



**ESPE**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA  
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO  
AMBIENTE**

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TEMA: ESTIMACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA  
DE DESLIZAMIENTOS MEDIANTE EL MÉTODO FUZZDES, EN  
LA ZONA URBANA DE LA ADMINISTRACIÓN ZONAL NORTE  
EUGENIO ESPEJO, DEL DISTRITO METROPOLITANO DE  
QUITO**

**AUTOR: ZAFRIR VALLEJO RAQUEL MAGDIEL**

**DIRECTOR: ING. OSWALDO PADILLA  
CODIRECTOR: ING. MARIO CRUZ**

**SANGOLQUÍ  
2015**

**CERTIFICADO, DIRECTOR, CODIRECTOR**


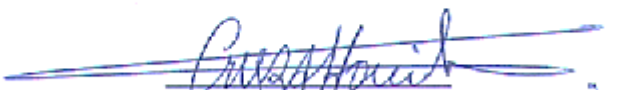
Ing. Oswaldo Padilla

Ing. Mario Cruz

Certifican:

Que el trabajo titulado “ESTIMACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS MEDIANTE EL MÉTODO FUZZDES, EN LA ZONA URBANA DE LA ADMINISTRACIÓN ZONAL NORTE EUGENIO ESPEJO, DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO”, realizado por Raquel Magdiel Zafrir Vallejo, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. El trabajo en mención consta de dos empastados y dos discos compactos el cual contienen el documento en formato portátil de Acrobat (.pdf).

Sangolquí, junio del 2015

  
Ing. Oswaldo Padilla  
Ing. Mario Cruz

## AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Raquel Magdiel Zafrir Vallejo

Declaro que:

El proyecto de grado titulado “ESTIMACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS MEDIANTE EL MÉTODO FUZZDES, EN LA ZONA URBANA DE LA ADMINISTRACIÓN ZONAL NORTE EUGENIO ESPEJO, DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que se incluyen en el documento y cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, junio de 2015



Raquel Zafrir

## AUTORIZACIÓN

Yo, Raquel Magdiel Zafrir Vallejo

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución el proyecto de grado titulado “ESTIMACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS MEDIANTE EL MÉTODO FUZZDES, EN LA ZONA URBANA DE LA ADMINISTRACIÓN ZONAL NORTE EUGENIO ESPEJO, DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, junio de 2015



---

Raquel Zafrir

## DEDICATORIA

A Dios, quien me ha guiado durante toda esta etapa universitaria, levantándome de cada tropiezo y dándome la fuerza necesaria para hoy cumplir este sueño.

A mi mami, por estar conmigo en todo momento, dando lo mejor de sí siempre para mi bienestar y apoyándome ante todas las circunstancias.

A mi papi, ya que a pesar de la distancia siempre ha estado aquí, pendiente de nosotros, y apoyándome en todo momento.

A toda mi familia por siempre estar pendiente de mí y de mis logros por compartir conmigo todas mis alegrías y darme siempre una mano amiga en cualquier momento.

A Cristian, por su todo cariño, por siempre estar presente con una voz de aliento sin importar las circunstancias.

A todos mis amigos que durante la carrera universitaria, fueron los cómplices de lo que hoy es una hermosa realidad.

## AGRADECIMIENTO

A Dios por bendecirme en cada paso que he dado y por darme la sabiduría necesaria para hoy culminar otra etapa de mi vida.

A mi mami por toda su paciencia, por confiar en mí y por animarme a ser mejor todos los días.

A mi papi, por todo lo que he aprendido a su lado, por su cariño incondicional y por todo el apoyo brindado.

A mi familia por impulsarme siempre a seguir adelante y alcanzar nuevos logros en mi vida.

A todos mis profesores de la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente, especialmente a mi director Ing. Oswaldo Padilla y a mi Codirector Ing. Mario Cruz, por brindarme todos sus conocimientos para la culminación del presente proyecto.

A Cristian, que a lo largo de este caminar, ha sabido brindarme todo su apoyo y comprensión, quien ha sabido darme el aliento necesario para salir adelante ante cualquier adversidad.

A mis amigos, por todas las experiencias vividas, por todo su apoyo y compañía en todos los momentos de mi vida.

**ÍNDICE DE CONTENIDOS**

CAPÍTULO I.....	1
1. GENERALIDADES .....	1
1.1 Introducción .....	1
1.2 Antecedentes.....	2
1.3 Definición del problema .....	3
1.4 Justificación e importancia.....	3
1.5 Ubicación geográfica del área de estudio .....	5
1.6 Objetivos.....	7
1.6.1 Objetivo General .....	7
1.6.2 Objetivos Específicos .....	7
1.7 Metas.....	7
CAPÍTULO II.....	8
2. MARCO TEÓRICO .....	8
2.1 MOVIMIENTOS EN MASA .....	8
2.1.1 Introducción.....	8
2.1.2 Partes de un deslizamiento .....	8
2.1.3 Clasificación de los deslizamientos .....	9
2.1.4 Susceptibilidad del terreno a deslizamientos .....	14
2.2 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) .....	16
2.2.1 Generalidades.....	16
2.2.2 Bases de datos geográficas .....	18
2.3 ANÁLISIS ESPACIAL .....	22
2.4 GENERACIÓN DE MODELOS CARTOGRÁFICOS EN SIG .....	22
2.5 LÓGICA DIFUSA .....	23
2.5.1 Generalidades.....	23
2.5.2 Descripción de la metodología .....	24

	vii
2.5.3 Casos de lógica Fuzzy .....	29
2.6 CRITERIOS PARA LA DEFINICIÓN DE AMENAZA POR INESTABILIDAD DE LADERA .....	31
2.6.1 Significado de los mapas de amenazas por deslizamientos .....	32
2.7 FOTOGRAFÍA AÉREA .....	32
2.7.1 Fotointerpretación .....	33
CAPÍTULO III.....	35
3. GENERALIDADES .....	35
3.1 INTRODUCCIÓN.....	35
3.2 INFORMACIÓN Y DATOS.....	35
3.2.1 Recopilación de la información.....	35
3.2.2 Generación de datos .....	36
3.2.3 Análisis de proximidad .....	38
3.2.4 Análisis de datos .....	40
3.3 ANÁLISIS DE METODOLOGÍA DE FUZZY.....	41
3.3.1 Análisis de variables y relaciones.....	41
3.3.2 Comportamiento de las variables que intervienen .....	51
3.4 ANÁLISIS DE MÉTODOS ESTADÍSTICOS.....	53
3.5 MODELOS DE PROBABILIDAD.....	54
3.5.1 Obtención de los modelos cartográficos.....	55
3.5.2 Desarrollo del proceso SIG .....	59
3.5.3 Ajuste de los modelos .....	70
CAPÍTULO IV .....	72
4. RESULTADOS .....	72
4.1 Análisis de los modelos obtenidos. ....	72
4.2 Descripción de los modelos obtenidos.....	72



4.2.1	Modelo 1: Valores de variables originales dados por el programa. ....	73
4.2.2	Modelo 2: Percentil Fuzzy al 95% y 5%.....	76
4.2.3	Modelo 3: Percentil Fuzzy al 90% y 10%.....	79
4.2.4	Modelo 4: Regresión lineal .....	81
4.2.5	Modelo 5: Regresión Logística .....	85
4.2.6	Modelo 6: FuzzDes Modificado .....	87
4.3	Elección del modelo que más se ajuste a la realidad. ....	90
CAPÍTULO V .....		93
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	93
5.1.	Conclusiones.....	93
5.2	Recomendaciones.....	94
BIBLIOGRAFÍA.....		95

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1 .....	36
Tabla 2 .....	39
Tabla 3. ....	47
Tabla 4. ....	48
Tabla 5. ....	49
Tabla 6. ....	52
Tabla 7. ....	54
Tabla 8. ....	65
Tabla 9. ....	67
Tabla 10. ....	69
Tabla 11. ....	69
Tabla 12. ....	71
Tabla 13. ....	75
Tabla 14. ....	77
Tabla 15. ....	81
Tabla 16. ....	84
Tabla 17. ....	85
Tabla 18. ....	90
Tabla 19. ....	92

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Zona de Estudio.....	6
Figura 2. Partes de un deslizamiento de tierra.....	10
Figura 3. Caída de rocas .....	10
Figura 4. Vuelco de rocas .....	11
Figura 5. Deslizamiento Traslacional .....	12
Figura 6. Deslizamiento Rotacional .....	12
Figura 7. Propagación Lateral.....	13
Figura 8. Tipos de deslizamientos en la naturaleza .....	15
Figura 9. Modelo de datos espaciales.....	20
Figura 10. Función Seno Cuadrado .....	24
Figura 11. Puntos importantes del modelo.....	25
Figura 12. Curva simétrica.....	26
Figura 13. Función de pertenencia Caso 1 .....	30
Figura 14. Función de pertenencia Caso 2. ....	30
Figura 15. Función de pertenencia caso 3. ....	31
Figura 16. Fotografía Zona de Estudio.....	37
Figura 17. Fotointerpretación digital.....	37
Figura 18. Mapa de deslizamientos Fotointerpretados.....	41
Figura 19. Variable Pendiente .....	42
Figura 20. Variable precipitación.....	43
Figura 21. Variable distancia a vías principales .....	44
Figura 22. Variable distancia a ríos.....	45
Figura 23. Variable de distancia a fallas .....	46
Figura 24. Variable Cobertura Vegetal.....	48
Figura 25. Variable Dureza de la Roca .....	50
Figura 26. Modelo cartográfico general.....	56
Figura 27. Modelo cartográfico de Lógica Difusa .....	57
Figura 28. Modelo cartográfico de métodos estadísticos .....	58
Figura 29. Modelo de ocurrencia a deslizamientos 1 .....	74
Figura 30. Modelo de ocurrencia a deslizamientos 2 .....	78
Figura 31. Modelo de ocurrencia a deslizamientos 3 .....	80
Figura 32. Modelo de ocurrencia a deslizamientos 4 .....	83

	xi
Figura 33. Modelo de ocurrencia a deslizamientos 5 .....	86
Figura 34. Modelo de ocurrencia a deslizamientos 6 .....	88

**ÍNDICE DE ECUACIONES**

Ecuación 1.....	25
Ecuación 2.....	25
Ecuación 3.....	27
Ecuación 4.....	27
Ecuación 5.....	27
Ecuación 6.....	28
Ecuación 7.....	28
Ecuación 8.....	29
Ecuación 9.....	29
Ecuación 10.....	30
Ecuación 11.....	31
Ecuación 12.....	59
Ecuación 13.....	60
Ecuación 14.....	60
Ecuación 15.....	60
Ecuación 16.....	60
Ecuación 17.....	61
Ecuación 18.....	61
Ecuación 19.....	61
Ecuación 20.....	62
Ecuación 21.....	62
Ecuación 22.....	63
Ecuación 23.....	63
Ecuación 24.....	63
Ecuación 25.....	65
Ecuación 26.....	66
Ecuación 27.....	70
Ecuación 28.....	70

## RESUMEN

Debido a los diferentes eventos naturales que ocurren en el Distrito Metropolitano de Quito, especialmente en temporadas lluviosas; se han tratado de determinar mediante diferentes métodos, la probabilidad de ocurrencia a los mismos con el fin de adoptar medidas de prevención y mitigación que permitan a futuro la prevención de pérdidas tanto humanas como económicas. Por la creciente densidad poblacional presente en la ciudad, es notorio que existen zonas vulnerables frente a amenazas naturales, ya que incluso en zonas aledañas a las quebradas se encuentran asentamientos los cuales aumentan el riesgo de la población a sufrir pérdidas irreparables. La recurrencia de movimientos en masa en el área de estudio y la escasa información vigente, precisan realizar un estudio que con sus resultados ayude a los organismos competentes a la toma de decisiones. Mediante aplicación de Sistemas de Información Geográfica los cuales permiten modelar diferentes fenómenos, basados en algoritmos matemáticos y entre ellos la lógica difusa, para el presente estudio se busca estimar la probabilidad de ocurrencia a deslizamientos en la Administración Zonal Norte Eugenio Espejo. El algoritmo utilizado mostro su veracidad al contrastarlo con un inventario de deslizamientos obtenidos a partir de fotointerpretación y verificación en campo. En el presente estudio se muestra como al combinar técnicas de modelamiento (Lógica Fuzzy) y evaluación multicriterio se pueden obtener valores más ajustados y más reales que representan el fenómeno.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **LÓGICA FUZZY**
- **DESLIZAMIENTOS**
- **SIG**
- **MODELAMIENTO**
- **PROBABILIDAD**

## ABSTRACT

Due to different natural events in the Metropolitan District of Quito, especially in rainy seasons; it has been treated to use different methods to determine the probability of occurrence to them in order to adopt measures to prevent and mitigate future economic and human losses. By increasing population density present in the city, it is clear there are areas vulnerable to natural hazards, even areas near streams settlements which increase the risk of the population to suffer irreparable losses. The recurrence of landslides in the study area and low current information, require a study that with its result will help to the competent Organism to make decisions. Through application of Geographic Information Systems which allow to model different phenomena, based on mathematical algorithms including fuzzy logic. The study aims to estimate the probability of occurrence of landslides in the Northern Zonal Administration Eugenio Espejo This algorithm showed its effectiveness when contrasted with an inventory of lanslides from photo interpretation and field verification techniques. This study shows how combining modeling techniques (Fuzzy Logic) and multi-criteria evaluation, it can get tighter and more real values representing the phenomenon.

### KEY WORDS:

- **FUZZY LOGIC**
- **LANDSLIDES**
- **GIS**
- **MODELING**
- **PROBABILITY**

## CAPÍTULO I

### 1. GENERALIDADES

#### 1.1 Introducción

Los deslizamientos de laderas suponen un considerable riesgo, tanto para las personas como para el medio ambiente. Además, los daños ocasionados afectan desde el punto de vista económico y social a una región por la destrucción de infraestructuras, carreteras, comunicaciones y falta de servicios esenciales (García, 2008).

El Ecuador al ser un país andino, vive bajo amenaza de riesgos naturales graves, como son los sísmicos, volcánicos y morfo dinámicos (Pierre, 1989).

A lo largo de su historia, los desastres han sido frecuentes en el Distrito Metropolitano de Quito, lo que ha ocasionado muertes y cuantiosas pérdidas económicas, especialmente durante las últimas décadas. Los fenómenos más comunes que se desarrollan en los territorios del Distrito Metropolitano de Quito, son los deslizamientos y desprendimientos que se generan en las márgenes de las quebradas, taludes de vías y en pendientes mayores 30°, así como flujo de lodo y escombros. Es así que, en el invierno de 2010, se multiplicaron inundaciones y movimientos en masa en varias zonas del Distrito. En el sector la Forestal, al sur de la ciudad un gran deslizamiento interrumpió la circulación vehicular en la Av. Simón Bolívar, lo que ocasionó 6 muertes y la necesaria evacuación y relocalización de un centenar de familias (Secretaría de Seguridad, 2015).

Así mismo (Pierre, 1989) menciona que la ciudad de Quito frecuentemente ha sufrido accidentes de origen tanto climático como geomorfológico relacionados con los escurrimientos de superficie perturbados por la urbanización: inundaciones, avenidas de lodo, derrumbes y hundimientos.

Es por ello y debido a las constantes catástrofes que ocurren en el Distrito, especialmente en temporadas lluviosas; que se han elaborado distintos proyectos enfocados a la probabilidad de ocurrencia a deslizamientos con el



fin de adoptar medidas de prevención y mitigación que permitan a futuro la prevención de pérdidas tanto humanas como económicas.

## **1.2 Antecedentes**

El Distrito Metropolitano de Quito localizado en un entorno biodiverso, de múltiples contrastes en lo geográfico, ecológico y paisajístico; con una morfología irregular y con alturas que varían de 440 a 4840 metros sobre el nivel del mar (msnm) que influye directamente en el clima que posee (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2010).

La ciudad de Quito en los últimos treinta años, casi ha cuadruplicado su población, lo que ha determinado la utilización irracional del terreno, incluidas zonas consideradas como de protección natural y de alta peligrosidad ante diversas catástrofes naturales, causando el consiguiente riesgo a la población y a su infraestructura civil (Orellana & Zea-La-Rochelle, 2008).

Es así que debido a la creciente densidad poblacional presente en la ciudad, se cuenta con zonas vulnerables frente a estas amenazas naturales, ya que inclusive en zonas de terrenos con pendientes fuertes y zonas aledañas a las quebradas se encuentran asentamientos los cuales aumentan el riesgo de la población a sufrir pérdidas irreparables.

En Quito, los terrenos inestables se generan en lugares conformados por sedimentos eólicos de origen volcánico, con pendientes mayores al 25%, deforestados, e inadecuadamente ocupados (apertura de vías y urbanizaciones). En periodos lluviosos se produce una erosión intensa del terreno evidenciada por la presencia de cárcavas, deslizamientos y flujos de lodo, entre otros fenómenos geodinámicos. Otras áreas críticas de la ciudad constituyen los flancos abruptos de quebradas, en cuyos bordes se han construido irresponsablemente viviendas, a pesar de que existen ordenanzas municipales que lo prohíben (Orellana & Zea-La-Rochelle, 2008).

Existen diferentes métodos para estimar deslizamientos en la tierra, en los últimos años el modelamiento de variables espaciales se ha utilizado para varias aplicaciones, entre ellas, para el cálculo de probabilidad de ocurrencia

a deslizamientos se tienen los siguientes proyectos relacionados y/o complementarios:

- Padilla Oswaldo, “Fundamento teórico para modelación de variables ambientales mediante lógica Fuzzy”. Revista Geoespacial Número 4, ESPE, 2007.
- Andocilla Lorena, “Implementación del algoritmo de lógica Fuzzy aplicado a la determinación del grado de susceptibilidad de deslizamientos en el área Monjas – Ferroviaria – LA Magdalena - Itchimbia del Distrito Metropolitano de Quito” Tesis de Grado ESPE, Quito,2012.
- Jaramillo Carolina, “Determinación de la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos aplicando lógica Fuzzy vs Mora Vahrson, en el área de Monjas-Itchimbia-Panecillo, del Distrito Metropolitano de Quito, (DMQ) y simulación en 3D”, Tesis de Grado ESPE, Quito, 2014.

### **1.3 Definición del problema**

Distintos fenómenos naturales ocurren con frecuencia durante todo el año en el país; sin embargo en época invernal se deja al descubierto la vulnerabilidad de los sectores ubicados en las laderas, ya sean del Pichincha o de las elevaciones que rodean a Quito, ya que se presentan frecuentes deslizamientos y deslaves que ocasionan daños en las viviendas, así como también obstrucciones en las vías de acceso principales y de alto flujo vehicular; en general las pérdidas irreparables que se presentan frente a este tipo de catástrofes pueden ser humanas, materiales o financieras.

La recurrencia de dichos movimientos en masa en el área de estudio y la escasa información vigente, precisan realizar un estudio que con sus resultados ayude a los organismos competentes a la toma de decisiones.

### **1.4 Justificación e importancia**

En América Latina, el número de víctimas y los daños materiales por evento ocurrido han sido siempre muy altos, ya que muchos asentamientos humanos se encuentran al pie de escarpes montañosos o bien en zonas próximas. Sin embargo, las estimaciones de daños son escasas, sobre todo

en eventos poco recientes, y las que hay difieren mucho unas de otras. Los datos que se presentan corresponden a eventos puntuales de deslizamiento, casi siempre relacionados con otro tipo de proceso. Teniendo en cuenta que estos ejemplos representan sólo una pequeña parte del total, cabe esperar que los daños debidos a deslizamientos sean muy grandes y si se les compara con los producidos por otro tipo de proceso, probablemente sean los movimientos en masa uno de los procesos naturales que mayores daños produce en esta región del mundo (Bonachea, 2006).

En el Ecuador, en la provincia de Pichincha, el riesgo potencial comprende todas las quebradas desde la Rumipamba hasta Atucucho. Son problemas de represamientos y deslizamientos, básicamente generados por la tala del bosque y la construcción anti técnica de vías de penetración y de urbanizaciones particulares sin autorización municipal (Diario Hoy, 2012).

En Ecuador las cifras en cuanto a muertes por evento catastrófico natural son concluyentes, los deslizamientos es el desastre natural que más vidas humanas ha cobrado, durante el siglo pasado se registraron más de 23000 muertes por encima de los demás desastres, en los últimos 12 años la tendencia sigue de igual manera, ya que se registran 235 muertes que representan el 73% de muertes por desastres naturales (Toulkeridis, 2013).

Un estudio de la Secretaría de Seguridad, realizado en el 2011 determinó que a lo largo de la Av. Simón Bolívar hay seis zonas propensas a deslaves en la época invernal. Allí se ha detectado filtraciones de agua en los taludes (El Comercio, 2012).

Por estas razones, en el sector de las quebradas y laderas se recomienda acciones de prevención, para lo cual se deberá contar con estudios geológicos y geotécnicos de la zona que identifiquen los sitios de posibles deslizamientos con el fin de estabilizar los suelos (EPMAPS, 2015).

En los proyectos mencionados anteriormente se definió una metodología basada en la lógica Fuzzy cuyo método ha sido denominado FuzzDes, por ello debido a todo lo mencionado anteriormente se propone realizar un modelo a través del método FuzzDes que permita estimar la probabilidad de

ocurrencia de deslizamientos en el área de estudio, a fin de identificar las áreas susceptibles a este tipo de inestabilidades para con ello proporcionar información verídica a los organismos competentes y así contribuir a prevención e implementación de acciones que ayuden a disminuir los efectos de este fenómeno, para de esta manera salvaguardar la vida de los habitantes del sector.

En esta propuesta de proyecto, se ha seleccionado la zona urbana de la Administración Zonal Eugenio Espejo, del Distrito Metropolitano de Quito, como complemento a la ciudad Quito y a los proyectos realizados anteriormente en cuanto a predicción de deslizamientos mediante lógica difusa en el Centro-Sur de Quito por (Andocilla, 2012) y (Jaramillo, 2014).

### **1.5 Ubicación geográfica del área de estudio**

El proyecto se desarrollara en la zona urbana de la Administración Zonal Norte Eugenio Espejo, del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), que comprende las parroquias: San Isidro del Inca, Kennedy, Concepción, Cochapamba, Jipijapa Rumipamba, Iñaquito, Mariscal Sucre y Belisario Quevedo La zona de estudio cuenta con una superficie de 89.4 km<sup>2</sup>. A continuación la Figura 1 con la zona de estudio.

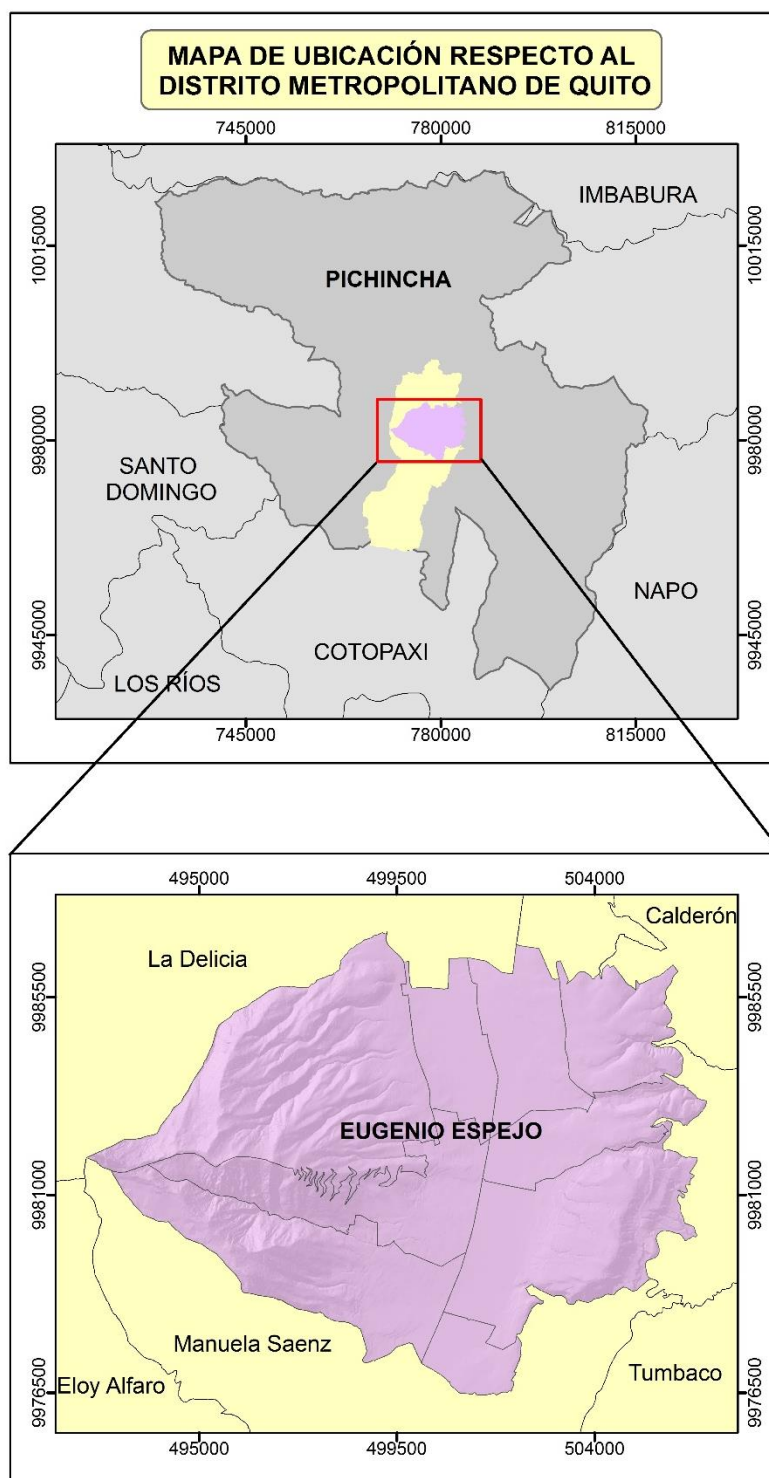


Figura 1. Zona de Estudio

## **1.6 Objetivos**

### **1.6.1 Objetivo General**

Calcular la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos mediante el método FuzzDes, en la zona urbana de la Administración Zonal Norte Eugenio Espejo, del Distrito Metropolitano de Quito.

### **1.6.2 Objetivos Específicos**

- Recopilar información necesaria existente.
- Estructurar y homogeneizar la información cartográfica obtenida.
- Identificar áreas de deslizamientos mediante técnicas de interpretación en 3D (fotointerpretación), toma de datos en campo y verificación.
- Identificar y analizar las variables que intervienen en el área de estudio.
- Modelar la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en el área de estudio en función de las variables del modelo FuzzDes.
- Validar el modelo de la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en el área de estudio.

## **1.7 Metas**

- Una geodatabase debidamente estructurada.
- Un mapa de deslizamientos a escala 1:10.000.
- Un mapa por cada variable a modelar para lógica Fuzzy a escala 1:10.000.
- Un modelo de probabilidad de ocurrencia de deslizamientos para el área de estudio.
- Un reporte de validación del modelo de probabilidad de ocurrencia de deslizamientos para el área de estudio.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 MOVIMIENTOS EN MASA

El término movimientos en masa se refiere al transporte pendiente abajo de masas de suelo o roca por procesos esencialmente gravitatorios, conocidos también como procesos aluviales debido a que se presentan en diferentes condiciones, afectando suelos y rocas de distinto tipo, en taludes naturales y artificiales, con rangos de velocidad que oscilan entre centímetros por año y cientos de kilómetros por hora (Iriondo, 2006).

##### 2.1.1 Introducción

Algunos movimientos en masa, como la reptación de suelos, son lentos, a veces imperceptibles y difusos, en tanto que otros, como algunos deslizamientos pueden desarrollar velocidades altas y pueden definirse con límites claros, determinados por superficies de rotura (Crozier & Glade, 2005).

El factor desencadenante de los movimientos en masa es el colapso de volúmenes de suelo o roca cuando las tensiones que soportan sobrepasan la resistencia de los materiales. El agente de transporte en este tipo de movimientos es la gravedad, sin intervención importante del agua, viento o hielo. De ello se deduce que los movimientos en masa se producen fundamentalmente en taludes y superficies con pendientes pronunciadas (Iriondo, 2006).

##### 2.1.2 Partes de un deslizamiento

- Corona: sector de la ladera que no ha fallado y localizada arriba del deslizamiento. Puede presentar grietas, llamadas grietas de la corona.
- Escarpe principal: superficie de pendiente muy fuerte, localizada en el límite del deslizamiento y originada por el material desplazado de la ladera. Si este escarpe se proyecta bajo el material desplazado, se obtiene la superficie de ruptura.

- Escarpe menor: superficie de pendiente muy fuerte en el material desplazado y producida por el movimiento diferencial dentro de este material.
- Punta de la superficie de ruptura: la intersección (algunas veces cubierta) de la parte baja de la superficie de ruptura y la superficie original del terreno.
- Cabeza: la parte superior del material desplazado a lo largo de su contacto con el escarpe principal.
- Tope: el punto más alto de contacto entre el material desplazado y el escarpe principal.
- Cuerpo principal: la parte del material desplazado que sobre yace la superficie de ruptura localizada entre el escarpe principal y la punta de la superficie de ruptura.
- Flanco: lado del deslizamiento
- Pie: la porción de material desplazado que descansa ladera abajo desde la punta de la superficie de ruptura
- Dedo: el margen del material desplazado más distante del escarpe principal.
- Punta: el punto en el pie más distante del tope del deslizamiento.

(Cruden & Varnes, 1996)

Se presenta la *Figura 2* con las partes de un deslizamiento de tierra.

### **2.1.3 Clasificación de los deslizamientos**

La clasificación de los deslizamientos de tierra sigue actualmente el esquema basado en (Varnes D. , 1978) y (Cruden & Varnes, 1996).

Los principales criterios de clasificación son:

- Tipo de movimiento: caídas, vuelcos, deslizamientos, propagaciones y flujos.
- Tipo de material involucrado en el movimiento: roca, escombros y suelos.



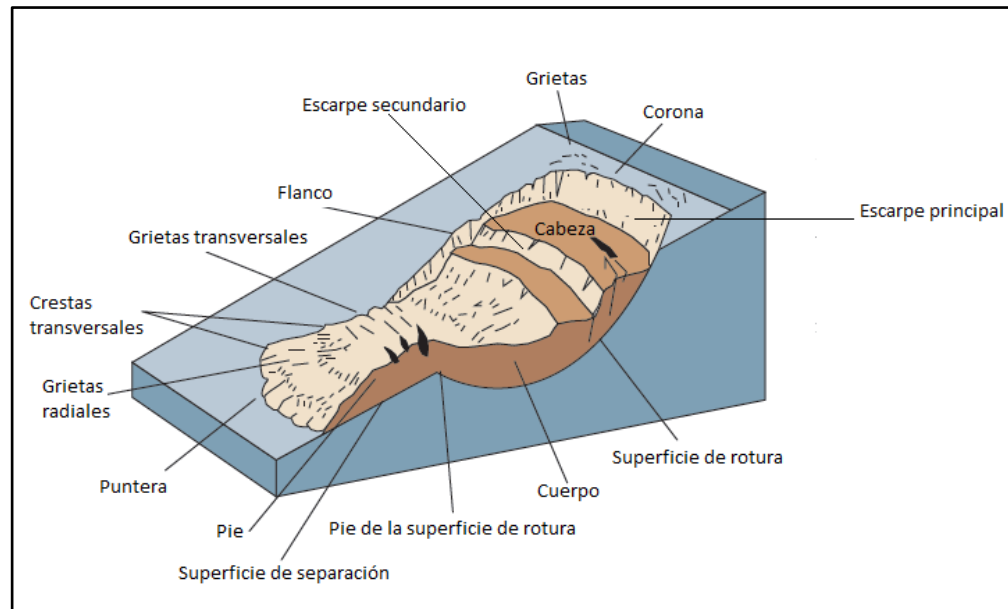


Figura 2. Partes de un deslizamiento de tierra.

Fuente: (USGS, 2004)

### 2.1.3.1 TIPO DE MOVIMIENTO

**Caídas:** Es un tipo de movimiento en masa en el cual uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera (ver *Figura 3*), sin que a lo largo de esta superficie ocurra desplazamiento cortante apreciable. Una vez desprendido, el material cae desplazándose principalmente por el aire pudiendo efectuar golpes, rebotes y rodamiento (Varnes D. , 1978). Dependiendo del material desprendido se habla de una caída de roca, o una caída de suelo. El movimiento es muy rápido a extremadamente rápido (Cruden & Varnes, 1996) es decir con velocidades mayores a  $5 \times 10^1$  mm/s.



Figura 3. Caída de rocas

Fuente: (GEMMA, 2007)

**Volcamientos:** Se denomina así a un tipo de movimiento en masa en el cual hay una rotación generalmente hacia adelante de uno o varios bloques de roca o suelo, (*ver Figura 4*) alrededor de un punto o pivote de giro en su parte inferior. Este movimiento ocurre por acción de la gravedad, por empujes de las unidades adyacentes o por la presión de fluidos en grietas (Varnes, 1978). El volcamiento puede ser en bloque, flexional (o flexural) y flexional del macizo rocoso.

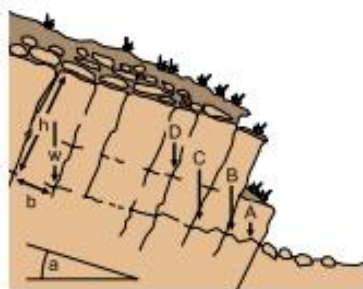


Figura 4. Vuelco de rocas  
Fuente: (GEMMA, 2007)

**Deslizamientos:** Es un movimiento ladera abajo de una masa de suelo o roca cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de falla, o de una delgada zona en donde ocurre una gran deformación cortante. En el sistema de (Varnes D. , 1978) se clasifican los deslizamientos, según la forma de la superficie de falla por la cual se desplaza el material, en traslacionales y rotacionales.

*Deslizamiento traslacional:* Es un tipo de deslizamiento en el cual la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla plana u ondulada (*ver Figura 5*). En general, estos movimientos suelen ser más superficiales que los rotacionales y el desplazamiento ocurre con frecuencia a lo largo de discontinuidades como fallas, diaclasas, planos de estratificación o planos de contacto entre la roca y el suelo residual o transportado que yace sobre ella (Cruden & Varnes, 1996).



Figura 5. Deslizamiento Traslacional  
Fuente: (GEMMA, 2007)

*Deslizamiento Rotacional:* Es un tipo de deslizamiento en el cual la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla curva y cóncava. Los movimientos en masa rotacionales muestran una morfología distintiva caracterizada por un escarpe principal pronunciado y una contrapendiente de la superficie de la cabeza del deslizamiento hacia el escarpe principal. La deformación interna de la masa desplazada es usualmente muy poca. Debido a que el mecanismo rotacional es auto-estabilizante, y éste ocurre en rocas poco competentes, la tasa de movimiento es con frecuencia baja, excepto en presencia de materiales altamente frágiles como las arcillas sensitivas (ver *Figura 6*). (GEMMA, 2007)

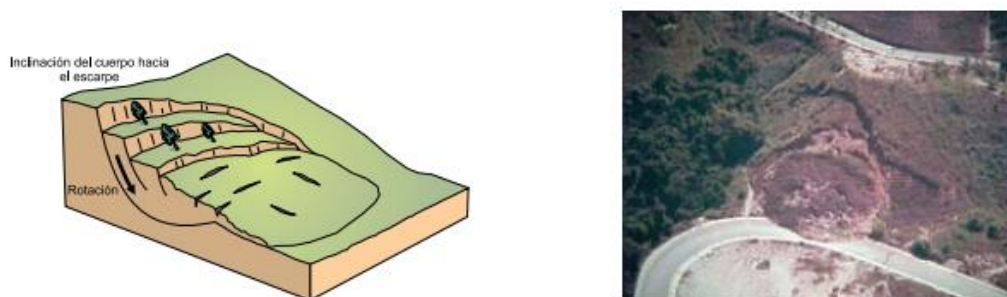


Figura 6. Deslizamiento Rotacional  
Fuente: (GEMMA, 2007)

**Propagación Lateral:** es un tipo de movimiento en masa cuyo desplazamiento ocurre predominantemente por deformación interna (expansión) del material. La mayoría de los deslizamientos y los flujos involucran algún grado de expansión. Las propagaciones laterales pueden considerarse como la etapa final en una serie de movimientos donde la deformación interna predomina decididamente sobre otros mecanismos de

desplazamiento como los que imperan en el deslizamiento o el flujo (ver Figura 7).

(Varnes D. , 1978) distingue dos tipos de propagación, uno en que el movimiento afecta a todo el material sin distinguirse la zona basal de cizalla, típico de masas rocosas, y otro que ocurre en suelos cohesivos que sobre yacen a materiales que han sufrido licuefacción o a materiales en flujo plástico.

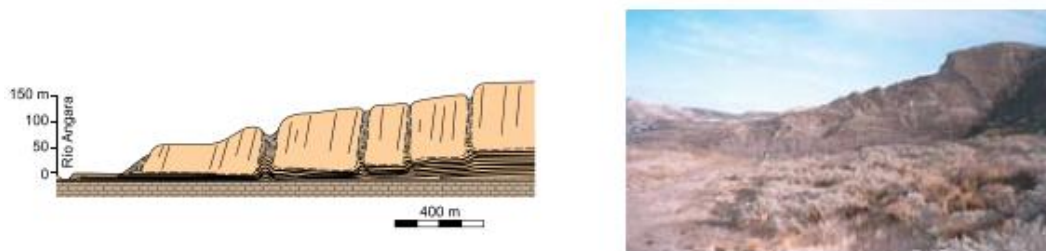


Figura 7. Propagación Lateral

Fuente: (GEMMA, 2007)

**Flujos:** Es un tipo de movimiento en masa que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante al de un fluido; puede ser rápido o lento, saturado o seco. En muchos casos se originan a partir de otro tipo de movimiento, ya sea un deslizamiento o una caída. Se agrupan a diferentes movimientos de ladera que tienen en común la deformación interna y continua del material y la ausencia de una superficie neta de desplazamiento (Varnes D. , 1978). En algunos casos la superficie de rotura se puede asimilar a toda una franja de deformación. Las diferencias estriban en el material implicado, su contenido en agua y la velocidad de desarrollo, de lenta (reptación) a súbita (flujos de rocas). Los más comunes son los movimientos en suelo (flujos o coladas de tierra o barro), movimientos de derrubios (flujos de derrubios) o bloques rocosos (flujos de bloques). (Jiménez, 2005)

### 2.1.3.2 TIPO DE MATERIAL

**Roca:** El desprendimiento de rocas se refiere a rocas o piedras que caen libremente de la pared de un corte vertical en el terreno. Se producen por

debilitamiento o meteorización del suelo, o la degradación del suelo permanentemente helado. (IFRC, 2008)

**Escombros:** Los desprendimientos de escombros y corrientes de lodo son ríos de roca, tierra y otros materiales saturados de agua. Se crean cuando el agua se acumula rápidamente en la tierra, durante las fuertes lluvias o cuando la nieve se derrite a gran velocidad, convirtiendo el terreno en un río caudaloso de lodo o “barro aguado”. Pueden avanzar rápidamente por declives, con poca o ninguna advertencia, a velocidades de avalancha. También pueden viajar varias millas desde su origen y aumentan de tamaño a medida que recogen árboles, piedras, automóviles y otros materiales. (FEMA, 2014)

**Tierra:** Un deslizamiento de tierras es el desplazamiento de suelo o rocas controlado por la gravedad. La velocidad de desplazamiento puede ser lenta o rápida, pero nunca muy lenta. Los deslizamientos de tierras pueden ser superficiales o profundos. El material está constituido por una masa correspondiente a una porción de la ladera o a la propia ladera. El desplazamiento se produce cuesta abajo y hacia fuera, y hacia un plano despejado. (IFRC, 2008)

En la Figura 8 se presenta un cuadro resumen con los tipos de deslizamientos que se pueden desarrollar según el tipo de movimiento y tipo de material en la naturaleza.

#### **2.1.4 Susceptibilidad del terreno a deslizamientos**

La susceptibilidad del suelo a los movimientos de ladera (S), se define como la favorabilidad del ambiente físico y de los elementos inherentes de las masas de terreno y superficie como la geología, pendiente, geomorfología, usos del suelo, etc., a la ocurrencia de deslizamientos. Indica la predisposición del terreno a deslizarse pero no implica el aspecto temporal del mismo. En este trabajo, se utilizarán los factores de susceptibilidad en función de la disponibilidad de datos en nuestra escala de trabajo. (Navarro, 2012).



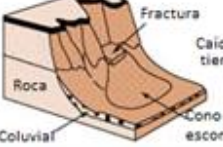

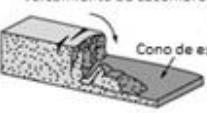


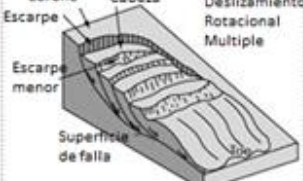
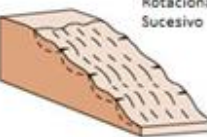



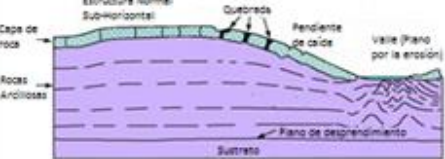

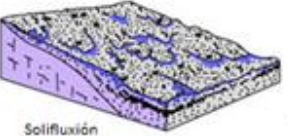
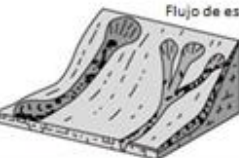

Tipo de Material		ROCA	ESCOMBROS	TIERRA
Tipo de Movimiento				
CAÍDA		 Fractura Caída de roca	 Fractura Caída de escombros Pedregal Cono de escombros	 Fractura Caída de tierra Coluvial Cono de escombros
	VOLCAMIENTO	 Volcamiento de roca	 Volcamiento de escombros Cono de escombros	 Grietas Volcamiento de tierra Cono de escombros
DESIZAMIENTO	ROTACIONAL	 Deslizamiento Rotacional Superficie de falla	 Corona Cabeza Escarpe Escarpe menor Superficie de falla Deslizamiento Rotacional Múltiple	 Deslizamiento Rotacional Sucesivo
	TRASLACIONAL	 Deslizamiento de rocas	 Deslizamiento de escombros	 Deslizamiento de tierra
PROPAGACIÓN	 Estructura Normal Subhorizontal Capa de roca Rocas Arcillosas Sustrato Grietas Pendiente de caída Vale (Plano por la erosión) Plano de deslizamiento	 Propagación de tierra		
FLUJO	 Solifluxión	 Flujo de escombros	 Flujo de Lodo	

Figura 8. Tipos de deslizamientos en la naturaleza

Fuente: (Varnes, 1978)

En el estudio de la susceptibilidad de los deslizamientos se consideran tres aspectos importantes:

- Inventario de los deslizamientos
- Morfología de la zona de estudio
- Análisis de los factores de ocurrencia

La metodología usada para el estudio de la susceptibilidad del terreno a deslizamientos es un proceso de análisis de los factores o variables que los

condicionan, y que logran interrelacionarse en función a la realidad del terreno. (Lana, y otros, 2004)

## **2.2 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)**

El Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS por sus siglas en inglés), es una herramienta informática, la tecnología de procesamiento de información asistido por computadora para la entrada, manipulación y despliegue de datos espaciales o que tienen que ver con un espacio físico determinado. Es un conjunto de operadores que manipulan una base de datos espaciales y constituye un puente de soporte entre el "mundo real" y el usuario.

Teniendo como referencia el procesamiento de datos relacionado con un espacio geográfico, el SIG es un modelo compuesto de un conjunto de objetos (estructura de datos espaciales) y de un conjunto de operadores que efectúan procesos y/o consultas sobre el espacio. Este conjunto de objetos o bloques constituyen procedimientos cuya función en forma de algoritmos abstractos, permite actualizar y procesar elementos de una estructura de datos espaciales y/o base de datos espacial. (SINPAD, 2014)

### **2.2.1 Generalidades**

Los SIG, aunque den la impresión de ser aplicaciones meramente prácticas, basadas en un programa concreto, trabajan con una metodología propia y poseen un núcleo teórico importante en el que se combinan conceptos de diferentes disciplinas.

Así pues, un SIG es un software específico que permite a los usuarios crear consultas interactivas, integrar, analizar y representar de una forma eficiente cualquier tipo de información geográfica referenciada asociada a un territorio, conectando mapas con bases de datos.

El uso de este tipo de sistemas facilita la visualización de los datos obtenidos en un mapa con el fin de reflejar y relacionar fenómenos geográficos de cualquier tipo, desde mapas de carreteras hasta sistemas de identificación de parcelas agrícolas o de densidad de población. Además, permiten realizar

las consultas y representar los resultados en entornos web y dispositivos móviles de un modo ágil e intuitivo, con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión, conformándose como un valioso apoyo en la toma de decisiones. (CEA, 2014)

### ***SIG EN LA GESTIÓN DE RIESGO***

La Geografía es la ciencia que estudia los modos de organización del espacio, la distribución de las formas y de las poblaciones sobre la Tierra. Por otro lado, el Análisis Geográfico busca comprender los modos de organización en el espacio constituido por la superficie terrestre y su biósfera, empleando un conjunto de técnicas que buscan explicar las relaciones de los seres humanos con el medio y entre sí. Dentro de este concepto, el SIG, se constituye en una herramienta para realizar Análisis Geográfico.

El SIG ofrece la capacidad de almacenar, acceder, analizar, manipular, desplegar e integrar información ambiental, económica y social en un solo sistema, facilitando las siguientes operaciones:

- Superposición de datos para fines comparativos
- Actualización de información para ilustrar cambios en el tiempo
- Cambios de escala para microanálisis
- Derivación de datos no disponibles mediante manipulación de factores conocidos
- Integración de paquetes de datos de ciencias sociales y físicas
- Incorporación de datos adquiridos mediante sensores remotos tales como imágenes de satélite con fines de monitoreo ambiental continuo; y
- Modelado de procesos sociales y físicos con propósitos de simulación y predicción.

La Gestión del Riesgo es un medio para ligar el desarrollo local con lo cotidiano de la vida de las personas, entendiéndose entonces, como un medio para lograr el Desarrollo Sostenible. A su vez, el riesgo se entiende como “probabilidad determinada y cuantificada mediante estudios técnico científicos de que se presenten consecuencias humanas, materiales y ambientales



negativas, para una población vulnerable, a causa de la influencia de un peligro, durante un tiempo de exposición determinado”. En tal sentido, la gestión del riesgo busca el desarrollo local, conjugando factores de peligro y vulnerabilidad para evitar o mitigar los efectos negativos de un desastre sobre el ser humano o el medio ambiente. (SINPAD, 2014)

## **2.2.2 Bases de datos geográficas**

Una Base de Datos Geográfica (BDG) es un conjunto de datos geográficos organizados de tal manera que permiten la realización de análisis y la gestión del territorio dentro de aplicaciones de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Además, una BDG se utiliza de soporte para la implantación de servicios geográficos relacionados con las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE), y su contenido es la base fundamental en los procesos de producción cartográficos.

La espina dorsal de una BDG es el modelo de datos, que consiste en la formalización conceptual (descripción) de las entidades geográficas del mundo real con el objeto de realizar una abstracción que permita satisfacer unas necesidades de información. La implementación del modelo debe de facilitar la explotación y optimizar el almacenamiento para conseguir el mejor rendimiento en las consultas. (IGN, 2015).

### **2.2.2.1 Características**

Las bases de datos geográficas tienen la facilidad de almacenar eficientemente la geometría de eventos espaciales junto con los atributos que los caracterizan.

Las bases de datos espaciales deberán satisfacer los mismos requerimientos que las alfanuméricas en cuanto a eficiencia, capacidad de acceso multiusuario, baja redundancia, seguridad, etc. La independencia de los datos respecto al programa de aplicación se hace aquí más patente, ya que los clientes deben representar gráficamente objetos cuyas coordenadas están en realidad almacenadas como datos numéricos en la base de datos.

Una base de datos espacial estará formada por cuatro tipos de información:

- *Posición geográfica*
- *Atributos*: son datos no espaciales que reflejan las características del objeto o evento en cuestión, por lo que pueden ser almacenados en una base de datos no espacial.
- *Topología*: define las relaciones espaciales entre entidades geográficas como, por ejemplo, la recta 1 interseca a la recta 2 en el punto A se encuentra en el interior del polígono P. pueden ser definidas explícitamente o calculadas a necesidad.
- *Tiempo*: será registrado en toda la representación dinámica de elementos, como puede ser uso de suelo, cobertura vegetal, red viaria, divisiones administrativas, etc.

(Taboada & Cotos, 2005)

#### **2.2.2.2 Modelo de datos espaciales**

La base de datos espacial de un SIG no es más que un modelo del mundo real, una representación digital con base en objetos discretos. Una base de datos espacial es una colección de datos referenciados en el espacio que actúa como un modelo de la realidad (NCGIA, 1990)

Para trabajar con un SIG es necesario en primer lugar introducir la información geográfica en un sistema de información y realizar una modelización de la realidad, siendo los dos modelos de datos más empleados el vectorial y el raster. Ver Figura 9.

Si se desea disponer de información de una amplia zona sin importar los límites de los objetos, se emplean los datos raster con los que se dispone de información continua. Sin embargo, si los límites de las entidades geográficas tienen gran importancia para la aplicación y se requieren recoger los elementos de forma individual, se elegirá un modelo vectorial.

En ambas estructuras de datos será necesario que queden reflejadas las relaciones espaciales de los elementos entre sí, lo cual se conoce en el área de las matemáticas como topología. (Zarzosa & Núñez, 2002)

### **MODELO VECTORIAL**

Este modelo representa cada objeto geográfico de forma independiente (entidad) mediante las primitivas graficas (puntos, líneas y polígonos), codificando explícitamente el límite que lo separa del entorno. Las primitivas están caracterizadas de la siguiente forma:

- Los elementos puntuales se representan mediante un par de coordenadas "x,y" que definen la posición del punto.
- Los elementos lineales están formados por uno o más segmentos lineales que se unen en vértices representados mediante coordenadas "x,y".
- Los elementos superficiales se representan mediante coordenadas "x,y" de los vértices de las líneas que forman su perímetro.
- Ejemplo: Un lago (entidad) puede representarse en un SIG mediante un polígono (primitiva grafica).

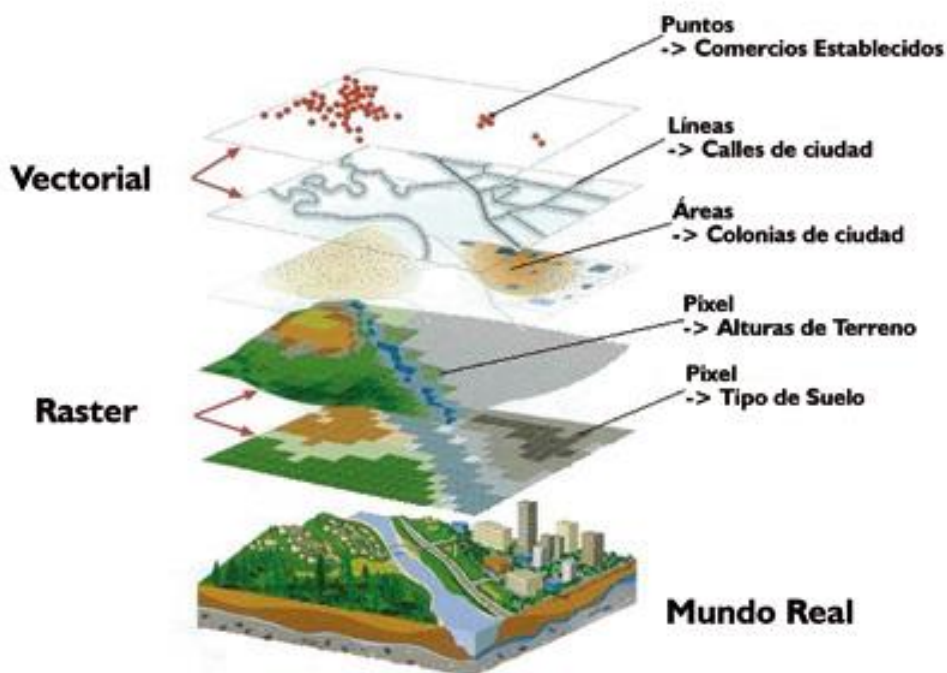


Figura 9. Modelo de datos espaciales  
Fuente: (IGAC, 2015)

## **MODELO RASTER**

Este modelo centra su interés más en las propiedades del espacio que en la representación precisa de los elementos que lo conforman. Para ello estructura el espacio en una serie de elementos discretos por medio de una retícula regular, generalmente compuesta por celdas cuadradas, también llamadas 'píxeles'. Cada una de esas celdas se considera como indivisible y es identificable por su número de fila y columna.

La representación de los elementos del mundo real se hace de la siguiente forma: un elemento puntual se representa mediante una celda un elemento lineal mediante una secuencia de celdas alineadas y un elemento poligonal mediante una agrupación de celdas contiguas. Los límites entre los elementos geográficos no quedan registrados de forma explícita, pero se pueden deducir a partir de los valores de las celdas. Por ejemplo: un lago puede representarse mediante un grupo de celdas colindantes que tienen un mismo valor temático; se trata por tanto, de un modelo continuo que cubre todo el territorio.

Uno de los mayores inconvenientes que se asocian a este modelo es la falta de exactitud a la hora de localizar los elementos. Teóricamente las celdas podrían ser tan pequeñas como se deseara hasta llegar a la misma exactitud que presentan las coordenadas X e Y en un sistema vectorial, pero se producirán unas necesidades en el almacenamiento y proceso de datos difíciles de alcanzar.

El formato raster permite representar también variables que presentan una variación continua sobre el espacio, es decir, superficies. El ejemplo más típico es el mapa de altitudes, donde se le asigna a cada celda un valor, de forma que se puede conocer como varía la altitud por toda el área que cubre un mapa. Se puede representar de esta forma superficies tridimensionales, que añade una tercera variable (Z) a las dos coordenadas de cada localización (X e Y), para representar el valor de la variable cuantitativa y continua, en este caso la altitud; esto es lo que se conoce como modelo digital de elevaciones (MDE). (Zarzosa & Núñez, 2002)

### **2.3 ANÁLISIS ESPACIAL**

El análisis espacial es la conjugación de técnicas que buscan separar, procesar, clasificar y presentar con criterios cartográficos el estudio cuantitativo y cualitativo de aquellos fenómenos que se manifiestan en el espacio y que son objeto del presente estudio.

Estas herramientas pueden ser de diferentes tipos, gráficos y cuantitativos primordialmente. Muchas de estas herramientas se usan en un SIG, herramientas gráficas para la composición de cartografía de diferente tipo y herramientas estadísticas de distinta índole que permiten describir, inferir y predecir cuantitativamente estos fenómenos. Todas estas operaciones realizadas pueden producir resultados tanto de datos geográficos, tablas de datos o tipo vectores. (IniSIG, 2014)

### **2.4 GENERACIÓN DE MODELOS CARTOGRÁFICOS EN SIG**

Para crear un modelo SIG que ayude a resolver algún problema requiere de diferentes etapas, como:

- **Conceptualización:** es el análisis del sistema real, definición de las partes relevantes y de los procesos clave: identificación y planteamiento claro del problema a solucionar. Límites del problema en cuanto alcance a analizar. Se define el dominio espacial y temporal del estudio.
- **Diseño:** la etapa de diseño consiste en establecer las variables de estado, selección y exclusión de partes y relaciones, así como las escalas temporal y espacial en las cuales se desarrollan las partes. Se definen las operaciones analíticas a realizar entre los grupos de variables. Se crea un modelo físico de datos.
- **Implementación:** en esta fase se traduce a código el modelo esquemático; implica la solución a problemas de programación (lenguajes, planteamiento de ecuaciones, escritura de código)
- **Análisis y modelamiento:** en la fase de análisis y modelamiento propiamente dicha se seleccionan los métodos y operaciones específicas

para los análisis de datos. Se identifican y definen las interfaces de análisis externos se detallan esquemas de flujo.

- Verificación funcional: es la fase de análisis de estabilidad. En esta fase se examina si el modelo genera resultados razonables de sensibilidad. Se ve la variación de los resultados ante cambios en las variables dentro del rango de variación natural; un parámetro crítico es aquel que induce cambios fuertes de incertidumbre, analizar los resultados ante cambios en los parámetros dentro del error estándar de cada uno.
- Validación: es la comprobación del modelo con datos independientes. La validación nunca es absoluta; unos buenos resultados no garantizan un comportamiento correcto en todos los escenarios. (Aviles & Hermosa, 2009)

## **2.5 LÓGICA DIFUSA**

La lógica difusa es una rama de la inteligencia artificial que se funda en el concepto de "todo es cuestión de grado", lo cual permite manejar información de difícil especificación si quisiéramos hacer cambiar con esta información el funcionamiento o el estado de un sistema específico. La lógica difusa en comparación con la lógica convencional permite trabajar con información que no es exacta para poder definir evaluaciones convencionales, contrario con la lógica tradicional que permite trabajar con información definida y precisa (Supo, 2003).

### **2.5.1 Generalidades**

Con lo mencionado anteriormente se entiende por Lógica Difusa a una lógica multivaluada que permite representar matemáticamente la incertidumbre, proporcionando herramientas formales para su tratamiento.

Como indica (Zadeh, 1973), "Cuando aumenta la complejidad, los enunciados precisos pierden su significado y los enunciados útiles pierden precisión.", que puede resumirse como que "los árboles no te dejan ver el bosque". Básicamente, cualquier problema del mundo puede resolverse como dado un conjunto de variables de entrada (espacio de entrada), obtener un

valor adecuado de variables de salida (espacio de salida). La lógica difusa permite establecer este mapeo de una forma adecuada, atendiendo a criterios de significado (y no de precisión). El término Lógica Difusa actualmente se utiliza en un amplio sentido, agrupando la teoría de conjunto difusos, reglas si-entonces, aritmética difusa, cuantificadores, etc. (González, 2015)

### 2.5.2 Descripción de la metodología

La metodología difusa se basa en el análisis y selección del caso particular de la variable que interactúa con el fenómeno o evento.

Las funciones que se ajustan son las sinusoidales (ver *Figura 10*). Se usará la curva del seno cuadrado, para obtener una curva donde el rango sea de  $[0, 1,0]$ , y no obtener valores negativos, como sería el caso de tomar la curva seno no cuadrática. El eje x se convierte en la probabilidad y el ángulo de la función, que se lo llamará  $\alpha$ , estará en función de la variable del evento. (Padilla, 2006)

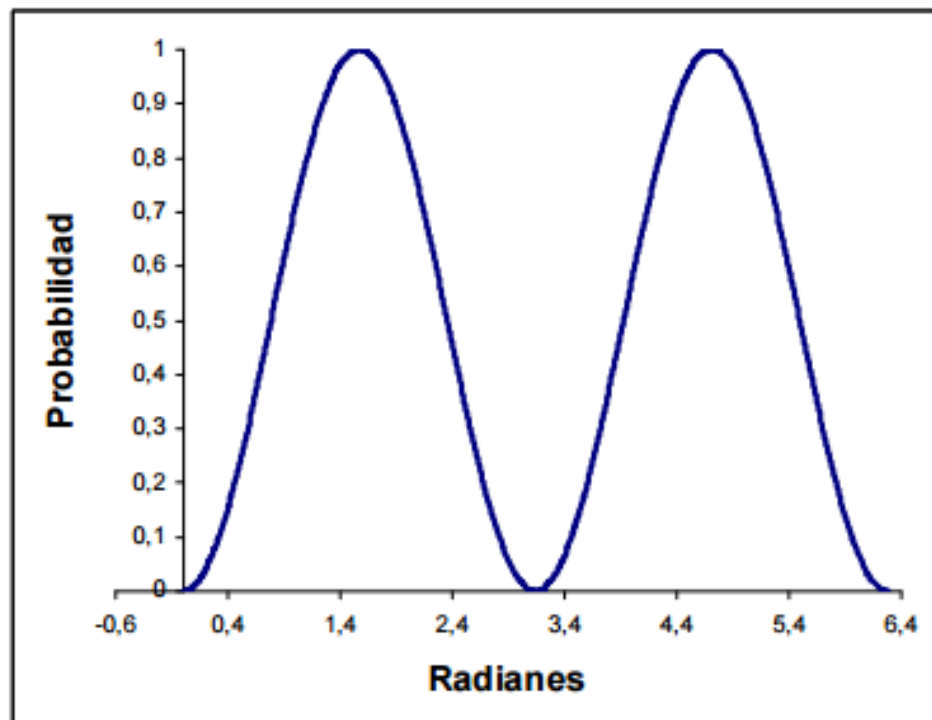


Figura 10. Función Seno Cuadrado

Fuente: (Padilla, 2006)

Es así que la probabilidad se define de la siguiente en la Ecuación 1:

$$P = f(\text{Sen } \alpha) \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

P = probabilidad de ocurrencia del evento o fenómeno

$\alpha$  = variable en función del evento o fenómeno

Mínima P = 0 o 0%

Máxima P = 1 o 100%

Para obtener una curva donde el rango sea de [0, 1,0], se usa la función cuadrada del seno (Ecuación 2).

$$P = f(\text{Sen}^2 \alpha) \quad \text{Ecuación 2}$$

**Puntos importantes en la función:** Estas funciones están controladas por cuatro puntos situados de la siguiente forma (ver *Figura 11*).

- Punto A: Punto de valor mínimo en la variable a modelar.
- Punto B y C: Rango de valores donde se encuentran la mayor cantidad de datos de la variable.
- Punto D: Punto de valor máximo en la variable.

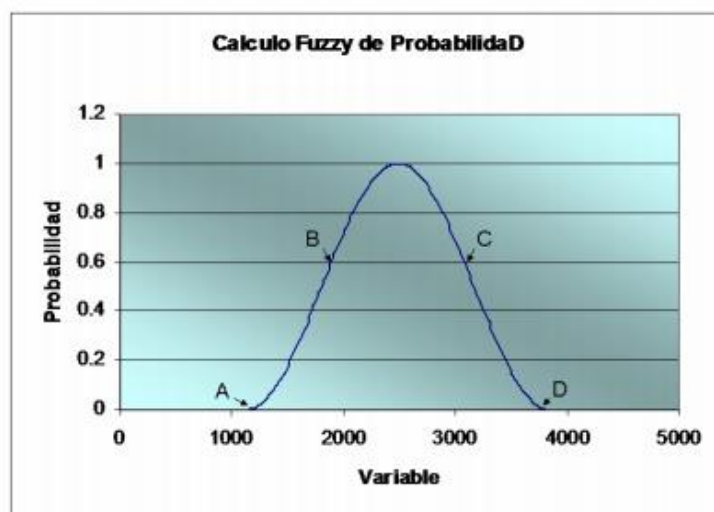


Figura 11. Puntos importantes del modelo  
Fuente: (Padilla, 2006)



**Puntos de inflexión de la curva:** estos puntos pueden ser tomados como un caso particular para situar los puntos B y C de las variables (Figura 11). Se tienen tres casos de los que se va a tomar como ejemplo el de la curva simétrica (Figura 12).

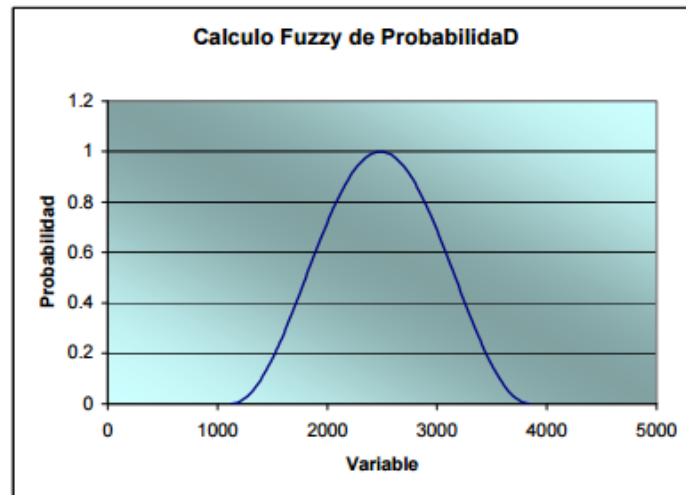


Figura 12. Curva simétrica  
Fuente: (Padilla, 2006)

$$P = \text{Sen}^2 \alpha$$

$$P' = 2 * \text{Sen} \alpha * \text{Cos} \alpha$$

$$P'' = 2 * \text{Sen} \alpha * -\text{Sen} \alpha + 2 * \text{Cos} \alpha * \text{Cos} \alpha$$

$$P'' = 2(\text{Cos}^2 \alpha - \text{Sen}^2 \alpha)$$

$$(\text{Cos}^2 \alpha - \text{Sen}^2 \alpha) = 0$$

$$1 - \text{Sen}^2 \alpha - \text{Sen}^2 \alpha = 0$$

$$1 - 2 * \text{Sen}^2 \alpha = 0$$

$$\text{Sen}^2 \alpha = 1/2$$

$$\alpha_1 = \pi/4$$

$$\alpha_2 = 3\pi/4$$

Finalmente:

$$P_1(A; 0)$$

$$P_2\left(B; \frac{\pi}{4}\right)$$

$$P_3\left(C; \frac{3\pi}{4}\right)$$

$$P_4(D; \pi)$$

$P_5\left(\frac{B+C}{2}; \frac{\pi}{2}\right)$ , donde P5 corresponde al punto medio de la curva.

**Zonas bajo la curva:** De la ecuación general de la recta (Ecuación 3) se tiene.

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) \quad \text{Ecuación 3}$$

El eje x será la variable V; el eje y será la variable  $\alpha$ .

**Zona I ( $P_1P_2$ ):** Pertenece a la sección en la que existe menor cantidad de datos, en el principio de la función (Ecuación 4).

$$\begin{aligned} P_1(A, 0) \\ P_2\left(B, \frac{\pi}{4}\right) \\ y - y_1 &= \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) \\ \alpha - 0 &= \frac{\frac{\pi}{4} - 0}{B - A} (V - A) \\ \alpha &= \frac{\pi}{4} * \frac{(V - A)}{(B - A)} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 4}$$

**Zona Ila ( $P_2P_5$ ):** Pertenece a la sección en la que existe mayor cantidad de datos, en el principio de la función (Ecuación 5).

$$\begin{aligned} P_2(B, \pi/4) \\ P_5\left(\frac{B + C}{2}, \frac{\pi}{2}\right) \\ y - y_1 &= \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) \\ \alpha - \pi/4 &= \frac{\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4}}{\frac{B + C}{2} - B} (V - B) \\ \alpha &= \frac{\pi}{4} + \frac{\pi/2(V - B)}{(C - B)} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 5}$$

**Zona IIb ( $P_5P_3$ ):** Pertenece a la sección en la que existe mayor cantidad de datos, en el final de la función (Ecuación 6).

$$\begin{aligned}
 & P_5\left(\frac{B+C}{2}, \frac{\pi}{2}\right) \\
 & P_3(C, 3\pi/4) \\
 y - y_1 &= \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) \\
 \alpha - \frac{\pi}{2} &= \frac{\frac{3\pi}{4} - \frac{\pi}{2}}{C - \frac{B+C}{2}} \left(V - \frac{B+C}{2}\right) \\
 \alpha &= \frac{\pi}{2} + \frac{\pi/4(2V - B - C)}{(C - B)}
 \end{aligned}
 \tag{Ecuación 6}$$

**Zona III ( $P_3P_4$ ):** Pertenece a la sección en la que existe menor cantidad de datos, en el final de la función (Ecuación 7).

$$\begin{aligned}
 & P_3(C, 3\pi/4) \\
 & P_4(D, \pi) \\
 y - y_1 &= \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) \\
 \alpha - \frac{3\pi}{4} &= \frac{\pi - \frac{3\pi}{4}}{D - C} (V - C) \\
 \alpha &= \frac{3\pi}{4} + \frac{\pi/4(V - C)}{(D - C)}
 \end{aligned}
 \tag{Ecuación 7}$$

Como se puede pensar existen diversas aplicaciones, como puede ser el modelamiento de fenómenos espaciales como la ubicación de especies u ocurrencia de un determinado fenómeno; en sensores remotos se aplica para la clasificación de imágenes en la obtención de uno o varios elementos, como puede ser un tipo de vegetación, una clase de suelo específico, entre otros. En cualquiera de estas situaciones o ejemplos existen más de dos variables que se encuentran involucradas al elemento a obtenerse, es así que la

probabilidad de localizar o modelar este elemento corresponde al producto de todas esas variables, (Ecuación 8) siendo así:

$$P_t = \frac{PV1 + PV2 + PV3 + \dots + PVn}{n} \quad \text{Ecuación 8}$$

Dónde:

$P_t$  = es la probabilidad total de obtención de un fenómeno (clasificación de una imagen)

$PV1 \dots PVn$  = son las probabilidades individuales, obtenidas mediante la metodología de operadores difusos propuesta, de cada variable.

$N$  = número total de variables.

(Padilla, 2006)

### 2.5.3 Casos de lógica Fuzzy

La lógica Fuzzy es una gama intermedia, o posibles respuestas entre el sí y el no, de forma cualitativa. Sin embargo debido a que no todas las variables tienen el mismo comportamiento se han determinado los siguientes casos:

**CASO 1:** Este caso contempla a la curva completa del seno cuadrado, (Ecuación 9) que se encuentra en un rango de 0 a  $\pi$  radianes. Los eventos al cual corresponderían este caso, serian aquellos que durante su rango, la probabilidad de presencia de deslizamientos crece desde 0 hasta un punto máximo 1, y posteriormente decrece nuevamente a 0 (Ver *Figura 13*).

$$P = \text{Sen}^2 \alpha \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\text{Rango} = [0 < \alpha < \pi]$$

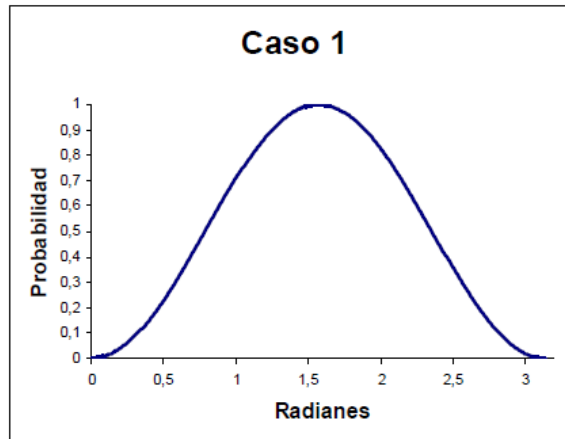


Figura 13. Función de pertenencia Caso 1

Fuente: (Padilla, 2006)

**CASO 2:** Este caso contempla a la parte de la curva seno cuadrado, (Ecuación 10) que se encuentra en un rango de 0 a  $\pi/2$  radianes. Los eventos al cual corresponderían este caso, serian aquellos que durante su rango, la probabilidad de presencia del deslizamiento crece desde 0 hasta un punto máximo 1, y este corresponde también al máximo de su rango (Ver *Figura 14*)

$$P = \text{Sen}^2 \alpha$$

$$\text{Rango} = [0 < \alpha < \pi/2]$$

Ecuación 10

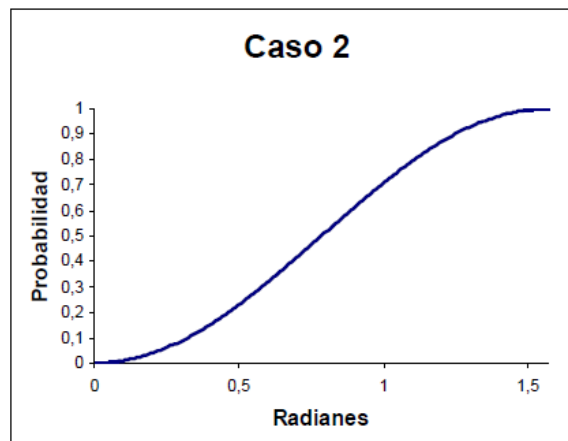


Figura 14. Función de pertenencia Caso 2.

Fuente: (Padilla, 2006)

**CASO 3:** Este caso contempla a la parte de la curva coseno cuadrado, (Ecuación 11) que se encuentra en un rango de 0 a  $\pi/2$  radianes. Los eventos al cual corresponderían este caso, serian aquellos que durante su rango, la

probabilidad de presencia del deslizamiento decrece desde 1 hasta un punto mínimo 0, y este corresponde al máximo de su rango (Ver *Figura 15*).

$$P = \text{Sen}^2 \alpha$$

$$\text{Rango} = [\pi/2 < \alpha < \pi]$$

Ecuación 11

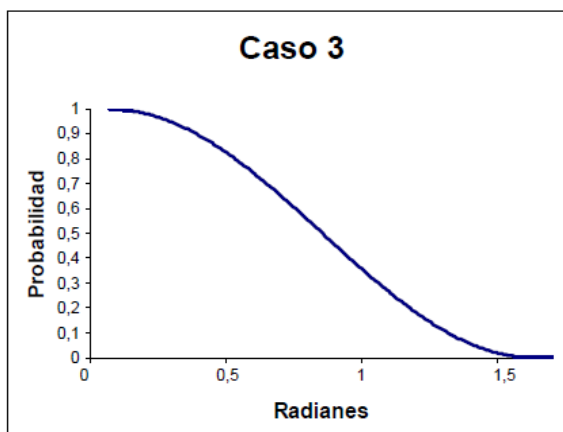


Figura 15. Función de pertenencia caso 3.

Fuente: (Padilla, 2006)

## 2.6 CRITERIOS PARA LA DEFINICIÓN DE AMENAZA POR INESTABILIDAD DE LADERA

Los valores de frecuencia e intensidad que se obtienen se trasladan a diagramas que relacionan estas dos variables. Estos diagramas han sido desarrollados en base a experiencia de Suiza y modificados y aplicados en Venezuela y Ecuador. En Nicaragua han sido utilizados por el proyecto PRAAC para el análisis de zonas inundables. Los valores presentados para esta propuesta han sido adaptados a las características de los fenómenos que más comúnmente se producen en Nicaragua. Se propone su uso para la evaluación de la amenaza de inestabilidades en Nicaragua (INETER, 2005), conforme muestra el Cuadro 1.

Cuadro 1. Niveles de amenaza por inestabilidad de ladera

Intensidad	Alta	Alta	Alta	Media	Residual
	Media	Alta	Media	Baja	
	Baja	Media	Baja	Baja	
	Frecuencia Tr	Alta 1 - 10	Media 10 - 50	Baja 50 - 200	Muy Baja > 200
		Frecuencia			

Fuente: (INETER, 2005)

### 2.6.1 Significado de los mapas de amenazas por deslizamientos

Los niveles de amenaza (intensidad vs frecuencia o probabilidad) son utilizados en los procesos de planificación y gestión territorial, (Ver Cuadro 2) por lo que deben representar el uso que se le puede dar y los daños potenciales a que este uso estaría expuesto (INETER, 2005).

## 2.7 FOTOGRAFÍA AÉREA

Las fotografías aéreas son de gran utilidad en cuanto a la inventariación de los elementos del medio físico ya que sus características permiten suministrar una perspectiva completa, tridimensional y permanente del suelo.

Así mismo proporcionan una información más completa que otras técnicas, por todo ello, su utilización simplifica la detección de sectores homogéneos respecto a la vegetación, a los usos del suelo, a los rasgos geomorfológicos, etc. (MOPT, 1992)

Las fotografías aéreas son una fuente inestimable de información para el estudio de la naturaleza y las características del medio costero y terrestre. Las fotografías aéreas verticales pueden ser utilizadas para actualizar mapas básicos existentes y para producir nuevos mapas de base, en la forma de fotografías individuales o diversas fotografías ensambladas conocidas como mosaicos. (FAO, 2013)

Cuadro 2. Significado de los mapas de amenazas para la planificación del territorio.

Significado de los mapas de amenazas para la planificación del territorio			
Leyenda	Pérdidas y daños previsibles en caso de uso para asentamientos humanos		Implicaciones para el ordenamiento territorial
	Zonas urbanizadas	Zonas rurales	
<b>Amenaza Alta</b> (Rojo)	Las personas están en peligro tanto adentro como afuera de las viviendas. Existe un alto peligro de destrucción repentina de viviendas y muertes de sus habitantes.	Exposición directa a la amenaza.  Grandes afectaciones y pérdidas totales o casi totales de bienes inmuebles, terrenos, animales, recursos naturales de la ladera y la vida humana.	<b>Zona de prohibición e intervención inmediata:</b> tierras no aptas para el desarrollo de asentamientos humanos ni de infraestructura importante (hospitales, etc) u ocupados de forma permanente. Áreas ya edificadas o viviendas deben ser reubicadas, o protegidas con medidas de reducción de riesgo, sistemas de alerta temprana, evacuación temporal y modificación paulatina del uso de los territorios.
<b>Amenaza Media</b> (Naranja)	Las personas están en peligro afuera de las viviendas, pero no o casi no adentro. Se debe contar con daños en las viviendas, pero no destrucción repentina de éstos, siempre y cuando su modo de construcción haya sido adaptado a las condiciones del lugar.	Exposición directa a la amenaza.  Moderadas afectaciones y pérdidas parciales de bienes inmuebles, terrenos, animales, recursos naturales de la ladera y la vida humana.	<b>Zona de alta restricción y reglamentación del uso y manejo de los territorios,</b> en la cual se puede permitir cierto desarrollo de asentamientos humanos de baja densidad, siempre y cuando se realicen estudios de riesgo detallados previos y apliquen normas de construcción y obras de mitigación. Construcciones existentes que no cumplan con las normas deben ser reforzadas, protegidas o reubicadas.
<b>Amenaza Baja</b> (Amarillo)	El peligro para las personas es débil o inexistente.  Los edificios pueden sufrir daños leves, pero puede haber fuertes daños al interior de los mismos.	Exposición directa o indirecta a la amenaza.  Bajas afectaciones y pocas pérdidas de bienes inmuebles, terrenos, animales, recursos naturales.	<b>Zona de moderada restricción y sensibilización,</b> para el manejo del territorio, se permite el desarrollo de asentamientos humanos de baja densidad. La población debe ser informada de la existencia de potenciales amenazas para que apliquen medidas de protección.
<b>Amenaza residual</b> (Rayas amarillentas)	Existen amenazas que tienen una probabilidad de ocurrencia muy débil y que se pueden manifestar con una intensidad fuerte.	Exposición directa o indirecta a la amenaza.  Bajas afectaciones y pocas pérdidas de bienes inmuebles, terrenos, animales, recursos naturales	<b>Zona de sensibilización,</b> apta para el desarrollo de asentamientos humanos. Los usuarios del suelo deben ser informados ante la existencia de amenazas muy poco probables pero de alta intensidad.
<b>Zona de susceptibilidad</b> (Rayas rojo pálido)	Zona cuyo grado de amenaza no se ha podido identificar con un nivel de precisión suficiente y que podría incluir, por consiguiente, áreas de amenaza alta. Incluye áreas protegidas por obras de protección cuyo diseño y estado de mantenimiento no se han podido verificar.	Exposición directa e indirecta a la amenaza.  Relativamente se pueden esperar afectaciones y pérdidas de bienes inmuebles, terrenos, animales, recursos naturales de la ladera y la vida humana.	<b>Zona de restricción y reglamentación del uso del territorio,</b> no apta, temporalmente, para la instalación, expansión o densificación de asentamientos humanos, mientras no se determine su grado de amenaza por medio de investigaciones adicionales de detalle.
<b>Verde Claro: Amenaza no detectada:</b> ninguna amenaza conocida, o despreciable según el estado actual de conocimientos			

Fuente: (INETER, 2005)

### 2.7.1 Fotointerpretación

La aplicación de la foto interpretación con fines de estudio en varias ciencias según la mencionada sociedad tiene como bases principales los aspectos siguientes:



- Muestra imágenes del terreno que son fiel reproducción de los objetos que existen en la superficie.
- Vistas dos fotografías sucesivas a través del estereoscopio se pueden apreciar tridimensionalmente los objetos, percibiéndose su forma que en simples fotografías puede parecer amorfa.
- Muestra áreas suficientemente grandes con lo cual se obtiene un panorama más amplio.
- La exageración de la distancia vertical, que se aprecia mediante la observación de pares estereoscópicos, se constituye en una ayuda al intérprete, ya que enfatiza sobre los objetos pequeños.
- La permanencia y fidelidad de la imagen fotográfica permite al intérprete hacer mediciones y un estudio completo y cuidadoso del área.
- Fotografías del mismo lugar tomadas en diferentes épocas, permiten hacer un estudio comparativo de los cambios que puedan sucederse en el área.

Un aspecto fundamental de la fotointerpretación es el hecho de que se pueden observar las características importantes del terreno que estén íntimamente relacionadas con el propósito del estudio. (Torres, 1976)

## CAPÍTULO III

### 3. GENERALIDADES

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

Para determinar la probabilidad de ocurrencia a deslizamientos en la zona de estudio, se debe analizar las diferentes variables que intervienen en dicho fenómeno. El inventario de movimientos en masa es lo más importante al momento de realizar la evaluación de susceptibilidad. Así mismo se debe elaborar una base de datos con información que se relaciona directamente a dicha evaluación tales como: litología, cobertura vegetal, vías, hidrografía, precipitaciones, entre otros. Las evidencias que se pueden identificar en campo forman parte importante de esta estimación.

El presente trabajo propone el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos mediante el método FuzzDes, el cual está basado en lógica difusa, que en base a la combinación de métodos matemáticos permite la obtención de modelos que representan las áreas susceptibles para posteriormente conseguir un modelo que se ajuste a la realidad de la zona de estudio.

#### 3.2 INFORMACIÓN Y DATOS

Para la implementación del algoritmo de Lógica Fuzzy aplicado al cálculo de la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos, se recopiló información existente en distintas instituciones mencionadas a continuación, la cual se organizó para la posterior actualización de la misma.

##### 3.2.1 Recopilación de la información

La recopilación de la información geográfica se realizó en diferentes instituciones, a continuación se presenta la Tabla 1 con la información recopilada y su respectiva fuente.

Tabla 1  
Información recopilada en diferentes instituciones

INFORMACIÓN	FUENTE
Fotografías aéreas a escala 1:5.000, correspondientes a la ciudad de Quito	Instituto Geográfico Militar
Base digital de la Ciudad de Quito	Secretaría de Seguridad y Gobernabilidad
Modelo digital del terreno (MDT)	
Información Temática: Fallas, Geología, Cobertura Vegetal.	
Ortofotomosaico, a escala 1:5000, del Distrito Metropolitano de Quito	
Datos de estaciones meteorológicas de los años 200 al 2015	INAMHI

### 3.2.2 Generación de datos

Luego de organizar la información base adquirida, se inicia con la interpretación de fotografías aéreas, para reconocer deslizamientos en la zona de estudio y así obtener los puntos de muestra para el estudio en campo.

#### 3.2.2.1 Interpretación de fotografías aéreas

Para la identificación de los deslizamientos en la ciudad de Quito se obtuvo las fotografías aéreas en formato digital, pertenecientes al IGM tomadas para el Proyecto Quito. Las fotografías son de alta resolución a escala 1:5.000 lo cual permite visualizar claramente todo el terreno.

Las fotografías aéreas deben ser consecutivas es decir todas deben formar su par estereoscópico, además de cumplir con algunas especificaciones que permitan que lo que ha sido interpretado en el laboratorio, se sujete a la realidad del terreno.

Se analizó las fotografías aéreas, mediante técnicas de fotointerpretación y conocimientos geomorfológicos, se obtuvieron zonas susceptibles a deslizamientos, de donde se obtienen los puntos de muestreo los cuales posteriormente se comprobaron en campo. *Ver Figura 16.*



Figura 16. Fotografía Zona de Estudio

Así mismo como complemento a la fotointerpretación se realizó la superposición del ortofotomosaico entregado por la Secretaria de seguridad y Gobernabilidad, al modelo digital del terreno, con ello se obtiene la sensación de relieve en la imagen y así con ayuda del monitor 3D y las gafas 3D activas se realizó la fotointerpretación digital; con la ayuda de dos monitores en el primero se realiza la visión en 3D mientras que en el segundo se procede a la digitalización como se puede observar en la *Figura 17*.



Figura 17. Fotointerpretación digital

Después de realizada la fotointerpretación se procede a la digitalización en el software ArcGis 9.3 sobre el ortofotomosaico antes mencionado, se digitalizaran todos los deslizamientos encontrados para ser verificados en campo. La verificación se la realiza visualmente constatando si existen

procesos de reptación, grietas de tracción en el suelo o como en algunos casos se ve claramente la forma del deslizamiento y el material acumulado.

### **3.2.2.2 Conversión de formatos y sistemas de referencia**

Las variables utilizadas en el análisis fueron convertidas al sistema de referencia TMQ WGS84, ya que se tenían diferentes formatos, esto para trabajar de manera general. Así como los datos cartográficos y temáticos, fueron convertidos a shapefile, que consiste en un archivo principal, un archivo índice, y una base de datos. Esta base de datos contiene características propias del elemento.

### **3.2.2.3 Construcción de base de datos alfanumérica**

Una vez generados los archivos base, a partir de la información recopilada, se procedió a la actualización de la base de datos, obteniendo información de las diferentes variables a ser utilizadas en el estudio.

### **3.2.3 Análisis de proximidad**

Los geoprosos que realizan análisis de proximidad son herramientas elementales en el empleo de los SIG, en este caso son áreas de influencia y enlace espacial. Dichas herramientas de geoprosamiento realizan pequeñas operaciones, pero fundamentales para realizar análisis con datos geográficos. (IniSIG, 2014)

El análisis de proximidad es una forma de analizar localizaciones o rasgos mediante medición de distancias entre ellos y otros rasgos en el área. Las variables distancia vías, distancia fallas, distancia recursos hídricos son analizadas de acuerdo a su proximidad, demostrando que mientras más cercano se encuentre un punto a estas variables su probabilidad de ocurrencia a un deslizamiento es mayor, que un punto que se encuentre más alejado a cada una de estas variables. (Aviles & Hermosa, 2009)

### 3.2.3.1 Interpolación

La interpolación trata de predecir datos de sitios no muestreados, se utiliza esta técnica para construir el mapa de precipitación, tomando como base los datos meteorológicos, en un periodo de 15 años (2000-2015), de estaciones cercanas a la zona de estudio. A continuación la Tabla 2 con la información requerida.

Tabla 2  
Estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio

Nombre	Código	X	Y	Precipitación Media	Precipitación Máxima
		TMQ WGS84			
Tabacundo	M1094	529700,08	9996311,3	51,8	198,2
La Tola	M0002	514849,88	9974612,23	71,2	263,8
Izobamba	M0003	494431,37	9959434,54	120,5	367,9
Inamhi - Iñaquito	M0024	501856,24	9981560,22	89,2	372,9
Malchingui	M0111	518686,25	9993852,67	47,7	202,8
San Jose de Minas	M0337	511910,88	9981313,03	153,8	966,9
Chillogallo	M354	485242,99	9968502,23	135,85	53

Fuente: (INAMHI, 2014)

### 3.2.3.2 Rasterización

Es el proceso por el cual se transforman datos vectoriales en una malla de pixeles o imagen raster. Consiste básicamente en situar una malla sobre el mapa vectorial, para codificar los pixeles en función de los datos que posean mayor medida. La capacidad de rasterización la soporta la mayoría de plataformas SIG. (Peña, 2006)

Este formato es útil para análisis de grandes extensiones con baja precisión de propiedades espaciales. Los sistemas raster tienen mayor poder analítico que el vectorial, y por tanto, es idóneo para el estudio de fenómenos cambiantes en el espacio como las variables de suelos, elevación del terreno, los índices de vegetación, precipitaciones, entre otros.

Para cambiar las variables a formato raster se procede a determinar la resolución espacial necesaria para mantener la información a escala 1:10.000, escala determinada para el proyecto. Para el análisis de deslizamiento se utilizara un factor de 3.3 milímetros.

### **3.2.4 Análisis de datos**

#### **3.2.4.1 Puntos de muestra**

Una vez definidos los deslizamientos en la fotointerpretación se obtienen los puntos de muestreo los cuales se verifico en campo. La comprobación en campo fue diseñada para recolectar datos que permitieran verificar la información obtenida de las fotografías aéreas y para comprobar que efectivamente responden a la realidad. Es importante determinar detalles topográficos en la fotografía aérea para localizar la posición exacta de dichos deslizamientos, se procede a tomar puntos GPS así como también fotografías de los deslizamientos vistos en campo. A continuación se presenta la Figura 18 con el mapa de deslizamientos, el cual presenta los deslizamientos fotointerpretados en la fotografía aérea representados en forma de polígono y en color rojo; así mismo en forma de punto los puntos muestreados en campo. Es importante mencionar que en la visita a campo se encontró más puntos a los fotointerpretados, algunos de ellos no se han podido graficar en la fotografía debido a la escala de trabajo ya que para escala 1:10.000 la unidad mínima de mapeo es 1600 m<sup>2</sup>, los mencionados corresponden a áreas más pequeñas es por ello que solo se encuentran como puntos y no como polígonos. Así mismo se realizó fichas que presentan datos técnicos de los deslizamientos visitados en campo (Ver anexo B.1 y anexo B.2)

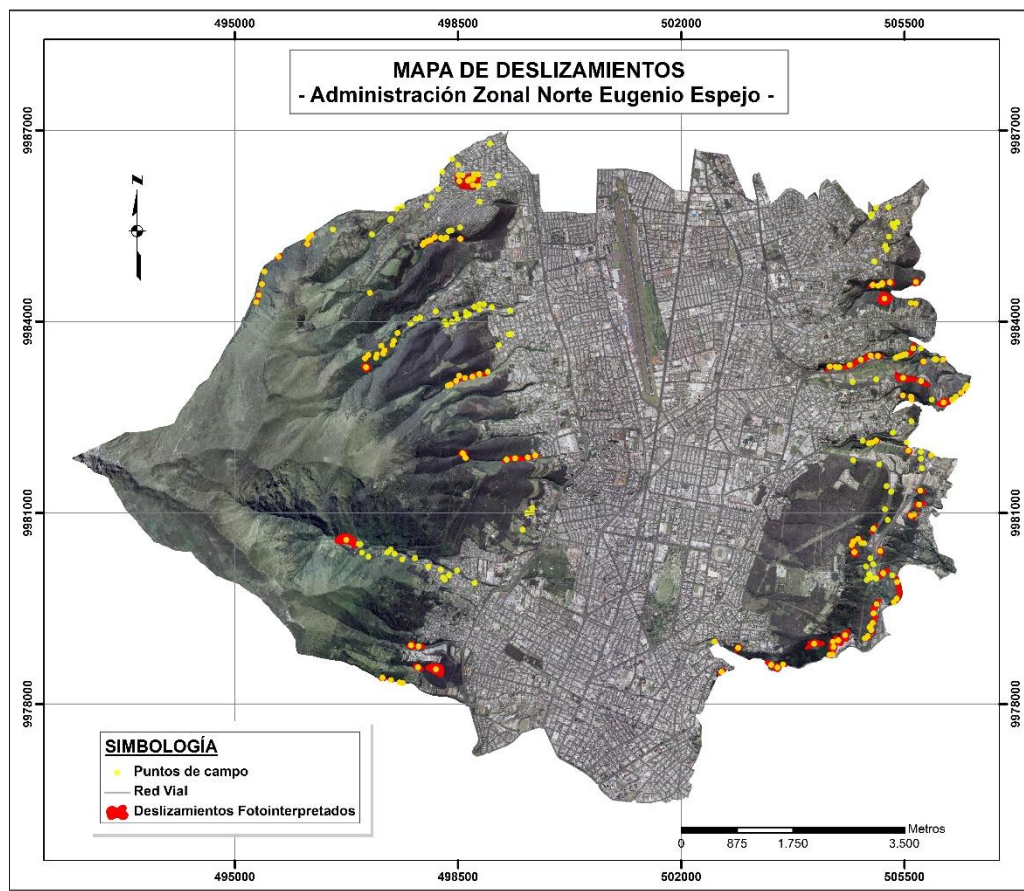


Figura 18. Mapa de deslizamientos Fotointerpretados

### 3.3 ANÁLISIS DE METODOLOGÍA DE FUZZY

La lógica difusa es definida como un sistema matemático que modela funciones no lineales, que dan como resultado valores numéricos (0 – 1) como respuesta cuantitativa a las posibles soluciones entre el sí y el no. Para ella se aplican las funciones Seno y Coseno, para variables dependientes e independientes respectivamente.

#### 3.3.1 Análisis de variables y relaciones

Para determinar las variables que intervienen en el análisis, se toma en cuenta criterios técnicos, área de estudio y disponibilidad de información. De acuerdo al análisis de cada variable se podrá conocer como cada una de estas interviene en la ocurrencia a deslizamientos. A continuación se va a analizar cada una de ellas.



**Pendiente:** al ser una variable que condiciona la aparición de movimientos del terreno, se analizó esta variable debido a que se presentan grandes cambios de topografía en la zona de estudio. Para ello se procede a la creación de un mapa de pendientes de la zona de estudio, con la herramienta Slope del software Arcgis 9.3, utilizando la variable curvas de nivel y el modelo digital de terreno, que genera los valores máximos y mínimos de pendiente en grados. A continuación la Figura 19 con el mapa de pendientes de la zona de estudio. (Ver anexo A.1.)

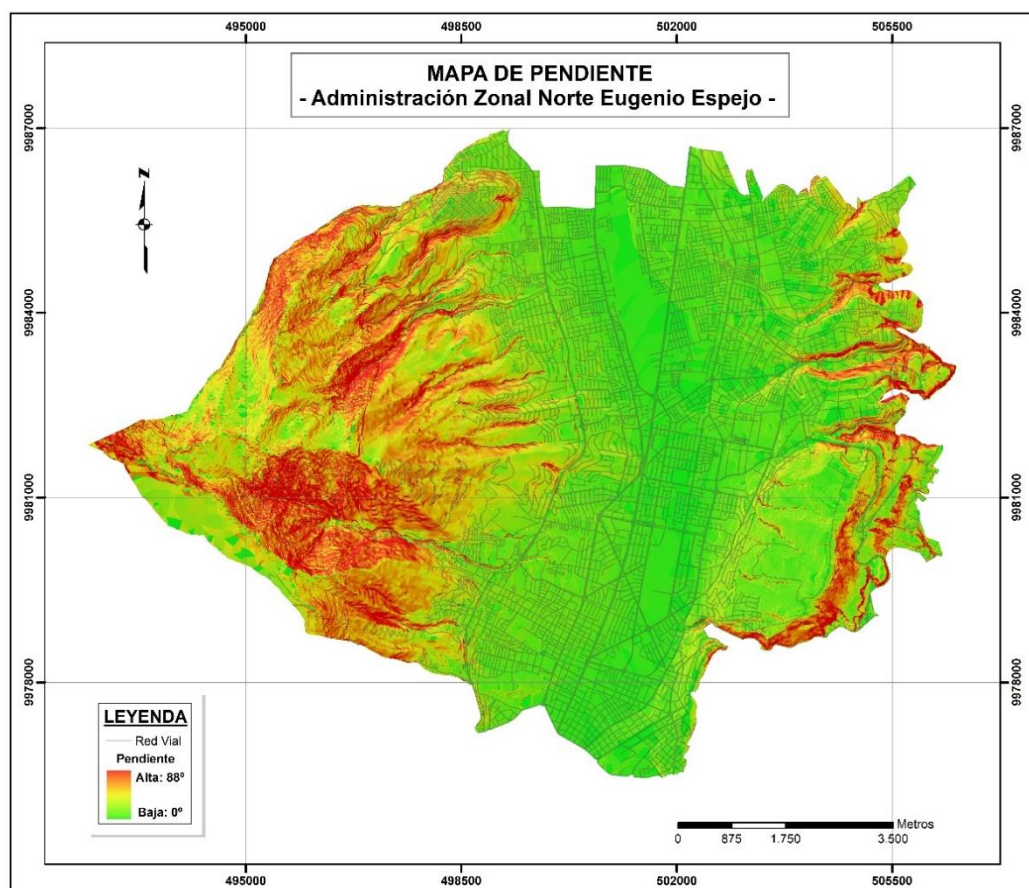


Figura 19. Variable Pendiente

**Precipitación:** esta variable representa la media de los datos anuales de medición de la precipitación en milímetros en un periodo de 15 años (2000-2015), dicha variable es un factor a considerar en cuanto a la estabilidad de terreno, debido a que como se ha mencionado anteriormente la época invernal produce saturación de agua en el suelo, lo cual ocasiona un incremento de las fuerzas que tienden al deslizamiento. Para obtener dicha variable se

realiza una interpolación con las estaciones meteorológicas más cercanas a la zona de estudio que en este caso son: La Tola, Izobamba, Inamhi-Iñaquito, Malchingui, San Jose de Minas, Tabacundo y Chillogallo. Con ello se obtiene los valores máximos y mínimos de precipitación en el periodo de 15 años.

A continuación se presenta la Figura 20 con la variable precipitación y con la estación meteorológica que se encuentra dentro del área de estudio que en este caso es la estación INAMHI. (Ver Anexo A.2.)

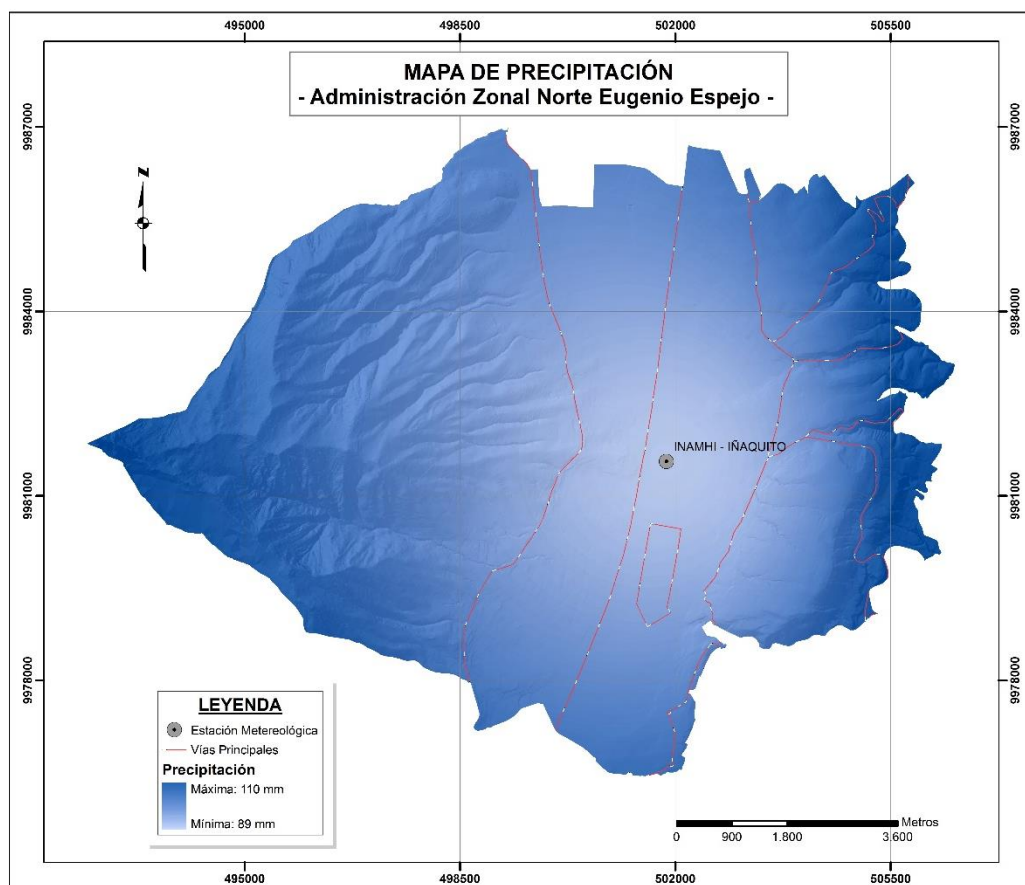


Figura 20. Variable precipitación

***Distancia a vías de comunicación:*** la construcción de vías tiene una relación directa con estos fenómenos ya que puede causar desequilibrio de los taludes, lo cual afecta directamente en la estabilidad natural que poseen las laderas y así provocar innumerables deslizamientos. Así mismo mientras más pendiente exista cerca de las vías mayor será la vulnerabilidad.

Para obtener esta variable se realiza un análisis de proximidad, que implica obtener distancia medida desde cada celda hasta el origen más cercano. Las distancias se miden en línea recta, con ello se demuestra que mientras más cercano se encuentre un punto a esta variable su probabilidad de ocurrencia a un deslizamiento es mayor. En el caso de esta variable se utilizó las vías principales de la zona de estudio. A continuación se presenta la Figura 21 con la variable de distancia a vías principales. (Ver anexo A.3.)

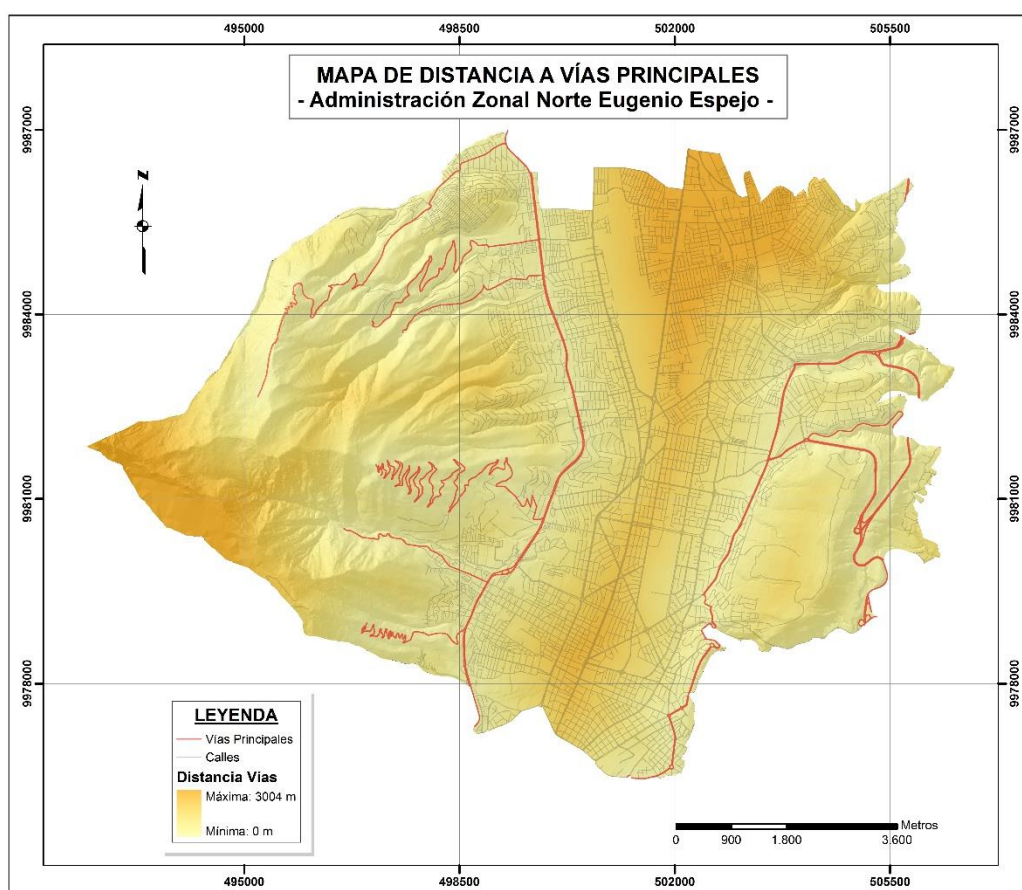


Figura 21. Variable distancia a vías principales

**Distancia a ríos:** la presencia de recursos hídricos en la zona de estudio causa erosión lo cual a lo largo del tiempo inestabiliza el terreno, dando paso a la formación de deslizamientos, así pues mientras más cerca se este del recurso hay mayor probabilidad a sufrir movimientos en masa.

Para obtener esta variable también se realiza un análisis de proximidad, que implica obtener distancia medida desde cada celda hasta el origen más cercano. Las distancias se miden en línea recta, con ello se demuestra que

mientras más cercano se encuentre un punto a esta variable su probabilidad de ocurrencia a un deslizamiento es mayor. A continuación se presenta la Figura 22 con la variable distancia a ríos. (Ver anexo A.4)

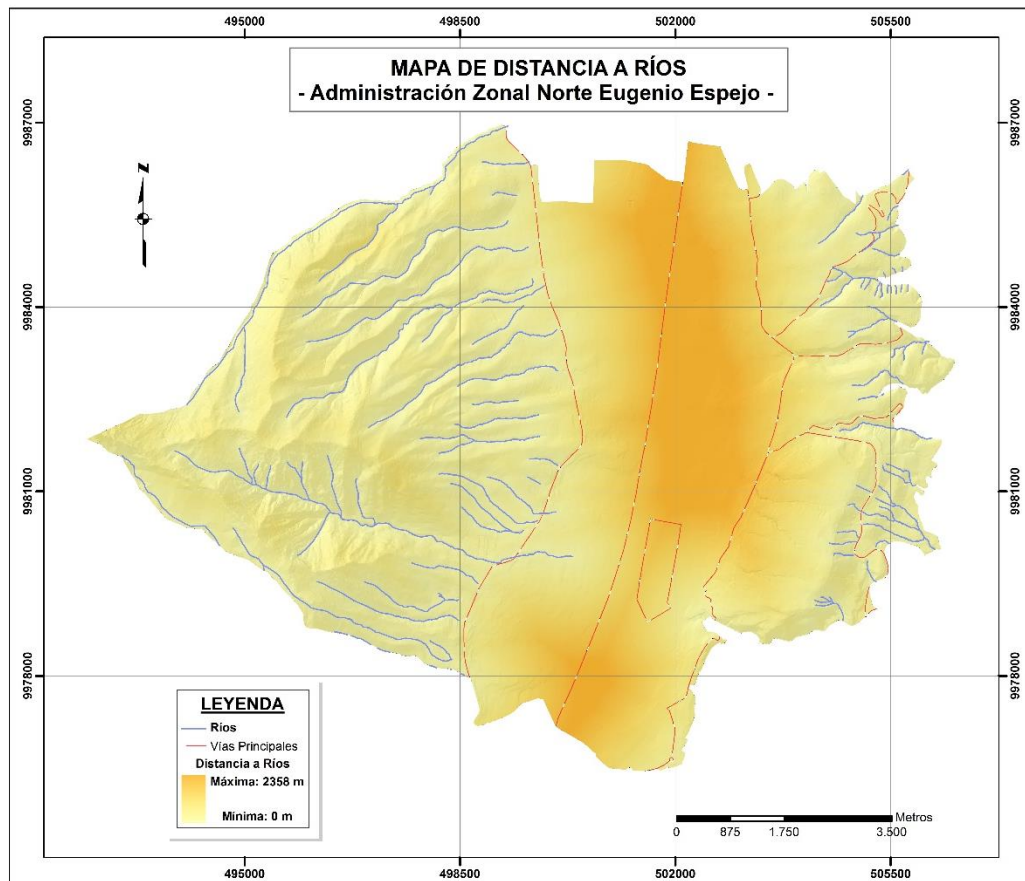


Figura 22. Variable distancia a ríos

**Distancia a fallas geológicas:** Al ser las fallas geológicas una fractura en el terreno, que cuando las fuerzas tectónicas superan la resistencia de las rocas provoca un movimiento de uno de los lados respecto al otro, la zona de ruptura tiene una superficie bien definida denominada plano de falla y su formación va acompañada de un deslizamiento de las rocas tangencial a este plano. Este movimiento puede tener desplazamientos pequeños durante largos periodos de tiempo.

Para obtener esta variable se realiza un análisis de proximidad, que implica obtener distancia medida desde cada celda hasta el origen más cercano. Las distancias se miden en línea recta, con ello se demuestra que mientras más cercano se encuentre un punto a esta variable su probabilidad

de ocurrencia a un deslizamiento es mayor. A continuación se presenta la Figura 23 con la variable de distancia a fallas. (Ver anexo A.5)

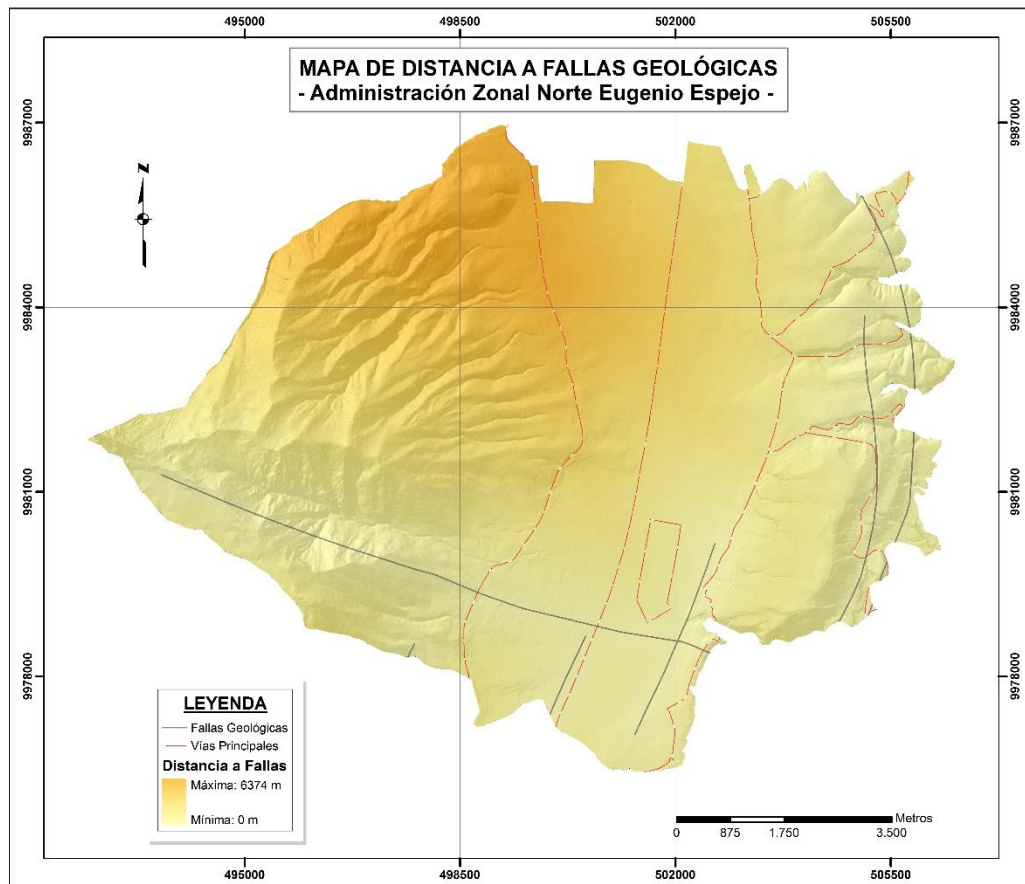


Figura 23. Variable de distancia a fallas

**Cobertura vegetal:** el tipo de vegetación tanto en el talud como en el área arriba del talud es un parámetro importante para su estabilidad. La vegetación cumple dos funciones principales: en primer lugar tiende a determinar el contenido de agua en la superficie y además da consistencia por el entramado mecánico de sus raíces. Como controlador de infiltraciones tiene efecto directo sobre el régimen de aguas subterráneas y actúa posteriormente como secador del suelo al tomar el agua que requiere para vivir.

La deforestación puede afectar la estabilidad de un talud ya que se facilita la infiltración masiva de agua y no existe refuerzo de raíces. La quema de la vegetación aumenta la inestabilidad de los taludes.

Para lograr lo antes mencionado se eligió el método de análisis jerárquico propuesto por Thomas Saaty, el cual se trata de un procedimiento de comparación por pares de los criterios que parte de una matriz cuadrada en la cual el número de filas y columnas está definido por el número de criterios a ponderar. Así se establece una matriz de comparación entre pares de criterios, comparando la importancia de cada uno de ellos con los demás. El objetivo de esta etapa es calcular la prioridad de cada elemento. (Ramírez, 2004)

Para obtener el orden de importancia de las variables se calculó la densidad de deslizamientos, que consiste en dividir el área de deslizamientos presentes en cada cobertura vegetal para el área de dicha cobertura (ver Tabla 3) siendo así la cobertura vegetal con más importancia la de bosques y áreas seminaturales y la de menos importancia el área urbana.

Tabla 3.  
Densidad de deslizamientos

Cobertura Vegetal	# de deslizamientos	Área de deslizamientos (km <sup>2</sup> )	Área cobertura vegetal(km <sup>2</sup> )	# Deslizamientos/ km <sup>2</sup>
Bosques y áreas seminaturales	73	0,271	13,637	0,020
Suelo desnudo	1	0,008	0,516	0,016
Áreas cultivadas	7	0,086	5,709	0,015
Vegetación Natural	125	0,434	48,514	0,009
Área Urbana	34	0,224	45,163	0,005

Por lo tanto según la Tabla 3 se obtiene el orden de las variables las cuales se presentan en la Tabla 4.

Una vez determinada la importancia de la variable de cada fila en relación a la variable de su columna correspondiente, así, es preciso primero, completar toda la matriz introduciendo en el triángulo superior-derecho el inverso del valor de la celdilla correspondiente del triángulo inferior-izquierdo. Luego es preciso sumar cada columna para obtener un marginal de columna, a continuación, generar una nueva matriz mediante la división de cada celdilla

entre el marginal de su columna. Por último, calcular la media de los pesos para cada línea. (Ramírez, 2004)

Tabla 4.

Valoración por la matriz de Satty para la cobertura vegetal.

	Bosques y áreas seminaturales	Suelo desnudo	Áreas cultivadas	Vegetación natural	Áreas artificiales	<b>PESOS</b>
Bosques y áreas seminaturales	1	2	3	4	5	<b>0,44</b>
Suelo desnudo	0,50	1	1,50	2	2,50	<b>0,22</b>
Áreas cultivadas	0,33	0,67	1	1,33	1,67	<b>0,15</b>
Vegetación natural	0,25	0,50	0,75	1	1,25	<b>0,11</b>
Áreas artificiales	0,20	0,40	0,60	0,80	1	<b>0,09</b>

A continuación la Figura 24 con la variable cobertura vegetal. (Ver anexo A.6).

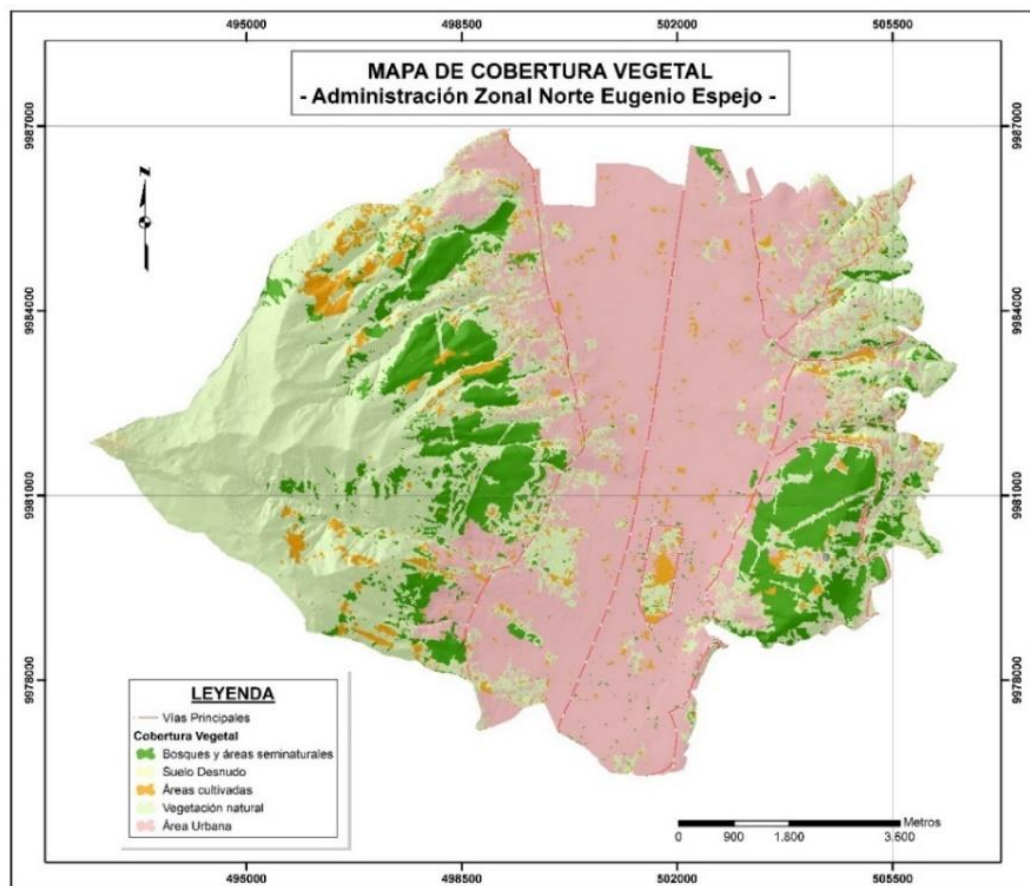


Figura 24. Variable Cobertura Vegetal

**Dureza de la roca:** la resistencia del suelo a la erosión depende en parte de la posición topográfica, la pendiente del terreno o la incidencia directa de las actividades humanas, las propiedades del suelo son los condicionantes más importantes. (MOPT, 1992)

Para la obtención de esta variable se emplea los índices litológicos de la F.A.O., que permiten obtener el índices de resistencia de la roca en un rango de 0.1 - 0.9. con la Tabla 5 que se presenta a continuación.

Tabla 5.  
Índices litológicos propuestos por la FAO

UNIDAD	DESCRIPCIÓN	ÍNDICE DE RESISTENCIA DE LA ROCA
Lava	Roca volcánica reciente, algunas son parte de la formación. Por el tipo de material que en mayor porcentaje están formadas por lava estas unidades se las considera como rocas bien consolidadas.	0,9
Flujo de lava potrerillos		
Lava indiferenciada y piroclastos	Depósito de origen volcánico originado por el transporte de sólidos de todos los tamaños en un medio acuoso. Debido a procesos diagenéticos ha adquirido un alto grado de cementación.	0,8
Lava andesíticas, riocitas y tobas		
Lahar	Piroclastos mezclados con roca volcánica reciente tiene un índice de resistencia menor que el de la lava ya que los piroclastos son roca blanda.	0,6
Piroclastos y lavas	Los depósitos superficiales se hallan constituidos por cantos rodados, guijarros, arenas limos, arenillas, material detrítico acarreado por eventuales crecidas, torrentes, movimientos permanentes de agua o por hielo; esto da como resultado un material poco consolidado debido al mecanismo de transporte, arrastre y erosión.	0,5
Terrazas		0,4
Cono de deyección		
Depósito Coluvial		0,3
Deposito glaciario		

CONTINUA 



<p>Esquistos</p>	<p>Rocas metamórficas bastante cizalladas y fracturadas que se caracterizan por ser un material poco consolidado.</p>	<p>0,2</p>
<p>Deposito aluvial</p>	<p>Depósitos superficiales de materiales como cantos rodados quijarros, y además de diferente granulometría. Todo esto hace que presente una estructura poco consolidada y por lo tanto de baja resistencia.</p>	<p>0,1</p>

Fuente: (MOPT, 1992) citado por (Aviles & Hermosa, 2009)

Con lo mencionado a continuación se presenta la Figura 25 con el mapa de unidades litológicas. (Ver anexo A.7.)

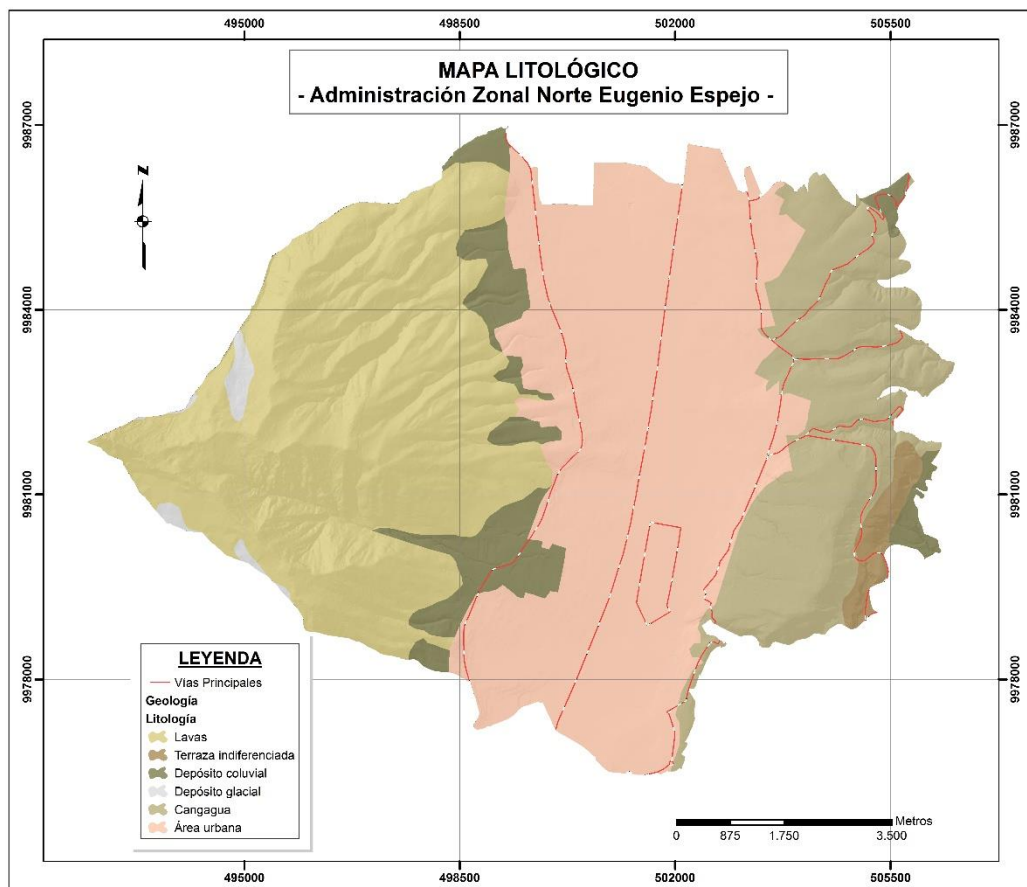


Figura 25. Variable Dureza de la Roca

### 3.3.2 Comportamiento de las variables que intervienen

A modo de resumen en base al literal anterior se analiza cada variable y su comportamiento en base a la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos, para determinar la relación de cada variable a dicho fenómeno.

Las variables que intervienen en el modelo de lógica difusa se dividen en dos grupos:

El primer grupo lo conforman las variables que se relacionan directamente al fenómeno de ocurrencia de deslizamientos, es decir si el valor de la variable analizada es mayor; la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos también es mayor, existe una relación directa entre ambas, si aumenta el valor de  $x$  aumenta el valor de  $y$ . En este caso se encuentran las siguientes variables:

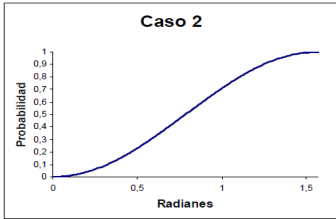
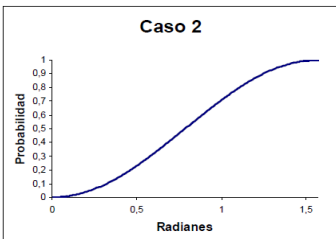
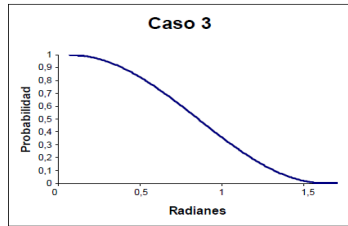
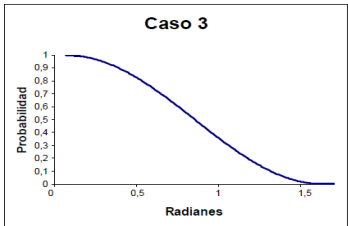
- Pendiente
- Precipitación
- Cobertura vegetal

El segundo grupo lo conforman al contrario las variables que no se relacionan directamente al fenómeno de ocurrencia de deslizamientos, es decir que el valor de la variable analizada va a ser menor mientras la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos incrementa, en este caso la relación es inversamente proporcional. Las variables que cuentan con esta relación son:

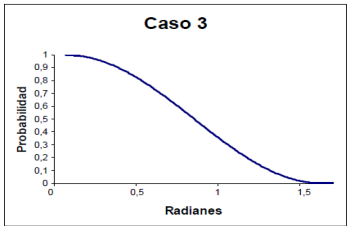
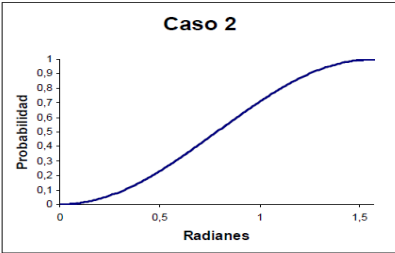
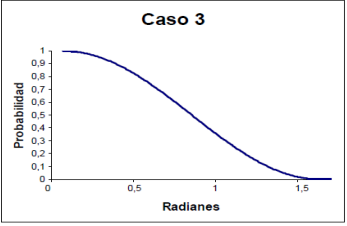
- Distancia a vías de comunicación
- Distancia a recursos hídricos
- Distancia a fallas geológicas
- Dureza de la roca

A continuación se presenta la Tabla 6. con las variables antes descritas ahora con un enfoque en base a la lógica difusa, la cual determina la situación de cada variable en base a los movimientos en masa.

Tabla 6.  
Análisis de las variables de Lógica Fuzzy

DESCRIPCIÓN	CASO FUZZY	
<p><b>Pendiente</b></p> <p>Como se mencionó anteriormente la variable pendiente tiene una relación directamente proporcional a la ocurrencia de deslizamientos en este caso a mayor pendiente mayor susceptibilidad a deslizamientos.</p>		
	<b>RANGO</b>	<b>FUNCIÓN</b>
	0 a $\pi/2$	SENO
<p><b>Precipitación</b></p> <p>La precipitación genera no solo inestabilidad en el terreno sino también la presencia de erosión en el mismo, por lo tanto la probabilidad de ocurrencia a deslizamientos es alta, en este caso la variable es directamente proporcional.</p>		
	<b>RANGO</b>	<b>FUNCIÓN</b>
	0 a $\pi/2$	SENO
<p><b>Distancia a vías de comunicación</b></p> <p>En cuanto a las vías, en la zona de estudio en particular se tiene la presencia de abundantes deslizamientos, es así que mientras más corta sea la distancia de una vía en relación al terreno, mayor será la probabilidad de ocurrencia a un deslizamiento, en este caso la variable es inversamente proporcional.</p>		
	<b>RANGO</b>	<b>FUNCIÓN</b>
	0 a $\pi/2$	COSENO
<p><b>Distancia a recursos hídricos</b></p> <p>Igualmente en el caso de los recursos hídricos, la presencia de estos hace que la erosión aumente así mismo las quebradas son sitios en donde más inestable se encuentra el terreno, es por ello que mientras más corta sea la distancia de un río en relación al terreno mayor será la probabilidad de ocurrencia a un deslizamiento, por lo tanto la variable es inversamente proporcional.</p>		
	<b>RANGO</b>	<b>FUNCIÓN</b>
	0 a $\pi/2$	COSENO

CONTINUA 

DESCRIPCIÓN	CASO FUZZY	
<p><b>Distancia a fallas geológicas</b></p> <p>En este caso la presencia de fallas geológicas en la zona de estudio provoca movimientos de terreno en distintas direcciones lo cual involucra también deslizamientos, es por ello que mientras más larga sea la distancia de una falla en relación al terreno menor será la probabilidad de ocurrencia a un deslizamiento, por lo tanto la variable es inversamente proporcional.</p>		
<p><b>Cobertura vegetal</b></p> <p>La cobertura vegetal da protección al suelo en cuanto a la erosión y por tanto a la ocurrencia a deslizamientos; sin embargo al utilizar la matriz de Satty se está jerarquizando la cobertura vegetal que presenta mayor número de deslizamientos fotointerpretados. Por lo tanto según la Tabla 4 los cuerpos de agua son más propensos a deslizamientos con la ponderación de 0.4082 y la zona antrópica es la menos propensa con un valor de 0.068.</p> <p>En este caso la variable es directamente proporcional ya que a mayor ponderación mayor probabilidad de ocurrencia a deslizamientos.</p>		
<p><b>Dureza de la roca</b></p> <p>En cuanto a la variable dureza de la roca mientras más resistente sea la roca existe menos posibilidades de ocurrencia aun deslizamiento es así que esta variable es inversamente proporcional.</p>		
	<b>RANGO</b>	<b>FUNCIÓN</b>
	0 a $\pi/2$	COSENO
	<b>RANGO</b>	<b>FUNCIÓN</b>
	0 a $\pi/2$	SENO
	<b>RANGO</b>	<b>FUNCIÓN</b>
	0 a $\pi/2$	COSENO

Fuente: (Padilla, 2006)

### 3.4 ANÁLISIS DE MÉTODOS ESTADÍSTICOS

Para complementar la metodología de lógica difusa se realizan análisis con dos métodos estadísticos, el método de regresión lineal y el método de regresión logística.

Para la aplicación de dichos métodos es necesario contar con una variable dependiente, que en este caso será la variable de presencias/ausencias, las

presencias serán representadas con el valor de 1 mientras que las ausencias con el valor de 0, así mismo las variables independientes serán: pendiente, distancia a vías, distancia a ríos, distancia a fallas, dureza de la roca, cobertura vegetal y precipitación.

Es necesario mencionar que dichas variables serán directa o inversamente proporcionales a la variable dependiente, tal como se lo ha mencionado en párrafos anteriores, lo cual se comprobó en los resultados estadísticos que se presentan más adelante.

Para la modelización, se preparó una tabla con todas las variables a utilizar, para ello se utiliza la herramienta “sample” de Arcgis, la cual es útil para obtener un valor para cada celda en base a una vecindad específica.

En este caso se obtuvo los valores para cada variable independiente (pendiente, distancia a vías, distancia a ríos, distancia a fallas, dureza de la roca, cobertura vegetal y precipitación), en base a la ubicación de los puntos de presencia/ausencia. A continuación la Tabla 7 muestra un extracto de la tabla original.

Tabla 7.  
Datos utilizados en métodos estadísticos

ID	Presencia/ Ausencia	X	Y	D.fallas	D.Ríos	Pendiente	D.Vías	C.Vegetal	Dureza Roca	Precipitación
0	0	500759,37	9976692,81	693,41	1152,07	5,33	503,16	680,00	100,00	411,42
1	0	501834,14	9976705,88	577,23	362,40	2,05	88,23	680,00	100,00	420,21
2	0	501084,28	9976866,57	328,91	1007,26	0,00	396,10	680,00	100,00	412,71
3	0	501467,91	9976929,53	182,67	778,07	0,00	471,53	1020,00	100,00	415,24
4	0	501795,01	9976999,58	433,42	534,25	5,13	187,54	680,00	100,00	417,62
5	0	501239,64	9977027,56	112,66	1017,60	0,00	528,00	680,00	100,00	412,72
6	0	501853,32	9977135,75	431,18	551,49	2,68	134,73	680,00	100,00	417,02
7	0	500843,26	9977187,93	516,48	1408,98	1,21	791,12	680,00	100,00	408,96
8	0	500468,33	9977295,05	498,99	1747,43	0,81	1103,38	680,00	100,00	406,23
9	0	501540,73	9977296,11	79,35	897,78	0,00	367,63	680,00	100,00	412,88
10	0	501263,18	9977404,47	215,43	1191,60	2,40	606,60	680,00	100,00	409,89
11	0	500227,30	9977455,74	216,53	1622,14	0,84	1385,35	680,00	100,00	404,19
12	0	500910,21	9977589,64	612,11	1588,52	0,87	960,79	680,00	100,00	406,25
13	0	499870,49	9977670,56	195,12	1232,80	1,51	1063,17	2041,00	100,00	401,69

### 3.5 MODELOS DE PROBABILIDAD

Mediante técnicas de modelamiento y aplicación de los métodos mencionados, se obtuvo varios modelos de probabilidades de susceptibilidad

a deslizamientos en la zona de estudio, los cuales a través de un ajuste permiten escoger que modelo se adapta más a la realidad de dicha zona.

### **3.5.1 Obtención de los modelos cartográficos**

El primer modelo presentado es el modelo cartográfico general el cual indica la obtención de todas las variables independientes que intervienen en el modelo.

A continuación se presenta la Figura 26 en donde se presenta el procedimiento para la obtención de las siete variables independientes que permiten obtener los modelos de probabilidad de ocurrencia a deslizamientos.

#### **3.5.1.1 Generación de modelos de probabilidad mediante lógica difusa**

Mediante lógica Fuzzy, se presenta Figura 27 con el modelo de probabilidad de ocurrencia a deslizamientos que corresponde a los tres primeros modelos de probabilidad estos son:

- Modelo cartográfico 1: Valores de variables originales dados por el programa.
- Modelo cartográfico 2: Percentil Fuzzy al 95% y 5%.
- Modelo cartográfico 3: Percentil Fuzzy al 90% y 10%.

#### **3.5.1.2 Generación de modelos de probabilidad mediante métodos estadísticos**

Así mismo para elaborar los modelos de predicción en base a métodos estadísticos se presenta el procedimiento general en la Figura 28.

- Modelo cartográfico 4: Regresión lineal
- Modelo cartográfico 5: Regresión Logística

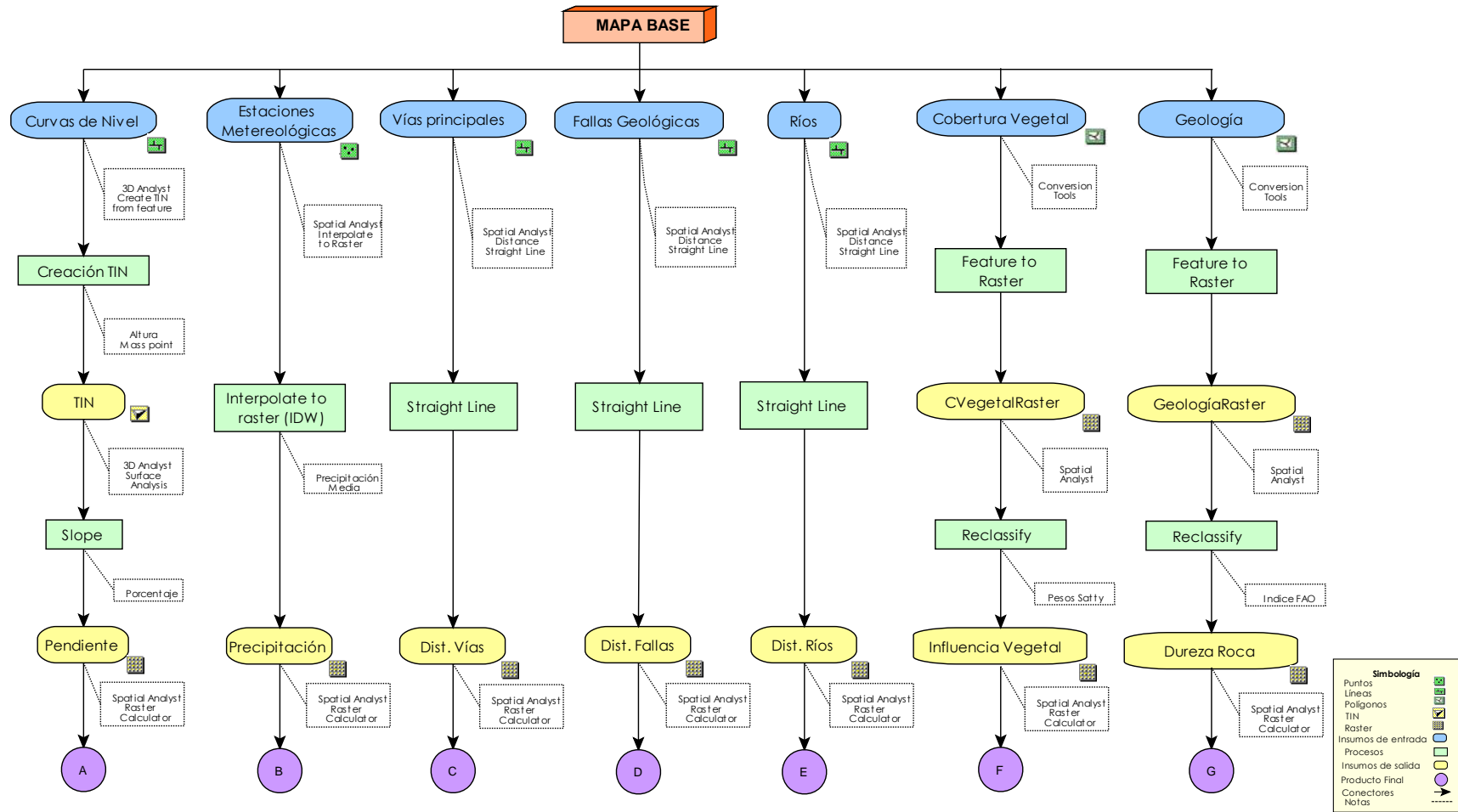


Figura 26. Modelo cartográfico general

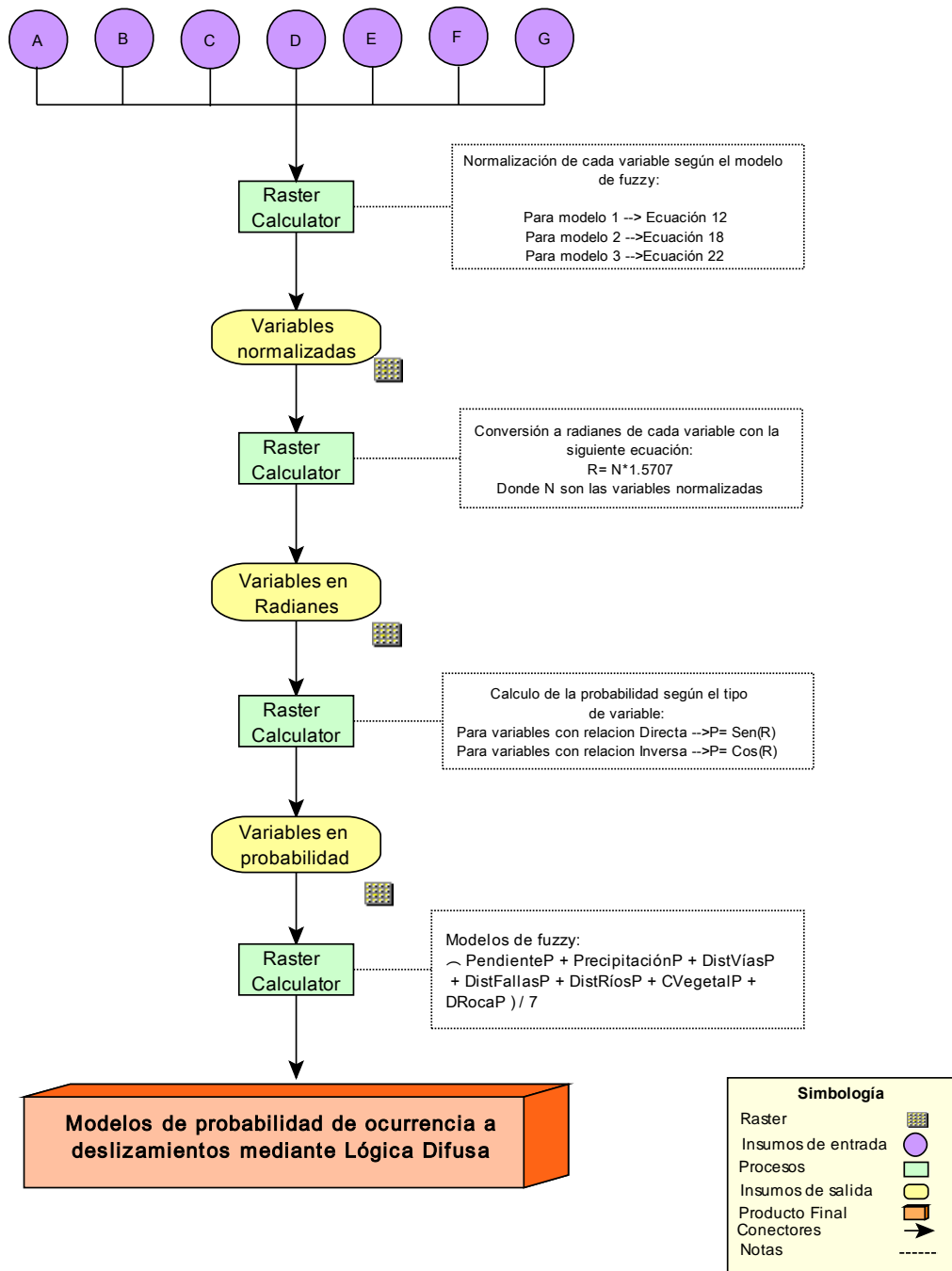


Figura 27. Modelo cartográfico de Lógica Difusa



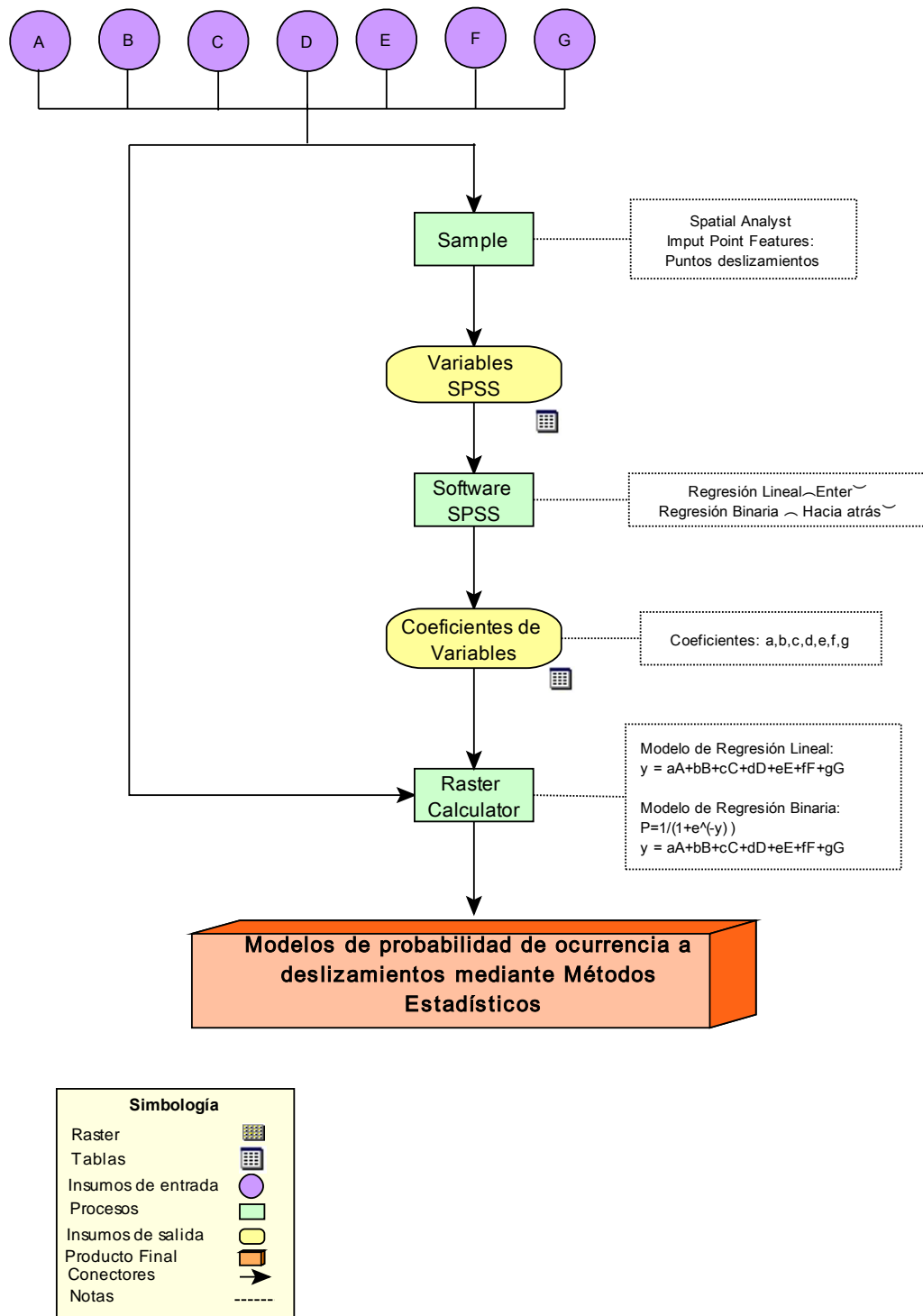


Figura 28. Modelo cartográfico de métodos estadísticos

### 3.5.2 Desarrollo del proceso SIG

Una vez definidos los modelos cartográficos y con la información cartográfica mencionada anteriormente se realizan los modelos de ocurrencia mediante lógica difusa, métodos de geoestadística y FuzzDes modificado, los cuales se desarrollaron en SIG, en este caso el software Arcgis 9.3, mediante la herramienta de Análisis Espacial y la calculadora raster en donde se realizaron distintas operaciones algebraicas las cuales dieron como resultado los diferentes modelos que se trataran a continuación.

#### 3.5.2.1 Modelos de probabilidad ocurrencia de deslizamientos

A continuación se presenta la metodología de los modelos de ocurrencia a deslizamientos definidos anteriormente.

##### 3.5.2.1.1 LÓGICA DIFUSA

*Modelo 1: Valores de variables originales dados por el programa.*

Una vez obtenidas las variables que se van a utilizar en los modelos de lógica difusa, se procede a normalizar dichas variables, para obtener así valores entre 0 y 1, que permitan realizar las operaciones algebraicas que se realizaran a posterior.

Para la normalización de dichas variables en el modelo 1 se utilizara la siguiente Ecuación 12:

$$N = \frac{Vo - Vm}{VM - Vm} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

N= Normalización

Vo= Variable Original

Vm= Valor mínimo

VM= Valor máximo

Después de normalizar las variables se procede a convertir a radianes dependiendo del caso de lógica Fuzzy escogido, en los casos 2 y 3 el rango es de 0 a  $\frac{\pi}{2}$ , por lo que para la conversión a radianes se utiliza el valor correspondiente a  $\frac{\pi}{2}$ , con la Ecuación 13.

$$R = N * 1.5707963268 \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

R= Radianes

N= Variable normalizada

Luego se procede a la obtención de las probabilidades del modelo, aplicando la función de cada variable con la Ecuación 14 y la Ecuación 15:

$$P = \text{Sen}^2(R) \quad \text{Ecuación 14}$$

$$P = \text{Cos}^2(R) \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

P=Probabilidad

R= Variable en radianes

Las ecuaciones 14 y 15 se utilizaran dependiendo de la proporcionalidad de cada variable a su función.

Por ultimo para obtener el Modelo 1, se procede a extraer al promedio, (Ecuación 16) que es la suma de todas las probabilidades de cada variable dividida para el número total de ellas.

$$Y = (\text{pendiente} + \text{precipitación} + \text{dvías} + \text{dhídrica} + \text{dfallas} + \text{cvegetal} + \text{durezza}) / 7 \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

Y= Probabilidad del modelo

*Modelo 2: Percentil Fuzzy al 95% y 5%.*

En este modelo, para la normalización de las variables se utilizan de igual manera los valores máximos y mínimos de cada variable y a su vez el número total de la muestra de deslizamientos fotointerpretados se les aplica el cinco percentil, obteniéndose los valores más cercanos y lejanos:

Valor más cercano: 0.05

Valor más lejano: 0.95

Al aplicar estos valores en la ecuación de la recta (Ecuación 17), se linealiza la dispersión de los deslizamientos, a su vez se lleva los valores de los raster de cada variable a valores entre 0 y 1. La aplicación de la ecuación de la recta es la obtención de la normalización en este modelo (Ecuación 18 y Ecuación 19) para la normalización de las variables según el caso de lógica Fuzzy al que pertenecen:

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) \quad \text{Ecuación 17}$$

Para el segundo caso se tiene lo siguiente:

P1 (Vm; 0.05)

P2 (VM; 0.95)

$$Pp = 0.05 + \left( \frac{0.9}{VM + Vm} \right) * (Vo - Vm) \quad \text{Ecuación 18}$$

Para el tercer caso se tiene lo siguiente:

P1 (Vm; 0.95)

P2 (VM; 0.05)

$$Pp = 0.95 + \left( \frac{0.9}{VM + Vm} \right) * (Vo - Vm) \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

Pp= Pre probabilidad (valor de normalización)

Vo=Variable original

VM= Valor máximo

Vm= Valor mínimo

Luego de normalizar las variables se procede a convertir a radianes dependiendo del caso de lógica Fuzzy escogido y después se procede a la obtención de las probabilidades del modelo, aplicando la función de pertenencia a cada variable, con el proceso del modelo anterior.

Por ultimo para obtener el Modelo 2, se procede a extraer al promedio, (Ecuación 20) que es la suma de todas las probabilidades de cada variable dividida para el número total de ellas.

$$Y = (\text{pendiente} + \text{precipitación} + \text{dvías} + \text{dhídrica} + \text{dfallas} + \text{cvegetal} + \text{dureza}) / 7 \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

Y= Probabilidad del modelo

*Modelo 3: Percentil Fuzzy al 90% y 10%.*

En este modelo, para la normalización de las variables se utilizan de igual manera los valores máximos y mínimos de cada variable y a su vez el número total de la muestra de deslizamientos fotointerpretados se les aplica el diez percentil, obteniéndose los valores más cercanos y lejanos:

Valor más cercano: 0.1

Valor más lejano: 0.90

Al aplicar estos valores en la ecuación de la recta (Ecuación 21), se linealiza la dispersión de los deslizamientos, a su vez se lleva los valores de los raster de cada variable a valores entre 0 y 1. La aplicación de la ecuación de la recta es la obtención de la normalización (Ecuación 21 Ecuación 22 y Ecuación 23) en este modelo para la normalización de las variables según el caso de lógica Fuzzy al que pertenecen:

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) \quad \text{Ecuación 21}$$

Para el segundo caso se tiene lo siguiente:

P1 (Vm; 0.1)

P2 (VM; 0.9)

$$Pp = 0.1 + \left( \frac{0.8}{VM + Vm} \right) * (Vo - Vm) \quad \text{Ecuación 22}$$

Para el tercer caso se tiene lo siguiente:

P1 (Vm; 0.9)

P2 (VM; 0.1)

$$Pp = 0.9 + \left( \frac{0.8}{VM + Vm} \right) * (Vo - Vm) \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde:

Pp= Pre probabilidad (valor de normalización)

Vo=Variable original

VM= Valor máximo

Vm= Valor mínimo

Luego de normalizar las variables se procede a convertir a radianes dependiendo del caso de lógica Fuzzy escogido y después se procede a la obtención de las probabilidades del modelo, aplicando la función de pertenencia a cada variable, con el proceso del modelo anterior.

Por ultimo para obtener el Modelo 3, se procede a extraer al promedio, (Ecuación 24) que es la suma de todas las probabilidades de cada variable dividida para el número total de ellas.

$$Y = (pendiente + precipitación + dvías + dhídrica + dfallas + cvegetal + dureza) / 7 \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde:

Y= Probabilidad del modelo

### 3.5.2.1.2 MÉTODOS DE ESTADÍSTICOS

Los cálculos para las regresiones presentadas a continuación se realizaron con el paquete estadístico SPSS. Se debe ingresar los valores obtenidos en cada variable independiente para los puntos tanto de presencia como de ausencia, las ausencias tendrán un valor de 0 y las presencias de 1, convirtiéndose esta en la variable dependiente del modelo.

Se ensayaron diversos métodos automáticos, comprobando los criterios por los cuales las variables se introducen y se eliminan de las ecuaciones: por pasos hacia adelante, por pasos hacia atrás e introducir todos.

#### *Modelo 4: Regresión lineal*

Tras probar diferentes métodos automáticos de selección de variables, se eligió el método "Enter", dicho método en el que todas las variables de un bloque se introducen en un solo paso. Es el método por defecto

Para determinar el grado en el que una recta se ajusta a una nube de puntos se utiliza el coeficiente de determinación  $R^2$ , se trata de una medida estandarizada que toma valores entre 0 y 1 (0 cuando las variables son independientes y 1 cuando entre ellas existe relación perfecta). Este coeficiente posee una interpretación muy intuitiva: representa el grado de ganancia que podemos obtener al predecir una variable basándonos en el conocimiento que tenemos de otra u otras variables. (UCM, 2014)

Para el modelo de regresión lineal realizado el valor del coeficiente  $R^2$  es igual a 0.871 como ya se mencionó anteriormente si el valor tiende a 1 indica que existe una relación positiva entre la variable dependiente y las variables independientes.

La Tabla 8 contiene los coeficientes no estandarizados (en directas) y estandarizados de la recta de regresión estimada. Concretamente, la columna etiquetada como B permite escribir la recta de regresión en puntuaciones directas. Así el modelo 4 de regresión lineal múltiple, está dado por la siguiente Ecuación 25:

$$Y = 0.5785 - 0.0039 \text{ Pendiente} - 0.0067 \text{ DRoca} + 0.0001 \text{ CVegetal} - 0.0001 \text{ DVías} - 0.0001 \text{ DRíos} + 0.0025 \text{ Precipitación} - 0.0000 \text{ D.Fallas}$$

Ecuación 25

Tabla 8.  
Resultados Regresión Lineal

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	Constante	0,5785	0,270		2,141	0,033
	D. Roca	-0,0067	0,000	-0,566	-19,067	0,000
	Pendiente	0,0039	0,001	0,153	7,240	0,000
	Precipitación	0,0025	0,003	0,021	0,928	0,354
	D. Ríos	-0,0001	0,000	-0,192	-6,365	0,000
	C. Vegetal	0,0001	0,000	0,080	4,639	0,000
	D. Vías	-0,0001	0,000	-0,084	-3,682	0,000
	D. Fallas	0,0000	0,000	0,163	9,381	0,000

Fuente: SPSS, 2015

Según estos resultados, variables como la pendiente y dureza de roca son de gran importancia para el modelo de ocurrencia a deslizamientos. Los signos de los coeficientes para cada variable son lógicos en relación al conocimiento previo que se tiene en base a la relación inversa o directa de cada variable antes analizada.

Los signos negativos representan la relación inversamente proporcional, así por ejemplo se tiene la distancia a vías, tal como se había planteado anteriormente mientras más corta sea la distancia de una vía en relación al terreno, mayor será la probabilidad de ocurrencia, también se tiene dureza de la roca, lo que indica a mayor dureza de la roca menor presencia de deslizamientos.

En cuanto a la significancia estadística cuando se presenta un valor inferior a 0,05, se puede decir que las variables están aportando al modelo; sin embargo para una variable el resultado no es el esperado, es el caso de la precipitación en este caso se presenta un coeficiente superior al umbral



establecido, dicho resultado se puede deber a posibles efectos de multicolinealidad.

#### *Modelo 5: Regresión logística*

Esta técnica de regresión es utilizada cuando la variable dependiente a predecir es dicotómica, de igual manera que en la regresión lineal tras probar diferentes métodos automáticos de selección de variables, se eligió el método "Hacia atrás", dicho método se inicia con un modelo que incluye todas las variables independientes, luego de ello realiza varios pasos en los cuales se eliminan las menos significativas para el modelo. Este método proporciono 3 pasos, entre ellos se escogió el último modelo que lograba el porcentaje de acierto global más alto; sin embargo no incluye el total de las variables.

Para el modelo de regresión logística realizado en el modelo escogido (paso 3), el valor del coeficiente  $R^2$  es igual a 0.731 como ya se mencionó anteriormente si el valor tiende a 1 indica que existe una relación positiva entre la variable dependiente y las variables independientes.

La Tabla 9 recoge los tres pasos que efectúa el método "hacia atrás" con los coeficientes y estadísticos de los modelos calculados. La interpretación de los valores de (B) de cada una de las variables permite conocer la contribución que cada variable tiene en el ajuste del modelo, así como la explicación física del mismo. Así el modelo 5 de regresión lineal múltiple, está dado por la siguiente Ecuación 26:

$$P = \frac{1}{1 + e^{-y}}$$

$$y = -6.6077 + 0.37755 \text{ Pendiente} - 0.05747 \text{ Dureza Roca} \\ + 0.01635 \text{ CVegetal} - 0.00422 \text{ DVías} \\ - 0.01524 \text{ DRíos}$$

Ecuación 26

Tabla 9.  
Resultados de la Regresión Logística

Variables en la ecuación						
		B	E.T.	Wald	gl	Sig.
Paso 1 <sup>a</sup>	Pendiente	0,43447	0,268846	2,61159589	1	0,106
	D. Roca	- 0,20591	0,15018	1,87979531	1	0,17
	C. Vegetal	0,03509	0,022693	2,39084269	1	0,122
	D. Ríos	- 0,03221	0,020133	2,55964814	1	0,11
	D. Vías	- 0,00714	0,004346	2,70294374	1	0,1
	D. Fallas	- 0,00053	0,000957	0,30176673	1	0,583
	Precipitación	- 1,38663	1,093028	1,60938434	1	0,205
	Constante	123,675	101,8592	1,47421596	1	0,225
Paso 2 <sup>a</sup>	Pendiente	0,45879	0,267282	2,94642572	1	0,086
	D. Roca	-0,1716	0,107565	2,54502789	1	0,111
	Vegetal	0,03018	0,018022	2,80475004	1	0,094
	D. Ríos	- 0,02902	0,016774	2,9925112	1	0,084
	D. Vías	- 0,00701	0,003763	3,4698177	1	0,062
	Precipitación	- 1,20365	0,889457	1,83127274	1	0,176
	Constante	108,345	83,27559	1,69270532	1	0,193
Paso 3 <sup>a</sup>	Pendiente	0,37755	0,182986	4,25711656	1	0,039
	D. Roca	- 0,05747	0,025893	4,926753	1	0,026
	Vegetal	0,01635	0,006073	7,24931084	1	0,007
	D. Ríos	- 0,01524	0,005408	7,94674814	1	0,005
	D. Vías	- 0,00422	0,001778	5,62316063	1	0,018
	Constante	- 6,60771	4,341981	2,31593068	1	0,128

Fuente: SPSS, 2015

Según estos resultados, nuevamente variables como la pendiente y dureza de roca son de gran importancia para el modelo de ocurrencia a deslizamientos.

Se pueden observar los tres pasos que realiza el método, en el primer paso se incluyen todas las variables independientes obteniendo una significancia muy baja, con un nivel superior a 0,05, para cada una de ellas. Así mismo se puede observar que en este caso la variable precipitación presenta signo negativo en su coeficiente, lo cual es contradictorio ya que en análisis anteriores se definió como variable directamente proporcional.

En el último paso al eliminar la variable distancia a fallas y la precipitación se obtiene un mejor nivel de significancia en el modelo, con un nivel inferior a 0,05. En este tercer paso todos los signos de los coeficientes (B) son lógicos en relación al conocimiento previo que se tiene en base a la relación inversa o directa de cada variable antes analizada.

Con ello se puede confirmar tal como se mencionó en la regresión lineal que el signo negativo presente en la variable precipitación, así como la baja significancia presentada en el primer paso del modelo actual, son debido a efectos de multicolinealidad o correlación entre las demás variables.

### **3.5.2.1.3 FUZZDES MODIFICADO**

Con la finalidad de mejorar la capacidad de representar la realidad del área de estudio y obtener mejores resultados, se utilizara un algoritmo modificado, el cual básicamente consiste en asignar pesos o ponderaciones a las distintas variables que intervienen en la probabilidad de ocurrencia a deslizamientos y a su vez utilizar el mejor modelo según los casos de lógica difusa.

Para lograr lo antes mencionado se eligió el método de análisis jerárquico propuesto por Thomas Saaty, el cual se trata de un procedimiento de comparación por pares de los criterios que parte de una matriz cuadrada en la cual el número de filas y columnas está definido por el número de criterios a ponderar. Así se establece una matriz de comparación entre pares de criterios, comparando la importancia de cada uno de ellos con los demás. El objetivo de esta etapa es calcular la prioridad de cada elemento. (Ramírez, 2004)

En base a la preliminar aplicación de métodos estadísticos y criterio propio, se obtiene el orden de importancia de las variables independientes en relación a la variable dependiente, según el rango mencionado anteriormente. La matriz empleada para la ponderación de las variables se indica en la Tabla 10.

Una vez determinada la importancia de la variable de cada fila en relación a la variable de su columna correspondiente, así, es preciso primero, completar toda la matriz introduciendo en el triángulo superior-derecho el inverso del valor de la celdilla correspondiente del triángulo inferior-izquierdo.

Luego es preciso sumar cada columna para obtener un marginal de columna. Por último, calcular la media de los pesos para cada línea. (Ramírez, 2004)

Tabla 10.  
Matriz de importancia para cada variable

	Pendiente	D. Roca	D. Vías	C.Vegetal	D. Ríos	Precipitación	D. Fallas
Pendiente	1	2	3	5	6	8	9
D. Roca	0,50	1	1,50	2,50	3,00	4,00	4,50
D. Vías	0,33	0,67	1	1,67	2,00	2,67	3,00
C.Vegetal	0,20	0,40	0,60	1	1,20	1,60	1,80
D. Ríos	0,17	0,33	0,50	0,83	1	1,33	1,50
Precipitación	0,13	0,25	0,38	0,63	0,75	1	1,13
D. Fallas	0,11	0,22	0,33	0,56	0,67	0,89	1

Una vez realizado dicho procedimiento se muestra la Tabla 11 con las ponderaciones de Saaty para cada variable.

Tabla 11.  
Pesos Saaty

Pendiente	0,409
D. Roca	0,2061
D. Vías	0,1369
C.Vegetal	0,0821
D. Ríos	0,0685
Precipitación	0,0518
D. Fallas	0,0456

Para que la consistencia de los juicios emitidos en la matriz de comparación por pares sea aceptable no se debe sobrepasar el 0.1 de la razón de consistencia. El valor de consistencia que se obtuvo es 0 por lo que se considera que se obtuvo juicios consistentes en cuanto a las variables.

Luego de obtener dichas ponderaciones, tal como se mencionó anteriormente se debe elegir el modelo mejor ajustado de la aplicación de lógica difusa en este caso el *Modelo 3: Percentil Fuzzy al 90% y 10%*, es el que presenta un mejor ajuste. Con las variables normalizadas de dicho modelo y los pesos antes calculados se procede a estimar la probabilidad de ocurrencia a deslizamientos, para ello se recurre a una sumatoria lineal ponderada de las variables, presentadas en la Ecuación 27:

$$Y = 0.409 * Pendiente + 0.2061 * Droca + 0.1369 * Dvías + 0.0821 * CVegetal + 0.0685 * Dhídrica + 0.0518 * Precipitación + 0.0456 * Dfallas \quad \text{Ecuación 27}$$

### 3.5.3 Ajuste de los modelos

Para realizar el ajuste de los modelos se utilizan puntos de presencia a deslizamientos y puntos de ausencia a deslizamientos, los cuales representan la realidad en terreno. Con dichos puntos se obtiene los valores presentes en los distintos modelos y se procede a calcular el error estándar, que es un conjunto de datos o una medida de dispersión, que indica cuanto pueden alejarse los valores respecto al promedio (media), por lo tanto es útil para buscar la probabilidad de que un evento ocurra (Andocilla, 2012). El ajuste realizado se basa en la Ecuación 28.

$$N = Valor\ medido - Valor\ calculado \quad \text{Ecuación 28}$$

$$N = 1 - Y$$

Donde:

N= ajuste

Valor medido= 1 o valor de los puntos de muestra

Valor calculado = cálculo de la desviación estándar de los promedios de probabilidades (Y) de los diferentes modelos.

Con este ajuste se puede determinar la veracidad de ocurrencia del fenómeno de deslizamientos en cada modelo, ya que al aplicar los casos de lógica Fuzzy cada modelo muestra variabilidad en sus resultados; sin embargo comparando los puntos de presencia/ausencia de deslizamientos se puede determinar qué modelo se ajusta más a la realidad del terreno.

A continuación en la Tabla 12 se presenta los errores estándar de los modelos aplicados y sus respectivos ajustes, el mejor modelo es el que obtiene un mayor valor de ajuste acercándose al valor de 1 o 100%.

Tabla 12.  
Ajuste de los modelos

	Modelo 1	Modelo2 (95 y 5 %)	Modelo3 (90 Y 10%)	Modelo4 Regresión Lineal	Modelo5 Regresión Logística	Modelo6 Combinado
Mínimo	0,050	0,064	0,081	0,011	0,000	0,074
Máximo	0,873	0,837	0,873	0,970	1,000	0,856
Promedio	0,415	0,418	0,420	0,499	0,560	0,383
Error Estándar	0,227	0,223	0,216	0,267	0,493	0,217
Ajuste	0,773	0,777	0,784	0,733	0,507	0,783

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS

#### 4.1 Análisis de los modelos obtenidos.

En el presente proyecto se obtuvo seis modelos de probabilidad de ocurrencia a deslizamientos, cada modelo se realizó con las distintas metodologías antes planteadas.

Para la representación de los mismos se utiliza una escala de colores que va del verde al rojo, siendo el verde: probabilidad baja, amarillo: probabilidad media, naranja: probabilidad alta y rojo: probabilidad muy alta a ocurrencia.

Las tonalidades rojas indican mayor probabilidad de ocurrencia a deslizamientos; en la zona de estudio se presenta en las zonas aledañas a las vías que se encuentran en lugares con pendientes altas, en este caso mayoritariamente en la vía Simón Bolívar que atraviesa las parroquias: Ñaquito, Jipijapa y San Isidro del Inca. Al contrario las tonalidades verdes indican la baja probabilidad de que ocurra un deslizamiento, esta zona comprende básicamente la zona urbana de Quito que se encuentra comprendida entre las avenidas: Eloy Alfaro y Mariscal Sucre.

Como complemento y para la comprobación de dichos modelos se realizó una salida de campo a fin de comprobar la susceptibilidad de ocurrencia a deslizamientos en el área de estudio y para así poder detallar de mejor manera que modelo se ajusta a la realidad de dicha zona.

#### 4.2 Descripción de los modelos obtenidos.

A continuación se presentan los seis modelos obtenidos tanto con la metodología de Fuzzy como con los métodos estadísticos, así mismo se presenta un modelo combinado en el cual se asignan pesos a las variables utilizadas para así obtener una mejor representación de la probabilidad de ocurrencia a deslizamientos en el área de estudio.

#### **4.2.1 Modelo 1: Valores de variables originales dados por el programa.**

En el primer modelo de probabilidad se utilizan los valores originales, es decir en este caso las variables independientes toman un valor entre 0 y 1, como probabilidad de ocurrencia.

La Figura 29 muestra el mapa de probabilidad de ocurrencia a deslizamientos del modelo1 (Ver anexo C.1). El mismo presenta un ajuste del 0.773.

Para la administración Zonal Norte Eugenio Espejo, se tiene que toda la parte urbana ubicada en las zonas planas del DMQ con pendientes inferiores al 25%, presentan una probabilidad baja de ocurrencia a deslizamientos con una tonalidad de verde claro, tal como se esperaba, ya que en la salida de campo no se registraron deslizamientos en el área, los sectores que se incluyen en esta categoría van desde la avenida Eloy Alfaro hasta la avenida Mariscal Sucre, entre ellos se encuentran: zonas aledañas al ex Aeropuerto, La Concepción, Chaupicruz, La el Inca, la Luz, La Kennedy, Jipijapa, Los Granados, Ñaquito Bajo, Granados, Batán Bajo, Av. Naciones Unidas, Parque la Carolina y Av. Mariana de Jesús.

Se puede observar que la probabilidad media en tonos de amarillo se encuentra en la parte noroccidental de la administración, esta incluye a las zonas aledañas de la Av. Mariscal Sucre, como por ejemplo el Pinar Alto, una parte de Atucucho, y San Fernando, en esta zona la pendiente es de 25% en adelante.

La probabilidad alta con tonos anaranjados se encuentra mayoritariamente en las parroquias de Cochapamba y Rumipamba, parte en las laderas del Pichincha y en el sector de Atucucho, en este sector se registraron gran cantidad de deslizamientos debido a la fuerte pendiente presente en el área, así como también cerca a las quebradas.



### MODELO DE OCURRENCIA A DESLIZAMIENTOS 1 - Administración Zonal Norte Eugenio Espejo -

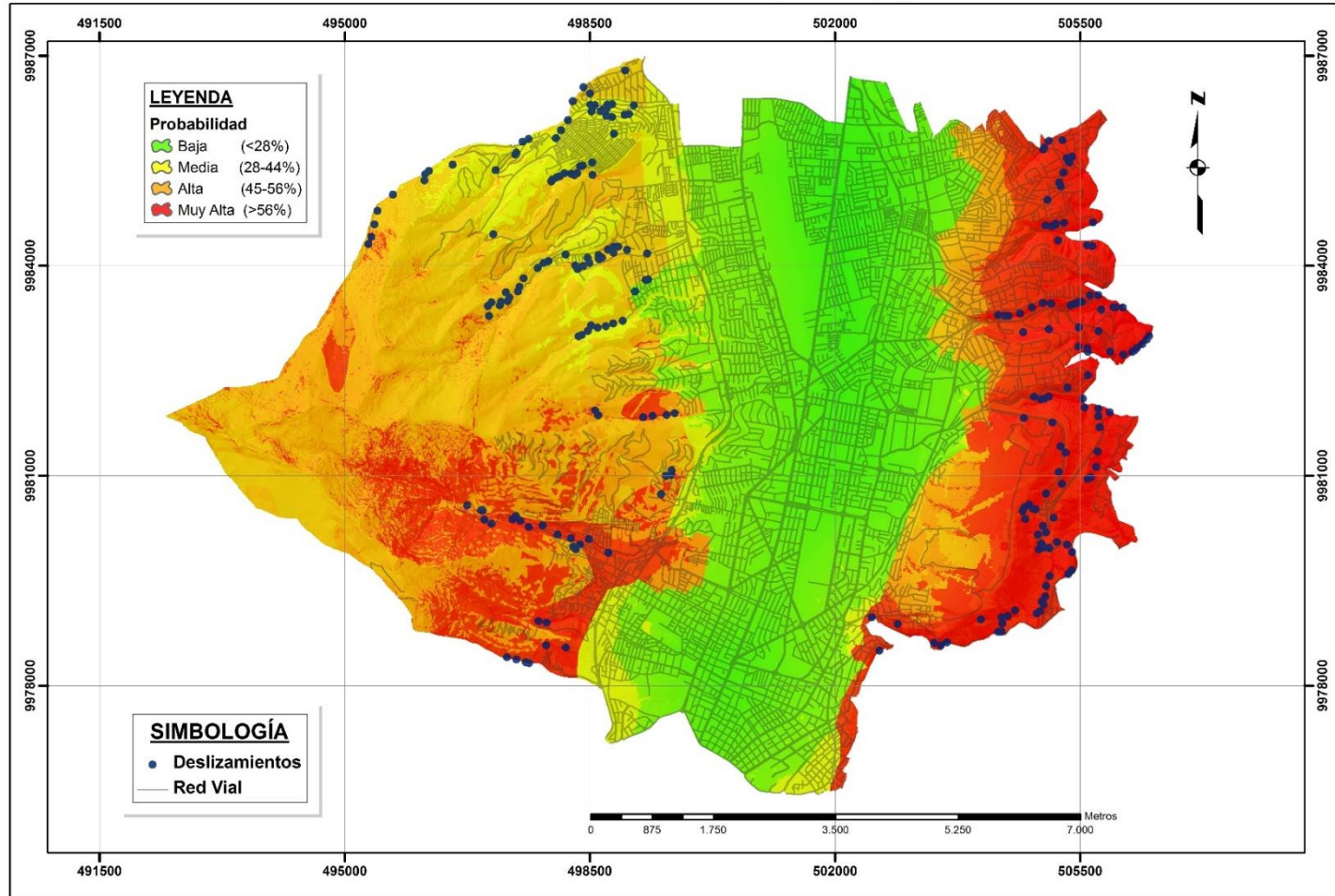


Figura 29. Modelo de ocurrencia a deslizamientos 1

Por último la probabilidad muy alta representada en color rojo se encuentra evidentemente alrededor de la Av. Simón Bolívar así como también en la parte suroccidental de la administración.

En el sector de la Av. Simón Bolívar la apertura de vías ha desestabilizado los taludes debido a la presencia de pendiente en la zona, así mismo se registró varios puntos de deslizamientos en las zonas aledañas a los ríos con ausencia de vegetación.

Para la parte suroccidental entre la parroquia Rumipamba y Belisario Quevedo se encuentra el Rio Ingapirca, el cual presenta varios deslizamientos, debido a la escasa vegetación, así mismo la pendiente alta de la zona podría ser otra de las causas de los mismos.

Igualmente realizando una comparación entre los puntos de presencias observados en campo y el modelo de probabilidad obtenido se presenta la Tabla 13 con los siguientes resultados:

Tabla 13.  
Dispersión puntos de presencia Modelo 1

	Modelo 1	# Puntos	Porcentaje
Probabilidad	Baja	0	0,0%
	Media	27	11,2%
	Alta	67	27,8%
	Muy Alta	147	61,0%
	Total	241	100%

Al analizar la Tabla 13 se tiene que para las 241 presencias registradas tanto en campo como en fotointerpretación digital, el 61% se encuentran en la probabilidad alta, el 28% se encuentra en probabilidad alta y el 11% presenta media probabilidad.

Como se puede observar los puntos de presencia se enmarcan básicamente en la zona alta y muy alta de deslizamientos, del modelo predicho con un 89%, estos puntos corresponden a la zona de la Av. Simón Bolívar y a las laderas del Pichincha, que como se había mencionado anteriormente cuentan con varios registros de deslizamientos, por lo tanto

dicho modelo con un ajuste del 0.773 representa de manera aceptable la realidad del terreno.

#### **4.2.2 Modelo 2: Percentil Fuzzy al 95% y 5%.**

Para el segundo modelo de probabilidad se utilizan las variables al 95% y 5%, es decir en este caso las variables independientes toman un valor entre 0.05 y 0.95, como probabilidad de ocurrencia.

La Figura 30 muestra el mapa de probabilidad de ocurrencia a deslizamientos del modelo 2 (Ver anexo C.2.). El mismo presenta un ajuste del 0.777.

El presente modelo representa la probabilidad baja en tono verde claro, esta categoría incluye la zona urbana que cuenta con pendientes bajas del DMQ, en el norte los sectores aledaños al ex aeropuerto pasando el parque la Carolina hasta llegar a la Av. Patria.

La probabilidad media se presenta en tono amarillo esta incluye a las zonas noroccidentales de la Administración, en este caso se presenta el sector de Cotocollao, el barrio Bellavista y una parte de la zona de Atucucho.

Atucucho está dividido en dos categorías la categoría media y la categoría alta, como se puede observar los puntos de presencia observados en campo corresponden a puntos aledaños a quebradas, estos puntos y esta zona del sector Atucucho se encuentran representados en la probabilidad alta con un tono anaranjado.

De igual forma la probabilidad alta en este modelo se encuentra en las laderas del pichincha y en su frente se encuentra representada en las zonas cercanas al parque Metropolitano a la altura de la Av. Eloy Alfaro.

Si bien en este modelo la probabilidad muy alta representada con el color rojo se ha reducido un poco en relación al anterior modelo, sigue presentándose en el sector de la Av. Simón Bolívar la cual presenta gran cantidad de puntos muestreados como presencia a deslizamientos, así mismo

en las laderas del Pichincha en la parte suroccidental se presenta esta tonalidad, analizando las variables esto se debe a la fuerte pendiente presente en dicha zona con un valor superior al 65%, así mismo la presencia de vegetación natural ya que cuenta con una ponderación media de probabilidad.

Igualmente realizando una comparación entre los puntos de presencias observados en campo y el modelo de probabilidad obtenido se presenta la Tabla 14 con los siguientes resultados:

Tabla 14.  
Dispersión puntos de presencia Modelo 2

	Modelo 2	# Puntos	Porcentaje
Probabilidad	Baja	0	0,0%
	Media	21	8,7%
	Alta	72	29,9%
	Muy Alta	148	61,4%
	Total	241	100%

Al analizar la Tabla 14 se tiene que para las 241 presencias registradas tanto en campo como en fotointerpretación digital, el 61% se encuentran en la probabilidad alta, el 30% se encuentra en probabilidad alta, el 9% presenta media probabilidad.

Como se puede observar y en comparación al modelo anterior la probabilidad media bajo de 11% a 9%, esto significa que el 3% de diferencia está cayendo en la probabilidad alta lo cual es más acertado en este modelo.

La probabilidad alta y muy alta refleja el 91% de los puntos de presencia, estos puntos corresponden en su mayoría a la zona de la Av. Simón Bolívar, también se encuentran en las laderas del Pichincha, en esta categoría se encuentran los puntos muestreados en la zona de Atucucho que se mencionó en párrafos anteriores. El presente modelo con un ajuste del 0.777 representa de manera aceptable la realidad del terreno.

### MODELO DE OCURRENCIA A DESLIZAMIENTOS 2 - Administración Zonal Norte Eugenio Espejo -

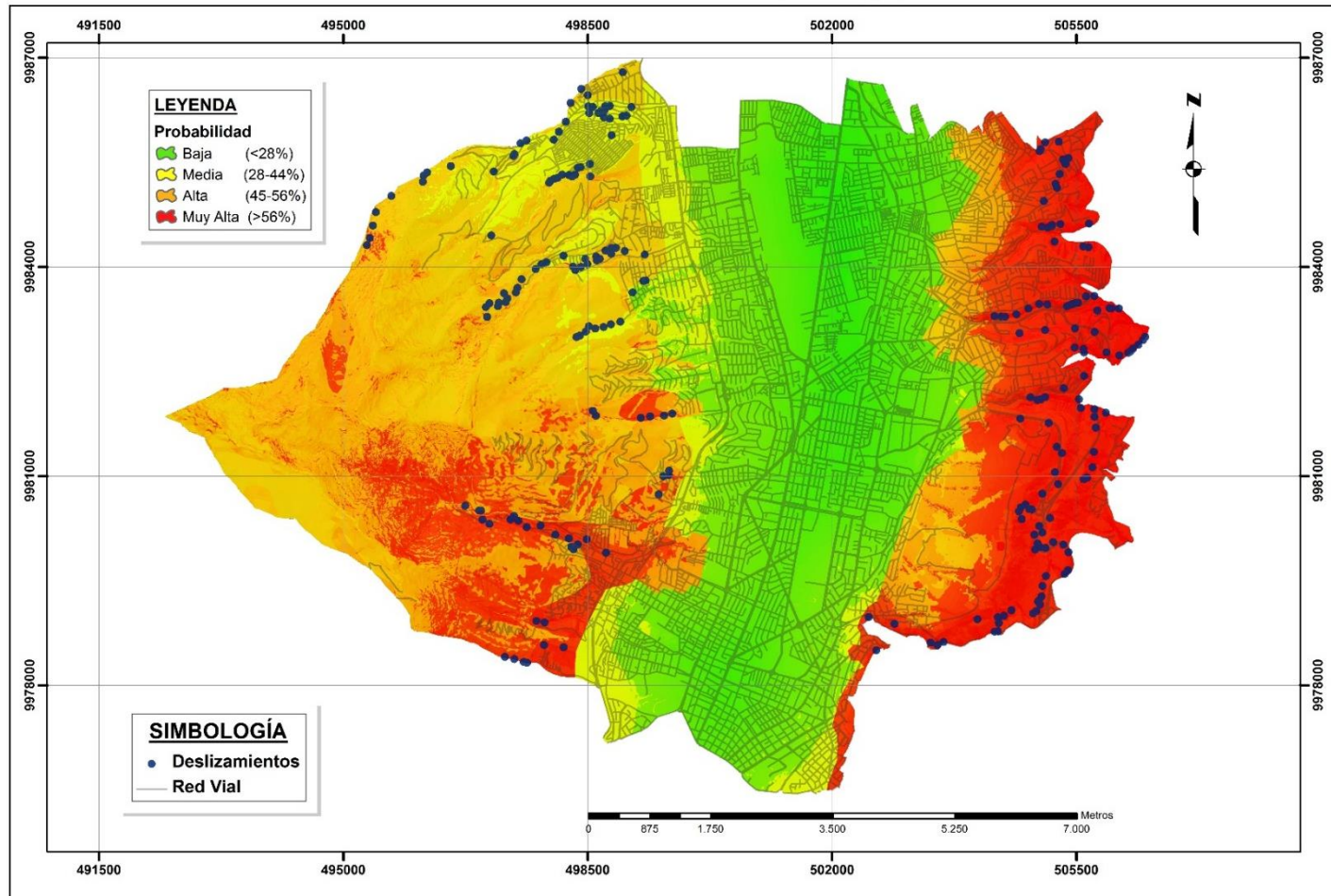


Figura 30. Modelo de ocurrencia a deslizamientos 2

#### **4.2.3 Modelo 3: Percentil Fuzzy al 90% y 10%.**

Para el tercer modelo de probabilidad se utilizan las variables al 90% y 10%, es decir en este caso las variables independientes toman un valor entre 0.1 y 0.90, como probabilidad de ocurrencia.

La Figura 31 muestra el mapa de probabilidad de ocurrencia a deslizamientos del modelo 2 (Ver anexo C.3.).El mismo presenta un ajuste del 0.784.

En este modelo la probabilidad baja representada con tonos de verde claro se sigue manteniendo en la zona urbana del DMQ, que va desde el ex aeropuerto hasta la Av. Patria; sin embargo se puede notar una diferencia en la parte noroccidental cerca a la Av. Mariscal Sucre, esta zona en el modelo está representada por una probabilidad media.

La probabilidad media se presenta en tono amarillo esta incluye también a las zonas noroccidentales de la Administración, en este caso se presenta el sector de Cotocollao, el barrio Bellavista y una parte de la zona de Atucucho.

En cuanto a la probabilidad alta representada en tonos anaranjados se encuentra tanto en las laderas del Pichincha como en las zonas aledañas al parque Metropolitano, así mismo en esta categoría se encuentra una zona de Atucucho, dicha zona y por comprobación en campo es la que muestra la mayor presencia de deslizamientos ya que cuenta con varias quebradas y zonas de alta pendiente.

La probabilidad alta se representa en tonos rojos y se puede evidenciar que se representa mayoritariamente en la zona de la Av. Simón Bolívar y también en la parte suroccidental de las laderas del Pichincha, esto se da debido a la fuerte pendiente presente en la zona superior al 65%.

**MODELO DE OCURRENCIA A DESLIZAMIENTOS 3**  
**- Administración Zonal Norte Eugenio Espejo -**

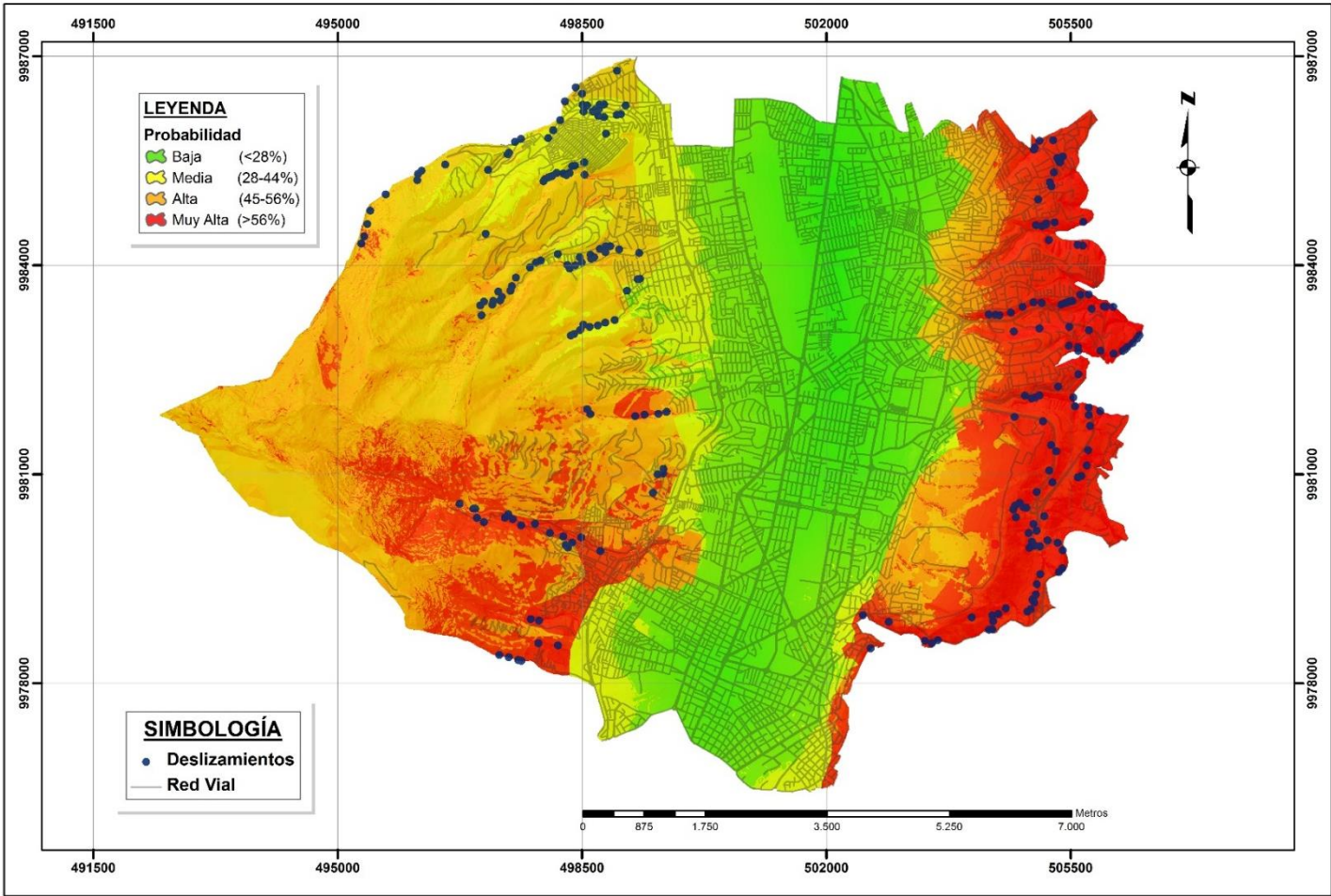


Figura 31. Modelo de ocurrencia a deslizamientos 3

Igualmente realizando una comparación entre los puntos de presencias observados en campo y el modelo de probabilidad obtenido se presenta la Tabla 15 con los siguientes resultados:

Tabla 15.  
Dispersión puntos de presencia Modelo 3

	Modelo 3	# Puntos	Porcentaje
Probabilidad	Baja	0	0,0%
	Media	22	9,1%
	Alta	70	29,0%
	Muy Alta	149	61,8%
	Total	241	100%

Como se puede observar en la Tabla 15 se tiene que para las 241 presencias registradas tanto en campo como en fotointerpretación digital, el 62% se encuentran en la probabilidad alta, el 29% se encuentra en probabilidad alta y el 9% presenta media probabilidad.

En este caso no se han encontrado puntos de presencia en la probabilidad baja lo cual indica que este modelo tiene mejor relación con la realidad.

Como se puede observar y en comparación al modelo anterior la probabilidad alta y muy alta reflejan el 91 % de los puntos de presencia, con ello se está alcanzando un buen acierto en el modelo 3 ya que estos puntos se encuentran presentes tanto en la Av. Simón Bolívar como en las laderas del Pichincha. Es importante mencionar que de los tres modelos de lógica difusa el presente es el que mejor ajuste ha conseguido con un valor de 0.784, dicho modelo una mejor realidad del área de estudio.

#### 4.2.4 Modelo 4: Regresión lineal

A continuación se presenta el primero de los modelos estadísticos aplicados en este caso se utilizó los valores originales, es decir en este caso las variables independientes toman un valor entre 0 y 1, como probabilidad de ocurrencia.



La Figura 32 muestra el mapa de probabilidad de ocurrencia a deslizamientos del modelo 4. (Ver anexo C.4) El mismo presenta un ajuste del 0.733.

En este modelo la probabilidad baja se representa con un tono verde claro, dicha categoría se encuentra en parte de la zona urbana del DMQ, contrario a los demás modelos analizados, este modelo no incluye la zona de las casas ni zonas aledañas al Parque la Carolina. La probabilidad baja en la parte norte se mantiene en los sectores aledaños al ex Aeropuerto, pero para la parte sur de la Administración la probabilidad media ha aumentado.

Se puede observar que la probabilidad media en tonos de amarillo ya no se encuentra presente en la parte noroccidental de la administración, esta incluye a las zonas aledañas de la Av. Mariscal Sucre en toda la administración, así mismo se encuentra presente en zonas como el Batán Bajo y la Floresta.

La probabilidad alta con tonos anaranjados se encuentra mayoritariamente en las parroquias de Cochapamba y Belisario Quevedo, en el sector de Atucucho, en este sector se registraron gran cantidad de deslizamientos debido a la fuerte pendiente presente en el área, así como también cerca a las quebradas.

Para la probabilidad muy alta se tienen tonos en color rojo, que como se puede observar en este modelo se presenta en la mayoría de zonas tanto al oriente como al occidente de la Administración, en este caso toda la parte del Parque Metropolitano y las laderas del Pichincha se representan en esta tonalidad, si bien es cierto en el sector de la Av. Simón Bolívar se han encontrado cuantiosos deslizamientos, el área que cubre la probabilidad de ocurrencia muy alta no es coherente a la realidad ya que por ejemplo zonas como el parque Metropolitano no deberían entrar en esta categoría.

**MODELO DE OCURRENCIA A DESLIZAMIENTOS 4**  
**- Administración Zonal Norte Eugenio Espejo -**

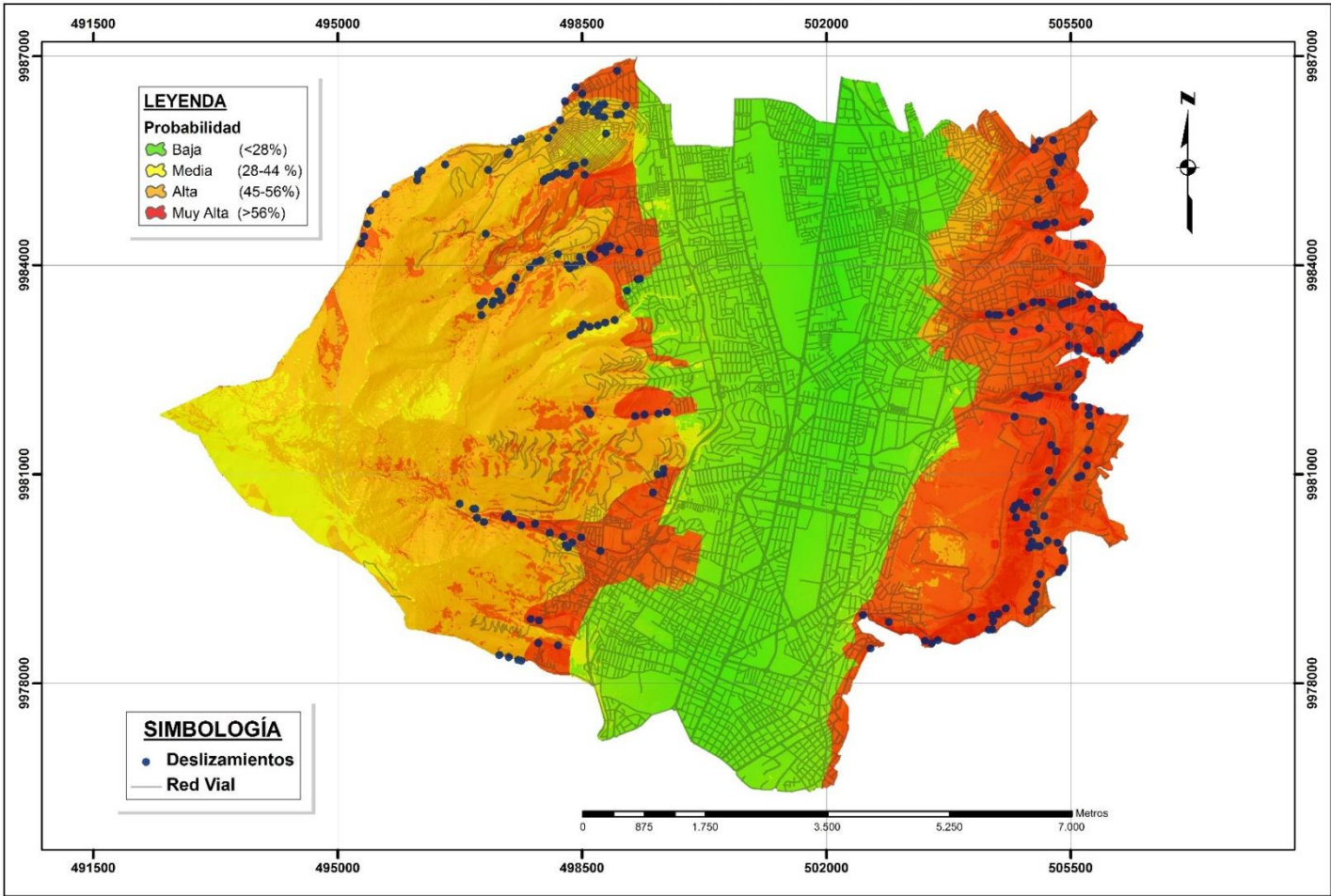


Figura 32. Modelo de ocurrencia a deslizamientos 4

Estos resultados se deben como se analizó en los métodos estadísticos a que la como se puede observar en la Ecuación 24, se le da un valor alto a la pendiente seguido de la geología lo cual en este caso ocasiona que se produzcan estos resultados.

De la misma manera realizando una comparación entre los puntos de presencias observados en campo y el modelo de probabilidad obtenido se presenta la Tabla 16 con los siguientes resultados:

Tabla 16.  
Dispersión puntos de presencia Modelo 4

	Modelo 4	# Puntos	Porcentaje
Probabilidad	Baja	0	0,0%
	Media	1	0,4%
	Alta	61	25,3%
	Muy Alta	179	74,3%
	Total	241	100%

Como se puede observar en la Tabla 16 se tiene que para las 241 presencias registradas tanto en campo como en fotointerpretación digital, el 74% se encuentran en la probabilidad alta, el 25% se encuentra en probabilidad alta, el 0.4% presenta media probabilidad.

Con estos resultados y a primera instancia se podría decir que el modelo predice de manera acertada la probabilidad de ocurrencia, debido a que la mayoría de deslizamientos se están concentrando en la probabilidad alta y muy alta con un valor de casi el 100% superior a los valores obtenidos en los modelos anteriores; sin embargo dicho resultado se debe a que la mayoría de las zonas donde se encuentran los puntos se han registrado como muy altas, dando una incongruencia en los resultados. Lo dicho se puede comprobar con el ajuste del modelo el cual es 0.733, a pesar de no ser malo es inferior a los anteriores ajustes presentados por lo tanto dicho modelo no representa de manera adecuada la realidad del terreno.

#### 4.2.5 Modelo 5: Regresión Logística

Para el siguiente modelo aplicado con métodos estadísticos de la misma manera caso se utilizó los valores originales, es decir en este caso las variables independientes toman un valor entre 0 y 1, como probabilidad de ocurrencia.

La Figura 33 muestra el mapa de probabilidad de ocurrencia a deslizamientos del modelo 5. (Ver anexo C.5.)El mismo presenta un ajuste del 0.507.

Es importante mencionar que el modelo de regresión logística dada su ecuación, tiene la capacidad de predecir ausencias y presencias solamente, este es el caso del presente modelo en el que se puede observar dos tonalidades muy marcadas, la verde representa ausencia de deslizamientos mientras que la roja representa presencia. La probabilidad baja se encuentra en toda la zona urbana del DMQ que se encuentra entre la Av. Eloy Alfaro y la Av. Mariscal Sucre; mientras que la probabilidad alta a ocurrencia se encuentra en los sectores oriental y occidental de la Administración.

Igualmente realizando una comparación entre los puntos de presencias observados en campo y el modelo de probabilidad obtenido se presenta la Tabla 17 con los siguientes resultados:

Tabla 17.  
Dispersión puntos de presencia Modelo 5

	Modelo 5	# Puntos	Porcentaje
Probabilidad	Baja	0	0%
	Media	0	0%
	Alta	0	0%
	Muy Alta	241	100%
	Total	241	100%

**MODELO DE OCURRENCIA A DESLIZAMIENTOS 5**  
**- Administración Zonal Norte Eugenio Espejo -**

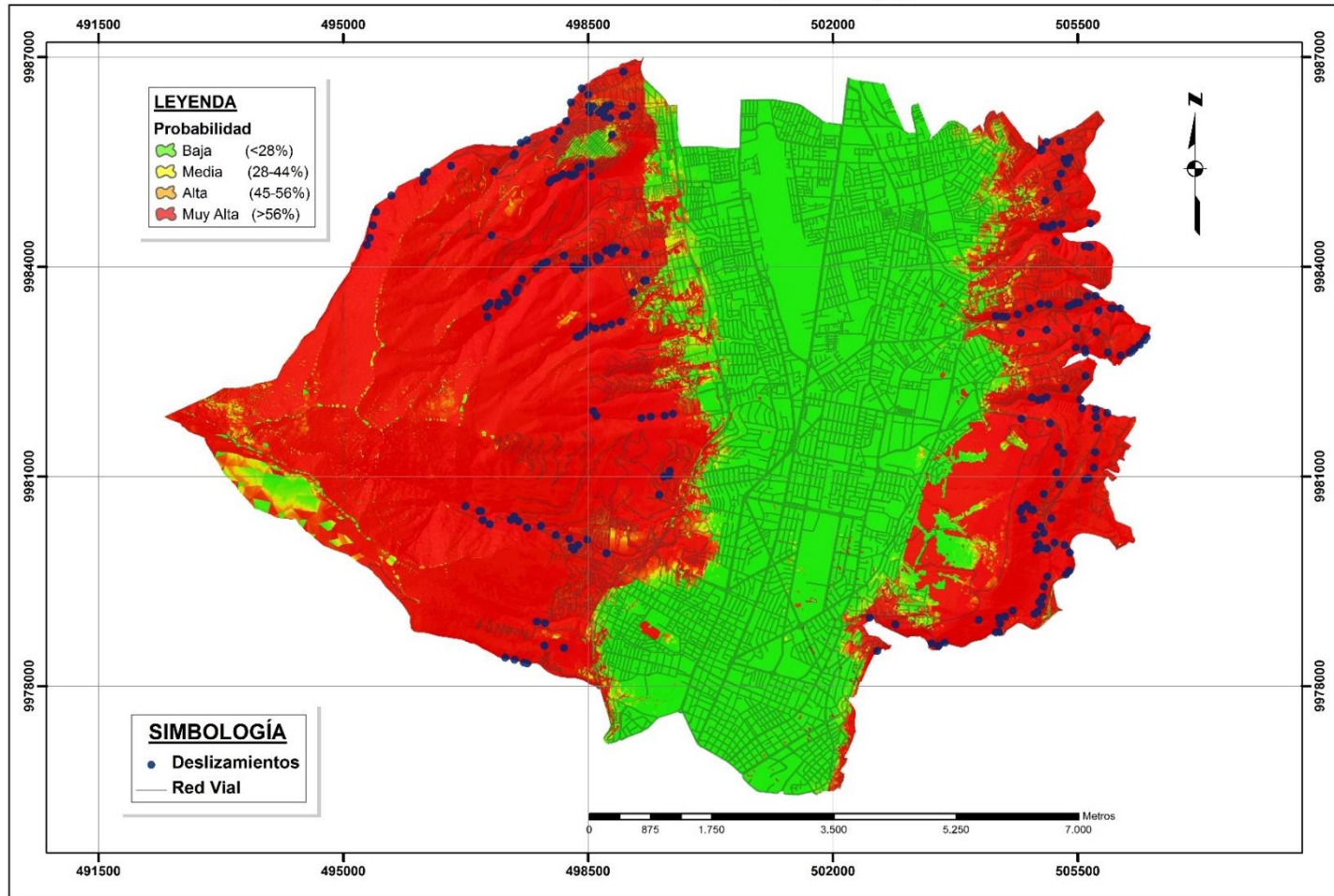


Figura 33. Modelo de ocurrencia a deslizamientos 5

Como se puede observar en la Tabla 17, todos los puntos observados en campo se encuentran en la probabilidad muy alta a ocurrencia, los resultados son los esperados ya que como se había mencionado dicho modelo permite calcular las presencias o ausencias de deslizamientos, en este caso todos los puntos muestreados concuerdan en la zona de presencias.

Dicho modelo puede ser útil al momento de elegir lugares explícitos con ausencias y presencias solamente, en el caso de estudio es necesario un rango de probabilidad por lo cual el modelo no resulta eficiente. Esto se comprueba con el ajuste del modelo que es igual a 0.507.

#### **4.2.6 Modelo 6: FuzzDes Modificado**

Por último se presenta el modelo 6, el cual se ha denominado como FuzzDes modificado ya que es un modelo que pretende mejorar la capacidad de representar la realidad del área de estudio. Para ello se obtuvieron de los modelos estadísticos el orden de importancia de las variables y de la metodología Fuzzy el mejor ajuste para el uso de las variables.

La Figura 34 muestra el mapa de probabilidad de ocurrencia a deslizamientos del modelo1. (Ver anexo C.6.). El mismo presenta un ajuste del 0.783.

En este modelo se representa la probabilidad baja con un tono verde claro esta tonalidad está presente en la parte urbana ubicada en las zonas planas del DMQ con pendientes inferiores al 25%, los sectores que se incluyen en esta categoría van desde la avenida Eloy Alfaro hasta la avenida Mariscal Sucre, entre ellos se encuentran: Zonas aledañas al ex Aeropuerto, Los Granados, Iñaquito Bajo, Granados, Batán Bajo, Av. Naciones Unidas, Parque la Carolina y Av. Mariana de Jesús, hasta llegar a la Av. Patria.

**MODELO DE OCURRENCIA A DESLIZAMIENTOS 6**  
**- Administración Zonal Norte Eugenio Espejo -**

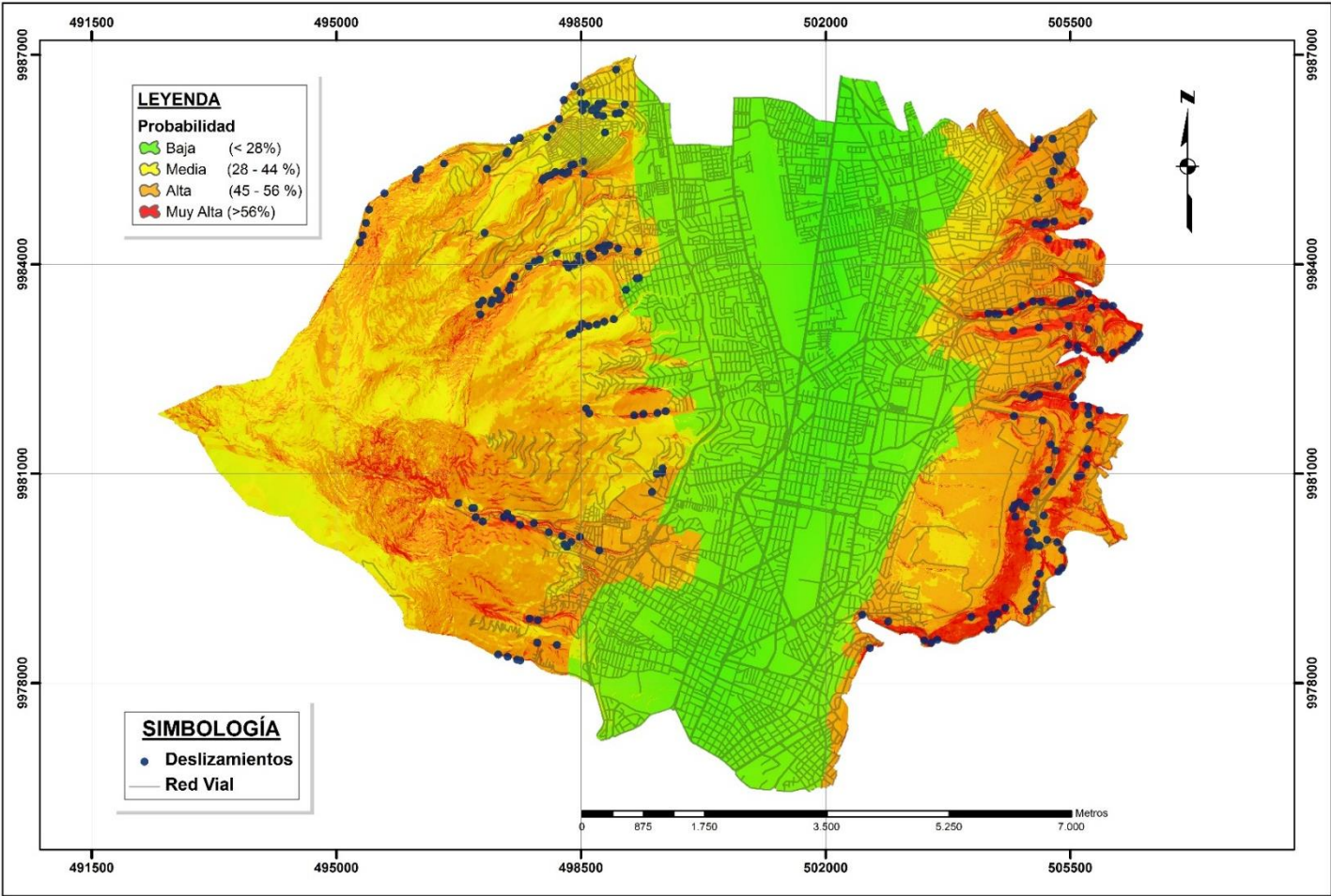


Figura 34. Modelo de ocurrencia a deslizamientos 6

Se puede observar que la probabilidad media en tonos de amarillo se encuentra tanto en las laderas del Pichincha como en la zona nororiental de la Administración, esta incluye a las zonas aledañas de la Av. Mariscal Sucre, como por ejemplo el Pinar Alto, una parte de Atucucho, y San Fernando, en esta zona la pendiente es de 25% en adelante. Para la zona nororiental se incluye el sector de los Nevados.

La probabilidad alta con tonos anaranjados se encuentra mayoritariamente en las parroquias de Ñaquito y Jipijapa, en su parte media así mismo se observa que en las parroquias Cochapamba y Rumipamba, se presenta esta tonalidad. También se encuentra presente en el sector de Atucucho, en este sector se registraron gran cantidad de deslizamientos debido a la fuerte pendiente presente en el área, así como también cerca a las quebradas.

La probabilidad muy alta representada en color rojo se encuentra evidentemente alrededor de la Av. Simón Bolívar así como también en la parte suroccidental y nororiental de la administración.

En el sector de la Av. Simón Bolívar la apertura de vías y las zonas de explotación de canteras desestabilizan los taludes dando como resultado numerosos deslizamientos, así mismo se registró varios puntos de deslizamientos en las zonas aledañas a los ríos con ausencia de vegetación.

Para la parte suroccidental y nororiental de la administración en donde se presenta esta tonalidad, se encuentro varios ríos en la cartografía base como en la visita a campo, cerca de los cuales se presentan varios deslizamientos, debido a la escasa vegetación, así mismo la pendiente alta de la zona podría ser otra de las causas de los mismos.

Igualmente realizando una comparación entre los puntos de presencias observados en campo y el modelo de probabilidad obtenido se presenta la Tabla 18 con los siguientes resultados:



Tabla 18.  
Dispersión puntos de presencia Modelo 6

	Modelo 6	# Puntos	Porcentaje
Probabilidad	Baja	1	0 %
	Media	33	13,7 %
	Alta	89	36,9 %
	Muy Alta	119	49,4 %
	Total	241	100%

Al analizar la Tabla 18 se tiene que para las 241 presencias registradas tanto en campo como en fotointerpretación digital, el 49% se encuentran en la probabilidad alta, el 37% se encuentra en probabilidad alta, el 14% presenta media probabilidad.

Para la probabilidad alta y muy alta se tiene un porcentaje del 86%, estos puntos corresponden a la zona de la Av. Simón Bolívar y a las laderas del Pichincha, que como se había mencionado anteriormente cuentan con varios registros de deslizamientos, por lo tanto dicho modelo con un ajuste del 0.783 representa de manera aceptable la realidad del terreno.

#### 4.3 Elección del modelo que más se ajuste a la realidad.

Para determinar el modelo que mejor representa la realidad del terreno se debe verificar el valor de ajuste (Tabla 12) y la representación de los resultados gráficamente.

Para lo cual se va a realizar un resumen de las semejanzas y diferencias entre los modelos realizados para determinar el mejor.

#### Semejanzas

- Las zonas aledañas a las vías principales como la Av. Simón Bolívar y zonas de quebradas presentes en las laderas del Pichincha son susceptibles a deslizamientos, se representan en tonalidades rojas.
- Las zonas de probabilidad alta a ocurrencia se presentan tanto cercanas al parque Metropolitano, como en las laderas del Pichincha, en el sector de Atucucho, se representan en color anaranjado, esto se debe a la pendiente superior a 25% y también a la falta de vegetación cercana a los ríos.

- Las zonas de baja probabilidad de ocurrencia se presentan mayoritariamente en la zona urbana en todos los modelos, dicha zona cuenta con una pendiente inferior a 25% y va desde sectores aledaños al Ex Aeropuerto hasta la Av. Patria.
- La mayoría de puntos muestreados se concentran en las probabilidades alta y muy alta de los 6 modelos analizados.
- Ningún modelo presenta puntos de presencia en la categoría baja de probabilidad de ocurrencia a deslizamientos.
- Los modelos estadísticos presentan un 100% en los puntos muestreados entre la categoría alta y muy alta.
- El modelo 2 y 3 presentan un 91% en los puntos muestreados entre la categoría alta y muy alta.

### **Diferencias**

- Realizando una comparación entre los puntos de presencias observados en campo y los modelos de probabilidad obtenidos se tiene que para las 241 presencias registradas tanto en campo como en fotointerpretación digital, se tiene lo siguiente:
- El 89% de las presencias en el modelo 1 se presentan en las zonas de probabilidad alta y muy alta, mientras que el 11% se presenta en la zona probabilidad media.
- El 91% de las presencias tanto en el modelo 2 como en el modelo 3 se presentan en las zonas de probabilidad alta y muy alta y el 9% restante se encuentra en la zona de probabilidad media.
- El 100% de las presencias el modelo 4 y el modelo 5 se presentan en las zonas de probabilidad alta y muy alta.
- El 86% de las presencias en el modelo 6 se presentan en las zonas de probabilidad alta y muy alta, y el 14% restante se encuentra en la zona de media probabilidad. En este caso los resultados de los modelos 4 y 5 a pesar de parecer los mejores no lo son ya que comparando los resultados gráficos y de ajustes, estos modelos difieren de la realidad.
- Los valores de ajuste para cada modelo se presentan a continuación en la Tabla 19:

Tabla 19.  
Ajuste de Modelos

Modelo 1	0,773
Modelo 2	0,777
Modelo 3	0,784
Modelo 4	0,733
Modelo 5	0,507
Modelo 6	0,783

En este caso para el modelo 6 que es el FuzzDes modificado se esperaba el mejor ajuste sin embargo como se puede observar en la Tabla 19 el modelo 3 presenta el mejor ajuste. Es necesario mencionar que el FuzzDes modificado procede del mejor modelo de lógica difusa en este caso fue el modelo 3.

Con todo lo analizado tanto en las semejanzas como en las diferencias, de cada modelo, se elige como mejor modelo al modelo 6 realizado ya que a pesar de que no se tiene el mejor ajuste la diferencia comparándolo con el modelo 3 es tan solo 0.001.

El modelo 6 representa de mejor manera la realidad del terreno en forma gráfica y presenta uno de los mayores ajustes. Se eligió éste porque se pretende, lograr un modelo explicativo, en el que se observen las variables y factores más influyentes en la probabilidad de ocurrencia a deslizamientos.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

- Las zonas propensas a inestabilidades de terreno se localizan principalmente en las zonas aledañas a la Av. Simón Bolívar ya que la apertura de vías ha desestabilizado los taludes del sector, así mismo se registró varios puntos de deslizamientos en las zonas aledañas a los ríos que se encuentran erosionadas, otras zonas a considerar son las zonas de fuerte pendiente, zonas de explotación de canteras y rellenos de quebradas.
- El cálculo de probabilidad de ocurrencia a deslizamientos comprende 3 metodologías: lógica difusa, métodos estadísticos y FuzzDes modificado, siendo el último uno de los mejores ya que asignando ponderaciones a las distintas variables que intervienen pretende representar de mejor manera la realidad del área de estudio.
- La verificación de campo permite calibrar los modelos de predicción para así poder validar sus resultados.
- Las variables más importantes que se presentan en los modelos estadísticos son la pendiente y la dureza de roca, sin embargo la menos influyente es la precipitación.
- El modelo de probabilidades de ocurrencia a deslizamientos FuzzDes modificado es un posible mapa de probabilidad de ocurrencia a deslizamientos de la zona estudiada. El área en tonos rojos mostraría la mayor probabilidad de ocurrencia, al contrario el área en tonos verdes la menor probabilidad de ocurrencia.
- La metodología de Fuzzy, aplicada en este estudio presenta resultados confiables matemáticamente en relación a la verificación en campo, por lo tanto es una alternativa confiable para el modelamiento de deslizamientos en la zona.

## 5.2 Recomendaciones

- Inspeccionar la explotación de canteras en el área urbana y alrededor de Quito, planificar nuevos sitios de explotación y realizar un control técnico de explotación y ubicación de los residuos.
- Utilizar la metodología de Fuzzy para realizar mapas de vulnerabilidad y riesgos, ya que los resultados obtenidos con esta metodología para el presente estudio son satisfactorios.
- El presente estudio debe ser tomado en cuenta para realizar acciones de prevención, mitigación y correctivas necesarias en el Distrito Metropolitano de Quito.
- La zona de estudio abarca la zona Centro - Norte de la Ciudad de Quito, así mismo se cuentan con estudios anteriores que abarcan la zona Centro – Sur. Es necesario aplicar la misma metodología para las zonas faltantes en la ciudad y así obtener un resultado semejante de la probabilidad de ocurrencia a deslizamientos en la totalidad del DMQ.
- El sector de la Av. Simón Bolívar existen numerosos deslizamientos, por lo que se recomienda estabilizar los taludes en las zonas para prevenir futuros accidentes que afectan a la población aledaña.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Andocilla, L. (2012). Implementación del algoritmo de lógica Fuzzy aplicado a la determinación del grado de susceptibilidad a deslizamientos en el Área Monjas – Ferroviaria – La Magdalena – Itchimbia del Distrito Metropolitano De Quito. *Revista Geoespacial, ESPE*.
- Aviles, M., & Hermosa, L. (2009). *Análisis y modelamiento de susceptibilidad a deslizamientos mediante SIG y geoestadísticas en las parroquias de Papallacta y Cuyuja, Cantón Quijos*. Quito: Tesis de Grado, ESPE.
- Bonachea, J. (2006). *Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a procesos geomorfológicos*. Obtenido de Tesis Doctorales en Red: <http://www.tesisenred.net/handle/10803/10610>
- CEA. (24 de febrero de 2014). *Sistemas de Información Geográfica*. Obtenido de Confederación de Empresarios de Andalucía: <http://sig.cea.es/>
- Crozier, M., & Glade, T. (2005). Deslizamientos, Peligro y Riesgo: Problemas, conceptos y enfoques. *Deslizamientos, Peligro y Riesgo: Chichester*, 2-40.
- Cruden, D., & Varnes, D. (1996). Tipos de deslizamientos y procesos. *En reporte especial 247: Deslizamientos: Investigación y Mitigación*, 36-75.
- Diario Hoy. (2012). Laderas del Pichincha el riesgo de Quito. *Hoy*, pág. 6A.
- El Comercio. (11 de enero de 2012). Deslizamientos e inundaciones por lluvias. *Comercio*.
- EPMAPS. (16 de marzo de 2015). *Estudios de actualización del plan maestro integrado de Agua potable y alcantarillado para el distrito metropolitano de Quito*. Obtenido de Empresa Pública Metropolitana de Agua y Saneamiento de Quito:

[http://www.aguaquito.gob.ec/sites/default/files/documentos/plan\\_maestro\\_alcantarillado.pdf](http://www.aguaquito.gob.ec/sites/default/files/documentos/plan_maestro_alcantarillado.pdf)

FAO. (1 de noviembre de 2013). *Las fotografías aéreas y su interpretación*. Obtenido de Depósitos de documentos de la FAO: <http://www.fao.org/docrep/003/t0390s/t0390s08.htm>

FEMA, F. E. (24 de 7 de 2014). *Deslizamiento de tierra y desprendimiento de escombros (corrientes de lodo)*. Obtenido de Federal Emergency Management Agency: <https://www.fema.gov/node/33166>

García, M. J. (Noviembre de 2008). *Metodologías para la evaluación de peligrosidad a los deslizamientos inducidos por terremotos*. Obtenido de Red Geomática: [http://redgeomatica.rediris.es/andes/htmls/pdf/Tesis\\_MJGR\\_2009.pdf](http://redgeomatica.rediris.es/andes/htmls/pdf/Tesis_MJGR_2009.pdf)

GEMMA. (2007). Figuras de tipos de deslizamientos.

GEMMA. (2007). *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas*. Canadá: Publicación Geológica Multinacional.

González, C. (2015). *Lógica Difusa. Una introducción práctica*. Obtenido de Escuela Superior de Informática: [http://www.esi.uclm.es/www/cglez/downloads/docencia/2011\\_Softcomputing/LogicaDifusa.pdf](http://www.esi.uclm.es/www/cglez/downloads/docencia/2011_Softcomputing/LogicaDifusa.pdf)

IFRC, F. I. (2008). *Deslizamientos y avalanchas*. Obtenido de Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja: <http://www.ifrc.org/es/introduccion/disaster-management/sobre-desastres/definicion--de-peligro/deslizamientos-y-avalanchas/>

IGAC. (2015). Modelo y estructura de datos. Bogotá, Colombia.

IGN. (16 de marzo de 2015). *Cartografía y Bases Geográficas*. Obtenido de Instituto Geográfico Nacional: <http://www.ign.es/ign/layoutIn/actividadesBDGintro.do>

- INAMHI. (2014). Anuarios Metereológicos. Quito.
- INETER. (Agosto de 2005). Inestabilidad de laderas. Nicaragua.
- INETER. (Agosto de 2005). *Inestabilidad de Laderas, Mapa de amenazas*.  
Obtenido de Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales:  
<http://web-geofisica.ineter.gob.ni/proyectos/metalarn/deslizamiento.pdf>
- IniSIG. (4 de noviembre de 2014). *Introducción al Análisis Espacial*. Obtenido de IniSIG: <http://inisig.com/introduccion-al-analisis-espacial-i/>
- Iriondo, M. (2006). *Introducción a la Geología*. Córdoba - Argentina: Editorial Brujas.
- Jaramillo, C. (2014). "Determinación de la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos aplicando lógica Fuzzy vs Mora Vahrson, en el área de Monjas-Itchimbia-Panecillo, del Distrito Metropolitano de Quito, (DMQ) y simulación en 3D". *Revista Geoespacial, ESPE*.
- Jiménez, J. (23 de Septiembre de 2005). *Análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante SIG en la cuenca vertiente al embalse Ruales, Granada*. España: Universidad de Granada.
- Lana, H., Zhou, L., Wang, H., Li, R., H, Z., & Gil. (2004). *Science Direct*.  
Obtenido de Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China.
- MOPT. (1992). *Guía para la elaboración de estudios del medio físico*. Madrid, España: Fotojae, S.A.
- Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. (2010). *Atlas de Amenazas Naturales del Distrito Metropolitano de Quito*. Quito: Advantlogic Ecuador S.A.
- Navarro, J. (2012). *Susceptibilidad y amenaza de movimientos de ladera mediante SIG en el Municipio de Berlín, El Salvador*. Obtenido de Universidad Complutense Madrid:  
[http://eprints.ucm.es/19876/1/TFM\\_JNV\\_FINALCUT.pdf](http://eprints.ucm.es/19876/1/TFM_JNV_FINALCUT.pdf)



- NCGIA. (1990). *Qué es la ciencia de la información geográfica?* Obtenido de Centro Nacional de Información Geográfica y Análisis: <http://www.ncgia.ucsb.edu/giscc/units/u002/u002.html>
- Orellana, H., & Zea-La-Rochelle, J. (29 de Agosto de 2008). *Peligrosidad de terrenos inestables en Quito, detección y mitigación*. Obtenido de EIRD: <http://www.eird.org/deslizamientos/pdf/spa/doc9218/doc9218-contenido.pdf>
- Padilla, O. (2006). *Figuras de Funciones en Logica Difusa*. Quito, Ecuador.
- Padilla, O. (2006). FUNDAMENTO TEÓRICO PARA MODELIZACION DE VARIABLES AMBIENTALES MEDIANTE OPERADORES DIFUSOS. *Revista Geoespacial No.4*.
- Peña, J. (2006). *Sistemas de información geográfica aplicados a la gestión del territorio*. Alicante: Editorial Club Universitario.
- Pierre, P. (1989). *Riesgos Naturales en Quito. Lahares, aluviones y derrumbes del Pichincha y del Cotopaxi*. Quito: Editora Nacional.
- Ramírez, M. (2004). *El método de jerarquias analíticas de Saaty en la ponderación de variables*. Obtenido de Universidad Nacional del Nordeste : <http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/com2004/2-Humanidades/H-004.pdf>
- Secretaria de Seguridad. (2015). *Atlas de amenazas naturales y exposición de infraestructura del Distrito Metropolitano de Quito*. Quito: Advantlogic Ecuador S.A.
- SINPAD. (22 de octubre de 2014). *¿Qué es un SIG?* Obtenido de Sistema de Información Nacional para la Respuesta y Rehabilitación: <http://sinpad.indeci.gob.pe/PortalSINPAD/Default.aspx?ItemId=261>
- Supo, R. (2003). *Lógica Difusa*. Tacna, Perú: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

- Taboada, J., & Cotos, J. (2005). *Sistemas de Información Medioambiental*. España: Gesbiblo,S.L.
- Torres, R. (1976). *Fotointerpretación, su aplicación en la determinación de la clasificación y cartografía de los suelos de un área de la península de Nicoya, Guanacaste, Costa Rica*. Turrialba, Costa Rica: Orton Memorial Library.
- Toulkeridis, T. (28 de enero de 2013). Deslaves Ecuador. (N. Aguilera, Entrevistador)
- UCM. (2014). *Universidad Complutense de Madrid*. Obtenido de Análisis de regresión lineal: el procedimiento de la regresión lineal.: [http://pendientedemigracion.ucm.es/info/socivmyt/paginas/D\\_departamento/materiales/analisis\\_datosyMultivariable/18reglin\\_SPSS.pdf](http://pendientedemigracion.ucm.es/info/socivmyt/paginas/D_departamento/materiales/analisis_datosyMultivariable/18reglin_SPSS.pdf)
- USGS. (Julio de 2004). Tipos de deslizamientos y procesos. USA.
- Varnes. (1978). Tipos de deslizamientos en la naturaleza.
- Varnes, D. (1978). Tipos de movimientos y procesos. *En reporte especial 176: Deslizamientos: Análisis y control*, 11-33.
- Zadeh, L. (1973). *Esquema de un nuevo enfoque para el análisis de sistemas complejos*. IEEE.
- Zarzosa, N., & Núñez, A. (2002). *Sistemas de información geográfica*. Barceloa, España: Ediciones UPC.