolidados existe otro que afecta a rocas consolidadas cohesivas

los rock flows (Varnes, 1978) que generalmente se asocian a deformaciones gravitacionales profundas (sackung). Cabe mencionar que es un tipo de flujo en el que se ve involucrado un fluido con rocas, donde implica un transporte a zonas de baja pendiente.

3.7. ANÁLISIS MULTICRITERIO

El análisis multicriterio tiene como punto de partida la estandarización en una escala común de clasificación para todos los parámetros o factores incluidos en este proceso más tarde, la importancia relativa de estos parámetros se compara en una matriz par, cuyo análisis determina el peso específico de cada factor. Este procedimiento se efectúa para cada una de las opiniones añadido al análisis por los especialistas; los resultados medios son obtenidos y, en su caso, los errores estadísticos son corregidos (Saaty, 1984).

La evaluación multicriterio es un conjunto de técnicas utilizadas en la decisión multidimensional y los modelos de evaluación, dentro del campo de la toma de decisiones (Barredo, 1996). Para Eastman (1993), este proceso implica la evaluación de la elección de alternativas basadas en criterios concretos.

Como consecuencia de la variedad de posibilidades alternativas para la importancia relativa de los factores, es necesario determinar un grado de consistencia en la obtención de los valores de comparación; Generalmente, se emplea un procedimiento propuesto por Saaty (1980).

La toma de decisiones multicriterio debe ser entendida como un mundo de conceptos, aproximaciones, modelos y métodos para describir, evaluar, ordenar, jerarquizar, seleccionar o rechazar objetos, en base a una evaluación (expresada por puntuaciones, valores o intensidades de preferencia) de acuerdo a varios criterios (Colso y de Bruin, 1989).

Los análisis multicriterio y modelos de decisión multiobjetivo ofrecen oportunidad de obtener un análisis equilibrado de todas las facetas de los problemas de

planificación, particularmente debido a que varios efectos tangibles, como los sociales y las repercusiones ambientales pueden ser considerados cabalmente (Nijkamp y Van Delft, 1977).

De acuerdo con Pietersen (2006), el objetivo general de la evaluación multicriterio (EMC) es auxiliar al decisor a escoger la mejor alternativa entre un rango de posibilidades en un entorno de criterios en competencia y conflicto; y los objetivos pueden ser económicos, ambientales, sociales, institucionales, técnicos y estéticos. Cuando las decisiones implican alcanzar varios objetivos o criterios, ellas se denominan decisiones multiobjetivo o decisiones multicriterio, respectivamente. Las técnicas de EMC consisten en una primera etapa en el diseño de una matriz con los criterios y las alternativas definidos; la siguiente etapa consiste en la agregación de las distintas puntuaciones de los criterios, tomando en cuenta la preferencia de los expertos expresada en término de pesos que se asignan a los diferentes criterios; ese procedimiento o técnica permite al decisor comparar entre las diferentes alternativas con base a los pesos asignados.

Los tipos de análisis de la evaluación se dividen en dos principales: A) Búsqueda de la solución más adecuada, no es necesario que el resto de las alternativas quede ordenada o evaluada. B) Es necesario que todas las alternativas queden evaluadas y ordenadas en cuanto a su grado de adecuación y validez.

En la evaluación multicriterio se deben de tomar en cuenta algunas definiciones básicas tales como;

- 1) Decisión: Elección de una de las alternativas posibles para solucionar un problema.
- 2) Alternativas: Cada una de las soluciones posibles a un problema, dotadas de ventajas e inconvenientes diferentes.
- 3) Criterios: Los distintos aspectos de la realidad que inciden de alguna manera en las ventajas o inconvenientes de las alternativas disponibles como soluciones al problema.

4) Tipos de criterios: A) factores: los aspectos que aumentan o disminuyen la valoración de una alternativa como solución al problema. (Los factores pueden ser cuantitativos u ordinales). B) Restricciones: los aspectos de la realidad que determinan que alternativas son válidas/aceptables y cuales no como solución al problema (Las restricciones son siempre binarias).

Unos criterios tienen para el decisor más relevancia que otros, para ello se asigna una denominación llamada "Pesos" o ponderaciones, a estas medidas de acuerdo a la importancia relativa que los criterios tienen para el decisor (Pietersen, 2006).

CAPÍTULO IV METODOLOGÍA Y MATERIALES

El presente trabajo de investigación es denominado como un estudio exploratorio, debido a que se elabora por medio de la falta de información de la localidad y se realiza para lograr una aproximación al proceso. Este tipo de investigación auxilia para definir de manera concreta el proceso y para describir cómo se debe realizar el estudio (Pick y López, 2000).

La utilización de un SIG para la estimación de riesgos socio-naturales es una técnica que cada vez se emplea con mayor frecuencia, debido a las grandes ventajas que aporta a la hora de integrar, organizar y procesar las variables que intervienen en la estimación de este tipo de riesgos. También es importante resaltar el papel que realiza un SIG a la hora de gestionar y analizar la intervención de los parámetros en el resultado final y la toma de decisiones de los diferentes especialistas en la estimación del mismo (Lain, 2002).

Los mapas de “susceptibilidad” a los movimientos de ladera fueron desarrollados por primera vez, por Brabb en San Mateo County (California), para el United States Geological Survey (USGS) en 1978. Estos primeros mapas se realizaban superponiendo capas con los diferentes factores geológicos que influían en las fallas de los taludes (zonas donde comienza el movimiento de laderas). En 1988, se inició el uso de Sistemas de Información Geográfica para la elaboración de los mapas de susceptibilidad. Existen diversos métodos de evaluación de la susceptibilidad a los movimientos de ladera a través de SIG, Soeters y van Westen (1996) y Aleotti y Chowdhury (1999), entre otros autores. Todos ellos, proporcionan una amplia visión de los más utilizados, entre los que se incluyen principalmente los métodos estadísticos, determinísticos, de indexación y de evaluación directa de la susceptibilidad. La aplicabilidad de cada método a una zona determinada depende sobre todo de las características y extensión de dicha zona, del tipo y extensión de los deslizamientos existentes, de los datos geotécnicos e hidrogeológicos disponibles y de la escala de trabajo.

4.1. METODOLOGÍAS

Como se menciona anteriormente existen diferentes tipos de metodologías para estimar la susceptibilidad a los deslizamientos, por lo cual se realizó un análisis detallado de múltiples estudios tomando en cuenta su información para determinar la susceptibilidad a deslizamientos en el municipio de Valle de Bravo, por ello haremos mención de los más importantes utilizados para sustentar la metodología de este proyecto.

En el año 2013 se llevó a cabo un estudio por el departamento de formación general y ciencias básicas, universidad Simón Bolívar, sede del litoral, Venezuela en colaboración con la universidad Pedagógica Experimental Libertador, instituto pedagógico de Caracas por Scarleth Mujica y Henry Pacheco para determinar la metodología para la generación de un modelo de zonificación de amenaza por procesos de remoción en masa, en la cuenca del río Camurí Grande, estado Vargas, Venezuela, donde menciona que los deslizamientos representan un problema para la población asentada en áreas de vertiente, aumentan la vulnerabilidad y pueden afectar la infraestructura, los bienes y la vida. El objetivo es proponer una metodología para el diseño de un modelo de amenaza por deslizamientos, aplicado a la cuenca del río Camurí Grande, Estado Vargas, Venezuela. Se plantea el procedimiento de la Evaluación Espacial Multicriterio, con elementos de la metodología costarricense Mora-Vahrson (Mora, y Vahrson 1992) para clasificar la amenaza por deslizamientos, así como el uso del instrumento Matriz de Jerarquización Analítica e indagaciones teóricas, para la asignación del peso ponderado de las variables y el cruce de mapas, con apoyo de un Sistema de Información Geográfica. Estos modelos son de suma importancia para la Gestión de Riesgos, en las políticas de prevención.

La zonificación de la susceptibilidad y la amenaza por procesos de remoción en masa, ha sido elaborada mediante los procedimientos de la Evaluación Espacial Multicriterio (EEM), como método de análisis y toma de decisiones, integrándolo con una base de datos cartográficos en un Sistema de Información Geográfica (SIG), manejados con el programa Mapinfo Professional 9.0 y el módulo Vertical Mapper.

Esta EEM, ha sido utilizada por varios autores para este tipo de evaluaciones referidas a la susceptibilidad y la amenaza, en Venezuela, por ejemplo, destaca el trabajo de Roa (2007) sobre la estimación de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos e imágenes satelitales en la cuenca del río Mocotíes del Estado Mérida. Así mismo la EEM también ha sido combinada con la utilización de la tecnología de los SIG, aunque el reto debe ser mayor frente a las necesidades requeridas para el país.

En relación con el objetivo planteado, se consideraron una serie de factores que pueden estar involucrados en la generación de procesos de remoción en masa, tales como, la geología de superficie, la pendiente del terreno, la geomorfología, la vegetación, el conflicto de uso del espacio, la distribución temporal de las precipitaciones y la variable sísmica a través de las fallas tectónicas y contactos litológicos, a los que se les denomina lineamientos. Estos factores constituyen las variables, y cada una de ellas ha sido ponderada de acuerdo al método de las jerarquías analíticas, a juicio de expertos y a una sustentación teórica, que determinaría su proclividad a generar procesos de remoción en masa.

Toda la información cartográfica fue utilizada para crear los mapas de susceptibilidad y amenaza como modelos, superponiéndolos mediante una suma ponderada, lo que generaría dos modelos finales.

En el proceso ha sido necesario hacer una reclasificación de las fuentes en atributos, convirtiéndolos de vector a raster, y cada elemento con la asignación de un valor en una escala del 1 al 5, que indica su proclividad a los deslizamientos. La suma ponderada está dada por el peso o grado de influencia de cada variable en porcentaje, de acuerdo a su propensión a generar procesos de remoción en masa, empleando el método estadístico multivariado, con una aproximación semicuantitativa. Cada capa fue cruzada a través del álgebra de mapas, considerando la columna de pesos ponderados obtenidos de la matriz de jerarquización analítica. El algoritmo utilizado fue el siguiente: (Geología) + (Pendiente) + (Geomorfología) + (Vegetación) + (Conflicto de Uso) = SUSCEPTIBILIDAD (Mujica y Pacheco, 2013).

En el año 2001 se llevó a cabo un estudio para el simposio nacional sobre taludes y laderas de Madrid España por Hervás de Diego para determinar la evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos mediante el uso conjunto de sig, teledetección y métodos de evaluación multicriterio. aplicación al barranco de Tirajana (Gran Canaria), donde menciona que se busca proponer un método indirecto de evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos dentro de un SIG, que integra factores condicionantes de la inestabilidad de laderas, algunos de ellos extraídos a partir del análisis de imágenes de satélite multispectrales y multitemporales, y técnicas de evaluación multicriterio basadas en jerarquías analíticas y sumas lineales ponderadas de pesos de factores y clases. Este método se ha aplicado a la depresión del Barranco de Tirajana (Gran Canaria), que está cubierta en su mayor parte por depósitos derivados de grandes deslizamientos principalmente traslacionales y rotacionales, desarrollados originalmente en coladas de lava y brechas volcánicas. El método permite evaluar cuantitativamente la consistencia en la asignación de pesos, con lo que se reduce la subjetividad inherente a ésta, que es típica de los métodos de indexación. Dicho método se considera especialmente útil para la evaluación de la susceptibilidad a escalas intermedias (1:25.000 y 1:50.000) en zonas donde apenas existen datos geotécnicos e hidrogeológicos, y en las que además no es factible realizar muestreos estadísticos adecuados, como en la depresión de Tirajana.

Una aplicación más adecuada de los métodos de evaluación indirecta requiere la utilización de algún procedimiento que disminuya la subjetividad en la asignación de pesos o que normalice analíticamente el criterio con el que éstos se asignan a los diferentes factores condicionantes de deslizamientos considerados. El método que se presenta en esta comunicación pertenece a esta última categoría. En éste se integran en un SIG diversos factores condicionantes de la inestabilidad de laderas, algunos de ellos obtenidos por teledetección, y se evalúa la susceptibilidad a los deslizamientos en general mediante técnicas de evaluación multicriterio. La metodología se aplica finalmente a la depresión del Barranco de Tirajana, en la isla de Gran Canaria.

El método empleado para la evaluación de la susceptibilidad requiere en primer lugar la creación de la base de datos mediante la elección y cartografía de los factores del terreno condicionantes de la inestabilidad. Para ello se utilizan técnicas tradicionales, como la fotointerpretación y el reconocimiento directo de campo, junto con otras de tratamiento digital de imágenes de satélite, de interpretación de imágenes de satélite tridimensionales (Hervás y Rosin, 2001) y de imágenes de sombreado del relieve a partir de modelos de elevación del terreno (MDE) de alta resolución. Así mismo se han digitalizado y actualizado algunos mapas ya existentes. Estos factores, una vez homogeneizados en cuanto a contenido, escala y formato gráfico, se integran en un SIG.

A continuación, se subdivide cada factor en clases, a las que asignan pesos en función de su influencia relativa en la inestabilidad. Posteriormente se determina analíticamente el peso relativo de cada factor con respecto a los demás, usando para ello el método de evaluación multicriterio de las jerarquías analíticas (Saaty, 1980, 1994; Eastman et al., 1995). Éste utiliza una estructura jerarquizada de criterios (los factores del terreno en nuestro caso) junto con la comparación de criterios por parejas para establecer sus pesos.

Como factores condicionantes de la inestabilidad se han seleccionado la pendiente del terreno, el tipo de materiales, la actividad de los movimientos de ladera, los cambios de usos del suelo, y las proximidades a fondos de barrancos y a embalses. El algoritmo utilizado fue el siguiente: (Pendiente) + (Proximidad a Barrancos) + (Proximidad a Embalses) + (Cambios de uso de Suelos) + (Materiales Geológicos) + (Actividad de Deslizamientos) = Susceptibilidad (Hervas, 2001).

En el año 2014 se llevó a cabo un estudio para la titulación de graduado en ingeniería geomática y topografía para la escuela técnica superior de ingenieros en topografía, geodesia y cartografía de la universidad de Madrid por Laura Moral Fernández para determinar el cálculo de la susceptibilidad de deslizamiento del terreno en Lorca mediante un sistema de información geográfica, donde se busca detallar el proceso de producción de mapas de susceptibilidad del suelo a los

deslizamientos usando como herramienta fundamental un SIG. Éste permite, en primer lugar, integrar, homogeneizar y analizar todas las variables que intervienen en el análisis de la susceptibilidad (pluviometría, características geotécnicas del suelo, altitud, pendiente...), en segundo lugar, integrar todos los factores intervinientes para obtener un mapa de susceptibilidad y, por último, incorporar los deslizamientos de ladera desencadenados por el terremoto de Lorca 2011 y compararlos con el mapa de susceptibilidad.

De todas las metodologías que actualmente ofrece la literatura para estimar la susceptibilidad del terreno a sufrir deslizamientos de laderas, en este trabajo se ha empleado la propuesta por Mendoza y Domínguez (2006) por la completitud y diversidad que ofrece en los factores de susceptibilidad y por la sencillez que presenta a la hora de implementarla dentro del Sistema de Información Geográfica.

Esta metodología empírica es de naturaleza cualitativa y está basada en la metodología propuesta por Suárez (1998), incorporando a la anterior modificaciones y criterios más amplios a la hora de estudiar los factores de susceptibilidad.

Las metodologías cualitativas de estimación de la susceptibilidad del terreno a deslizamiento están basadas en la asignación de valores numéricos a cada uno de los factores influyentes según sus atributos. Tales factores reúnen aspectos topográficos, geotécnicos, históricos, geomorfológicos y ambientales. En función de la suma total de las calificaciones asignadas, se establecieron cinco grados de la susceptibilidad del deslizamiento (muy bajo a muy alto).

Para la realización de un estudio en el que se analiza la combinación espacial de diferentes variables, como es el caso que nos ocupa, es imprescindible dar a todas ellas una correcta posición geográfica, complementada con las características que las identifican. Por este motivo, el Sistema de Información Geográfica (SIG) diseñado en este estudio se considera como la herramienta óptima para la elaboración, análisis y presentación de resultados, el software a utilizar será ArcGis 10. Los elementos usados fueron Geología, Pendientes, Vegetación y usos del Suelo, Desnivel en Laderas, Régimen de Agua en Laderas, Geomorfología (Moral, 2014).

En el año 2016 el centro nacional de prevención de desastres llevo a cabo un estudio por Leobardo Domínguez Morales para determinar el análisis de umbrales de lluvia que detonan deslizamientos y sus posibles aplicaciones en un sistema de alerta temprana por inestabilidad de laderas, donde explica que México históricamente ha sido afectado por el embate de ciclones tropicales que generan lluvias torrenciales en la mayor parte de su territorio. Esta condición y su topografía accidentada, hacen que sea altamente susceptible al fenómeno de inestabilidad de laderas, siendo las lluvias el principal factor detonante. Con base en estos antecedentes, el área de geotecnia, ahora Subdirección de Dinámica de Suelos y Procesos Gravitacionales, elaboró un análisis de los principales deslizamientos, detonados por lluvias intensas y prolongadas, ocurridos entre 1999 y 2008. De ese análisis, y tomando como base el primer mapa de susceptibilidad a la inestabilidad de laderas, elaborado en el año 2001 por la entonces subdirección de Riesgos Geológicos del CENAPRED, el área de geotecnia implementó un procedimiento semicualitativo para definir umbrales de lluvia que detonan deslizamientos de tierra donde umbral se refiere a el nivel mínimo o máximo de alguna cantidad necesaria para que un proceso tenga lugar o un cambio de estado. Un umbral mínimo define el nivel mínimo por debajo del cual un proceso no se produce. Un umbral máximo representa el nivel por encima del cual un proceso siempre se produce.

Se propuso dividir al país en ocho regiones para las cuales se determinaron sus correspondientes umbrales, según casos documentados en tres de las ocho regiones, en tanto que para las cinco restantes se aplicaron análisis inversos. En este informe se presenta un análisis más detallado de un mayor número de casos de deslizamientos detonados por lluvias, abarcando los años 1999 a 2013. Con estos casos se procedió a identificar si los umbrales de lluvia propuestos en el primer estudio de 2011 (Domínguez, 2011) se mantienen o se modifican a la luz de un mayor número de casos, así como de una mayor disponibilidad de datos de lluvia, proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Lo anterior tuvo como finalidad determinar y afinar los umbrales de lluvia más representativos de las diferentes regiones de México, a fin de que éstos puedan ser implementados a un

Sistema de generación de mapas de Alertamiento; mismos que podrían ser generados en tiempo real. Para ello, la Dirección de Investigación del CENAPRED ha generado una propuesta de proyecto que podría ser financiado a través de la Subcuenta de Investigación del FOPREDEN. Para el desarrollo de dicho proyecto, el CENAPRED tiene contemplada la participación del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA); institución que cuenta con la experiencia y el conocimiento para el desarrollo tecnológico del sistema.

Así pues, los valores límite o umbrales relacionados con la cantidad de lluvia, más comúnmente investigados, son: Precipitación total acumulada, Lluvia antecedente, intensidad de las precipitaciones y duración de las lluvias (Ramírez, 2010), índice de humedad del suelo o la combinación de ellos. Si bien, las lluvias son el factor último que detona o dispara un proceso de inestabilidad, existen casos donde los deslizamientos son producto de la reducción progresiva de las resistencias de los suelos y de las rocas, la cual puede ser reducida por meteorización, esfuerzos tectónicos y por actividades humanas (Soeters y Van Westen, 1996), por lo que el efecto de las lluvias y de los sismos se consideran como factores externos o desencadenantes (Wang y Sassa, 2003).

Es importante mencionar que cuando los umbrales sobrepasan valores críticos de precipitación la situación de estabilidad de una ladera o talud alcanza un proceso de estabilidad crítica, por lo que a partir de dicho valor la posibilidad de que se presente un deslizamiento es prácticamente inminente. La determinación de dichos umbrales tiene beneficios directos para la toma de decisiones, ya que proporciona información que puede ser utilizada para la evacuación preventiva de zonas propensas a deslizamientos (CENAPRED, 2016).

En el año 2016 se llevó a cabo un estudio para la titulación de licenciatura en ingeniería forestal para el instituto tecnológico de Costa Rica por Iván Fabricio Chaverri molina para determinar la zonificación de la susceptibilidad a deslizamiento, por medio de la metodología Mora-Vahrson (1994), en la microcuenca del río macho, San José, Costa Rica, donde se determinó por medio

de un Sistema de Información Geográfica, la susceptibilidad a deslizamientos. Esta metodología permite clasificar la susceptibilidad a deslizamientos de una región, por medio del análisis de cinco variables: pendiente, litología, humedad del suelo, sismicidad y registro de lluvias intensas en un lapso de 24 horas asociado a un periodo de retorno de 100 años.

La metodología Mora-Vahrson (1994) es un procedimiento relativamente sencillo y bastante efectivo a la hora de zonificar regiones. Ha sido utilizada en países como Guatemala (Barillas, 2008), El Salvador (SNET, 2004) y Nicaragua (INETER et al., 2004), con buenos resultados según se desprende de los estudios publicados. En Costa Rica esta metodología se ha implementado exitosamente en el análisis de la susceptibilidad a deslizamientos en diversas localidades, entre ellas El Cacao de Atenas (Mora 2004a), el cantón de San José (Mora 2004b), Valle de Orosí (Salazar 2007) y en el corredor del poliducto entre Siquirres y Turrialba (Segura et al., 2011).

La efectividad de la metodología ha sido confirmada por Barrantes et al. (2011) en un estudio realizado en la microcuenca del río Sarapiquí, en el que se corroboró la coincidencia entre las zonas identificadas como de alta susceptibilidad y los deslizamientos ocurridos el 6 de enero de 2008 a raíz del terremoto de Cinchona. Los resultados fueron suficientemente precisos, en las zonas identificadas como de 2 muy alta y alta susceptibilidad ocurrieron deslizamientos de magnitud considerable. Así mismo, los autores recomiendan que esta metodología se aplique a una escala no mayor que 1:50000, debido a la dificultad de conseguir información detallada de litología, altitud y meteorología.

Para el proceso se utilizó el programa de sistemas de información geográfica ArcGIS 10, para el análisis de la información y la elaboración de los mapas. Se determinó que en el área de estudio predomina un relieve con pendientes planas, el factor litológico revela condiciones de geológicas de alta susceptibilidad, los factores de humedad en el suelo, intensidad sísmica y lluvias máximas presentan valores constantes para toda la microcuenca. Los resultados muestran que la zonificación más ampliamente distribuida es la de muy baja y baja, concordante con la caracterización topográfica. El 8% del área de la microcuenca se encuentra en

una zona de alta susceptibilidad. Se incorporó el parámetro “uso del suelo” para determinar las zonas prioritarias a intervenir por medio de técnicas de restauración ecológica, utilizando como criterios la susceptibilidad a deslizamientos y el tipo de cobertura. Se identificaron además áreas urbanas ubicadas en zonas de susceptibilidad mediana y alta (Chaverri, 2016).

En el año 2012 se llevó a cabo un estudio para la titulación de la maestría en tecnologías de la información geográfica. universidad Complutense de Madrid por Jorge Navarro Vidal para determinar susceptibilidad y amenaza de movimientos de ladera mediante sig en el municipio de Berlín, El Salvador, donde busca identificar los factores condicionantes de la inestabilidad de laderas y técnicas de evaluación multicriterio. Este método se ha aplicado en una escala municipal, que engloba la mayor parte del término municipal de Berlín (El Salvador), el cual, por sus condiciones orográficas y geológicas, le hacen propenso a sufrir movimientos de ladera, como atestiguan los eventos asociados a factores detonantes como sismos y fuertes precipitaciones ocurridos en esta zona en el pasado. Para este estudio se utilizaron las variables de pendiente, orientación rugosidad, curvatura, litología, geotecnia y uso de suelo. (Navarro, 2012).

Con el propósito de cumplir con los objetivos de esta tesis, se planteó el desarrollo metodológico a través de diferentes etapas del proceso de análisis de susceptibilidad a los deslizamientos en el municipio Valle de Bravo. Para ello se determinarán las características Físico Geográficas de la zona y sus factores condicionantes y desencadenantes. Así mismo se realizará un análisis final entre todos los factores para lograr determinar las zonas susceptibles a deslizamientos en el caso de estudio

4.2. MATERIALES

4.2.1. Herramienta de Trabajo

El software que se ha utilizado para la implementación del Sistema de Información Geográfica, ha sido ArcMAP 10.1 de ESRI. ArcGIS constituye una familia de productos de software para construir un SIG completo. Esta familia es producida y comercializada por la empresa ESRI (Environmental Systems Research Institute). Este software permite realizar todos los procesos del Sistema de Información Geográfica en un mismo espacio, desde la captura de datos, edición geométrica y análisis de variables hasta la producción cartográfica. Las aplicaciones que se han utilizado han sido:

- ArcMap: Aplicación que permite editar información geográfica, visualizarla de forma combinada y crear mapas. Esta herramienta ha sido utilizada para visualizar de forma conjunta todas capas de información del SIG, para analizar la información, establecer uniones espaciales entre ellas y para diseñar los mapas.
- ArcCatalog: Aplicación compartida que permite organizar y clasificar toda la información del SIG. Esta herramienta se ha empleado para gestionar las capas de información geográfica.
- ArcToolbox: Aplicación compartida donde se encuentran las herramientas para realizar distintas operaciones de análisis con la información geográfica. Esta herramienta permitirá combinar información en diferentes formatos (vectorial y ráster) y obtener nuevas capas de información. Esta herramienta ha sido empleada para desarrollar todos los geoprocursos y parte del tratamiento de la información.

4.3. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO MEDIANTE LA INVESTIGACIÓN DE INFORMACIÓN PARA ELABORAR CARTOGRAFIA.

La finalidad de la caracterización es poder identificar y conocer de manera concreta las condiciones del área de estudio para en base a ello realizar un análisis preciso de los factores que influyan en los deslizamientos.

4.3.1. Escala de Trabajo

Teniendo en cuenta que la zona de estudio engloba el municipio de Valle de Bravo sus inmediaciones, la escala de trabajo para el análisis que se llevarán a cabo será 1:50,000, dado que es la más conveniente para homogeneizar los datos de partida.

4.3.2. Sistema de Referencia

Para la realización del análisis, se eligió como sistema de referencia el WGS 84 (World Geodetic System, 1984) que es un sistema geodésico de coordenadas geográficas usado mundialmente, que permite localizar cualquier punto de la Tierra (sin necesitar otro de referencia). La proyección cartográfica es UTM (Universal transversa de Mercator).

4.3.3. Localización

Valle de Bravo, se localiza en la parte oeste del Estado de México. Valle de Bravo limita al norte con los municipios de Ixtapan del Oro, Donato Guerra y Amanalco; al este con los municipios de Amanalco y Temascaltepec; al sur con el municipio de Temascaltepec y al oeste con los municipios de Zacazonapan, Otzoloapan, Santo Tomás e Ixtapan del Oro. Se encuentra ubicado entre las coordenadas 19° 04' 37" y 19° 17' 28" latitud norte y entre 99° 57' 34" y 100° 15' 54" longitud oeste. El municipio cuenta con una superficie territorial de 421.95 kilómetros cuadrados. (Atlas de Riesgo de Valle de Bravo, 2016).

es concordante y transicional con los sedimentos calcáreos terrígenos de la Formación Amatepec (Campa, 1983).

Al sur en el cerro El Mirador y San Juan Atexcapan la formación se encuentra cubierta por ignimbritas terciarias; mientras que al este y oeste queda cubierta por depósitos basáltico-andesíticos cuaternarios.

Formación Arcelia. Cerna (1982), denominó como Formación Arcelia al conjunto de rocas volcánicas de origen submarino de composición basáltico-andesítico con intercalaciones de sedimentos silíceos, areniscas y lutitas. Campa (1979) la definió como parte de la secuencia volcánico sedimentaria.

Se distribuye a lo largo de límite oriental en una franja irregular con dirección general nortesur, desde el poblado El Chilar pasando por la Presa Santo Tomás, Otzoloapan y Zacazonapan hasta San Juan Acatitlán. Consiste de una secuencia volcánico-sedimentaria formada por lavas y tobas.

Cabe mencionar que partir del análisis de la geología regional se determinaron los principales tipos de roca para su estudio en el municipio de Valle de Bravo, los cuales comprenden los bancos de rocas metasedimentarias provenientes de la formación Teloloapan, ubicados cerca del poblado de Rincón de Estradas.

Al sur en el cerro El Mirador y San Juan Atezcapan se encuentran las Riolitas terciarias, mientras que al este y al oeste quedan cubiertos por depósitos de basalto y andesita cuaternarios. Así mismo se encuentran areniscas y lutitas provenientes de la formación Arcelia (Islas, 2010).

En las áreas de San Pedro Tenayac, Albarradas, El Tule y La Finca, estas rocas se encuentran cubiertas y afectadas por pórfidos riolíticos, así como por intrusiones de granito de edad terciaria. Cabe mencionar que en algunas partes del municipio se encuentran depósitos de origen aluvial.

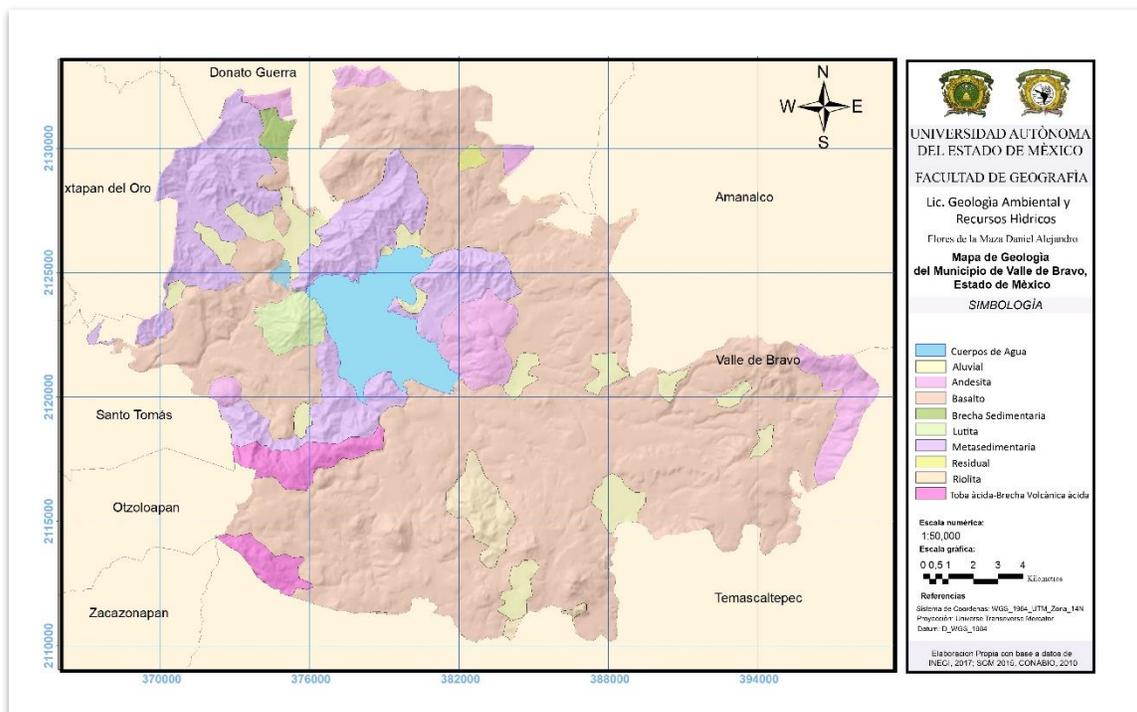
En las áreas de San Pedro Tenayac, Albarradas, El Tule y La Finca, estas rocas se encuentran cubiertas y afectadas por pórfidos riolíticos, así como por intrusiones graníticas de edad terciaria y son cubiertas por depósitos de lahar y derrames basáltico-andesíticos del cuaternario. Dado que se desconoce la base de esta

unidad es muy difícil determinar su espesor. Sin embargo, Cerna (1983) y Parga (1981), lo estimaron en 2000 metros.

Existen formaciones con presencia de metamorfismo en la ladera Norte de la Presa, lo cual es el basamento sobre el cual se depositaron los materiales debidos a la actividad volcánica. El resto de área es de edad cuaternaria, y esta cuenta con la presencia de los suelos menos desarrollados desde el punto de vista evolutivo. Dentro de los materiales o formaciones debidos a los fenómenos del vulcanismo, se tienen: Derrames basálticos y sus posteriores aportes de productos piroclásticos a lo largo de miles de años. Edificios volcánicos y lomeríos de brechas volcánicas, caracterizados por ser fragmentos rocosos en una matriz de productos piroclásticos y Conos cineríticos, formados por cenizas volcánicas. (Islas, 2010).

Es importante señalar que existen fallas geológicas en el territorio que rodea el área urbana actual de la cabecera municipal, por lo que es indispensable considerar este aspecto en la definición de zonas para albergar el crecimiento poblacional.

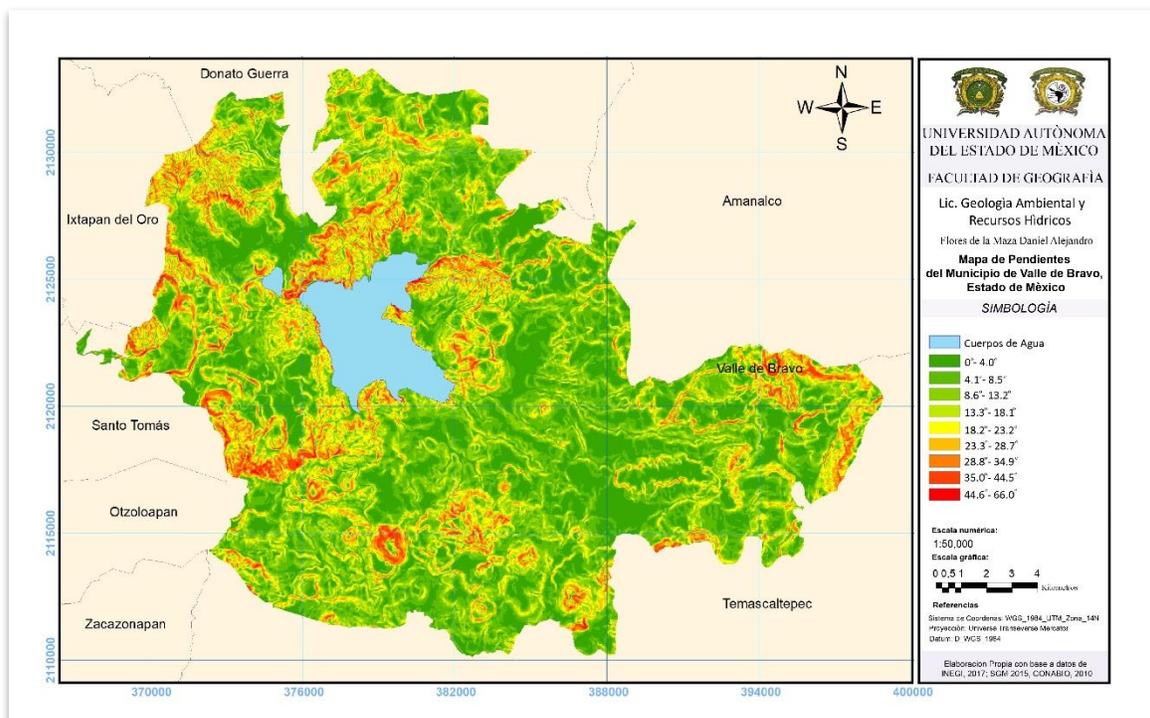
FIGURA 12.0 Mapa de Geología de Valle de Bravo. Elaboración propia con base a datos de INEGI (2014), SGM (2016) y CONABIO (2010).



4.3.5. Topografía e Hipsometría

El Municipio de Valle de Bravo está rodeado por montañas, existiendo tres formas de características de relieve: la primera corresponde a las zonas accidentadas que abarcan, aproximadamente el 50% de la superficie total del municipio y está formada por las sierras de Temascaltepec, Tenayac, Valle de Bravo y por las faldas de sierras circundantes; la segunda corresponde a zonas semiplanas que comprenden, aproximadamente, el 30% de la superficie; y la tercera corresponde a las zonas planas que ocupan el 20% de la superficie, además, Valle de Bravo presenta numerosos volcanes dispersos en su territorio destacando entre ellos el Cerro Gordo. Los Principales niveles que se encuentran en el municipio van desde los 2,600 metros sobre el nivel del mar, hacia el noreste, hasta los 1,400 metros (Atlas de Riesgo Valle de Bravo, 2016).

FIGURA 13.0 Mapa de Pendientes de Valle de Bravo. Elaboración propia con base a datos de INEGI (2014), SGM (2016) y CONABIO (2010).



4.3.6. Edafología

En la Cuenca que conforma a Valle de Bravo, prácticamente las tres cuartas partes de la superficie total está cubierta por andosoles, es decir suelos derivados de productos piroclásticos, específicamente de cenizas volcánicas. Así mismo, derivados de productos piroclásticos, existen otros tipos de suelos con una presencia importante en la cuenca, y que se describen brevemente. Algunas características importantes de los andosoles son su composición mineralógica, donde el alófono compone hasta en un 60% los productos minerales, la alta fijación de fósforo, su alta retención de humedad (que puede llegar hasta un 400%), la alta porosidad, su baja densidad aparente y la alta capacidad de intercambio catiónico (INEGI, 2001).

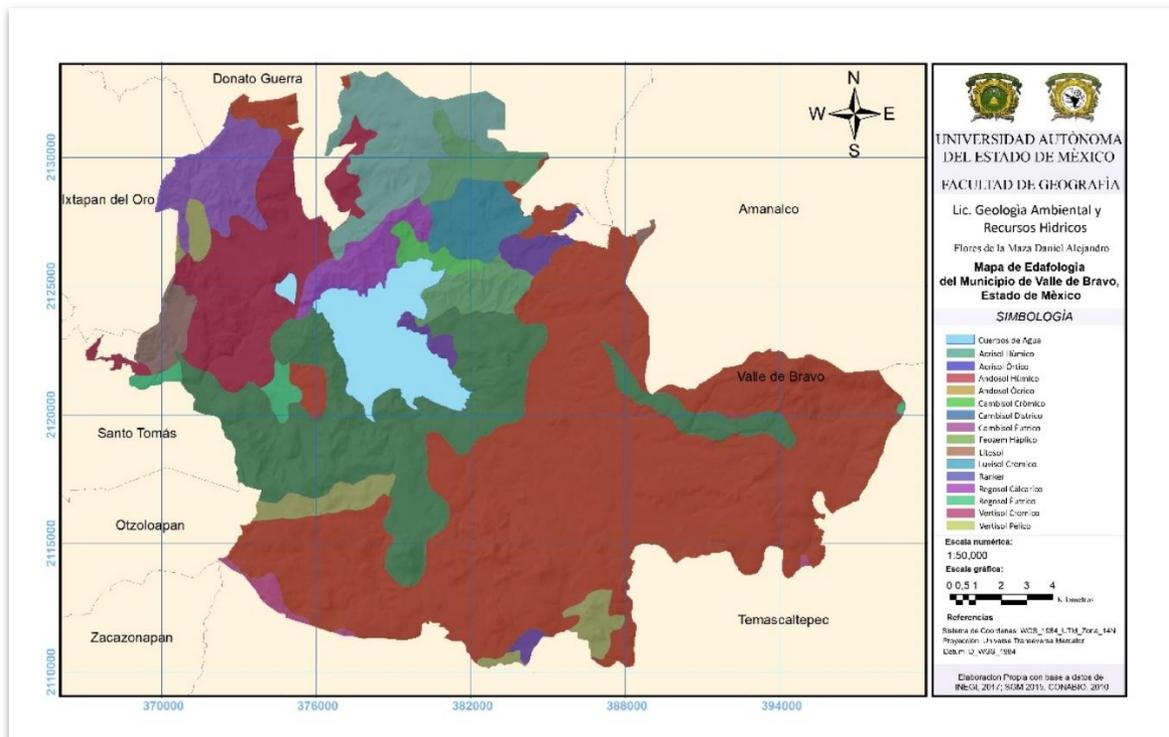
La alta erosión de los suelos y la profundidad que pueden llegar a tener, ya que gran cantidad de los suelos es arrastrada con cierta. Por ello es importante conservar la estabilidad de los suelos mediante el cuidado de las cubiertas vegetales, o para el caso de la agricultura mediante prácticas de conservación de suelos. Derivados de los andosoles existen otros suelos denominados cambisoles, los cuales tienen un mayor grado de evolución, y contienen un enriquecimiento de arcilla en el horizonte B, lo que genera mejores condiciones para el aprovechamiento agrícola. Estos suelos se encuentran en zonas más planas y estables. Así mismo existe otro grupo de suelos denominado Feozem, igualmente relacionado con los andosoles, pero se caracterizan por ser suelos negros con una acumulación en su evolución de materia orgánica, y que se encuentran generalmente en las partes bajas de los valles.

Existen otros suelos de origen piroclástico, como lo son los luvisoles y los acrisoles, provenientes de materiales piroclásticos de edad posiblemente terciaria, donde se han formado arcillas. Presentan un lavado importante, es decir un desgaste importante en su composición química debido a la erosión del agua principalmente. Los suelos fueron formados en condiciones de humedad importante. Así mismo son suelos que cuentan con una capa superficial delgada debido a la acumulación de materia orgánica proveniente de la vegetación natural.

El suelo acrisol, es un suelo viejo y ácido de zonas montañosas, preferentemente de origen volcánico. Presenta un color rojo o amarillo claro, es pobre en nutrientes, arcilloso y fácilmente erosionable.

El resto de los tipos de suelo que se localizan en esta zona no son aptos o presentan alguna restricción para los dos tipos de uso señalados y se encuentran en Mesa de Jaimes, La Compañía, Casas Viejas, Peña Blanca, San Mateo Acatitlán, Loma de Chihuahua, de Rodríguez y en porciones de los parajes de Tenantongo, Rancho Avándaro y Cerro Gordo, estos suelos corresponden a los tipos de suelo Litosol, Vertisol, Regosol y Ranker (INEGI, 2004).

FIGURA 14.0 Mapa de Edafología de Valle de Bravo. Elaboración propia con base a datos de INEGI (2014), SGM (2016) y CONABIO (2010).



4.3.7. Uso de Suelo y Vegetación

4.3.7.1. Uso de Suelo

El Municipio de Valle de Bravo cuenta con una superficie de 42,195 hectáreas, distribuidas en bosques, manejo agrícola, pecuario y forestal.

Los procesos de ocupación del territorio municipal son condicionados por el alto costo de los predios en zonas urbanas o urbanizables, así como por las restricciones derivadas de la normatividad en materia de planeación urbana y ambiental. El incremento de la población municipal genera la incorporación gradual de nuevas zonas al desarrollo urbano, entre ellas, algunas que forman parte de las áreas naturales protegidas que existen en el municipio y, en otros casos, en zonas que, por sus características físicas o localización, son consideradas como no urbanizables y representan riesgos para los asentamientos humanos que se ubican en ellas, o carecen de la infraestructura y servicios urbanos básicos (PDMVD, 2016).

4.3.7.2. Vegetación

Debido al tipo de clima, variedad de suelos, al relieve y las actividades humanas, el tipo de vegetación que se desarrolla en la Región XIX, Valle de Bravo, está representado por bosques de pino, oyamel y encino los cuales dominan la parte centro-norte, mientras que el bosque mesófilo y la selva baja caducifolia se presentan en pequeñas porciones del municipio de Valle de Bravo.

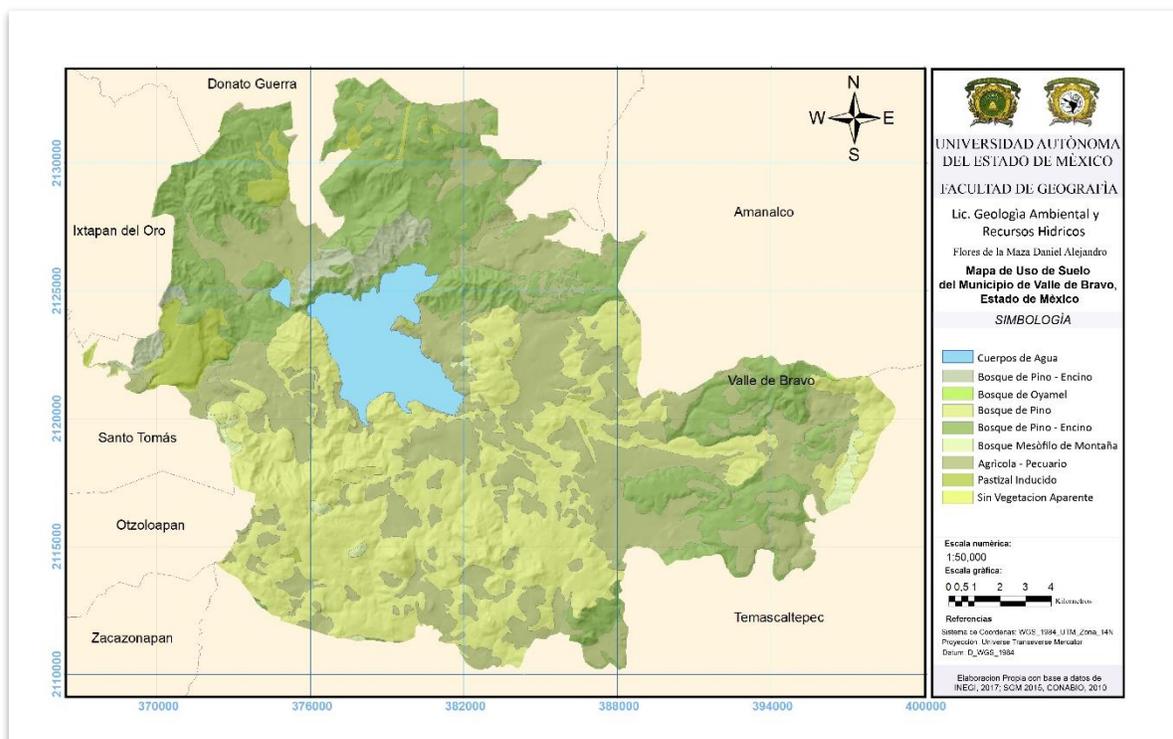
Bosque de pino. Los pinares son comunidades características de las montañas, sin llegar a ser el tipo de vegetación predominante. En su mayoría los pinares tienden a estar asociados con especies de encino para formar bosques de pino-encino, por lo que resultan menos frecuentes los rodales constituidos exclusivamente por el género *Pinus*. Los pinares son comunidades donde el estrato más importante es el arbóreo, con alturas promedio entre los 20 y 30 metros. Se encuentra en los municipios de Amanalco, Valle de Bravo y Villa de Allende (PDMVD, 2016).

Bosque de oyamel. Se localiza en las partes altas de las montañas, en elevaciones por encima de los 2,900 msnm. y con clima semifrío, Esta comunidad presenta un ecotono con el bosque de pino, por lo que es común encontrar cinturones donde las especies de Pinus se encuentran asociadas con las de Abies.

Bosque mixto (pino-encino). Este es el tipo de vegetación predominante en la cuenca de Valle de Bravo. Se localiza en elevaciones por arriba de los 1,800 msnm. y alcanza altitudes de hasta 2,700 mts., en las que son claramente dominantes las especies del género Pinus.

Bosque Mesófilo de Montaña. De este tipo de bosque quedan solamente pequeños reductos o manchones, confinados a laderas pronunciadas, de relieve accidentado, en áreas protegidas de fuertes vientos e insolación. Fisonómicamente es un bosque denso, con árboles de entre 15 y 20 mts. de altura; presenta un estrato arbóreo bajo, así como un estrato arbustivo bien definido (PDMVD, 2016).

FIGURA 15.0 Mapa de Uso de Suelo y Vegetación de Valle de Bravo. Elaboración propia con base a datos de INEGI (2014), SGM (2016) y CONABIO (2010).



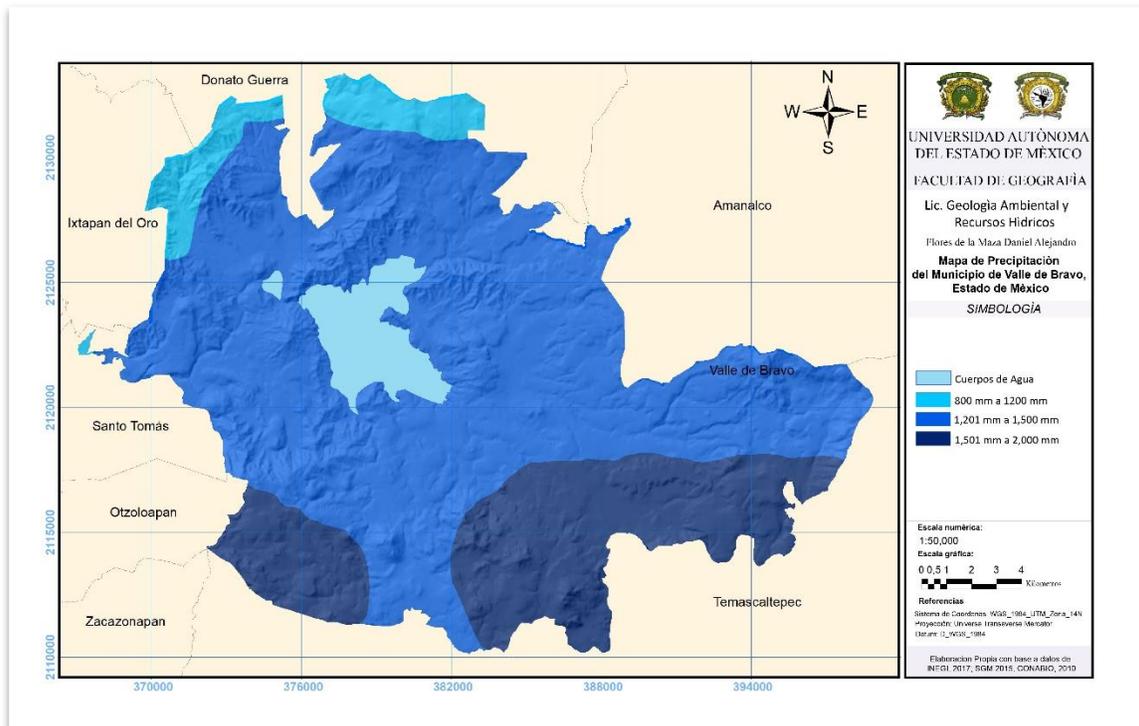
4.3.8. Clima

El Clima es templado subhúmedo con lluvias en verano; las lluvias se presentan de junio a septiembre y se prolongan, en ocasiones hasta octubre. Los meses más calurosos son: mayo, junio y agosto; la dirección de los vientos en general, es de poniente a oriente.

Los aspectos climáticos presentan las siguientes características: Muy húmedo, deficiente moderada de agua invernal, clima templado con invierno benigno, en el tanto la temperatura promedio de anual es de 17.5°C, la máxima de 32.0°C, y la mínima de 1.3°C, el promedio de días lluviosos en un año es de 103, el promedio de días despejados en un año es de 202, el promedio de días nublados en un año es de 60 y el promedio de precipitación anual es de 1,024.7 mm. Los rangos de la precipitación van de los 800 mm a los 2000 mm.

Se llegan a registrar lluvias en noviembre y diciembre; las heladas se inician a mediados de diciembre y se prolongan hasta febrero; las lluvias son más abundantes en verano; en esta época, la precipitación pluvial es ascendente de junio a julio (CONABIO, 1998).

FIGURA 16.0 Mapa de Precipitación de Valle de Bravo. Elaboración propia con base a datos de INEGI (2014), SGM (2016) y CONABIO (2010).



4.3.9. Hidrología

El municipio se encuentra en la Región Hidrológica del Río Balsas (RH-18), dentro de la cuenca del Río Cutzamala, y forma parte de las subcuencas de los ríos Tiloxtoc y Temascaltepec. En esta cuenca se encuentran las presas de Valle de Bravo, Tiloxtoc e Ixtapantongo.

En el municipio de Valle de Bravo existen tres presas que son: Tiloxtoc, Colorines y Valle de Bravo. Esta última tiene una extensión de 21 kilómetros cuadrados y forma parte del Sistema Hidroeléctrico "Miguel Alemán". Actualmente pertenece a la Comisión de Aguas del Valle de México y se utiliza para abastecer de agua potable a la zona metropolitana de la ciudad de México (Atlas de Riesgo, 2016).

El límite máximo del embalse del vaso de la Presa Valle de Bravo se localiza a los 1,830 msnm, conforme a lo establecido en el Decreto 186, publicado en la Gaceta del Gobierno del 23 de marzo de 1993. El área que abarca el vaso es de 1,851 hectáreas, con una capacidad total de almacenamiento es de 457 millones de metros cúbicos.

La presa recibe los aportes de los ríos la Yerbabuena, San Diego, Ladera Oriente de Cualtenco, Calderones el Cerrillo, Tizates, El Carrizal, Los Hoyos, Amanalco, San Gaspar, La Cascada y Las Flores; ríos que en conjunto integran un área de captación de 509.01 km², equivalente a 65.6% del área. El río Amanalco es el de mayor importancia por su caudal. En el Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Valle de Bravo se establece que existen en el municipio 101 manantiales, 21 arroyos, tres bordos y siete acueductos. Entre los principales problemas que se observan al respecto destacan dos: la contaminación de cauces de ríos y arroyos, así como del mismo vaso de la presa y, por otra parte, la disminución progresiva en la captación de este recurso (INEGI, 2018).

4.4. FACTORES CONDICIONANTES Y DESENCADENANTES DE LOS DESLIZAMIENTOS Y SU PONDERACION PARA EL ÁREA DE ESTUDIO.

En relación con la clasificación debe hablarse también de factores condicionantes y desencadenantes de estos movimientos. Los primeros son aquellos que evolucionan lentamente como el relieve, la litología en su dimensión resistente, la estructura tectónica a diferentes escalas, la hidrogeología (ligada al cambio climático) y el clima. Los factores desencadenantes varían con mayor rapidez, incluso instantáneamente, como sucede en el caso de un terremoto (Ayala, 1990).

TABLA 5.0 Factores influyentes en la inestabilidad de laderas.

Tabla de Factores	
Factores Condicionantes	Factores Desencadenantes
Geología	Precipitación
Edafología	
Uso de Suelo y Vegetación	
Pendientes	

Existen otros factores desencadenantes como los sísmicos que tienen gran relevancia en los deslizamientos, sin embargo, no fueron tomados en cuenta ya que en el municipio de Valle de Bravo no se encuentran reportes ni afectaciones relacionadas con dicho factor.

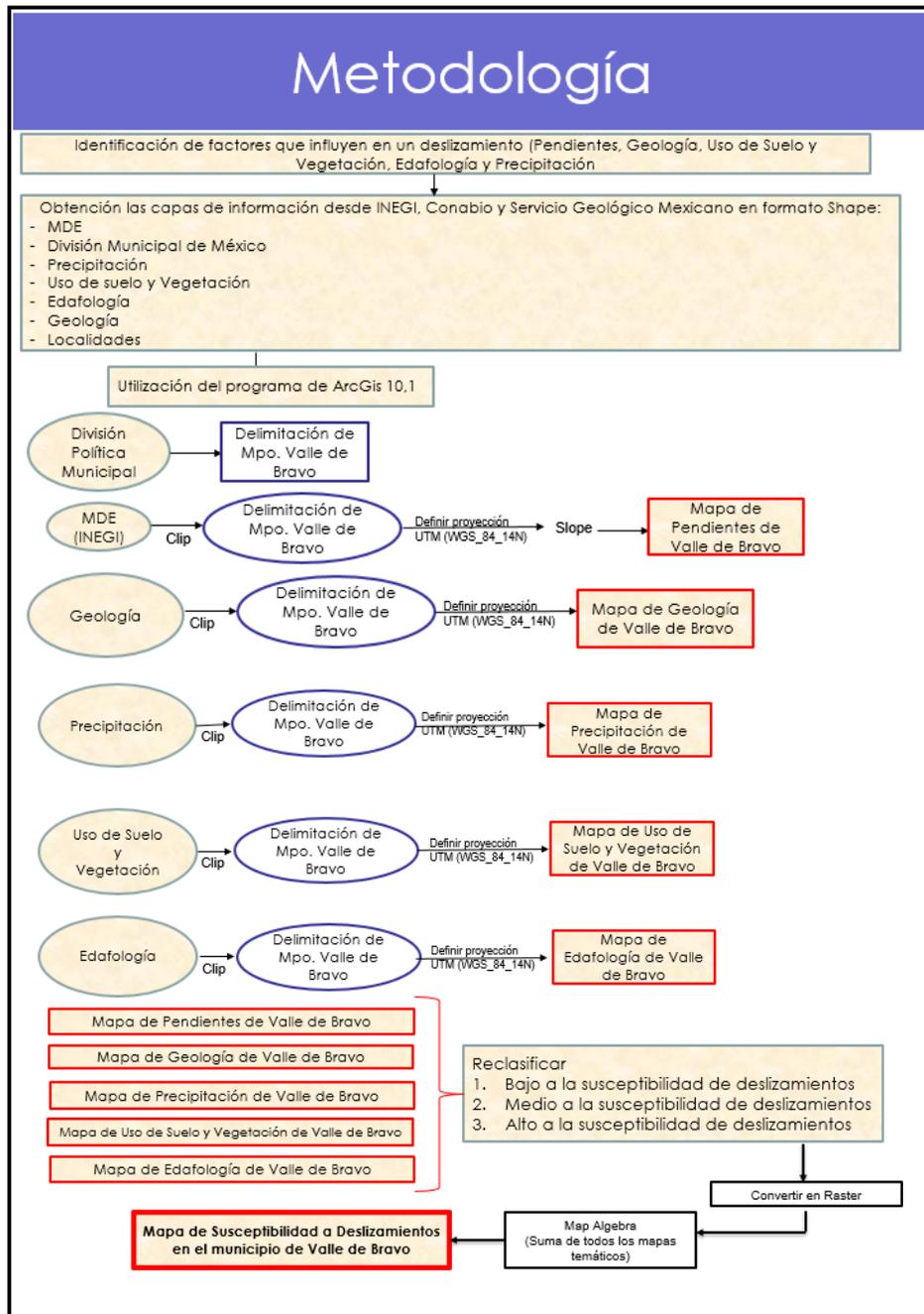
Para ello se utilizarán capas de información en escalas de 1:50,000 obtenidas de INEGI, CONABIO y SGM para ser procesadas de vector a raster (en este caso se utilizarán las capas de información shapefile basadas en los siguientes aspectos: tipos de suelo, vegetación, tipo de rocas, precipitación y curvas de nivel) en el software ArcMap 10.1. Esta información ayudará a determinar el contexto físico del municipio de Valle de Bravo para determinar los atributos particulares de la zona de estudio. Con Base en lo anterior se obtendrán varios mapas (Uso de suelo, edafología, geología, geología y pendientes. Posteriormente esta información se utilizará en la tesis para generar mapas de cada factor, los cuales servirán en conjunto para realizar el análisis de susceptibilidad a deslizamientos en el municipio de Valle de Bravo y con ello se obtendrán mapas temáticos de cada factor.

Esta información servirá como la fase previa para realizar el análisis multicriterio, pues se obtendrá cada mapa temático con cada factor ya con un peso otorgado de acuerdo a sus distintos aspectos.

Para obtener cada mapa temático ponderado se realizará el proceso de asignar un peso específico a cada aspecto mediante un análisis multicriterio para determinar los siguientes rangos, 1 susceptibilidad baja, 2 susceptibilidad media y 3 susceptibilidad alta, dependiendo del valor que le corresponda a cada aspecto de la

capa de información. Todo ello generado en un campo nuevo en la tabla de atributos con el nombre de pesos. Posteriormente se generará un raster en el apartado de ArcToolbox – Conversion Tools – To Raster - Polygon to Raster y seleccionaremos nuestra capa de información a procesar teniendo en cuenta que el valor del campo que utilizaremos será el de pesos, al obtener nuestro raster le otorgaremos los colores de Verde (Bajo), Amarillo (medio) y rojo (alto).

TABLA 6.0 Metodología para el análisis de la susceptibilidad a deslizamientos.
Elaboración propia.



4.4.1. Factores Condicionantes

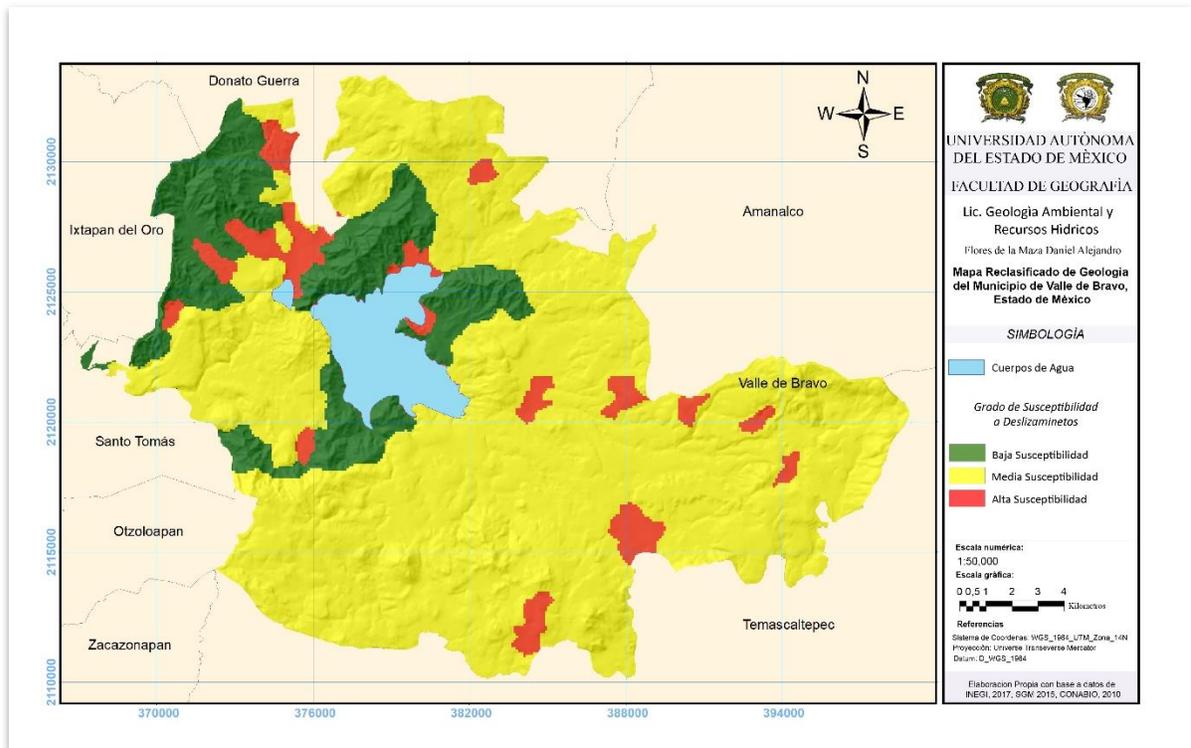
4.4.1.1. Factor Geología

Esta Variable tiene mucho que ver ya que existen muchos tipos de roca y según sus características podemos encontrar rocas muy inestables como las rocas poco consolidadas, las cuales pueden ser más inestables que una roca ígnea como un granito. Esto será en base a cartas obtenidas en la escala 1:50,000 de INEGI.

TABLA 7.0 Clasificación de geología. Elaboración propia con base a las características geológicas propuestas por Mora – Vahrson (1991).

Factor: Geología		
Tipo de Rocas	Asignación de peso <i>(Susceptibilidad a Deslizamiento)</i>	¿Por qué?
Metasedimentaria	Baja	Son rocas consolidadas, las cuales cuentan con un alto grado de resistencia a los movimientos y son poco susceptibles a deslizamientos
Basalto, Lutita, Andesita, Riolita, Toba Acida - Brecha Volcánica	Media	Su comportamiento va a depender de la exposición en la zona en la que se encuentren y son consideradas con una susceptibilidad media
Aluvial, Residual y Brecha Sedimentaria	Alta	Su comportamiento tiene un alto grado de susceptibilidad ya que, es material suelto y expuesto a las alteraciones del intemperismo

FIGURA 17.0 Mapa de Geología de Valle de Bravo reclasificado en tres rangos para la susceptibilidad a deslizamientos. Elaboración propia con base a datos de INEGI (2014), SGM (2016) y CONABIO (2010).



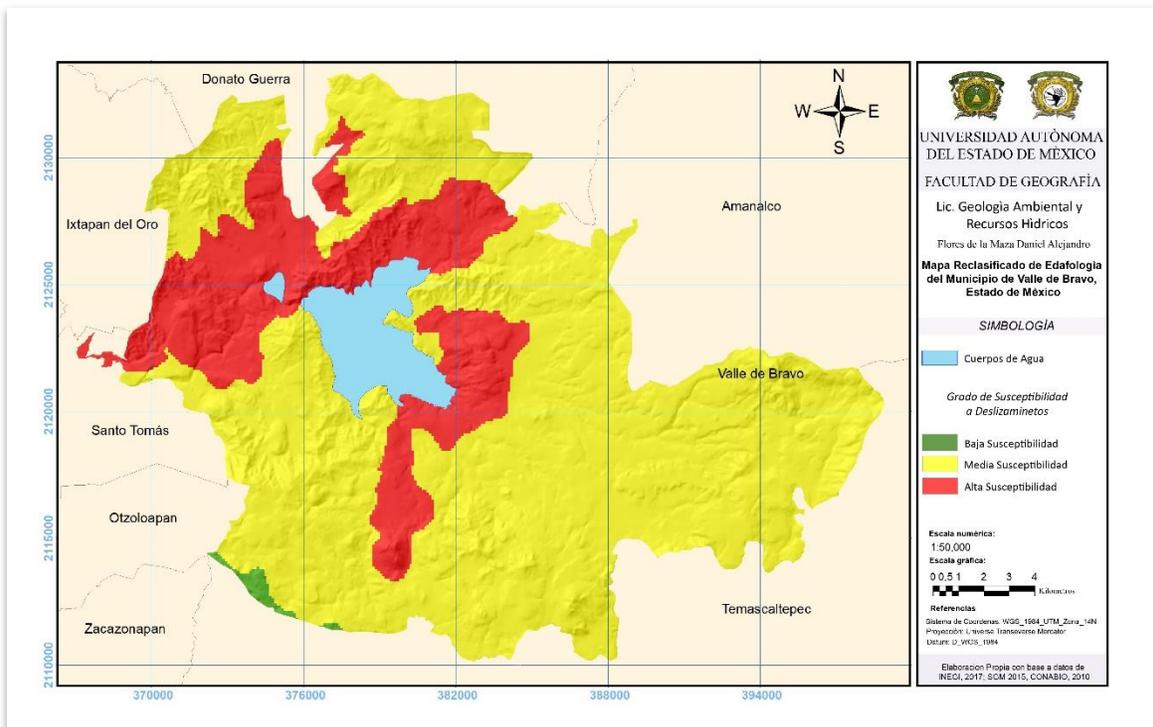
4.4.1.2. Factor Edafología

El análisis de la variable edafológica es de gran importancia ya que permitió determinar qué tipo de suelos conforman el municipio de Valle de Bravo y clasificar, por el grado de susceptibilidad en la que se encuentran los suelos, por medio de la caracterización del suelo, dónde se destacaron los componentes principales y la permeabilidad, relacionándolos con la pendiente.

TABLA 8.0 Clasificación de edafología. Elaboración propia con base a las características de suelos propuesta por Fritz Patrick (1980).

Factor: Edafología		
Tipo de Suelo	Asignación de peso <i>(Susceptibilidad a Deslizamiento)</i>	¿Por qué?
Cambisol, Feozem	Baja	De acuerdo a sus características es poco probable a deslizarse. En el municipio es aptos para uso urbano.
Andosol, Acrisol, Luvisol y Litosol	Media	Susceptibilidad moderada a deslizarse por sus características que lo componen y las condiciones en las que se encuentran.
Vertisol, Regosol, Ranker y Acrisol.	Alta	Por su composición puede haber caída de roca o materiales. La susceptibilidad a deslizamiento es alta

FIGURA 18.0 Mapa de Edafología de Valle de Bravo reclasificado en tres rangos para la susceptibilidad a deslizamientos. Elaboración propia con base a datos de INEGI (2014), SGM (2016) y CONABIO (2010).



4.4.1.3. Factor Uso de Suelo y Vegetación

Por medio de esta variable se determinaron las áreas una cobertura vegetal y las que son utilizadas para uso agrícola, lo que permitió determinar las áreas propensas al proceso.

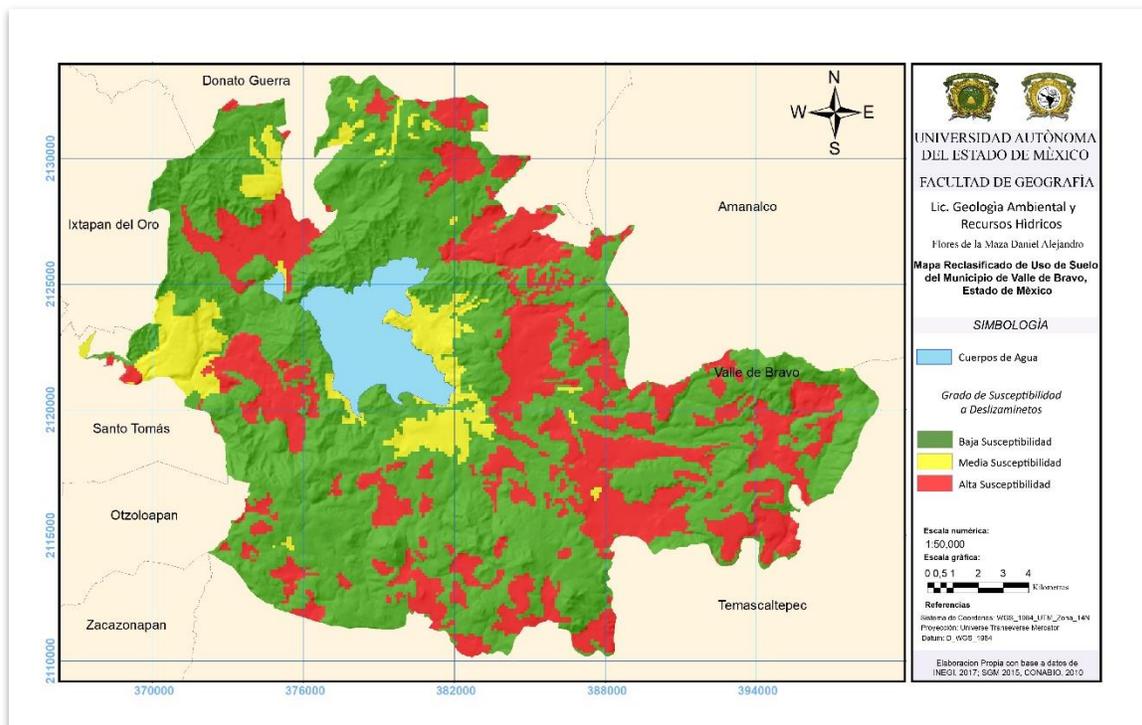
Los usos de suelo tienen que ver ya que la estabilidad de una ladera ya que puede variar según si es un bosque o son terrenos para agricultura los cuales son más susceptibles a inestabilidad.

“El efecto de refuerzo mecánico impartido por las raíces, se relaciona con la resistencia del suelo a esfuerzos de cortante tangencial, ya que se mejora ampliamente el valor de la cohesión”. Asimismo, las raíces proporcionan un anclaje que refuerza y contrarresta la gravedad de las pendientes, “y el peso de la vegetación ejerce sobre el suelo una componente vertical que aumenta la carga normal y por consiguiente la resistencia al deslizamiento.”

TABLA 9.0 Clasificación de Usos de Suelo. Elaboración propia con base a criterios de Usos de Suelo propuestos por Fritz Patrick (1980).

Factor: Uso de Suelo y Vegetación		
<i>Tipo de Uso de Suelo y Vegetación</i>	<i>Asignación de peso</i> <i>(Susceptibilidad a Deslizamiento)</i>	<i>¿Por qué?</i>
Bosque de Pino, Bosque de Encino, Bosque Mesofilo de Montaña y Bosque de Oyamel	Baja	Se consideraron como con baja susceptibilidad a los bosques, debido a que generan cohesión de los suelos debido a las raíces, además de que coadyuvan en el proceso de filtración.
Pastizal Inducido	Media	Se le asignó esta categoría a los pastizales inducidos debido a que su cubierta es intermitente y la profundidad de sus raíces es escasa en comparación con los árboles que corresponden al uso forestal.
Sin Vegetación aparente, Agricultura de Temporada, Agricultura de Riego y usos pecuarios	Alta	Los suelos considerados con una alta susceptibilidad a deslizamientos son los que principalmente tienen fines agrícolas, así como los suelos desnudos, esto debido a que carecen de biota que genere cohesión en sus granos y por lo tanto, resultan vulnerables a los agentes intemperizantes.

FIGURA 19.0 Mapa de Uso de Suelo y Vegetación de Valle de Bravo reclasificado en tres rangos para la susceptibilidad a deslizamientos. Elaboración propia con base a datos de INEGI (2014), SGM (2016) y CONABIO (2010).



4.4.1.4. Factor Pendientes

Para el análisis de las laderas en el municipio de Valle de Bravo se analizó el grado de inclinación del terreno, debido a que “el ángulo de las pendientes es quizá el principal factor de los movimientos en masa” (Wicander y Monroe, 2000).

En este orden de ideas, Lugo (1988:40) establece que “el mapa de pendientes es un trabajo esencial mecánico consistente en transformar las distancias entre curvas de nivel en valores de pendiente.

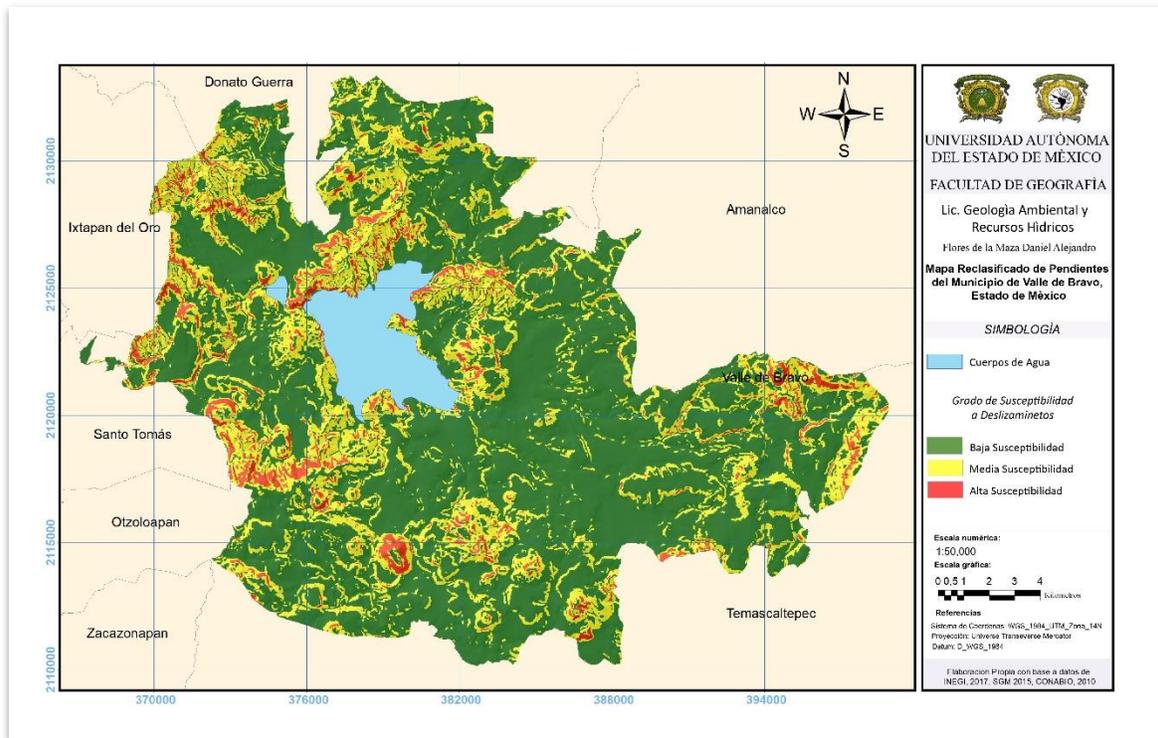
Es importante mencionar que la pendiente plana o con inclinación suave, presenta muy poca probabilidad que se den los movimientos en masa, en caso de ocurrir serían muy lentos y de baja intensidad. Las pendientes inclinadas o con un escarpe importante es donde pueden ocurrir movimientos de masa de todo tipo y hay peligro de erosión y de deslizamiento de suelo.

En pendientes con gran inclinación es donde pueden darse procesos intensivos como la erosión bajo la cubierta del bosque, reptación y deslizamientos con peligro extremo o también con afloramientos de roca, depósitos finos e incoherentes de talud cayendo de la cara libre de roca.

TABLA 10.0 Clasificación de pendientes. Elaboración propia con base a las características de pendientes propuesta por Pedraza (1996)

Factor: Pendientes		
Grado de Inclinación	Asignación de peso <i>(Susceptibilidad a Deslizamiento)</i>	¿Por qué?
0° a 15°	Baja	Son pendientes consideradas con una susceptibilidad baja, ya que tienen muy poca probabilidad de que ocurra un deslizamiento
15° a 30°	Media	Son pendientes consideradas con una susceptibilidad media ya que tienen probabilidad a deslizarse.
Mayor a 30°	Alta	Son pendientes consideradas con una susceptibilidad alta ya que por su grado de inclinación pueden ser uno de los factores más importantes que provoquen un deslizamiento.

FIGURA 20.0 Mapa de Pendientes de Valle de Bravo reclasificado en tres rangos para la susceptibilidad a deslizamientos. Elaboración propia con base a datos de INEGI (2014), SGM (2016) y CONABIO (2010).



4.4.2. Factores Desencadenantes

4.4.2.1. Factor Precipitación

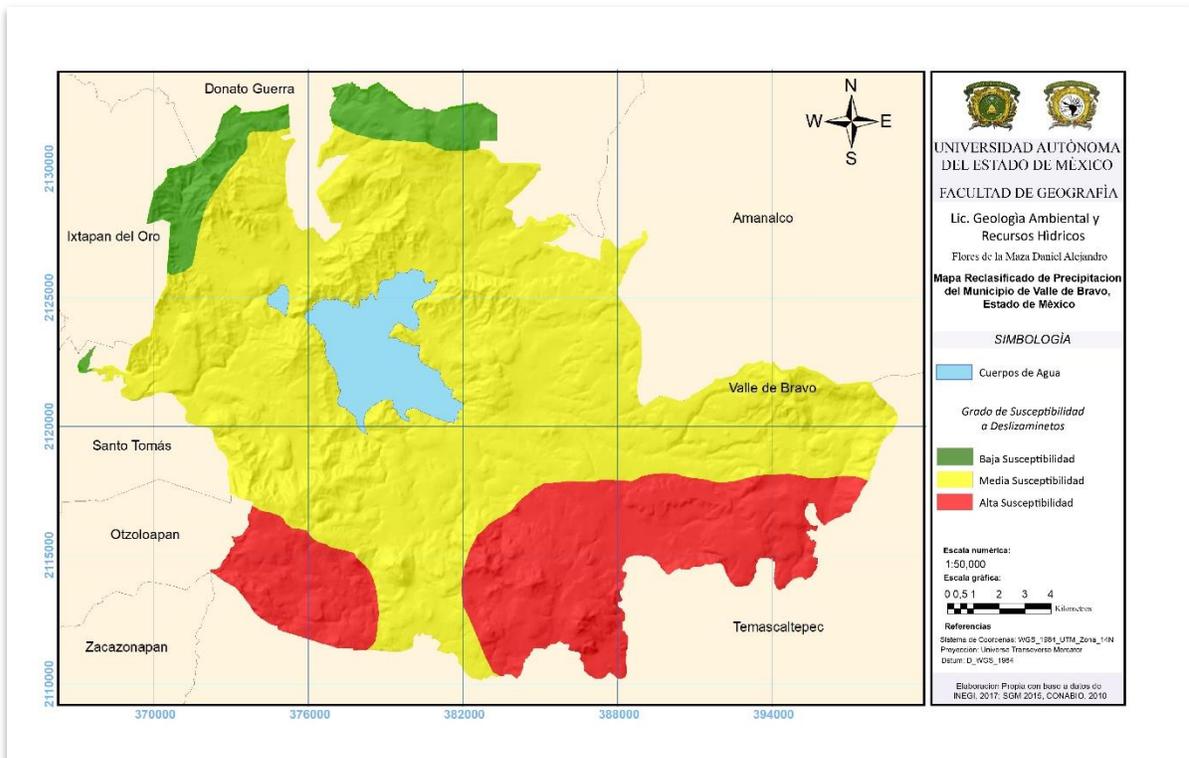
La variable de precipitación es considerada como un elemento desencadenante en los deslizamientos, ya que a mayor carga del suelo causada por la saturación de agua existe una mayor probabilidad a los deslizamientos, es decir, entre mayor sea la precipitación mayor susceptibilidad.

Se considera la variable precipitación como un desencadenante o factor externo, de acuerdo a lo que plantea el método de clasificación de amenaza de Mora et. al. (2002).

TABLA 11.0 Clasificación precipitación. Elaboración propia con base a las características de precipitación propuestas por Mora Vahrson (1994) y CENAPRED (2016).

Factor: Precipitación		
Cantidad de Precipitación	Asignación de peso (Susceptibilidad a Deslizamiento)	¿Por qué?
0 mm a 800 mm anuales	Baja	Es considerado con una susceptibilidad baja ya que es muy poca cantidad de agua.
800 mm a 1500 mm	Media	Es considerado con una susceptibilidad media ya que conforme va aumentando la cantidad de agua el suelo va a saturándose más y aumenta su probabilidad de deslizamiento.
1500 mm o mas	Alta	Es considerado con una susceptibilidad alta ya que la gran cantidad de agua satura el suelo y tiende a comportarse como un fluido y por ende a deslizarse.

FIGURA 21.0 Mapa de Precipitación de Valle de Bravo reclasificado en tres rangos para la susceptibilidad a deslizamientos. Elaboración propia con base a datos de INEGI (2014), SGM (2016) y CONABIO (2010).



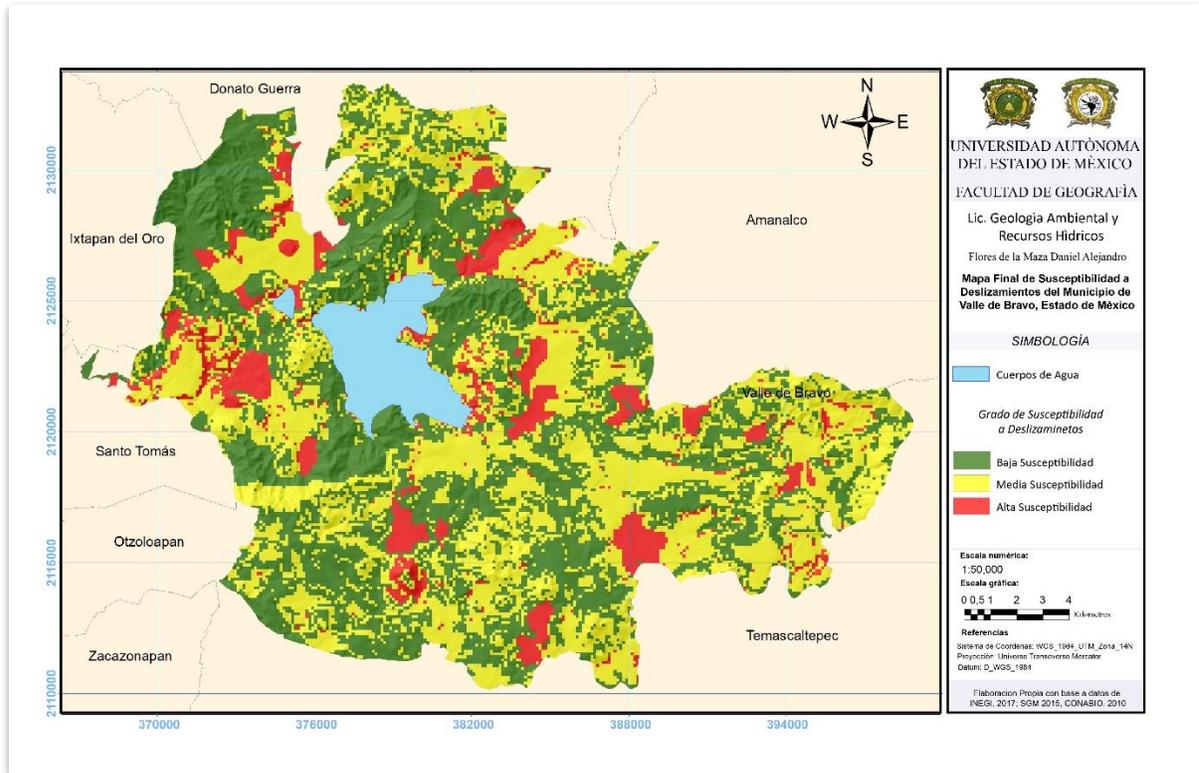
4.5. ANÁLISIS FINAL MEDIANTE ARCMAP 10.1 PARA LA ELABORACIÓN DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS.

En este apartado se efectuará un análisis en base a los mapas temáticos obtenidos para procesar la información de la manera más adecuada a través de una superposición de mapas temáticos. Se utilizará el software ArcMap 10.1 en la herramienta de ArcToolbox – Spatial Analyst Tools – Map Algebra – Raster Calculator, en ese apartado realizaremos la suma de nuestros mapas para obtener el resultado final del trabajo que identifique las principales zonas susceptibles a deslizamientos identificando a las zonas susceptibles a deslizamientos de acuerdo a la siguiente simbología rojo-alto, amarillo-medio y verde-bajo.

La susceptibilidad del terreno a sufrir deslizamientos de ladera ha sido obtenida a partir de varios factores los cuales a su vez han sido obtenidos mediante modificaciones y combinaciones de la información recopilada. A continuación, se muestra un listado en el que aparecen los mapas finales de los factores que intervinieron en el cálculo de la susceptibilidad.

1. Mapa de pendientes
2. Mapa de Geología
3. Mapa de Uso de Suelo y Vegetación
4. Mapa de tipos de Suelo
5. Mapa de Precipitación

FIGURA 22.0 Mapa de Susceptibilidad a deslizamientos de Valle de Bravo clasificado en tres rangos. Elaboración propia con base a datos de INEGI (2014), SGM (2016) y CONABIO (2010).



Este resultado se analizará más adelante junto con las localidades para con ello lograr identificar las condiciones de susceptibilidad a los deslizamientos que tiene cada localidad.

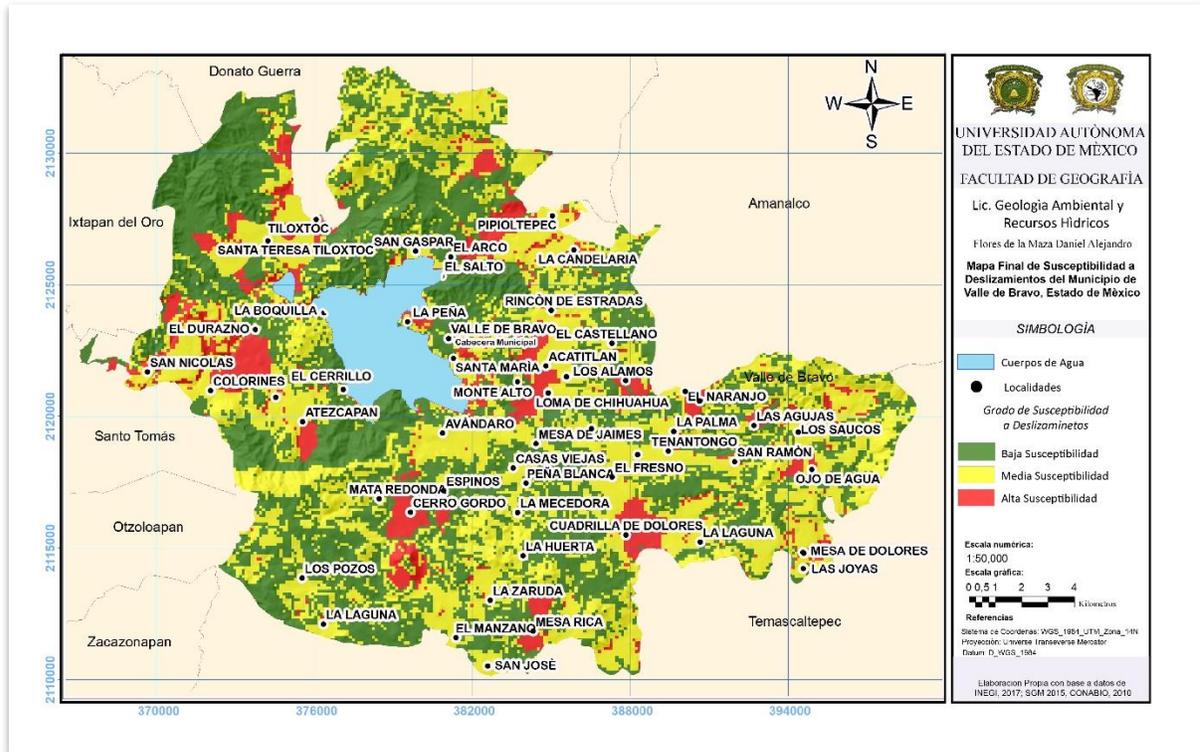
CAPÍTULO V ANÁLISIS DE RESULTADOS, RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

5.1. RESULTADOS

La metodología empleada para realizar el estudio clasifica la susceptibilidad en tres rangos (Baja, Media y Alta). Atendiendo a esta clasificación, se obtuvo el mapa de susceptibilidad donde se puede advertir con claridad las diferentes zonas de distinta susceptibilidad. La mayoría de la zona de estudio tiene una susceptibilidad baja a media y la superficie restante en menor cantidad muestra una susceptibilidad alta.

De acuerdo al mapa se encuentran localidades con una susceptibilidad alta como Tiloxtoc, San Nicolas, Cerro Gordo, La Candelaria, Loma de Chihuahua, Amatitlán, Los Álamos, El Naranjo, Las Agujas, Cuadrilla de Dolores, Atezcapan y Mesa Rica. Las localidades con una susceptibilidad media son San Gaspar, Colorines, Pipioltepec, Rincón de Estradas, Los Álamos, Casas Viejas, El Fresno, Santa Teresa Tiloxtoc, Tenantongo, La Palma, Los Saucos, Las Joyas, Santa María, El Cerrillo, La Zaruda, Los Pozos, La Laguna, San José, Mata Redonda y Avándaro. Las localidades con una susceptibilidad baja son El Durazno, El salto, El Castellano, Cabecera Municipal, Monte alto, Mesa de Jaimes, Peña Blanca, La Laguna, La Huerta, Espinos, El Manzano y la Mecedora.

FIGURA 23.0 Mapa de Susceptibilidad a deslizamientos de Valle de Bravo con localidades, clasificado en tres rangos. Elaboración propia con base a datos de INEGI (2014), SGM (2016) y CONABIO (2010).



En la siguiente tabla se muestra la clasificación de la susceptibilidad al deslizamiento, donde se explican los rangos de la probabilidad que ocurra un deslizamiento y sus características.

TABLA 12.0 Clasificación de la Susceptibilidad a deslizamientos. Elaboración propia de los criterios de susceptibilidad en base a datos de la clasificación de Mora, (2004).

Clasificación de la Susceptibilidad al deslizamiento

<i>Clase</i>	<i>Calificativo de Susceptibilidad al Deslizamiento</i>	<i>Características</i>
1	Baja Susceptibilidad	Son sectores estables con baja susceptibilidad los cuales tienen muy poca inclinación del terreno con materiales consolidados. No se requieren medidas correctivas. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios indispensables como hospitales, centros educativos, estaciones de policía, bomberos, etc.
2	Media Susceptibilidad	Son sectores con una media susceptibilidad donde existe la posibilidad de un deslizamiento donde hay pendientes, pero con suelos y rocas consolidados. No se debe permitir la construcción de infraestructura si no se realizan estudios geotécnicos y se mejora la condición del sitio. Las mejoras pueden incluir: movimientos de tierra, estructuras de retención, manejo de aguas superficiales y subterráneas, bioestabilización de terrenos, etc. Los sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado. Recomendable para usos urbanos de baja densidad.
3	Alta Susceptibilidad	Son sectores poco estables con inclinación del terreno con materiales poco consolidados y escasa vegetación. Probabilidad de deslizamiento muy alta en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Para su utilización se deben realizar estudios estabilidad a detalle y la implementación de medidas correctivas que aseguren la estabilidad del sector, en caso contrario o prohibir su uso con fines urbanos deben mantenerse como áreas de protección.

En Valle de Bravo, se puede ver reflejada una importante problemática del país, relacionada con el hábitat, la calidad de vida y el riesgo en que vive la población, ante la ocurrencia de eventos socio-naturales relacionados con las fuertes precipitaciones.

Como se menciona anteriormente en el Mapa de Susceptibilidad se observa que la mayoría de la zona de estudio tiene susceptibilidad baja a media. Sin embargo, se

han identificado zonas con diferentes combinaciones que llevan a una alta susceptibilidad:

Las zonas con un alta susceptibilidad tienen que ver principalmente con la conjunción de distintas características de los valores de cada variable donde influyen cuestiones como una alta pendiente, ya que a mayor sea dicha pendiente aumentan la probabilidad de deslizamiento, en cuanto a la geología podemos determinar que un suelo aluvial es poco compacto y estable a lo cual indica una probabilidad alta de deslizamiento, la vegetación es un elemento muy importante ya que los suelos con escasa vegetación, descubiertos o utilizados para la agricultura son zonas propensas a experimentar procesos de erosión y por ende están con un alta susceptibilidad. Estos son unos de los principales elementos que causan una susceptibilidad alta.

Es importante mencionar que existen zonas en el mapa que tienen un alto grado de pendiente y no muestran un alto grado de susceptibilidad, esto se debe a que cuentan con un sustrato rocoso compacto y resistente como rocas andesíticas, riolíticas y metasedimentarias, así como muestran una cobertura vegetal con bosques abundantes los cuales proporcionan una gran filtración del agua y previenen la erosión por ello no permiten que la susceptibilidad tenga un mayor grado.

El resultado de esta investigación debe ser utilizado como una herramienta para la toma de decisiones en lo que respecta a la planificación urbana, otorgamiento de permisos para la construcción de obras de infraestructura y en la regulación de uso de suelo del terreno, sin sustituir estudios geotécnicos de detalle, principalmente en las áreas de susceptibilidad de media a muy alta.

5.2. RECOMENDACIONES Y MEDIDAS PREVENTIVAS

5.2.1. Recomendaciones

- Una vez concluido este trabajo y con la experiencia adquirida en el mismo, se plantean un conjunto de recomendaciones y desarrollos para líneas futuras de trabajo que podrían contribuir a completar la problemática relacionada con la susceptibilidad a los deslizamientos.
- Otra línea que se considera muy importante en los SIG es la automatización de procesos, que puede ayudar a implementar de modo casi automático las metodologías diseñadas, así como adaptarlas a otras zonas de trabajo o a otros escenarios. La automatización facilita al mismo tiempo las actualizaciones sucesivas de los estudios que se realicen, sin más que cambiar las capas de información que requieran revisiones.
- También sería interesante que este tipo de estudios realizados sirviesen para complementar los planes de ordenación territorial y de emergencia de los Ayuntamientos y si ocurriera un fenómeno mayor que el analizado en este estudio, se pudiera hacer una valoración previa de las zonas en riesgo y las potenciales infraestructuras afectadas.
- Se recomienda prestar atención de la precipitación en cuanto a el tamaño, las características, la distribución y la intensidad con la que se presentan dependen de la cantidad de agua con la que se movilizan. Así pues, existen casos en los que para cierta cantidad de lluvia es posible que el fenómeno se active, pero no se movilice completamente; especialmente si el factor detonante se interrumpe. Mientras que, en otros casos, en los que las lluvias son persistentes aún después de que el deslizamiento se ha activado, es altamente posible que el fenómeno adquiera una mayor velocidad y capacidad de desplazamiento; tornándose más destructivo, por lo que el agua juega uno de los factores más importantes que determinan la magnitud y el poder destructivo de los mismos.
- Se recomienda que, en las zonas urbanas ubicadas en áreas susceptibles a deslizamientos medio a alto, realizar los estudios técnicos y determinar las acciones correctivas y preventivas a implementar, para reducir el riesgo.

- Se recomienda implementar un plan de restauración ecológica, con pasto o alguna otra medida en las zonas de mediana y alta susceptibilidad. Este plan de restauración debe ser una estrategia que permita combinar el uso de especies forestales y la producción agropecuaria.
- Aplicar técnicas de bioingeniería del suelo, para estabilizar las laderas. Es importante implementar el manejo de aguas y la conformación de los taludes con pendientes adecuadas, según las condiciones del terreno.
- Se recomienda coordinar con las diferentes instituciones encargadas del manejo y atención de emergencias, las estrategias a implementar en las áreas urbanas ubicadas en zonas de media y alta susceptibilidad a deslizamientos. A fin de que la población esté debidamente informada sobre las acciones a tomar en caso de un deslizamiento.
- Se recomienda analizar la tala de todos los árboles de grandes extensiones de tierra y la construcción de carreteras, la elaboración de una red extensa de carreteras utilizadas para sacar la madera cortada del bosque (Keller y Blodgett, 2004).

5.2.2. Medidas Preventivas

La prevención de grandes deslizamientos es difícil pero el sentido común y las buenas prácticas de ingeniería y otros métodos pueden ayudar a minimizar el riesgo. Por ejemplo, cargar la parte superior de las laderas, excavar en laderas sensibles, colocar material de relleno en las laderas o cambiar las condiciones del agua en ellas deberían evitarse o hacerse con precaución. Las técnicas comunes de ingeniería para la prevención de los deslizamientos incluyen el drenaje superficial y subterráneo, la eliminación de materiales inestables de las pendientes, la construcción de muros de contención u otras estructuras de soporte o la combinación de estas técnicas.

5.2.2.1. Control de Drenaje

El control del drenaje superficial y subterráneo normalmente es efectivo para estabilizar una pendiente. El objetivo es desviar el agua para evitar que circule o se infiltre en la ladera. La escorrentía superficial puede ser desviada en la ladera mediante una serie de acequias superficiales. La cantidad de agua que se infiltra en una ladera puede controlarse también cubriendo la ladera con una capa impermeable como cubiertas de cemento, asfalto o incluso plástico. Al agua subterránea se le puede impedir que sature una ladera mediante sumideros subterráneos. Para construir un sumidero, una tubería de desagüe con agujeros en toda su longitud se rodea con grava permeable o roca triturada y se coloca bajo tierra para interceptar y desviar el agua fuera de una ladera potencialmente inestable (Vallejo et al., 2002).

5.2.2.2. Nivelación

Aunque la nivelación de laderas para urbanización ha aumentado la peligrosidad de deslizamientos en muchas zonas, una nivelación cuidadosamente planificada puede aumentar la estabilidad de una ladera. En una sola operación de corte y relleno, el material de la parte superior de una ladera se elimina y se coloca cerca de su base. De esta manera se reduce el gradiente total y se elimina material de la parte superior de la ladera donde contribuye a la fuerza impulsora, colocándolo en el pie de la ladera donde aumenta la fuerza de resistencia. Sin embargo, este método no es práctico en una ladera muy alta y abrupta. En lugar de eso, la ladera puede cortarse en una serie de bancadas o escalones cada uno de los cuales contiene acequias superficiales para desviar la escorrentía. Las bancadas reducen el gradiente global y son buenos lugares de recogida de rocas caídas y pequeños deslizamientos (Vallejo et al., 2002).

5.2.2.3. Control de Drenaje

Uno de los métodos más comunes de estabilización de una ladera es un muro de contención que la sostenga. Estos muros pueden construirse de hormigón o ladrillo, mallas de alambre llenas de piedras llamadas gaviones o una serie de pilares de largas vigas de hormigón, acero o madera dirigidas hacia la tierra. Para que

funcionen con eficacia los muros deben estar anclados muy por debajo de la base de la ladera, rellenos con grava permeable o roca triturada y provistos de tubos de desagüe para reducir la presión del agua en la ladera. Añadiendo plantas, estos muros pueden resultar agradables estéticamente o armonizar con la ladera natural. Prevenir los deslizamientos puede ser caro pero la recompensa puede hacer que el esfuerzo merezca la pena. Las estimaciones de la relación beneficio-coste para la prevención de los deslizamientos van de diez a 2 000. Esto es, por cada dólar gastado en la prevención de deslizamientos, el ahorro será de diez a 2 000 dólares. Como la relación beneficio-coste en la prevención de deslizamientos es tan favorable, parece prudente evaluar deslizamientos activos y potencialmente activos en zonas donde se pueda esperar y posiblemente evitar un daño considerable. (keller y Blodgett, 2004).

5.2.2.4. Sistemas de alerta de deslizamientos

Los sistemas de alerta de deslizamientos no los impiden, pero pueden dar tiempo para evacuar a la gente y sus posesiones y detener trenes o desviar el tráfico. La vigilancia proporciona el modo más sencillo de alerta. Las zonas peligrosas pueden inspeccionarse visualmente para cambios evidentes y pueden observarse pequeñas caídas de roca en carreteras y otras zonas para eliminarlas rápidamente. El seguimiento humano tiene la ventaja de fiabilidad y flexibilidad, pero se hace difícil con el mal tiempo y en localizaciones peligrosas.

Otros sistemas de alerta incluyen sistemas eléctricos, medidores de inclinación y geófonos que recogen vibraciones de rocas en movimiento.

Para los deslizamientos existentes, pueden perforarse pozos poco profundos en una ladera y hacer el seguimiento para ver cuándo contiene el deslizamiento una cantidad peligrosa de agua. En algunas zonas, resulta útil una red de pluviómetros para alertar cuando se ha sobrepasado el umbral de precipitaciones y son probables deslizamientos de suelo superficiales (keller y Blodgett, 2004).

5.2.2.5. La vegetación

Como lo menciona Keller y Blodgett, (2004) la vegetación tiene un papel complejo en el desarrollo de los deslizamientos y fenómenos relacionados. La naturaleza de la vegetación en una zona es función del clima, tipo de suelo, topografía y de la historia de incendios, cada uno de los cuales influye también de manera independiente en lo que ocurre en las laderas. La vegetación es un factor importante en la estabilidad de la ladera por tres razones:

- La vegetación proporciona una cubierta protectora que amortigua el impacto de la lluvia que cae. Esta amortiguación hace que el agua pueda infiltrarse en la pendiente retrasando al mismo tiempo la erosión de la superficie
- Las raíces de las plantas añaden fuerza y cohesión a los materiales de la ladera. Actúan como las barras de acero de refuerzo en el hormigón y aumentan la resistencia de una ladera a los deslizamientos.
- La vegetación también añade peso a una ladera.

5.2.2.6. Adaptación al peligro de deslizamiento

Aunque la adaptación más razonable al peligro de deslizamientos es simplemente no construir en zonas propensas a los mismos, muchas personas siguen adelante. Mientras se sigan construyendo y comprando viviendas caras con vistas panorámicas o asentando poblaciones con una alta susceptibilidad a los deslizamientos seguirá existiendo esta problemática.

En cuanto a las adaptaciones personales que se pueden hacer para minimizar el peligro de deslizamientos Considere los siguientes consejos si va a adquirir una propiedad en una ladera:

- Los deslizamientos se desarrollan a menudo en zonas de geología compleja, se recomienda una evaluación geológica por un geólogo profesional para cualquier propiedad en una ladera.

- Evite viviendas en la entrada de un valle o cañón, incluso una pequeña, donde los flujos de detritos pueden originarse en laderas situadas aguas arriba y bajar por el cauce.
- Consulte a las agencias locales como departamentos de ingeniería de la ciudad o el municipio que puedan ser conscientes de deslizamientos en su zona.
- Tenga cuidado con pequeños desprendimientos en la esquina de la propiedad: normalmente se hacen más grandes con el tiempo.
- Si adquiere una casa, mire si hay grietas en las paredes y compruebe si hay muros de contención que se inclinan o están agrietados. No se fíe de puertas o ventanas que se atascan o de suelos irregulares. Debe comprobarse si hay grietas o inclinación en los cimientos. Si las grietas en las paredes de la casa o en los cimientos pueden seguirse hasta el suelo del exterior, debe preocuparse porque puede haber un deslizamiento.
- Sea precavido con pérdidas en la piscina o depósito séptico, árboles o vallas inclinadas pendiente abajo o cables de instalaciones que estén tensos o combados.
- Tenga cuidado si hay pequeños manantiales porque los deslizamientos suelen filtrar agua. Mire las zonas especialmente verdes, que no sean un campo de filtración del sistema séptico, donde hay más agua subterránea.
- Recorra la propiedad y sus alrededores, si es posible, buscando grietas lineales o curvas (incluso pequeñas) que pudieran indicar inestabilidad de la superficie del terreno.
- Busque las características de la superficie mencionadas anteriormente que utilizan los geólogos para identificar posibles deslizamientos.
- Si bien corregir el problema de un potencial deslizamiento es a menudo efectivo, puede ser caro; gran parte del arreglo está bajo tierra donde nunca verá la mejora. En términos generales es mejor no comprar terrenos con un riesgo potencial de deslizamientos.

■ La presencia de una o más de las características anteriores no demuestra que haya un deslizamiento o que vaya a ocurrir. Por ejemplo, grietas en paredes y cimientos, puertas y ventanas que se atascan o suelos irregulares pueden estar causados por terrenos expansivos. Sin embargo, está justificada una investigación adicional si están presentes las anteriores características (Keller y Blodgett, 2004).

5.3. CONCLUSIONES

El presente estudio realizado para determinar las zonas susceptibles a deslizamientos en el municipio de Valle de Bravo, Estado de México nos lleva a darnos cuenta que los principales factores que influyen con gran relevancia en el análisis de la susceptibilidad son la pendiente, ya que a mayor inclinación aumenta de forma exponencial la probabilidad de un deslizamiento, así como también es importante el factor de la geología, ya que existen rocas menos consolidadas que pueden desprenderse, en cuanto a los usos del suelo se determinó que los lugares con mayor predisposición a un deslizamiento son los suelos descubiertos o con poca vegetación y los agrícolas ya que están altamente expuestos a la erosión a diferencia de zonas de bosque llenos de cobertura vegetal y grandes extensiones de árboles, los cuales tienen una alta filtración de agua por lo cual tienen una menor susceptibilidad a deslizarse. La precipitación como factor desencadenante es muy importante ya que las zonas donde se tiene registro que existe una mayor precipitación son zonas que están expuestas a tener deslizamientos, por ello se considera de gran relevancia estudiar y analizar de forma precisas la precipitación y su comportamiento sobre el terreno.

Es de gran relevancia mencionar que se recomienda que los emplazamientos urbanos estén encaminados a desarrollarse en zonas con una baja susceptibilidad, es decir, regular los usos del suelo y restringir la construcción de casas en zonas de mayor susceptibilidad, ya que existen localidades en zonas de alta susceptibilidad a deslizarse, se entiende que por el contexto social y la percepción del riesgo de las

personas es muy difícil reubicar estas zonas pero con base a este proyecto se pueden buscar las medidas para realizar un sistema de prevención o de alerta temprana donde se puedan salvaguardar la mayor cantidad de personas, ya que no solo se afectan las personas y su integridad física que es lo más importante si no también existe una gran afectación económica cuando ocurren estos procesos.

Para el modelo se consideraron un total de cinco variables para generar el mapa de susceptibilidad (geología, pendiente, uso de suelo y vegetación, tipos de suelo y precipitación).

La metodología de la evaluación espacial multicriterio, puede ser considerada como muy conveniente y estratégica para el manejo de una inmensa cantidad de datos, informaciones y variables para la generación de los mapas. En efecto, con la evaluación espacial multicriterio se pueden considerar muchos aspectos físico-naturales y antrópicos que intervienen en la generación de procesos de remoción en masa, pero la investigación también dependió de la información disponible ya que eso puede representar una limitación, incluso tratándose del municipio de Valle de Bravo, Estado de México.

Actualmente los sistemas de información geográfica como lo es ArcMap 10.1 permiten el análisis de los deslizamientos, así como la elaboración de mapas de susceptibilidad de manera sistemática, rápida y eficiente, ello ha ampliado considerablemente la posibilidad de tratar con grandes bases de datos y realizar cálculos para la estimación de la susceptibilidad que eran inviables en grandes áreas en este sentido la posibilidad de regionalizar los análisis de susceptibilidad se ha visto enormemente facilitada con el uso de los sistemas de información geográfica.

En el mapa de susceptibilidad, resultado final, se muestra la importancia y relevancia que guardan las características geológicas de los materiales que componen las laderas. Influyen también los rasgos de inclinación, la vegetación y usos de la tierra, los tipos de suelos y la precipitación.

La posible relación causa-efecto entre tala de árboles y erosión es un tema de enorme importancia medioambiental y económica, ya que la tala en laderas débiles

e inestables puede aumentar la erosión por deslizamientos de tierra varias veces comparada con laderas en las que no se había realizado la tala de árboles. La construcción de carreteras en zonas que van a ser taladas puede ser un problema realmente serio porque las carreteras pueden interrumpir el drenaje de la superficie, alterar el movimiento del agua subterránea y cambiar negativamente la distribución de los materiales de terreno en una ladera por las operaciones de cortar, rellenar o de nivelación.

Los deslizamientos y otros tipos de rupturas del terreno son fenómenos naturales que ocurrirían con o sin la actividad humana. Sin embargo, en muchos casos la expansión de las zonas urbanas, las redes de transporte y el uso de los recursos naturales ha aumentado el número y frecuencia de los deslizamientos. En otras ubicaciones, donde se ha reconocido el potencial de deslizamientos, el número de sucesos ha disminuido por las medidas preventivas.

Las laderas excesivamente pronunciadas, aumento del agua por riego de jardines y sistemas sépticos y el peso adicional del material de relleno y las casas hacen que pendientes anteriormente estables se vuelan inestables. Como regla, cualquier proyecto que haga más pronunciada una ladera o la saturación de agua, aumente su altura o coloque una carga extra en ella puede causar un deslizamiento.

Las autoridades locales y quienes toman decisiones, respecto a la evacuación ante la inminente ocurrencia de este fenómeno, están interesadas tanto en la determinación del momento donde ocurrirá el deslizamiento, como en su probable localización, es decir el cuándo y el dónde; y es precisamente allí donde la investigación y desarrollo de modelos físicos y estadísticos para la implementación de sistemas de alerta temprana tiene una gran potencial de aplicación en nuestro país, lo que seguramente en un futuro cercano nos permitirá reducir las cuantiosas pérdidas anuales asociados a este tipo de fenómenos.

El análisis de los resultados derivados de la aplicación de esta metodología, busca permitir e identificar áreas prioritarias para el ordenamiento territorial, prevención de desastres, manejo y gestión de riesgo.

Podrían ser posibles soluciones al recurrente problema de los deslizamientos en el municipio de Valle de Bravo son las siguientes: Control estructural, Cambiar el uso de la tierra e Instalar un sistema de alerta efectivo, sin embargo, para ello se requiere la realización de diversos estudios complementarios para determinar las más adecuadas.

Lamentablemente en muchas ocasiones la percepción del peligro de deslizamientos de tierra por parte de los propietarios en zonas susceptibles a esta problemática es una reacción sin preocupación, es decir, una reacción normal ya que ellos al momento de hablar de los deslizamientos dicen: podría ocurrir en otras laderas, pero nunca en ésta. De la misma manera que los mapas de inundaciones no impiden la urbanización en zonas propensas a las inundaciones, los mapas de deslizamientos no van a impedir que mucha gente se traslade a zonas peligrosas. Los eventuales ocupantes de laderas que inicialmente no son conscientes del peligro puede que no estén influidos por la información técnica. La poca frecuencia de deslizamientos grandes reduce la conciencia del peligro, en especial cuando las pruebas de sucesos pasados no son fácilmente visibles. Por desgracia, muchas veces son los sucesos catastróficos los que llaman la atención de muchas personas sobre el problema por ello es que en todo momento las pláticas técnicas e informativa sobre la ocurrencia y afectaciones sobre esta problemática son muy oportunas.

Este estudio puede ser el punto de partida para seguir elaborando proyectos que tengan una mayor profundidad en las problemáticas y afectaciones relacionadas con los deslizamientos, como analizar la peligrosidad, resiliencia, vulnerabilidad, riesgos etc.

6. BIBLIOGRAFÍA

Agliardi, F.; Crosta, G., y Zamchi, A. (20019: Structural constraints on Deep-seated slope deformation kinematics. *Engineering Geology*, 59, 83-102.

Alcantara-Ayala, I. 2002. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology* 47. Pág. 107-124.

Aleotti, P., Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment. Summary review and new perspectives”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58(1), 21-44

Atlas de Riesgos Valle de Bravo. (2016): Deslizamientos de Tierra. 376 págs.

Angeli, M. G.; Gasparetto, G.; Menotiti, R. M.; Silvano, S., y Soldati, M. (1996). Rock Avalanche. En: Dikau, R.; Brunnsden, D.; Schrott, R., e Ibsen, M. L. (Eds.): *Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes*. Wiley. Chichester, 190-201.

Ayala-Carcedo, F. J.; Andreu Fe, M.; Ferrer, M.; de Simón, A. Fernández, I.; Olalla, C.; Gómez, J.; Sanpedro, J., y Cienfuegos. F. J. (1987b): *Manual de Taludes*. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, 456 págs.

Ayala-Carcedo, F. J. (1994): Socioeconomics impacts and vulnerability resulting from slope movements. En: Corominas, y Georgakakos. (Eds.): *Proceedings of the U.S.-Spain Workshop on Natural Hazards*. Iowa University, pp. 235-254.

Ayala-Carcedo, F. J., Corominas, J., y Lain, L. (2002): Mapas de Susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG. Aplicaciones en España, IGME.

Barillas, E. (2008): Guía metodológica para la evaluación de zonas susceptibles a deslizamientos disparados por lluvias. Ciudad de Guatemala, Guatemala.

Barrantes, G. Barrantes, O y Núñez, O. (2011): Efectividad de la metodología Mora – Vahrson modificada en el caso de los deslizamientos provocados por el terremoto de Cinchona, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central* 2(47):141-162.

Barredo, J. I (1996): Multicriteria evaluation methods for ordinal data in a GIS environment. *Geographical Systems*, pp. 313-327.

Bisci, C.; Dramis, F., y Sorriso-Valvo, M. (1996): Rock Flow (Sackugen). En Dikau, R.; Brunnsden, D.; Schorott, e Ibsen, M. L. (Eds.): *Landslide Recognition. Identification. Movement and Causes*. Wiley. Chichester, 150-160.

Bordonau, J., y Villalpa, J. M. (1986): Geomorphologie et tectonique récente dans le Val d Aran (zone axiale des Pyrénées Centrales (Espagne)). *Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique*, 27, 303-310.

Borgati, L., y Soldati, M. (2005): Fenomeni Franosi. En: Panizza, M. (Ed.) *Manuale de Geomorfologia Applicata*. FrancoAngeli. Milano, 88-123.

Bovis, M. J. (1982): Uphill-facing (antislope) scarps in the Coast Mountains, southwest Btitish Columbia. *Geological Society of America Bulletin*, 93, 804-812.

Brabb, E. E., y Harrod, B. (1989): Landslides: Extent and economic significance. Balkema, Rotterdam.

Bromhead, E. N. (1979) Factors affecting the transition between the varius types of mass movement in coastal cliffs consisting largely of consolidated clay, with special reference to Southern England. *Quaterly Journal Engineering Geology*, 12, 291-309.

- Bromhead, E. N. (1986): La estabilidad de las Pendientes. Surrey University Press. New York, 374 págs.
- Brunsdon, D. (1993): Mass movement; The Research frontier and beyond: a geomorphological approach. *Geomorphology*, 7, 85-128.
- Brunsdon, D. (1984): Mudslides. En Brunsdon, D., y Prior, B. (Eds.) *Slope Instability*. Wiley. Chinchester, 364-418.
- Brunsdon, D., e Ibsen, M. L (1996): Mudslide. En: Dikau, A. Brunsdon, D. Shortt, L., e Ibsen, M. L. (Eds.): *Landslide Recognition. Identification Movement and Causes Wiley*. Chichester, 103-119.
- Buma, J., y van Asch, T. (1996a): Slide (rotational). En: Dikau, R.; Brunsdon, D.; Schrott, L., e Ibsen, M. L. (Eds.): *Landslide Recognition, Identification, Movement and Causes*. Wiley, Chichester, 43-61.
- Buma, J., y van Asch, T. (1996b): Soil (debris) spreading. En: *Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes*. Wiley, Chichester, 137-148.
- Caine, N. (1980): The rainfall intensity duration control of shallow landslide and debris flow. *Geografiska Annaler*, 62 A, 23-27.
- Calamber, L., y Dantine, R. (1964): The avalanche of ash at Jupille (Liege) on February 3rd, 1961. *Vol. Commemorative to prof. F. Campus*. Liege. Belgium, 41-57.
- Campa, Uranga, M. F., y Coney, P. J. (1983): Tectonostratigraphic terranes and mineral resources distributions in México. *Can. J. Earth Sci.*, 20. 1040-1051.
- Campa, Uranga, M. F. y Ramírez, E., Joel. (1979): La evolución geológica y la metalogénesis del noroccidente de Guerrero; Univ. Auton. Gro., Serie Técnico Científica, No. 1, 102 p.
- Campbell, R. H. (1975): Soil Slips, Debris Flows, and Rainstorms in the Santa Monica and Vicinity, Southern California. *United States Geological Survey Professional Paper*, 851, 51 págs.
- Cancelli, A.; Pellegrini, M., y Tosatti, G. (1987): Alcuni esempi di deformazioni gravitative profonde di versante nell'Apennino settentrionale. *Memorias Società Geologica di Italia*, 39, 447-466.
- Carson, M. A., y Kirkby, M. J. (1972): Hillslope forms and process. Cambridge University Press 475 p., Londres.
- Cartaya, S., Méndez, W.; Pacheco, H. (2006): Modelo de zonificación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa a través de un sistema de información geográfica. *Interciencia*, vol. 31, no 9.
- Chacón, J., Irigaray, C., Fernandez, T., El Hamdouni, R. (2006): Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. Volume 65, Number 1. Pág. 341-411.
- Chaverri, I., F., (2016): Zonificación de la susceptibilidad a deslizamiento, por medio de la metodología Mora-Vahrson (1994), en la microcuenca del Río Macho. el instituto Tecnológico de Costa Rica.
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres) (2016): Análisis de umbrales de lluvia que detonan deslizamientos y sus posibles aplicaciones en un sistema de alerta temprana por inestabilidad de laderas.
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres) (2019): CENAPRED realiza coloquio en Puebla para recordar el 20 aniversario de deslizamiento de ladera
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres) (2014): Diagnostico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México.

Cerna, Z., (1983): Hoja Tejupilco 14Q-h (7) con resumen de la geología de la hoja Tejupilco, estados de Guerrero, México y Morelos. Carta Geológica de México serie 1:100000. Instituto de Geología. U.N.A.M.

Clark, M., y Small, J. (1982): *Slopes and Weathering*. Cambridge University Press. Cambridge, 190 págs.

Crozier, M. J. (1975): Techniques for the morphometric analysis of landslips, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 17,78-101.

Crozier, M. J. (1986a): Deslizamientos: Causas, consecuencias y medio ambiente. Croom Helm. London, 252 págs.

Crozier, M. J. (2004b): Slope Stability, En: Goudie, A. S (Ed.): *Encyclopedia of Geomorphology Routledge*. London, 969-970.

Crozier, M. J., y Glade, T. (2005): Landslide hazard and risk: issues, concepts and approach. En: Glade, T.; Anderson, M y Crozier, M. J. (Eds.): *Landslides Hazard and Risk*. Wiley. Chichester, 1-40

Cruden, D. M. (1991): A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43, 27-20.

Cruden, M. C., y Varnes, D. J. (1996): *Landslides: Investigation and Mitigation*. Special Reporte 247. National Academy Press. Washington, 36-75.

Colso, G., y de Bruin, G. (1989): *Models and Methods in multiple criteria decision making*, pergamon press.

Copons, R.; Vilaplana, J. M.; Corominas, J.; Altimir, J.; y Amigo, J. (2005): Rockfall risk management in high-density urban areas. The Andorran Experience. En: Glade, T.; Anderson, M., y Crozier, M. J. (Eds.): *Landslide Hazard and Risk*. Wiley. Chichester, 675-698.

Corominas, J.; Remondo, J.; Farias, P.; Estevao, M.; Zezere, J., Díaz de Terán, J.; Dikau, R.; Schrott, L.; Moya, J., y Gonzales, A. (1996): Debris flow. En: Dikau, R.; Brunnsden, D.; Schrott, R., e Ibsen, M. L (Eds.): *Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes*. Wiley. Chichester, 161-180.

CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y el Uso de la Biodiversidad) (1998): *Climas del Área Natural Protegida de Valle de Bravo*.

CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y el Uso de la Biodiversidad) (2010): *Información y bases de datos cartográficos*.

Costa, J. E. (1984): Physical Geomorphology of debris flow. En: Costa, J. E.; Flaischer, P. J. (Eds.): *Development and Applications of Geomorphology*. Springer. Berlin, 268-317.

Costa, J. E. (1988a): Rheologic, geomorphologic and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows and debris flows. En: Blaker, V. R.; Craig Kochel, R., Patton, P. C. (Eds.): *Flood Geomorphology*. Wiley. New York, 113-122.

Coussot, P., y Meunier, M. (1996): Recognition. Classification and mechanical description of debris flow. *Earth-Science Reviews*, 40, 209-277.

Davila, I. (2010): *Aludes de lodo y tierra en la vía Toluca-Temascaltepec*

Davis, W. M. (1899): The Geographical cycle. *Geographical Journal*, 14 481-504.

Dikau, R. (2004): Mass Movement. En: Goudie, A. S. (Ed.): *Encyclopedia of Geomorphology*. Routledge, London, 644-625.

Dikau, R.; Brunnsden, D.; Schorott, L., e Ibsen, M. L. (Eds.). *Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes*. Wiley. Chichester. 1-12.

Dikau, R.; Schrott, L., y Dehn, M. (1996b): Topple. E: Dikau, R., Brunnsden, D.; Schrott, L., e Ibsen, M. L. (Eds.): *Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes*. Wiley. Chichester, 29-41.

Domínguez L., (2011): Mapa preliminar de peligros por deslizamientos de laderas. Secretaría de Gobernación, CENAPRED, México, 6 p.

Dominguez, L., Castañeda, A., y Gonzales, A. (2016): Análisis De Umbrales De Lluvia Que Detonan Deslizamientos Y Sus Posibles Aplicaciones En Un Sistemas De Alerta Temprana Por Inestabilidad De Laderas.

Douglas, I. (1977): *Humid Landforms*. The MIT Press. Cambridge, 288 págs.

Dunne, T., y Leopold, L. V. (1978): *Water in Environmental Planning*. Freeman. San Francisco, 818 págs.

Eastman, J. R. (1993): *GIS and Decision Making. Explorations in Geographic Information Systems Technology*. Ginebra, UNITAR European Office, 112 p.

Eastman, J.R., Jin, W., Kyem, P.A.K. y Toledano, J. (1995). Raster procedures for multicriteria/multi-objective decisions. *Photogrammetric Engineering. & Remote Sensing*, Vol. 61, 539-547.

El Universal. (2010): Registran otro deslave en Valle de Bravo.

EPOCH (European Community Programme) (1993): En: Flageollet, J. C. (ed.): *Temporal Occurrence and Forecasting of Landslides in the European Community*, 3 vols.

Fritz Patrick, E A, (1980): *Suelos, su formación, clasificación y distribución*. Editorial CECSA.

Flageollet, J. C.; y Weber, D. (1996) Fall. En: Dikau, R. Brunnsden, D.; Schrott, L., e Ibsen, M. L. (EDS.): *Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes*. Wiley. Chichester, 13-28.

Gonzales, L. I. (2002): *Ingeniería Geológica*. (Ed.) Pearson educación. 744 págs.

Goodman, R.E., y Bray. J. W. (1976): *Toppling of rock slopes*. En: *Proceedings, Special Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes*. American Society of Civil Engineers. Boulder, Colorado, vol. 2, 201-234.

Gutiérrez, F. (1998): *Fenómenos de subsidencia por disolución de deformaciones evaporíticas en las fosas neógenas de Teruel y Catalunya* (Cordillera Ibérica). Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Zaragoza. Inédita.

Gutierrez, F.; Arazuzo, T., y Desir, G. (1994): Deslizamientos en el escarpe de yesos de Aljafarín (Zaragoza). *Cuaternario y geomorfología.*; 8, 54-68.

Gutiérrez, F.; Acosta, E.; Ríos, S.; Guerrero, J., y Lucha, P. (2005): Geomorphology and geochronology of sacking features (up-hill-facing scarps) in the Central Spanish Pyrenees. *Geomorphology*, 69, 298-314.

Gonzales, L.; Ferrer, M.; Ortuño, L.; y Oteo, C. (2002): *Ingeniería Geológica*. (Ed.) Pearson educación. 744 págs.

Gutiérrez, F.; Arauzo, T.; Sancho, C., y Gutiérrez, M (1995): Factores desencadenantes de los deslizamientos de la cantera del Barrio de la Corona (Ejea de los Caballeros, Depresión del Ebro). *Cuaternario y Geomorfología*, 9, 33-50.

Hansen, M. J (1984a): Estrategia para la Clasificación de Deslizamientos de Tierra. En: Brunnsden, D., y Prior, D. B. (Eds.) *Inestabilidad de Pendientes*. Wiley. Chichester, 1-25.

Hervas, D. (2001): Evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos mediante el uso conjunto de sig, teledetección y métodos de evaluación multicriterio. aplicación al barranco de Tirajana (gran canaria).

Hervás, J. y Rosin, P.L. (2001): Tratamiento digital de imágenes de teledetección en el espectro óptico para el reconocimiento y control de deslizamientos. V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Madrid. En prensa.

Higgins, C. G. (1982): Grazing-Step terracettes and their significance. *Zeitschrift fur Formophologie*, 26, 459-472.

Hook, R. leB. (1987): Mass movements in sem-arid enviroments and the morphology of alluvial fans. En: Anderson, M. G., y Richards, K. S. Slope Stability. Wiley. Chichester, 505-529.

Hutchinson, J. N. (1968): Movimientos en Masa. En: Fairbridge, R. W. (Ed): *La Enciclopedia de la Geomorfologia*. Reinhold. New York, 688-695.

INEGI (2001): Síntesis de Información geográfica del estado de México. Suelos. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI (2004): Guía para la Interpretación de Cartografía - Edafología. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI (2018). Fisiografía del Área Natural Protegida de Valle de Bravo.

Ineter, SNET & BGR. (2004): Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos de Nicaragua: el Método Mora-Vahrson.

Innes, J. L. (1983): Lichenometric dating of debris-flow deposits in the Scottish Highlands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 8, 579-588.

Isalas, J. (2010): Inventario físico de los recursos minerales de la carta Valle de Bravo. municipios Valle de bravo, Temascaltepec, Zacazonapan, Oztoloapan, Santo Tomás, Ixtapan del oro, San simón de guerrero y Donato guerra, Estado de México.

Janh, A. (1964): Slopes morphological features resulting from gravitation. *Zeitschrift fur Geomorphologie supplement Band*, 5, 59-72.

Johnson, A. M. (1970): *Physical Processes in Geology*. Freeman. San Francisco, 577 págs.

Johnson, A. M., y Rodine, J. R. (1984): Debris Flow. En: Brunsdén, D., y Prior, D. V. (Eds.): *Slope Instability*. Wiley. New York, 257-361.

Juarez, I. (2018): Deslave afecta casa y auto en Valle de Bravo. *Quadratin*. Estado de México.

Keller, E.A (1988): *Environmental Geology*. Charles and Nerril Publishing. Fifth Edition. Columbus, Usa.

Keller, E., y Blodgett, R., (2004): Riesgos Naturales. Procesos de la Tierra como desastres y catástrofes. Pearson. 422 págs.

Kiersch, G. A. (1983): The Vaiont reservoir disaster. En: Tank, R. W (Ed.): *Envairomental Geology*. Oxford University Press. Oxford, 151-162.

LAÍN, H. L. (2002); Los Sistemas de Información Geográfica en la gestión de los riesgos geológicos y el Medio Ambiente

Martinez, O. (2016): México: Al menos 39 muertos por deslizamientos de tierra tras la tormenta Ear.

McCalpin, J. P. (1999): Criteria for determining the seismic significance of sackugen and other scarplike landformes in mountains regions. Techniques for identifying Faults determining their origins. United States Nuclear Regulatory Commission. Washintong, 2.55-2.59.

McCalpin, J. P., e Irvine, (1995): Sackungen at the Aspen Highlands ski ara, Pitkin County, Colorado. Enviromental and Engineering Geosciencie, 277-290.

McGill, G. E., y Stomquist, A. W. (1979): The grabens og Canyolands National Park, Utah: geometry, mechanics and kinematics. Journal of Geophysical Research, 84, 4547, 4563.

MENDOZA, M. J. Y DOMÍNGUEZ, L., (2006); Estimación de la amenaza y el riesgo de deslizamientos en laderas y su aplicación a un caso práctico. Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Mora, S. y Vahrson, w. (1991): Determinación a priori de la amenaza de deslizamientos sobre grandes áreas, utilizando indicadores morfodinámicos. En: Memoria sobre el Primer Simposio. Bogotá, Colombia. pp. 259-273

Mora, R.; Vahrson, w. y Mora, S. (1992): Mapa de Amenaza de Deslizamientos, Valle Central, Costa Rica. CEPREDENAR.

Mora, S., y Vahrson, W., (1994): Macrozonation methodology for landslide hazard determination. Bulleting of the Association of Engineering and Geologist. 31(1): 49-58.

Mora, S., (2004a): Aplicación de la metodología MVM para determinar la susceptibilidad a deslizamientos en el Bajo Cacao, Atenas, Alajuela. Escuela Centroamericana de Geología. UCR, San José Costa Rica.

Mora, S., (2004b): Evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento del cantón de San José, provincia de San José, Costa Rica. Escuela Centroamericana de Geología UCR. San José Costa Rica.

Moral, F, (2014): Cálculo de la susceptibilidad de deslizamiento del terreno en Lorca mediante un sistema de información geográfica. Escuela técnica superior de ingenieros en topografía, geodesia y cartografía de la universidad de Madrid.

Mujica, S., y Pacheco, H (2013): Metodología para la generación de un modelo de zonificación de amenaza por procesos de remoción en masa, en la cuenca del río Camurí Grande, estado Vargas, Venezuela

Müller, L. (1964b): The rock slide in the Vaiont Valley. *Rock Mechanics and Enginnering Geology*, 2, 3-4.

Murck, B. W., Skinner, B. J., y Porter, S. C. (1996): Enviromental geology. John Wiley and Sons.

Navarro, J. (2012): Susceptibilidad y amenaza de movimientos de ladera mediante s.i.g. en el municipio de berlín, el salvador. Universidad complutense de Madrid

Neall, V. E. (1996): Hydrological disaster associated with volcanoes. En: Singh, V. P. (Ed.): *Hydeology of Disasters*. Kluwer. Dordrecht.

Neall, V. E. (2004): Lahar. En: Goudie, A. S. (Ed.): *Encyclopedia of Geomorphology*. Routledge. London, 597-599.

Nijkamp, P., y Van Delft, A. (1977): Multi-Criteria Analysis and Regional Decision-Making.

Plan de Desarrollo Municipipla Valle de Bravo. (2016): Protección Civil 260 págs.

Panizza, M. (1973): Glacio pressure implications in the production of landslide in the Dolomitic área. *Geologia Applicata e Idrogeologia*, 8 289-297.

- Parga, J. (1981): Geología del área de Tizapa municipio de Zacazonapan, México, D. F. Univ. Nal. Autón. Méx. Facultad de Ciencias, Tesis de maestría, 135 págs.
- Pasuto, A., y Soldati, M. (1996): Rock Spreading. En: Dikau, A.; Brunsden, D.; Schrott, L., elbsen, M. L. (Eds.): *Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes*. Wiley. Chichester, 122-136.
- Pedraza, J. (1996): GEOMORFOLOGÍA. Principios, Métodos y Aplicaciones. Madrid España: Ed. Rueda.
- PDMVB (Plan de Desarrollo Municipal Valle de Bravo) (2016): Protección Civil del municipio de Valle de Bravo. 212 págs.
- Pietersen, K. (2006): Multiple criteria decision análisis. A tool to support sustainable management of groundwater resources in South Africa". Water Research Commission, Private Bag X03, Gezina, 0031, South Africa.
- RadBruch-Hall, D. H. (1978): Gravitational creep of Rocks masen on slopes. En: Voight, B. (Ed): *Rockslides and Avalanches. Natural Phenomena*. Elsevier. Amsterdam, 607-657.
- Ramirez, A. (2010): Estudio de la relación lluvia y deslizamiento en la Estabilidad de taludes. Tesis (título de ingeniero civil). Concepción, Chile. Universidad del Biobío, Depto. De Ingeniería civil, 2010. 157h.
- Rantz, S. E. (1970): Urban sprawl and flooding inSouththner California. *United States Geological Survey*. Circular 601B.
- Roa, J.G. (2006): Aproximación al mapa de susceptibilidad y amenazas por deslizamientos de la ciudad de Trujillo, Venezuela. Revista AGORA. Trujillo, vol. 9, no 2.
- Roa, J. (2007): Estimación de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos e imágenes de satélites: Cuenca del río Mocoties, estado Mérida-Venezuela. Revista Geográfica Venezolana, 48(2), pp. 183-219
- Saaty, T.L. (1980). "The Analytic Hierarchy Process"; McGraw-Hill, Nueva York.
- Saaty, T. L. (1984): The analytic Hierarchy Process. MacGraw-Hill. New York, 287 pp.
- Saaty, T.L. (1994). *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process*; RWS Publications, Pittsburgh
- Salazar, L. (2007): Modelaje de la amenaza al deslizamiento mediante el sistema de información geográfico ILWIS utilizando el método Mora & Vahrson, 1991.
- Schuster, R. L. (1996): Socioeconomic significance of landslides. En Turner, y Schuster. (Eds.): *Landslides, Investigation and mitigation*. Transportation Research Board, Special Report 247.
- Segura, G. Badilla, E. Badilla, E. y Obando, L. (2011): Susceptibilidad al deslizamiento en el corredor Siquirres-Turrialba. Revista Geológica de América Central. 2(45): 101-121.
- Selby, M. (1985): *Earths Changing Surface*. Claredon. Press. Oxford, 607 págs.
- Selby, M. J. (1993): *Hillslope Material and Processes*. Oxford University Press. Oxford, 451 págs.
- Sharpe, C. F. S. (1938): *Landslides and Related Phenomena*. Columbia University Press. New York, 138 págs.
- Sidle R.C., y Ochiai H. (2006): *Landslides: processes, prediction, and land use*. Water Resources Monograph 18. American Geophysical Union, Washington D.C.
- Skinner, B. J., y Porter, S. C. (1992): *The Dynamic Earth. An introduction to physical geology*. New York. 570 págs.

SNET (Servicio Nacional de Estudios Territoriales) (2004): Memoria técnica para el mapa de susceptibilidad de deslizamientos de tierra en El Salvador. San Salvador, El Salvador. Consultado 25 ago. 2012

Soeters, R. y Van Westen, C.J. (1996): Slope instability recognition, analysis and zonation. In Turner, K. y Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides Investigation and Mitigation*; Transportation Research Board, Special Report 247, National Academy Press, Washington DC, 129-177.

Suarez, J. (1998): Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.

Suarez, J. (2009): Deslizamientos. Análisis Geotécnico. Bucaramanga Colombia.

Tabor, R. W. (1971): Origin of the ridge-top depressions by large scale creep in the Olympic Mountains, Whashington. *Geological Society of America Bulletin*, 82, 1811-1822.

Tarbuck, E., y Lutgens, F. (1999): Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física. Pearson 686 págs.

Takashi, T. (1991): debris Flow. Balkema. Rotterdam, 165 págs.

Terzagui, K. (1943): *Theoretical Soil Mechanics*. Wiley, New York, 105 págs.

Terzagui, K., y Peck, R. B. (1948): *Soil Mechanics and Engineering Practice*. Wiley. New York, 566 pags.

Varnes, D. J. (1958): Tipos de deslizamientos y procesos. En: Eckel, E. B. (Ed.): *Landslides and Engineering Practice*. Highway Research Board Special Report 29. NAS-NCR Publication 544, 20-47.

Varnes, D. J. (1978): *Slope movement: types and processes*. En: Schuster, R. L., y Krizek, R. J. (eds.): *Landslides: Analysis and Control. Transportation Research Board Special Report 176*. National Academy of Sciences. Washington, 11-33.

Varnes, D. J. (1984): *Landslide, Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice*. UNESCO. Paris.

Villacorta, S., Fidel, L., y Carrión, B. (2012): Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Perú. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 69(3), 393-399.

Vincent, P., y Clarke, V. (1980): Terracette morphology and soil properties: a note a canonical correlation study. *Earth Surface Processes*, 5, 291-295.

Wang, G., Sassa, K. (2003): Pore pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: effects of grain size and fine particle content. *Engineering Geology Vol. 69*, Pág. 109-125.

Ward, W. H. (1945) The stability of natural slopes. *Geographical Journal*, 105, 170-197.

Wells, S. G., y Harvey, A. M. (1987): Sedimentologic and geomorphic variations in storm generated alluvial fans. Howgill Fells, Northwestern England. *Bulletin Geological Society of America*, 98, 182-198.

Yatsu, E. (1966): Control de Rocas en Geomorfología. Sozosh. Japan.

Young, A. (1972): Slopes. Oliver & Bot, London. 288 pp.

Zischinsky, U. (1966): On the deformation of high slopes. *Proceedings of first congress on the International Society of Roch Mechanics*, vol. 2, 179-185.

Zaruba, Q., y Mencl, V. (1969) *Landslides and Their Control*. Elsevier. Amsterdam, 205 págs.

Zaruba, Q., y Mencl, V. (1982) *Deslizamientos de Tierra y su Control*. Elsevier. Amsterdam, 324 págs.

ANEXOS

Fotos de algunos deslizamientos en el municipio de Valle de Bravo, Estado de México.



Foto del deslizamiento ocurrido el 18/08/2013 en la localidad del Cerrillo, Valle de Bravo, Estado de Mexico (Atlas de Riesgos Valle de Bravo).



Foto del deslizamiento ocurrido el 07/10/2013 en la localidad de Avandaro, Valle de Bravo, Estado de Mexico (Atlas de Riesgos Valle de Bravo).



Foto del deslizamiento ocurrido el 26/010/2018 en la localidad de Rincon de Estradas, Valle de Bravo, Estado de Mexico (Atlas de Riesgos Valle de Bravo).



Foto del deslizamiento ocurrido el 30/08/2013 en la localidad de Rincon de Estradas, Sublocalidad 3 puentes, Valle de Bravo, Estado de Mexico (Atlas de Riesgos Valle de Bravo).



Foto del deslizamiento ocurrido el 25/09/2013 en la carretera Valle de Bravo – Saucos , Valle de Bravo, Estado de Mexico (Atlas de Riesgos Valle de Bravo).



Foto del deslizamiento ocurrido el 29/10/2013 en la localidad de Santa Maria, Sublocalidad El Colibri, Estado de Mexico (Atlas de Riesgos Valle de Bravo).



Foto del deslizamiento ocurrido el 12/09/2013 en la localidad de Rincon de Estradas, Sublocalidad La Candelaria, Valle de Bravo, Estado de Mexico (Atlas de Riesgos Valle de Bravo).