



ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

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

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO
AMBIENTE**

**“ANÁLISIS Y MODELAMIENTO DE SUSCEPTIBILIDAD A
DESLIZAMIENTOS MEDIANTE SIG Y GEOESTADÍSTICA
EN LAS PARROQUIAS DE PAPALLACTA Y CUYUJA,
CANTON QUIJOS”**

REALIZADO POR:

**MARCO JAVIER AVILÉS MASAPUNTE
LIZZETTE GABRIELA HERMOSA ROMÁN**

SANGOLQUÍ – ECUADOR

JUNIO – 2009

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO.....	0
ÍNDICE DE TABLAS.....	5
CAPÍTULO 2.....	5
CAPÍTULO 3.....	5
CAPÍTULO 4.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
CAPÍTULO 1.....	6
CAPÍTULO 2.....	6
CAPÍTULO 3.....	6
GLOSARIO.....	8
CAPÍTULO 1. PRESENTACIÓN.....	13
1.1. Introducción.....	13
1.2. Antecedentes.....	13
1.2.1. Situación Actual.....	16
1.2.2. SIG en el análisis de susceptibilidad a deslizamientos.....	16
1.3. Justificación e Importancia.....	17
1.4. Objetivos.....	18
1.4.1. Objetivo general.....	18
1.4.2. Objetivos Específicos.....	18
1.5. Alcance.....	18
1.6. Descripción del proyecto.....	18
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	20
2.1. Deslizamientos.....	20
2.1.1. Introducción.....	20
2.1.2. Elementos del deslizamiento.....	21
2.1.3. Clasificación.....	22
• Mecanismos.....	23
• Tipos de Movimientos del Terreno.....	24
2.1.4. Metodología de Levantamiento.....	27

• Identificación.....	27
• Estimación de la Susceptibilidad del Terreno a Deslizamientos.....	28
• Potencialidad de Movimiento del Terreno.....	28
• Representación de Movimientos de Terreno.....	29
2.1.5. Factores y Detonantes de Movimientos del Terreno.....	29
2.1.6. Susceptibilidad del Terreno a Deslizamientos.....	31
2.2. Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	31
2.2.1. Generalidades.....	32
2.2.2. Construcción de bases de datos geográficas.....	35
2.2.3. Topologías, Modelos de datos y Tipos de SIG.....	36
2.2.4. Análisis Espacial.....	37
2.2.5. Modelos cartográficos.....	38
• Características.....	38
• Modelo Vectorial.....	39
• Modelo Raster.....	39
• Tabulación cruzada.....	40
• Algebra de Mapas.....	41
2.2.6. Generación de modelos en software (SIG).....	41
2.3. Lógica Fuzzy (Difusa).....	42
2.3.1. Conceptos de conjuntos difusos.....	43
• Lógica clásica y multivariada.....	43
• Lógica difusa.....	44
• Operadores Fuzzy.....	44
• Propiedades de los conjuntos difusos.....	46
• Operaciones sobre los conjuntos difusos.....	46
• Relaciones difusas.....	47
2.4. Inferencia estadística.....	48
2.4.1. Tipos de variables.....	48
2.4.2. Diagramas de dispersión.....	49
2.4.3. Sistemas y modelos.....	49
• Sistemas.....	49
• Modelos.....	50
• Relación entre sistemas y modelos.....	51
2.4.4. Modelos estadísticos.....	52
• Análisis de Regresión.....	52
• Análisis de regresión múltiple.....	52
• Modelo de regresión lineal.....	54
• Modelo de regresión logística.....	54
2.4.5. Estimaciones y estimadores.....	56
• Estimadores.....	56
• Métodos de estimación puntual.....	57
• Métodos de estimación por intervalo.....	58

2.4.6.	Teoría de Errores.....	58
•	Errores aleatorios.....	59
•	Errores sistemáticos.....	59
2.4.7.	Validación de modelos.....	60
•	Pruebas de validación.....	61
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE DESARROLLO.....		62
3.1.	INTRODUCCIÓN.....	62
3.2.	Información y datos.....	62
3.2.1.	Recopilación de información.....	62
3.2.2.	Generación de Datos.....	63
•	Determinación de Puntos de Muestra.....	63
•	Interpretación de fotografías e imagen satelital.....	63
•	Digitalización.....	65
•	Conversión de formatos y sistemas de referencia.....	65
•	Generación de base de datos alfanumérica.....	66
3.2.3.	Análisis de datos.....	66
•	Análisis de variables y relaciones.....	66
•	Análisis de proximidad.....	71
•	Interpolación.....	71
•	Vectorización.....	72
•	Rasterización.....	72
•	Clasificación.....	73
3.3.	Modelos cartográficos.....	75
3.3.1.	Obtención de los modelos cartográficos.....	75
•	Análisis de regresión múltiple.....	76
•	Multivariate adaptive regresión splines (MARS).....	81
•	Utilización de Operadores Fuzzy.....	84
•	Primer Análisis.....	85
•	Segundo Análisis (Análisis del 95%).....	90
3.4.	Validación estadística de Modelos Cartográficos planteados.....	95
3.4.1.	Cálculo del error estandar en la estimación.....	95
3.4.2.	Análisis de correlación.....	95
•	Cálculo del coeficiente de determinación múltiple.....	96
3.4.3.	Inferencia Estadística. Prueba de Hipótesis.....	96
3.4.4.	Análisis Estadístico.....	99
3.4.5.	Resultados del Proceso Estadístico.....	99
3.5.	Modelo de deslizamientos.....	99
3.5.1.	Modelos predictivos.....	99
3.5.2.	Comparación de configuraciones: Procrustes.....	100

3.5.3. Implementación de Modelo Obtenido.....	102
3.5.4. Desarrollo de Procesos SIG.....	103
Capítulo 4. RESULTADOS.....	104
CONCLUSIONES.....	109
RECOMENDACIONES.....	112
ANEXOS.....	113
A1. Hoja de Datos.....	113
A2. Diagramas de dispersión.....	116
A3. Modelos Cartográficos.....	119
A4. Mapas Temáticos - Variables que Intervienen.....	125
A5. Mapa de susceptibilidad a Deslizamientos.....	129
A6. Memórias Técnicas.....	130
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	143

ANÁLISIS Y MODELAMIENTO DE SUSCEPTIBILIDAD
A DESLIZAMIENTOS MEDIANTE SIG
Y GEOESTADÍSTICA EN LAS PARROQUIAS DE
PAPAYANAYACUYUA, CANTÓN QUIJOS.
CIGMA,

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 2.

Tabla 2.1. Clasificación simplificada de los mecanismos y tipos de deslizamientos.

Tabla 2.2. Resumen de operadores Fuzzy.

CAPÍTULO 3.

Tabla 3.1. Índices litológicos propuestos por la FAO.

Tabla 3.2. Índices de protección de la cobertura vegetal al suelo.

Tabla 3.3. Análisis de variables que intervienen en el estudio.

Tabla 3.4. Estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio.

Tabla 3.5. Fórmulas del análisis Fuzzy.

Tabla 3.6. Cálculo del valor α .

Tabla 3.7. Fórmulas del análisis Fuzzy con el 95% de los datos.

Tabla 3.8. Variables que intervienen en el modelo.

Tabla 3.9. Valores del error estándar de cada modelo.

Tabla 3.10. Valores del coeficiente de correlación de cada modelo.

Tabla 3.11. Pruebas de hipótesis.

Tabla 3.12. Valor del estadístico F de cada modelo.

Tabla 3.13. Valor de ajuste de cada modelo.

Tabla 3.14. Tabla de resultados del análisis de Procrustes.

CAPÍTULO 4.

Tabla 4.1. Resumen de fórmulas para la obtención de los modelos de susceptibilidad del terreno a deslizamientos.

Tabla 4.2. Análisis estadístico de los modelos de susceptibilidad del terreno a deslizamientos.

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1.

Figura 1.1. Mapa de susceptibilidad de deslizamientos del Ecuador.

CAPÍTULO 2.

Figura 2.1. Partes de un Deslizamiento.

Figura 2.2. Movimiento de Terreno (Caída).

Figura 2.3. Movimiento de Terreno (Derrumbe).

Figura 2.4. Movimiento de Terreno (Trasncional).

Figura 2.5. Movimiento de Terreno (Rotacional).

Figura 2.6. Movimiento de Terreno (Reptación).

Figura 2.7. Movimiento de Terreno (Solufuxión).

Figura 2.8. Movimiento de Terreno (Flujos de Derrubio).

Figura 2.9. Movimiento de Terreno (Flujos de Tierra).

Figura 2.10. Movimiento de Terreno (Flujos de Lodo).

Figura 2.11. Movimiento de Terreno (Expansión Lateral).

Figura 2.12. Presentación Gráfica de un SIG.

Figura 2.13. Mapa temático - Índice de protección de la cobertura vegetal.

Figura 2.14. Modelo Vectorial.

Figura 2.15. Modelo Raster.

Figura 2.16. Algebra de Mapas.

Figura 2.17. Conjuntos Difusos.

Figura 2.18. Operador AND.

Figura 2.19. Operador OR.

Figura 2.20. Negación de Conjuntos Difusos

Figura 2.21. Sistemas y Modelos.

CAPÍTULO 3

Figura 3.1. Malla de 5000 m. sobre el área de estadio.

Figura 3.2. Clasificación de una imagen satelital.

Figura 3.3. Modelo cartográfico general.

Figura 3.4. Función Sen^2 .

Figura 3.5. Rango de interés de la función Sen^2 .

Figura 3.6. Primer caso del análisis Fuzzy.

Figura 3.7. Secciones del primer caso Fuzzy.

Figura 3.8. Segundo caso del análisis Fuzzy.

- Figura 3.9. Secciones del segundo caso Fuzzy.
- Figura 3.10. Análisis Fuzzy con el 95% de los datos.
- Figura 3.11. Análisis Fuzzy con el 95% de los datos, primer caso.
- Figura 3.12. Análisis Fuzzy con el 95% de los datos, segundo caso.
- Figura 3.13. Tercer caso del análisis Fuzzy.
- Figura 3.14. Puntos localizados en la zona de estudio.
- Figura 3.15. Diagramas de dispersión.
- Figura 3.16. Puntos en los que cambia la pendiente de las regresiones.
- Figura 3.17. Función hockey stick.
- Figura 3.18. Funciones standard y espejo.
- Figura 3.19. Cambio de signo del coeficiente.
- Figura 3.20. Modelo Mars.
- Figura 3.21. Estadístico F .
- Figura 3.22. Superposición de mapas.
- Figura 3.23. Traslaciones y rotaciones para minimizar el error estadístico.
- Figura 3.24. Comparación de distribuciones.
- Figura 3.25. Puntos de objeto de los modelos obtenidos.
- Figura 3.26. Modelo final de deslizamientos (Análisis fuzzy con el 95% de los datos).

CAPÍTULO 4.

- Figura 4.1. Modelo 3 (Fuzzy con el 95% de datos al 60 percentil)
- Figura 4.2. Modelo 4 (Fuzzy con el 95% de datos al 80 percentil)
- Figura 4.3. Modelo 2 (Fuzzy al 80 percentil)
- Figura 4.4. Modelo 5 (MARS)
- Figura 4.5. Modelo 1 (Fuzzy al 60 percentil)
- Figura 4.6. Modelo 6 (Regresión múltiple)

GLOSARIO

ALGORITMO - secuencia explícita y finita de operaciones que conduce a la solución de un problema aplicado a los SIG suele tratarse de un conjunto de operaciones de álgebra de mapas o sobre bases de datos que permiten obtener un resultado mediante combinación de información espacial y alfanumérica

ATRIBUTO - propiedad o característica de una clase de elementos en una base de datos por ejemplo, la superficie, la población, la renta media pueden ser atributos de la clase municipios en una base de datos.

BANDA - rango de frecuencias del espectro electromagnético por ejemplo, la banda 1 del sensor TM se define en el rango 0.45-0.52 μm .

BASE DE DATOS - conjunto de datos estructurado para permitir su almacenamiento, consulta y actualización en un sistema informático las bases de datos relacionales son un caso concreto en el que la información se organiza en relaciones (llamadas más frecuentemente tablas) que son conjuntos de registros, cada uno de los cuales integra información de un elemento en un conjunto de campos

BINARIO - sistema de numeración basado en dos dígitos, 0 y 1 los sistemas de numeración pueden crearse sobre una base (número de dígitos básicos) arbitraria.

CARTOGRAFÍA - conjunto de técnicas utilizadas para la construcción de mapas.

CELDA - elemento básico de información en una estructura raster matricial representa el valor medio de un área rectangular superpuesta al terreno (es un concepto análogo al de pixel en una imagen digital)

CLASIFICACIÓN - proceso de agrupamiento de un conjunto de elementos en clases en el sentido estadístico, una clasificación pretende agrupar los elementos en clases internamente homogéneas pero diferenciables entre ellas por los valores de una o varias variables

COORDENADA - cantidad usada para definir una posición en un sistema de referencia las coordenadas pueden ser lineales (cartesianas) o angulares (esféricas) según el sistema de referencia

COTA - altitud asociada a un punto habitualmente, un mapa de elevaciones está formado por curvas de nivel y por puntos acotados

CONJUNTOS BORROSOS - la teoría de conjuntos borrosos difusos permite la evaluación progresiva de la composición de elementos en un conjunto, lo que se describe con la ayuda de una función algebraica en el intervalo $[0, 1]$.

CUENCA HIDROLÓGICA - conjunto de puntos del terreno cuyas líneas de flujo convergen en un sumidero el sumidero suele hacerse coincidir con un punto singular: una desembocadura o una confluencia de ríos

DATO - hecho verificable sobre la realidad un dato puede ser una medida, una ecuación o cualquier tipo de información que pueda ser verificada (en caso contrario se trataría de una creencia).

DIGITALIZAR - operación de codificar la información en cifras la digitalización se aplica habitualmente a la codificación de la información gráfica (mapas y planos convencionales) pero puede ser aplicada con propiedad a todo tipo de información para la construcción de bases de datos digitales.

ERROR - diferencia entre el valor medido o estimado y el valor real en un modelo, el error representa la desviación entre lo predicho por el modelo y la realidad; el error es una estimación de la calidad de la información de un mapa y suele distinguirse del concepto de precisión, que hace referencia a la calidad del método de medida utilizado.

ESCÁNER - sensor óptico acoplado a un dispositivo de barrido para la digitalización de documentos con un escáner se recorre un documento mediante un sensor óptico que mide la reflectancia general (tonos de gris) o la de cada color primario (RGB) para formar una imagen digital.

ESTÁNDAR - propiedad que garantiza la uniformidad en los métodos de capturar, representar, almacenar y documentar la información la estandarización es, hoy por hoy, un objetivo ya que no existen normas universalmente aceptadas para casi ningún tipo de información.

FOTOGRAMETRÍA - conjunto de técnicas implicadas en la obtención de datos métricos a partir de fotografías, la fotogrametría es la forma más usual de generar modelos digitales de elevaciones, usando pares estereoscópicos y apoyos sobre el terreno.

FUZZY - lógica difusa; es una forma de lógica de obtener varios valores derivados de los conjuntos borrosos para hacer frente a la teoría del razonamiento donde los valores son aproximados y no exactos.

GENERALIZACIÓN - simplificación realizada al representar un objeto real mediante un modelo se aplica también al proceso de eliminación selectiva de vértices en una forma geométrica para simplificarla

GEORREFERENCIAR - asignar coordenadas geográficas a un objeto o estructura el concepto aplicado a una imagen digital implica un conjunto de operaciones geométricas

que permiten asignar a cada pixel de la imagen un par de coordenadas (x,y) en un sistema de proyección

GPS - acrónimo de global positioning system, o sistema de localización global hace referencia a un sistema mediante el cual es posible estimar las coordenadas actuales de una estación en tierra mediante la recepción simultánea de señales emitidas por varios satélites (llamados en conjunto constelación GPS).

IMAGEN DIGITAL - representación gráfica de un objeto mediante una matriz regular que recoge valores de reflectancia los valores de reflectancia suelen medirse mediante sensores sensibles a ciertos rangos de longitudes de onda de la luz; ejemplos de estos sensores son los transportados por plataformas aéreas (aviones o satélites) o los integrados en un escáner para la digitalización de documentos impresos.

INTERPOLACIÓN - estimación del valor de una variable en un punto a partir de otros datos próximos se entiende que el punto problema está dentro del rango de variación de los datos disponibles, en caso contrario se habla de extrapolación. La interpolación puede hacerse en un espacio de 1, 2 o más dimensiones.

MATRIZ - estructura de datos formada por elementos (celdas) dispuestos regularmente en filas y columnas la matriz es la estructura más usada para la construcción de modelos digitales del terreno e imágenes digitales; en este último caso, cada elemento de una matriz se denomina pixel; se habla de 'matriz regular' cuando filas y columnas están separadas por la misma distancia.

MAPA - modelo gráfico de la superficie terrestre donde se representan objetos espaciales y sus propiedades métricas, topológicas y atributivas un mapa puede ser analógico (impreso sobre papel, por ejemplo) o digital (codificado en cifras, almacenado en un ordenador y presentado en una pantalla) existen mapas métricos, diseñados para representar distancias, superficies o ángulos y mapas topológicos, diseñados para representar vecindad, inclusión, conectividad y orden en el contexto de los SIG un mapa es la presentación de cualquier estructura de datos usada para reflejar cartográficamente una variable espacial (nominal o cuantitativa) independientemente del modelo de datos utilizado (vectorial o raster).

MODELO - representación simplificada de un objeto o proceso en la que se representan algunas de sus propiedades un modelo reproduce solamente algunas propiedades del objeto o sistema original que queda, por tanto, representado por otro objeto o sistema de menor complejidad; los modelos se construyen para conocer o predecir propiedades del objeto real.

MODELO DE DATOS - esquema conceptual utilizado para representar la realidad mediante un modelo un modelo de datos intenta solucionar el problema de cómo dar el paso realidad a modelo, es decir, cómo representar la realidad de forma adecuada y eficiente; un mismo modelo de datos puede luego expresarse en diferentes estructuras de datos, la forma física en la que se organiza la información en una base de datos.

MDE - (Modelo digital de elevaciones), cuando la variable a representar es la cota o altura del terreno se denomina Modelo Digital de Elevaciones, este modelo toma en cuenta lo que se levanta sobre el suelo.

MDT - (Modelo digital del terreno) se denomina modelo digital del terreno a una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua, como puede ser la temperatura, la cota o la presión atmosférica.

Relieve del suelo desnudo

PENDIENTE - ángulo entre la línea normal a la superficie del terreno y la vertical la pendiente o inclinación del terreno es la derivada primera de la altitud y puede estimarse directamente a partir del modelo digital de elevaciones mediante filtros

PRECISIÓN - calidad del proceso de medida de una magnitud el método GPS es muy preciso pero las medidas utilizadas sin corrección están afectadas por un error importante derivado de una degradación inducida en la señal de los satélites

PROYECCIÓN - conjunto de transformaciones métricas definidas para representar la superficie de la Tierra sobre un plano. Existe un gran número de proyecciones, cada una de las cuales posee propiedades diferentes en cuanto a las métricas del objeto real y de su representación plana

RASTER - modelo de datos en el que la realidad se representa mediante celdas que forman un mosaico regular cada celda del mosaico es una unidad de superficie que recoge el valor medio de la variable representada (altitud, reflectancia ...), las celdas pueden ser cuadradas (celdas) o no (triangulares, hexagonales...) un modelo de datos raster está basado en localizaciones.

RIESGO - pérdidas esperadas de los elementos vulnerables ante la ocurrencia de un fenómeno determinado el riesgo suele valorarse en unidades monetarias (ver vulnerabilidad) riesgo específico: grado de pérdidas esperadas como consecuencia de un fenómeno determinado; es igual a la peligrosidad por la vulnerabilidad.

SIG/GIS - sistema de información geográfica; sistema de gestión de bases de datos (SGBD) con herramientas específicas para el manejo de información espacial y sus

propiedades los tipos de propiedades que un SIG debe poder analizar tanto independiente como conjuntamente son tres: métricas, topológicas y atributivas.

SISTEMA DE COORDENADAS - marco de referencia espacial que permite la definición de localizaciones mediante coordenadas éstas pueden ser lineales (sistemas cartesianos, con ejes ortogonales) o esféricas (donde se utilizan como coordenadas el acimut y elevación angular).

VALIDACIÓN - proceso de comprobación de que datos y métodos responden a un estándar por ejemplo, la comprobación de que los códigos municipales de una base de datos se corresponden son coherentes con la codificación de referencia (por ejemplo, del Instituto Nacional de Estadística).

VECTOR - entidad geométrica definida por una magnitud y un sentido un vector está formado por un par de puntos ordenados; el orden define el sentido del vector y la distancia entre origen y final su magnitud; si la magnitud es nula, el vector se reduce a un punto y el sentido queda indefinido.

VECTORIAL - modelo de datos en el que la realidad se representa mediante vectores o estructuras de vectores una estructura vectorial puede ser compleja: una cadena de vectores forma un arco; una cadena de arcos forma un anillo; uno o varios anillos definen un polígono se trata de un modelo de datos basado en objetos (geométricos) frente al modelo raster, basado en localizaciones.

VECTORIZAR - transformación de una estructura raster en una vectorial.

VULNERABILIDAD - el porcentaje de pérdida de un elemento como resultado de la ocurrencia de un fenómeno natural de una magnitud determinada la vulnerabilidad se expresa en un rango 0 (ningún daño) a 1 (pérdida completa); es un concepto que se aplica en análisis de riesgo.

CAPÍTULO 1. PRESENTACIÓN.

1.1. Introducción.

Durante los últimos años el estudio de los deslizamientos han cobrado mayor importancia, puesto que son considerados como uno de los peligros geológicos que generan grandes pérdidas, tanto humanas como de bienes (ver Figura 1.1). Estos eventos pueden ser controlados teniendo en cuenta planes de prevención a través de estudios de las zonas potenciales a la ocurrencia de estos fenómenos.

De esta forma para la evaluación de las características y el comportamiento de las laderas, se desarrolla una serie de metodologías que involucran métodos determinísticos como probabilísticos. En este trabajo se presenta el análisis de la susceptibilidad de los deslizamientos con validación de los modelos y la implementación de técnicas alternativas como la lógica difusa. Los desastres que originan la ocurrencia de deslizamientos pueden minimizarse adoptando medidas de prevención teniendo un buen conocimiento de las características de su evolución y los factores que intervienen en su desarrollo; el análisis de susceptibilidad del terreno a deslizamientos se realiza mediante tratamiento estadístico multivariante¹ que consiste dentro de la modelación de sistemas, una etapa esencial y que presenta dificultades tanto conceptuales como prácticas, siendo necesario la validación de los modelos probabilísticos del evento, una parte importante en este proceso es la validación empírica, que se efectúa para comparar las predicciones del modelo con observaciones provenientes del mundo real.

Estas comparaciones, idealmente, se deben efectuar usando métodos estadísticos adecuados, con un nivel de confianza aceptable, de tal modo que las inferencias sean correctas. Sin embargo, en muchos casos sobre el modelamiento de deslizamientos existen nuevos modelos de simulación que han sido realizados sin una adecuada validación, y su comportamiento con nuevos datos.

1.2. Antecedentes.

La Provincia de Napo en el Ecuador, es una reserva de agua dulce y diversidad biológica del país, el área de estudio corresponde a las parroquias de Papallacta y Cuyuja, se encuentran dentro del Cantón Quijos.

¹ Herramientas estadísticas que estudian el comportamiento de tres o más variables al mismo tiempo.

Los desastres naturales alteran los ecosistemas, e incrementan el impacto de su degradación, demandando enormes cantidades de capital para reponer lo que es destruido y dañado, el mayor número de personas fallecidas por desastres en el país se deben a deslizamientos e inundaciones; por ello la importancia de estudiar estos fenómenos².

La figura 1.1. muestra las zonas potencialmente sensibles a los deslizamientos y derrumbes.

Este mapa, fue realizado con base en la información general de INFOPLAN.

Se observa que la región andina es potencialmente la más expuesta a las manifestaciones morfodinámicas, y que la provincia de Napo está potencialmente expuesta a deslizamientos³.

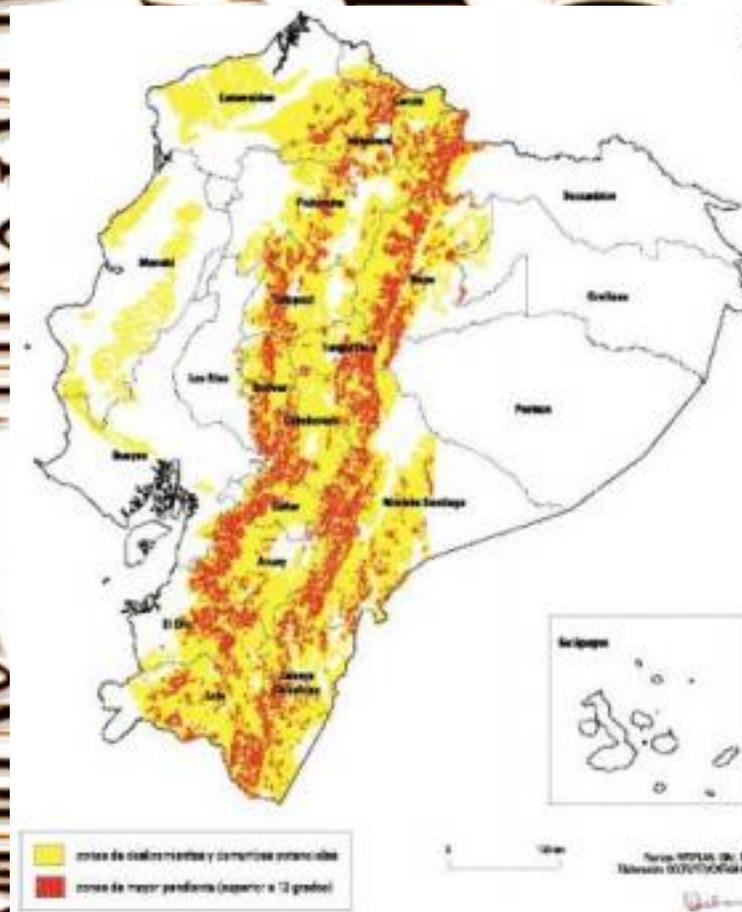


Figura 1.1. Mapa de susceptibilidad de deslizamientos del Ecuador.

Fuente: Libro de Amenazas, vulnerabilidad, riesgo y capacidades en Ecuador, Oxfan, IRD, COOPI, 2003.

Por tal motivo se ha desarrollado varios proyectos relacionados a movimientos del terreno en el Cantón Quijos, como:

² OEA-Secretaría Técnica de Gestión de Riesgo, 2001.

³ Libro de Amenazas, vulnerabilidad, riesgo y capacidades en Ecuador, Oxfan, IRD, COOPI, 2003.

- Tesis “Desarrollo de una aplicación SIG orientada a la administración de Riesgos Volcánicos y Sísmicos en el tramo de la Carretera Papallacta-Lago Agrio y por Movimientos en Masa en el Tramo Papallacta – Baeza” elaborado por C. Campos, X. Reyes y X. Rodríguez, ESPE. (2003)
- “Estudio de Deslizamientos en la Carretera Quito Tena, Tramo La Virgen de Papallacta – Sardinas”, elaborado por la DINAGE. (2002)

Mostrando que existe interés en esta zona, para la realización de estudios de fenómenos naturales, sin embargo los gobiernos locales no han designado recursos técnicos, tecnológicos y económicos para estudios de gestión de riesgo, en este ámbito.

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, siendo 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. En este marco el análisis geográfico busca comprender los modos de organización en el espacio constituido por la superficie terrestre empleando un conjunto de técnicas que buscan explicar las relaciones de los seres humanos con el medio y entre sí; dentro de este concepto, los SIG, se constituye en una herramienta para realizar análisis geográfico.

Los SIG al permitir manejar gran cantidad de datos para cada unidad de terreno, tanto para el caso de los métodos determinísticos⁴ como para los probabilísticos⁵, ayudan a obtener otros parámetros relacionados con la ocurrencia de cualquier fenómeno a ser estudiado, dando como resultado la generación de modelos predictivos de ocurrencia de un fenómeno. El carácter estadístico o físico de los modelos, constituye parte fundamental en el análisis del modelamiento del fenómeno a estudiar, basándose en las leyes físicas que rigen los procesos, y en relaciones estadísticamente significativas entre variables. Las ecuaciones que describen un modelo no son por tanto físicamente o dimensionalmente consistentes ni universales, ya que en rigor solo son válidas para el contexto espacio temporal en el que se estudia cualquier fenómeno.

⁴ Se basan en información conocida - “Modelos de Decisión”, Gould, Eppen y Schmidt.

⁵ Parte de la información necesaria no se conoce con certeza - “Modelos de Decisión”, Gould, Eppen y Schmidt.

1.2.1. Situación Actual.

El terremoto del 5 de marzo de 1.987 provocó la reactivación de muchas fallas y accionó una serie de grandes deslizamientos causando severos daños en un tramo del oleoducto razón por la que el país perdió alrededor de seis meses de ingresos de la venta internacional del crudo. Los deslizamientos y flujos de lodo ocurridos en la zona de Papallacta en junio del 2.001, dejaron como resultado 36 personas sepultadas, 4 desaparecidas, 250 personas afectadas⁶ un tramo del SOTE destruido y el derrame de 10.000 barriles de petróleo; son evidencias claras que el área es una zona susceptible a varias amenazas naturales.

La construcción de vías conlleva un desplazamiento del terreno, ya sea para relleno o corte, provocando la inestabilidad del terreno; en estudios anteriores⁷ se evidencia que en el tramo de la carretera Papallacta-Baeza, existen continuos desplazamientos de terreno. Al poseer gran cantidad de información sobre esta zona se presenta la duda sobre que análisis resulta más conveniente y óptimo para dicha zona de estudio, siendo este proyecto una orientación a elaborar una herramienta útil para el análisis de deslizamientos, tratando de recopilar información realizada años anteriores sobre este tema y en parte del área de estudio, logrando obtener un desarrollo geoestadístico para ser aplicado a modelos de susceptibilidad del terreno a deslizamientos y conseguir un modelo óptimo de susceptibilidad del terreno a deslizamientos.

1.2.2. SIG en el análisis de susceptibilidad a deslizamientos.

Para analizar la susceptibilidad del terreno a deslizamientos es importante contar con herramientas que nos permita trabajar con un correcto y rápido manejo de datos espaciales, siendo en general el objetivo del uso del SIG.

Los SIG en este tipo de estudios son muy útiles para el procesamiento de la base de datos georeferenciada, su principal ventaja es facilitar diferentes operaciones que se pueden realizar con las distintas coberturas generadas en base a mapas temáticos de una determinada zona, generando de esta forma los mapas de susceptibilidad del terreno a deslizamientos.

⁶ Diario El Comercio, Junio, 2.001

⁷ Estudio de Deslizamientos en la Carretera Quito Tena, Tramo La Virgen de Papallacta – Sardinas, DINAGE 2002

1.3. Justificación e Importancia.

Las parroquias de Papallacta y Cuyuja son un foco de desarrollo para la provincia y la principal conexión entre Napo y Pichincha, poseen grandes reservas de agua dulce y diversidad biológica, se ven amenazadas por una serie de fenómenos internos y factores ambientales externos, que algunas veces combinados con la construcción de vías, son la causa para la inestabilidad del terreno; en la ruta del SOTE y OCP existen 45 Km. de alto riesgo geotectónico, hidrológico y sísmico con posibilidades de rupturas de los oleoductos más de una vez por año. En la zona de Cuyuja han ocurrido 25 roturas del oleoducto y poliducto la mayor parte por desastres naturales⁸.

En Papallacta la inestabilidad del terreno provoca que vías sean deshabilitadas hasta su reparación, proyectos desarrollados como “Proyecto Hidroeléctrico Baeza”, realizado por la empresa eléctrica Quito S.A, han cambiado el uso del suelo dentro de la parroquia, la diferente inclinación de los taludes del valle del río Quijos, se presentan con pendientes más pronunciadas al margen derecho, ocasionados por un rejuvenecimiento debido a la superposición de las lavas del Antisana, en tanto que los taludes del margen izquierdo muestran pendientes más tendidas y con rasgos de inestabilidad evidenciando la presencia de varios deslizamientos.

Al no contar con resultados completos que reflejen la realidad total de las parroquias, como también su grado de afectación y aumento de deslizamientos que ha provocado la construcción de diferentes proyectos civiles, el proyecto “ANÁLISIS Y MODELAMIENTO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS MEDIANTE SIG Y GEOESTADÍSTICA EN LAS PARROQUIAS DE PAPALLACTA Y CUYUJA, CANTÓN QUIJOS”, comprende el análisis y determinación de zonas de susceptibilidad a deslizamientos abarcando un área de 64.000 has aproximadamente, además implica la validación de diferentes modelos probabilísticos para la determinación del modelo de mejor ajuste de susceptibilidad a deslizamientos y la implementación de un conjunto de técnicas alternativas como la lógica difusa.

⁸ OCP, Estudio Hidrológico Cruce Río Quijos, INGECONSULT - 2001

1.4. Objetivos.

1.4.1. Objetivo general.

Modelar y comparar diferentes métodos para la validación del mapa de susceptibilidad a deslizamientos, utilizando análisis SIG y geoestadística, en las parroquias de Papallacta y Cuyuja.

1.4.2. Objetivos específicos.

- Generar una base de datos alfanumérica y gráfica de la zona de estudio.
- Obtener modelos de susceptibilidad a deslizamientos, con los datos e información temática de las Parroquias.
- Normalizar, analizar y determinar errores, mediante diagramas de dispersión y geoestadística, de las variables que intervienen en el modelo de deslizamientos.
- Comparar los modelos de susceptibilidad del terreno a deslizamientos obtenidos.
- Analizar el modelo final de susceptibilidad a deslizamientos y contrastar su calidad mediante un test estadístico sobre una muestra de datos de comprobación.

1.5. Alcance.

- Establecer factores internos y externos que afectan la estabilidad del terreno.
- Estimar la susceptibilidad del terreno a deslizamientos.
- Localizar áreas potencialmente inestables (evaluación de la susceptibilidad).
- Implementar la utilización de operadores fuzzy en la realización de modelos estadísticos.
- Integrar los modelos de susceptibilidad del terreno a deslizamientos con dos diferentes sistemas de información Geográfica.
- Utilizar dos herramientas geoestadísticas para el análisis y validación de modelos.

1.6. Descripción del proyecto

El presente estudio es un aporte de información para administraciones locales que se debe tener en cuenta en la gestión de riesgos en las parroquias de Papallacta y Cuyuja. Las fases de del estudio incluyen la recopilación, análisis y validación de datos, y la aplicación de

los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la evaluación de la susceptibilidad del terreno a deslizamientos. Con esta perspectiva se llevará un proceso de estimación de la susceptibilidad.

El análisis de la susceptibilidad del terreno a deslizamientos, se realizó mediante tratamiento estadístico multivariante de tipo discriminante. El objetivo principal del análisis ha sido la captura automática de la mayor parte de los factores relacionados con estos deslizamientos de forma tradicional mediante fotointerpretación, reconocimiento de campo y posterior digitalización.

Los factores utilizados serán relacionados con la geometría y situación actual del terreno, realizando un tratamiento estadístico para cada factor, estos resultados se mostrarán con en el análisis de cada variable utilizada en este proyecto; así como la predicción de ocurrencia de deslizamientos, determinado por zonas de susceptibilidad.

ANÁLISIS Y MUESTREO DE LA SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS MEDIANTE SIG Y GEOSTADÍSTICA EN LAS PARROQUIAS DE PARRALTA Y CUYUJA, CANTÓN QUIJOS, CIGMA,

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Deslizamientos.

Sharpe en 1938 definió los deslizamientos como la “caída perceptible o movimiento descendente de una masa relativamente seca de tierra, roca o ambas”.

Según Crozier (1986) “un deslizamiento se define como el movimiento gravitacional hacia el exterior de la ladera y descendente de tierras o rocas sin la ayuda del agua como agente de transporte”.

2.1.1. Introducción.

Para el presente proyecto se conceptualizará a los deslizamientos como un descenso masivo y relativamente rápido, a veces de carácter catastrófico, de materiales, a lo largo de una pendiente. En un deslizamiento el material se mueve como una masa única, no como varios elementos que se mueven a la vez, se efectúa a lo largo de una superficie de deslizamiento, que facilita la acción de la gravedad. Esta superficie se crea por la absorción de agua a una profundidad determinada, lo que implica un cambio de densidad de la capa subyacente que es lo que provoca la existencia de un plano de deslizamiento. Afecta tanto a tierras poco compactas como a rocas.

Todo fenómeno o evento que produce el desplazamiento de un pequeño o gran volumen de suelo o roca, se considera como terreno inestable. Se basa en un concepto universal “todo terreno es inestable cualquiera sea su naturaleza y su contexto, porque está sometido a las leyes de la gravedad y procesos de erosión y degradación físico química”⁹.

La mejor estrategia para reducir los impactos de los deslizamientos es la prevención, que precisa de la percepción de la existencia del fenómeno de peligro, de su evaluación y la adopción de medidas para mitigar los efectos¹⁰. En este sentido la primera fase en la prevención del peligro a deslizamiento es la identificación y caracterización de éste. La caracterización del peligro se expresa usualmente de forma cartográfica mediante la clasificación de zonas del territorio de acuerdo a la susceptibilidad a deslizamientos que presenten. Los mapas resultantes (mapas de susceptibilidad y mapas de peligrosidad) son

⁹ Curso CERIG 1995.

¹⁰ Corominas, 1992.

una herramienta básica para la planificación del territorio¹¹, sobre todo, en zonas montañosas.

La ocurrencia de deslizamiento depende de las siguientes variables:

- Clase de rocas y suelos
- Orientación de las fracturas o grietas en la tierra.
- Cantidad de lluvia en el área.
- Cobertura vegetal
- Actividad sísmica.
- Actividad humana (cortes en ladera, falta de canalización de aguas, etc.).
- Erosión (por actividad humana y de la naturaleza).

Los deslizamientos o movimientos de masa no son iguales en todos los casos, y para evitarlos o mitigarlos es indispensable saber las causas y la forma como se originan, por tanto para el área de estudio se considerará las variables que expresen la mejor correlación del fenómeno, para ser tomadas en cuenta en el modelo matemático.

2.1.2. Elementos del deslizamiento.

- **Escarpe principal:** Una superficie de fuerte pendiente sobre terreno no perturbado alrededor de la periferia del deslizamiento, causado por movimiento de material de deslizamiento fuera del terreno no perturbado. La proyección de la superficie de escarpa debajo del material desplazado viene a ser la superficie de la ruptura.
- **Escarpe secundario:** Una superficie de pendiente fuerte sobre el material desplazado producida por movimientos diferenciales al interior de la masa deslizante.
- **Cabeza:** La parte superior del material de deslizamiento a lo largo del contacto entre el material desplazado y la escarpa principal.
- **Puntera:** El punto más lejano de la margen desde la cima del deslizamiento.
- **Pie:** La porción del material desplazado que queda pendiente abajo del margen de la superficie de ruptura.
- **Cuerpo principal:** Aquella parte del material desplazado suprayacente a la superficie de ruptura entre la escarpa principal y el pie y la base de la superficie de ruptura.
- **Flanco:** El costado de un deslizamiento de tierras.

¹¹ Irigaray et al., 2000

- Corona: El material que aún permanece en su lugar, prácticamente no desplazado y adyacente a las partes más altas de la escarpa principal.
- Superficie original del terreno: La pendiente que existía antes que ocurra el movimiento que se está considerando. Si ésta es la superficie de un deslizamiento anterior, el hecho debe ser anotado.
- Superficie de separación: Es la superficie que separa el material desplazado del material estable pero no se reconoce que hubiera sido una superficie que falló.
- Material desplazado: El material que se ha desplazado de su posición original sobre la pendiente. Puede estar en estado deforme o no deforme
- Zona de agotamiento: El área dentro de la cual el material desplazado queda debajo de la superficie original del terreno.
- Zona de acumulación: El área dentro de la cual el material desplazado queda encima de la superficie original del terreno.

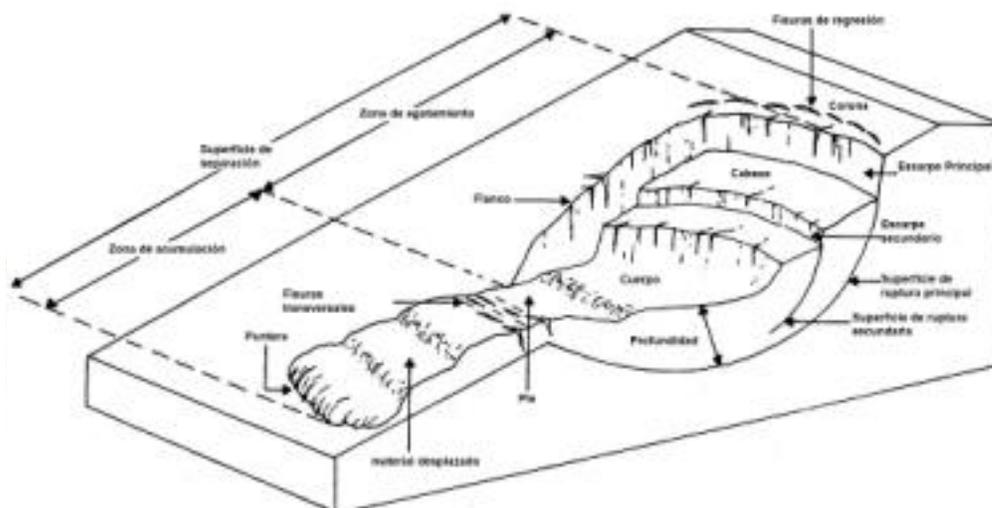


Figura 2.1. Partes de un Deslizamiento
Fuente: Curso CERIG 1995

2.1.3. Clasificación

La clasificación utilizada es la propuesta por Corominas y García (1997) basada en la clasificación de Varnes, Hutchinson y Cruden, exceptuando lo que los autores definen como deformaciones sin rotura. (Tabla 2.1.).

- **Mecanismos**

El criterio básico que permite separar los distintos tipos de deslizamiento son los mecanismos de rotura. Se pueden encontrar 5 mecanismos de rotura principales:

- Un desprendimiento es aquel movimiento de una porción de suelo o roca, en forma de bloques aislados o masivamente que, en una gran parte de su trayectoria desciende por el aire en caída libre, volviendo a entrar en contacto con el terreno, donde se producen saltos, rebotes y rodaduras.

Tabla 2.1. Clasificación simplificada de los mecanismos y tipos de deslizamiento.

Fuente: "Terminología de los movimientos de ladera"¹².

TIPO DE MECANISMO	SUBTIPO	TIPO DE DESLIZAMIENTO	TÉRMINO EN INGLÉS
Movimientos donde predomina la trayectoria vertical		Desprendimientos o caídas	Falls
Movimiento de giro en Bloques por fractura en escarpes		Derribe o Volcamiento	Topples
Movimientos de grandes bloques al iniciarse la rotura	Superficies de deslizamiento planas	Deslizamientos Traslacionales	Slides
	Deslizamientos sobre superficies curvadas	Deslizamientos Rotacionales	Rotational Slides
Movimientos de una masa desorganizada	Flujos	Reptación Soliflucción Flujos de Barridos Flujos de Tierra Flujos de Lodo	Creep Solifluction Debris flows Earthflows Avalanches
Movimientos con extrusión plástica lateral		Expansión Lateral	Lateral spreading

- Los vuelcos son movimientos de rotación hacia el exterior, de una unidad o conjunto de bloques, alrededor de un eje pivotante situado por debajo del centro de gravedad de la masa movida.
- Los deslizamientos son movimientos descendentes relativamente rápidos de una masa de suelo o roca que tiene lugar a lo largo de una o varias superficies definidas que son visibles o que pueden ser inferidas razonablemente o bien corresponder a una franja estrecha.

¹² Corominas y Garcia, 1997

- El movimiento dominante en las expansiones laterales es la extrusión plástica lateral, acomodada por fracturas de cizalla o de tracción que en ocasiones pueden ser de difícil localización.
- Los Flujos son movimientos de una masa desorganizada o mezclada donde no todas las partículas se desplazan a la misma velocidad ni sus trayectorias tienen que ser paralelas. Debido a ello la masa movida no conserva su forma en su movimiento descendente, adoptando a menudo morfologías lobuladas.

- **Tipos de Movimientos del Terreno.**

- Caída.- Es el movimiento de rocas, principalmente a través del aire y en forma rápida sin dar tiempo a eludirlas.



Figura 2.2 Caída

- Derrumbe o Volcamiento.- Consiste en el giro hacia delante de una o varias rocas, ya sea por acción de la gravedad o presiones ejercidas por el agua.



Figura 2.3. Derrumbe

- Deslizamiento Traslacional.- Consiste en movimientos de capas delgadas de suelo o rocas fracturadas a lo largo de superficies con poca inclinación.



Figura 2.4 D. Traslacional

- Deslizamiento Rotacional (Hundimientos) Son los desplazamientos de suelos o rocas blandas a lo largo de una depresión del terreno.

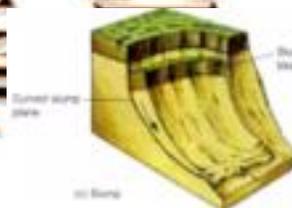


Figura 2.5. D. Rotacional

Dependiendo de la profundidad a la que se encuentre la superficie de deslizamiento el movimiento en masa puede ser superficial, y que afecta a poco volumen, o profundo, y que afecta a grandes volúmenes. En este caso presenta un perfil cóncavo que imprime a la masa, en el deslizamiento, un movimiento de rotación.

- Reptación.- Es un tipo de movimiento, provocado por la inestabilidad de un talud y la gravedad, es un movimiento muy lento que se da en capas superiores de laderas arcillosas. La velocidad de bajada es mayor en la superficie, está relacionado con procesos de variación de humedad estacionales ya que el agua favorece este fenómeno actuando como lubricante o aumento el peso, se manifiestan en forma de pequeñas ondulaciones, y suelen ser signo de una posible futura inestabilidad generalizada.



Figura 2.6. Reptación

- Solifluxión.- La solifluxión es el proceso geomorfológico característico de zonas de clima periglacial (aunque puede darse incluso en los trópicos), consistente en el desplazamiento masivo y lento por gravedad de formaciones arcillosas u otros tipos de suelo sobre el permafrost a causa de la plasticidad y fluidez adquirida por aquéllos cuando absorben gran cantidad de agua.



Figura 2.7. Solifluxión

- Flujos de derrubios.- Son movimientos complejos que engloban a fragmentos rocosos, bloques, cantos y gravas en una matriz fina de arenas, limos y arcilla.



Figura 2.8. Flujos de Derrubios

- Flujos de Tierra - Son movimientos lentos de materiales blandos. Estos flujos frecuentemente arrastran parte de la capa vegetal.

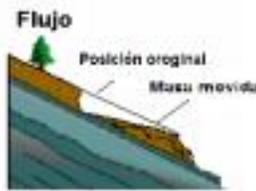


Figura 2.9. Flujos de Tierra

- Flujos de lodo.- Se forman en el momento en que la tierra y la vegetación son debilitadas considerablemente por el agua, alcanzando gran fuerza cuando la intensidad de las lluvias y su duración es larga.



Figura 2.10. Flujos de lodo

- Expansión lateral - Se caracteriza porque la ampliación lateral por corte progresivo y grietas de tracción es el modo predominante de este tipo de movimiento. Los fragmentos de la capa superior pueden hundirse, desplazarse, rotar o desintegrarse, o licuarse y fluir. El mecanismo de falla puede entonces englobar rotación, traslación y flujo por lo cual éste tipo de falla puede considerarse como compleja.



Figura 2.11 Expansión lateral

2.1.4. Metodología de Levantamiento.

A continuación se describen los cuatro elementos que permiten evaluar y representar la susceptibilidad del terreno a deslizamientos:

- **Identificación.**

Para identificar áreas potencialmente inestables a movimientos del terreno existen métodos que se pueden agrupar en¹³:

- Instrumentación de la ladera es el mejor método para controlar la existencia de deslizamientos. Este es un método muy costoso y sólo se aplica en estudios puntuales.
- Reconocimiento geomorfológico de deslizamientos previos muestra que las áreas con deslizamientos anteriores son las más susceptibles¹⁴. El reconocimiento se realiza mediante el estudio de las formas del relieve, las características de los depósitos deslizados y con indicadores de actividad como la vegetación, daños en infraestructuras, etc.¹⁵.

Sin embargo la identificación de deslizamientos previos, sobre todo si son antiguos y de grandes dimensiones, no es inmediata y se han observado conexiones de zonas deslizadas en mapas geomorfológicos y de riesgo¹⁶.

- Índices morfológicos de inestabilidad evalúa la inestabilidad potencial de las laderas por analogía con otras de la misma litología y entorno geográfico.

Diversos ejemplos son la topografía cóncava¹⁷ que favorece la acumulación de colusiones en hondonadas que concentran el flujo subsuperficial, favoreciendo la formación de corrientes de derrubios; las pendientes umbral o críticas, por encima de las cuales se produce la rotura, envolventes que, para alturas determinadas, incluyen los ángulos que permiten mantener los taludes estables, entre otros.

También se ha relacionado la superficie de cuenca superficial con la susceptibilidad de rotura de una ladera mediante las características topográficas.

- Tratamiento de datos permiten estimar la susceptibilidad a los deslizamientos evaluando la participación de un conjunto de distintos factores asociados a la

¹³ Corominas, 1992

¹⁴ Kojan et al., 1972

¹⁵ Corominas, 1986

¹⁶ Antoine, 1977

¹⁷ Reneu y Dietrich, 1987

estabilidad y la contribución relativa de cada uno de ellos. El resultado final es un índice de potencialidad indicando la susceptibilidad a la rotura. Existen varios métodos que se han aplicado a los deslizamientos¹⁸. Una de las técnicas más utilizadas es el análisis estadístico multivariante¹⁹ basado en la regresión múltiple y en el análisis discriminante como técnicas estadísticas más utilizadas.

- **Estimación de la Susceptibilidad del Terreno a Deslizamientos.**

El tipo de deslizamiento, su tamaño y su movilidad son aspectos fundamentales para estimar la susceptibilidad. No todos los mecanismos de rotura deben interpretarse como fenómenos catastróficos. La reptación, por ejemplo, con su baja velocidad limita el nivel de daños, mientras que deslizamientos como pequeñas avalanchas de derrubios pueden causar daños enormes²⁰. El alcance de los deslizamientos se puede estimar mediante dos clases de aproximaciones:

- Métodos empíricos se basan en relaciones observadas entre el volumen del movimiento y su alcance.
- Modelos numéricos se basan en la simulación de la trayectoria de deslizamientos de tipo desprendimiento y de las corrientes de derrubios. Los modelos se desarrollan con software mediante modelos numéricos²¹.

- **Potencialidad de Movimiento del Terreno.**

La predicción temporal de la ocurrencia de una rotura en una ladera es el aspecto más difícil de definir en la evaluación de la peligrosidad a deslizamientos, se le puede dividir en:²²

- Los métodos basados en la observación de movimientos se basan en la constatación que tanto en suelos como en rocas la rotura suele estar precedida por deformaciones.
- Los métodos empíricos indirectos correlacionan los deslizamientos ocurridos en un área con los factores desencadenantes. Otros autores correlacionan los

¹⁸ Stevenson, 1977

¹⁹ Jones, 1961; Baeza, 1994

²⁰ Corominas y Alonso, 1984

²¹ Deangeli y Grasso, 1996

²² Corominas, 1992

deslizamientos con otros factores como el área de la cuenca hidrográfica y la pendiente de la ladera.

- **Representación de Movimientos de Terreno.**

En la mayoría de los estudios para evaluar la susceptibilidad a los deslizamientos se limitan a estimar la misma sin una validación de los resultados. Cuando se puede disponer de un número suficiente de datos se pueden utilizar tanto métodos estadísticos como probabilísticos para estimar la susceptibilidad y su posterior clasificación. Con estos métodos se evalúa la influencia de cada factor en la estabilidad. La principal ventaja es la objetividad del método puesto que los resultados pueden ser comparados y validados. El principal inconveniente es que los resultados normalmente sólo pueden aplicarse a la zona de donde se han extraído las funciones estadísticas que son las que determinan la contribución de cada factor a la estabilidad.

2.1.5. Factores y Detonantes de Movimientos del Terreno.

La inestabilidad de taludes se da por el desequilibrio entre las fuerzas que actúan en un talud, condicionadas por una serie de factores que actúan simultáneamente y dan lugar a la modificación de las condiciones iniciales de estabilidad del terreno.

Para el presente estudio se usaran ciertos factores de inestabilidad que son denominados “parámetros” que se clasifican en tres grandes grupos: Geológicos, Topográficos y Ambientales.

- La Geología permite conocer las características de los suelos y rocas. La formación geológica determina la presencia de materiales duros o de baja resistencia.
- El ángulo de talud referido a las pendientes; generalmente las pendientes más pronunciadas tienen mayor probabilidad de deslizamientos. Esto no impide que ocurran deslizamientos en pendientes suaves y viceversa, las pendientes más pronunciadas pueden no ser siempre las más peligrosas.
- Clima: promedio de precipitación anual expresada en mm/año, permite conocer la cantidad de lluvia en una determinada zona.
- Cobertura vegetal (índices de protección del suelo) referido al tipo de vegetación, madurez, estado y protección que brinda al suelo.

- Fallas y discontinuidades Es un plano de ruptura de una roca, donde hay un desplazamiento provocado por esfuerzos tectónicos. La mayor parte de las fallas tienen lugar a lo largo de fracturas inclinadas. De acuerdo al sentido del movimiento las fallas se clasifican en:

- Fallas normales: son aquellas en las que el bloque del techo se mueve hacia abajo con respecto al bloque del muro. Estas fallas suelen tener buzamientos moderados a altos, con un promedio de 60°. Con buzamientos menores a 45° pasan a denominarse fallas normales de bajo ángulo.
- Fallas transcurrentes: son aquellas que acomodan el movimiento horizontal de los bloques adyacentes con respecto al plano de falla. Estas dependiendo a su vez del movimiento relativo de un bloque con respecto al otro, pueden ser de dos tipos: dextrales o sinistral.
- Fallas inversas: se caracterizan por un movimiento del bloque del techo hacia arriba con respecto al muro. Las fallas inversas tienen generalmente un buzamiento menor a 45°, en promedio 30°. Puede ocurrir que el plano de falla sea muy inclinado, en cuyo caso se originaría un cabalgamiento, es decir, que los estratos más antiguos solaparían a los más modernos (quedarían por encima).
- Fallas activas: son aquellas que han presentado evidencia de movimiento en el pasado geológico reciente (cuaternario), y que es capaz de generar terremotos en el futuro próximo.

- Red hidrográfica conformada por todos los cuerpos de agua: ríos, lagunas, lagos, quebradas, entre otros
- Geología (índice de resistencia de la roca a la erosión)
- Suelos (% retención de humedad)

En general, el mecanismo disparador de los movimientos en masa está asociado con la realización de cortes en terreno natural inestable sin la debida protección geotécnica, otros factores que pueden dinamizar los movimientos en masa, incluyen la actividad sísmica, la saturación del suelo por fluidos y la incidencia de procesos erosivos.

Cuanto más factores se apliquen a un sitio específico, mayores serán las posibilidades de que el sitio experimente desprendimientos.

Las intervenciones antrópicas que pueden contribuir a generar riesgo de deslizamientos en áreas susceptibles a los fenómenos de deslizamientos son:

- Cortes en el terreno como de carreteras, cortes para construcción de casas, que crean masas inestables de material sin apoyo, generando pendientes negativas.
- Construcción de muros sin posibilidad para drenaje. El agua del suelo retenida detrás de los muros incrementa la presión en los poros y el peso en el material retenido, desestabiliza la masa retenida.
- Remover plantas de raíces profundas desestabiliza el suelo en una ladera e incrementa el potencial de deslizamiento.
- El mal manejo de aguas superficiales o subsuperficiales en las laderas a través de la irrigación, o votando las aguas residuales sobre ellos.
- Rellenos en zonas de pendientes y con una pobre compactación.

2.1.6. Susceptibilidad del Terreno a Deslizamientos.

La susceptibilidad es la potencialidad de un terreno o área, a la ocurrencia de deslizamientos y no, implica el aspecto temporal del fenómeno²³.

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

- Inventario de los deslizamientos.
- Topografía de la zona de estudio.
- Análisis de los factores de ocurrencia.

La metodología usada para el estudio de la susceptibilidad de los deslizamientos de ladera es un proceso de análisis de los factores que los condicionan, y que logran interrelacionarse en función al Factor de Certeza. Los sistemas de información geográfica permiten realizar dicho análisis mediante superposición de mapas temáticos de los diferentes factores condicionantes, gracias al establecimiento de bases de datos asociadas.

2.2. Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Los SIG en estudios de susceptibilidad de terrenos a deslizamientos, son muy útiles para el procesamiento de la base de datos. La principal ventaja de los SIG es que facilitan diferentes operaciones que se pueden realizar con las distintas coberturas generadas en

²³ Lana, et al 2004

base a mapas temáticos de una determinada zona. Esto permite una integración organizada de hardware, software, datos geográficos y personal, diseñado para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión.

2.2.1. Generalidades.

La difusión, sobre todo en la última década, de programas computacionales para aplicar los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha facilitado y promovido la incorporación de la dimensión espacial en el análisis de fenómenos y procesos sociales, entre ellos los demográficos. Otras aplicaciones de los SIG van desde la construcción de un conjunto o inventario de información exhaustiva de unidades territoriales (en punto, línea o área) hasta su uso como herramientas para formular modelos estadísticos que reflejen la espacialidad e interacción de los fenómenos con la dimensión territorial y ambiental.

Los SIG facilitan la combinación e integración de múltiples cartografías, manejadas como capas superpuestas de datos digitales (ver Figura 2.12.) que se observan simultáneamente y como características de un mismo espacio, para la generación de información aplicable a proyectos o cuestiones específicas.

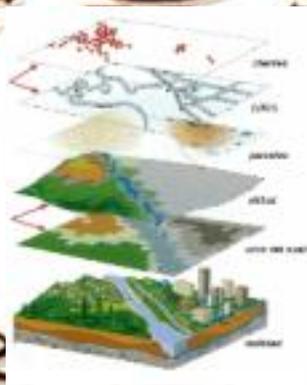


Figura 2.12. Representación gráfica de un SIG

Un SIG permite ingresar o recoger, editar, almacenar, administrar, recuperar, integrar, manipular, analizar, mostrar y modelar capas de datos geográficos y datos de unidades referenciadas espacialmente, usando las herramientas que ofrece el programa de análisis geográfico, para producir información fácil de interpretar y útil, frecuentemente aplicada a la toma de decisiones y a la planeación²⁴.

²⁴ Naciones Unidas, 1997, p. 2 y Walker y Miller 1990, citados en ERDAS IMAGINE, 2000, p. 384; y Trevor 1995, p. 52, citado por Gómez, 2001, p. 2

Además de los equipos físicos, un SIG debe funcionar en condiciones adecuadas, en términos de la información o datos que se ingresan al sistema; su operación debe estar a cargo de personas capacitadas y se debe contar con un presupuesto suficiente. La difusión de estas tecnologías permite que actualmente no solo se desarrollen en el plano institucional sino también en otros ámbitos.

Gracias a los SIG es posible realizar tres actividades fundamentales:

- Visualizar datos en forma espacial,
- Manejar información georeferenciada para su análisis y
- Modelarla.

Una vez que se ingresaron los datos y se conformaron las bases respectivas de las capas y atributos, el beneficio primario de un SIG es que permite visualizar esta información, capa por capa, a manera de mapas de presentación. Asimismo, se obtienen notas, imágenes y bases de datos ligadas a los objetos georeferenciados.

Los SIG son interactivos por lo que, además de generar imágenes estáticas (layouts)²⁵, permiten consultas directas, movimientos continuos sobre la carta geográfica, cambios de escala en la visualización (zoom), cambios de escala del objeto (si el sistema cuenta con dicha información), creación de reportes, consulta y visualización simultánea de datos estadísticos, gráficos, imágenes, notas relativas a un objeto georeferenciado específico seleccionado (reporte referente al centroide seleccionado) o de toda la base de datos. Asimismo, se puede alimentar a los SIG con información, en forma de bases de datos actualizados, en que se logra mostrar secuencias temporales que, de acuerdo con los ritmos de actualización, pueden llegar a operar casi en tiempo real.

Los programas para los SIG permiten desplegar sobre la misma cartografía la información estadística de sus bases de datos georeferenciadas, según si el investigador diseñó la relación del SIG con dichas bases y la construcción de gráficos estadísticos por cada unidad geográfica u objeto georeferenciado.

Un producto derivado de este manejo visual interactivo es la publicación de mapas temáticos estáticos con información seleccionada (Figura 2.13), en segundo término, un SIG permite manejar información ya sea desplegándola sobre la misma imagen cartográfica para su exploración y ordenando las bases de datos y procesándolas para diversos análisis exploratorios.

²⁵ Newsom y Mitrani, 1993, p. 200

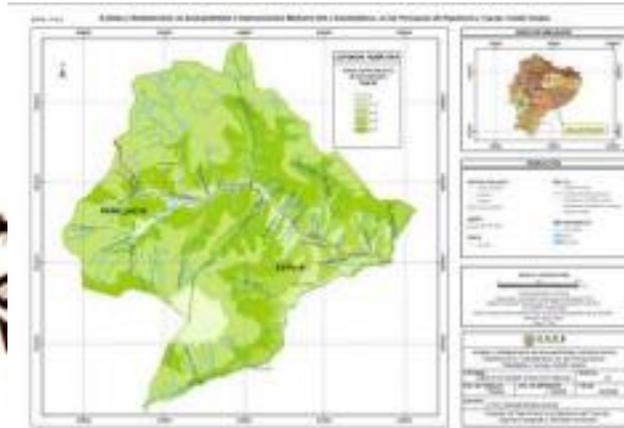


Figura 2.13. Mapa temático - Índice de protección de la cobertura vegetal.

Las capas o mapas de variables individuales pueden analizarse para extraer nueva información, ya sea por una simple comparación visual o combinando y comparando las capas por procedimientos específicos del programa, como la recodificación (asignación de nuevos valores para las clases o rangos de las variables) y la superposición (creación de nuevos archivos con valores específicos de las capas de entrada). Así se puede recuperar la nueva información que se genera. En los SIG, el análisis es el proceso de buscar, en la información geográfica, patrones y relaciones entre las características²⁶.

El Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (ESDA) se sustenta en la cualidad interactiva de los SIG de acceder a bases de datos de diferentes subsistemas y al mismo tiempo de mostrar la visualización de estos rasgos geográficamente y apoyándose en métodos visuales y cuantitativos para resumir las propiedades espaciales de una variable. Así se pueden describir los patrones espaciales y las relaciones entre variables de los elementos georeferenciados, dando pie a la formulación de hipótesis que pueden comprobarse en análisis posteriores con herramientas estadísticas y cartográficas más poderosas, como el uso de modelos formales estadísticos y geográficos.

Algunos procedimientos de análisis espacial comúnmente incluidos en las rutinas de los programas de SIG son el análisis de proximidad (que implica el cálculo de distancias entre objetos georeferenciados con valores, rangos o clases específicos de una variable); el análisis de proximidad (que permite identificar áreas cuya característica de análisis tiene el mismo valor o categoría y que mantienen continuidad, eliminando las áreas no significativas según un límite de inclusión); el análisis de vecindad (para analizar las cualidades de las áreas vecinas de acuerdo con parámetros límite, de densidad, media,

²⁶ Mitchel, 1999, p. 11 citado por Gómez Solís, 2001, p. 4

suma, etc.); la indización (agrega los valores de las capas de insumo), y el análisis matricial (para generar los valores para las áreas u objetos cuyas variables que sirvieron de insumo coinciden con el diseño solicitado).

En tercer término, un SIG permite desarrollar modelos de datos georeferenciados (geográficos, ambientales, estadísticos, sociales o sus combinaciones) de simulaciones, de proyecciones o de corte explicativo, que ayuden a comprender mejor los fenómenos estudiados o de los cuales se deriven aplicaciones específicas.

Mediante el desarrollo de modelos de datos georeferenciados en los SIG es posible derivar y crear nueva información espacial o georeferenciados a partir de insumos de diversa índole y también vincular resultados de modelos de análisis estadístico con las georeferencias a través de las rutinas y herramientas del programa geográfico, o bien a través del desarrollo externo (en un programa estadístico) y su vinculación a los objetos (puntos, líneas, áreas) georeferenciados.

Algunos procedimientos de modelización comúnmente incluidos en las rutinas de los programas de SIG son la modelización gráfica, que permite combinar capas de datos en un número ilimitado de formas, y la modelización script, que permite combinar las capas de datos a través de operadores y condicionales²⁷. Esto puede hacerse para información de un momento específico (transversal) o a lo largo del tiempo (longitudinal), de acuerdo con su disposición y el tipo de modelo estadístico, de simulación o visual que se plantee.

La modelización espacial permite construir zonas, estimar movimientos o desplazamientos y velocidades de elementos sobre áreas y vectores, estimar volúmenes de elementos, así como la valoración de su evolución en el tiempo, y valorar procesos en el territorio, incluida la interacción de distintas variables según supuestos definidos y formalizados.

2.2.2. Construcción de bases de datos geográficas.

La construcción de una base de datos geográfica implica un proceso de abstracción para pasar de la complejidad del mundo real a una representación simplificada asequible para el lenguaje de los ordenadores actuales. Este proceso de abstracción tiene diversos niveles y normalmente comienza con la concepción de la estructura de la base de datos, generalmente en capas; en esta fase, y dependiendo de la utilidad que se vaya a dar a la información a compilar, se seleccionan las capas temáticas a incluir. Pero la estructuración de la información espacial procedente del mundo real en capas conlleva cierto nivel de

²⁷ ERDAS IMAGINE, 2005, pp. 393 y 394

dificultad. Existen relaciones espaciales entre los objetos geográficos que el sistema no puede obviar; es lo que se denomina topología, que en realidad es el método matemático-lógico usado para definir las relaciones espaciales entre los objetos geográficos.

Aunque a nivel geográfico las relaciones entre los objetos son muy complejas, siendo muchos los elementos que interactúan sobre cada aspecto de la realidad, la topología de un SIG reduce sus funciones a cuestiones mucho más sencillas, como por ejemplo conocer el polígono (o polígonos) a que pertenece una determinada línea, o bien saber qué agrupación de líneas forman una determinada carretera. Existen diversas formas de para modelar estas relaciones entre los objetos geográficos, dependiendo de la forma en que ello se lleve a cabo se tiene uno u otro tipo de Sistema de Información Geográfica dentro de una estructura

2.2.3. Topologías, Modelos de datos y Tipos de SIG.

En función del modelo de datos implementado en cada sistema se puede distinguir tres grandes grupos de Sistemas de Información Geográfica:

- Datos vectoriales,
- Datos raster y
- modelo de datos Orientados a Objetos.

En realidad, la mayor parte de los sistemas existentes en la actualidad pertenecen a los dos primeros grupos (vectoriales y raster).

Los datos vectoriales, son aquellos que para la descripción de los objetos geográficos utilizan vectores definidos por pares de coordenadas relativas a algún sistema cartográfico. Con un par de coordenadas y su altitud gestionan un punto, con dos puntos generan una línea, y con una agrupación de líneas forman polígonos. De entre todos los métodos para formar topología vectorial la forma más robusta es la topología arco-nodo, cuya lógica de funcionamiento trataré de detallar en los siguientes esquemas.

La topología arco-nodo basa la estructuración de toda la información geográfica en pares de coordenadas, que son la entidad básica de información para este modelo de datos. Con pares de coordenadas (puntos) forma vértices y nodos, y con agrupaciones de éstos puntos forma líneas, con las que a su vez puede formar polígonos. Para poder implementarla en un ordenador, se requiere la interconexión de varias bases de datos a través de identificadores comunes. Estas bases de datos, son tablas con datos ordenados de forma tabular, contienen

columnas comunes a partir de las cuales se pueden relacionar datos no comunes entre una y otra tabla.

En general, el modelo de datos vectorial es adecuado cuando se trabaja con objetos geográficos con límites bien establecidos, como pueden ser, carreteras, hidrografía, etc.

Los datos raster, basan su funcionalidad en una concepción implícita de las relaciones de vecindad entre los objetos geográficos. Su forma de proceder es dividir la zona de afección de la base de datos en una malla regular de pequeñas celdas y atribuir un valor numérico a cada celda como representación de su valor temático. Lógicamente, para tener una descripción precisa de los objetos geográficos contenidos en la base de datos el tamaño de cada celda ha de ser reducido (en función de la escala), lo que dotará a la malla de una resolución alta. Sin embargo, a mayor número de filas y columnas en la malla, mayor esfuerzo en el proceso de captura de la información y mayor tiempo de ejecución en cálculos del computador a la hora de procesar la misma.

No obstante, el modelo de datos raster es especialmente útil cuando se tiene que describir objetos geográficos con límites difusos, como por ejemplo puede ser la dispersión de una nube de contaminantes, o los niveles de contaminación de un acuífero subterráneo, donde los contornos no son absolutamente nítidos, en esos casos, el modelo raster es más apropiado que el vectorial.

Modelo de datos orientados a objetos, plantean un cambio en la concepción de la estructura de las bases de datos geográficas, mientras los modelos de datos vectoriales y raster, estructuran su información mediante capas, los sistemas orientados a objetos intentan organizar la información geográfica a partir del propio objeto geográfico y sus relaciones con otros. De este modo, los objetos geográficos están sometidos a una serie de procesos y se agrupan en clases entre las cuales se da la herencia. Esto introduce un carácter dinámico a la información incluida en el sistema, frente a los modelos de datos vectoriales y raster que tienen un carácter estático.

2.2.4. Análisis Espacial.

Análisis SIG es el conjunto de herramientas y procedimientos que permiten la manipulación y análisis de datos espaciales con el fin de obtener como resultado la solución de preguntas ó llevar a cabo la solución de problemas complejos. Mediante el análisis se interpretan las variables, los procesos y los resultados²⁸.

²⁸Cristancho, 2003

El análisis espacial es la denominación habitualmente empleada para referirse a un amplio conjunto de procedimientos de estudio de los datos geográficos en los que se considera de alguna manera sus características espaciales. El análisis espacial importa la metodología estadística y su adaptación al estudio de los datos espaciales²⁹.

2.2.5. Modelos cartográficos.

Los modelos cartográficos se basan en la utilización de las funciones de análisis de un sistema de información geográfica bajo una secuencia lógica de tal manera que se puedan resolver problemas espaciales complejos (IGAC. Conceptos Básicos De Sistemas de Información Geográfica y Aplicaciones En Latinoamérica, 1995). Los modelos cartográficos son expresiones detalladas de la manipulación de los datos utilizando las funciones de software SIG, para la producción de nueva información que será almacenada en el computador, de manera permanente como nuevas entidades, o de manera virtual para análisis determinados³⁰.

- **Características.**

Las principales características de los modelos cartográficos son:

- Presentación de una secuencia lógica de operaciones analíticas expresadas en diagramas de flujo,
- Usualmente están codificadas en macros (lenguajes de comando),
- Apoyan el uso de SIG en planeamiento, realización de consensos (consensus building) y resolución de conflictos.
- Los esquemas de flujo son la implementación SIG de los modelos conceptuales del problema y su solución, son el modelo SIG.

En el esquema de flujo se presentan primero los datos o mapas primitivos de entrada, luego los mapas derivados, a continuación los mapas de interpretación y finalmente el resultado ó interpretación final integrada. Un mapa de entrada puede ser el de altitudes, el mapa derivado podría ser el de pendientes y el mapa interpretado sería por ejemplo el mapa con pendientes seleccionadas.

²⁹ Unwin, 1981. Tomado de Bosque, 1992

³⁰ IGAC. Guía Metodológica para la Formulación del Plan de Ordenamiento Territorial Urbano. Aplicable a Ciudades, 1996

- **Modelo Vectorial.**

El modelo vectorial representa cada objeto geográfico de forma independiente (entidad) mediante gráficas de punto, línea, polígono, codificado explícitamente el límite que los separa del entorno como puede observarse en la figura 2.14

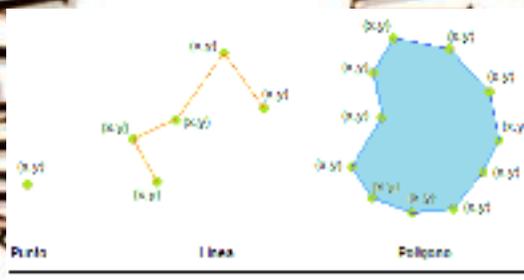


Figura 2.14. Modelo Vectorial

Los elementos puntuales se representan mediante un par de coordenadas x, y , que definen la posición geográfica del punto.

Los elementos lineales están formados por uno o más segmentos lineales que se unen en vértices representados mediante las coordenadas x, y .

Los elementos superficiales se representan mediante las coordenadas x, y , de los vértices de las líneas que forman su perímetro.

El modelo vectorial es una estructura de datos utilizada para almacenar datos geográficos. La localización de los nodos y la estructura topológica se almacena de forma explícita. Las entidades quedan definidas por sus límites solamente y los segmentos curvos se representan como una serie de arcos conectados. Un SIG vectorial se define por la representación vectorial de sus datos geográficos. De acuerdo a las peculiaridades de este modelo de datos, los objetos geográficos se representan explícitamente y, junto a sus características espaciales, se asocian sus valores temáticos.

- **Modelo Raster.**

El modelo raster es un método para el almacenamiento, el procesamiento y la visualización de datos geográficos. Cada superficie a representar se divide en filas y columnas, formando una malla o rejilla regular. (Figura 2.15)

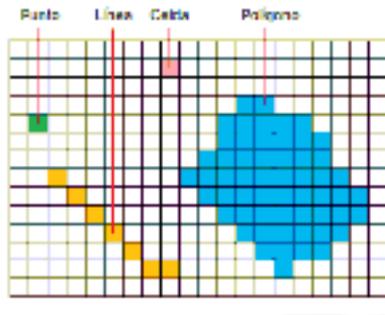


Figura 2.15. Modelo Raster

Cada celda ha de ser rectangular, aunque no necesariamente cuadrada. Cada celda de la rejilla guarda tanto las coordenadas de la localización como el valor temático. La localización de cada celda es implícita, dependiendo directamente del orden que ocupa en la rejilla, a diferencia de la estructura vectorial en la que se almacena de forma explícita la topología. Las áreas que contienen idéntico atributo temático son reconocidas como tal, aunque las estructuras raster no identifican los límites de esas áreas como polígonos en sí.

Los datos raster son una abstracción de la realidad, representan ésta como una rejilla de celdas, en la que la posición de cada elemento es implícita según el orden que ocupa en dicha rejilla. En el modelo raster el espacio no es continuo sino que se divide en unidades discretas. Esto le hace especialmente indicado para ciertas operaciones espaciales como por ejemplo las superposiciones de mapas o el cálculo de superficies.

Las estructuras raster pueden implicar en ocasiones un incremento del espacio de almacenamiento, ya que almacenan cada celda de la matriz sin tener en cuenta si se trata de una entidad o simplemente de un espacio vacío.

- **Tabulación cruzada**

Permite estudiar la relación entre dos mapas raster.

A) Relación entre una variable dependiente (nuevas zonas urbanas) y una variable explicativa (niveles de pendiente).

B) Análisis del cambio espacial en una variable entre dos fechas (variación de las ocupaciones del suelo entre dos años)

Permite crear informes de la actividad de circulación en un periodo de tiempo determinado basados en campos seleccionados.

- **Álgebra de Mapas.**

Uno de los usos fundamentales de los Sistemas de Información Geográfica es la obtención de nuevas capas de información a partir de otras previamente disponibles. Para ello se dispone de un conjunto de herramientas de cálculo con matrices de datos que reciben el nombre genérico de álgebra de mapas. (Figura 2.16.)

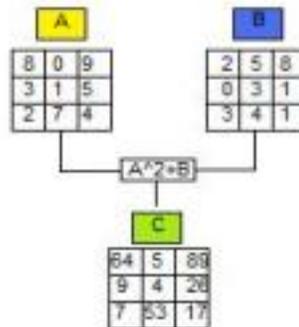


Figura 2.16. Álgebra de Mapas

El álgebra de mapas incluye un amplio conjunto de operadores que se ejecutan sobre una o varias capas raster de entrada para producir una o varias capas raster de salida. Por operador se entiende un algoritmo que realiza una misma operación en todas las celdas de una capa raster. Estos operadores se definen mediante ecuaciones, por ejemplo el operador $C = A^2+B$ genera una nueva capa (C) asignando a cada celda el valor de la celda correspondiente en la capa (A) multiplicado por su propio valor y sumado la capa B. Cada capa raster es una matriz de números y la operación se realiza para todos los números de la matriz, por tanto para todas las celdas de la capa raster. Sin embargo aunque ambas operan sobre matrices, el álgebra de mapas tiene poco más que ver con el concepto matemático de álgebra matricial.

2.2.6. Generación de modelos en software (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 aquél 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.

2.3. Lógica Fuzzy (Difusa).

En la teoría clásica de conjuntos, los enunciados de un conjunto se definen como verdadero o falso: 1 ó 0. Los enunciados de un conjunto Fuzzy, sin embargo, se expresan en una escala continua de 1 (asociado) a 0 (no asociado). Así, las clases individuales de mapas se pueden evaluar considerando su calidad de asociación al conjunto, basado en un juicio subjetivo. La asociación siempre relaciona una cierta proposición.

Los valores de asociación Fuzzy deben ser falsos en el rango (0,1), pero hay ajustes no prácticos en la elección de valores de asociación fuzzy.

La lógica difusa llamada también lógica borrosa por otros autores o fuzzy logic es básicamente una lógica con múltiples valores, que permite definir valores en las áreas oscuras entre las evaluaciones convencionales de la lógica precisa: Si / No, Cierto / Falso, Blanco / Negro, etc. Se considera un super conjunto de la lógica booleana. Con la lógica difusa, las proposiciones pueden ser representadas con grados de certeza o falsedad. La lógica tradicional de las computadoras opera con ecuaciones muy precisas y dos respuestas: Si o no, uno o cero.

2.3.1. Conceptos de conjuntos difusos.

Los conjuntos clásicos se definen mediante un predicado que da lugar a una clara división del Universo de Discurso X en los valores "Verdadero" y "Falso". Sin embargo, el razonamiento humano utiliza frecuentemente predicados que no se pueden reducir a este tipo de división: son los denominados predicados vagos. Zadeh en 1965, definió el concepto de conjunto difuso, basándose en la idea de que existen conjuntos en los que no está claramente determinado si un elemento pertenece o no al conjunto. A veces, un elemento pertenece al conjunto con cierto grado, llamado grado de pertenencia.

Un conjunto difuso A sobre un universo de discurso U (ordenado) es un conjunto de pares dado por: $A = \{\mu_A(u) / u \in U, \mu_A(u) \in [0,1]\}$, Donde μ es la llamada función de pertenencia y $\mu_A(u)$ es el grado de pertenencia del elemento u al conjunto difuso A . Este grado oscila entre los extremos 0 y 1, $\mu_A(u) = 0$, indica que u no pertenece en absoluto al conjunto difuso A , $\mu_A(u) = 1$, indica que u pertenece totalmente al conjunto difuso A .

- **Lógica clásica y multivariada.**

La lógica multivariada incluye sistemas lógicos que admiten varios valores de verdad posibles, es una ligera generalización de la lógica de primer orden, tiene básicamente las mismas propiedades. La diferencia consiste en que, en lugar de tener un único universo en cada estructura, se admite la posibilidad de que las estructuras tengan varios universos e incluso un número infinito de ellos. Cada operación de la estructura tiene universos asignados como dominio y un universo como lugar donde tomar valores; también las relaciones tienen universos de la estructura asignados, de manera que puede relacionar objetos pertenecientes a distintos de ellos. El lenguaje formal debe adaptarse a esos cambios de planteamiento, proporcionando tipos de variables distintas para cada universo y especificando el universo que corresponden a cada término y la secuencia de universos que corresponde a cada símbolo de relación. La lógica multivariada es, a menudo, más apropiada para tratar de modo natural las estructuras concretas que aparecen habitualmente en matemáticas pero las complicaciones de notación que la acompañan cuando se presenta con generalidad suelen provocar su sustitución por la más simple sintaxis de la lógica de primer orden.

- **Lógica difusa.**

La lógica difusa fue investigada, por primera vez, a mediados de los años sesenta en la Universidad de Berkeley (California) por el ingeniero Lotfy A. Zadeh, La lógica difusa permite representar el conocimiento común, que es mayoritariamente del tipo lingüístico cualitativo y no necesariamente cuantitativo, en un lenguaje matemático a través de la teoría de conjuntos difusos y funciones características asociadas a ellos. Permite trabajar a la vez con datos numéricos y términos lingüísticos, los términos lingüísticos son inherentemente menos precisos que los datos numéricos pero en muchas ocasiones aportan una información más útil para el razonamiento humano.

El aspecto central de los sistemas basados en la teoría de la lógica difusa es que, a diferencia de los que se basan en la lógica clásica, tienen la capacidad de reproducir aceptablemente los modos usuales del razonamiento, considerando que la certeza de una proposición es una cuestión de grado. Más formalmente se puede decir que si la lógica es la ciencia de los principios formales y normativos del razonamiento, la lógica difusa o borrosa se refiere a los principios formales del razonamiento aproximado, considerando el razonamiento preciso (lógica clásica) como caso límite. Así pues, las características más atractivas de la lógica difusa son su flexibilidad, su tolerancia con la imprecisión, su capacidad para modelar problemas no-lineales, y su base en el lenguaje natural.

- **Operadores Fuzzy.**

Los Conjuntos Difusos se pueden operar entre sí del mismo modo que los conjuntos clásicos. Puesto que los primeros son una generalización de los segundos, es posible definir las operaciones de intersección, unión y complemento haciendo uso de las mismas funciones de pertenencia.

Si $f_A(x)$ indica la función de pertenencia de x al conjunto A , entonces

$f_A(x)$ está entre 0 y 1

si $f_A(x)=1$, x pertenece totalmente a A

si $f_A(x)=0$, x no pertenece a A

Se considera otras definiciones más generales para las operaciones entre los Conjuntos Difusos. En la actualidad se considera correcto definir el operador intersección mediante cualquier aplicación t-norma y el operador unión mediante cualquier aplicación s-normal.

Las operaciones entre conjuntos difusos puede verse de la siguiente manera:

Sea A un intervalo difuso entre 5 y 8, y B un número difuso entorno a 4. (Figura 2.17)

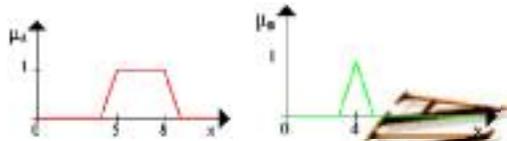


Figura 2.17. Conjuntos Difusos

La figura 2.18. muestra la operación AND (Y) del conjunto difuso A y el número difuso B (el resultado es la línea azul).



Figura 2.18. Operador AND

La operación OR (O) como puede observarse en la figura 2.19. del conjunto difuso A con el número difuso B (la línea azul).



Figura 2.19. Operador OR

La figura 2.20. da un ejemplo para una negación. La línea azul es la NEGACION del conjunto difuso A.



Figura 2.20. Negación de conjuntos difusos

De forma general las operaciones básicas entre conjuntos serán:

Operaciones: $A(x)$, $B(x)$ son conjuntos difusos en el universo X .

Unión: $(A \cup B)(x) = A(x) \cup B(x) = \max \{A(x), B(x)\}$

Intersección: $(A \cap B)(x) = A(x) \cap B(x) = \min \{A(x), B(x)\}$

Negación (complemento a uno): $A(x) = \neg A(x) = 1 - A(x)$

- **Propiedades de los conjuntos difusos.**

Propiedades Básicas:

Conmutativa: $A \cup B = B \cup A$; $A \cap B = B \cap A$;

Asociativa: $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap C = A \cup B \cap C$;

$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup C = A \cap B \cup C$;

Idempotencia: $A \cup A = A$; $A \cap A = A$;

Distributiva: $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$;

$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$;

Condiciones Frontera o Límite: $A \cup \emptyset = A$; $A \cup X = X$;

$A \cap \emptyset = \emptyset$; $A \cap X = A$;

Involución (doble negación): $\neg(\neg A) = A$;

Transitiva: $A \cap B$ y $B \cap C$, implica $A \cap C$;

Propiedades Anadidas: Se deducen de las anteriores

$(A \cap B) \cap A \cap (A \cup B)$;

Si $A \cap B$, entonces $A = A \cap B$ y $B = A \cup B$;

$\text{Card}(A) + \text{Card}(B) = \text{Card}(A \cup B) + \text{Card}(A \cap B)$;

$\text{Card}(A) + \text{Card}(\neg A) = \text{Card}(X)$;

- **Operaciones sobre los conjuntos difusos.**

Se distingue 6 tipos de operaciones:

Subconjunto o inclusión.

A es un subconjunto de B $\mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad x$

Unión: La unión de los conjuntos difusos A y B es el conjunto difuso C; su función de pertenencia está dada por:

$$\mu_C(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x)$$

Intersección: La intersección de los conjuntos difusos A y B es el conjunto difuso; su función de pertenencia está dada por:

$$\mu_C(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x)$$

Complemento o negación: El complemento del conjunto difuso A, se define como:

$$\mu_{\neg A}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

Producto cartesiano: Si A y B son conjuntos difusos en X e Y, el producto cartesiano de los conjuntos A y B en el espacio $X \times Y$ tiene la función de pertenencia:

$$\mu_{A \cap B}(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

Co-producto cartesiano: $A + B$ en el espacio $X \times Y$ tiene la función de pertenencia:

$$\mu_{A \cup B}(x, y) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

Las operaciones de complemento, unión e intersección, al igual que la teoría clásica de conjuntos, cumple las propiedades asociativa, conmutativa y distributiva así como las leyes de Morgan.

- **Relaciones difusas.**

La lógica difusa define los diversos grados de pertenencia de un elemento a un conjunto siguiendo patrones de razonamiento similares a la inteligencia humana, de esta forma conceptos convencionales como alto (1) y bajo (0) tienen para la lógica difusa variables como mediano, medianamente alto, etc; todos ellos dentro del rango $[0,1]$.

Los conjuntos difusos (fuzzy sets) son aquellos que pueden contener elementos con grados parciales de pertenencia, definidos por una función de pertenencia cuanto más cerca esté $A(x)$ del valor 1, mayor será la pertenencia del objeto x al conjunto A ; a diferencia de los conjuntos clásicos (fuzzy crisp) donde un elemento puede pertenecer o no a un conjunto.

Un elemento de un conjunto difuso se expresa de la siguiente manera

(a/b) donde: a es el grado de pertenencia del elemento; y b es el elemento del conjunto

Un sistema difuso está conformado por variables de entrada y salida, reglas difusas, y un método de inferencia que permita obtener los valores de las variables de salida, cuando son conocidos los valores de las variables de entrada. Para relacionar conjuntos difusos se emplean diferentes operadores, los más usados se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Revisión de operadores Fuzzy

OPERACIÓN	DEFINICIÓN
Contención o subconjunto	A es subconjunto de B si y solo si $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$, para todo x , $A \subseteq B \Leftrightarrow \mu_A(x) \leq \mu_B(x)$
Unión	La unión de los conjuntos difusos A y B , es el conjunto difuso C , y se escribe como $C=A \cup B$, su función de pertenencia está dada por: $\mu_C(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x)$
Intersección	La intersección de los conjuntos difusos A y B es el conjunto difuso C , y se escribe como $C=A \cap B$; su función de pertenencia está dada por: $\mu_C(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x)$
Complemento (negación)	El complemento del conjunto difuso A , se define como: $\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$
Producto Cartesiano	Si A y B son conjuntos difusos en X y Y , el producto cartesiano de los conjuntos A y B $A \times B$ en el espacio $X \times Y$ tiene la función de pertenencia $\mu_{A \times B}(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y))$

2.4. Inferencia estadística.

Actualmente se reconoce la importancia de la estadística aplicada en el desarrollo de investigaciones en muy diversos campos; cada vez son más los trabajos prácticos de diferentes disciplinas que requieren de métodos estadísticos como muestreo, simulación, diseño de experimentos, modelamiento estadístico e inferencia, para llevar a cabo recolección, compendio y análisis de datos y para su posterior interpretación. En estudios de deslizamientos, los métodos estadísticos son de amplio uso; por ejemplo en la estimación del riesgo por deslizamiento, predicción, localización, determinación de magnitudes y cuantificación de incertidumbres. Los principales modelos estocásticos usados para describir los procesos relacionados con los deslizamientos se basan en series de tiempo y procesos puntuales. Los modelos de series de tiempo se usan generalmente para describir procesos que son muestreados en puntos de tiempo discretos, mientras que procesos puntuales se usan para modelar fenómenos que se presentan de manera irregular, sin un patrón temporal, y que pueden ocurrir en cualquier momento o espacio.

Por otro lado, al proceso de experimentación llevado a cabo en laboratorios con el objetivo de aumentar la comprensión de alguna teoría para su validación y empleo posterior, la simulación, considerada como un método de experimentación controlada, es el proceso de imitación de aspectos importantes del comportamiento de un sistema, mediante la construcción de un modelo implementado en un computador de tal forma que permita generar observaciones dadas ciertas entradas. Con el análisis estadístico de tales observaciones se estiman medidas del comportamiento del sistema de interés. Sin embargo de esta manera no es posible encontrar resultados óptimos, sino más bien, resultados satisfactorios a problemas de difícil, costosa o imposible resolución mediante otros métodos.

2.4.1. Tipos de variables.

Las variables representan un concepto de vital importancia dentro de un proyecto de investigación. Las variables, pueden entenderse como los conceptos que forman enunciados de un tipo particular denominado hipótesis. Las variables se refieren a propiedades de la realidad que varían, es decir, su idea contraria son las propiedades constantes de cierto fenómeno.

Dentro del conjunto de elementos que están siendo objeto de una investigación determinada (población); se toma un subconjunto de unidades muestrales que son seleccionadas en el muestreo; mediante inferencia estadística se extrapolarán los resultados a toda la población, tomando en cuenta características de la población que puede diferir entre unidades muestrales (variable), para esto se asigna un valor que toma una variable para cada una de las unidades de la muestra (dato u observación).

De acuerdo a esto existen los siguientes tipos de variables:

Variable Dependiente: valores que toma el fenómeno de estudio en las unidades muestrales. Debe medirse de forma objetiva, precisa, sistemática y repetible.

Variable Independiente: Representan la variación en los factores que generan las hipótesis que se quiere examinar. Discriminan entre los trabajos observacionales y experimentales.

Variable Discreta: aquella que entre dos valores próximos puede tomar a lo sumo un número finito de valores.

Variable Continua: la que puede tomar los infinitos valores de un intervalo.

2.4.2. Diagramas de dispersión

Los Diagramas de dispersión o gráficos de correlación permiten estudiar la relación entre 2 variables. Dadas 2 variables x , y , se dice que existe una correlación entre ambas si cada vez que aumenta el valor de X aumenta proporcionalmente el valor de Y (Correlación positiva) o si cada vez que aumenta el valor de X disminuye en igual proporción el valor de Y (Correlación negativa).

Un diagrama de dispersión es una representación gráfica de la relación entre dos variables, muy utilizada en las fases de comprobación de teorías e identificación de causas raíz y en el Diseño de soluciones y mantenimiento de los resultados obtenidos. Tres conceptos especialmente destacables son que el descubrimiento de las verdaderas relaciones de causa-efecto es la clave de la resolución eficaz de un problema, que las relaciones de causa-efecto casi siempre muestran variaciones, y que es más fácil ver la relación en un diagrama de dispersión que en una simple tabla de números.

2.4.3. Sistemas y modelos.

- **Sistemas.**

Un sistema es una fuente de datos del comportamiento de alguna parte del mundo real. Está formado por elementos que interactúan para lograr un objetivo, los cuales poseen

características o atributos, parámetros y variables, que toman valores numéricos o lógicos. Un sistema puede ser natural o artificial, dinámico o estático, estable o inestable, adaptativo o no adaptativo, lineal o no lineal; puede tener variables independientes o dependientes, no controlables o controlables, continuas, discretas o mixtas, no observables u observables. Las reglas que especifican la interacción entre los elementos de un sistema, determinan la forma en que las variables descriptivas cambian con el tiempo. Las variables que describen las entidades, los atributos y las actividades de un sistema en un instante particular de tiempo, que permiten predecir su comportamiento futuro, se denominan variables de estado y sus valores proporcionan el estado del sistema en ese instante, además relacionan el futuro del sistema con el pasado a través del presente. Si el comportamiento de los elementos del sistema puede predecirse con seguridad, el sistema es determinístico, de lo contrario es estocástico. Si la probabilidad de encontrarse en alguno de los estados no cambia con el tiempo el sistema es estático, de lo contrario es un sistema dinámico. Si el estado de un sistema cambia sólo en ciertos instantes de tiempo se trata de un suceso discreto, de lo contrario de un suceso continuo.

Sea un sistema físico como por ejemplo la Tierra; o una estructura definida, como por ejemplo la corteza; o un estado de ella, por ejemplo la liberación de energía y reacondicionamiento de esfuerzos producidos en un punto determinado. El interés puede ser la composición química en el interior de la Tierra; o un modelo de velocidades asociado a la corteza, o la identificación del punto en el interior de la Tierra a partir del cual se produjo la liberación de energía.

• Modelos.

Un modelo es una representación formal de un sistema real, con el que se pretende aumentar su comprensión, hacer predicciones y ayudar a su control. Los modelos pueden ser físicos (descritos por variables medibles), análogos (diagrama de flujo) y simbólicos (matemáticos, lingüísticos, esquemáticos). Los modelos matemáticos o cuantitativos son descritos por un conjunto de símbolos y relaciones lógico-matemático. Para la construcción de un buen modelo es necesario contar con leyes (físicas) que describan el comportamiento del sistema. También es importante la experiencia, la intuición, la imaginación, la simplicidad y la habilidad para seleccionar el subconjunto más pequeño de variables. El primer paso es establecer el problema en forma clara y lógica delimitando sus fronteras; luego viene la recogida y depuración de datos; el diseño del experimento; las pruebas de contrastes; la verificación del modelo y la validación de las hipótesis. Por

ejemplo, un análisis de sensibilidad determinara el grado de influencia en la solución del modelo debido a variaciones en los parámetros (robustez de un modelo). Un modelo debe ser una buena aproximación al sistema real, debe incorporar los aspectos importantes del sistema y debe resultar fácil de comprender y manejar. Un factor muy importante es que haya una alta correlación entre lo que predice el modelo y lo que actualmente ocurre en el sistema real.

- **Relación entre sistemas y modelos.**

Un sistema puede ser descrito mediante una función que relaciona un conjunto de datos u observaciones (d, variables de respuesta) con un grupo de parámetros P (m1, m2..); cada grupo de valores específicos de este grupo de parámetros proporciona un modelo (m) diferente.

Si se dispone de un modelo físico (G) que obtenido a partir de la teoría relaciona los datos observados con los parámetros conocidos, se tiene entonces una relación funcional G y F (d, m) que describe el fenómeno; si esta relación es lineal, se define entonces como $Gm = d$. Aquí se pueden tener dos situaciones diferentes: se conocen los parámetros del modelo pero es necesario conocer la respuesta de ese sistema, esta situación es conocida como el problema directo; o de lo contrario, se dispone de observaciones de las variables de predicción y de respuesta, pero se desconocen los parámetros del modelo que expliquen mejor la relación entre esas variables, aquí se habla del problema inverso, el cual se resuelve mediante regresión estadística. Resolver el problema inverso consiste en estimar los valores del modelo (m) que expliquen mejor las observaciones³¹.

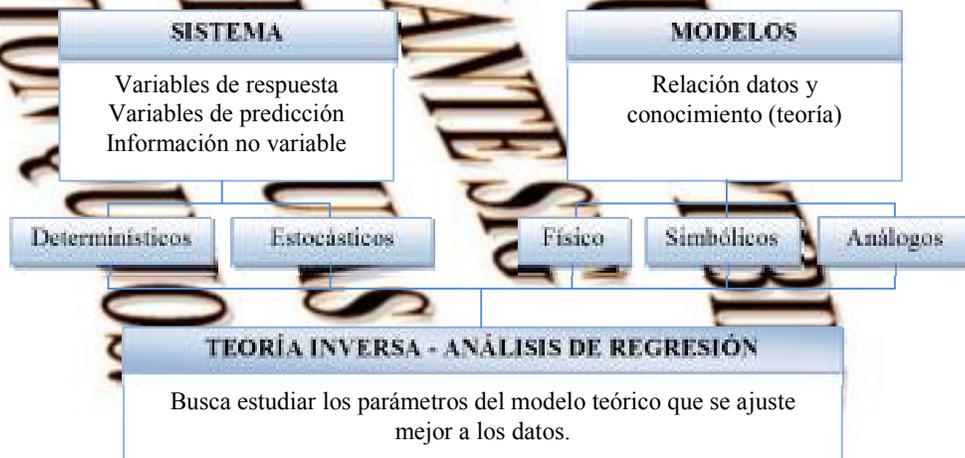


Figura 2.20. Sistemas y Modelos

³¹ (Menke, 1984; Tarantola and Valette, 1982b).

2.4.4. Modelos estadísticos.

Un modelo estadístico es una expresión simbólica en forma de igualdad o ecuación que se emplea en todos los diseños experimentales y en la regresión para indicar los diferentes factores que modifican la variable de respuesta.

Los modelos estadísticos se utilizan en general en el marco de una marcha deductiva, de acuerdo a la variabilidad de un fenómeno particular, y se busca comprender los componentes de esta variabilidad. Si los individuos estadísticos son entidades espaciales, se impone cuestionarse acerca de una diferenciación espacial. Consiste en elaborar un cierto número de hipótesis sobre las causas de esta diferenciación y estas hipótesis son luego verificadas o no según el modelo estadístico. El modelo más clásico es la regresión múltiple, que se aplica cuando el conjunto de variables en juego son cuantitativas. El modelo se expresa del siguiente modo.

$$Y = a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_p X_p + e$$

donde Y designa la variable a ser explicada

X₁, X₂,... X_p designan las variables explicativas

a₁, a₂,... a_p son los coeficientes

e es el residuo de la regresión

La aplicación del modelo permite, con la ayuda de la estadística inferencial, evaluar el grado de significación y los roles respectivos de X₁, X₂,... X_p para explicar la variabilidad del fenómeno descrito por Y.

- **Análisis de Regresión.**

El análisis de regresión tiene por objetivo estimar el valor promedio de una variable, variable dependiente, con base en los valores de una o más variables adicionales, variables explicativas. En este tipo de análisis, la variable dependiente es estocástica mientras que las variables explicativas son no estocásticas en su mayor parte. El análisis de regresión ha cobrado popularidad debido al gran número de paquetes estadísticos que lo incluyen y por ser un “proceso robusto que se adapta a un sinfín de aplicaciones científicas y ejecutivas que permite la toma de decisiones” (Linne et al. 2000, p. 47, tr.).

- **Análisis de regresión múltiple.**

Es una extensión de la regresión lineal:

$$Y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + \epsilon$$

El término error (ϵ) indica el error aleatorio, no modelizable, y que puede deberse a:

- error muestral
- efectos atribuibles a otras variables independientes no incluidas en el estudio. Por este motivo se debe tener cuidado a la hora de escoger las variables.

b_1, b_2, \dots, b_n son los coeficientes de regresión parcial, que informan sobre la contribución independiente de cada v.i. a la predicción de Y.

Se puede ampliar para cualquier número m de variables independientes:

$$Y' = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_mx_m$$

Para poder resolver y obtener a, b_1 y b_2 en una ecuación de regresión múltiple el cálculo se presenta muy tedioso porque se tiene que atender 3 ecuaciones que se generan por el método de mínimo de cuadrados:

$$\sum y = na + b_1 \sum x_1 + b_2 \sum x_2$$

$$\sum x_1y = a \sum x_1 + b_1 \sum x_1^2 + b_2 \sum x_1x_2$$

$$\sum x_2y = a \sum x_2 + b_1 \sum x_1x_2 + b_2 \sum x_2^2$$

El error estándar de la regresión múltiple (S_{xy}), es una medida de dispersión la estimación se hace más precisa conforme el grado de dispersión alrededor del plano de regresión se hace más pequeño.

Para medirla se utiliza la fórmula:

$$S_{xy} = \sqrt{\frac{\sum (y - \hat{y})^2}{n - m - 1}}$$

Y : Valores observados en la muestra

\hat{Y} : Valores estimados a partir de la ecuación de regresión

n : Número de datos

m : Número de variables independientes

El coeficiente de determinación múltiple (r^2), mide la tasa porcentual de los cambios de Y que pueden ser explicados por x_1, x_2 y x_3 simultáneamente.

$$r^2 = \frac{SC \text{ regresión}}{SC \text{ Total}}$$

- **Modelo de regresión lineal.**

Si se considera la siguiente relación para explicar el comportamiento de una variable dependiente (Y) en función de n variables dependientes (X1, X2, X3, ... Xn) .

$$Y=f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (a).$$

donde f(.) es una forma funcional implícita. En el caso en el cual esta forma funcional no pueda estimarse, f(.) puede aproximarse mediante:

$$Y = \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \Psi \quad (b).$$

para $i=1,2,\dots,n$ donde las β son parámetros de la función y Ψ es el error debido a la aproximación lineal de (a).

En la realidad, la ecuación (b) no se cumple estrictamente pues existe también una variación en la variable dependiente debido a que hay errores de medición. A esta variación inexplicable se le denomina ruido blanco y se denota como ϵ . Por otro lado, no todas las variables independientes son medibles o se puede tener acceso a la información por lo que sólo algunas de ellas se utilizarán finalmente en el modelo.

Se tiene una muestra de m observaciones, $j=1, 2, \dots, m$ e información sobre k variables independientes que determinan en parte el comportamiento de Y. La ecuación (b) puede describirse como:

$$Y_j = \sum_{i=1}^k \beta_i X_{ij} + \Psi_j + Z_j + \epsilon_j$$

donde Z es el efecto de las n - k variables ($k < n$) que no fueron incluidas en el modelo. Z Sean $\psi_j = \Psi + \Psi_j$ y $Z_j = Z + Z_j$ donde ψ y Z son las desviaciones con respecto a las medias Ψ de y Z respectivamente, entonces:

$$Y_j = \psi_j + \beta_1 X_{1j} + \beta_2 X_{2j} + \dots + \beta_k X_{kj} + \epsilon_j;$$

$$\text{Donde: } \psi_j = Z + \Psi \quad \text{y } \epsilon_j = \Psi_j + Z_j + \epsilon_j$$

Esta ecuación se conoce como la ecuación de regresión lineal múltiple, donde las β son los coeficientes de la regresión que necesitan estimarse y las X las variables independientes.

- **Modelo de regresión logística.**

Permiten modelizar relaciones que no pueden ser tratados con Modelos Lineales Generales (GLM):

- Porque la variable dependiente no es continua y no se distribuye normalmente: presencia – ausencia, supervivencia, etc.

- Porque la relación entre las variables es intrínsecamente no lineal, como p.ej. el crecimiento de poblaciones o individuos, o el estado de salud de un individuo (la diferencia en estado de salud entre 30 y 40 años no es la misma que entre 60 y 70)

En la regresión logística, la variable dependiente es binomial (sí-no, presencia-ausencia)

$$\text{logit}(P) = \ln \frac{P}{1-P}$$

El GLM es un caso particular del modelo lineal generalizado (GLZ) en el que la variable dependiente se distribuye normalmente.

Básicamente, se trata de una regresión lineal que se comprime entre los valores 0-1 mediante la función:

$$P = \frac{1}{1 + e^{-(b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n)}}$$

en donde P es la probabilidad de presencia.

Esta P la podemos escribir como:

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

cuando $Z = 0$, entonces $P = 0.5$

Cuanto menor es Z, menor es P; cuando Z tiende a $-\infty$, entonces P tiende a 0:

$$\lim_{Z \rightarrow -\infty} (P) = \frac{1}{1 + e^{-(-\infty)}} = \frac{1}{1 + e^{\infty}} = \frac{1}{1 + \infty} = \frac{1}{\infty} = 0$$

Cuanto mayor es Z, mayor es P; cuando Z tiende a $+\infty$, entonces P tiende a 1:

$$\lim_{Z \rightarrow +\infty} (P) = \frac{1}{1 + e^{-(\infty)}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{e^{\infty}}} = \frac{1}{1 + 0} = 1$$

Así que si Z es el GLM ($= b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n$), con esto se ha conseguido una ecuación que permite conectar la respuesta binomial presencia-ausencia con los predictores tanto discretos (e.g. tipo de bosque) como continuos (e.g. precipitación) medidos o registrados en el área de estudio. Los predictores con “bs” positivos hacen aumentar la P, y viceversa. El problema que queda es cómo linearizar esta P; para eso, se recurre a:

$$P = \frac{1}{1 + e^{-\text{logit}(P)}} \quad \text{logit}(P) = \ln \frac{P}{1-P}$$

La regresión logística no utiliza Mínimos Cuadrados para estimar los parámetros, sino Máxima Verosimilitud (Maximum Likelihood): se eligen los coeficientes que hacen los resultados más probables.

La significación de los coeficientes b_0, b_1, \dots, b_n se estima mediante:

- Estadístico likelihood-ratio que proporciona los tests más eficaces y potentes.
- Estadístico condicional - una variante menos potente del LR

- Estadístico de Wald = (coeficiente/error estándar)² - se aproxima a una distribución χ^2 con g.l. = 1 para las variables continuas y g.l. = n - 1 para los factores.

2.4.5. Estimaciones y estimadores.

La estimación involucra el uso de datos muestrales en conjunción con alguna técnica estadística, y se puede llevar a cabo mediante estimación puntual o por intervalo: estimación puntual es la asignación de un valor al parámetro desconocido, estimación por intervalo es una fórmula que dice como utilizar los datos de una muestra para calcular un intervalo en el cual con cierto nivel de confianza se encuentra el valor del parámetro. La técnica para estimar los parámetros que definan un modelo teórico que no está disponible, pretendiendo una asociación entre variables de respuesta y variables de predicción no causal, debe proporcionar estimadores con cierta propiedad.

- **Estimadores.**

Sea δ un grupo de características del sistema que se desean conocer a partir de la observación de la variables x_1, \dots, x_n , con función de densidad de probabilidad $f(x; \delta)$ y y_1, \dots, y_n con función de densidad de probabilidad $f(y; \delta)$ observadas en una muestra aleatoria de tamaño n , la estimación de δ a partir de esta muestra se denotará como $\hat{\delta}$.

Las propiedades más deseables de un estimador son que la distribución de muestreo este centrada alrededor del valor del parámetro y que la varianza del estimador sea lo menor posible. El error cuadrático medio resume estas propiedades y es definido como:

$$ECM(\hat{\delta}) = \text{Var}(\hat{\delta}) + [\hat{\delta} - E(\hat{\delta})]^2$$

La calidad de las estimaciones puede medirse en función de exactitud, precisión y consistencia. La exactitud es el grado en que un valor promedio coincide con el valor verdadero de la cantidad de interés; una estimación es exacta cuando no tiene desviaciones positivas o negativas del valor verdadero, es decir se han reducido los errores sistemáticos. La precisión está relacionada con la variabilidad de los datos, mientras exista mayor variabilidad, habrá menor precisión; buena precisión significa que se han eliminado los errores aleatorios en el procedimiento de medición. Un estimador es consistente si converge probabilísticamente al valor del parámetro que está estimando, es decir, la estimación se aproxima más al valor del parámetro cuando el número de observaciones

tiende a infinito (ley de los grandes números). Además se habla de estimadores insesgados cuando el valor promedio toma valores muy cercanos al valor real, es decir el sesgo que puede evaluarse mediante el error cuadrático medio es cero. El estimador más eficiente es aquel estimador insesgado con varianza mínima y con la propiedad de que no existe otro estimador insesgado con menor varianza. Así el ECM que es la suma de la varianza y el sesgo describe las propiedades deseables de una estimación.

- **Métodos de estimación puntual.**

Mínimos cuadrados, obtiene la estimación del parámetro que minimiza el error cuadrático medio. El objetivo es minimizar $\sum (d_i - \hat{d}_i)^2$, donde \hat{d}_i son los valores estimados a partir del modelo y d_i son los datos observados, los cuales se asume que tienen asociado un error de medida que es independiente y distribuido normalmente con media μ y varianza σ^2 . La varianza del error es constante entre observaciones, de lo contrario es necesario usar mínimos cuadrados con factores de peso. Se supone que la variabilidad en los datos que no pueda explicarse mediante la ecuación de regresión se debe al error aleatorio, por tanto si la selección de la ecuación es correcta, esta última debe ser mínima. El sistema lineal a resolver es de la forma $Gm + e = d$; para lo cual es necesario plantear el sistema de ecuaciones normales que toman la forma,

$$(G^T G)m = G^T d$$

Si $G^T G$ tiene inversa, la solución para m es,

$$m = (G^T G)^{-1} G^T d$$

Existen diversos métodos para resolver el anterior sistema de ecuaciones, entre ellos métodos de descomposición de la matriz G en una suma de vectores, basándose en el hecho que un objeto de gran dimensión puede ser representado como la suma de productos de bajas dimensiones, lo cual hace más fácil su análisis. Algunos métodos de descomposición son el método QR que consiste en la descomposición de la matriz G en una matriz triangular superior R y una matriz ortogonal Q , ($Q^T Q = 1$), se resuelve el sistema:

$$RG = QTm,$$

este método involucra reducir la matriz simétrica a una matriz tridiagonal haciendo $n-2$ transformaciones ortogonales. Otros métodos son descomposición Cholesky, descompone $G = R^T R$ donde R es una matriz triangular superior, el sistema a resolver es $R^T R m = d$, descomposición LU - descompone $G = LU$, donde L es una matriz triangular superior y U es una matriz triangular inferior y descomposición del valor singular SV D. Algunos de

estos métodos requieren más operaciones que otros, y otros son especialmente útiles cuando el sistema está mal condicionado, o en caso de matrices simétricas.

Máxima verosimilitud, selecciona como estimador al valor del parámetro que tiene la propiedad de maximizar el valor de la probabilidad de la muestra aleatoria observada, es decir encuentra el valor de los parámetros que maximizan la función de verosimilitud.

La verosimilitud es la función de densidad de probabilidad conjunta de las variables independientes.

- **Métodos de estimación por intervalo.**

Una ventaja de estimación por intervalo es que muestra la exactitud con que estima el parámetro, a menor longitud del intervalo mayor exactitud en la estimación. Un intervalo de confianza es un rango de valores, centrado en una media muestral \bar{x} , dentro del cual se espera que con un nivel de confianza $(1-\alpha)$ se encuentre el valor del parámetro en cuestión³².

2.4.6. Teoría de Errores.

Cualquier medición es una observación indirecta, por lo tanto siempre es necesario llevar a cabo un análisis de errores. El error absoluto de una medida se puede definir como la diferencia entre el valor resultante de una medición y el valor real de la variable que se está observando. Valor verdadero es un concepto ideal y en general no puede ser conocido exactamente, lo más cercano a éste será una medida tomada con un instrumento estándar de alta calidad o exactitud que presente un error muy reducido, que reduzca el error instrumental a un nivel insignificante con respecto a otras fuentes de error. La variación restante puede ser considerada como una combinación de muchas variables independientes. Partiendo de la observación directa del movimiento del suelo se pueden leer tiempos de llegada de una onda sísmica, los cuales son usados para localizar la fuente de la perturbación. Un conjunto de datos puede ser posteriormente usado para modelar el comportamiento de una ladera. En este proceso continuo los errores son inevitables y es por eso que se hace indispensable considerarlos explícitamente para reducirlos y compensar sus efectos. Freedman en (1968) presenta un completo análisis sobre los diferentes tipos de errores encontrados en mediciones de datos

³² (Canavos 1988; Mendenhall and Sincich 1997)

Si se considera que los errores presentan variabilidad que depende del fenómeno estudiado, que los errores positivos y negativos son igualmente frecuentes (su valor promedio debe estar cercano a cero), que el error total no puede exceder una cantidad razonablemente pequeña, que la probabilidad de un error pequeño es mayor que la de un error grande y que la componente del error en el modelo es un efecto compuesto que representa muchas perturbaciones pequeñas pero aleatorias (las cuales son independientes de la variable de predicción y se deben a factores que no se encuentran incluidos en el modelo), puede entonces suponerse que los errores tienen una distribución de probabilidades normal.

Parte de la incertidumbre puede ser estimada usando métodos estadísticos, mientras que otra parte sólo puede ser determinada de manera subjetiva, usando sentido común o juicio científico sobre la calidad de instrumentos o sobre efectos no tenidos en cuenta explícitamente.

- **Errores aleatorios.**

Los errores aleatorios son pequeñas variaciones positivas o negativas producidas por causas desconocidas. Pueden ser cuantificados mediante análisis estadístico, por lo tanto, sus efectos pueden ser determinados. Por lo general los errores aleatorios se asocian con la participación humana en el proceso de medición y pueden deberse a; la identificación errónea del patrón que se está observando; como por ejemplo, la no identificación de una fase sísmica por exceso de ruido ambiental cuando esta llega a la estación. Este error y el error de lectura son independientes.

Error instrumental, por ejemplo, los errores de cronometraje o las variaciones en la respuesta de los instrumentos debido a su deterioro.

Error de lectura de tiempos de arribo, es el error residual, el cual puede permanecer aunque los demás errores sean eliminados.

- **Errores sistemáticos.**

Los errores sistemáticos se deben a causas identificables. Estos pueden ser corregidos, permanecer constantes o variar en forma previsible y pueden ser clasificados como; Instrumentales. Debidos a problemas de calibración, daño en los equipos, pérdida de señales durante su transmisión, etc.

Observacionales, como la mala selección del instrumento, baja calidad de la respuesta instrumental, ajuste incorrecto del cero, entre otros.

Naturales, Efecto de campos eléctricos y magnéticos.

Teóricos, Simplificación de los modelos o aproximaciones en las ecuaciones.

Los errores sistemáticos aparecen generalmente cuando la estructura de datos no corresponde con los datos medidos de la estructura real, en una escala comparable a la del modelo; mientras que pequeñas variaciones locales de la estructura, alrededor de los valores del modelo, generan diferencias que pueden ser tratadas como errores aleatorios en la mayoría de los casos.

2.4.7. validación de modelos.

Una vez conocidos los valores de m (modelo), es necesario realizar una validación de este modelo.

Se debe cuantificar qué tan adecuadamente el modelo describe los datos (observaciones o simulaciones) para los cuales fue aplicado y cómo es el ajuste. Antes de proceder a evaluar el modelo obtenido es necesario reexaminar la formulación del problema para detectar posibles errores y determinar la consistencia de las expresiones matemáticas. La siguiente etapa consiste en evaluar algunos estadísticos de prueba como el coeficiente de correlación y los resultados de una prueba F ; un análisis de varianza y un análisis de residuos también son de gran utilidad en esta etapa. En la evaluación de resultados se pueden variar los parámetros de entrada y verificar el comportamiento de los resultados, y si es posible, utilizar datos históricos para reconstruir el pasado y comparar éstos con los resultados del modelo. Finalmente es necesario verificar si las condiciones o supuestos iniciales coinciden con los resultados obtenidos, para esto es necesario el uso de pruebas de bondad de ajuste.

Hay dos factores importantes que se debe tener en cuenta en esta etapa; Los resultados obtenidos generalmente son el resultado de la conjunción de varios factores como tiempo, dinero y trabajo en grupo, por tanto es importante obtener la mayor cantidad de información y dar a conocer los resultados para que sean de utilidad, los valores obtenidos son el resultado de un trabajo consciente, por lo tanto se merecen un análisis real y objetivo.

- **Pruebas de validación.**

Al establecer un modelo se tienen dos diferentes fuentes de variación, una fuente de variación debida a la regresión (SCR) y una fuente de variación debida al error (SCE), la variación total (SCT) es la suma de estas dos. La variación se determina de la siguiente manera

$$SCR = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 = \frac{(\sum y_i)^2}{n}$$

$$SCE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$$

$$SCT = \sum (y_i - \bar{y})^2$$

El coeficiente de correlación o coeficiente de determinación R² mide la proporción de variación total de las observaciones con respecto a su media que puede ser atribuida a la recta de regresión estimada y es definido como,

$$R^2 = \frac{SCR}{SCT} = 1 - \frac{SCE}{SCT}$$

donde SCT representa la variación total con respecto a la media y SCR la porción de variación que es atribuible a un efecto lineal de las variables predictoras sobre las variables de respuesta. Si R² = 1 puede afirmarse que toda la variación presente en las observaciones es explicada por la presencia de las variables predictoras G en la ecuación de regresión.

Una hipótesis estadística es una afirmación con respecto a alguna característica desconocida del sistema que interesa analizar. Pruebas estadísticas como la prueba F se realizan para probar la hipótesis nula sobre los parámetros Ho : mj = 0 para todo j.

$$F = \frac{SCR / (l - 1)}{SCE / (n - l)}$$

es la estadística F(l-1, n-l) con l - 1 grados de libertad en el numerador y n-l grados de libertad en el denominador, n es el número de observaciones y l es el número de parámetros.

Si F es grande la mayor proporción de variación en los datos es debida a la regresión, la región de rechazo es F > F_α para un α determinado. La prueba F es una prueba de idoneidad general del modelo, que dice si los datos proporcionan o no pruebas suficientes que indiquen que el modelo global contribuye con información a la predicción de d.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE DESARROLLO

3.1. INTRODUCCIÓN.

Para modelar distintos tipos de variables espaciales, que representen un fenómeno en particular como la susceptibilidad del terreno a deslizamientos, se tomará en cuenta la probabilidad de ocurrencia de dicho fenómeno mediante geoestadística, técnica que se basará en la lógica difusa, combinando con otros métodos estadísticos que permitan obtener varios modelos que representen el fenómeno estudiado y conocer cual método se encuentra más acorde a la realidad espacial de la zona de estudio.

3.2. Información y datos.

Al realizar el estudio de la susceptibilidad del terreno a deslizamientos es necesario recopilar información existente, generar aquella que falta y analizarla; facilitando de esta forma la organización y actualización de datos en la zona de estudio.

3.2.1. Recopilación de información.

La información recopilada en diferentes instituciones fue:

- Cartas topográficas escala 1:50000 en el sistema de referencia PSAD56 coordenadas de referencia UTM 17S, que corresponden a: Oyacachi (ÑIII-B4), Papallacta (ÑIII-D2), Laguna de Mica (ÑIII-D4), y Baeza (OIII-C1). En formato digital (escaneadas en formato TIF), y en físico.
- Fotografías aéreas correspondientes a la línea de vuelo A-30C R-43 y A-31C R-54, que pertenecen al laboratorio de Fotointerpretación de las CIGMA.
- Imagen satelital landsat7 (ETM+), correspondiente a la zona P10-R60, de 1999 y 2001. Adquiridas de forma gratuita de la página de ESDI (Earth Science Data Interface) at the Global Land Cover Facility³³.

³³ <http://glcfapp.umaacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>

3.2.2. Generación de Datos.

Con la información base adquirida, es necesario generar puntos de muestra que permitan conocer la realidad del terreno, siendo de utilidad para el desarrollo del análisis de susceptibilidad del terreno a deslizamientos.

• **Determinación de Puntos de Muestra.**

Se dividió al terreno mediante una grilla de 5000x5000 metros (Figura 3.1); con la ayuda de las fotografías aéreas fueron localizadas zonas visibles, susceptibles a deslizamientos en cada zona marcada por la grilla; abarcando sitios propensos donde pueda producirse eventos de movimientos de masa.

Con estos antecedentes, se estableció puntos en el terreno susceptibles a deslizamientos, para luego ser comprobados mediante salidas de campo.

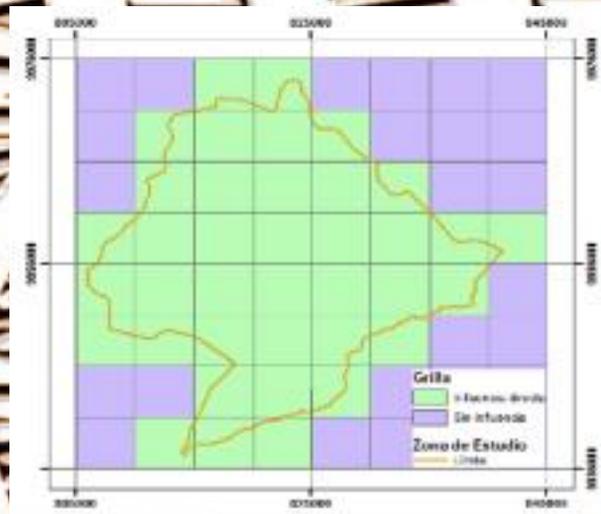


Figura 3.1. Malla de 5000 m. sobre el área de estudio.

• **Interpretación de fotografías e imagen satelital.**

Al analizar las fotografías aéreas, las zonas susceptibles a movimientos del terreno se definieron como aquellas que aparecen como una unidad discernible en una visión global. El campo de enfoque se dirigió a una superficie tal que no sea ni demasiado grande pues en ese momento la atención tenderá a estar dispersa sobre las diferentes partes constituyentes de la imagen, ni muy pequeña sino, puede, ser discriminada, pero no identificada. “Las claves de la interpretación se basan en principios de analogía: a una misma categoría de objetos (definida por sus propiedades) deberían corresponder imágenes fotográficas

semejantes”³⁴. Los sistemas de clasificación para la susceptibilidad del terreno a deslizamientos se basaron mayormente en datos históricos, las unidades de clasificación se realizó por su amplia visión del terreno donde ocurrió este fenómeno.

Se interpretó las fotografías aéreas correspondientes a la línea de vuelo A-30C R-43 y A-31C R-54, tomadas por el IGM - Proyecto Carta Nacional, escala 1:60.000. Se interpretó un total de 12 pares estereoscópicos, empleando un estereoscopio de espejos.

Esta información fue complementada con las observaciones realizadas en campo, donde se consiguió observar que los movimientos en masa están distribuidos en casi toda la cuenca del río Papallacta; sin embargo existe una mayor concentración desde Papallacta en adelante, sobre todo en la margen izquierda del río que lleva su mismo nombre.

Mediante la fotointerpretación, se pudo determinar la existencia de varios sectores donde ocurrieron deslizamientos, los cuales se extienden desde el Río Tambo hasta el Río Virutiyacu.

En el área de la cuenca del río Papallacta, se detectó grandes paleodeslizamientos ubicados en la margen derecha del Río Papallacta, considerados actualmente estables.

El margen izquierdo está influenciado por la presencia de la carretera, lo que ocasiona pequeños deslizamientos debido a la poca protección que la cobertura vegetal brinda al suelo recubierto por pasto, las fuertes precipitaciones, la ganadería (cruce de ganado) y otros factores.

Se pudo apreciar en las salidas de campo que existen evidencias de antiguos deslizamientos que se produjeron después de la construcción de la carretera. También se producen movimientos que consisten en reptación, flujos de lodo y escombros. Es evidente la sobresaturación del suelo y la formación de pantanos, lo que inestabiliza más los taludes. Para determinar la cobertura vegetal en el área del estudio, se lo realizó a partir de una imagen satelital Landsat TM del año 2001 combinación RGB 455, que fue georeferenciada para luego proceder a interpretarla y posteriormente digitalizarla, editarla y estructurarla.

Todo esto con el fin de obtener el tipo de cobertura vegetal existente en la zona de estudio; destacándose las siguientes unidades:

- Afloramiento Rocosos
- Eriales
- Flujo de lava
- Páramo

³⁴ Walter Serra, Prof. Titular Cátedras de Fotointerpretación y de Fotogrametría - Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

- Pasto
- Vegetación arbórea
- Vegetación arbustiva

Esta información se transformó a valores de índice de protección de la cobertura vegetal al suelo³⁵, ya que se ha comprobado la influencia de la vegetación en el control de los procesos de erosión del suelo. La protección de la cobertura vegetal depende de su naturaleza, que puede brindar diferentes grados de protección al suelo según su forma.

El grado de protección existente se expresa por un valor que oscila entre 0 y 1; los cuales están publicados en la Guía para la Elaboración de Estudios del Medio Físico del MOP de Madrid-España en el año 1.986.

- **Digitalización.**

Las cartas topográficas fueron escaneadas y georeferenciadas, mediante la ayuda de un software SIG se procedió a digitalizar en pantalla la zona de estudio sobre las cartas topográficas correspondientes.

La georeferenciación se refiere al proceso de asignar coordenadas cartográficas a los datos de una imagen. Los datos pueden estar ya proyectados en el plano deseado, pero no estar referenciados en el sistema de coordenadas apropiado.

La georeferenciación involucra únicamente el cambio de la información de coordenadas cartográficas en el archivo de la imagen. La cuadrícula (grilla) de la imagen no cambia.

El sistema de referencia, al cual fue proyectado nuestros datos, es PSAD56, coordenadas UTM 17S, ya que la mayor información recopilada, se encontraba en este sistema.

- **Conversión de formatos y sistemas de referencia.**

Las variables utilizadas en el análisis fueron convertidas en su totalidad en el sistema de referencia PSAD 56, como se mencionó anteriormente, la información recopilada se encontraba en diferentes formatos, como archivos cad (dwg, dgn), y shapefile; para trabajar de manera general, todos 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.

³⁵ Propuestos por la FAO publicados en la Guía para la Elaboración de Estudios del Medio Físico del MOP de Madrid-España, 1.986

- **Generación de base de datos alfanumérica.**

Una vez generados los archivos base, a partir de la información recopilada, se procedió a la actualización de su base de datos, obteniendo información temática de cada uno de las variables a ser tomadas en cuenta.

3.2.3. Análisis de datos.

Los datos obtenidos y generados serán analizados de acuerdo a su actualidad y representación espacial en el área del proyecto, tomando en cuenta cada variable que intervendrá en el análisis y sus relaciones con la susceptibilidad del terreno a deslizamientos.

- **Análisis de variables y relaciones.**

Para determinar las variables que intervienen en el análisis, se tomó en cuenta eventos históricos, criterios técnicos, zona de estudio, y la disponibilidad de información; obteniendo datos que permitan analizar de la mejor forma la susceptibilidad del terreno a deslizamientos.

Analizando únicamente la intervención de cada variable, en el análisis de susceptibilidad, se obtuvo las siguientes variables, permitiendo conocer cómo afecta cada una de ellas al análisis.

- *Índice de Resistencia a la Erosión.*

Aunque 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 y las propiedades del suelo son los condicionantes más importantes. Existen varios índices que expresan la erosionabilidad de un suelo en función de su textura, la estructura, el contenido en materia orgánica, la estabilidad de agregados o la capacidad de infiltración. De acuerdo a la Tabla 3.1. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Erosión (FAO), relaciona directamente la erosionabilidad del terreno con el sustrato litológico; y son estos índices los utilizados para la realización de este estudio, permitiendo conocer la tendencia del terreno o no, a un posible movimiento de su masa.

- *Índice de Protección.*

Los índices de protección de la cobertura vegetal al suelo, Tabla 3.2., fueron publicados en la Guía para la Elaboración de Estudios del Medio Físico del MOP de Madrid-España,

1.986, estos valores permiten relacionar la pérdida de suelo con la cobertura vegetal, factores edáficos y pendientes, a mayor protección, el suelo tiende a ser más estable, caso contrario este tiende a posibles movimientos.

Tabla 3.1. Índices Litológicos propuestos por la FAO

Fuente: Guía para la Elaboración de Estudios del Medio Físico del MOP de Madrid-España, 1.986

UNIDAD	DESCRIPCIÓN	ÍNDICE DE RESISTENCIA DE LA ROCA
Lava	Roca volcánica reciente, algunas son parte de la Formación Pisayumbo y otras del Antisana. Por el tipo de materiales que en mayor porcentaje están formados (lava) estas unidades se las considera como rocas bien consolidadas.	0.9
Flujo de lava potrerillos		
Lava indiferenciada y piroclastos Lavas andesíticas, riodacitas y tobas		0.8
Lahar	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.	0.6
Piroclastos y lavas	Piroclastos mezclados con roca volcánica reciente tiene un índice de resistencia menor que el de la lava, ya que los piroclastos son roca blanda.	0.5
Terrazas	Los depósitos superficiales de hallan constituidos por cantos rodados, guijarros, arenas limos, arcillas, 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.	0.4
Cono de deyección		
Depósito coluvial		
Depósito glaciar Depósito fluvio glaciar		0.3
Esquistos y gneises	Rocas metamórficas bastante cizalladas y fracturadas que se caracterizan por ser un material poco consolidado.	0.2
Depósito aluvial	Depósitos superficiales de materiales como cantos rodados, guijarros, y arenas de diferente granulometría. Todo esto hace que presente una estructura poco consolidada y por lo tanto de baja resistencia.	0.1
Nieve	-----	-----
Cuerpos de agua	-----	-----

- *Pendiente.*

Se analizó esta variable por que le terreno presenta grandes cambios de pendiente, siendo su valor expresado en grados, la pendiente es un factor que condiciona la aparición de movimientos del terreno.

- *Precipitación.*

Indica la cantidad de precipitaciones en el área de estudio, factor que influye considerablemente en la estabilidad de los taludes, ya que después de épocas de grandes lluvias se suelen producir grandes deslizamientos, esto es debido a que la infiltración de agua en terreno, puede ocasionar un incremento de las fuerzas que tienden al deslizamiento, la importancia de esta variable se establece que cuanto más saturado este el suelo de agua, este tiende a ser menos estable.

Tabla 3.2. Fuente: Índices de protección de la cobertura vegetal al suelo publicados en la Guía para la Elaboración de Estudios del Medio Físico del MOP de Madrid-España, 1.986

UNIDAD	ÍNDICE DE PROTECCIÓN DEL SUELO
Vegetación arbórea	1.00
Vegetación arbórea/Vegetación arbustiva alta	0.90
Vegetación arbórea/Vegetación arbustiva	0.80
Vegetación arbustiva alta/Vegetación arbórea	0.75
Vegetación arbórea/Pasto	0.70
Vegetación arbustiva alta/Pasto	0.65
Vegetación arbustiva baja	0.50
Vegetación arbustiva baja/Páramo	0.50
Páramo/Vegetación arbustiva baja	0.45
Páramo	
Pasto/Vegetación arbustiva alta	0.40
Pasto/Vegetación arbórea	
Pasto/Páramo	0.35
Pasto	0.30
Elujo de lava	
Afloramiento rocoso	0.0
Eriales	

- *Distancia a Vías.*

Se estima la estabilidad del terreno en función de sus características de construcción antrópica. La valoración se realiza de forma semicuantitativa, asignándole un valor numérico en función del tipo de vías que ha sido diseñada. La construcción de vías en esta zona, ha afectado directamente a la estabilidad del terreno, causando derrumbes, pequeños deslizamientos, esto puede evidenciarse que cuanto más próximo al tipo de construcción vial, el terreno se vuelve menos estable.

- *Distancias a Fallas*

Una falla, en geología, es una discontinuidad que se forma en las rocas superficiales de la Tierra (hasta unos 200 km de profundidad) por fractura, cuando las fuerzas tectónicas superan la resistencia de las rocas. La zona de ruptura tiene una superficie generalmente bien definida denominada plano de falla y su formación va acompañada de un deslizamiento de las rocas tangencial a este plano.

El movimiento causante de la dislocación puede tener diversas direcciones: vertical, horizontal o una combinación de ambas. En las masas montañosas que se han alzado por movimiento de fallas, el desplazamiento puede ser de miles de metros y muestra el efecto acumulado, durante largos periodos, de pequeños e imperceptibles desplazamientos, en vez de un gran levantamiento único. La zona de estudio cuenta con fallas, transcurrentes, inferida, diaclasa y fracturas, al hacer un análisis de proximidad, las zonas que se encuentren cerca se serán más afectadas a movimientos de terreno, que zonas más alejadas.

- *Distancias a Recursos Hídricos.*

La proximidad de una zona a una red hidrológica implica un aumento de la posibilidad de deslizamiento. Esto se debe a la que la presencia de agua en el terreno reduce la resistencia al corte de los materiales.

Al realizar los modelos cartográficos se evidenciará si estas variables apoyan el comportamiento del modelo a ser expuesto.

Las variables utilizadas fueron desarrolladas en formato vector ya que se tiene buena similitud de las formas, su cálculo es más preciso de áreas, perímetros y longitudes y son adaptados bajo bases de datos orientadas a objetos.

La Tabla 3.3. engloba el comportamiento de cada variable que intervendrá en el modelo, con la ocurrencia de movimientos del terreno, y a que caso fuzzy corresponderá; esto será analizado más adelante cuando se trate el tema de la metodología fuzzy.

Tabla 3.3. Análisis de las variables que intervienen en el estudio.

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	CASO FUZZY
<i>dst_antr</i>	La influencia antrópica, principalmente de vías, ha inestabilizado al terreno, provocando pequeños o grandes deslizamientos, ocasionando que mientras más cerca se encuentre a esta variable la probabilidad de ocurrencia del evento aumenta, cuanto más lejos esta probabilidad disminuye.	
<i>dst_fallas</i>	Las fallas geológicas provocan que el terreno encuentre o no en un movimiento, ya sea lento o violento; mientras más cerca a esta variable, la probabilidad de movimiento del terreno aumenta, pero esta disminuye mientras más lejos esté.	
<i>dst_hidr</i>	La erosión causada por los diferentes recursos hídricos, con el tiempo inestabiliza el terreno, siendo más probable la ocurrencia de deslizamientos, cuanto más cerca se esté del recurso, y disminuyendo cuanto más lejos esté.	
<i>ind_rest</i>	La resistencia de la roca a la erosión tiene una relación indirectamente proporcional, a la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento, ya que mientras más resistente sea esta, menos probable es la ocurrencia del evento.	
<i>ind_pres</i>	Las raíces de una cobertura vegetal, actúan como mala protectora para la estabilidad del terreno, teniendo una probabilidad mayor de ocurrencia del evento, cuanto menos índice de protección exista en la zona.	
<i>pend_grd</i>	Mientras mayor pendiente exista en un terreno, la probabilidad de ocurrencia, de pequeños o grandes deslizamientos, aumenta, ocasionando una relación directamente proporcional a la ocurrencia del evento.	
<i>prec</i>	El terreno, a la constante influencia del agua lluvia, pierde su estabilidad, siendo esto directamente proporcional a la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos.	

- **Análisis de proximidad.**

Con referencia a un conjunto de objetos, se pueden obtener mapas que ilustran como se reparte un territorio en términos de diferencia de distancias a cada objeto (mapa de distancias) o cómo se asigna a cada parte del territorio su objeto más cercano (mapa de proximidad). 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 a vías, distancia a fallas, y distancia a 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 de un deslizamiento es mayor, que un punto que se encuentre más alejado a cada una de estas variables.

- **Interpolación.**

La interpolación es una técnica de generalización y es definida como el método de predecir valores desconocidos de localizaciones vecinas³⁶. La interpolación trata de predecir datos de sitios no muestreados, se utiliza esta técnica para construir el mapa de isoyetas, tomando como base los datos meteorológicos de estaciones cercanas a la zona de estudio. Los datos de precipitación usualmente están irregularmente espaciados ya aplicando modelos topológicos de análisis especiales es posible la generación de isoyetas continuas.

Para la realización del mapa de isoyetas se obtuvo los puntos de ubicación de las estaciones meteorológicas de la zona, que pueden observarse en la tabla No 3.

La técnica de interpolación utilizada, cuyos resultados se asemejaron a la realidad climática de la zona de estudio fue el método de interpolación segmentaria (SPLINE), la idea central es que en vez de usar un solo polinomio para interpolar los datos, se puede usar segmentos de polinomios y unirlos adecuadamente para formar la interpolación.

³⁶ Análisis comparativo de diferentes métodos para la obtención de modelos de riesgo humano de incendios forestales - Vilar del Hoyo.

Tabla 3.4. Estaciones Metereológicas cercanas a la Zona de Estudio.

Fuente: INAMHI, Anuario metereológico.

NOMBRE	CÓDIGO	COORDENADAS	
		X_UTM	Y_UTM
<i>Baeza</i>	M215	848462	9929956
<i>Borja Misión Josefina</i>	M486	852963	9954154
<i>Cuyuja</i>	M436	828021	9990042
<i>El Chaco</i>	M201	796836	9963116
<i>La Mica</i>	P9	807350	9940960
<i>Oyacachi</i>	M545	837240	9962370
<i>Papañacta</i>	M118	817420	9958874
<i>Río Salado</i>	M208	800552	9977869
<i>Sardinas</i>	M490	811874	9958932

- **Vectorización.**

Los sistemas vectoriales son eficientes en el almacenamiento de mapas, ya que solo distinguen entre límites de características, y no lo que existe en el interior de las mismas. Por eso las variables a ser utilizadas en esta análisis fueron vectorizadas manualmente sobre las cartas topográficas que constituyen el área de estudio y sobre una imagen satelital, que permitió obtener el mapa base, de donde saldrán todas las variables necesarias para el análisis.

- **Rasterización.**

Para procesar la información, se requiere transformarla a formato raster, que es una estructura más simple de asimilación más directa a datos de sensores remotos, las operaciones de superposición son más sencillas y brinda mayor facilidad en el análisis espacial como distribución, densidad de superficie, etc. La unidad espacial conserva la misma forma y tamaño de modo que se facilitan las simulaciones. Este formato es útil para análisis de grandes extensiones con baja precisión de propiedades espaciales.

Sin embargo, las ventajas se presentan, primeramente, en que el espacio es definido de una manera uniforme y muy visual. Como resultado, los sistemas raster tienen mayor poder analítico que el vectorial en el análisis del espacio continuo, y por tanto, es idóneo para el estudio de fenómenos cambiantes en el espacio como las variables de los 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 1:50000, escala determinada para el proyecto.

Existen varios factores para determinar la resolución, la norma INEN determina que el error gráfico debe ser de 0.5 milímetros. El IPGH (Instituto Panamericano de Geografía e Historia), determina el factor de 0.3 milímetros, que corresponde al grosor común de la mina de lápiz. En la actualidad por el uso de computadores se determina un factor de 0.1 milímetros.

Para el análisis de deslizamiento se utilizará un factor de 0.3 milímetros. Ya que el presente proyecto se basa y complementa, a proyectos anteriormente desarrollados.

$$\text{Resolución espacial} = \text{Factor de escala} * \text{Factor de resolución}$$

$$\text{Resolución espacial} = (50000) * (0.0003) = 15 \text{ metros}$$

- **Clasificación.**

Clasificar una imagen es tomar decisiones reemplazando interpretaciones vagas y ambiguas por un proceso más cuantitativo y repetible. A través de una clasificación puede hacerse un mapeo eficiente y consistente de grandes áreas de la superficie terrestre.



Figura 3.2. Clasificación de una imagen satelital

Fuente: Imagen satelital Landsat TM, GLSF - zona volcán Antisana.

Al clasificar una imagen se asigna cada celda a una categoría, que representan una gama de variedad dentro de la imagen.

Las bandas utilizadas, para la clasificación de la imagen satelital fueron:

- La banda 4, correspondiente al infrarrojo cercano,
- La banda 5, correspondiente al infrarrojo medio, y
- La banda 3, correspondiente al color rojo.

Se utilizó esta combinación por que las radiaciones que captan los sensores del satélite en el espectro infrarrojo son particulares en cada tipo de cobertura vegetal o de suelo, si estas

bandas son colocadas en reemplazo de las correspondientes al espectro visual, se obtiene una imagen en falso color.

En cada temporada de cultivos, las coberturas vegetales cambian y también lo hacen los colores que se verá en la pantalla.

Se utilizó una clasificación supervisada, ya que se tenía conocimiento de la zona de estudio, adquirido por experiencia previa y trabajo en campo. Esta mayor familiaridad con la zona, permite al delimitar sobre la imagen áreas piloto, que se consideran suficientemente representativas de las categorías que componen la leyenda. Estas áreas se denominan en la bibliografía anglosajona “training fields” (campos o áreas de entrenamiento). El término indica que tales áreas sirven para entrenar al ordenador en el conocimiento de las distintas categorías.

En otras palabras, a partir de ellas el ordenador calcula las celdas similares que definen cada una de las clases, para luego asignar el resto de los píxeles de la imagen a una de esas categorías en función de sus similitudes.

El trabajo de campo, y la recopilación de documentos auxiliares como las fotografías aéreas o la cartografía convencional sirvieron de para una localización más precisa de las áreas, teniendo en la mente que debe tratarse de ejemplos suficientemente representativos y homogéneos de la clase que pretende definirse. Acabada la delimitación de un campo de entrenamiento, se seleccionó otros para la misma categoría, o bien culminar con él la definición de esa clase. Resulta bastante frecuente que los resultados de una clasificación digital, tengan una excesiva fragmentación. En otras palabras, las diversas categorías se superponen entre sí, manchas de color más o menos homogéneas se encuentran aleatoriamente por todo la imagen a ser analizada, por celdas asignadas a otras categorías, perdiéndose su unidad geográfica y dificultándose la interpretación de los resultados esto se debe a:

- La mayor parte de los criterios de asignación no tienen en cuenta la pertenencia de celdas vecinas.
- La propia complejidad del paisaje, directamente relacionada con la aparición de celdas de borde fronterizas a dos o más categorías que son los principales responsables de la discontinuidad visible en el mapa.

Para resolver este problema se aplicó una técnica de suavización, similar en la concepción, aunque no en la ejecución, a los filtros de paso bajo. Sobre la imagen clasificada no puede

aplicarse un filtro convencional, puesto que cualquier promedio de píxeles vecinos introduciría cambios imprevisibles en la clasificación.

3.3. Modelos cartográficos.

El modelamiento cartográfico es un conjunto de operaciones de análisis y comandos interactivos utilizando mapas que actúan como una pila cuyo fin es procesar decisiones de tipo espacial³⁷. La realidad está representada en mapas; el modelamiento está orientado a procesos y no a productos.

Para poder realizar un análisis estadístico, del modelo más idóneo, de la susceptibilidad del terreno a deslizamientos, se realizará diferentes tipos de modelos Figura No 3.3., los cuales permitirán conocer qué modelo refleja de mejor forma la realidad del fenómeno de deslizamientos.

3.3.1. Obtención de los modelos cartográficos.

Mediante técnicas de modelamiento se presentará varios modelos de deslizamientos, que serán:

Modelo 1: Fuzzy con el 60 percentil de los datos,

Modelo 2: Fuzzy con el 80 percentil de los datos,

Modelo 3: Fuzzy al 95%, con el 60 percentil de los datos,

Modelo 4: Fuzzy al 95%, con el 80 percentil de los datos,

Modelo 5: MARS,

Modelo 6: Mínimos Cuadrados.

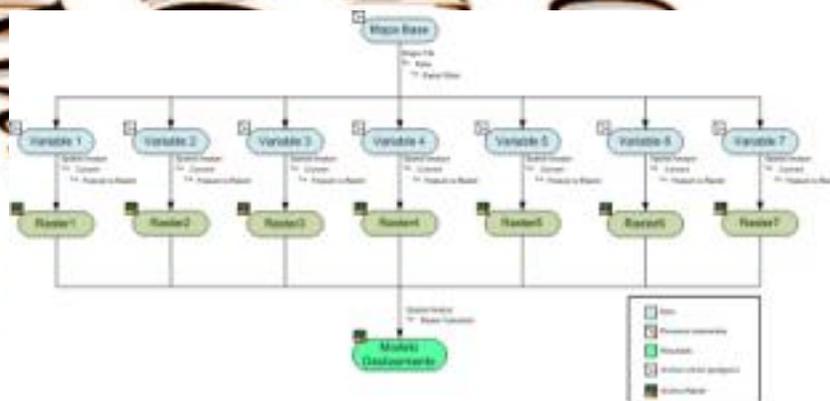


Figura 3.3. Modelo Cartográfico General.

³⁷ TOMLIN, 1990, citado por DEMERS, 1997

Esto permite escoger que método y modelo se adapta más a la realidad del fenómeno. Los modelos cartográficos de cada modelo se presentan en el anexo A3.

- **Análisis de regresión múltiple.**

El objetivo del análisis de regresión es determinar la relación de variables; es por esto que se ha utilizado este concepto para que a partir de hechos conocidos en ciertos puntos del área de estudio se pueda predecir de cierta forma cual sería el fenómeno a esperarse en el resto del área.

Considerando que la Regresión Múltiple utiliza más de una variable independiente para estimar la variable dependiente, se ha tomado este concepto para desarrollar el análisis de susceptibilidad a movimientos en masa frente a las diferentes variables que intervienen. La principal ventaja de utilizar el Análisis de Regresión Múltiple es poder incorporar más información disponible para estimar el comportamiento de la variable dependiente, ya que en algunas ocasiones, la correlación entre dos variables puede resultar insuficiente para determinar una ecuación de estimación confiable.

La regresión múltiple es una extensión de la regresión lineal:

$$Y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + \varepsilon$$

El término error (ε) indica el error aleatorio, no modelizable, y que puede deberse a:

- error muestral
- efectos atribuibles a otras variables independientes no incluidas en el estudio.

El problema de los coeficientes de regresión parcial (b_1, b_2, \dots, b_n) es que no informan sobre la magnitud de los efectos de cada variable independiente, porque dependen de la escala de medida (rango de variación de las X).

- *Variables que intervienen.*

Cada variable que interviene en el análisis, es analizada de acuerdo al evento que se desee estudiar; logrando conocer cómo reacciona cada variable, a la probabilidad de ocurrencia del evento.

Para un manejo adecuado de los datos, las variables fueron codificadas de la siguiente forma:

Tabla 3.8. Variables que intervienen en el estudio.

VARIABLE	CÓDIGO
Distancia a vías	<i>dst_vnt</i>
Distancia a fallas geológicas	<i>dst_fallas</i>
Distancia a recursos hídricos	<i>dst_hidr</i>
Índice de resistencia	<i>ind_rest</i>
Índice de protección	<i>ind_prot</i>
Pendiente	<i>pend_grd</i>
Precipitación	<i>prec</i>

- *Puntos de Muestra*

Para determinar el conjunto de puntos en la zona de estudio, se consideró estudios realizados anteriormente, como puntos donde se ha registrado movimientos en masa, puntos en donde existan evidencias de una potencial ocurrencia del fenómeno y puntos donde no existan o sean escasas las posibilidades de que llegue a producirse el mismo; estos puntos fueron obtenidos a partir de:

Observaciones de campo: por la facilidad de acceso se decidió tomar puntos muestra a lo largo de la principal vía de comunicación y de algunas vías secundarias.

Fotointerpretación de antiguos y potenciales movimientos en masa, en donde se han identificado deslizamientos antiguos y recientes, que constituyen unidades propensas a la ocurrencia de movimientos en masa. Cada punto muestreado posee características referentes a cada variable utilizada en la determinación de susceptibilidad del terreno a deslizamientos; por ende le corresponderá una cobertura temática según el número de variables a ser utilizadas.



Figura 3.14. Puntos localizados en la zona de estudio.

- *Elaboración de Diagramas de Dispersión.*

Para analizar la relación entre dos variables se examina la gráfica de los datos observados mediante diagramas de dispersión; estos pueden dar varios tipos de información.

Un análisis de correlación permite conocer el grado de relación entre dos variables, cuando existe una correlación total, se cumple que a cada valor de una variable, le corresponde un único valor de otra variable.

Los diagramas de dispersión permiten conocer las verdaderas relaciones de causa-efecto, que son la clave de la resolución eficaz de un problema, que las relaciones de causa-efecto casi siempre muestran variaciones, y que es más fácil ver la relación en un diagrama de dispersión que en una simple tabla de números. Para su realización se toma cada variable independiente, la cual es analizada con la variable dependiente, que en este análisis será la presencia/ausencia del fenómeno de movimiento en masa, como se puede observar en la figura 3.15. correspondiente a la variable precipitación; los diagramas de dispersión de cada variable se pueden observar en el anexo A?

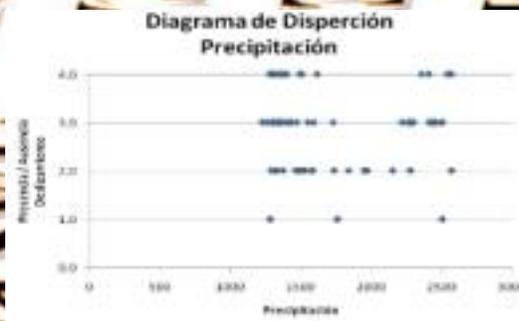


Figura 3.15. Diagrama de dispersión - variable precipitación.

Se puede evidenciar que cada variable independiente (X) tiene una relación compleja con su variable dependiente (Y), lo que significa que parece relacionarse con X pero no de un modo lineal. Esto se debe a que la variable dependiente no es continua y no se distribuye normalmente, como es el caso del análisis de presencia/ausencia, supervivencia, etc.; la relación entre las variables es intrínsecamente no lineal; esto permite tener aún más clara la idea, de utilizar un modelo diferente, para analizar las variables en este caso específico, como realizar el análisis Fuzzy, o utilizar los modelos lineales generalizados.

Según los diagramas de dispersión permiten tener una idea del comportamiento de X según Y , este comportamiento puede generalizarse en dos grupos, los cuales tendrán similar comportamiento según la variable dependiente.

El comportamiento del primer grupo es directamente proporcional a su variable dependiente, es decir, aumenta el valor de X , cuando aumenta el valor de Y ; habrá más probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento cuanto más grande sea el valor de la variable independiente; a este grupo pertenecen las variables:

- Precipitación,
- Pendiente.

El segundo grupo tiene un comportamiento inversamente proporcional, disminuye el valor de Y al aumentar el valor de X , la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento será más evidente al disminuir el valor de la variable dependiente; a este grupo pertenecen las variables:

- Distancia a recursos hídricos,
- Distancia a fallas geológicas,
- Distancia a vías,
- Índice de protección,
- Índice de resistencia a la erosión.
- *Planteamiento de la Ecuación de Estimación.*

Al analizar el comportamiento de cada variable, se puede concluir que el análisis de regresión múltiple, no correspondería a ser el modelo más idóneo para la representación del fenómeno de deslizamientos; sin embargo es necesario realizarlo para poder comparar y establecer el comportamiento de cada variable con el modelo que más se ajuste al análisis a ser estudiado.

La ecuación de regresión múltiple para analizar el fenómeno de deslizamientos, está compuesta por todas las variables independientes anteriormente mencionadas, formulándose de la siguiente manera:

$$MD = \alpha_0 + (\alpha_1)(Prep) + (\alpha_2)(Pend) + (\alpha_3)(Indp) + (\alpha_4)(Indr) + (\alpha_5)(Dstv) + (\alpha_6)(Dsth) + (\alpha_7)(Dstf)$$

Donde:

- MD = Modelo de deslizamientos.
- α = Coeficientes de regresión.
- $Prep$ = Precipitación.
- $Pend$ = Pendiente.
- $Indp$ = Índice de protección.

- I_{ndr} = Índice de resistencia.
- D_{stv} = Distancia a vías.
- D_{sth} = Distancia a recursos hídricos.
- D_{stf} = Distancia a fallas geológicas.

- *Planteamiento y resolución de sistemas de ecuaciones.*

Las incógnitas en la ecuación planteada anteriormente, serán los coeficientes de la regresión, que serán determinados mediante la resolución del sistema de ecuaciones; tomando en cuenta todos los puntos que fueron analizados en campo.

El error de la ecuación permite conocer la diferencia entre el error del modelo y de los valores observados para cada punto analizado, sin embargo el problema al añadir los errores individuales es el efecto de cancelación de los valores positivos y negativos, además una ecuación de estimación será mejor si estas diferencias son pequeñas.

En el sistema planteado anteriormente, según la ecuación:

$$MD = \alpha_0 + (\alpha_1)(Precp) + (\alpha_2)(Pend) + (\alpha_3)(Indp) + (\alpha_4)(Indr) + (\alpha_5)(D_{stv}) + (\alpha_6)(D_{sth}) + (\alpha_7)(D_{stf})$$

se reemplazará los valores de cada punto (variables independientes), al sistema de ecuación

$$AX = L$$

Donde:

A → Matriz $n \times n$, de los coeficientes,

X → Matriz de las incógnitas;

L → Matriz de términos independientes.

Para resolver el sistema se utilizará el método de mínimos cuadrados

$$AX = L$$

$$(A^T)(A)(X) = L$$

$$(A^T A)^{-1} (A^T A) X = (A^T A)^{-1} A^T L$$

$$I X = (A^T A)^{-1} A^T L$$

$$X = (A^T A)^{-1} A^T L$$

Donde:

$()^{-1}$ → Matriz inversa

A^T → Matriz transpuesta

I → Matriz identidad

Remplazando los valores de cada punto, y resolviendo el sistema de ecuaciones, se obtiene los siguientes coeficientes de la ecuación de regresión:

$$\begin{aligned}\alpha_0 &= 0.685 \\ \alpha_1 &= 0.000 \\ \alpha_2 &= 0.002 \\ \alpha_3 &= -0.055 \\ \alpha_4 &= -0.350 \\ \alpha_5 &= 0.000 \\ \alpha_6 &= 0.000 \\ \alpha_7 &= 0.000\end{aligned}$$

Estos valores al ser sustituidos en la ecuación del modelo de deslizamientos, dá como resultado:

$$MD = 0.685 + 0.002 (Pend) - 0.055 (Indp) - 0.350 (Indr)$$

Esta ecuación se introducirá en el programa SIG, para obtener un tercer modelo de deslizamientos, y que permita ser comparado con los demás modelos obtenidos.

- **Multivariate adaptive regression splines (MARS)**

MARS, cuyas siglas significan Multivariate Adaptive Regression Splines, fue desarrollado en los años 90s por el renombrado físico y estadista Jerome Friedman, de la Universidad de Stanford. Friedman, MARS plantea un análisis completo de las variables y su correspondiente importancia para la predicción del evento.

No se ajusta a una curva única, plantea la división por zonas y su correspondiente ajuste, lo que mejora los resultados.

MARS es un método no paramétrico que ajusta una serie de regresiones lineales a distintos intervalos de valores de la variable. Los puntos en los que cambia la pendiente de las regresiones se conocen como "knots" (nodos), Figura 3.16., y las diferentes rectas de regresión, como "basic functions" (funciones básicas).

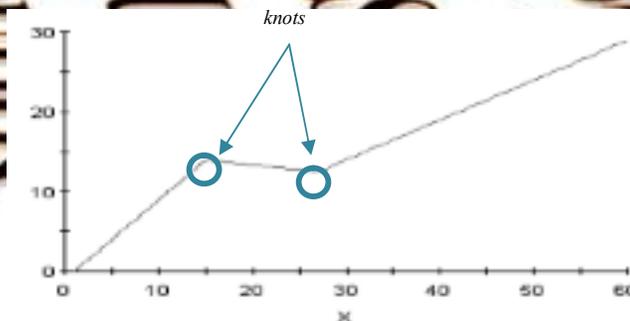


Figura 3.16. Puntos en los que cambia la pendiente de las regresiones

Las funciones básicas son un conjunto de funciones con las que MARS representa la información contenida en las variables originales. MARS utiliza la función "palo de hockey" ("*hockey stick function*"), que convierte la variable X , original en una nueva definida como:

$\max(0, X-c)$ ó $\max(c-X, 0)$, en la que c es el valor umbral (el "*knot*").

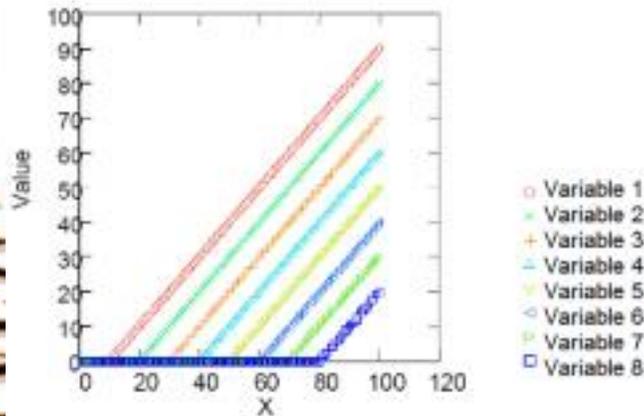


Figura 3.17. Función *hockey stick*

Las funciones básicas anteriores (*standard basic functions*) nunca podían tener pendientes distintas de 0 por debajo del valor umbral. Para solucionar este problema, se crean por pares (la "*standard*" y su "*mirror*").

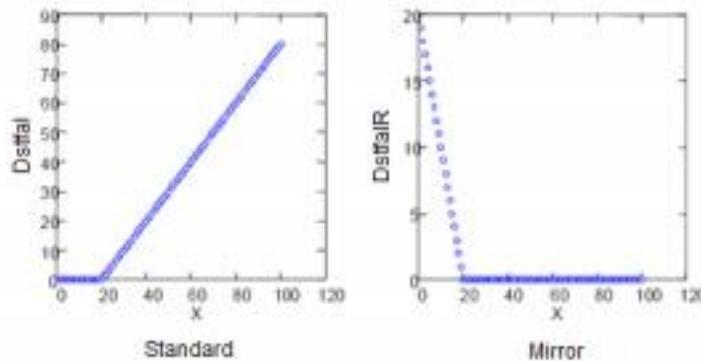


Figura 3.18. Funciones, Standard y Espejo

Lo que permite, cambiando el signo de su coeficiente, ajustar cualquier valor de la pendiente.

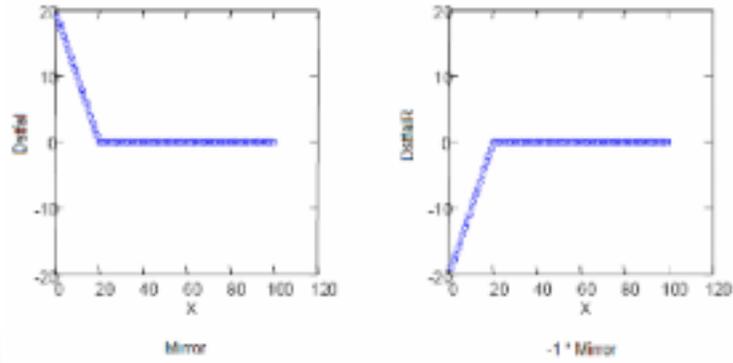


Figura 3.19. Cambio de signo del coeficiente

El modelo final tiene una forma similar al de una regresión multivariante:

Regresión Multivariante $\rightarrow MV = 31 + 0.9(4-var)_+ - 2.1(var-4)_+ + 1.9(var-8)$

Mars $\rightarrow MV = 31 + 0.9*BF1 - 2.1*BF2 + 1.9*BF3$ donde:

$BF1 = \max(4-var),$

$BF2 = \max(var-4),$

$BF3 = \max(var-8)$

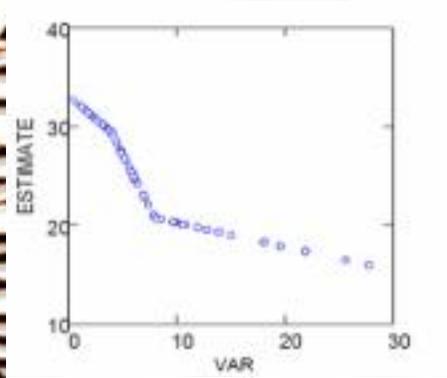


Figura 3.20. Modelo MARS

Las variables utilizadas en el análisis MARS son:

- Prep* = Precipitación.
- Pend* = Pendiente.
- Indp* = Índice de protección.
- Indr* = Índice de resistencia.
- Dstv* = Distancia a vías.
- Dsth* = Distancia a recursos hídricos.
- Dstf* = Distancia a fallas geológicas.

El modelo final, mediante multivariate adaptive regresión splines (MARS), para el modelo de deslizamientos es:

$$\begin{aligned} \text{BF3} &= \max(0, \text{DSTFAL} - 683.520); \\ \text{BF6} &= \max(0, \text{DSTHID} - 230.490); \\ \text{BF8} &= \max(0, \text{DSTHID} - 176.780); \\ \text{BF10} &= \max(0, \text{DSTHID} - 291.550); \\ \text{BF14} &= \max(0, \text{INDRST} - 0.300); \\ Y &= 0.577 - .263154\text{E-}03 * \text{BF3} - 0.019 * \text{BF6} + 0.012 * \text{BF8} + 0.007 * \text{BF10} - 0.590 * \text{BF14}; \end{aligned}$$

- **Utilización de Operadores Fuzzy.**

Basándose en la curva seno cuadrado como función de pertenencia; se tiene varios casos posibles, con sus correspondientes funciones de pertenencia, a las cuales las variables pueden ajustarse.

Esta metodología se basa en el análisis y selección del caso particular de cada variable que interactúa con el fenómeno o evento. Para esto se analiza tres posibles casos, que dependerá según el comportamiento de la variable en el fenómeno a estudiar.

De la curva del seno², se derivan los casos a ser estudiados, excluyendo curvas de pertenencia que no se adapten a los datos y que sus aplicaciones ya se han probado.

La lógica difusa puede usarse para explicar el mundo real, puesto que sigue el comportamiento humano de razonar, sacando conclusiones a partir de hechos observados; esto incluye sistemas lógicos que admiten varios valores de verdad posibles, permitiendo representar de forma matemática conceptos o conjuntos imprecisos. Si P es una proposición, se le puede asociar un número $v(P)$ en el intervalo $[0,1]$ tal que:

Si $v(P) = 0$, entonces P es falso.

Si $v(P) = 1$, entonces P es verdadero.

La veracidad de P aumenta con $v(P)$.

Con el fin de establecer un rango, que permita conocer el comportamiento de las variables, de manera más real, se ubican dos puntos adicionales al análisis, que serán valores para una probabilidad de ocurrencia del evento del 95%, dependiendo del caso de análisis.

- **Primer Análisis**

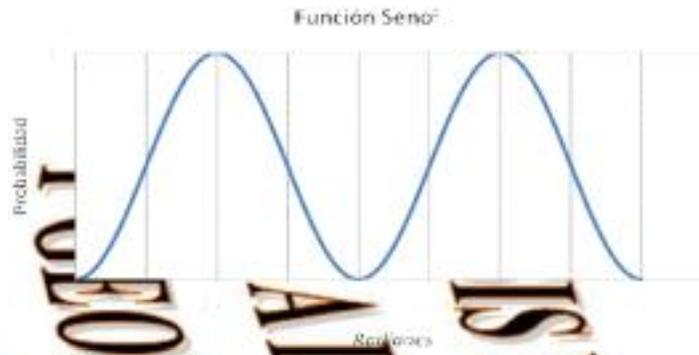


Figura 3.4. Función Seno²

Fuente: Revista Geoespacial No 4 - Padilla, Oswado.

Fragmento inferior de la Función Seno²

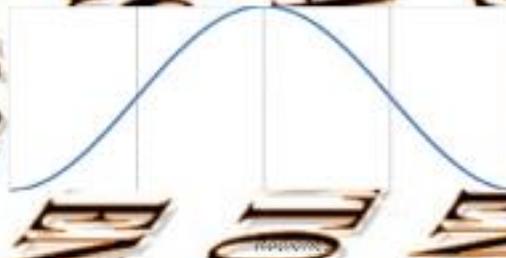


Figura 3.5. Rango de interés de la función Seno²

Fuente: Revista Geoespacial No 4 - Padilla, Oswado.

El rango a ser utilizado en el análisis es de $[0,1]$, 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 (f), que estará en función de la variable del análisis.

Siendo:

P = Probabilidad de ocurrencia del evento o fenómeno

f = variable en función del evento o fenómeno

Mínima probabilidad: $P = 0$ o 0%

Máxima probabilidad: $P = 1$ o 100%

Los posibles escenarios que podría presentarse, analizando la función seno², en el rango de 0 a π radianes, son aquellos donde la probabilidad de ocurrencia de un evento, va de 0 , a 1 , es decir desde una probabilidad nula hasta la probabilidad certera de ocurrencia del evento, tomando en cuenta los puntos de inflexión de la curva seno². En cada Caso se tomará

valores del 80 y 60 percentil, que permitirá tener un rango amplio, de selección del modelo más idóneo que represente de forma más real el fenómeno a estudiarse.

Primer caso.

Se encuentra en el rango de 0 a $\pi/2$ radianes.

Los casos a encontrar, son aquellos donde la probabilidad de ocurrencia, es directamente proporcionalmente al evento analizado.

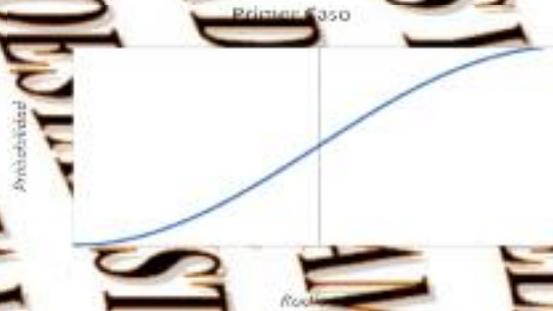


Figura 3.6. Primer caso del análisis Fuzzy

Los puntos de inflexión de la curva seno^2 , se calculan utilizando la segunda derivada, al ser las derivadas una útil herramienta para examinar las gráficas de funciones; la prueba de la primera derivada y la prueba de la segunda derivada permiten determinar si los puntos críticos son máximos, mínimos o ninguno

$$\begin{aligned}
 f &= \text{sen}^2\alpha \\
 f' &= (2\text{sen}\alpha)(\text{cos}\alpha) \\
 f'' &= (2\text{sen}\alpha)(-\text{sen}\alpha) + (2\text{cos}\alpha)(\text{cos}\alpha) \\
 f'' &= 2(\text{cos}^2\alpha - \text{sen}^2\alpha) \\
 \text{cos}^2\alpha - \text{sen}^2\alpha &= 0 \\
 1 - 2 * \text{Sen}^2\alpha &= 0 \\
 \text{Sen}^2\alpha &= 1/2 \\
 \alpha_1 &= \pi / 4 \\
 \alpha_2 &= 3\pi / 4
 \end{aligned}$$

Secciones del Primer Caso

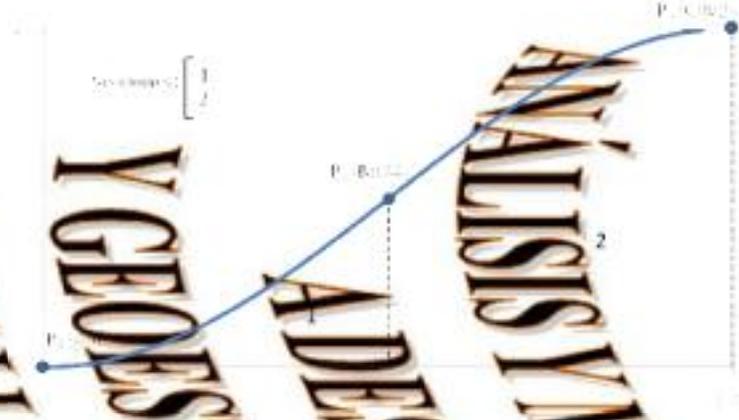


Figura 3.7. Secciones del Primer Caso Fuzzy

Coordenadas de los puntos de interés: P1(A;0), P2(B;π/4), P3(C, π/2).

Siendo:

A → valor mínimo de los datos obtenidos de cada variable.

B → valor del percentil de cada variable.

C → valor máximo de los datos obtenidos de cada variable.

Esto permite tomar un porcentaje de los datos que se encuentren en la zona de la función de pertenencia, que refleje la mayor probabilidad de ocurrencia del fenómeno a ser estudiado.

Sección 1: (P1-P2)

$$\frac{(y - y_1)}{(x - x_1)} = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}$$

$$x = v,$$

$$y = \alpha;$$

$$\frac{(\alpha - 0)}{(V - A)} = \frac{(\pi/4 - 0)}{(B - A)}$$

$$\alpha = (\pi/4) \frac{(V - A)}{(B - A)}$$

Sección 2: (P2-P3)

$$\frac{(y - y_1)}{(x - x_1)} = \frac{(y_1 - y_2)}{(x_1 - x_2)}$$

$$x = v;$$

$$y = \alpha;$$

$$\frac{(\alpha - \pi / 4)}{(V - B)} = \frac{(\pi / 4 - \pi / 2)}{(B - C)}$$

$$\alpha = \pi / 4 \left(\frac{V - B}{C - B} + 1 \right)$$

Segundo Caso.

Se encuentra en el rango de $\pi/2$ a π radianes.

Los casos a encontrar, son aquellos donde la probabilidad de ocurrencia, es inversamente proporcional al evento analizado.

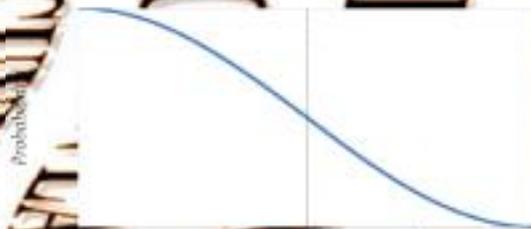


Figura 3.8. Segundo caso del análisis Fuzzy

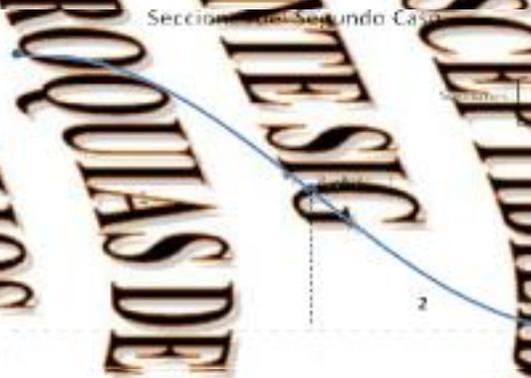


Figura 3.9. Secciones del segundo caso Fuzzy

Coordenadas de los puntos de interés: P1(A; $\pi/2$), P2(B; $3\pi/4$), P3(C; π).

Siendo:

A \rightarrow valor mínimo de los datos obtenidos de cada variable.

B \rightarrow valor del percentil de cada variable.

C \rightarrow valor máximo de los datos obtenidos de cada variable.

Esto permite tomar un porcentaje de los datos que se encuentren en la zona de la función de densidad, que refleje la mayor probabilidad de ocurrencia del fenómeno a ser estudiado.

Sección 1: (P1-P2)

$$\frac{(y - y_1)}{(x - x_1)} = \frac{(y_1 - y_2)}{(x_1 - x_2)}$$

$$x = v;$$

$$y = \alpha;$$

$$\frac{(\alpha - \pi/2)}{(V - A)} = \frac{(\pi/2 - 3\pi/4)}{(A - B)}$$

$$\alpha = \pi/4 \left(2 + \frac{(V - A)}{(B - A)} \right)$$

Sección 2: (P2-P3)

$$\frac{(y - y_1)}{(x - x_1)} = \frac{(y_1 - y_2)}{(x_1 - x_2)}$$

$$x = v;$$

$$y = \alpha;$$

$$\frac{(\alpha - 3\pi/4)}{(V - B)} = \frac{(3\pi/4 - \pi)}{(B - C)}$$

$$\alpha = \pi/4 \left(3 + \frac{(V - B)}{(C - B)} \right)$$

Para obtener los modelos expuestos anteriormente es necesario agrupar las fórmulas, y escribirlas de forma que pueda ser utilizado en un programa SIG.

Tabla 3.5. Fórmulas del análisis fuzzy.

A: Valor mínimo;	B: Percentil;	C: Valor máximo
<p>Algoritmo Primer Caso:</p> $VA1 = RASTER < B$ $VA2 = RASTER \geq B$ $VA3 = 45 * (RASTER - A) / (B - A)$ $VA4 = (45 * (1 + ((RASTER - B) / (C - B))))$ $VA = VA1 * VA3 + VA2 * VA4$ $RAD = VA * 3.141592654 / 180$ $Raster60/80 = Pow(\sin(RAD), 2)$		
<p>Algoritmo Segundo Caso:</p> $VA1 = RASTER < B$ $VA2 = RASTER \geq B$ $VA3 = 45 * (3 + ((RASTER - B) / (C - B)))$ $VA4 = 45 * (2 + ((RASTER - A) / (B - A)))$ $VA = VA1 * VA3 + VA2 * VA4$ $RAD = VA * 3.141592654 / 180$ $Raster60/80 = Pow(\sin(RAD), 2)$		

• Segundo Análisis (Análisis del 95%)

Los límites de confianza serán aquellos valores que delimitan al intervalo de confianza (rango de valores, calculado en una muestra, en el cual se encuentra el verdadero valor del parámetro, con una probabilidad determinada), la manera de construir intervalos de confianza, acerca de los cuales se tiene un grado de confianza conocido, de que en ellos esté contenida la media poblacional, siendo la más certera el análisis del 95%.

Para este análisis se calcula el valor de α para el 5% y 95% de probabilidad;

Tabla 3.6. Cálculo del valor α .

PROBABILIDAD	
5%	95%
$Sen^2 \alpha = 0.05$	$Sen^2 \beta = 0.95$
$Sen \alpha = \sqrt{0.05}$	$Sen \beta = \sqrt{0.95}$
$\alpha = 0.2255rad$	$\beta = 1.3453rad$
$\alpha = 0.0718\pi rad$	$\beta = 0.4282\pi rad$

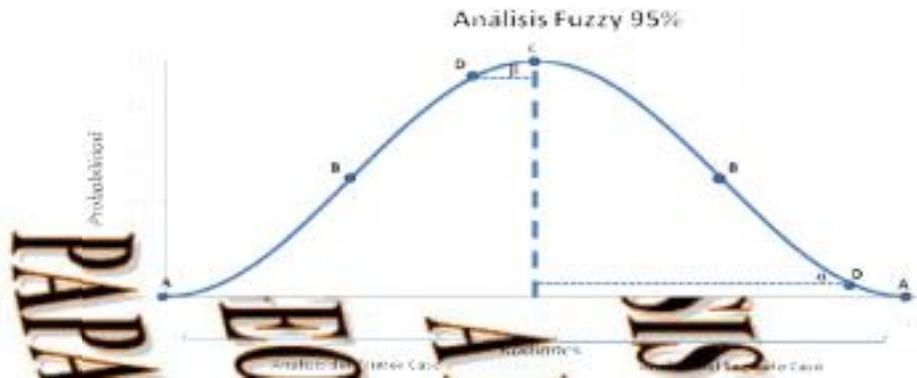


Figura 3.10. Análisis fuzzy con el 95 % de los datos.

Primer Caso

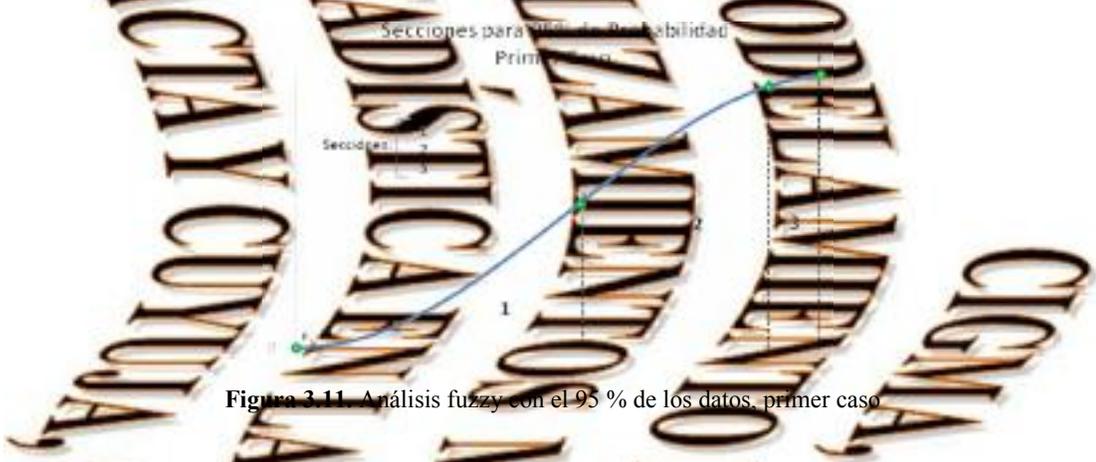


Figura 3.11. Análisis fuzzy con el 95 % de los datos. primer caso

Coordenadas de los puntos de interés: P1(A;0), P2(B, $\pi/4$), P2'(E;0.42822 π); P3(C; $\pi/2$).

Siendo:

A \rightarrow valor mínimo de los datos obtenidos de cada variable.

B \rightarrow valor del percentil de cada variable.

C \rightarrow valor máximo de los datos obtenidos de cada variable.

D \rightarrow valor correspondiente al 95% de los datos a ser modelados

Sección 1. (P1-P2)

$$\frac{(y - y_1)}{(x - x_1)} = \frac{(y_1 - y_2)}{(x_1 - x_2)}$$

$$x = \alpha;$$

$$\frac{(\alpha - 0)}{(V - A)} = \frac{(0 - \pi/4)}{(A - B)}$$

$$\alpha = \pi/4 \left(\frac{V - A}{B - A} \right)$$

Sección 2: (P2-P2')

$$\frac{(y - y1)}{(x - x1)} = \frac{(y1 - y2)}{(x1 - x2)};$$

$$x = v;$$

$$y = \alpha;$$

$$\frac{(\alpha - \pi / 4)}{(V - B)} = \frac{(\pi / 4 - 0.4284\pi)}{(B - D)}.$$

$$\alpha = \pi / 4 + 0.1782\pi \left(\frac{V - B}{D - B} \right)$$

Sección 3: (P2-P3)

$$\frac{(y - y1)}{(x - x1)} = \frac{(y1 - y2)}{(x1 - x2)};$$

$$x = v;$$

$$y = \alpha;$$

$$\frac{(\alpha - 0.4282\pi)}{(V - D)} = \frac{(0.4282\pi - \pi / 2)}{(D - C)};$$

$$\alpha = 0.4282\pi + 0.07\pi \left(\frac{V - D}{C - D} \right)$$

Segundo Caso

Secciones para el caso de Probabilidad
Segundo Caso



Figura 3.12. Análisis fuzzy con el 95% de los datos, segundo caso

Coordenadas de los puntos de interés: P1(A; $\pi / 2$), P2(B; $3\pi/4$), P2'(D; 0.9282π); P3(C; π).

Siendo:

A \rightarrow valor mínimo de los datos obtenidos de cada variable.

B \rightarrow valor del percentil de cada variable.

C \rightarrow valor máximo de los datos obtenidos de cada variable.

D \rightarrow valor correspondiente al 95% de los datos a ser modelados.

Sección 1: (P1-P2)

$$\frac{(y - y_1)}{(x - x_1)} = \frac{(y_1 - y_2)}{(x_1 - x_2)};$$

$$x = v;$$

$$y = \alpha;$$

$$\frac{(\alpha - \pi / 2)}{(V - A)} = \frac{(\pi / 2 - 3\pi / 4)}{(A - B)};$$

$$\alpha = \pi / 2 + \left(2 + \frac{V - A}{A - B} \right)$$

Sección 2: (P2-P2')

$$\frac{(y - y_1)}{(x - x_1)} = \frac{(y_1 - y_2)}{(x_1 - x_2)};$$

$$x = v;$$

$$y = \alpha;$$

$$\frac{(\alpha - 3\pi / 4)}{(V - B)} = \frac{(3\pi / 4 - 0.9282\pi)}{(B - D)};$$

$$\alpha = 3\pi / 4 + 0.55988 \left(\frac{V - B}{D - B} \right)$$

Sección 3: (P2', P3)

$$\frac{(y - y_1)}{(x - x_1)} = \frac{(y_1 - y_2)}{(x_1 - x_2)};$$

$$x = v;$$

$$y = \alpha;$$

$$\frac{(\alpha - 0.9282\pi)}{(V - D)} = \frac{(0.9282\pi - \pi)}{(D - C)};$$

$$\alpha = 0.9282\pi + 0.2255 \left(\frac{V - D}{C - D} \right)$$

De igual forma para poder obtener los modelos expuestos con el 95% de los datos es necesario escribirlos, de forma que puedan ser desarrollados por un programa SIG.

Tabla 3.7. Fórmulas del análisis fuzzy con el 95% de los datos.

A: Valor mínimo; B: 60/80 percentil; C: Valor máximo, D: 95 percentil	
<p>Algoritmo Primer Caso:</p> $VB1 = RASTER \leq B$ $VB2 = RASTER > B \ \& \ RASTER \leq D$ $VB3 = RASTER > D$ $VA1 = 45 * (RASTER - A) / (B - A)$ $VA2 = 45 + 32.07903 * (RASTER - B) / (D - B)$ $VA3 = 77.079 + 12.921 * (RASTER - D) / (C - D)$ $VA = VB1 * VA1 + VB2 * VA2 + VB3 * VA3$ $RAD = VA * 3.141592654 / 180$ $FRASTER1/2 = Pow(Sin(RAD), 2)$	
<p>Algoritmo Segundo Caso:</p> $VB1 = RASTER \leq B$ $VB2 = RASTER > B \ \& \ RASTER \leq C$ $VB3 = RASTER > D$ $VA1 = 45 * (2 + (RASTER - A) / (A - B))$ $VA2 = 135 + 32.07903 * (RASTER - B) / (D - B)$ $VA3 = 167.079 + (12.921 * (RASTER - D) / (C - D))$ $VA = VB1 * VA1 + VB2 * VA2 + VB3 * VA3$ $RAD = VA * 3.141592654 / 180$ $FRASTER1/2 = Pow(Sin(RAD), 2)$	

Tercer caso.

Se encuentra en el rango de 0 a π radianes.

Los casos a encontrar, son aquellos donde la probabilidad de ocurrencia, se comporta de forma directa e inversamente proporcional al evento analizado.

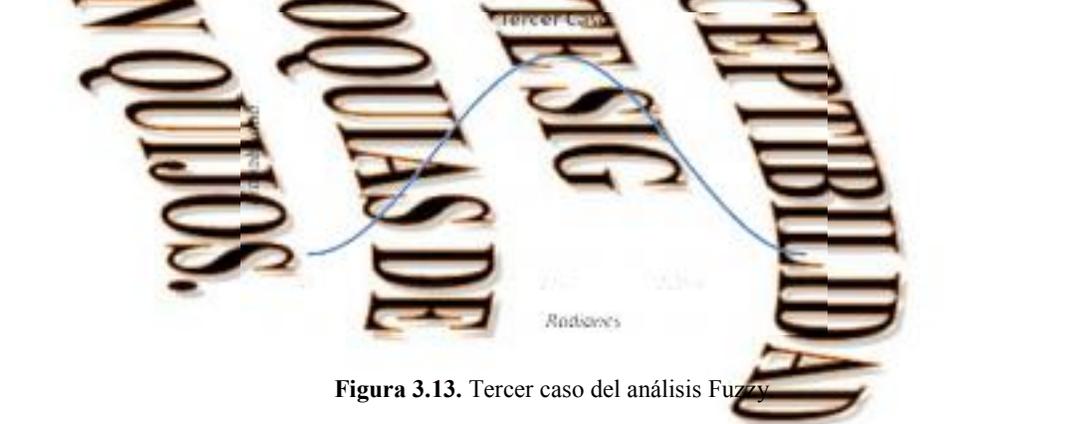


Figura 3.13. Tercer caso del análisis Fuzzy

Las variables que intervienen en este proceso, no contemplan un comportamiento de ocurrencia del evento como el presentado en este caso, siendo descartado el análisis para este tercer evento.

3.4. Validación estadística de Modelos Cartográficos planteados.

3.4.1. Cálculo del error estándar en la estimación.

El error estándar permite deducir la confiabilidad de la ecuación de regresión que se ha desarrollado; midiendo la dispersión de los valores observados alrededor de la recta de regresión, es decir mide la disparidad entre los valores observados y los valores estimados. Se considera al error estándar como un indicador del grado de precisión con que la ecuación de regresión, describe la relación entre las dos variables. Este error estándar se ve afectado por las unidades, y sus cambios, ya que es una medida absoluta, pues, se da en la misma unidad de medida que está dada la variable dependiente.

Tabla 3.9. Valores del error estándar de cada modelo.

	Modelo1 Fuzzy con 60 percentil	Modelo2 Fuzzy con 80 percentil	Modelo3 Fuzzy con el 95% de datos al 60 percentil	Modelo4 Fuzzy con el 95% de datos al 80 percentil	Modelo5 MARS	Modelo6 Mínimos Cuadrados
Error	0.680	0.629	0.559	0.593	0.658	0.768

Al ser una medida de dispersión la estimación se hace más precisa conforme el grado de dispersión alrededor del plano de regresión se hace más pequeño.

El modelo 3 y 4, de acuerdo al error estándar de estimación, predice mucho mejor la realidad del fenómeno estudiado, siendo menor al de los demás modelos.

3.4.2. Análisis de correlación.

El grado de relación entre dos o más variables se conoce como el análisis de correlación, para representar esta relación se utiliza un modelo matemático que estima el valor de una variable basándonos en el valor de otra.

El análisis de correlación es el conjunto de técnicas estadísticas empleado para medir la intensidad de la asociación entre dos variables, como son los datos reales tomados en campo sobre la presencia/ausencia de deslizamientos, y los datos obtenidos mediante los

modelos creados; el principal objetivo del análisis de correlación consiste en determinar que tan intensa es la relación entre dos variables.

- **Cálculo del coeficiente de determinación múltiple.**

Obteniendo el coeficiente de correlación permite describir la intensidad de la relación entre los dos conjuntos de variables de los datos reales y los valores predichos. El valor del coeficiente de correlación puede tomar valores desde menos uno hasta uno, indicando que mientras más cercano a uno sea el valor del coeficiente de correlación, en cualquier dirección, más fuerte será la asociación entre las dos variables.

Tabla 3.10. Valores del coeficiente de correlación de cada modelo.

COEFICIENTE DE CORRELACIÓN					
Modelo1 Fuzzy con 60 percentil	Modelo2 Fuzzy con 80 percentil	Modelo3 Fuzzy con el 95% de datos al 60 percentil	Modelo4 Fuzzy con el 95% de datos al 80 percentil	Modelo5 MARS	Modelo6 Mínimos Cuadrados
0.574	0.653	0.739	0.712	0.611	0.361

De acuerdo a este análisis, como se puede observar el coeficiente de determinación múltiple para los modelos 3 y 4, es mayor a los demás por tanto la asociación de los datos reales y predichos en estos modelos se asemejan más a la realidad del fenómeno.

3.4.5. Inferencia Estadística. Prueba de Hipótesis.

Cada modelo planteado, da una estimación sobre el comportamiento de los movimientos de masa en el área de estudio, partiendo de una muestra de puntos.

La prueba de hipótesis consiste en hacer una suposición, con respecto a los parámetros de la población, con cierto grado de libertad, para conocer si la suposición es aceptada o rechazada.

Los grados de libertad se los define como el número de valores que se puede escoger libremente; para conocer si los modelos son significativos, se analizará si existe evidencia estadística que indique que los valores de las variables independientes tomadas en conjunto explican significativamente la variabilidad observada P (probabilidad de ocurrencia de deslizamientos), en otras palabras que tan bien explica el modelo (M) el comportamiento de la variable susceptibilidad del terreno a movimientos en masa.

Los modelos se someten a una prueba de hipótesis global usando la distribución F (Fisher), la misma que permite analizar la igualdad de las varianzas de dos o más parámetros poblacionales, procedimiento conocido como análisis de varianza, Tabla 3.11.

Tabla 3.11. Pruebas de Hipótesis

Prueba sobre	Hipótesis Nula	Suposiciones	Estadístico de Prueba
La media	$m = m_0$	σ^2 conocida	Normal
	$m = m_0$	σ^2 desconocida	T
Igualdad de medias	$m_1 = m_2$	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ conocidas	Normal
	$m_1 = m_2$	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ desconocidas	T
	$m_1 = m_2$	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ conocidas	T
La varianza	$\sigma^2 = \sigma_0^2$	dist. Normal, N pequeña	χ^2
	$\sigma^2 = \sigma_0^2$	N grande	Normal
Igualdad de dos varianzas	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$		F
Una proporción	$p = p_0$		Normal
Igualdad de dos proporciones	$p_1 = p_2$		Normal

Se prueba los coeficientes debido a que si estos fueran 0, en la ecuación planteada el producto de 0 por cualquiera sea el valor que tome la variable independiente es 0, esto significaría que la variable independiente no interviene en el modelo, es decir no tiene relación con la susceptibilidad a movimientos en masa. De acuerdo a esto las hipótesis planteadas para probar el modelo globalmente son:

$H_0 : = \sigma^2$ *Hipótesis nula: la desviación del modelo con respecto a su media, se asemeja a la probabilidad de ocurrencia del fenómeno de deslizamiento*

$H_1 : \neq \sigma^2$ *Hipótesis alternativa: “la desviación del fenómeno de deslizamientos con respecto a su media, no depende del modelo planteado”*

Se trata de probar dos poblaciones independientes tienen la misma variabilidad, para esto se tiene un procedimiento estadístico basado en la razón de dos varianzas de muestra.

Si dos poblaciones se distribuyen en forma normal, entonces el cociente de sus varianzas muestrales, sigue una distribución F, la cual depende de dos conjuntos de grados de libertad.

La estadística de prueba F para probar la igualdad entre dos varianzas será:

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}$$

Los valores críticos permiten identificar el área de rechazo o aprobación de la hipótesis planteada, estos valores se les conoce como valor crítico extremo inferior (*VCI*), figura 3.12, y superior (*VCS*) de la distribución *F*, siendo:

$$Vcs = Fs(n_1-1)(n_2-1), \quad = \quad 2.2$$

$$Vci = Fi(n_1-1)(n_2-1) = 1/Fs(n_2-1)(n_1-1), \quad = \quad 0.27$$

donde: n_1-1 y n_2-1 = grados de libertad de los muestras 1 y 2.

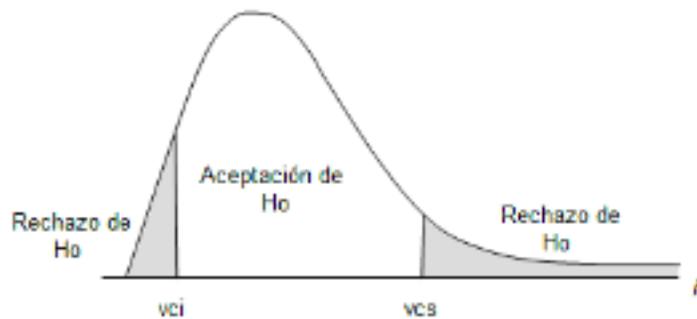


Figura 3.21. Estadístico *F*.

Tabla 3.12. Valor del Estadístico *F* de cada modelo.

VALOR DEL ESTADÍSTICO <i>F</i>					
Modelo1 Fuzzy con 60 percentil	Modelo2 Fuzzy con 80 percentil	Modelo3 Fuzzy con el 95% de datos al 60 percentil	Modelo4 Fuzzy con el 95% de datos al 80 percentil	Modelo5 MARS	Modelo6 Mínimos Cuadrados
0.3945	0.6338	0.8726	0.6442	1.8107	0.5945

Al observar los valores de todos los modelos, se puede evidenciar que la hipótesis nula es aceptada, es decir que todos los modelos no poseen variabilidad con respecto a la ocurrencia del fenómeno de deslizamientos.

3.4.4. Análisis Estadístico.

De acuerdo al análisis estadístico, todos los modelos muestran a su forma, la realidad de ocurrencia del fenómeno de deslizamientos, ya que al plantear la hipótesis, cada modelo muestra que su variabilidad es semejante a los datos reales tomados en campo

Esto permite conocer que los diferentes modelos de deslizamientos, muestran semejanza con la realidad, pero no que son los más indicados, para saber qué modelo representa de mejor forma la realidad es necesario realizar un proceso estadístico que muestre el grado de confiabilidad de cada modelo con respecto a la realidad de ocurrencia del fenómeno de deslizamientos.

3.4.5. Resultados del Proceso Estadístico.

El modelo 3, que representa utilizar *fuzzy* y con el 95% de los datos, muestra de mejor forma la realidad del fenómeno de deslizamientos, utiliza todas las variables que explican de mejor o menor forma, el comportamiento del fenómeno según cada evento planteado anteriormente.

3.5. Modelo de deslizamientos.

3.5.1 Modelos predictivos.

La R^2 ajustada es una estimación mediante validación cruzada ("cross-validation") de cómo se comportaría el modelo con datos nuevos.

La mejor estrategia para conocer cómo se comporta el modelo, con datos nuevos es dividir la muestra original en dos y comparar los modelos resultantes. Otra posibilidad es utilizar la fórmula de Stein:

$$R^2_{ajustada} = 1 - \left[\left(\frac{n-1}{n-k-1} \right) \left(\frac{n-2}{n-k-2} \right) \left(\frac{n+1}{n} \right) \right] (1 - R^2);$$

donde n es el número de casos y k el número de predictores (variables independientes).

Tabla 3.13. Valor de ajuste de cada modelo.

Modelos Predictivos					
Modelo1 Fuzzy con 60 percentil	Modelo2 Fuzzy con 80 percentil	Modelo3 Fuzzy con el 95% de datos al 60 percentil	Modelo4 Fuzzy con el 95% de datos al 80 percentil	Modelo5 MARS	Modelo6 Mínimos Cuadrados
0.200	0.315	0.459	0.412	0.252	0.145

3.5.2. Comparación de configuraciones: Procrustes.

La medida más empleada para evaluar lo bien o mal que una determinada configuración reproduce los datos originales es el stress, que se define como:

$$stress = \sum [d_{ij} - f(\delta_{ij})]^2$$

En esta fórmula d_{ij} representa las distancias reproducidas (escaladas), δ_{ij} (delta ij) son las distancias observadas y $f(\delta_{ij})$ indica una transformación no-métrica de los datos observados (originales) que reproduce la ordenación general de las distancias originales en un espacio de pocas dimensiones.

Cuanto menor el stress, mejor es el ajuste entre la matriz de distancias reproducidas y la matriz de distancias observadas.

La reducción de dimensiones que realizan PROXSCAL (SPSS >10) y métodos afines refleja las relaciones espaciales entre los objetos en un espacio de referencia común

Las distancias (o proximidades) a partir de las que se construyen los mapas pueden ser distancias geodésicas, distancias florísticas, distancias temporales, distancias de ocurrencia de un evento... Una superposición perfecta entre dos mapas supone una misma relación espaciales en los dos espacios de referencia: por ejemplo: similitud florística y distancias geodésicas

El ajuste entre mapas se calcula con el método de Procrustes, que es un método de superposición de mapas de objetos. Figura 3.22

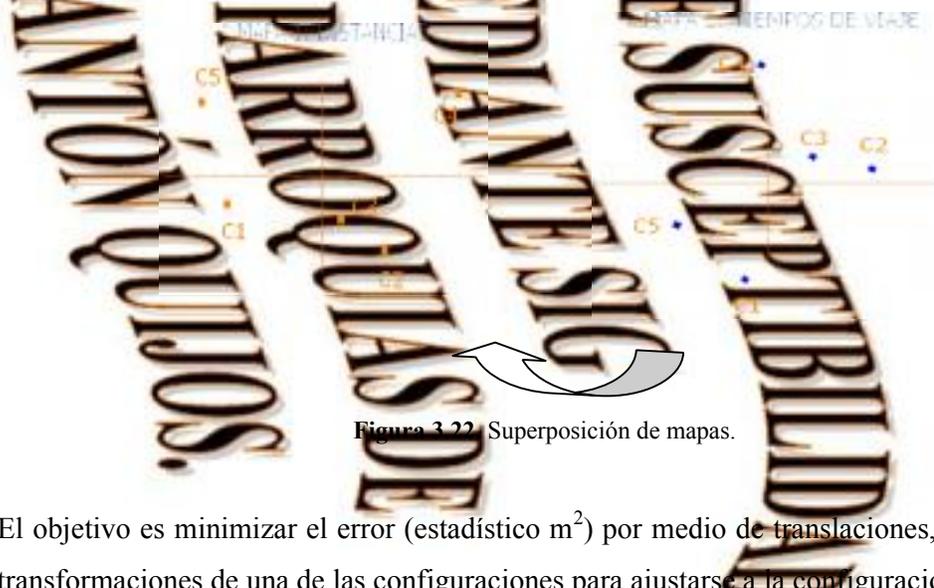


Figura 3.22 Superposición de mapas.

El objetivo es minimizar el error (estadístico m^2) por medio de translaciones, rotaciones y transformaciones de una de las configuraciones para ajustarse a la configuración objetivo.

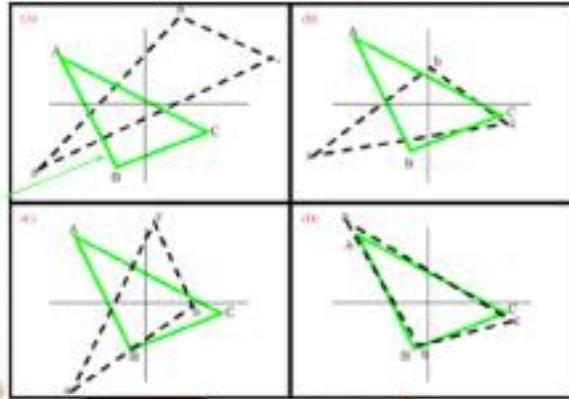


Figura 3.23. Traslaciones y rotaciones para minimizar el error estadístico.

$m^2=0$ significa un ajuste perfecto entre las dos configuraciones, para cada dato se tendrá un vector de error, para estimar la significación del estadístico m^2 los valores originales se comparan con la distribución de m^2 obtenida al permutar aleatoriamente (n veces según sea el caso) los elementos de una de las matrices. Figura 3.24.



Figura 3.24. Comparación de distribuciones.

Para los modelos obtenidos se tiene las siguientes medidas de ajuste y stress:

Tabla 3.14. Tabla de resultados del análisis de procrustes.

Stress bruto normalizado	.0358
Stress-I	.1892(a)
Stress-II	.4201(a)
S-Stress	.0680(b)
Dispersión explicada (D.A.F.)	.9642
Coefficiente de congruencia de Tucker	.9819

El stress bruto normalizado brinda información de la bondad de ajuste del modelo, Kruskal³⁸, en sus análisis, estableció una clasificación para los diferentes valores de stress, siendo estos:

³⁸ Procedimiento implementado en SPSS mediante el programa PROXCAL

- 0,2 → Pobre
- 0,1 → Aceptable
- 0,05 → Bueno
- 0,025 → Excelente
- 0,0 → Perfecto

El valor del stress al ser bajo, muestra un mejor ajuste entre la matriz de distancias reproducidas y la matriz de distancias observadas. Es decir posee mejor ajuste entre los datos del modelo y los datos reales del terreno, analizando la susceptibilidad a deslizamientos.

Dando como resultado un grupo de los modelos 1,2,3,4 (modelos utilizando lógica difusa) y mars, los cuales se encuentran más cerca de la realidad, Figura 3.25) y más alejado de la realidad de ocurrencia del fenómeno el método de los mínimos cuadrados.

Esto permite determinar que modelos representan de mejor forma la realidad del evento.

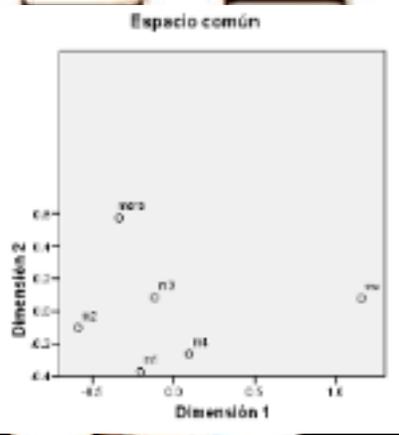


Figura 3.25. Puntos de objeto de los modelos obtenidos.

3.5.3. Implementación de Modelo Obtenido.

De acuerdo a los diferentes análisis estadísticos el modelo 3 y 4 será implementado para la realización del proyecto, siendo estos los que representan de forma más aproximada la realidad del evento estudiado. Figura 3.26.

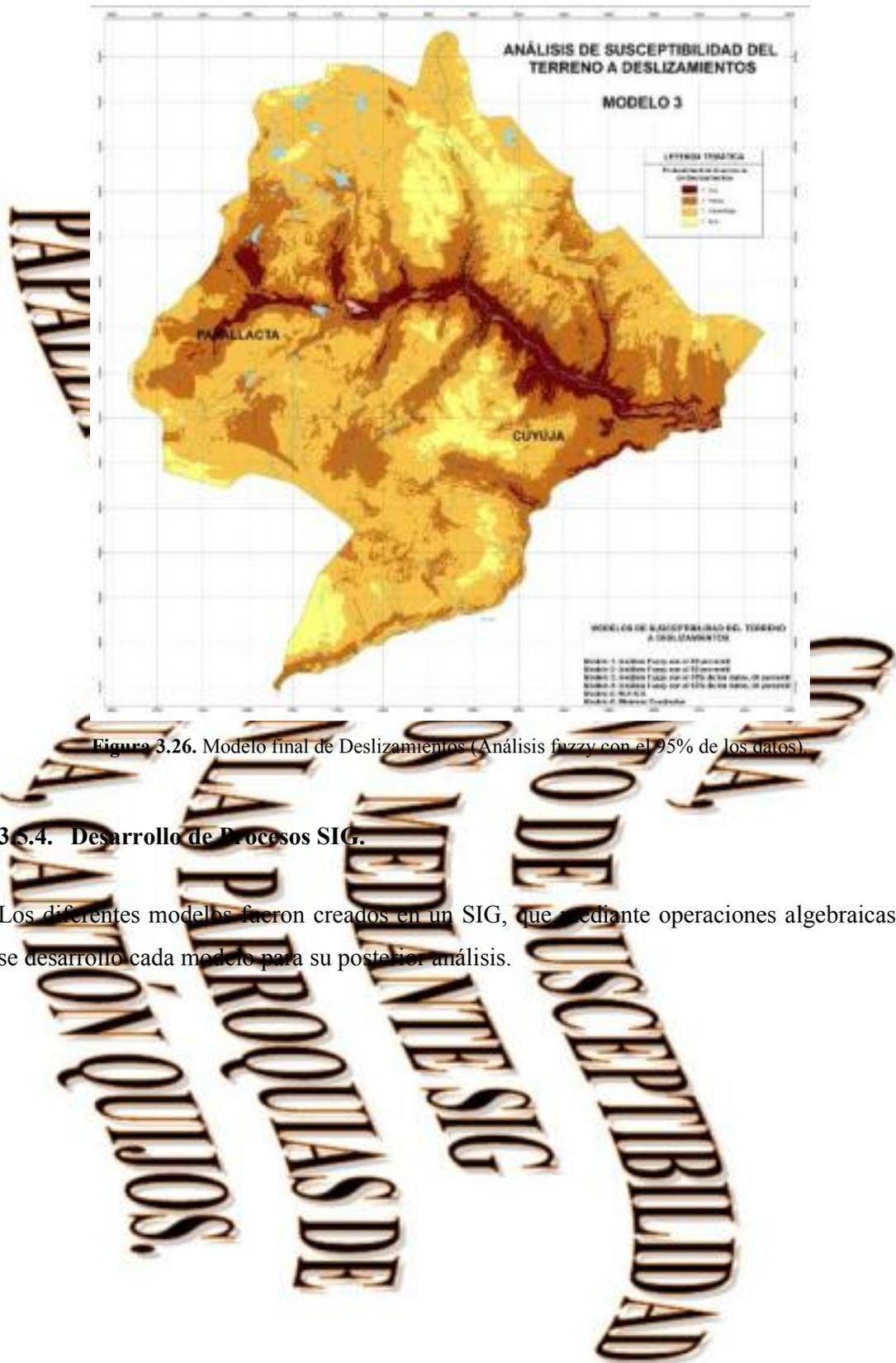


Figura 3.26. Modelo final de Deslizamientos (Análisis fuzzy con el 95% de los datos).

3.5.4. Desarrollo de Procesos SIG.

Los diferentes modelos fueron creados en un SIG, que mediante operaciones algebraicas, se desarrolló cada modelo para su posterior análisis.

Capítulo 4. RESULTADOS

De acuerdo a los diferentes modelos obtenidos, se ha planteado ecuaciones que permitan ser desarrolladas en un programa SIG, en la tabla 4.1 se presenta los modelos realizados con sus correspondientes ecuaciones.

Tabla 4.1. Resumen de formulas para la obtención de los modelos de susceptibilidad del terreno a deslizamientos.

MODELO	PROCESO SIG
1	$Y = pend_grd60 + presc60 + dst_fallas60 + dst_antr60 + dst_hidr60 + ind_rst60 + ind_pri60;$
2	$Y = pend_grd80 + presc80 + dst_fallas80 + dst_antr80 + dst_hidr80 + ind_rst80 + ind_pri80;$
3	$Y = fpend_grd60 + fpresc60 + fdst_fallas60 + fdst_antr60 + fdst_hidr60 + find_rst60 + find_pri60;$
4	$Y = fpend_grd80 + fpresc80 + fdst_fallas80 + fdst_antr80 + fdst_hidr80 + find_rst80 + find_pri80;$
5	$BF3 = \max(0, DSTFAL - 683.520);$ $BF6 = \max(0, DSTHID - 230.490);$ $BF8 = \max(0, DSTHID - 176.780);$ $BF10 = \max(0, DSTHID - 291.550);$ $BF14 = \max(0, INDRST - 0.300);$ $0.577 - .263154E-03 * BF3 - 0.019 * BF6 + 0.012 * BF8 + 0.007 * BF10 - 0.590 * BF14;$
6	$Y = 0.685 + 0.002 (Pend) - 0.055 (Indp) - 0.550 (Indr)$

El análisis estadístico del capítulo anterior, permitió conocer qué modelo se ajusta estadísticamente mejor a la realidad del terreno, esto se puede evidenciar en la tabla 4.2, la misma que muestra un ranking de los modelos obtenidos desde el mejor modelo, hasta el que presenta una relación baja con la realidad.

Al analizar cada modelo con la realidad del terreno, se verifico en las salidas de campo, que existen pequeñas inconsistencias con ciertas partes del área de estudio, esto se debe a la distribución de los puntos de muestra, los análisis de cada modelo se realizaron en las conclusiones del estudio.

Tabla 2. Análisis estadístico de modelos

<i>ORDEN DE IMPORTANCIA</i>	<i>MODELOS</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>Error</i>	<i>Coef de correlacion</i>	<i>Estadístico f</i>	<i>R2</i>
1	Modelo3	Fuzzy con el 95% de datos al 60 percentil	0.559	0.739	0.8726	0.459
2	Modelo4	Fuzzy con el 95% de datos al 80 percentil	0.583	0.712	0.6442	0.412
3	Modelo2	Fuzzy con 80 percentil	0.629	0.653	0.6338	0.315
4	Modelo5	MARS	0.656	0.611	1.8107	0.252
5	Modelo1	Fuzzy con 60 percentil	0.68	0.574	0.3945	0.2
6	Modelo6	Regresión	0.768	0.381	0.5945	0.145

Los modelos obtenidos mediante los diferentes análisis realizados son:

Fuzzy con el 95% de datos al 60 percentil

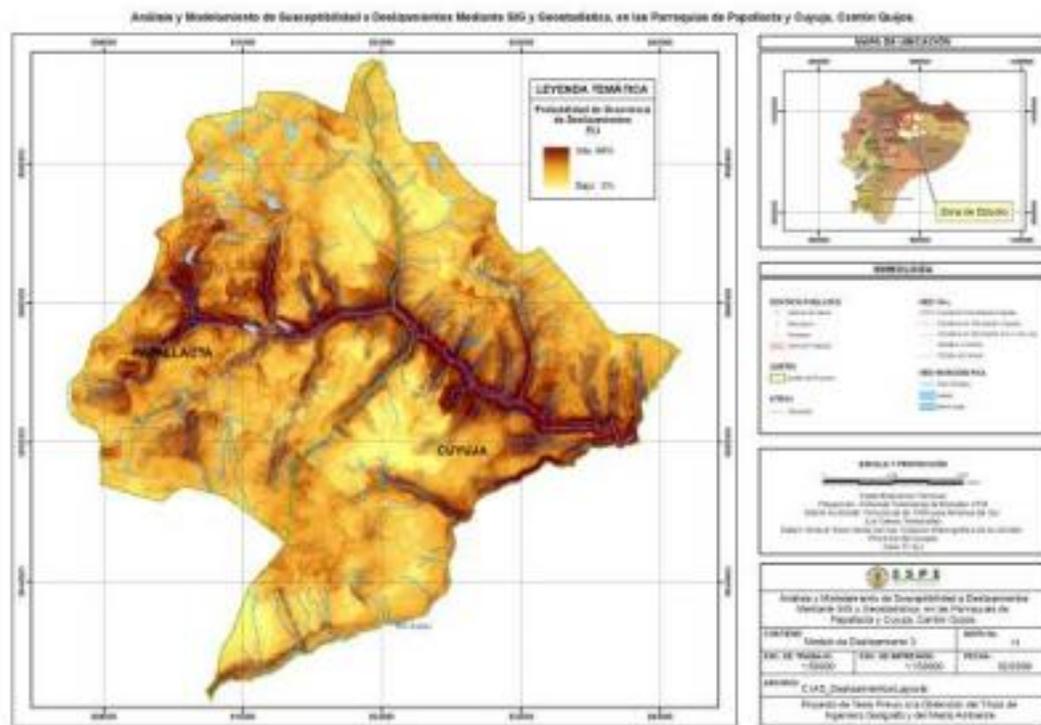


Figura 4.1. Modelo 3 (Fuzzy con el 95% de datos al 60 percentil)

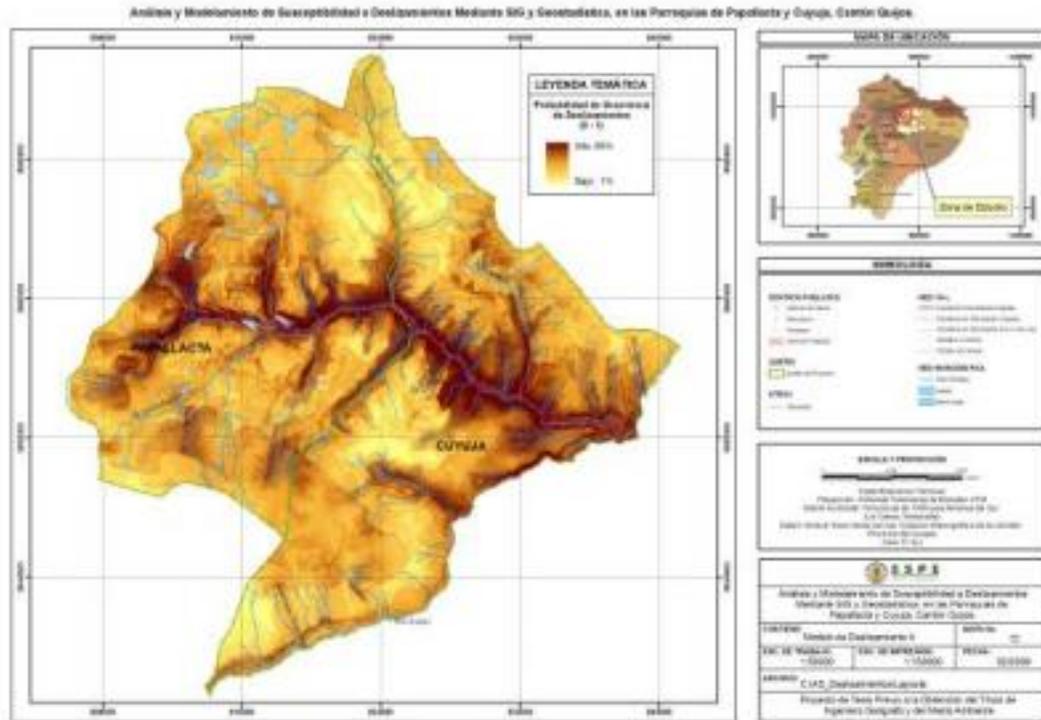


Figura 4.2. Modelo 4 (Fuzzy con el 95% de datos al 80 percentil)

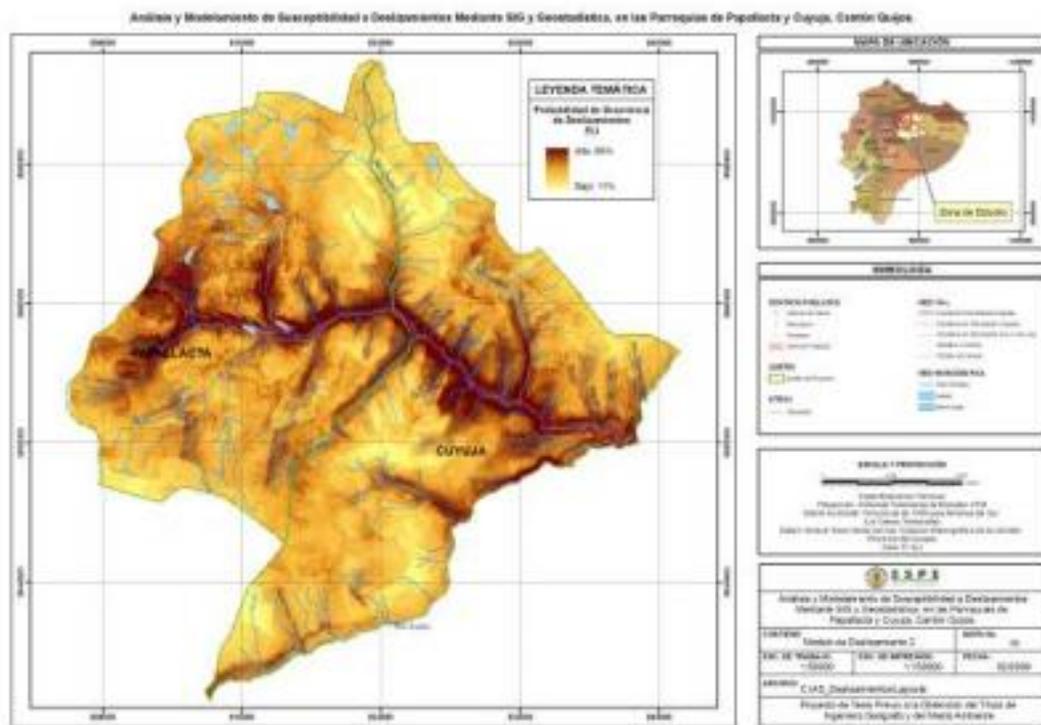


Figura 4.3. Modelo 2 (Fuzzy al 80 percentil)

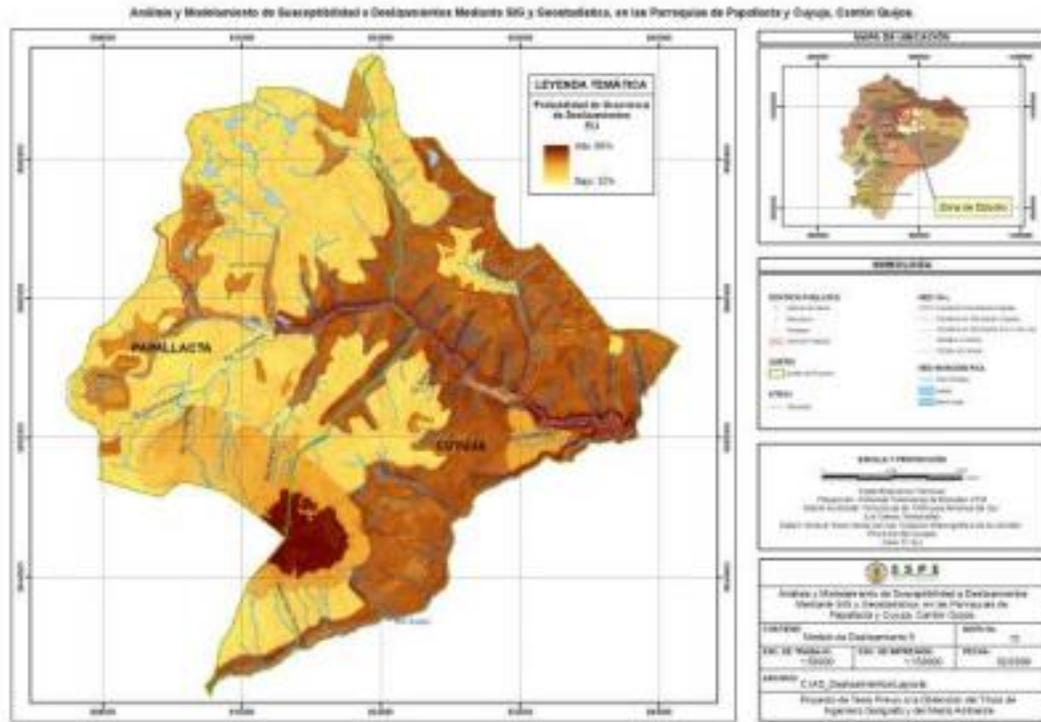


Figura 4.4. Modelo 3 (MARS)

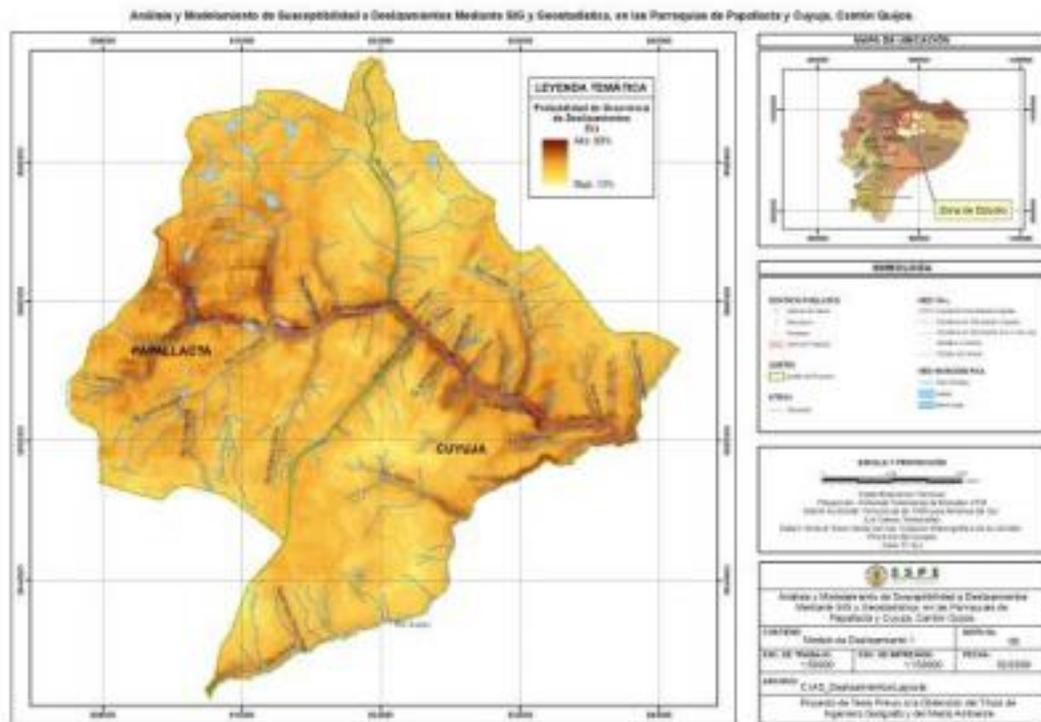


Figura 4.5. Modelo 1 (Fuzzy al 60 percentil)

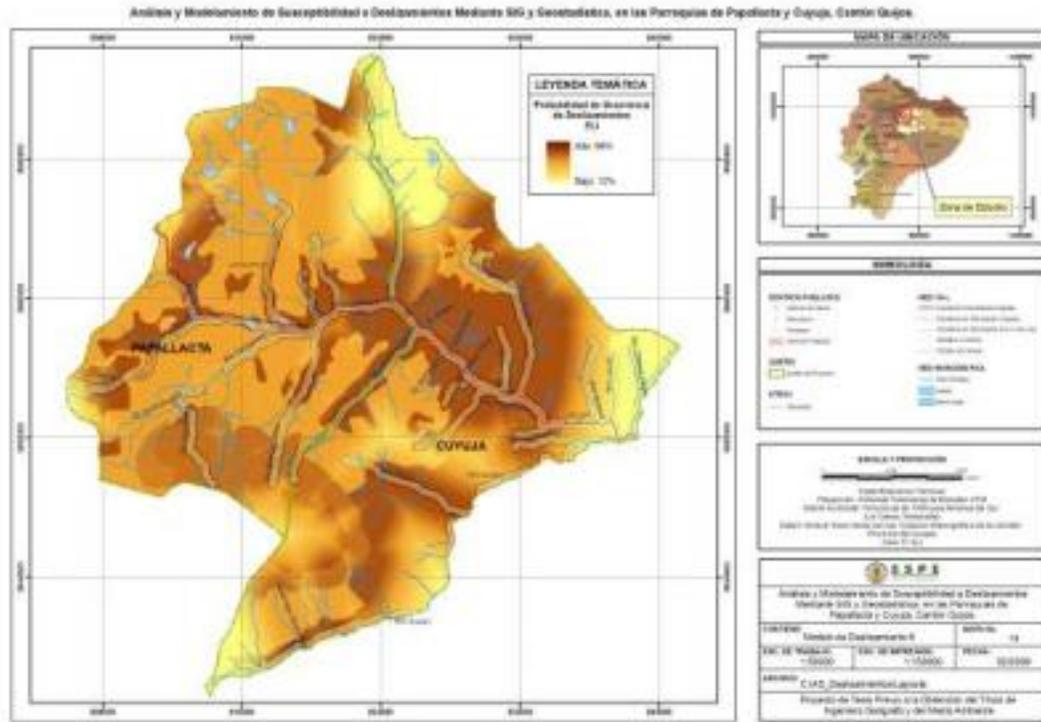


Figura 4.6. Modelo 6 (Regresión múltiple)

SIGMA,
 MENTO DE SUSCEPTIBILIDAD
 MEDIANTE SIG
 LAS PARROQUIAS DE
 CANTÓN QUIJOS.

CONCLUSIONES.

- Desde el punto de vista económico y del análisis de riesgo, las inestabilidades no suelen representar eventos catastróficos si se consideran como procesos aislados; sin embargo, su alta frecuencia hace que el estudio sea sumamente importante ya que, en conjunto, representan un coste anual elevado en destrucción de infraestructuras de comunicación, edificaciones y en pérdidas humanas.
- Las zonas de alta susceptibilidad a movimientos en masa determinada a través del modelamiento SIG, están distribuidas en casi toda la cuenca del Río Papallacta; sin embargo existe una mayor concentración desde la ciudad de Papallacta hasta la población de San Víctor a ambos lados de la vía, por tanto la construcción de vías de comunicación sin una correcta planificación, corte de taludes, sumado a los demás factores físicos y climáticos, son un detonante para que se produzcan movimientos en masa.
- El índice de protección de la cobertura vegetal presentado en el estudio, demuestra que la conversión de ocupación del suelo y cobertura vegetal natural, por pastos para ganadería contribuyen y aceleran los procesos de ocurrencia de movimientos en masa, especialmente en taludes y cauces de quebradas.
- El modelo probabilístico de deslizamientos ha sido desarrollado en base a las condiciones del área en particular, e información obtenida, por tanto áreas con características similares, pueden tener diferente grado de susceptibilidad debido a pequeñas diferencias tanto en las variables como en factores utilizados para el estudio. Los modelos obtenidos poseen una aplicación en el ámbito local, sin embargo la utilización de la metodología fuzzy engloba el estudio de varios fenómenos, presentándose como una técnica alternativa para el análisis de los fenómenos naturales, presencias de especies, entre otros.
- Expuestos los resultados del análisis y pruebas realizadas con los modelos de deslizamiento, la aplicación de metodología FUZZY obtuvo mejores resultados, que métodos utilizados anteriormente en estudios similares en el área de estudio, como el análisis mediante mínimos cuadrados.

- Los modelos de susceptibilidad del terreno a deslizamientos cuya ecuación de estimación fue ajustada a la función seno², representan los modelos más aproximados a la realidad del fenómeno en el terreno.

- Al ser el modelo probabilístico de mínimos cuadrados una herramienta generalmente utilizada para la predicción de fenómenos, fue muy importante en este estudio compararla con la metodología Fuzzy utilizada, obteniendo con esta última mejores resultados en la predicción de deslizamientos.

- Es necesario verificar en campo el comportamiento de cada modelo, en toda el área de estudio, solo los sectores de la vía Papallacta-Daeza, recursos hídricos principales (río Papallacta, río Quijos) y zonas cercanas a los centros poblados, pudo ser comprobado en campo, no así sectores cercanos al Antisana, por motivos de tiempo y recursos. Esto se puede evidenciar en la figura 6, donde el sector señalado no muestra la realidad del terreno. Para mejorar el modelo es necesario densificar puntos de muestra en este sector, que permita conocer de mejor forma el comportamiento de cada variable en esta zona.

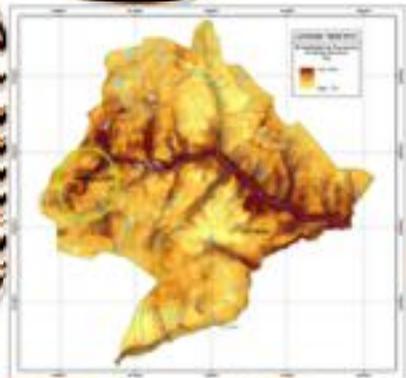


Figura 6. Sector a ser verificado en campo.

- Los modelos Fuzzy se asemejan de mejor forma a la realidad del terreno, mostrando zonas susceptibles a movimientos de masa en los sectores de las vías, esto se debe a la intervención antrópica, que causa inestabilidad de taludes y pérdida de la cobertura vegetal. Como se puede observar en la fotografía, en la vía Papallacta-Daeza cerca al sector sur-este de la laguna Papallacta, la inestabilidad del talud es evidente, poniendo en peligro la torre eléctrica que se puede observar en la esquina superior derecha, lo que afectaría la línea eléctrica del sector, poniendo en riesgo el tránsito y personas que circulan por el lugar.



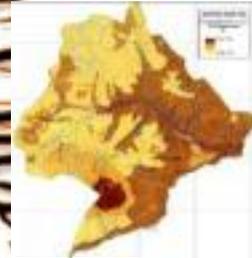
Figura 7. Foto particular en salida de campo.

- El pastoreo es otra causa de la inestabilidad de los taludes, como se puede evidenciar en la zona central de la fotografía (figura 7), ubicada en la vía Papallacta-Baeza, (oeste-este) aproximadamente a 300 metros, del río Chalpi Chico, el terreno presenta inestabilidad por causa del pastoreo evidenciando los modelos anteriormente presentados como esta zona de inestabilidad representativa.



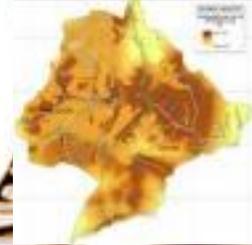
Figura 8. Foto particular en salida de campo.

- El modelo realizado en MARS, muestra de mejor forma la geología de la zona, en estudios posteriores se puede comprobar si utilizando la misma metodología, y el mismo número de puntos, en otro sector de la cordillera, da los mismos resultados, obteniendo así un mapa geológico preliminar, como ayuda de campo.



Modelo MARS

- Mediante la regresión múltiple, el modelo muestra de mejor forma la susceptibilidad de deslizamientos de acuerdo a la cobertura vegetal, esto debe ser verificado en campo, mediante la toma de datos nuevos en zonas que permitan conocer mejor la realidad del terreno.



Modelo R Múltiple

- Los modelos Fuzzy, muestran el comportamiento de todas las variables con relación a la ocurrencia del fenómeno de deslizamientos, mostrando resultados más confiables, tanto matemáticamente (mediante las pruebas estadísticas), como ciertos sectores que fueron verificados en campo.
- La metodología Fuzzy se presenta como una técnica alternativa y más eficiente en el modelamiento de deslizamientos de la zona estudiada.

4.2. Recomendaciones

- El presente estudio y estudios similares en las parroquias de Papallacta y Cuyuja deben ser tomados en cuenta para el ordenamiento territorial, planificación y construcción de nuevos proyectos en la zona.
- En la formulación e implementación de proyectos viales, hidroeléctricos, canteras, entre otros, se debe incluir estudios de riesgos para prevenir y evitar posibles desastres y los costos que conllevan la mitigación, restauración y recuperación del área afectada.
- Con los resultados obtenidos se hace necesario en todo proyecto en el cual se utilice un modelo probabilístico, validar dicho modelo para conocer cómo se comporta con un conjunto de datos nuevos y determinar su verdadero ajuste a la realidad del área de estudio.
- Como se ha comprobado en este estudio que en la vía Papallacta - Baeza existe gran cantidad de deslizamientos, por lo que se recomienda estabilizar los taludes en las zonas de mayor susceptibilidad de deslizamientos.
- Limitar la actividad ganadera a zonas de susceptibilidad media, ya que dicha actividad contribuye a la inestabilidad del terreno.

ANEXOS

A1. Hoja de Datos.

ID	X	Y	PRECIP	PEND	INDPRT	INDRST	DSTANT	DSTHID	DSTFAL
1	811006	9961113	2506.740	0.000	0.430	0.800	905.880	90.140	596.660
2	814157	9957536	1960.310	33.430	0.850	0.800	1535.010	1176.860	700.000
3	815812	9957535	1586.050	21.460	0.850	0.800	1217.580	956.880	532.540
4	818196	9957614	1324.160	22.380	0.350	0.800	403.110	254.950	599.330
5	817443	9958839	328.180	34.300	0.550	0.800	442.800	316.230	503.590
6	819509	9957403	1283.980	25.630	0.850	0.800	400.000	530.330	698.570
7	817074	9957065	1614.560	34.420	0.350	0.800	41.000	325.000	60.000
8	817439	9964064	1735.560	18.860	0.850	0.800	921.950	632.460	340.000
9	822027	9959193	1299.140	0.000	0.550	0.100	25.000	25.000	1110.860
10	820799	9952548	1928.180	24.340	0.850	0.800	4149.470	276.130	551.720
11	816611	9965811	1840.590	36.700	0.430	0.800	2841.520	1686.160	416.170
12	815321	9955711	1792.990	24.730	0.430	0.800	3095.260	291.550	134.160
13	823541	9966641	1484.250	38.210	0.850	0.800	6739.900	638.850	3480.060
14	828455	9956957	1302.520	21.170	0.350	0.100	357.950	424.260	184.390
15	827509	9957849	1287.510	32.880	0.350	0.200	395.280	469.710	644.050
16	830403	9955239	1360.410	29.310	0.550	0.100	237.170	425.730	683.520
17	825544	9958506	1082.450	38.000	0.350	0.200	325.260	246.220	82.460
18	825607	9958384	1281.880	33.650	0.350	0.200	335.410	200.000	134.160
19	817888	9957055	1242.560	35.480	0.850	0.800	794.510	509.900	560.360
20	812192	9960151	2464.980	14.660	0.850	0.800	460.980	570.640	493.960
21	812818	9955508	1973.440	0.000	0.850	0.800	3325.000	876.430	628.010
22	828314	9956428	1305.310	0.000	0.000	0.100	117.800	2.000	116.620
23	817062	9963976	1762.700	26.820	0.430	0.800	985.200	980.110	690.510
24	813276	9958286	2277.000	16.740	0.850	0.800	951.970	325.000	203.960
25	831344	9955824	1405.960	35.060	0.550	0.200	316.230	300.000	243.310
26	820408	9964925	1374.050	0.000	0.430	0.800	3175.690	1500.420	373.630
27	822285	9953689	1431.370	16.630	0.550	0.200	218.200	265.750	178.890
28	816978	9962912	1731.930	47.250	0.430	0.800	608.790	838.530	577.230
29	812552	9966808	2159.340	25.340	0.430	0.800	1651.700	5668.390	726.910
30	831567	9954191	1407.010	0.000	0.000	0.400	100.000	2.000	178.890
31	829686	9954834	1349.470	9.240	0.350	0.400	1.000	158.110	20.000
32	817671	9959272	1371.770	0.000	0.550	0.300	25.000	2.000	777.950
33	823277	9953346	1473.220	0.000	0.550	0.100	50.000	2.000	252.980
34	811834	9961574	2360.250	0.000	0.430	0.300	25.000	375.000	809.940
35	811108	9960990	2505.820	20.050	0.430	0.800	919.240	70.000	556.060
36	811676	9960486	2497.700	28.650	0.430	0.800	972.430	630.970	40.000
37	812370	9959525	2542.490	21.400	0.850	0.800	340.040	570.090	100.000
38	812468	9959202	2570.940	13.940	0.850	0.300	275.310	645.170	164.920
39	812478	9959209	2570.940	13.160	0.850	0.300	261.010	610.330	164.920
40	816142	9957716	1530.060	22.510	0.550	0.800	976.280	866.750	662.420

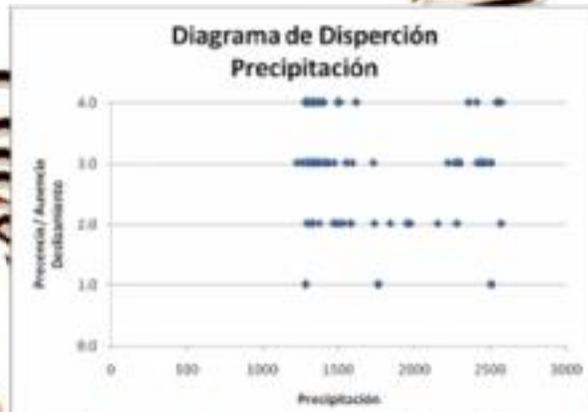
ID	X	Y	PRECIP	PEND	INDPRT	INDRST	DSTANT	DSTHID	DSTFAL
41	816479	9957694	1463.980	0.000	0.000	0.900	851.470	585.770	560.000
42	817483	9958736	1329.880	27.190	0.550	0.800	364.010	320.160	538.520
43	817485	9958741	1329.880	27.190	0.550	0.800	364.010	320.160	538.520
44	817431	9958924	1338.130	29.040	0.550	0.300	388.910	265.750	500.000
45	817280	9959920	1494.580	42.000	0.350	0.300	375.000	254.950	316.230
46	821931	9959096	1298.190	38.790	0.350	0.100	50.000	111.800	1176.440
47	827391	9956545	1291.630	30.660	0.350	0.200	459.620	381.610	377.360
48	830122	9954392	1362.820	9.070	0.550	0.400	150.000	50.000	44.720
49	831015	9953804	1297.150	25.580	0.350	0.200	381.610	425.000	393.950
50	831160	9953726	1402.450	31.330	0.350	0.200	403.110	427.200	402.490
51	812736	9959585	2448.490	19.280	0.850	0.800	1.000	213.600	372.020
53	817742	9959111	1342.480	26.010	0.350	0.300	35.360	90.140	861.630
54	817743	9959115	1342.480	26.010	0.350	0.300	35.360	90.140	869.250
55	817690	9959298	1372.380	0.000	0.350	0.300	25.000	2.000	785.880
56	822189	9959471	1303.390	29.750	0.550	0.100	1.000	206.160	1121.610
57	827651	9956920	1292.650	21.060	0.350	0.100	25.000	2.000	100.000
58	830281	9954966	1362.770	35.910	0.350	0.100	1.000	150.000	420.480
59	812092	9961950	2302.400	18.350	0.430	0.300	90.140	783.020	761.050
60	811366	9961364	2438.380	0.000	0.430	0.800	477.620	190.390	912.140
61	811934	9960862	2413.130	10.850	0.430	0.800	530.330	230.490	184.390
62	812628	9959899	2425.130	16.200	0.850	0.800	1.000	230.490	553.170
63	812727	9959576	2454.590	19.280	0.850	0.800	1.000	223.610	372.020
64	816401	9958090	1504.840	16.850	0.350	0.800	352.270	704.450	616.120
65	817539	9960304	1507.240	0.000	0.350	0.300	100.000	35.360	201.000
66	831419	9954101	1403.940	21.810	0.550	0.200	111.800	25.000	44.720
67	831275	9954180	1398.600	0.000	0.000	0.400	1.000	2.000	72.110
68	817891	9959122	1339.190	28.560	0.350	0.800	1.000	176.780	999.600
69	811602	9953892	2277.220	0.000	0.430	0.800	1.000	2600.120	1946.180
70	829100	9955788	1125.330	11.670	0.550	0.400	75.000	200.000	152.320
71	821630	9959384	1505.800	19.750	0.350	0.100	1.000	50.000	1008.960
72	822189	9959483	1303.340	29.750	0.350	0.100	1.000	230.490	1134.550
73	827776	9956847	1294.460	65.370	0.350	0.100	1.000	25.000	89.440
74	811641	9963530	2281.110	0.000	0.430	0.800	1.000	2350.000	1747.340
75	811963	9960846	2412.300	0.000	0.430	0.800	530.330	230.850	141.420
76	812096	9961956	2302.400	17.650	0.430	0.300	55.900	814.320	760.260
77	817671	9959284	1371.770	0.000	0.350	0.300	25.000	2.000	772.010
78	816027	9958291	1591.620	24.710	0.350	0.800	412.310	447.210	572.710
79	819827	9958238	1295.010	15.910	0.550	0.100	1.000	213.600	670.520
80	818153	9959569	1373.130	34.160	0.550	0.800	431.570	348.860	921.300
81	813640	9958684	2264.020	0.000	0.850	0.800	456.210	35.360	412.310
82	822186	9959473	1303.840	29.750	0.350	0.100	1.000	206.160	1121.610
83	817732	9959112	1342.480	26.010	0.350	0.300	35.360	90.140	843.090
84	817530	9960301	1509.580	0.000	0.350	0.300	100.000	35.360	201.000
85	811700	9963120	2291.770	18.420	0.430	0.800	1.000	1926.460	1481.890

ID	X	Y	PRECIP	PEND	INDPRT	INDRST	DSTANT	DSTHID	DSTFAL
86	812343	9963070	2219.800	0.000	0.430	0.300	575.000	1934.230	909.730
87	814403	9949473	1292.320	4.940	0.850	0.500	8716.970	158.110	444.070
88	808680	9953390	1952.840	29.920	0.430	0.800	6980.870	1407.570	649.000
89	820208	9955869	1261.230	21.580	0.850	0.200	781.420	190.390	891.070
90	830847	9951350	1422.560	22.810	0.350	0.200	158.110	878.210	1525.910
91	830345	9950408	1416.190	15.700	0.350	0.200	50.000	1033.500	2342.730

ANÁLISIS Y MODELAMIENTO DE SUSCEPTIBILIDAD
 A DESLIZAMIENTOS MEDIANTE SIG
 GEOESTADÍSTICA EN LAS PARROQUIAS DE
 PAPALLACTA Y CUYUJA, CANTÓN QUIJOS,
 CIGMA,

A2. Diagramas de dispersión.

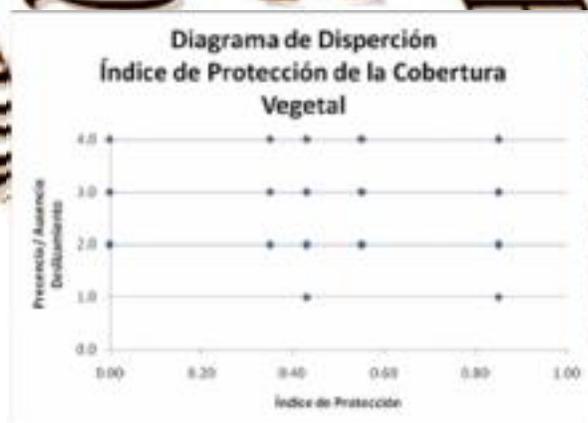
Variable Precipitación:



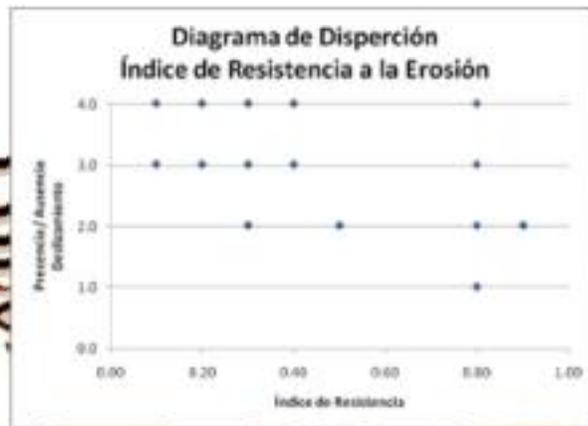
Variable Pendiente:



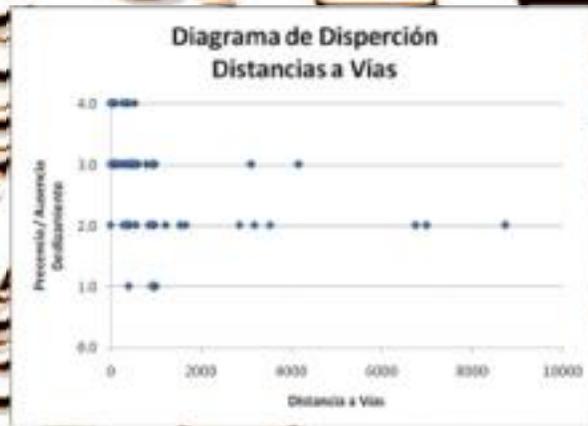
Variable Índice De Protección De La Cobertura Vegetal



Variable Índice de Resistencia de la Roca a la Erosión



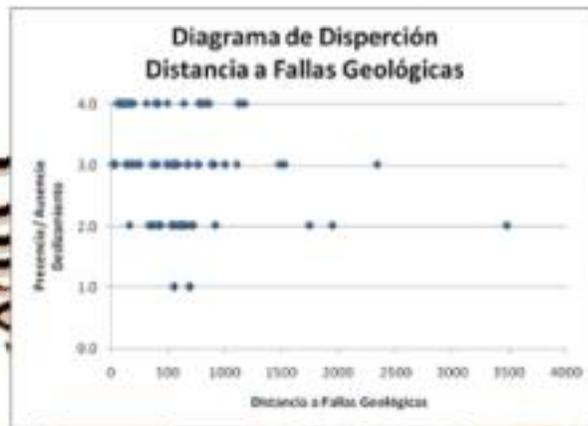
Variable Distancia a Vías de Comunicación



Variable Distancia a Recursos Hídricos



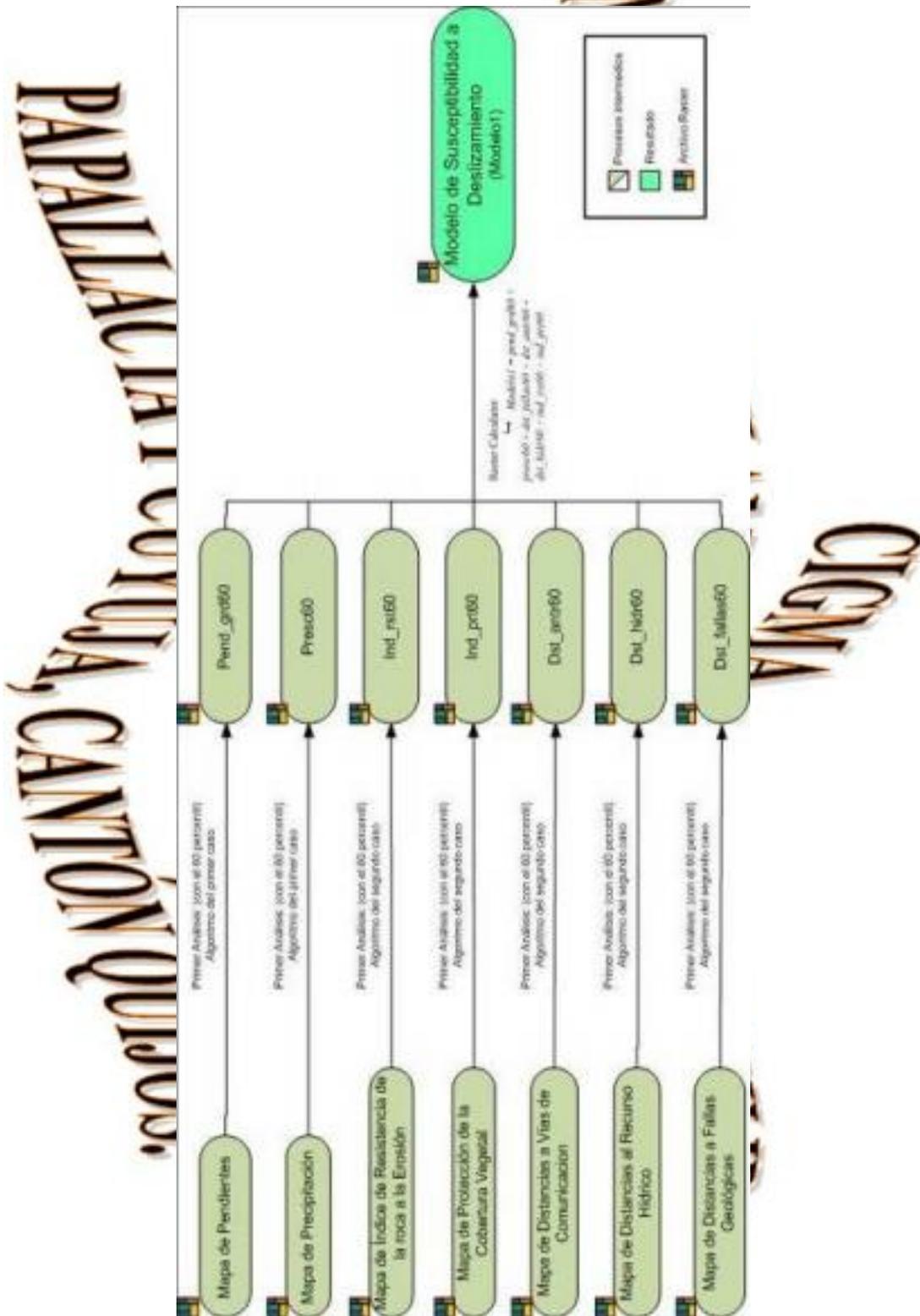
Variable Distancia a Fallas Geológicas



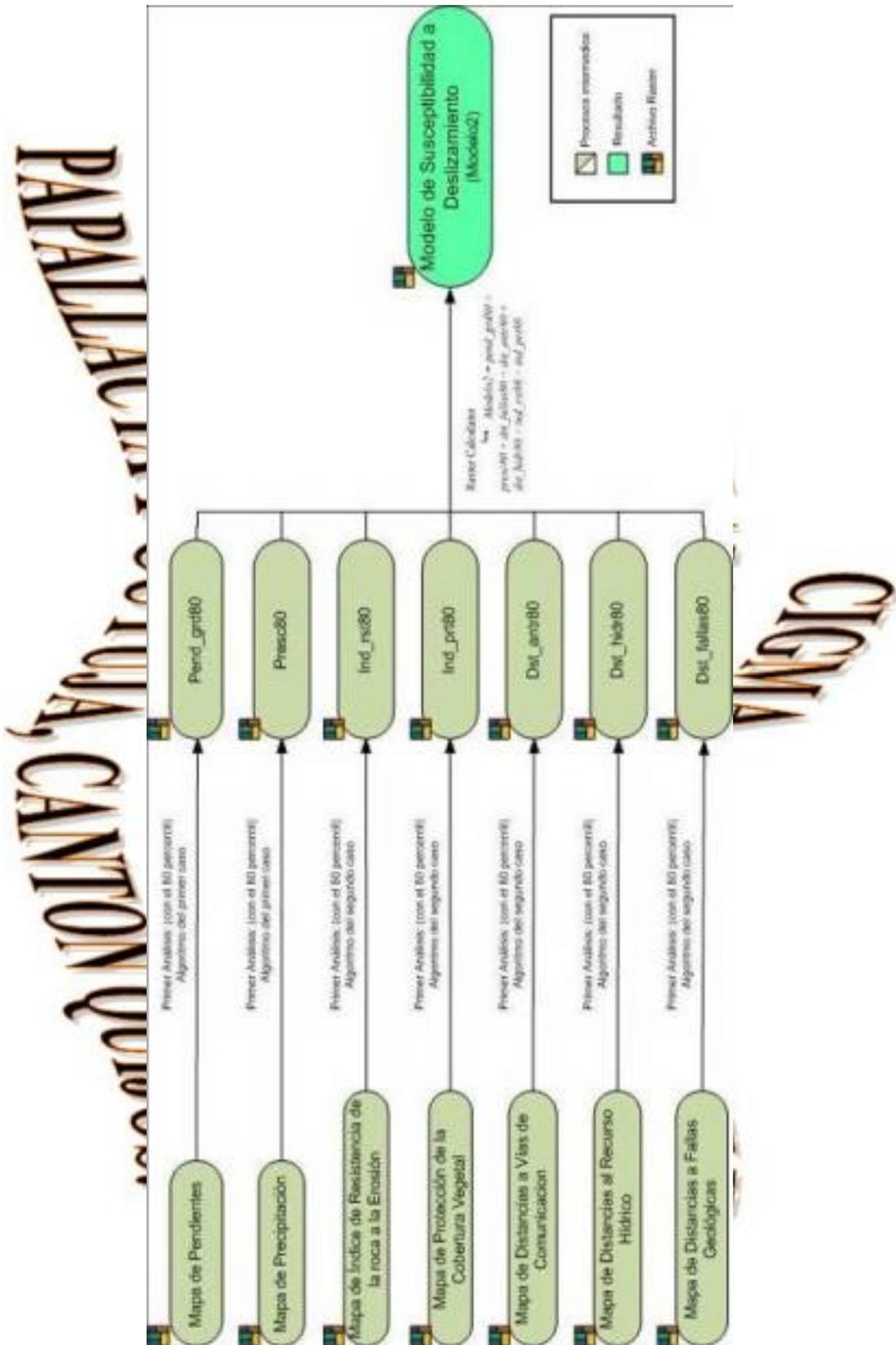
CIGMA,
MODELAMIENTO DE SUSCEPTIBILIDAD
ALIZAMIENTOS MEDIANTE SIG
ADÍSTICA EN LAS PARROQUIAS DE
PAPALLACTA Y CUYUJA, CANTÓN QUIJOS.

A3. Modelos Cartográficos.

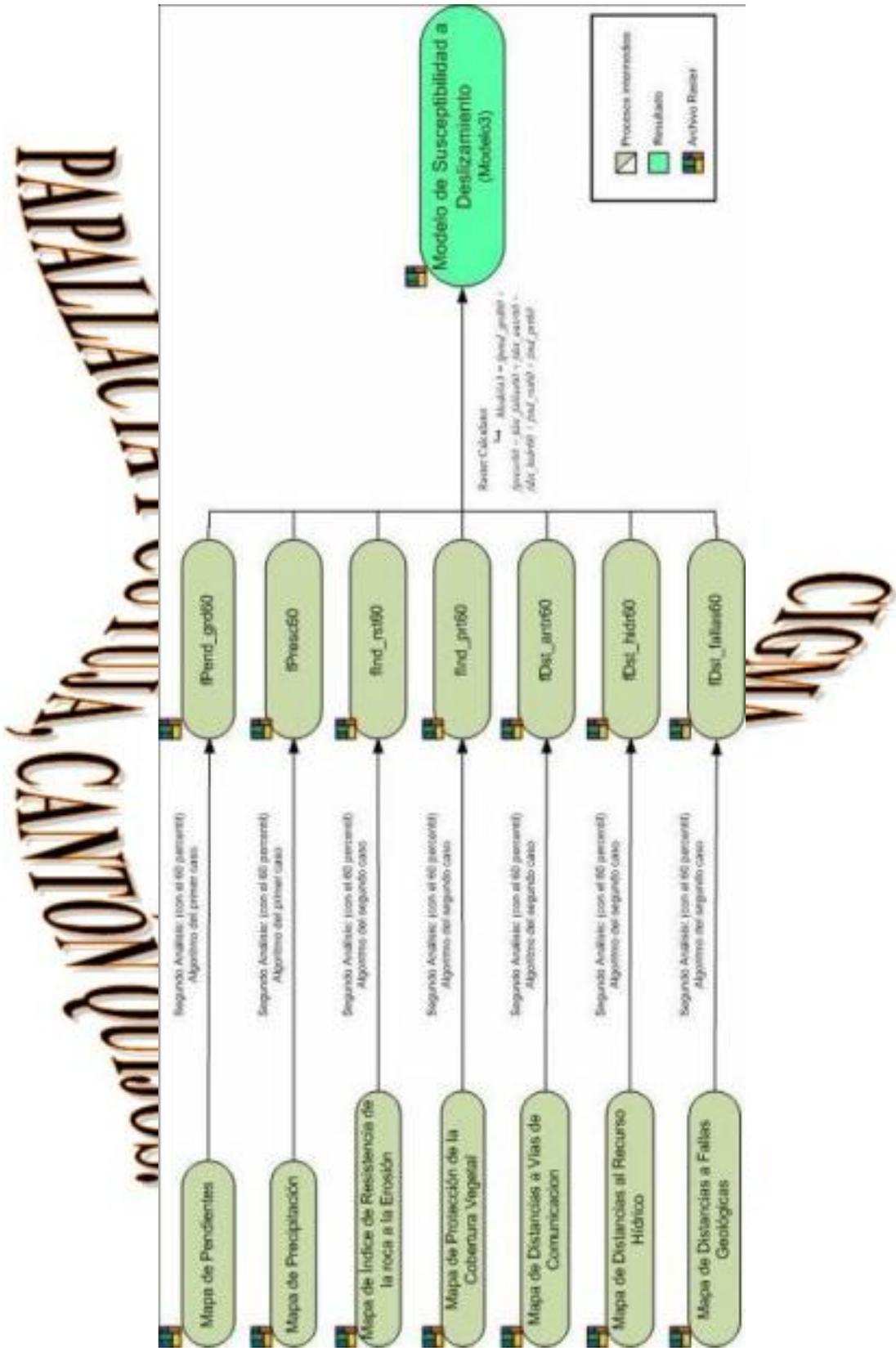
MODELO 1



MODELO 2

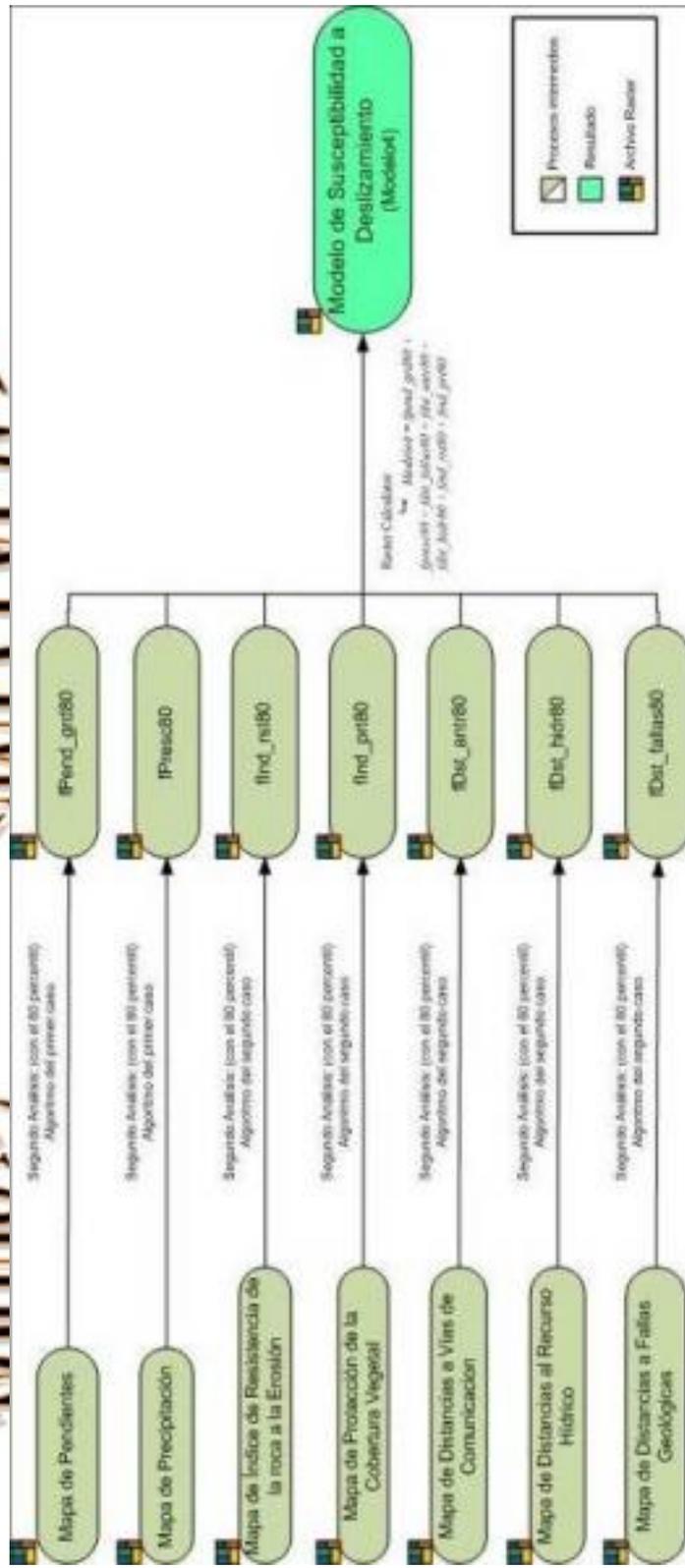


MODELO 3



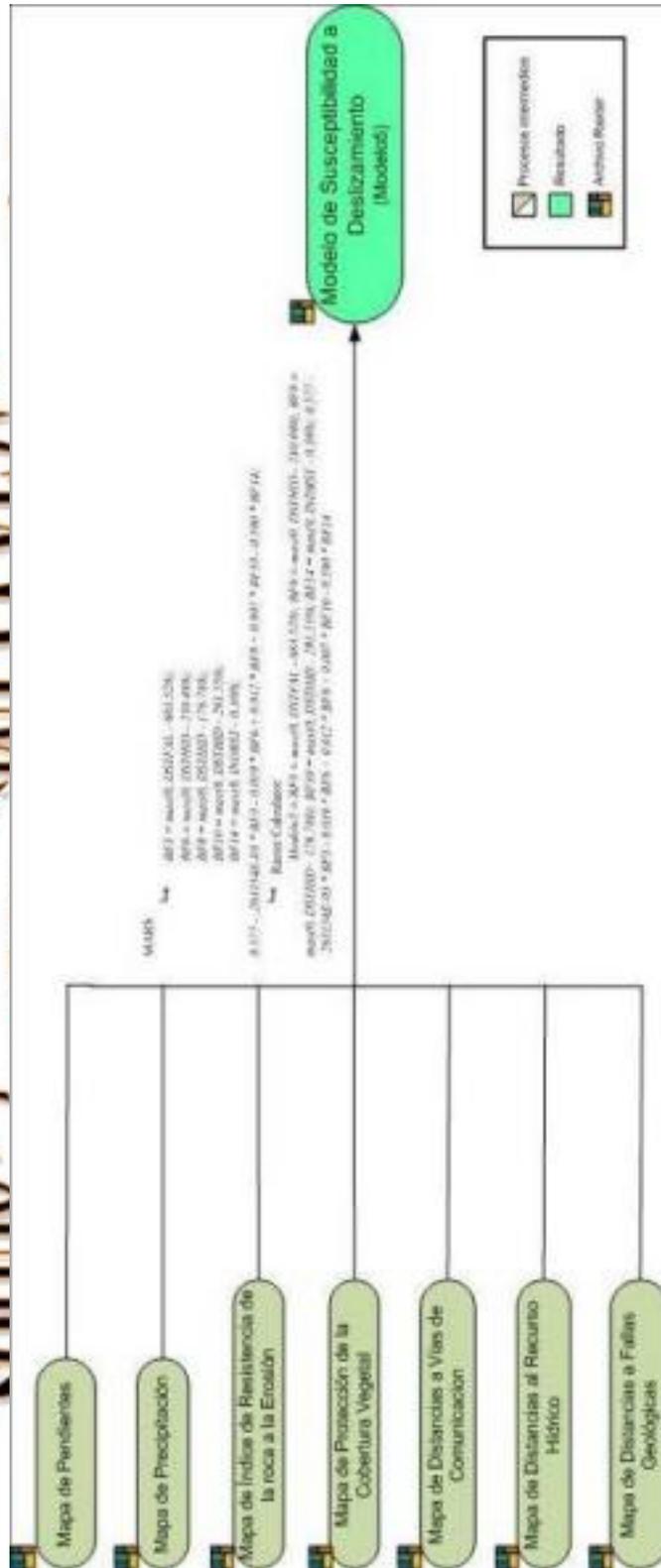
MODELO 4

PAPALLACHA I CURVA, CANTÓN QUIROSA, CIGMA



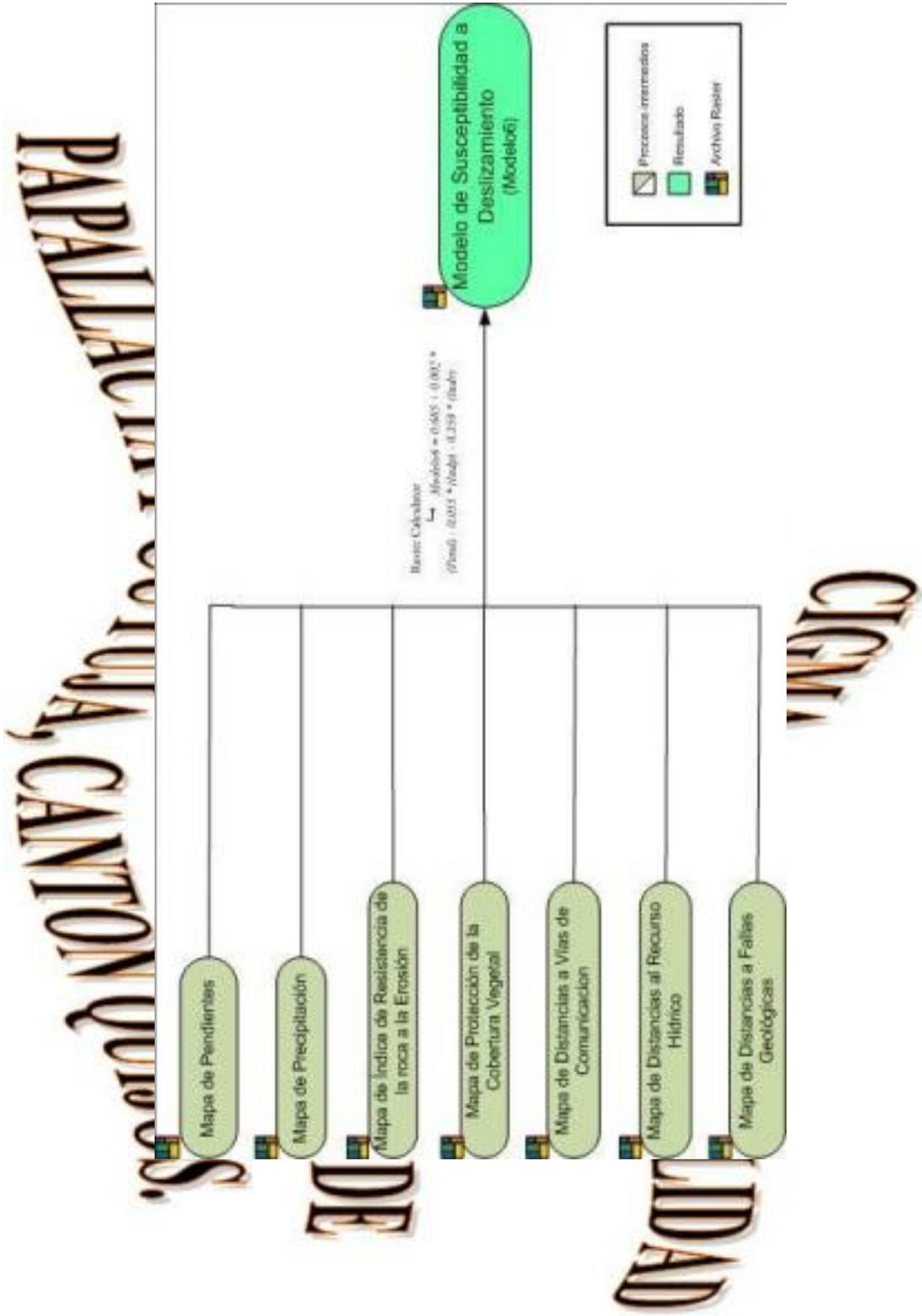
MODELO 5

PAPALLACHA I CUYA, CANTÓN QUIJUA,

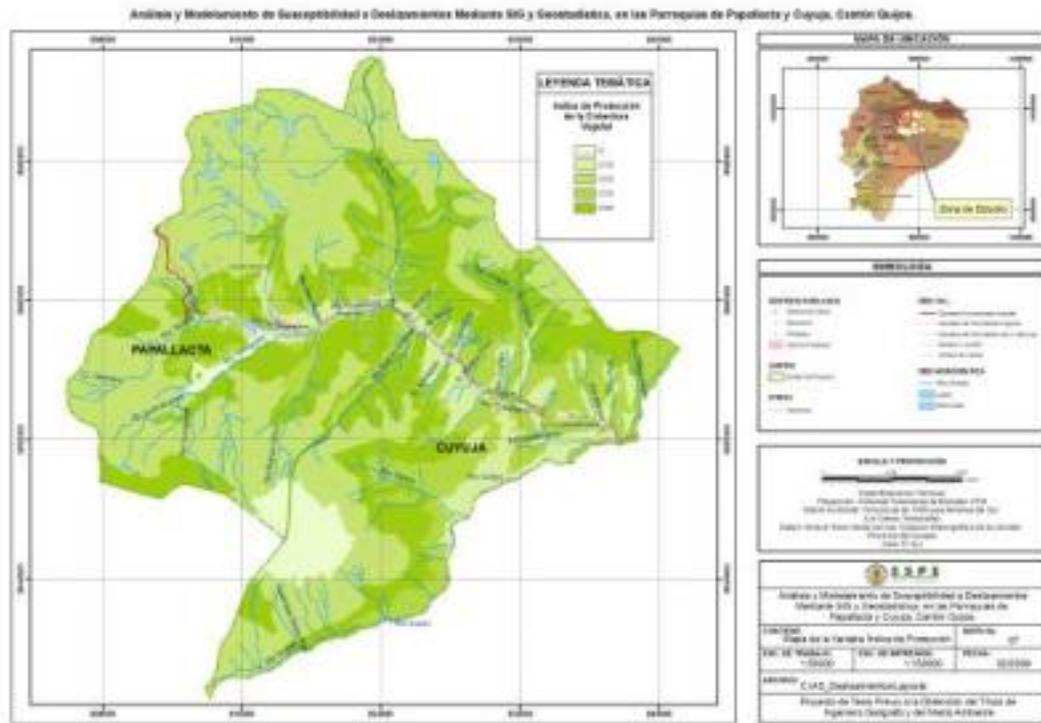


CIGMA

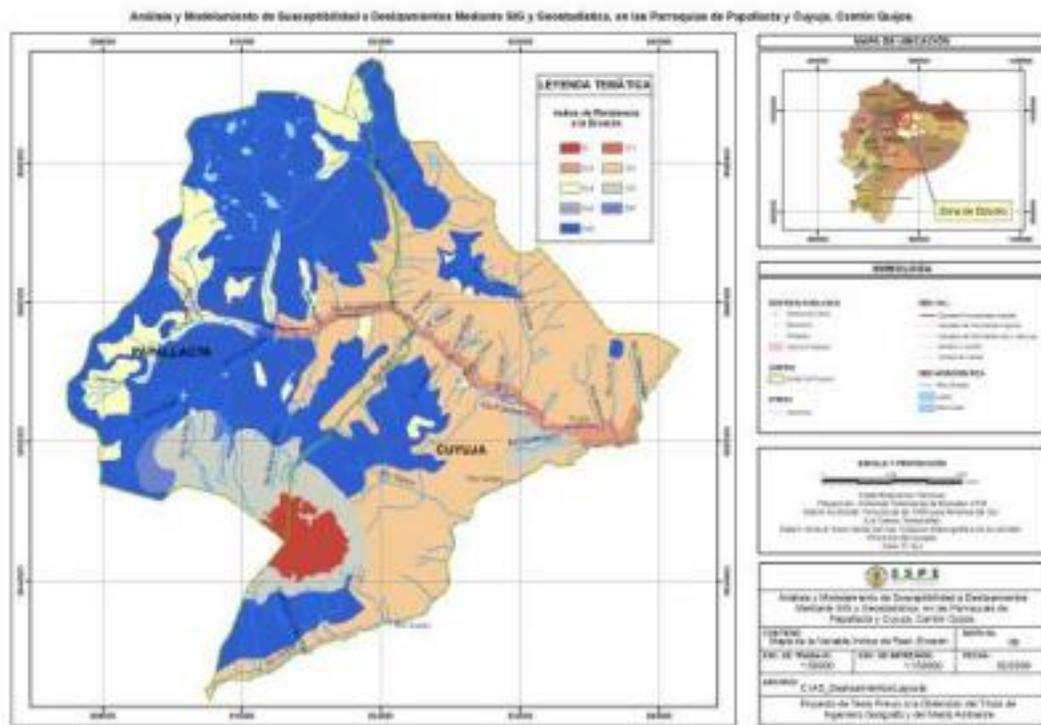
MODELO 6



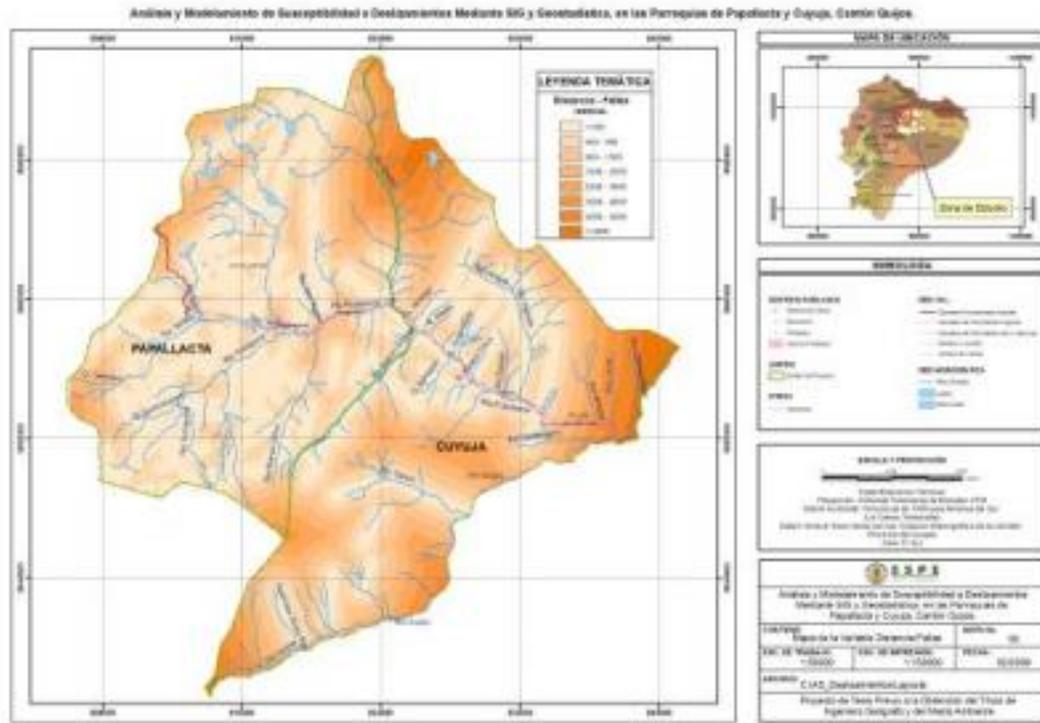
MAPA ÍNDICE DE PROTECCIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL



MAPA ÍNDICE DE RESISTENCIA DE LA ROCA A LA EROSIÓN



MAPA DE DISTANCIAS A FALLAS GEOLÓGICAS



MA,
 NTO DE SUSCEPTIBILIDAD
 OS MEDIANTE SIG
 LAS PARROQUIAS DE
 UJA, CANTÓN QUIJOS.

A6. Memórias Técnicas.

MEMORIA TÉCNICA 6.1

- ✓ **Nombre del mapa:** Mapa Base
- ✓ **Escala:** 1:50.000
- ✓ **Sistema de Referencia:** **Datum horizontal:** PSAD56 (Provisional South American 1956)
Datum vertical: Nivel medio del mar, Estación Mareográfica La Libertad, provincia del Guayas, 1.959
Proyección: UTM (Universal Transverse of Mercator)
Zona: 17 Sur
- ✓ **Fuentes:** Cartas Topográficas, formato físico de: Oyacachi (ÑIII-P4), Papallacta (ÑIII-D2), Laguna de Mica (ÑIII-D4), y Baeza (DII-C1) Escala: 1:50.000, IGM, 1.976-1.981
- ✓ **Procesos para la obtención del producto final:** Se procedió a escanear y georeferenciar y digitalizar las cartas correspondientes, para poder ser editadas y estructuradas. A continuación se detallan los diferentes procesos que se realizaron.
 1. **Georeferenciación:** Se procedió a georeferenciar las cartas topográficas escaneadas, tomando como base cada grilla de la carta escaneada.
 2. **Digitalización:** Con las cartas georeferenciadas, se digitalizó la zona de estudio para la elaboración del proyecto.
 3. **Edición:** Este proceso se realizó en un software CAD, debiendo cumplir con dos características principales:
 - a) Los elementos referentes a un tema se ubicó dentro de un mismo nivel; por ejemplo, drenajes, centros poblados, infraestructura eléctrica, etc.
 - b) En el caso de los elementos lineales, debe existir un nodo en cada intersección y en el caso de los polígonos estos deben cerrarse en un punto.
 4. **Conversion de formato CAD a formato SHP:** Se transformó los archivos en formato CAD a formato SHP haciendo una cobertura o tema a cada nivel de información; un tema de educación para todo lo referente a este aspecto: jardines, escuelas, colegios, institutos, etc; otro de religión en donde se encuentran las iglesias, cementerios, monasterios, etc. repitiendo el mismo proceso con todos los niveles. Para realizar este proceso se utilizó la herramienta “Export to shapefile”, mediante ArcCatalog.

MEMORIA TÉCNICA 6.2

- ✓ **Nombre del mapa:** Mapa de Pendientes
- ✓ **Escala:** 1:50.000
- ✓ **Sistema de Referencia:** **Datum horizontal:** PSAD56 (Provisional South American 1956)
Datum vertical: Nivel medio del mar, Estación Mareográfica La Libertad, provincia del Guayas, 1.959
Proyección: UTM (Universal Transverse of Mercator)
Zona: 17 Sur
- ✓ **Fuentes:** Curvas de nivel (intervalo de curva = 40m) de las cartas topográficas de: Oyacachi (ÑIII-B4), Papallacta (ÑIII-D2), Laguna de Mica (ÑIII-D4), y Baeza (OIII-C1) Escala: 1:50.000, IGM, 1976-1.981
- ✓ **Procesos para la obtención del producto final:** Los procesos realizados para obtener el mapa de pendientes son detallados a continuación:
 1. **Creación del DTM:** La creación del Modelo Digital del Terreno (DTM) fue realizado mediante un software SIG, mediante la altura de cada curva de nivel.
 2. **Obtención de las pendientes:** A partir del DTM se puede obtener las pendientes utilizando la herramienta “Derive Slope” del software SIG.
 3. **Estructuración de la base de datos alfanumérica:** Posteriormente, en el software SIG se modificó la base de datos, clasificando las pendientes en cuatro grupos de porcentaje.
 4. **Estructuración de la base de datos gráfica:** En este proceso se especifica las características gráficas de los elementos como símbolo, tamaño, color, etc.
 5. **Preparación del formato de salida:** Este proceso también es importante y se le debe dedicar el tiempo necesario, puesto que de este depende la presentación final del documento cartográfico facilitando al usuario una mejor comprensión de la información contenida y por consiguiente un buen uso de ella.
- ✓ **Rangos de pendientes en grados que conforman el Mapa de Pendientes de la Zona de Estudio.**
 - a) 0 – 12
 - b) 12 – 30
 - c) 30 – 45
 - d) > 45

MEMORIA TÉCNICA 6.3

- ✓ **Nombre del mapa:** Mapa de Precipitación
- ✓ **Escala:** 1:50.000
- ✓ **Sistema de Referencia:** **Datum horizontal:** PSAD56 (Provisional South American 1956)
Datum vertical: Nivel medio del mar, Estación Mareográfica La Libertad, provincia del Guayas, 1.959
Proyección: UTM (Universal Transverse of Mercator)
Zona: 17 Sur
- ✓ **Fuentes.** Series de datos de precipitación máxima en 24 horas de las estaciones: Papallacta (M118), Cuyuja (M436), Baeza (M215), Oyacaachi (M545), Borja Misión Josefina (M486), Yaruquí (M546) y Canganua (M344), La Mica (P9), El Chaco (M201), Sardinas (M490), Río Salado (M208), Guyllabamba (M341), INAMHI, Años: 1.982-1.992
 1. **Procesos para la obtención del producto final:** A continuación se presentan los procesos que se realizaron para obtener el mapa de precipitación máxima en 24 horas:
 2. **Transformación de Sistema de referencia de las estaciones meteorológicas:** La información proporcionada de la Tesis “DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN SIG ORIENTADA A LA ADMINISTRACIÓN DE RIESGOS VOLCÁNICO Y SÍSMICO EN EL TRAMO DE LA CARRETERA PAPALLACTA-LAGO AGRIO Y POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL TRAMO PAPALLACTA-BAEZA” se encontraba en el sistema de referencia WGS84 zona 18 Sur, utilizando el software Utmv6.200508, fue posible cambiar este sistema por PSAD 56 Zona 17 Sur.
 3. **Ploteo de las estaciones:** Se ingresó en una hoja de excel a cada una de las estaciones con sus respectivas coordenadas y se grabó el archivo como DBF4. Luego en el programa SIG se ploteó estos puntos mediante la herramienta Add Event Theme.
 4. **Conversión de formato DBF a formato SHP:** Se transformó el archivo que estaba en formato DBF4 a formato SHP constituyéndose así en un tema o cobertura que tiene atributos gráficos y alfanuméricos. Para realizar este proceso se utilizó la herramienta “Convert to shape”.
 5. **Estructuración de la base de datos alfanumérica:** Posteriormente, en este mismo software se alimentó la base de datos enlazada al tema, dando atributos a cada unidad

gráfica; a través de la creación de campos con las características de ubicación y nombre. Cabe señalar que en la base de datos existe un campo con los valores de precipitación máxima en 24 horas de cada una de las estaciones; campo por medio del cual posteriormente se va a interpolar.

6. **Interpolación.** La interpolación se realizó a través del campo donde se encuentran los valores de precipitación máxima en 24 horas de cada estación, el tamaño de píxel empleado fue de 10 m y el tipo de interpolación usada fue “Spline”. Es un método analítico (analiza la autocorrelación de la variable) y local (solo emplean los puntos muestrales que están en la vecindad de cada punto no muestral). Las funciones Spline son matemáticamente equivalentes a una regla flexible, estas pasan por los puntos de datos exactamente y permite determinar el grado de ecuación que representan el conjunto de puntos. Presenta algunas ventajas como: a) Debido a que son funciones Piecewise (piezas) usando algunos puntos al mismo tiempo, la interpolación puede ser calculada rápidamente, b) Retienen rasgos de pequeña escala y c) Son agradables estéticamente y permiten tener una vista clara de los datos al analizarlos a breves rasgos. Para realizar el proceso de interpolación se utilizó el módulo 3D de ArcView.

7. **Estructuración de la base de datos gráfica:** En este proceso se especifica las características gráficas de los elementos como símbolo, tamaño, color, etc.

8. **Preparación del formato de salida:** Este proceso también es importante y se le debe dedicar el tiempo necesario, puesto que de este depende la presentación final del documento cartográfico facilitando al usuario una mejor comprensión de la información contenida y por consiguiente un buen uso de ella.

✓ **Rangos de precipitación (mm) que conforman el Mapa de Precipitación Media Mensual de la zona de Estudio.**

- a) 800 - 1000
- b) 1000 - 1500
- c) 1500 - 1800
- d) 1800 - 2000
- e) 2000 - 2700

MEMORIA TÉCNICA 6.4

- ✓ **Nombre del mapa:** Mapa de índice de protección de la cobertura vegetal.
- ✓ **Escala:** 1:50.000
- ✓ **Sistema de Referencia:** **Datum horizontal:** PSAD56 (Provisional South American 1956)
Datum vertical: Nivel medio del mar, Estación Mareográfica La Libertad, provincia del Guayas, 1.959
Proyección: UTM (Universal Transverse of Mercator)
Zona: 17 Sur
- ✓ **Fuentes.** Imagen Satelital Landsat TM, combinación 453 RGB, año 2.000
Índices de Protección de la Cobertura Vegetal al Suelo publicados en la Guía para la Elaboración de Estudios para el Medio Físico del MOP de Madrid-España, 1.986
- ✓ **Procesos para la obtención del producto final:** A continuación se presenta un esquema de los procesos que se realizaron para obtener el mapa de Índices de Protección de la Cobertura Vegetal al Suelo:
 1. **Georeferenciación e Interpretación de la imagen Satelital**
Se obtuvo la imagen satelital (ETM+), correspondiente a la zona P10-R60, de 1999 y 2001. Adquiridas de forma gratuita de la página de ESDI (Earth Science Data Interface) at the Global Land Cover Facility, de la GLCF (universidad de Maryland - imágenes gratuitas), la georeferenciación de la imagen satelital se realizó mediante puntos identificables en las cartas topográficas, y en la imagen satelital, como puntos de cruce de vías, elementos topográficos, y elementos hidrográficos. Para su interpretación se usó un programa SIG, que permita clasificar la imagen satelital, mediante métodos supervisados y no supervisados.
 2. **Digitalización:** Este proceso se realizó en el software CAD.
 3. **Edición:** Este proceso también se realizó en el mismo software CAD, las unidades digitalizadas fueron polígonos, entonces se debe tener en cuenta que cada uno de estos polígonos debe cerrarse en un punto.
 4. **Conversión de formato DGN a formato SHP:** Se transformó el archivo que estaba en formato CAD a formato SHP, constituyéndose así en un tema o cobertura que tiene atributos gráficos y alfanuméricos. Para realizar este proceso se utilizó la herramienta “Convert to shape”.

5. **Estructuración de la base de datos alfanumérica:** Posteriormente, en este mismo software SIG se alimentó la base de datos enlazada al tema, dando atributos a cada unidad gráfica; a través de la creación de campos con las características que fueron proporcionadas en la Guía para la Elaboración de Estudios para el Medio Físico del MOP de Madrid-España, 1.986.

6. **Rasterización:** Se rasterizó las unidades de cobertura vegetal a través del campo que contiene los valores de los índices de protección con un tamaño de píxel de 10 m. Para realizar este proceso se utilizó el módulo Spatial Analyst del software SIG.

7. **Estructuración de la base de datos gráfica:** En este proceso se especifica las características gráficas de los elementos como símbolo, tamaño, color, etc.

8. **Preparación del formato de salida:** Este proceso también es importante y se le debe dedicar el tiempo necesario, puesto que de este depende la presentación final del documento cartográfico facilitando al usuario una mejor comprensión de la información contenida y por consiguiente un buen uso de ella.

✓ **Índices de Protección de cada Unidad de Cobertura Vegetal que conforma el mapa**

UNIDADES DE COBERTURA VEGETAL	ÍNDICES DE PROTECCIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL AL SUELO
Vegetación arbórea	1,00
Asociación de vegetación arbórea y vegetación arbustiva alta (Proporción 70/30)	0,90
Asociación de vegetación arbórea y vegetación arbustiva (Proporción 50-50)	0,80
Asociación de vegetación arbustiva alta y vegetación arbórea (Proporción 70/30)	0,75
Asociación de vegetación arbórea y pasto (Proporción 70/30)	0,70
Asociación de vegetación arbustiva alta y pasto (Proporción 70/30)	0,65
Vegetación arbustiva baja	0,50
Asociación de vegetación arbustiva baja y páramo (Proporción 70/30)	0,50
Asociación de páramo y vegetación arbustiva baja (Proporción 70/30)	0,45
Páramo	0,40
Asociación de pasto y vegetación arbustiva alta	0,40

UNIDADES DE COBERTURA VEGETAL	ÍNDICES DE PROTECCIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL AL SUELO
(Proporción 70/30)	
Asociación de pasto y vegetación arbórea (Proporción 70/30)	0,40
Asociación de pasto y páramo (Proporción 50-50)	0,35
Pasto	0,30
Flujo de lava	0,00
A floramiento rocoso, y,	0,00
Eriales	0,00

ANÁLISIS Y MODELAMIENTO DE SUSCEPTIBILIDAD
 A DESLIZAMIENTOS MEDIANTE SIG
 Y GEOSTADÍSTICA EN LAS PARROQUIAS DE
 PAPA LACTA Y CUYUJA, CANTÓN QUIJOS,
 CIGMA,

MEMORIA TÉCNICA 6.5

- ✓ **Nombre del mapa:** Mapa de índice de resistencia de la roca a la erosión.
- ✓ **Escala:** 1:50.000
- ✓ **Sistema de Referencia:** **Datum horizontal:** PSAD56 (Provisional South American 1956)
Datum vertical: Nivel medio del mar, Estación Mareográfica La Libertad, provincia del Guayas, 1.959
Proyección: UTM (Universal Transverse of Mercator)
Zona: 17 Sur
- ✓ **Fuentes:** Hoja Geológica de Pintag N°85, DGGM, 1.981-1.983 y Mapa de Geología de la Provincia del Napo, ECORAE-ZEE, 2.001
Índices Litológicos propuestos por la FAO publicados en la Guía para la Elaboración de Estudios para el Medio Físico del MOP de Madrid-España, 1.986
- ✓ **Procesos para la obtención del producto final.** A continuación se presentan los procesos que se realizaron para obtener el mapa de Índices de Resistencia de la Roca a la Erosión:
 1. **Edición:** Este proceso se realizó en un software CAD, las unidades digitalizadas fueron polígonos, entonces se debe tener en cuenta que cada uno de estos polígonos debe cerrarse en un punto.
 2. **Conversión de formato CAD a formato SHP:** Se transformó el archivo que estaba en formato CAD a formato SHP, constituyéndose así en un tema o cobertura que tiene atributos gráficos y alfanuméricos. Para realizar este proceso se utilizó la herramienta "Convert to shape", del software SIG.
 3. **Estructuración de la base de datos alfanuméricas:** Posteriormente, en este mismo software SIG, se alimentó la base de datos enlazada al tema, dando atributos a cada unidad gráfica; a través de la creación de campos según la tabla de los Índices Litológicos propuestos por la FAO publicados en la Guía para la Elaboración de Estudios para el Medio Físico del MOP de Madrid-España, 1.986
 4. **Rasterización:** Se rasterizó las unidades geológicas a través del campo que contiene los valores de los índices de resistencia de la roca a la erosión, con un tamaño

de píxel de 10 m. Para realizar este proceso se utilizó el módulo Spatial Analyst del software SIG.

5. **Estructuración de la base de datos gráfica:** En este proceso se especifica las características gráficas de los elementos como símbolo, tamaño, color, etc.

6. **Preparación del formato de salida:** Este proceso también es importante y se le debe dedicar el tiempo necesario, puesto que de este depende la presentación final del documento cartográfico facilitando al usuario una mejor comprensión de la información contenida y por consiguiente un buen uso de ella.

✓ **Índices de Resistencia de la Roca a la Erosión de cada Unidad Geológica que conforma el mapa**

UNIDAD GEOLÓGICA	ÍNDICE DE RESISTENCIA DE LA ROCA A LA EROSIÓN
Lava	0,90
Flujo de lava Potrerillos	0,90
Lava indiferenciada y piroclastos	0,80
Lavas andesíticas, riolacitas y tobas	0,80
Lahar	0,60
Piroclastos y lavas	0,50
Terrazas	0,40
Cono de deyección	0,30
Depósito Coluvial	0,30
Depósito glaciar	0,30
Depósito fluvio glaciar	0,30
Esquistos y gneises, y.	0,20
Depósito Aluvial	0,10

MEMORIA TÉCNICA 6.6

- ✓ **Nombre del mapa:** Mapa de distancias a vías de comunicación.
- ✓ **Escala:** 1:50.000
- ✓ **Sistema de Referencia:** **Datum horizontal:** PSAD56 (Provisional South American 1956)
Datum vertical: Nivel medio del mar, Estación Mareográfica La Libertad, provincia del Guayas, 1.959
Proyección: UTM (Universal Transverse of Mercator)
Zona: 17 Sur
- ✓ **Fuentes:** Mapa Base del estadio, elemento vías de comunicación
- ✓ **Procesos para la obtención del producto final:** A continuación se presentan los procesos que se realizaron para obtener el mapa de distancias a las vías de comunicación.
 7. **Clasificación:** Este proceso se realizó en un software SIG, clasificando de acuerdo al tipo de vías de comunicación, se utilizó una distancia de 30 metros a las vías pavimentadas, sin tomar en cuenta los senderos.
 8. **Costo de distancias:** Se utilizó la herramienta Spatial Analyst Tools para calcular la distancia de cada punto sobre el área de estudio, al elemento vías de comunicación.
 9. **Preparación del formato de salida:** Este proceso también es importante y se le debe dedicar el tiempo necesario, puesto que de este depende la presentación final del documento cartográfico facilitando al usuario una mejor comprensión de la información contenida y por consiguiente un buen uso de ella.
- ✓ **Distancia mínima y máxima obtenidas al elemento vías de comunicación.**
0 - 19997 metros

MEMORIA TÉCNICA 6.7

- ✓ **Nombre del mapa:** Mapa de distancias a recursos hídricos.
- ✓ **Escala:** 1:50.000
- ✓ **Sistema de Referencia:** **Datum horizontal:** PSAD56 (Provisional South American 1956)
Datum vertical: Nivel medio del mar, Estación Mareográfica La Libertad, provincia del Guayas, 1.959
Proyección: UTM (Universal Transverse of Mercator)
Zona: 17 Sur
- ✓ **Fuentes:** Mapa Base del estadio, elemento vías de comunicación
- ✓ **Procesos para la obtención del producto final:** A continuación se presentan los procesos que se realizaron para obtener el mapa de distancias a las vías de comunicación.
 10. **Clasificación:** Este proceso se realizó en un software SIG, clasificando de acuerdo al tipo del recurso hídrico, se utilizó una distancia de 30 metros a los ríos dobles y 5 metros a los ríos simples y quebradas.
 11. **Costo de distancias:** Se utilizó la herramienta Spatial Analyst Tools para calcular la distancia de cada punto sobre el área de estudio, al elemento vías de comunicación.
 12. **Preparación del formato de salida.** Este proceso también es importante y se le debe dedicar el tiempo necesario, puesto que de este depende la presentación final del documento cartográfico facilitando al usuario una mejor comprensión de la información contenida y por consiguiente un buen uso de ella.
- ✓ **Distancia mínima y máxima obtenidas al elemento vías de comunicación.**
0 - 7107 metros.

MEMORIA TÉCNICA 6.8

- ✓ **Nombre del mapa:** Mapa de distancias a fallas geológicas.
- ✓ **Escala:** 1:50.000
- ✓ **Sistema de Referencia:** **Datum horizontal:** PSAD56 (Provisional South American 1956)
Datum vertical: Nivel medio del mar, Estación Mareográfica La Libertad, provincia del Guayas, 1.959
Proyección: UTM (Universal Transverse of Mercator)
Zona: 17 Sur
- ✓ **Fuentes:** Mapa Base del estudio, elemento vías de comunicación
- ✓ **Procesos para la obtención del producto final:** A continuación se presentan los procesos que se realizaron para obtener el mapa de distancias a las vías de comunicación.
 13. **Clasificación:** Este proceso se realizó en un software SIG, clasificando las fallas de acuerdo al criterio técnico de la visita a campo realizada al área de estudio; tomando en cuenta pesos de acuerdo al tipo de falla:
 1. Fracturas
 2. Diaclasas
 3. Falla cubierta e inferida
 4. Falla segura
 14. **Costo de distancias:** Se utilizó la herramienta Spatial Analyst Tools, para calcular la distancia de cada punto sobre el área de estudio, al elemento vías de comunicación.
 15. **Preparación del formato de salida:** Este proceso también es importante y se le debe dedicar el tiempo necesario, puesto que de este depende la presentación final del documento cartográfico facilitando al usuario una mejor comprensión de la información contenida y por consiguiente un buen uso de ella.
- ✓ **Distancia mínima y máxima obtenidas al elemento vías de comunicación.**
0 - 7149 metros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CERECEDA, IRMA CRISTINA, "Uso de los SIG en el análisis de susceptibilidad y predicción de deslizamientos", 2005.
- CEES VAN WESTEN, "Introducción a los deslizamientos: Uso de los SIG en el mapeo de deslizamientos", 2001.
- ESCADA, MARIA ISABLE, "Aplicação de Técnica Fuzzy em SIG como alternativa para o Zoneamento Ecológico Econômico", 1998.
- GARCÍA RODRIGUEZ, M.J., BENITO, MALPICA, J. A., "Evaluación de la peligrosidad a los Deslizamientos en un SIG empleando Técnicas de Regresión Logística", 2000.
- GÓMEZ, J. GALINDO, "Conjuntos y Sistemas Difusos", 1997.
- JARRIN, J.I. CANDO, M.I, IBADANGO E.I, GORDÓN, "Estudio de deslizamientos en la carretera Quito Tena, tramo la virgen de Papallacta - Sardinas", 2001.
- KOSKO B, "Neural networks and fuzzy systems", Eds. Prentice Hall, 1992.
- ORTEGA, RODRIGO, "Análisis y modelos estadísticos", 2002.
- PEREZ, MARCO ANTONIO, "Sistemas de lógica Difusa", 2003.
- QUINTANILLA, IRMA CRISTINA, "Uso de los SIG en el análisis de susceptibilidad y predicción de Deslizamientos" 2004.
- QUINTAS, NURIA "Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos mediante el uso de sistemas de información geográfica", 2003.
- REYNA, ANGÉLICA - "El uso de los sistemas de información geográfica (SIG) en el análisis demográfico de situaciones de desastre", 2006.
- SANDOVAL, VÍCTOR; REAL, PEDRO - "Modelamiento y prognosis estadística y cartográfica del cambio en el uso de la tierra", 2005.
- SARRIA, FRANCISCO ALONSO - "SIG aplicados al análisis y cartografía de riesgos", 2002.
- SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE CONTROL DE EROSIÓN 2002 - "Modelo Para El Pronostico De La Amenaza Por Deslizamientos En Tiempo Real", 2001.
- VERGES GIOVANNI - "Uso De Modelos Espaciales Para El Análisis Estadístico", 2001.
- WESTEN, C.J. VAN "Herramientas para el análisis de mapas", 2005.