UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

Av. 12 de Abril s/n, Cuenca

INVESTIGACIÓN DE DESLIZAMIENTOS A TRAVÉS DE MÉTODOS GEOFÍSICOS Y TÉCNICAS DE MONITOREO

Director:
Ing. Jaime Bojorque I., PhD

Proyecto de graduación previo a la obtención del grado de Ingeniero Civil

Autor:
Alfredo Vladimir Vázquez Roura

Cuenca - Ecuador

Julio 2013

Resumen

Esta tesis recopila las técnicas más avanzadas para detectar, caracterizar, mapear y monitorear problemas de movimientos de masa. Dentro de la caracterización de los movimientos de masa se investiga los diferentes métodos geofísicos existentes que brindan información durante el estudio de inestabilidades.

Se analiza la aplicabilidad de diferentes técnicas de monitoreo con el objetivo de implementar Sistemas de Alerta Temprana (SAT). Para esto, se estudian los elementos que deben tener un sistema de este tipo y las consideraciones a tomarse en cuenta para su diseño e implementación.

Con el propósito de facilitar la selección de las técnicas a utilizar en el monitoreo de un movimiento en masa, se ha elaborado una herramienta computarizada ejecutada mediante el software Excel, en la cual se seleccionan el tipo de movimiento en masa y su velocidad y se proporciona de manera automática los métodos más recomendados para dichas condiciones.

La segunda herramienta que se elabora, sirve para un cálculo previo de cantidades de metros mínimos necesarios para los tendidos geofísicos y en el caso de tener información geofísica como Vp y Vs, se pueden obtener parámetros geotécnicos dinámicos.

Estas herramientas son posteriormente utilizadas en una aplicación para un estudio de una inestabilidad activa que afecta a la ciudad de Cuenca.

Cómo resultado se indican ventajas, desventajas y limitaciones de cada técnica tanto en el monitoreo como en la prospección geofísica, generando parámetros de elección que permiten identificar que método es el más adecuado para las distintas condiciones presentadas en los movimientos en masa.

(Geofisica, Geotècnica, movimientos en masa, Fenómenos de Remosión en Masa, Deslizamientos, Sistemas de Alerta Temprana, Técnicas de monitoreo, Inestabilidades, Monitoreo.)

Abstract

This thesis compiles the most advanced techniques to detect, characterize, map, and monitor mass movement problems. Among the characterization of such movements, this study emphasizes the different geophysical methods that provide information while studying instabilities.

The following research analyzes the applicability of several monitoring techniques - such as the real time monitoring - with the purpose of implementing Early Warning Systems (EWS). In order to accomplish this, this study focuses on all necessaries elements for this type of system, as well as on all considerations that should be taken into account for its correct design and implementation.

With the purpose of facilitating the selection process of such techniques when monitoring mass movements, a computerized tool has been created, which is utilized with the Excel software. This first tool automatically provides us with the most recommended methods for several conditions by just identifying a mass movement type and its speed.

The second tool created by this research allows the user to develop a previous calculation of the minimum amount of meters necessary for geophysical studies. In case of having geophysical information such as Vp and Vs, it is possible to obtain geophysical parameters with empirical correlations.

These tools will be later on used in an application for the study of an active instability that has a direct impact on Cuenca.

As a result, this study points out the advantages, disadvantages, and limitations of each technique, both in the monitoring process as well as in the geophysical research. This creates selection parameters that allow us to identify the most adequate method for the several conditions resulting from landslides.

Contenido

Resumen **2**

Abstract **3**

Contenido **4**

Lista de Figuras **6**

Lista de Tablas **8**

Lista de Símbolos **10**

Agradecimiento **13**

1 Introducción general **14**
1.1 Introducción 14
1.2 Antecedentes 16
1.3 Objetivos 17
1.3.1 Objetivo general 17
1.3.2 Objetivos específicos 17
1.4 Justificación 17
1.5 Situación Actual 18

2 Estado del arte **19**
2.1 Movimientos de masa 19
2.1.1 Definición 19
2.1.2 Clasificación de movimientos 23
2.1.3 Factores desencadenantes de FRM 27
2.1.4 Clasificación de deslizamientos por su velocidad 28
2.2 Técnicas de detección, caracterización y monitoreo a largo plazo de movimientos de masa 30
2.2.1 Introducción 30
2.2.2 Teledetección 31
2.2.3 Técnicas geotécnicas 49
2.3 Métodos geofísicos en el análisis de movimientos de masa 55
2.3.1 Investigaciones geofísicas en tierra 55

2.3.2 Geofísica aérea . . . 77
2.4 Sistemas de alerta temprana basados con monitoreo en tiempo real . . . 78
2.4.1 Desplazamientos y deformaciones . . . 79
2.4.2 Parámetros geofísicos . . . 85
2.4.3 Parámetros hidrometeorológicos . . . 86
2.4.4 Método geoeléctrico . . . 87
2.4.5 Sistemas de alerta temprana SAT . . . 88

3 Metodologia 93
3.1 Análisis de tipos de movimientos en masa . . . 93
3.2 Análisis de factibilidad de técnicas de monitoreo . . . 97
3.2.1 Escaner Laser Terrestre o TLS . . . 99
3.2.2 Estación total . . . 99
3.2.3 GPS diferenciales o dGPS . . . 99
3.2.4 Sistemas multiparamétricos (DMS) . . . 99
3.2.5 Extensómetros superficiales . . . 100
3.2.6 Acelerómetros . . . 100
3.2.7 Estaciones meterológicas . . . 100
3.3 Análisis de sistemas de alerta temprana basados en monitoreo en tiempo real . . . 100
3.4 Técnicas geofísicas para deslizamientos . . . 102

4 Análisis de resultados y discusión 105
4.1 Introducción . . . 105
4.2 Contexto general de la zona . . . 105
4.2.1 Ubicación . . . 106
4.2.2 Geología Local . . . 106
4.2.3 Geomorfología e hidrogeología . . . 107
4.2.4 Descripción del área inestable . . . 107
4.2.5 Área Vulnerable . . . 107
4.3 Aplicación de herramienta de técnicas de monitoreo . . . 108
4.3.1 Introducción a la aplicación . . . 109
4.3.2 Ejecución de la herramienta . . . 109
4.4 Aplicación de la herramienta para técnicas geofísicas . . . 112
4.4.1 Introducción a la aplicación . . . 112
4.4.2 Ejecución de la herramienta . . . 112
4.5 Diseño preliminar de estudios geofísicos . . . 115
4.6 Diseño preliminar de monitoreo . . . 118

5 Conclusiones y recomendaciones 121
5.1 Conclusiones . . . 121
5.2 Recomendaciones . . . 123

Referencias 125

Apéndices 127

A Herramientas generadas 128

A.1 Herramienta de técnicas de monitoreo 128
A.1.1 Cálculo de velocidad 128
A.1.2 Tabla matriz de métodos de monitoreo 129

Lista de Figuras

2.1.1 Talud artificial [33] 20
2.1.2 Ladera natural [33] 20
2.1.3 Diagrama deslizamiento de tierra [8] 21
2.1.4 Clasificación de FRM Cruden and Varnes [10] 23
2.1.5 Deslizamiento [8] 24
2.1.6 Volcamiento [8] 25
2.1.7 Caídas [8] 25
2.1.8 Flujos [8] 26
2.1.9 Expansiones laterales [8] 26
2.2.1 Tecnicas de caracterización y monitoreo [29] 30
2.2.2 Equipos de fotografía utilizados [29] 32
2.2.3 Mapa de deslizamientos verticales [29] 33
2.2.4 Deslizamiento de Wenchuan, China (2008) [29] 35
2.2.5 Gráfico de desplazamiento vs. velocidad [29] 37
2.2.6 Modelamiento de flujo de escombros [29] 38
2.2.7 Desplazamientos en Val Canaria, Ticino, Alpes Suizos [29] 38
2.2.8 Predicción de caida de rocas mediante TLS [29] 39
2.2.9 Comparación de superficies generadas a partir de ALS y TLS [29] 41
2.2.10 Modelo de flujo [29] 42
2.2.11 Imagen satelital [19] 44
2.2.12 Velocidad de movimiento en el area urbana de Bogota [30] 45
2.2.13 Análisis de DInSAR avanzado [29] 46
2.2.14 Equipo GB InSAR modelo IBIS-L [29] 47
2.2.15 Esquema extensómetro horizontal [33] 49
2.2.16 Esquema extensómetro vertical [33] 50
2.2.17 Esquema inclinómetro [33] 51
2.2.18 Inclinómetro automático [29] 51
2.2.19 Sensores piezométricos 52
2.2.20 Esquema de célula de presión [33] 53
2.2.21 Equipo DMS [29] 54
2.3.1 Geofísica en los movimientos de masa [12] 60
2.3.2 Propagación de ondas sísmicas [29] 62
2.3.3 Perfil de sísmica de refracción [18] 64
2.3.4 Tomografía sísmica [18] 65
2.3.5 Sísmica de reflexion [18] 66
2.3.6 Perfil MASW 1D [26] 67

2.3.7 Perfil MASW 2D [26] . . . 67
2.3.8 Geófono triaxial [27] . . . 68
2.3.9 Tomografía eléctrica [18] . . . 70
2.3.10 Perfil de resistividad y polarización inducida [3] . . . 71
2.3.11 Sondeos electromagnéticos [26] . . . 72
2.3.12 Equipo georadar [14] . . . 74
2.3.13 Gravimetría en zonas kársticas [15] . . . 75
2.3.14 Monitoreo micro sísmico [31] . . . 77
2.4.1 Clasificación de deslizamientos monitoreados [29] . . . 78
2.4.2 Métodos más utilizados y con mayor potencial para alerta temprana [29] . . . 79
2.4.3 Extensómetro vertical de cable [29] . . . 79
2.4.4 Sístema Multiparamétrico 2D (DMS) [29] . . . 80
2.4.5 Sístema Multiparamétrico 3D (DMS) [29] . . . 80
2.4.6 Instalación típica de un dGPS [1] . . . 81
2.4.7 Instalación típica de un GB InSAR [4] . . . 82
2.4.8 Estructura de protección de una estación total [28] . . . 83
2.4.9 Estación total automática [28] . . . 83
2.4.10 Extensómetro TM71 [16] . . . 84
2.4.11 TLS Topcon [35] . . . 85
2.4.12 Estación meterológica [28] . . . 86
2.4.13 Esquema de sistema TDR [33] . . . 87
2.4.14 Estudios previos a la implantación de un SAT [29] . . . 90
2.4.15 Instrumentación utilizada [29] . . . 91

4.2.1 Ubicación inestabilidad Turi . . . 106
4.2.2 Registro fotográfico Turi 1 . . . 107
4.2.3 Registro fotográfico Turi 2 . . . 108
4.3.1 Abrir archivo . . . 109
4.3.2 Elegir opciones . . . 109
4.3.3 Tabla generada . . . 110
4.4.1 Abrir herramienta geofísica . . . 112
4.4.2 Ingresar información para cálculo de cantidades geofísicas . . . 113
4.4.3 Resultados mostrados . . . 113
4.4.4 Cálculo de características geotécnicas . . . 114
4.4.5 Ejemplo de análisis . . . 114
4.5.1 Propuesta de ubicación de perfiles sísmicos . . . 116

A.1.1 Ejemplo de desplazamiento entre enero 2008 y marzo 2012 . . . 128

Lista de Tablas

2.1.1 Clasificación de velocidades según Cruden and Varnes [10] 29
2.2.1 Investigaciones aplicando imágenes satelitales [29] 34
2.2.2 Comparación de distintas estaciones totales [29] 36
2.2.3 Aplicaciones de ALS [29] 40
2.2.4 Investigaciones utilizando ALS[29] 40
2.2.5 Longitud de onda de radares [29] 43
2.2.6 Aplicaciones de polarimetría [29] 47
2.3.1 Ventajas y desventajas de los métodos geofísicos 56
2.3.2 Investigaciones mediante métodos geofísicos [12] 58
2.3.3 Aplicaciones, ventajas y desventajas de métodos geofísicos 59
2.3.4 Velocidades sísmicas y posibles materiales [29] 62
2.4.1 Investigaciones monitoreo sísmico [29] 85

3.1.1 Resumen de métodos más adecuados según velocidad [29] 95
3.1.2 Métodos adecuados para cada etapa [29] 95
3.1.3 Ventajas y desventajas ALS [29] 96
3.1.4 Ventajas y desventajas TLS [29] 96
3.1.5 Ventajas y desventajas GB InSAR [29] 96
3.1.6 Ventajas y desventajas Imagenes satelitales [29] 97
3.2.1 Métodos utilizados en el país INIGEMM (2013) 98

4.2.1 Resumen movimiento de masa 1 108
4.2.2 Resumen movimiento de masa 2 108
4.3.1 Tabla de métodos de monitoreo en tiempo real 111
4.5.1 Análisis 1 de cantidades de perfiles geofísicos 117
4.5.2 Análisis 2 de cantidades de perfiles geofísicos 117
4.5.3 Resumen de cantidades de perfiles geofísicos 118

A.1.1 Tabla matriz de métodos de monitoreo 129

Lista de Símbolos

La siguiente lista es una revisión general de los símbolos y acrónimos utilizados en el texto.

General symbols

(x, y, z)	Cordenadas cartecianas
δ	Densidad
K	Módulo de compresion
G	Módulo de cortante
Vp	Velocidad de ondas principales
Vs	Velocidad de ondas secundarias
Ωm	Resistividad
mS/m	Conductividad
Hz	Hercios
E	Módulo de Young
ν	Módulo de Poisson

Acrónimos

A-DInSAR	Advanced-Dynamic InSAR, InSAR Dinámico Avanzado
AGS	Alberta Geological Survey, Servicio Geológico de Alberta
ALS	Aerial Laser Scanner, Escáner Laser Aéreo
CPT	Cone Penetration Test, Prueba de Penetración de Cono
CRED	Centre for Research on the Epidemology of Disasters, Centro para Investigación de la Epidemiología de Desastres
DEM	Digital Elevation Model, Modelos Digitales de Elevación
DINAGE	National Direction of Geology, Dirección Nacional de Geología
DMS	Differential Multiparametric System, Sistema Diferencial Multiparamétrico
DSGSD	Deep-Seated Gravitational Slope Deformation, Deformaciones Gravitacionales Profundas en Laderas
DSLR	Digital Single Lens Reflex, Cámara Réflex Digital
DSM	Digital Surface Model, Modelo Digital de Superficie
DTM	Digital Terrain Model, Modelo Digital de Terreno
EDM	Electronic Distance Meter, Medidor Electrónico de Distancia
ERS	European Remote Sensing Satellite, Satélite Artificial de la Agencia Espacial Europea
FRM	Mass Removal Phenomena, Fenómenos de Remoción en Masa
GIS	Geographic Information System, Sistema de Información Geográfica
GPS	Global Positioning System, Sistema de Posicionamiento Global

GRM	Generalized Reciprocal Method, Método Recíproco Generalizado
IAEG	International Association of Engineering Geology, Asociación Internacional de Ingeniería Geológica
INAMHI	National Institute of Meteorology and Hydrology, Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
INIGEMM	National Mining Metallurgical Geological Institute, Instituto Nacional Geológico Minero Metalúrgico
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar, Radar Interferometríco de Apertura Sintética
LIDAR	Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging, Detección de Distancias con Laser
MASW	Multichannel Analysis of Surface Waves, Análisis Multicanal de Ondas de Superficie
NGI	Norwegian Geotechnical Instutute, Instituto Geológico Noruego
NIR	Near Infrared, Espectros Infrarrojos Cercanos
OBIA	Objet-Based Image Analysis, Análisis de Imagen Basado en Objetos
RMR	Rock Mass Rating, Índice de Calidad de la Roca
RMS	Root-Mean-Square, Media Cuadrática
SAD	Decision Support System, Sistema de Ayuda a la Decisión
SAR	Synthetic Aperture Radar, Radar de Apertura Sintética
SASW	Spectral Analysis of Surface Waves , Análisis Espectral de Ondas Superficiales
SAT	Early Warning Systems, Sistemas de Alerta Temprana
SEV	Vertical Electrical Sounding, Sondeo Electrico Vertical
SIG	Geographic Information System, Sistemas de Información Geográfica
SPT	Standard Penetration Test, Ensayo de Penetración Estándar
TDR	Time Domain Reflectometer, Reflectómetro de Dominio
TLS	Terrestrial Laser Scanner, Escáner Laser Terrestre
USA	United States of America, Estados Unidos de América
USACE	United States Army Corps of Engineers, Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos
USGS	United States Geological Survey, Servicio Geológico de los Estados Unidos
UTM	Universal Transverse Mercator, Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator
VHR	Very High Resolution, Sensores de muy Alta Resolución

Yo, Alfredo Vladimir Vázquez Roura, autor de la tesis "Investigación de deslizamientos a través de métodos geofísicos y técnicas de monitoreo", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 1 de Julio de 2013

Alfredo Vladimir Vázquez Roura
CI: 0103464103

Yo, Alfredo Vladimir Vázquez Roura, autor de la tesis "Investigación de deslizamientos a través de métodos geofísicos y técnicas de monitoreo", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 1 de Julio de 2013

Alfredo Vladimir Vázquez Roura
CI: 0103464103

Dedicatoria:
A mis padres Martha y Alfredo, ejemplos de vida, por su apoyo en los momentos más difíciles y por siempre creer en mi.
A mis abuelos queridos por su apoyo incondicional.
A mis amigos que han sido hermanos y compañeros en esta vida.

"Desafortunadamente, los suelos son fabricados por la naturaleza y no por el hombre, y los productos de la naturaleza son siempre complejos ... Tan pronto como se pasa del acero y el concreto al suelo, la omnipotencia de la teoría deja de existir. El suelo natural nunca es uniforme. Sus propiedades cambian de punto a punto, mientras que nuestro conocimiento de sus propiedades se limita a los pocos sitios en que las muestras han sido recogidas. En la mecánica de suelos la exactitud de los resultados calculados nunca supera a la de una estimación aproximada, y la función principal de la teoría consiste en que nos enseña qué y cómo observar en el campo."

– Karl Terzaghi

Agradecimiento

Quisiera expresar mi gratitud a todas las personas que hicieron posible esta investigación, al Ing. Jaime Bojorque por su constante ayuda a lo largo de este proyecto, con sugerencias e ideas que permitieron enriqueser el conocimiento y la investigación desarrollada. A la empresa Geo&Geo por la colaboración para desarrollar los temas en el campo de la geofísica. Al Ing. Edwin León por su colaboración brindando información acerca de las investigaciones que se realizan en el país.

De manera especial quisiera agradecer el apoyo incondicional de mis padres, familia y amigos que con su apoyo han sido un soporte en esta etapa de mi vida que concluye con esta investigación.

Alfredo Vladimir Vázquez Roura,
Cuenca, Julio 2013

Capítulo 1

Introducción general

1.1 Introducción

En la investigación de las ciencias exactas resulta imperativo comprender la interrelación entre el hombre y la naturaleza. Una aproximación elemental nos revela que la característica preponderante de esta interrelación es su dinamismo, su movimiento y su maravillosa demostración de la constante reconfiguración de las estructuras que nos gobiernan. Esta interrelación, nos introduce a una discusión sobre la inexorable voluntad humana de dominar las fuerzas de la naturaleza y, a su vez, sobre la poderosa respuesta que la naturaleza emite cada vez que el ser humano pretende su sometimiento. Nos enfrentamos, pues, a una interrelación ajena a la quietud y que, consecuentemente, abre las puertas para la investigación en una multiplicidad de áreas sobre las cuales hay infinitud de material por ser descubierto, interpretado y procesado.

En la dinámica antes expuesta, se planteó aquella cualidad humana plasmada en sus esfuerzos irrenunciables por lidiar con una naturaleza que nunca ha dejado de demostrar su fuerza y su dinamismo, causando incontables tragedias que afectan a la humanidad. Los efectos de esas monumentales demostraciones de fuerza se dejan ver principalmente en la pérdida de vidas humanas, aunque trascienden más allá y golpean economías, sociedades y hasta estructuras de gobernabilidad. Por lo tanto, es comprensible el deseo del ser humano, ya no de controlar esos efectos, sino de diseñar estrategias para sortearlos, mitigarlos, o inclusive adaptarnos a convivir con ellos. La clave, claro está, es la gestión adecuada de estos riesgos, que parta de una oportuna identificación, descripción, medición y monitoreo, permitiendo así la formulación de mecanismos adecuados para precautelar la seguridad de los seres humanos y de sus sistemas de vida.

El estudio de ciencias de la Tierra y los materiales que la componen, constituye en efecto una de las áreas desde las cuales se puede aportar al conocimiento científico y nos permite identificar apropiadamente sus amenazas, para el posterior diseño de mecanismos adecuados para su control.

El Ecuador, en su calidad de país atravesado por la Cordillera de los Andes, evidencia una morfología que lo hace susceptible a desastres naturales característicos de las zonas montañosas, siendo los movimientos de masa uno de los más recurrentes y potencialmente peligrosos. En efecto, los estudios realizados en base a los hechos demuestran que estos fenómenos merecen ser observados con especial atención, ya que su alto volumen de ocurrencia los hace más perjudiciales que terremotos, inundaciones, y erupciones volcánicas [33]. Caso especial fue el memorable desastre de La Josefina

(1993), en el que el deslizamiento de más de 200 millones de metros cúbicos de tierra del cerro Tamuga ocasionó el taponamiento de los ríos Cuenca y Jadán, dejando decenas de víctimas mortales, provocando millones de dólares en pérdidas económicas, y manteniendo en vilo al país entero. Aquel desafortunado desastre, en el que la ausencia de sistemas efectivos de detección, monitoreo y alerta significó una falla mortal. Es considerado por algunos analistas como el segundo desastre en magnitud en América del Sur, después de la catástrofe de Armero (1985) en el vecino país de Colombia.[36]

En ese contexto, el escenario que se presenta ante nosotros es retador por varios motivos. En primer lugar, los fatales antecedentes nos demuestran que la amenaza es latente, dado el dinamismo de la interrelación inicialmente citada. En segundo lugar, la escasez de medidas efectivas para el monitoreo de los movimientos de las tierras andinas es alarmante, lo cual nos obliga, como técnicos del tema, a profundizar en el estudio que se plantea. El tercer motivo es una consecuencia inherente del que lo precede, y radica en la complejidad de profundizar en la investigación de una temática que está en constante evolución, y que en América Latina aún se tiene mucho que estudiar.

El presente trabajo, titulado "Investigación de deslizamientos a través de métodos geofísicos y técnicas de monitoreo", pretende aportar de manera pragmática al estudio no solamente académico, sino eminentemente práctico, respecto de estos movimientos de masa y la respuesta y/o propuesta humana ante estos fenómenos, tal como se explicará posteriormente. El eje central de este trabajo gira en torno a la detección, la caracterización, el monitoreo, y el diseño e implementación de un sistema de alerta temprana ante un deslizamiento, sobre el cual se formulan cuatro cuestiones que aspiran a ser resueltas a posteriori: ¿dónde y cuándo ocurrirá el deslizamiento?, ¿qué magnitud tendrá?, ¿con qué velocidad se moverá?, ¿qué áreas afectará?.

En específico, la investigación busca analizar la factibilidad de aplicación del monitoreo de los movimientos de la tierra, ya sea en largos períodos o en tiempo real, y la inherente incorporación y utilización de técnicas geofísicas que permitan caracterizar los potenciales deslizamientos detectados gracias al monitoreo. Para este último efecto, el autor facilitará también, en formato Excel, una tabla que utiliza las variantes de velocidad y tipo de deslizamiento, para así proveer al analista una gama de técnicas adecuadas que se ajusten a las particularidades del movimiento.

Comprendido esto, conviene hacer una introducción sucinta a lo que contiene este estudio. Así, mientras el primer capítulo explica con detenimiento el propósito y los alcances del trabajo, el segundo capítulo ofrece una aproximación más completa al Estado del Arte referente a las técnicas de detección, caracterización y monitoreo que actualmente se utilizan en todo el mundo. Por un lado, se abordan los avances teóricos en la investigación; y, por otro, se proveen ejemplos que en la praxis permiten la ejecución de las diferentes técnicas que desencadenan, algunas de ellas, en sistemas de alerta temprana basados en monitoreo en tiempo real, que es precisamente el punto clave de esta propuesta. En el tercer capítulo, se presenta un análisis más profundo sobre las técnicas más adecuadas para estudiar los movimientos de masa, en base a las experiencias de empresas como el Servicio Geológico de los Estados Unidos "USGS" por sus siglas en ingles (United States Geological Survey) o de proyectos como SafeLand; análisis que conlleva a que en el cuarto capítulo se consolide toda la investigación en una aplicación real de estas técnicas, y de los conocimientos adquiridos.

En el último capítulo se da las conclusiones y recomendaciones del estudio, indicando ventajas y desventajas de distintas técnicas, además se dan a conocer los posibles estudios que se pueden realizar en este campo.

En la práctica, además del aporte académico y empírico, se busca un objetivo ulterior: llamar la atención sobre la necesidad de que la institucionalidad oficial y/o no-oficial del país ahonde en el monitoreo y el diseño de sistemas de alerta para deslizamientos, lo cual se traduciría en la reducción de riesgos inminentes para los seres humanos, así como la reducción o mitigación de potenciales pérdidas económicas y otras alteraciones que acompañan a estos desastres. Esta motivación ilustra a perfección aquella interrelación inicialmente citada, que a pesar de tener una impronta caótica, puede ambicionar a la concertación del ingenio humano y la majestuosidad de la naturaleza en torno al bienestar del planeta y sus seres vivos. Entendido el dinamismo de esa relación, se comprende también que ese constante movimiento y reconfiguración nos obliga a profundizar las investigaciones para comprender el funcionamiento del sistema en el que habitamos, y de esta manera, eventualmente, adaptarnos.

1.2 Antecedentes

Debido a que los movimientos de masa representan el mayor peligro hacia las vidas humanas, propiedad, infraestructura, etc., en todo el mundo. Se considera impresindible investigar, y establecer procedimientos y definir parámetros, que permitan tener control de estos fenómenos. En Europa por ejemplo durante el siglo 20 se han perdido 16.000 vidas y se han gastado en remediación más de 1.700 millones, según estadísticas del Centro para investigación de la epidemología de desastres "CRED" por sus siglas en inglés (Centre for Research on the Epidemology of Disasters).

En Estados Unidos el United States Geological Survey (USGS), califica a los movimientos en masa como los que representan mayor riesgo geológico, debido a que se provocan en los 50 estados del país, provocando entre 1 y 2 billones de daños y 25 fatalidades, en promedio cada año.

En el año 2007, con el objetivo de disminuir estas estadísticas en Europa, se creó el proyecto SafeLand compuesto de 27 instituciones de 13 paises europeos y cordinado por el Instituto Geotécnico Noruego o "NGI" por sus siglas en inglés (Norwegian Geotechnical Institute).

SafeLand tiene dentro de sus objetivos crear metodologías y guías que permitan elegir: estrategias de manejo y mitigación de riesgos; y medidas de prevención. Para esto SafeLand recopiló y analizó los métodos de caracterización y monitoreo de inestabilidades utilizados en varios proyectos alrededor del mundo. En el año 2012 SafeLand entrega el estudio final.

La USGS conduce sus investigaciones para responder preguntas como:

- ¿Dónde y cuándo ocurrirá un movimiento de masa?
- ¿Qué magnitud tendrá?
- ¿Con qué velocidad se moverá?
- ¿Qué áreas afectará?

Estas investigaciones buscan obtener mapas de riesgos precisos y poder predecir la ocurrencia de un movimiento en masa.

La información expuesta por SafeLand y el USGS es la base para esta investigación en el campo de técnicas de monitoreo.

Jaques Jenny [18] analiza los aportes de la geofísica en deslizamientos de tierra y zonas inestables; y Denis Jongmans y Stephane Garambois en el 2007 [12] realizan una revisión de todos las técnicas de investigación geofísica de movimientos de masa. Esta información en combinación con la información recopilada por SafeLand será la base en el análisis de los distintos métodos geofísicos existentes.

1.3 Objetivos

El objetivo de esta investigación es estudiar los métodos geofísicos y técnicas de monitoreo más adecuados para el estudio de movimientos en masa. Se busca también analizar los nuevos métodos que presenten las proyecciones más altas en cuanto a su desarrollo en el campo de los Fenómenos de Remoción en Masa (FRM). Con la información recopilada se busca desarrollar heramientas sencillas que faciliten la elección de los métodos más adecuados, basandose en una caracterización preliminar de la inestabilidad.

1.3.1 Objetivo general

Investigar el uso de los métodos geofísicos y técnicas de monitoreo en el análisis del deslizamiento y su aplicación en los deslizamientos, locales y regionales.

1.3.2 Objetivos específicos

- Conocer las distintas técnicas de monitoreo y monitoreo a tiempo real aplicados a los deslizamientos de tierra.
- Ampliar el conocimiento sobre las aplicaciones geofísicas dentro del campo de los deslizamientos y definir su aporte al modelamiento de los deslizamientos de tierra.
- Analizar los tipos de deslizamientos, y la relación de cada tipo con las distintas técnicas de monitoreo.
- Investigar la factibilidad de la aplicación de los métodos geofísicos y técnicas de monitoreo.

1.4 Justificación

Los Fenómenos de Remoción en Masa representan uno de los problemas fundamentales, que afectan a los seres humanos, puesto que son usualmente movimientos súbitos de enormes masas de tierra, que causan: muerte, daños materiales cuantiosos, taponamiento de ríos, pérdida de infraestructura, entre otros problemas económico-sociales.

Debido a su alto volumen de ocurrencia causan más daños, que terremotos e inundaciones [33]. Es aquí donde radica la importancia de su estudio y entendimiento de la dinámica de su movimiento, además de conocer los estudios que deben elaborarse y los sistemas de monitoreo, que nos permitan calibrar modelaciones y así tomar decisiones adecuadas en cuanto a las medidas de mitigación y al monitoreo a tiempo real que permitirá diseñar Sistemas de Alerta Temprana (SAT).

Dentro del país no se han implementado Sistemas de Alerta Temprana en base a un monitoreo en tiempo real. Al existir nuevas técnicas, que se están implementando en todo el mundo, se busca conocer ¿cuáles son?, ¿cuándo se aplican?, ¿en qué tipo de movimiento de masa?, ¿hasta qué velocidades permiten estudiar?. Así como también, analizar la factibilidad de su utilización.

Dentro de los estudios de un movimiento en masa, una parte fundamental para conocer las características de la masa deslizada es la Geofísica, puesto que nos permite conocer características: físicas, geométricas y mecánicas. El desarrollo de nuevas tecnologías y software han ampliado su uso en éste campo. Lo que se busca es conocer todos los métodos, que pueden aplicarse para entender la dinámica de los deslizamientos, la información que proporcionan, factores debemos tomar en cuenta, ventajas y desventajas de cada método, con el fin de identificar lo adecuado, para cada caso que se investiga.

Con el conocimiento de los métodos de monitoreo y los sistemas de alerta temprana, se podrá analizar la factibilidad de su implementación en los movimientos en masa en el país.

Analizando los diferentes métodos geofísicos, se determinará su utilidad en el campo de la dinámica de los movimientos en masa, la información que aportan para la modelación y recomendaciones.Esto permitirá elegir el método más adecuado tomando en cuenta los distintos tipos de movimientos en masa, su volumen, profundidad requerida de investigación, entre los más significativos.

1.5 Situación Actual

Actualmente es muy dificil detectar posibles movimientos en masa, mas bien, estos comienzan a ser estudiados cuando se presentan problemas. El capitulo 2 muestra los avances de las distintas tecnologias en: detección, caracterización y monitoreo de movimientos de masa.

Existen distintos métodos geofísicos, cada una mide una característica diferente, el análisis de estas permite identificar contrastes, estos contrastes deben ser utilizados en la caracterización de los movimientos en masa. El Capítulo 3 recopila los métodos geofísicos más modernos y analiza su utilización en el estudio de los FRM.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1 Movimientos de masa

2.1.1 Definición

Los términos: deslizamientos de tierra, Fenómenos de Remoción en Masa (FRM) o "landslides" en Inglés se definen "movimientos de masas de roca, residuos o tierra, hacia debajo de un talud" [11]. Terzaghi et al. [34], los define como:"Un desplazamiento rápido de una masa de roca, suelo residual o sedimentos de una ladera, en el cual el centro de gravedad de la masa que se desplaza, se mueve hacia abajo y hacia el exterior". Brunsden lo aborda como un proceso de remoción de masa que sirve para definir movimientos ladera abajo que no requieren el transporte de un medio como agua, aire o hielo. [6]. En 1977, Coates [7] Coates dice: "los deslizamientos representan una categoría de fenómenos incluidos dentro de los movimientos de remoción en masa, en los cuales la gravedad es la principal fuerza involucrada". Este movimiento debe ser moderadamente rápido e incluye desprendimiento, deslizamiento y flujo. La superficie del movimiento no es idéntica a un plano de ruptura y debe ocurrir ladera abajo. El material desplazado tiene límites bien definidos e incluye partes de regolita y de la roca madre.

Un deslizamiento es una amplia variedad de procesos, que resultan en movimientos de masas de distintos materiales, componen un talud o ladera y siguen la dirección de la gravedad. Los materiales afectados pueden ser: roca, suelo, rellenos o una combinación de estos. Principalmente estos materiales tienden a seguir los siguientes movimientos: caída, deslizamiento, flujo, dispersión, etc.

"Un talud o ladera es una masa de tierra que no es plana sino que presenta una pendiente o cambios significativos de altura" Suárez [33]. Una ladera se conforma mediante procesos estrictamente naturales, mientras que un talud con la acción antrópica. Dentro de los taludes podemos considerar 3 tipos: cortes de ladera, terraplenes y muros de contención.

Para definir las partes principales de un talud, se tomó las figuras 2.1.1 y 2.1.2 de Suárez [33], sus elementos se describen a continuación:

Pendiente: como su nombre lo indica, es la inclinación con respecto a la horizontal de la superficie del talud o ladera.

Altura: medida de la proyección vertical de la superficie tomada desde la base del talud o ladera hasta la cresta o parte más alta del talud o ladera.

Cresta: parte más alta de un talud o ladera donde se observa un cambio brusco de una pendiente alta a una casi horizontal.

Pie: corresponde a la parte inferior de un talud o ladera, donde existe un cambio brusco de una pendiente alta a una relativamente horizontal.

Nivel freático: usualmente se lo mide desde la cresta e indica la profundidad del nivel de agua.

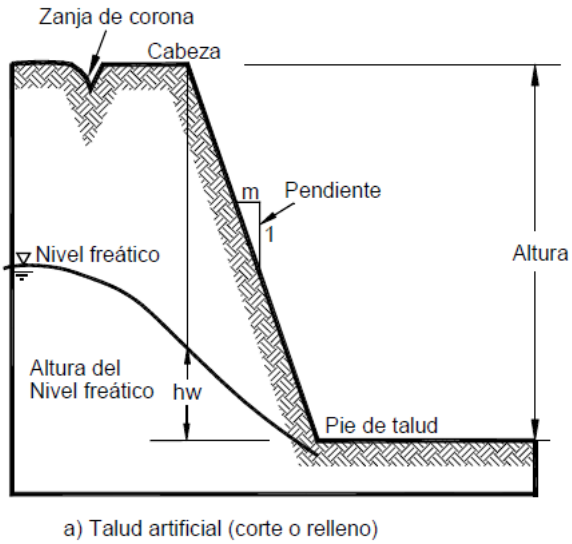

Figura 2.1.1: Talud artificial [33]

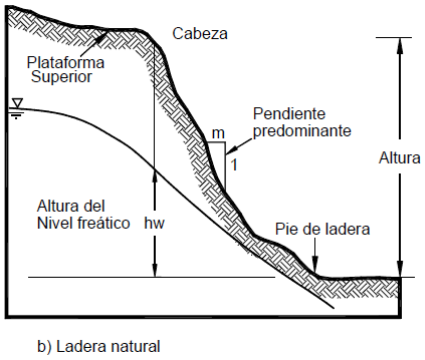

Figura 2.1.2: Ladera natural [33]

A los FRM se los puede clasificar principalmente utilizando estas variables antes mencionadas, es decir, el tipo de material presente y su movimiento.

Existen muchos análisis y clasificaciones de varios autores, que han buscado clasificar a los movimientos de tierra. Por ejemplo Cruden and Varnes [10] organizan a los deslizamientos por su tipo, tomando en cuenta 3 factores principalmente: la cinemática (aceleración y rapidez del movimiento), materiales involucrados y su estado de actividad. Por otro lado, Skempton and Hutchinson [32] y Hutchinson [17], utilizan criterios más geotécnicos para organizarlos.

Cada tipo de deslizamiento puede ser activado debido a distintos mecanismos tales como: saturación, sobrecarga, meteorización, pérdida de cohesión de materiales, cargas cíclicas, cambios geométricos, etc. También cada una de estas acciones generarán distintos efectos en cada tipo de inestabilidad dependiendo de: material, geometría, escala, estructura interna, etc.

Las masas suelen moverse según una superficie creada a lo largo de un área, donde las fuerzas motoras superaron las fuerzas resistentes, provocando una ruptura en la estructura interna del material, lo cual genera un movimiento de la masa sobre esta superficie, llamada superficie de falla.

La Asociación Internacional de Ingeniería Geológica, IAEG, diseñó un diagrama para representar las características morfológicas de un deslizamiento de tierras, el mismo que se muestra mediante la figura 2.1.3, cada elemento se describe a continuación:

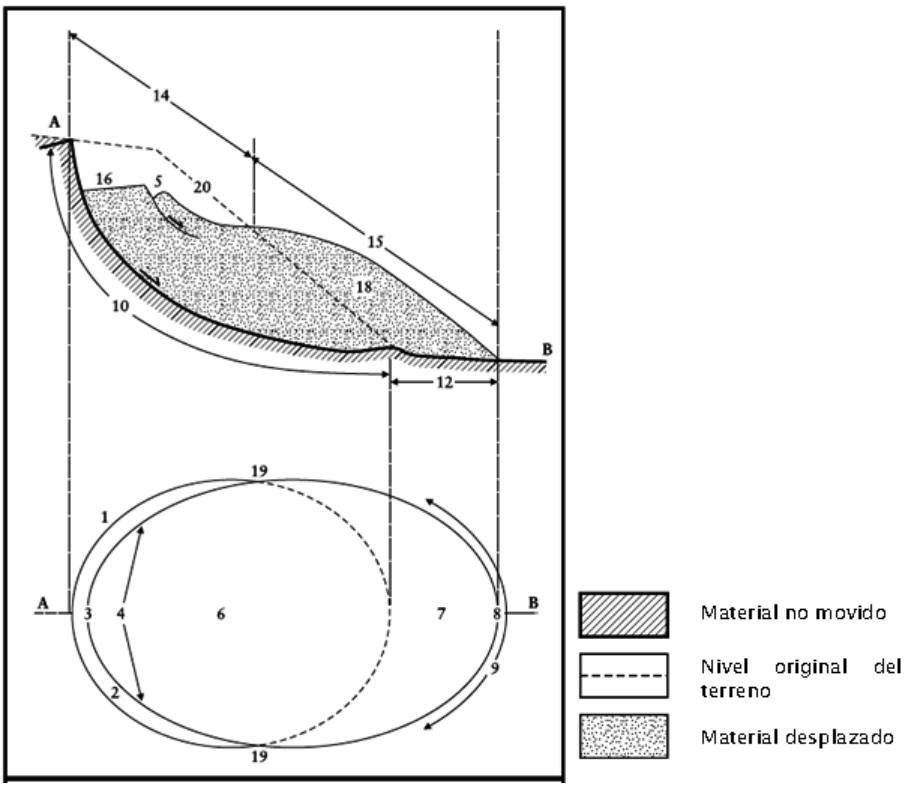

Figura 2.1.3: Diagrama deslizamiento de tierra [8]

1. Corona: se localiza en la parte superior al deslizamiento, siendo el contacto entre el escarpe y el material deslizado.
2. Escarpe principal: superficie casi vertical sobre la cual se ha desprendido la masa, se considera el inicio de la superficie de falla.
3. Margen superior: punto más alto de contacto entre el material deslizando y el escarpe principal.
4. Cabecera: contacto entre el material deslizado y el escarpe principal, a lo largo de la parte de la parte superior del deslizamiento.
5. Escarpe secundario: Un escarpe formado sobre la masa deslizada.

6. Cuerpo principal: material que se mueve sobre la superficie de falla, generalmente ha perdido sus propiedades geomecánicas, debido al movimiento producido.
7. Pie: material que ha sobrepasado el pie de la superficie de falla.
8. Punta del pie: lugar más lejano al cual llega la masa deslizada.
9. Margen inferior: Margen hasta donde llega el material deslizado.
10. Superficie de falla: superficie sobre la cual el material se desplaza, es la división entre el material no alterado y la masa deslizada.
11. Pie de superficie de falla (intersección de 10 y 20): Se ubica en la parte inferior del deslizamiento, siendo el contacto entre la superficie de falla y el terreno original, usualmente esta tapada con material deslizado.
12. Superficie de separación: parte de la superficie original del terreno que se desplaza más allá del pie de falla.
13. Material desplazado: material que cambio su posición original en el talud.
14. Zona de hundimiento: zona donde la altura del material deslizado es más baja que la original.
15. Zona de acumulación: zona donde la altura del material deslizado supera a la original.
16. Hundimiento: cuando la masa está bajo la superficie original.
17. Masa hundida: volumen que se encuentra entre la superficie original y la superficie de falla.
18. Acumulación: volumen que se encuentra sobre la superficie original.
19. Flancos: son los límites a ambos lados de la masa deslizada, para nombrarlos (derecho o izquierdo), se debe mirar al deslizamiento desde la corona hacia el pie.
20. Superficie original del terreno.

2.1.2 Clasificación de movimientos

En la figura 2.1.4 se presenta la clasificación propuesta por Cruden and Varnes [10].

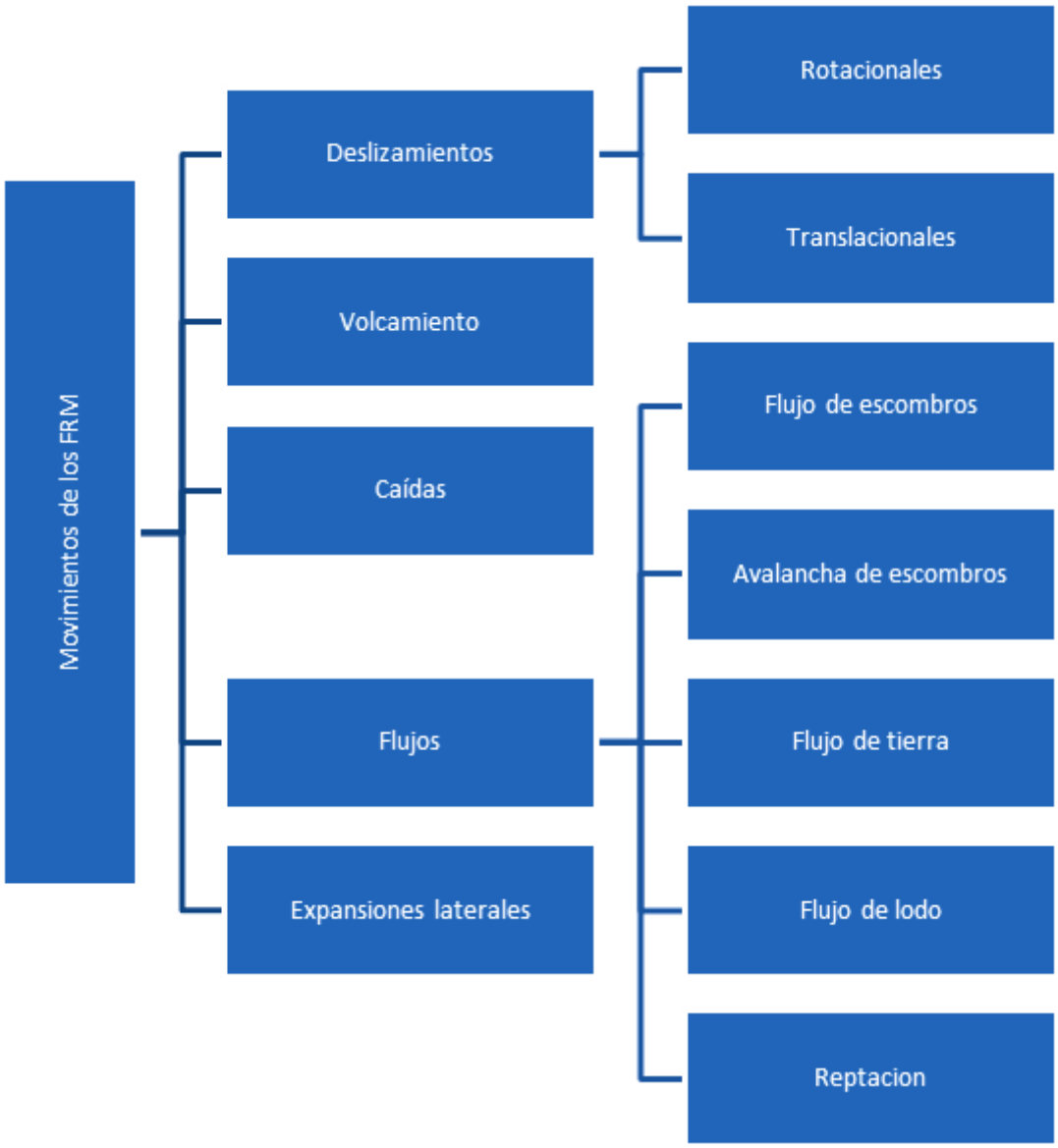

Figura 2.1.4: Clasificación de FRM Cruden and Varnes [10]

Cada tipo de deslizamientos se describe a continuación, en base a la información recopilada tanto del proyecto SafeLand [29] y Suárez [33].

Deslizamientos

Movimiento caracterizado por la presencia de una zona débil (superficie de falla), que divide la masa deslizada del material base inmóvil como muestra la figura 2.1.5 Pueden ser rotacionales o translacionales o una combinación de estos, llamados complejos. Puede estar compuesta de una sola masa en movimiento o de varias semi-independientes, que siguen la dirección de la superficie de falla generada. Es importante determinar el tipo de deslizamiento, puesto que cada tipo debe ser analizado con distintos métodos. Además tendrán diferentes medidas de estabilización y métodos de monitoreo. [29]

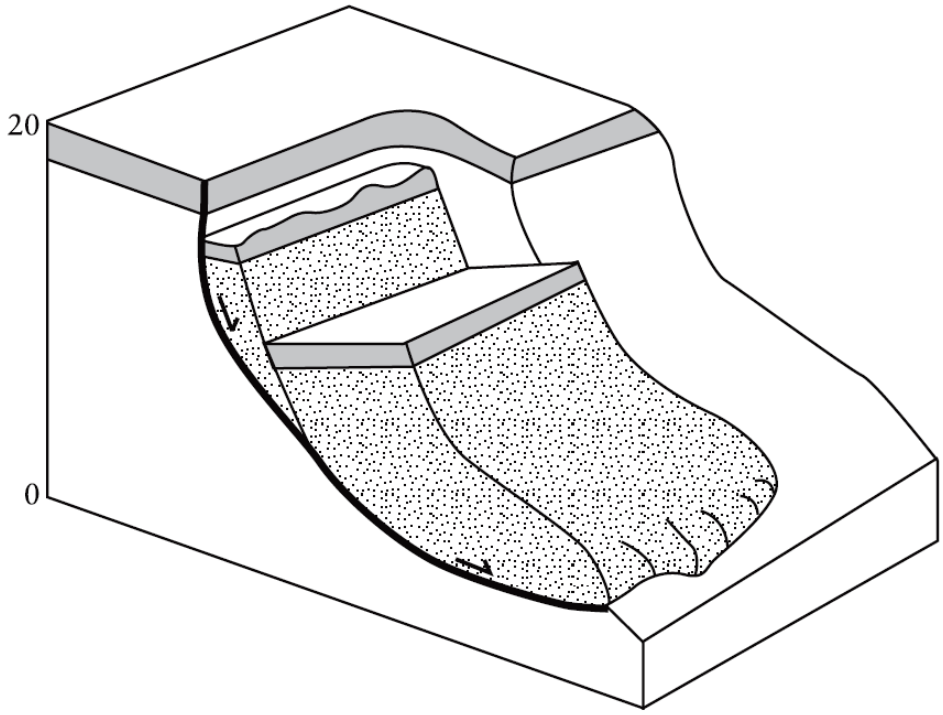

Figura 2.1.5: Deslizamiento [8]

1. Rotacionales: la superficie de ruptura tiene una forma cóncava hacia arriba, generando un movimiento rotacional de la masa con respecto a un centro de giro, el cual está sobre el centro de masa del cuerpo deslizado. Este movimiento de rotación genera una forma típica con un hundimiento en el escarpe principal, y un levantamiento en la parte inferior al pie de la falla, lo que origina un espacio previo a este levantamiento donde puede acumularse agua. [29]

2. Translacionales: La masa deslizada tiene un movimiento paralelo con respecto a la superficie de falla. [33]

Volcamiento

Tienen un movimiento rotacional hacia adelante (volcamiento), son rocas o unidades de suelo que caen, giran alrededor de un eje que se encuentra bajo el centro de gravedad de las masas que rotan. Dependen mucho de las discontinuidades o grietas existentes, que generan planos de debilidad y agentes erosivos actuarán para desencadenar el vuelco. [33] Ver figura 2.1.6.

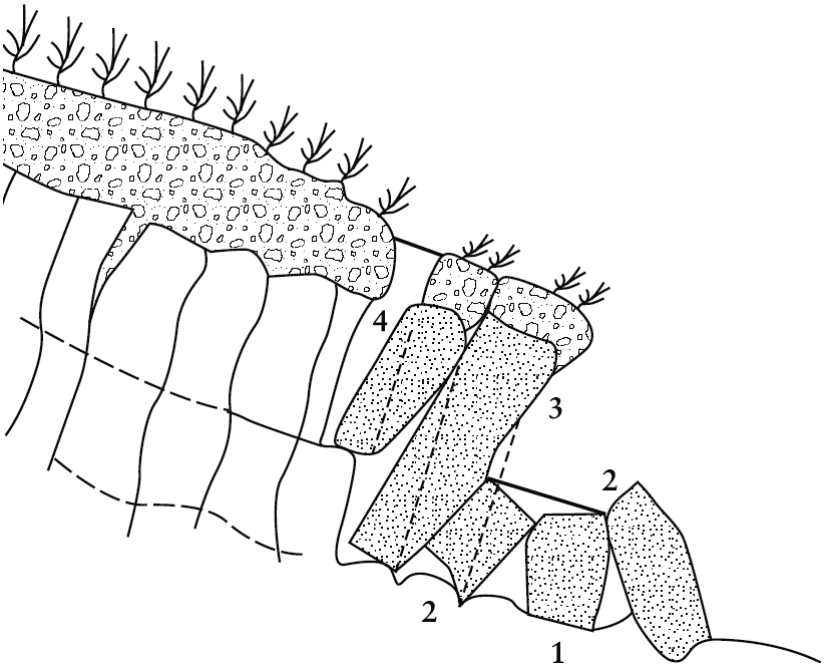

Figura 2.1.6: Volcamiento [8]

Caídas

Desprendimiento súbito de masa de roca o suelo, el descenso es por caída libre, tanto rodando como por rebote como se observa en la figura 2.1.7. Comúnmente se dan en taludes casi verticales. [29]

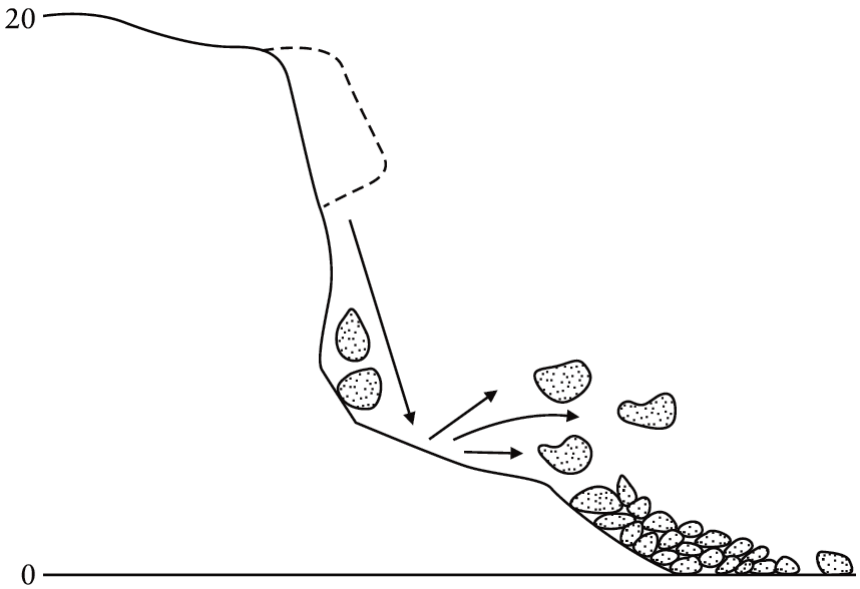

Figura 2.1.7: Caídas [8]

Flujos

Son masas como se ve en la figura 2.1.8 que siguen la dirección de la gravedad y responden a las leyes de la mecánica de fluidos, generando un movimiento turbulento de la masa. Su velocidad varía desde extremadamente lento hasta rápida, su profundidad es variable desde centímetros hasta varios metros. [29]
Los flujos se clasifican en:

1. Flujo de escombros de tierra o de lodo.
2. Avalancha de escombros.
3. Reptación: Usualmente se mide en $cm/\text{año}$, afecta a grandes áreas de terrenos. Se produce en pendientes medias o bajas.

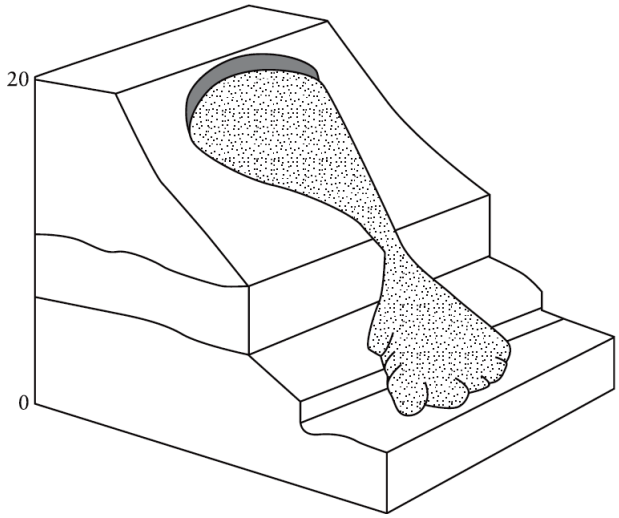

Figura 2.1.8: Flujos [8]

Expansiones laterales

Se producen principalmente en terrenos relativamente planos con fallas a tensión del terreno, prácticamente se da en sedimentos de arena y limo debido a la licuefacción. También causan problemas si están bajo un estrato duro, ya que provocan hundimientos, fracturas o también pueden ser una superficie de deslizamiento. [29]

La figura 2.1.9 ilustra un ejemplo de este caso.

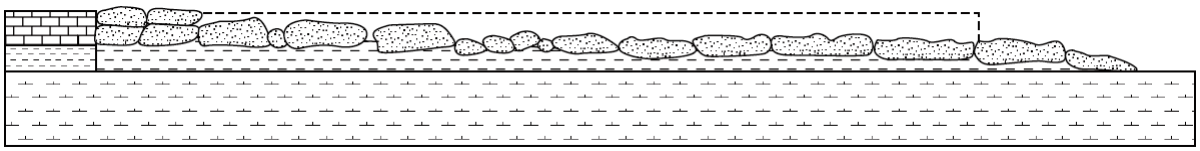

Figura 2.1.9: Expansiones laterales [8]

2.1.3 Factores desencadenantes de FRM

Los movimientos de tierra se pueden dar por distintos factores como: Geológicos, morfológicos, antrópicos, físicos, etc. En esta parte se busca definir a los desencadenantes como estímulos externos, que afectan inmediatamente al estado de movimiento de los FRM. No todos los factores desencadenantes que se describen son aplicables en nuestro medio, puesto que son tomados de SafeLand [29], estos mecanismos desencadenantes se basan en los problemas en Europa. Se los describe como un estado del arte, para luego analizar los que pueden afectar en nuestro medio.

Precipitación

Es bien conocida la acción de las lluvias sobre los movimientos de tierra, principalmente los tipos de lluvia que más afectan para el desencadenamiento de movimientos según SafeLand [29] son de muy rara ocurrencia, es decir, eventos con periodos de retorno muy grandes tales como:

- Lluvias de muy larga duración con intensidades bajas.
- Lluvias tipo tormentas eléctricas, donde existe una intensidad muy alta, pero duran poco.
- Una combinación de ambas.

La lluvia satura el material, lo cual conlleva una pérdida de resistencia efectiva, debido al movimiento del agua por los poros de los materiales (percolación). Además aumenta la densidad de los materiales volviéndolos más pesados, altera las características geomecánicas de los materiales, cambia el nivel freático, etc. Por estas razones, la precipitación es considerada una de las principales causas que provocan los deslizamientos.

Erosión

Se ocasiona principalmente cuando los ríos erosionan el pie de una ladera o talud, especialmente durante inundaciones o eventos que transportan grandes cantidades de agua repentinamente. En las zonas costaneras el mar genera erosiones en la parte baja de los acantilados. Además, pueden provocar flujo de escombros debido a las crecientes de agua, que originan una erosión superficial. [29]

- La erosión del pie de talud genera una reducción de estabilidad debido a la pérdida de peso de material que favorece la estabilidad y al aumento de la gradiente del talud.
- Si se combina la erosión con diaclasamiento, se dan los volcamientos.

Derretimiento de nieve

No es un caso frecuente en nuestro País, pero puede afectar a zonas montañosas muy altas. SafeLand [29] analiza que se producen cuando existen cambios bruscos de temperatura, los cuales derriten las capas de nieve, provocando infiltraciones hasta estratos inferiores que están congelados y producen un aumento considerable en la presión de poros del suelo; este efecto puede acelerarse si existe precipitación.

Desgaste

Se produce principalmente en la roca inalterada cuando se ve afectado por procesos erosivos durante períodos prolongados, provocando una pérdida de capacidades geomecánicas, que llevan a la formación de regolitos. Esta capa superficial es la que puede deslizarse. [29]

Sismos

Muchos sitios que son propensos a deslizarse, pueden verse afectados por la acción de sismos. SafeLand [29] destaca que la ocurrencia de estas sacudidas de la tierra aumenta la probabilidad de ocurrencia de un FRM principalmente debido a 3 factores:

- Las sacudidas pueden llevar a las masas de tierra o suelo a romper las fuerzas de inercia.
- Los materiales pueden reacomodarse y dilatarse permitiendo una rápida infiltración.
- Pueden generar fallas internas de los materiales como la licuefacción.

Procesos volcánicos

Se refieren principalmente a la posibilidad de generación de lahares en los alrededores del volcán.

2.1.4 Clasificación de deslizamientos por su velocidad

En el cuadro 2.1.1 se muestra la clasificación por velocidades según Cruden and Varnes [10] y su relación con tipos de FRM y su poder destructivo tomado de Keeper [21]. El cuadro utiliza información de SafeLand [29] y Andino [5].

Clasif. de velocidad	**Descripción**	**Vel. (mm/seg)**	**Vel. típica**	**Tipos de FRM asociados**	**Importancia de la probabilidad destructiva**
7	Ext. rápido			Caída de rocas, avalanchas de rocas, flujos	Catástrofe debido a la violencia, escape poco probable
		$5 * 10^3$	5 m/s		
6	Muy rápido			Deslizamientos de rocas, avalanchas de suelos, Propagación lateral, flujos rápidos de suelos	Escape de algunas personas es posible
		$5 * 10^1$	3 m/min		
5	Rápido			Desplome de suelo, deslizamiento de bloques de suelo	Evacuación y escape posible, perdida de elementos estructurales y equipos
		$5 * 10^{-1}$	1.8 m/h		
4	Moderada			Desplome de roca, deslizamiento de roca, flujos lentos de tierra, deslizamiento de bloques de suelo	Algunas estructuras deben tener mantenimiento rutinario
		$5 * 10^{-3}$	13 m/mes		
3	Lenta			Desplome de rocas y suelo, flujos lentos de suelo	Pueden realizarse construcciones de remediación a lo largo del movimiento, solo es necesario mantenimiento.
		$5 * 10^{-5}$	1.6 $m/año$		
2	Muy lenta			Flujos lentos de tierra	No genera daños en estructuras permanentes
		$5 * 10^{-7}$	16 $mm/año$		
1	Ext. lenta				

Cuadro 2.1.1: Clasificación de velocidades según Cruden and Varnes [10]

2.2 Técnicas de detección, caracterización y monitoreo a largo plazo de movimientos de masa

2.2.1 Introducción

El monitoreo de un FRM busca conocer de manera más detallada el comportamiento de la masa que se desliza lo largo del tiempo y medir parámetros geotécnicos que rigen el comportamiento de los mecanismos de falla [33]. Permite generar soluciones adecuadas y efectivas, además de crear sistemas de monitoreo en tiempo real con avisos tempranos que buscan evitar pérdidas humanas. Asimismo, un conocimiento detallado de la dinámica del deslizamiento ayuda a organizar con previsión planes de emergencia, que proporcionarán de manera efectiva a la toma rápida de decisiones para sobrellevar los efectos de las inestabilidades.

Para realizar la caracterización y monitoreo, se cuentan con distintas técnicas e instrumentos, que brindan información detallada. Se han tomado los métodos más modernos y destacados por SafeLand [29] y se representan mediante un cuadro sinóptico en la figura 2.2.1.

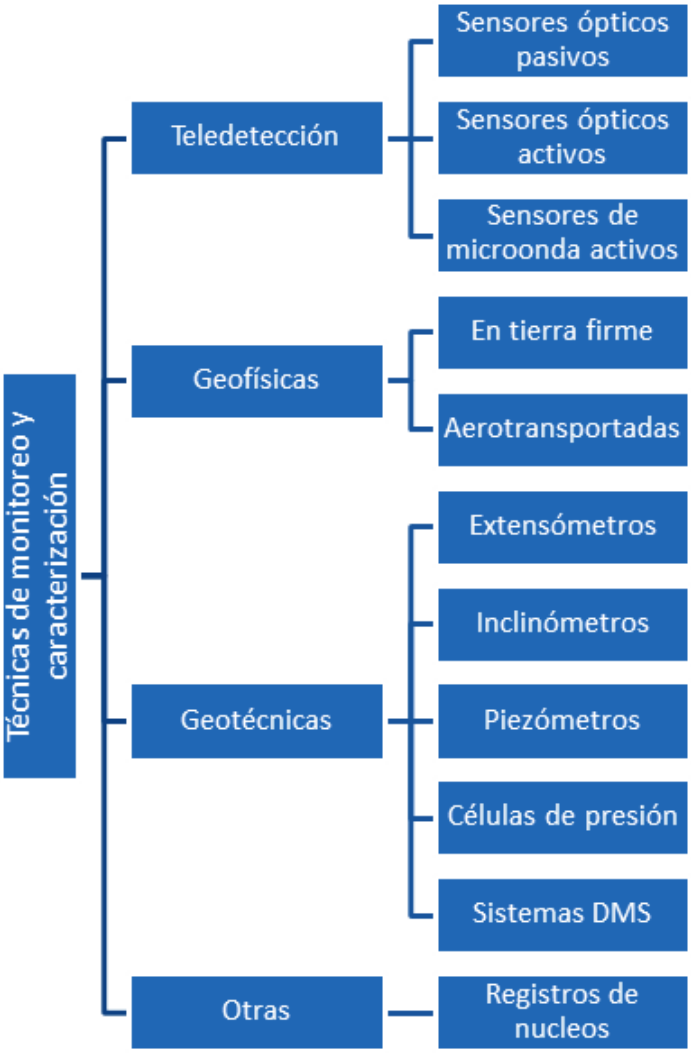

Figura 2.2.1: Tecnicas de caracterización y monitoreo [29]

Existe un gran avance en las técnicas de caracterización y monitoreo, principalmente en el uso de las imágenes satelitales de alta resolución y teledetección con láser. Estos avances no solo han permitido monitorear las inestabilidades, sino también caracterizarlas. Por ejemplo A-DInSAR, un sistema de Radares de alta resolución, brinda información muy detallada y confiable de los movimientos en pendiente, a escala regional.

A continuación se describirán todos los elementos mostrados en la figura 2.2.1, resaltando sus aplicaciones en el campo de caracterización y monitoreo de los FRM.

2.2.2 Teledetección

También llamada detección remota, son las diversas técnicas para adquirir información en el campo de la Ingeniería Civil y Geotécnica; las técnicas buscan caracterizar el terreno proporcionando información como: topografía, cobertura, dinámica, etc. Estas técnicas brindan información en diferentes escalas y utilizando distintos métodos.

Un sistema de teledetección se compone principalmente de 3 partes: foco energético, superficie terrestre y sensor. Estos sensores se pueden clasificar en función de la fuente emisora de energía, es decir, si un sensor utiliza una fuente natural como el sol, será un sensor pasivo, por el contrario, si el sensor también es un emisor de energía electromagnética, este será un sensor activo.

Sensores ópticos pasivos

Métodos fotográficos, óptico-electrónicos y de antena. Estos sensores captan principalmente la radiación electromagnética generada por el sol.

Imágenes tomadas en tierra firme Los sensores han avanzado a la par del desarrollo tecnológico de las cámaras digitales. Recientemente los sistemas costosos y análogos se han convertido en obsoletos con la llegada de cámaras de alta resolución (+ 12Mega-pixels), a costos adecuados. Las cámaras que tienen una buena relación costo-beneficio en el campo de la fotogrametría son las llamadas "DSLR", cámaras digitales con lentes intercambiables con una excelente calidad de imágenes.

SafeLand [29] en base a la investigación de (Chandler et al.,2005) recomienda que para lograr generar modelos de superficies digitales, "DSM" por sus siglas en Inglés (Digital Surface Model), de alta precisión, se debe tener un cuenta las correcciones debido a las distorsiones geométricas, sin embargo, para un análisis fotogramétrico son muy eficientes. SafeLand [29] destaca los trabajos como: determinar discontinuidades de macizos rocosos (Roncella, 2005), evaluar cambios en ríos (Chandler, 2002), erosión de acantilados (Lim, 2008) y monitoreo de deslizamientos (Cardenal, 2008).

SafeLand [29] resalta las opiniones de autores como Arattano y Marchi (2000), Imaizumi (2005) o Zakeri (2008), quienes hablan de la utilización de las cámaras en procesos geológicos, que tienen velocidades muy altas, como por ejemplo, flujo de escombros. La fotogrametría será importante para realizar observaciones durante el trabajo de oficina.

SafeLand [29], en base a Costa y Willliams (1984), da a conocer que para entender la dinámica de flujos es recomendable utilizar videos. Esto permite conocer su movimiento, calibrar modelos numéricos, validar otros sistemas de monitoreo, entender los riesgos y peligros y determinar velocidades superficiales que este tipo de movimientos pueden generar.

SafeLand [29] destaca a Mantovani (2000) quien ha utilizado videos dentro de los sistemas de monitoreo en taludes en condiciones críticas. Debido a la falta de información en condiciones como: la noche, niebla, lluvias, etc., estos métodos se deben utilizar como complementarios a los sistemas de alerta temprana.

SafeLand [29] da a conocer sobre los avances en la telecomunicación que resalta Yin (2007). Estos han permitido crear sistemas económicos que no buscan ser extremamente precisos, sin embargo permiten desarrollar sistemas de alerta temprana rápidos y flexibles, además están en desarrollo sistemas de monitoreo en tiempo real. Travelletti (2009) demostró con una correlación de fotografías, tomadas cada hora, que se tiene una buena correlación comparando con medidas de GPS.

La mayoría de sensores en este campo captan los espectros visibles de luz, en cuanto a este problema SafeLand [29] muestra el trabajo de Brandy y Rowell (1986), quienes utilizan espectros infrarrojos cercanos o "NIR" por sus siglas en Inglés (Near Infrared) para el estudio de fracturas de rocas en Laboratorio, pero no se han encontrado aplicaciones a gran escala utilizando "NIR".

Tanto las fotografías como los videos permiten conocer la evolución de las inestabilidades, puesto que se pueden comparar varios momentos en amplios períodos de tiempo. Mediante análisis se puede reconstruir los procesos de falla, identificar la dinámica del movimiento, procesos geológicos en macizos rocosos, etc.

La figura 2.2.2 muestra la evolución de los equipos de fotografía que se usan en el campo del estudio de FRM.

Figura 2.2.2: Equipos de fotografía utilizados [29]

Imágenes aéreas Al igual que las fotografías tomadas en tierra, el avance de las cámaras digitales han dado buenos beneficios, pero todavía no llegan a la calidad obtenida por estos sistemas.

SafeLand [29] basado en Cramer (2009) explica que la Sociedad Alemana de Fotogrametría lidera una muy buena iniciativa para la evaluación de los nuevos sistemas existentes. Usualmente en los sistemas analógicos se utilizan películas especiales llamadas pancromáticas, que permiten captar todas las longitudes de onda del espectro visible, en blanco y negro. También se utilizan distintos

tipos de películas y filtros, que permiten captar espectros de luz específicos, como el infrarrojo, que permite observar la diferente vegetación, cuerpos de agua, tipos de suelo, etc.

Según SafeLand [29] los avances en equipos aéreos no tripulados o DROIDS, han permitido disminuir los costos de adquisición de imágenes. A estos vehículos aéreos se los dota de sistemas económicos de grabación, que permiten realizar adquisiciones con resoluciones sub-decimétricas, además de sistemas de posicionamiento global GPS, que permiten geo-referenciar con mucha precisión la información adquirida. Son equipos de alta flexibilidad de trabajo, bajo costo de operación y una resolución adecuada, para monitorear inestabilidades locales.

Para interpretar las imágenes aéreas, la experiencia es la principal herramienta que existe. Se debe tomar en cuenta: color, forma, patrones, texturas, tonos, sombras, etc. También se debe considerar la utilización de varias fotografías y realizar un análisis a lo largo del tiempo. El uso del estereoscopio permite simular una vista en tercera dimensión, logrando observar con claridad la profundidad y realizar interpretaciones adecuadas y con mayor certeza.

El ojo humano no es sensible a todos los espectros de luz, por lo que se han desarrollado métodos automáticos de interpretación. SafeLand [29] indica que para poder implementar estos métodos se debe tomar en cuenta que existen algunas diferencias para la adquisición y debe realizarse un pre-proceso de la fotografía.

Utilizando la fotogrametría se puede elaborar modelos digitales precisos del terreno, incluso se los compara con los realizados mediante escáneres LIDAR. SafeLand [29] en base a Weber y Herrmann (2000) destaca la utilización de modelos de terreno digital "DTM" por sus siglas en inglés (Digital Terrain Model), elaborados a lo largo del tiempo, puesto que estos permiten realizar comparaciones, logrando aproximar los volúmenes que se han desplazado. SafeLand [29] en base a Brückl (2006) agrega, que los desplazamientos y velocidades se pueden determinar si se posee información geofísica.

La figura 2.2.3 tomada de SafeLand [29] indica un mapa de desplazamientos verticales al Oeste de Bélgica, creado por Dewitte (2008) mediante una comparación entre 2 DTMs generados a partir de fotogrametría, con imágenes desde 1973 a 1996.

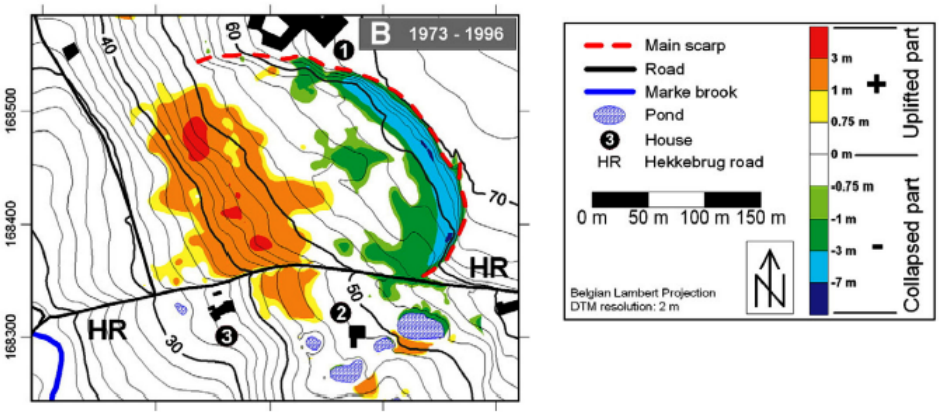

Figura 2.2.3: Mapa de deslizamientos verticales [29]

Imágenes satelitales El crecimiento mundial y las necesidades que generan han desarrollado el campo de los satélites. Su tecnología ha avanzado y sobre todo el número que están disponibles. SafeLand [29] con base en los estudios de Tatem (2008) señala que existían más de 150 satélites en órbita, además basado en Euroconsult (2009) da a conocer que se realizarán 250 lanzamientos, tanto de satélites públicos como privados entre el 2009 y 2018. La mayoría de estos satélites cuentan con sensores pasivos, que captan la radiación electromagnética de la superficie terrestre.

SafeLand [29] destaca los comentarios de Haeberlin (2005) quien resalta la importancia de nuevos sensores, que permiten: obtener imágenes con mayores resoluciones, inventariar grandes deslizamientos e identificar flujos de lodo y escombros.
Existen satélites que proporcionan información para realizar levantamientos detallados de hasta 0.25 m de resolución, lo cual indica que estos métodos han superado la calidad de la fotografía aérea. Para su análisis comparten los mismos problemas.

Debido a su expansión, los costos de imágenes de alta resolución han disminuido y han mejorado los "DSM". SafeLand [29] resalta la opinión de Dewitte (2008) y Walstra (2007), quienes piensan que aunque la mayoría de investigaciones fotogramétricas de deslizamientos, movimientos de volúmenes y deformaciones, se siguen basando en fotografías aéreas debido a su alta resolución. El desarrollo de sensores de muy alta resolución "VHR" (Very High Resolution) con distancias de muestreo "GSD" (Ground Sampling Distance) más pequeñas, irán gradualmente reemplazándolas en el futuro.

Con la creciente implantación de sensores VHR, se han desarrollado muchas herramientas informáticas llamadas Análisis de imagen basado en objetos o OBIA por sus siglas en Inglés (Objet-Based Image Analysis). SafeLand [29] destaca la utilización de este software durante la última década en varios campos, como de las inestabilidades, presentando potencial tanto para inventariar los deslizamientos como para monitorearlos. el cuadro 2.2.1 se basa en la información de SafeLand [29] e indica las investigaciones de varios autores, que han demostrado su eficiencia.

Investigación	**Autor**	**Año**
Detección de lineamientos geológicos	Mavrantza y Argialas	2008
Detección de fallas	Marpu	2008
Mapeo geomorfológico	Van Asselen y Seimonsbergen	2006
Cambios de cobertura del suelo	Riedel	2008
Evaluación indirecta de la vulnerabilidad social	Ebert	2009

Cuadro 2.2.1: Investigaciones aplicando imágenes satelitales [29]

SafeLand [29] resalta el trabajo de Blaschke (2010) quien realizó una revisión de las investigaciones que se están desarrollando alrededor de OBIA y destaca que la mayoría de usos están en el análisis de la cobertura del suelo clasificaciones por usos del suelo con buenos resultados en los entornos urbanos.

La figura 2.2.4 tomada de SafeLand [29] muestra el resultado de la segmentación de una imagen luego del deslizamiento en Wenchuan, China (2008). Las flechas indican la dirección de deslizamientos de rocas.

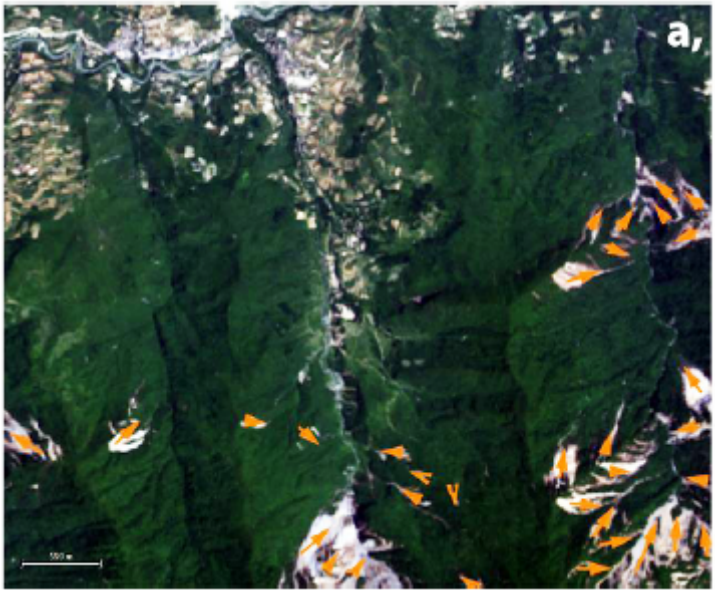

Figura 2.2.4: Deslizamiento de Wenchuan, China (2008) [29]

Aunque OBIA todavía está creciendo alrededor del campo de los deslizamientos, SafeLand [29] está investigando en adaptar OBIA a diferentes campos de su interés como por ejemplo en un sistema semi-automático o automático, que permita inventariar los deslizamientos.

Sensores ópticos activos: RADAR y LIDAR

El radar emite un haz energético, que se refleja sobre la superficie para capturar estas ondas reflejadas y luego analizarlas. El LIDAR es un sensor, que envía pulsos de luz ultravioleta e infrarrojo y genera información relacionada sobre el tipo de partículas en la zona.

Los láseres son instrumentos que emiten un haz o una serie de pulsos de radiación electromagnética. Para poder utilizar estos sensores se debe tener una vista directa con el punto que se quiere medir. Comúnmente, en nuestro medio, se utilizan reflectores llamados prismas, que devuelven la señal enviada por el equipo.

Técnicas más modernas se realizan utilizando equipos que no necesitan reflectores artificiales, es decir, utilizan el reflejo que genera la superficie del terreno, lo cual ha facilitado la obtención de información en el campo.

Medición de distancia electrónica

Para realizar estas mediciones se usa un instrumento llamado medidor electrónico de distancia o EDM por sus siglas en inglés (Electronic Distance Meter). Este instrumento envía y recibe un láser y permite conocer la distancia luego de analizar las propiedades de la señal reflejada. Cuando se combina esta información con ángulos y coordenadas en 3 dimensiones (x, y, z) se puede obtener la ubicación espacial de un punto.

Las estaciones totales son las más utilizadas, por cuanto poseen un costo adecuado y una precisión alta, de milímetros. Además, permiten realizar lecturas de 1 km. (reflejo de la superficie) hasta 5 km

(usando reflectores artificiales). Es importante manifestar que, cuando se usan prismas, las distancias a medirse pueden ser mayores y la información más precisa.

Su utilización en el monitoreo se aplica para analizar deformaciones en largos periodos de tiempo, es decir, cambios producidos cada mes o cada año. Además poseen una resolución de alrededor de 50-100 puntos por Km^2, aunque para el monitoreo se recomienda entre 20 y 30 puntos de control, [29].

El cuadro 2.2.2 indica los principales modelos comerciales disponibles según USACE (2007):

Equipo	**Características**
Estación total con reflector	Permite adquisiciones de hasta 5 km, 2 operarios son necesarios, y necesita de un elemento reflector.
Estación total sin reflector	Adquisiciones de hasta 1 km, 1 persona puede realizar el levantamiento de información, utiliza superficies naturales para obtener información.
Estación total automática	No necesita un operador para la toma de datos, y puede trabajar en modo con reflector y sin reflector.

Cuadro 2.2.2: Comparación de distintas estaciones totales [29]

Generación de DEM Los modelos de elevación digitales o DEM por sus siglas en inglés (Digital Elevation Model) y los mapas topográficos son representaciones del terreno en 2D y 3D. Son la base para comenzar un estudio de una inestabilidad, también permite realizar un análisis previo del estado actual y caracterizar. Son el punto base para un monitoreo.

Desplazamientos de un FRM Aunque existen muchos métodos para el estudio de los desplazamientos de un deslizamiento, el uso de una estación total es lo más económico, preciso, de fácil utilización y disponible en el medio. También el EDM puede utilizarse para el monitoreo en tiempo real con detalles a nivel del milímetro. La utilización de puntos fijos de medición ha permitido la implementación de sistemas de alerta temprana. Otra ventaja es que puede utilizar el reflejo de superficies naturales, SafeLand [29] destaca el trabajo de Mikos (2005) quien emplea estos métodos en zonas de mucha actividad de caída de rocas y da a conocer la importancia de no poner en riesgo a Personas e instrumentos durante el monitoreo.

Monitoreo en tiempo real Se utiliza principalmente una estación total robótica, que además permite alta precisión. SafeLand [29] en base a Saito (1969) y Fukuzono (1985) indica la utilización de estos equipos en la predicción de fallas, correlacionando información como desplazamientos, tiempo, precipitación, etc. Una de las ventajas, que permiten los sistemas automatizados de EDM, es que la información puede ser transmitida vía satélite a una central de control, permitiendo analizar los datos casi instantáneamente.

La figura 2.2.5 muestra un ejemplo de correlación que muestra SafeLand [29], es un gráfico desplazamientos vs. tiempo, para diferentes puntos de control medidos con una estación total electrónica. Se observa la influencia del agua en la velocidad del movimiento.

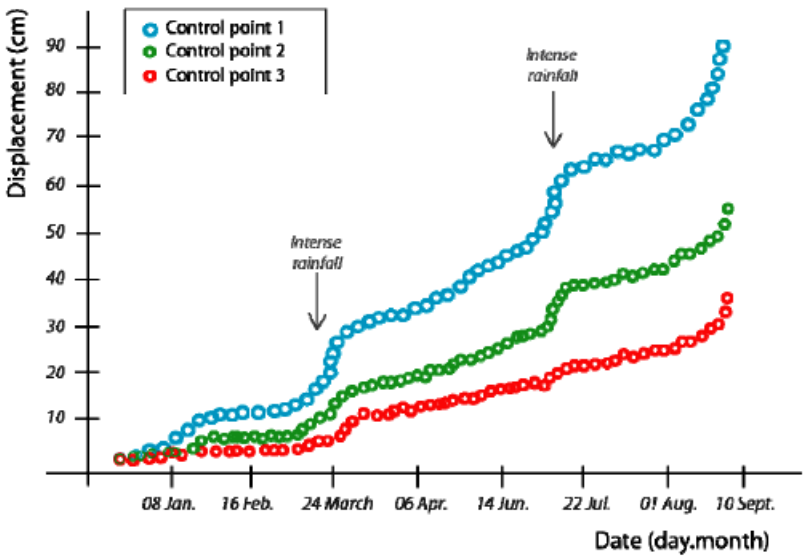

Figura 2.2.5: Gráfico de desplazamiento vs. velocidad [29]

Escáner laser terrestre
Cuando se monta un sistema LIDAR en una plataforma que se desplaza en tierra, a este instrumento se lo llama, escáner laser terrestre o TLS. Esta nueva tecnología permite adquirir información de alta precisión (mm) a velocidades muy altas y en todas las direcciones (3D). Son técnicas modernas, comenzaron a utilizarse en la década de los 90´s y se ha aprovechado para la caracterización y monitoreo de deslizamientos.

Es un equipo que envía y recibe pulsos de láser infrarrojo para el cálculo de distancias, posee un sistema de espejos y de rotación, que a diferencia de los EDM, permite capturar miles de puntos por minuto y realizar levantamientos de amplias áreas de terreno con precisiones milimétricas y altas velocidades.

El uso de los sistemas TLS ha ayudado a entender de mejor manera a los FRM, puesto que se han desarrollado muchos aspectos como: la generación de DEM de alta precisión y resolución, caracterización de discontinuidades, detección de desplazamientos y predicción de detección de caída de rocas, SafeLand [29].

Mapeo Poder delimitar el área de un deslizamiento, cómo se desplaza, la geometría del deslizamiento, identificar fracturas, identificar partes del FRM, etc. Es importante como base para poder entender la dinámica de la inestabilidad en estudio. Estos sistemas sobresalen por el detalle, precisión y velocidad de adquisición de la información.

Modelamiento Los DEM son la base de todo análisis para: definir la trayectoria de la caída de rocas, modelamiento de los caminos de flujo de escombros, cálculos de factores de seguridad, equilibrio límite, etc.

La figura 2.2.6 se tomó de SafeLand [29], muestra un modelamiento de flujo de escombros realizado por Horton (2008).

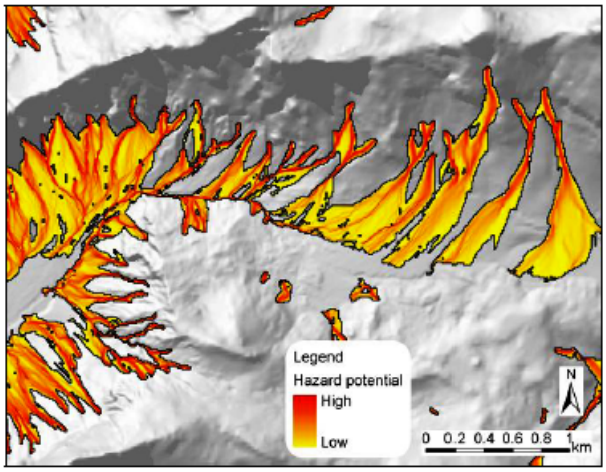

Figura 2.2.6: Modelamiento de flujo de escombros [29]

Análisis estructural Los DEM generados también contribuyen con el análisis de las familias de discontinuidades, existen software como Coltop 3D, que calculan la orientación de las discontinuidades basados en la información de TLS.

Desplazamientos del deslizamiento Se toma la información adquirida a lo largo de un amplio período, con esta se puede analizar los desplazamientos de la masa.

Se pueden comparar varios DEMs generados directamente, los puntos adquiridos o la transformación de toda la masa rígida.

La figura 2.2.7 muestra los desplazamientos en Val Canaria, Ticino, Alpes Suizos. Fue extraída de SafeLand [29].

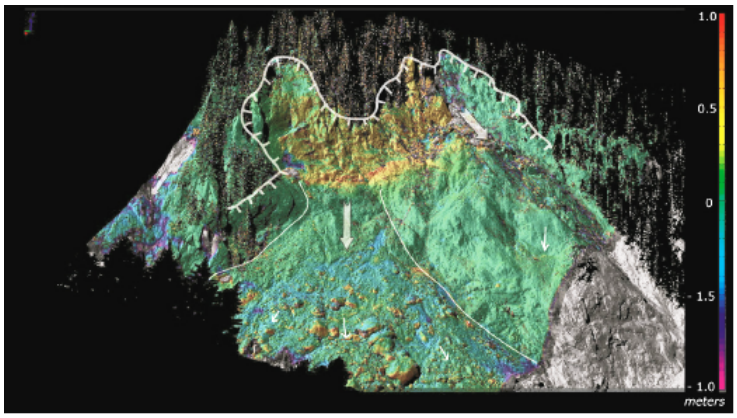

Figura 2.2.7: Desplazamientos en Val Canaria, Ticino, Alpes Suizos [29]

Predicción de caída de rocas Usando la información adquirida a lo largo del tiempo durante períodos de monitoreo, se puede comparar para detectar cambios 3D del terreno. SafeLand [29] destaca los logros de Rosser (2005), Lim (2006) y Abellán (2009) ya que han detectado cambios repentinos, que les permitió caracterizar: morfología, magnitud, frecuencia, ubicación de la caída de rocas e incluso definir indicadores que han llevado a predecir fallas de magnitudes mayores.

La figura 2.2.8 muestra un ejemplo de predicción de caída de rocas en el acantilado basáltico en Castellfollit de la Roca. Se realizó mediante la comparación de modelos TLS, y muestra 50 m3 de caida de rocas. Figura tomada de SafeLand [29], Abellán et al. 2009.

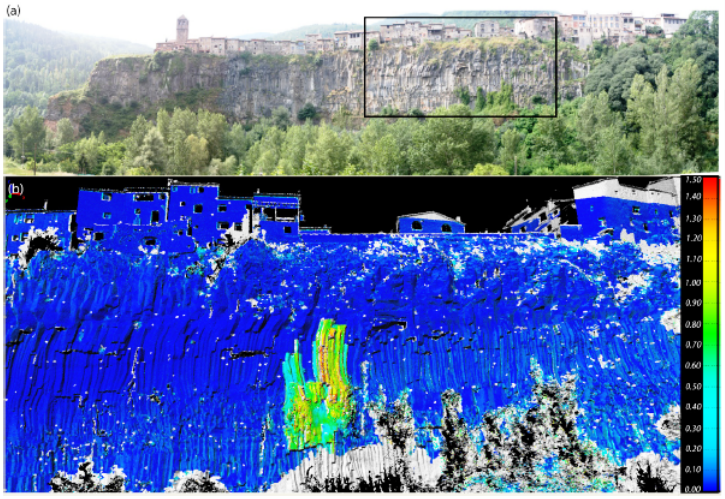

Figura 2.2.8: Predicción de caida de rocas mediante TLS [29]

Escáner laser aéreo

Cuando se montan equipos de escáner láser en plataformas aéreas, se crean los instrumentos llamados escáner laser aéreo o ALS por sus siglas en inglés (Aerial Laser Scanner). Utilizando este instrumento se pueden realizar adquisiciones de coordenadas en 3D de grandes superficies con detalle hasta decimétrico. La topografía es su principal utilidad, así como también la generación de DEM de alta resolución.

En el campo de los FRM, este instrumento ha permitido analizar grandes áreas de terreno e identificar deslizamientos, caracterizarlos y monitorearlos. Su uso se adapta mejor a escalas regionales.
Los ALS se componen principalmente de 4 partes: escáner láser, sistema de posicionamiento global de precisión, unidad aérea de transporte y equipos que capturan imágenes.

Su precisión varía entre los 10 y 30 cms. SafeLand [29] en base a Baltsavias (1999) indica que la precisión dependerá de los siguientes factores: tipo de láser, equipo aéreo, GPS, altura de vuelo, dirección del láser, ángulo de laderas, vegetación existente, etc. Los estándares sugieren que estos levantamientos y monitoreo se realicen a escala regional.

La resolución está en alrededor de 2-4 puntos por m^2 cuando se efectúan levantamientos de alta calidad en sitios amplios. Estos valores están controlados por la altura de vuelo, velocidad de vuelo y velocidad de escaneo del equipo. Se pueden llegar a valores de 1 punto por cada 5 o 10 m^2. Sus principales aplicaciones son:

Al igual que los métodos terrestres, los ALS permiten generar DEM de alta resolución, con estos modelos se puede realizar 4 estudios: mapeo, caracterización, monitoreo y modelación [29]. Estos métodos admiten el análisis en el campo de las deformaciones gravitacionales profundas en pendientes o DSGSD, por sus siglas en inglés (Deep-Seated Gravitational Slope Deformation).

El cuadro 2.2.3 tomada de SafeLand [29], resume las aplicaciones que permite los ALS.

	Mapeo	**Caracterización**	**Monitoreo**	**Modelación**
Deslizamientos profundos	Sí	Sí	Sí	Sí
Deslizamientos superficiales	Sí	Sí	No	Sí
Caída de rocas	Sí	Sí	No	Sí
Flujo de escombros	Sí	Sí	No	Sí
DSGSD	Sí	Sí	Sí	Sí

Cuadro 2.2.3: Aplicaciones de ALS [29]

Mapeo Con los DEM derivados de los ALS, varios autores han mostrado la utilidad para distinguir las distintas inestabilidades. Se han empleado desde métodos clásicos de mapeo basados en el criterio del experto hasta métodos semi automáticos, que han permitido delimitar las áreas con problemas. [29]
El cuadro 2.2.4 tomada de SafeLand [29] indica el trabajo de los de varios autores utilizando ALS.

Autores	**Trabajo**
Chigra et al. (2004)	Detección de deslizamientos superficiales en áreas con cubiertas vegetales.
McKean and Roering (2004)	Utilización de DEM de alta resolución para la delimitación automática de un deslizamiento en Nueva Zelanda usando la aspereza de la topografía
Derron et al. (2005a;2005b)	Uso de DEM derivado de ALS, para la investigación de desprendimientos de rocas en la parte oeste de Noruega. Se caracterizaron los escarpes, fallas laterales, orientaciones de fracturas, laderas de piedra, etc.
Van Den Eeckhaut et al. (2005)	Uso de los sistemas LIDAR para el mapeo de deslizamientos profundos. Este trabajo se lo comparó los inventarios realizados con DEM de alta resolución con el mapeo convencional (trabajos en el campo).
Schulz (2007)	Con los DEM de alta resolución derivados de los ALS, se realizó el mapeo de 173 deslizamientos, profundos y superficiales, en los acantilados costaneros cerca de Seattle (Washington, USA)

Cuadro 2.2.4: Investigaciones utilizando ALS[29]

Caracterización Dentro de la caracterización se pueden analizar distintos elementos y condicionantes como: magnitud, dirección, actividad, ángulo de la pendiente, orientación de discontinuidades. Utilizando los DEMs de alta resolución generados gracias a los ALS y las herramientas como los sistemas de información geográfica o SIG, se han logrado caracterizar algunos deslizamientos.

SafeLand [29] indica que varios autores han utilizado los modelos DEM de alta resolución para analizar factores condicionantes en la estabilidad de taludes como las pendientes abruptas, para

llegar a obtener mapas de susceptibilidad regional y áreas propensas a deslizarse.

El estudio de la orientación de las discontinuidades debido a su importancia en la estabilidad de taludes, ha sido tratado por diferentes autores. Los métodos ALS combinados con los Análisis cinemáticos de los macizos rocosos y el método de equilibrio límite permiten caracterizar y detectar áreas propensas a la caída de rocas al analizar los factores de seguridad.[29]

Monitoreo Si se poseen varias lecturas por ALS, en diferentes épocas, se puede comparar los relieves topográficos y así determinar movimientos y volúmenes que se desplazan. Su alta precisión (al decímetro), permite realizar análisis de calidad en áreas inestables con muy buenas aproximaciones en el cálculo de volúmenes y en velocidades de movimiento.

SafeLand [29] en base a Travelleti (2008) destaca 3 métodos para realizar el monitoreo a partir de los modelos DEM generados por los ALS:

- El método de referencia consiste en analizar los desplazamientos locales y rotaciones de puntos fijos como casas, árboles, muros, etc.
- Comparar las nubes de puntos generadas por los ALS mediante el método de "distancia más corta" (shortest distance method).
- Correlacionar las imágenes de relieves sombreados como realiza, mediante una identificación automática de parámetros similares entre imágenes sucesivas.

La figura 2.2.9 muestra la comparación de 2 superficies generadas a partir de ALS y TLS, antes y luego de la falla. Se distinguen el area de acumulación de piedras y rocas (scree) y el area de origen (source). Tomado de SafeLand [29] en base a Pedrazzini (2010).

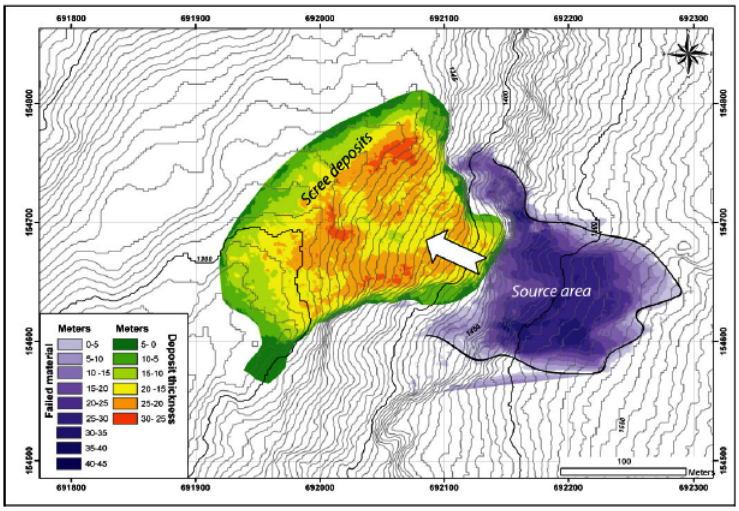

Figura 2.2.9: Comparación de superficies generadas a partir de ALS y TLS [29]

Modelamiento Para un modelamiento mientras más precisa es la representación del terreno en 3D, mejor y más fiable será el resultado obtenido. Se pueden modelar varios fenómenos como: energía, trayectoria, comportamiento de flujos de escombros, medidas de estabilización, estado límite del talud, etc. Por lo tanto, es necesario para cada caso de modelación utilizar un enfoque adecuado.

SafeLand [29] destaca los trabajos de Hoek (2000), Agiliardi y Costa (2003) y Gianin (2004) quienes demuestran la importancia de la pendiente para la simulación de caída de rocas. Este parámetro es utilizado por muchos software que calculan trayectorias, energías, saltos, etc. de las caídas de rocas. También destaca las investigaciones de Dorren y Seijmonsbergen (2003) y Jaboyedoff (2008) quienes utilizando la herramienta SIG y combinándola con la teoría del ángulo de la sombra, han logrado generar mapas con las áreas de salto de rocas.

Horton (2008) modeló la dirección y distancias de salto de un flujo de escombros, basándose en un DEM de alta resolución, creado a partir de lecturas por ALS. También manifiesta que la confiablidad de los resultados está estrechamente relacionada con la resolución de los DEM, a mayor resolución, mayor confiabilidad, SafeLand [29].

La figura 2.2.10 tomada de SafeLand [29] muestra el modelo Flow-R, con detección de origen, energía de exentricidad y probabilidad. Figura de Joboyedoff (2010).

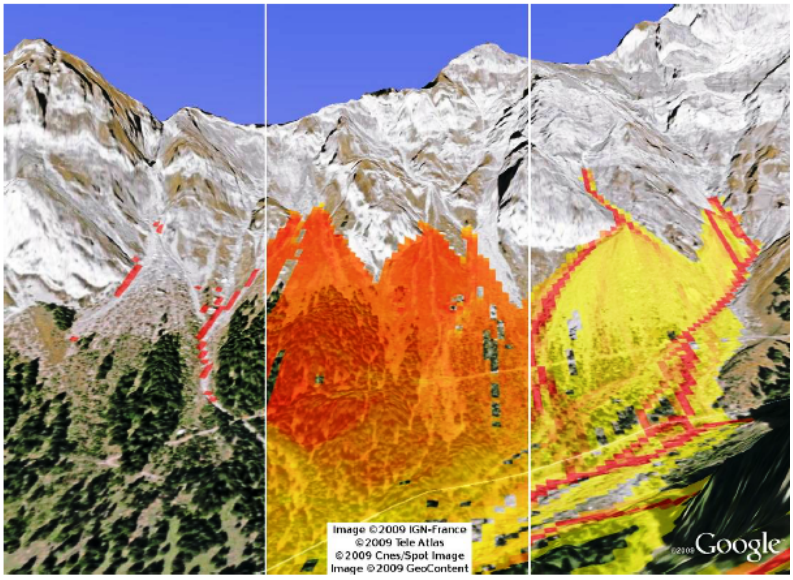

Figura 2.2.10: Modelo de flujo [29]

Sensores de microonda activos

El desarrollo de los radares se dio a inicios del siglo XX con el fin de detectar objetos remotamente. Radar viene de un acrónimo en Inglés (Radio Detección And Ranging) o detección y medición de distancias por radio. Las ondas o microondas de radio son ondas electromagnéticas con longitudes de onda, que varían desde 1 mm hasta 1 m Los métodos de radar han permitido realizar detecciones precisas de movimientos y obtener imágenes de la superficie terrestre.[29]

SafeLand [29] en base a Hanssen (2001), describe 2 tipos de sistemas de radar: biestático con 2 antenas, una para emisión de ondas electromagnéticas y otra para su recepción, y otro monoestático con una sola antena para las dos tareas.

Las antenas emiten pulsos con amplitudes de longitud de ondas predefinidas, el cuadro 2.2.5 realizada por Woodhouse (2006), indica la nomenclatura, frecuencia y longitud de onda que se usan tradicionalmente por los radares estándar.

Banda	Longitud de onda	Longitud de onda	Frecuencia
P	Decimétrica	30 cm hasta 1 m	0.3 hasta 1 GHz
L	Decimétrica	15 cm hasta 30 cm	1 hasta 2 GHz
S	Decimétrica	7.5 cm hasta 15 cm	2 hasta 4 GHz
C	Centimétricas	3.75 cm hasta 7.5 cm	4 hasta 8 GHz
X	Centimétricas	2.5 cm hasta 3.75 cm	8 hasta 16 GHz

Cuadro 2.2.5: Longitud de onda de radares [29]

Las antenas receptoras de radar estiman el rango y miden la amplitud y la fase (tiempo entre ondas) de los pulsos retrodispersados.

SafeLand [29] en base a Hassen (2001) y Norland [25], señala la importancia que tienen factores como: presión, temperatura, presión del agua, estratificación atmosférica, rugosidad, humedad y contenido de sal.

Las ondas de radio, en comparación con las infrarrojas, están menos influenciadas por condiciones atmosféricas. Permiten realizar adquisiciones tanto en lluvias intensas como en niebla espesa.
Mientras mayor es la longitud de onda, menor es la precisión y la resolución, pero se logra una mejor penetración y estabilidad de la señal de retorno.[29]

Los radares de apertura sintética o SAR por sus siglas en inglés (Synthetic aperture radar) son una técnica, que permite obtener una resolución extremadamente nítida, además de poder observar a la tierra en diferentes polaridades. Esto ha ayudado a diferenciar zonas y clasificarlas para definir usos territoriales (X-band Polarimetric SAR), generar DEM (InSAR), localización de fallas y cambios de elevación en el tiempo (DInSAR), etc.

Los sistemas SAR adquieren información de un mismo punto desde varios ángulos y las adquisiciones se realizan a lo largo de franjas.

SAR interferiométrico(InSAR)

Este tipo de radares se utilizaron en la inestabilidad de Tafjorden en Noruega, la realizó Norland [25]. Su principal aplicación se da en el monitoreo contínuo de movimientos en puntos fijos, aplicando el principio de cambio de fase.

Aunque las condiciones atmosféricas no influyen de manera significativa, Norland [25] recomienda el uso de equipos, que permitan conocer la humedad relativa, además recomienda otro punto de lectura en un terreno fijo para realizar correlaciones y correcciones.
Siguiendo estas recomendaciones, Norland [25], indica que es posible realizar monitoreo con una precisión mejor a 0.1 mm a 2.9 km.

La figura 2.2.11 muestra una imagen satelital de Kilauea, Hawaii en Mayo de 1999.

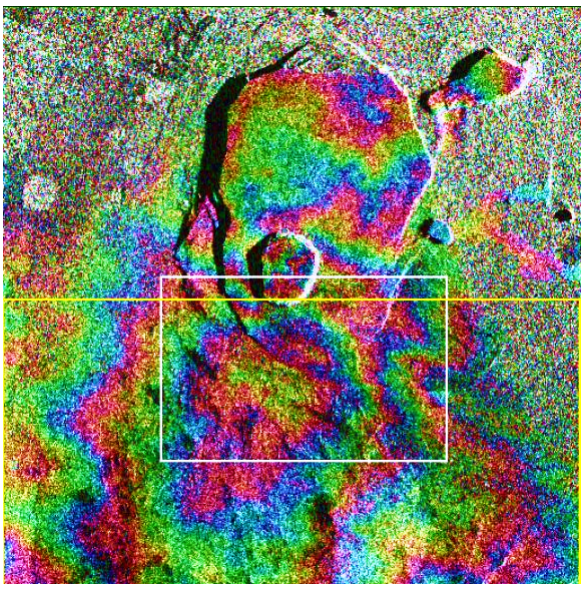

Figura 2.2.11: Imagen satelital [19]

SAR interferiométrico diferencial (DInSAR)

Este método permite analizar movimientos o pequeñas deformaciones en la superficie. Analiza las diferencias en fase de dos adquisiciones tomadas sobre un mismo lugar, pero en un periodo diferente de tiempo. La meta de la técnica DInSAR es identificar y cuantificar pequeñas deformaciones, analizando la diferencia de fase entre dos series de datos.

Utiliza un DEM base sobre el cual se analizarán movimientos posteriores. Se recomienda utilizar DEM generados por diferentes métodos tales como: ALS, mapas topográficos, etc. Aunque también se pueden trabajar con DEM generados a partir de las lecturas SAR.

Si todas las condiciones son favorables durante la adquisición de información y el procesamiento de la misma es perfecto, se pueden llegar a precisiones subcentimétricas. Satélites como el ERS y el Envisat han alcanzado precisiones de 2.33 mm.[29]
Para lograr este detalle se debe tomar en cuenta las distintas limitaciones que influyen en la captura de información de este método.

Los ruidos que afectan durante la adquisición de datos son:

- Falta de correlación geométrica y temporal: se debe a cambios geométricos y eléctricos de la superficie analizada. Por ejemplo, cambio de vegetación, nuevos usos del suelo, erosión, humedad del suelo, etc.
- Efectos atmosféricos: aunque las amplitudes de onda no se ven afectadas por la atmósfera, las pequeñas perturbaciones que puedan darse en la fase alterarán los resultados. Para atenuar estos efectos SafeLand [29] en base al trabajo de Massonnet y Feigl (1998), recomienda realizar las adquisiciones durante la noche.

- Efectos en órbita: Es importante conocer la posición relativa de las plataformas durante las adquisiciones. Estas usan ubicaciones detalladas, que son guardadas junto con la información recopilada, que luego ayudará a realizar calibraciones durante el procesamiento de datos.

La figura 2.2.12 muestra un mapa de velocidad lineal del area urbana de la ciudad de Bogota. Imagen tomada de Sanchez [30].

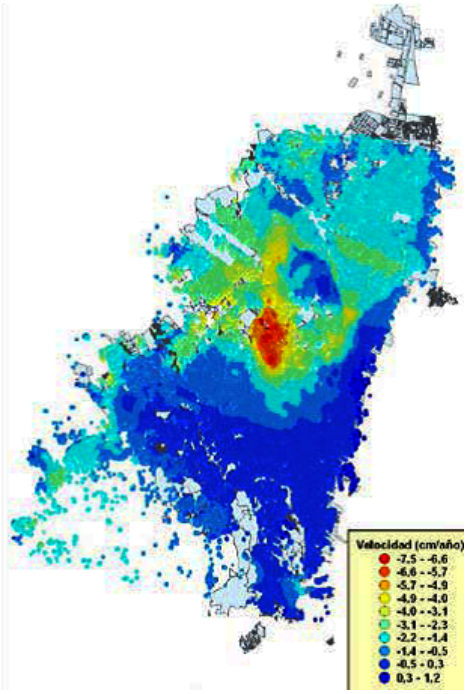

Figura 2.2.12: Velocidad de movimiento en el area urbana de Bogota [30]

SAR interferiométrico multitemporal (DInSAR avanzado)

También llamados DInSAR avanzados, mejoran de gran manera la calidad de los resultados DInSAR para el análisis de deformaciones y monitoreo. Estás técnicas utilizan varias tomas de imágenes SAR a lo largo del tiempo sobre una misma área, permitiendo detectar y medir desplazamientos en el tiempo.

SafeLand [29] destaca a Crosetto (2005), quien muestra que estas técnicas permiten superar las limitaciones presentadas en los DInSAR estándar, dando como resultado precisiones milimétricas, además mejoran las aproximaciones de los modelos de deformaciones, toda vez que brindan una completa descripción del comportamiento a lo largo del tiempo de la masa analizada. Además la calidad de la información recopilada mejora, por cuanto se puede analizar el error entre un sinnúmero de tomas de información, no como en los DInSAR estándar que utiliza solo dos.

Alrededor de 15 a 20 imágenes deben utilizarse para realizar un análisis multi-interferiométrico, la velocidad mínima de movimiento detectado es de 1 $mm/año$.
SafeLand [29] en base a Allievi (2004), sugiere que para garantizar una buena calidad de información, en algunas áreas se pueden implementar equipos que se comunican con los satélites llamados refrectores.

La figura 2.2.13 tomada de SafeLand [29] en base a Crosetto (2005) muestra un ejemplo de los resultados de un analisis de DInSAR avanzado. Se obtuvo tasas de deformación a partir de análisis multi-interferiométricos de datos de ERS 1995-2000.

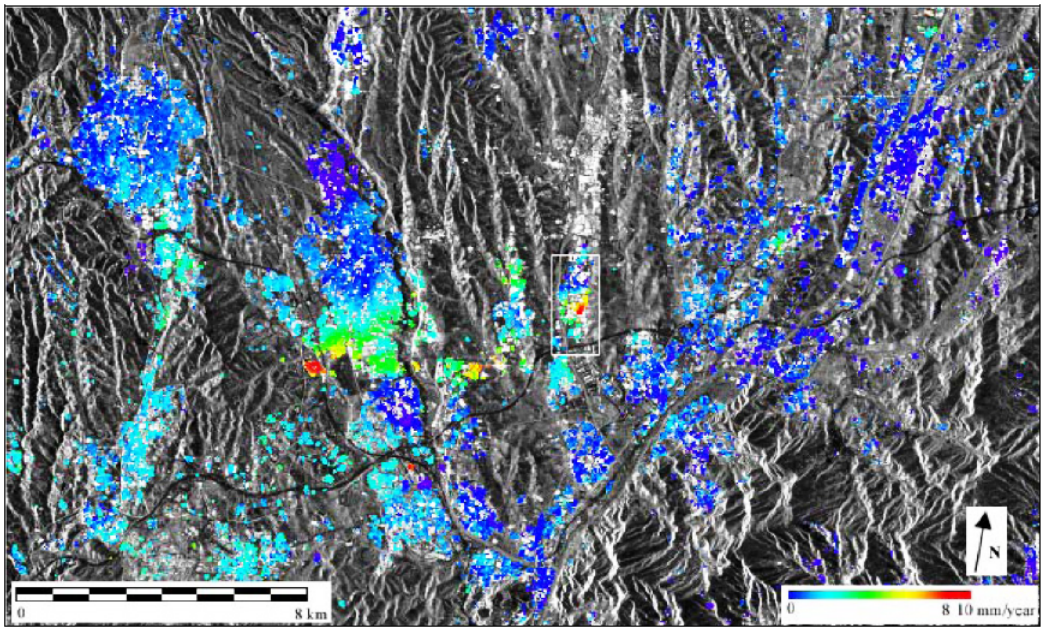

Figura 2.2.13: Análisis de DInSAR avanzado [29]

Muchas técnicas de DInSAR avanzado se han desarrollado principalmente en los siguientes tópicos: la cadena de procesamiento interferiométrico, criterios de selección de pixels, aproximaciones utilizadas, modelos utilizados y estrategias de procesamiento. Para definir cuál utilizar, se debe tener en cuenta qué aspecto se busca definir con el modelo.

Usualmente, para modelar las deformaciones del terreno, SafeLand [29] recomienda utilizar funciones lineales para las aproximaciones de la mayoría de DInSAR avanzados. También existen otros métodos más complejos utilizados por varios autores, que permiten definir la dinámica de las inestabilidades .

InSAR en tierra (GB InSAR)

Aunque los DInSAR se desarrollaron en los inicios con información obtenida de plataformas espaciales, actualmente se han desarrollado métodos que utilizan información recopilada con equipos interferiométricos de microonda en la tierra. A estos métodos interferiométricos diferenciales en tierra se los llama GB InSAR por sus siglas en inglés (Ground Based InSAR).

Es un método popular particularmente para el monitoreo de deslizamientos e inestabilidades. Este método analiza lugares puntuales, como edificios, pequeñas áreas urbanas, taludes, etc., SafeLand [29].

El primer equipo se presentó en 1999, el desarrollo de nuevos radares y la alta demanda de equipos han ocasionado que varias empresas de todo el mundo inviertan en su desarrollo. Werner C. [37], indica que los últimos equipos se han diseñado enfocados en el monitoreo en tiempo real.
Estos sistemas presentan muchas ventajas, puesto que analizan toda el área en movimiento, mientras que otras técnicas como: extensómetros, inclinómetros, fotogrametría, etc. solo dan información

puntual.

La figura 2.2.14 es el primer equipo GBInSAR modelo IBIS-L comercialmente disponible.

Figura 2.2.14: Equipo GB InSAR modelo IBIS-L [29]

Polarimetría para la estimación de humedad del suelo

La polarimetría analiza los campos eléctricos naturales. Un SAR polarimétrico mide el campo eléctrico que emite la zona analizada. Algunos modelos pueden llegar a estimar parámetros físicos como: humedad del suelo, rugosidad del suelo, tipo de suelo, etc. a partir de modelos de dispersión polarimétrico.

El cuadro 2.2.6 basado en la información de SafeLand [29] muestra las diversas aplicaciones que se tienen con esta técnica:

Autor	**Año**	**Trabajo**
Lemoine	1994	Zonificar varios tipos de cultivos
Le Toan Rignot	1992 1995	Estimación de biomasa y discriminación de diferentes especies en un bosque
Lin Dubois	1994 1995	Rugosidad de la superficie y humedad del suelo
Shin y Donzier	2000	Medidas de humedad de la nieve.
Oh	1992	Caracterización geológica de las estructuras
Czuchlewski	2003	Detección de cambios en la superficie de un deslizamiento.

Cuadro 2.2.6: Aplicaciones de polarimetría [29]

Para la estimación de la humedad del suelo, el coeficiente de retrodispersión de zonas con vegetación escasa está relacionado con: frecuencia, ángulo de incidencia y polarización de la onda, así también con la rugosidad de la superficie del suelo, composición, densidad y sobre todo su contenido de agua. Esto hace posible que se pueda calcular la humedad del suelo mediante SAR, SafeLand [29].

SafeLand [29] en base a Ulaby (1982), indica que la penetración de las ondas en el suelo está en el rango de centímetros y asegura que se puede conocer el contenido de agua en la superficie del suelo hasta más o menos 5 cm.

Todos los cálculos se efectúan mediante métodos empíricos y deben ser tomados como tal, al depender de muchos factores. SafeLand [29] sugiere ser cautos con la información que se obtenga.

Para la utilización de estos métodos es muy importante tener en cuenta la vegetación presente, a mayor vegetación el cálculo se vuelve más difícil y con menores certezas. La presencia de vegetación es alta en la mayoría de superficies naturales, siendo una limitación importante en la utilización de estos métodos.

SafeLand [29] destaca a autores como Hajnsek (2009), ya que trata el problema de la vegetación utilizando otros métodos, que permitan separar la información recopilada en varios componentes como: vegetación, rugosidad del suelo, etc., para así lograr una adecuada aproximación de la humedad del suelo.

2.2.3 Técnicas geotécnicas

Los métodos descritos en esta sección cumplen una función importante en el monitoreo en campo y se implementan señalando los siguientes objetivos:

- Evaluar la condición de estabilidad actual y futura
- Evaluar los riesgos antes de la implementación de sistemas de monitoreo y la realización de trabajos en el sitio
- Predecir movimientos y tensiones
- Usar sistemas de alerta temprana
- Elegir las mejores alternativas de remediación
- Evaluar las medidas de mitigación

Diferentes mediciones ofrecen información en el campo referente a: deformación, nivel freático y presión total en el suelo.
Entre los instrumentos de campo tenemos: extensómetros, inclinómetros, piezómetros, células de presión y sistemas multiparamétricos (DMS).

Extensómetros con cable

Los extensómetros miden los movimientos horizontales o verticales relativos y la amplitud de grietas. Pueden ser manuales o automáticos y se coloca una parte en un lugar fijo, es decir, fuera de la masa que se desliza y otro punto dentro de la masa que se desliza, usualmente existen grietas en medio de estos dos puntos. Se conecta un cable entre estos y se obtiene el movimiento relativo existente. La figura 2.2.15 tomada de Suárez [33], es un esquema de un extensómetro horizontal.

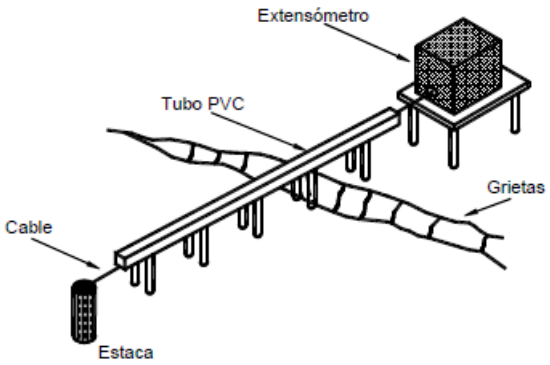

Figura 2.2.15: Esquema extensómetro horizontal [33]

Suárez [33], recomienda que los equipos deben tener una precisión mínima de 0.2 mm y ademas relacionar la información de movimiento con la de precipitación.
Estos sistemas también se pueden implementar para medir la evolución de la separación de las discontinuidades en los macizos rocosos.

En el caso específico de los extensómetros verticales, se debe realizar una perforación vertical que atraviese la superficie de falla y medir la variación en la longitud de un cable que esté anclado al fondo de una perforación, la cual debe ser un estrato estable. Una polea mide con precisión la extensión del cable. A diferencia de los Inclinómetros este método permite medir deformaciones mayores a 5 cm.

La figura 2.2.16 tomada de Suárez [33], muestra cómo se coloca un extensómetro horizontal dentro de una perforación.

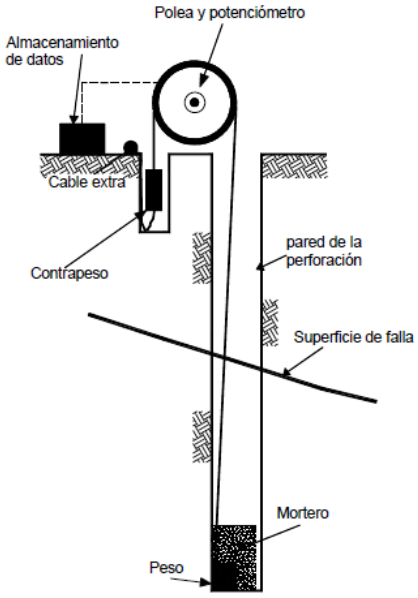

Figura 2.2.16: Esquema extensómetro vertical [33]

Corominas J. [9], indica que debido a la deformación del ducto y del cable, los desplazamientos medidos suelen ser menores a los reales.

Inclinómetros

Estos instrumentos miden la deformación normal al eje de la perforación mediante una sonda que se introduce en un tubo que recubre la misma. Esta sonda mide la inclinación con respecto a la vertical de la perforación y permite:

- Calcular la distribución y magnitud de los movimientos
- Determinar la profundidad de la superficie de falla
- Detección del espesor de la zona de corte
- Conocer la velocidad del movimiento
- Analizar la relación entre el movimiento y las lluvias
- Estudiar la efectividad de las medidas de mitigación
- Monitoreo de movimientos horizontales en excavaciones de túneles, presas de tierra, etc.
- Medición de desviaciones de muros

- Definir la dirección del movimiento

La figura 2.2.17 se tomó del texto de Suárez [33], para indicar las partes básicas en la implementación de un Inclinómetro. Suárez [33] explica que se puede medir deformaciones de 1.3 a 2.5 mm en

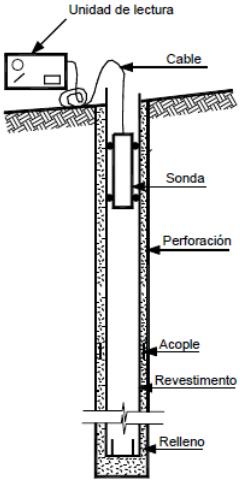

Figura 2.2.17: Esquema inclinómetro [33]

una longitud de 33 m. Actualmente, se han desarrollado los llamados Inclinómetros "in situ", con una serie de acelerómetros inteligentes o sensores electrolíticos, que permiten obtener información contínua a lo largo de la perforación y alcanzar mayores precisiones (2.5 veces) que con métodos convencionales.
Los Inclinómetros automáticos son controlados por computadora y poseen una sonda biaxial. Se programa únicamente la frecuencia con la que se harán las lecturas e información recopilada y enviada mediante sistemas inalámbricos a una computadora. Estos avances han permitido desarrollar sistemas de alerta eficaces.

La figura 2.2.18 muestra un Inclinómetro automático, esta imagen se tomó de SafeLand [29].

Figura 2.2.18: Inclinómetro automático [29]

Piezómetros

Son instrumentos que permiten medir el nivel freático y la presión de poros. Existen diferentes formas de realizar las mediciones como:

- Observación de pozos: es la forma fácil y económica de realizar mediciones, se debe dejar que el agua se equilibre antes de tomar medidas
- Sondeos abiertos: se coloca un tubo con perforaciones en la base dentro de una perforación existente. Se mide la altura del agua dentro del tubo
- Piezómetro de cabeza abierta: similar a los sondeos abiertos, pero elimina errores debido a que posee un filtro y sellos con bentonita

Suárez [33] considera que los piezómetros eléctricos son los más confiables, además Abramson L. W. [2] resalta su fácil interpretación, durabilidad, muestreo cómodo de agua, mide la permeabilidad del suelo, etc. Entre estos tenemos los:

- Piezómetros neumáticos: se tiene una punta porosa que va conectada a una válvula, que se acciona con gases o fluidos, esta información es mostrada por un manómetro en la superficie
- Piezómetro de hilo vibrátil: se compone de un diafragma metálico unido a un cable tensionado, las deflexiones en el diafragma cambian la tensión del cable, la cual se transforma a presión de agua. También mide presiones negativas

La figura 2.2.19 muestra los sensores piezómetros electrónicos modelo OG200 marca VW que se introducen en las perforaciones para la adquisición de información. Esta imagen fue tomada de la página web de la empresa Suministros Andaluces de Perforación.

Figura 2.2.19: Sensores piezométricos

Células de presión

Son instrumentos que ayudan a determinar tres características del esfuerzo en el suelo: distribución, intensidad y dirección. Para medir los esfuerzos totales se pueden emplear dos tipos:

- Células de presión empotradas, se coloca las células de presión dentro de las masas de tierra como presas de tierra

- Células de presión de contacto se miden utilizando elementos estructurales como: muros, túneles, cimentaciones, etc.

Dos tipos de células se distinguen: diafragma e hidráulica. Estas células miden la presión en el suelo mediante una resistencia eléctrica y transmiten a un transductor, el cual indica la presión.

Se puede ver en la figura 2.2.20 un ejemplo de cómo funciona una célula de presión; también se observan sus partes más importantes. Esta imagen fue tomada de SafeLand [29].

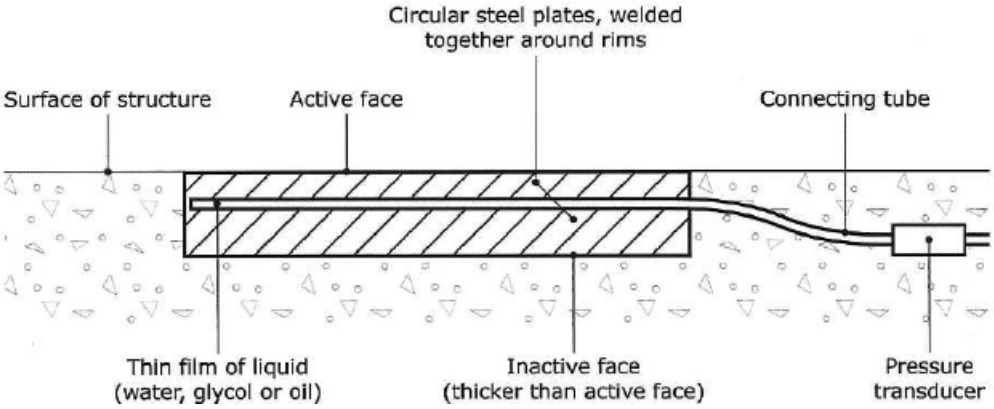

Figura 2.2.20: Esquema de célula de presión [33]

Sistema diferencial multiparamétrico (DMS)

En el campo geotécnico estos sistemas permiten estudiar simultáneamente los piezómetros, inclinómetros, extensómetros, variaciones en aceleración, temperatura, etc.

El sistema diferencial multiparamétrico DMS, por sus iniciales en inglés (Differential Multiparametric System), se ha diseñado para el análisis en tiempo real de la estabilidad de deslizamientos y taludes. Permite el monitoreo continuo de los parámetros físicos y mecánicos de las estructuras. Este sistema se lo instala en una perforación y posee un equipo que envía los datos a un ordenador, el cual analiza y tiene la capacidad de generar alertas.

Dentro de las ventajas de este sistema el Proyecto SafeLand [29] indica las siguientes:

- Fácil instalación
- Cómoda recolección de información
- Reducción de costos
- Se obtiene suficiente información de una sola perforación
- Permite monitoreo continuo
- Adaptable a sistemas de alerta temprana
- Alta resolución de información

En la figura 2.2.21 se encuentra el equipo DMS, un diagrama de su colocación dentro de la perforación y un esquema de la información que permite monitorear. Esta imagen fue tomada de SafeLand [29].

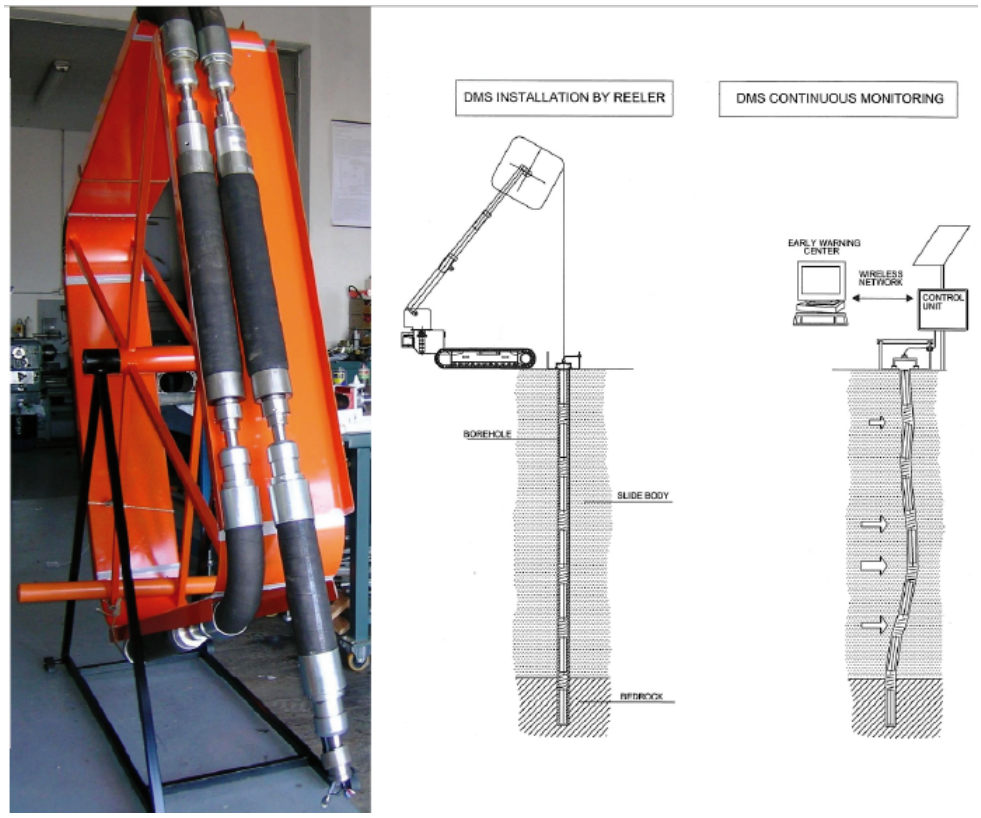

Figura 2.2.21: Equipo DMS [29]

2.3 Métodos geofísicos en el análisis de movimientos de masa

2.3.1 Investigaciones geofísicas en tierra

Los métodos geofísicos de superficie han tenido grandes avances en los últimos 20 años, tanto en métodos de análisis como en equipos y software. Los resultados han avanzado en su presentación, usualmente se los muestra en 2D; aunque dependiendo del número y ubicación de perfiles tomados en campo, se pueden obtener representaciones en 3D. El desarrollo de los mismos ha avanzado aún más hacia la presentación de modelos en "4D", estos incluyen la variable del tiempo y son usados para monitoreo. Para este tipo de modelos se realizan multiples adquisiciones a lo largo de un período determinado de tiempo, mostrando variaciones temporales.

Las técnicas geofísicas no brindan directamente información geológica o características mecánicas del subsuelo, más bien son métodos económicos y rápidos, que ofrecen parámetros físicos como: densidad, parámetros elásticos, resistividad, parámetros acústicos, etc. Esta información puede ser correlacionada y permite calibraciones de modelos con métodos de muestreo directo como perforaciones. La interpretación de los resultados demanda la interacción de varios expertos como: Geofísicos, Geólogos, Geotécnicos, Hidrólogos, Hidrogeólogos, etc.

Según D. Jongman [12] para analizar la estabilidad de un talud o deslizamiento se consideran 3 factores:

- Definir la superficie de falla y la geometría del FRM
- Definir el régimen hidrogeológico
- Detección y caracterización del movimiento

Comúnmente la mayoría de inestabilidades resultan de un cambio tanto en la morfología como en la estructura interna e hidrogeología de la masa inestable, por lo que se debe analizar las características de la masa en profundidad hasta encontrar un estrato firme que no esté afectado por el movimiento.

Para obtener información del subsuelo se tiene dos caminos:

- Técnicas geotécnicas convencionales: perforaciones, ensayos de penetración, calicatas, etc., permiten definir de manera directa la resistencia, composición, estratos, geología, etc. Los principales problemas que se presentan se deben a que la información recolectada es puntual, su costo elevado debido a la maquinaria utilizada, usualmente la accesibilidad a los sitios de estudio es reducida siendo difícil ingresar con equipos de perforación y se trabaja en lugares inestables poniendo en riesgo personal y equipos.
- Métodos geofísicos: permiten obtener amplia información a lo largo de perfiles y además se puede efectuar correlaciones con varios perfiles, para conseguir datos en 3D, abarcando grandes áreas. Todo esto a costos inferiores a los de una perforación.

El cuadro 2.3.1, basada en información de SafeLand [29], indica las ventajas y desventajas en la utilización de métodos geofísicos. Se puede observar que las desventajas de los métodos geofísicos pueden ser contrarestadas por los métodos geotécnicos convencionales, es decir, son 2 técnicas complementarias y deben usarse en conjunto para lograr resultados óptimos.

Ventajas	**Desventajas**
Rápidas y fáciles de emplear en pendientes inestables.	Reducción de la resolución con la profundidad.
Técnicas no invasivas.	Tiene algunas soluciones y debe calibrarse usando varios perfiles o técnicas directas de investigación como perforaciones.
Abarcan amplios volúmenes de investigación.	La información obtenida son parámetros físicos no propiedades geotécnicas o geológicas.

Cuadro 2.3.1: Ventajas y desventajas de los métodos geofísicos

Las técnicas geofísicas se emplean para trabajos exploratorios como estudios de factibilidad, que permite conocer la técnica exploratoria apropiada a aplicarse, además de ubicar el lugar idóneo para efectuar las auscultaciones. Estos mismos perfiles pueden ser calibrados y dar información importante para fases posteriores a lo largo de un proyecto. Debe tomarse en cuenta, que se pueden utilizar varios métodos geofísicos para correlacionarlos y complementar información. Por último, estos perfiles obtenidos en etapas iniciales pueden ayudar en un monitoreo futuro, puesto que permite analizar las variaciones de las características físicas del material en el tiempo. Su principal desventaja es el relacionar la información geofísica obtenida con los parámetros geotécnicos.

Los métodos geotécnicos directos permiten calibrar adecuadamente los resultados geofísicos y validar los resultados a lo largo de perfiles o volúmenes estimados por métodos Indirectos.

SafeLand [29] resalta los 3 factores que Mc Cann y Foster (1990) establecen para la elección de un método geofísico adecuado:

- Debe existir un contraste geofísico, es decir, deben estar presentes límites: Geológicos, Hidrológicos o Mecánicos. No implica necesariamente variaciones en propiedades geofísicas.
- Generalmente a mayor profundidad menor detalle, siendo este factor dependiente de cada método.
- La calidad de información geofísica recolectada dependerá del ruido ambiental inducido por: torres eléctricas, paso de vehículos, viento, características del material, etc.

Luego del procesamiento de la información se pueden obtener 4 tipos de distribuciones de resultados: 1D, que representa las características en profundidad bajo 1 punto; 2D la imagen de un perfil; 3D una malla de puntos que representa un volumen; y 4D muestra la variación de este volumen a lo largo del tiempo. Para las 3 últimas representaciones se utilizan métodos numéricos de inversión. SafeLand [29] utiliza la definición de Menke (1989) que indica que son instrumentos matemáticos que permiten extraer los parámetros buscados, asumiendo un modelo conocido que relacionará la información recopilada con estos parámetros.

Al ser métodos numéricos como: transformada de Fourier, aproximación de funciones por polinomios, elementos finitos, análisis de convergencia, etc., poseen infinitas soluciones, los cuales se han desarrollado en los últimos años, basan su "calidad" en el error RMS o error medio cuadrático. Como son métodos iterativos, se busca que los errores sean mínimos; en caso de existir contrastes amplios con las características físicas medidas, el error será alto, por cuanto parte de un modelo estratificado contínuo. Por lo que se debe adoptar un criterio para aceptar o no el error calculado.

Para calibrar el modelo de inversión empleado por software como Res2dinv (tomografía eléctrica) y Geogiga (tomografía sísmica), se puede utilizar información recopilada en el campo, como perforaciones o ensayos de penetración.

D. Jongman [12] recopilaron investigaciones importantes realizadas por varios autores, así generaron el cuadro 2.3.2, que resume el método geofísico utilizado, el parámetro que se mide, las condiciones geológicas, el tipo de deslizamiento y que aplicación se obtuvo de cada método. Esta cuadro permite conocer de manera general los resultados que pueden ser obtenidos mediante la utilización de métodos geofísicos y bajo qué condiciones geológicas.

El cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos, en su documento "Measurements and applications in an engineering context of geophysical methods" (2001), presenta un resumen de los métodos geofísicos con sus aplicaciones, ventajas y limitaciones. Estos se muestran en el cuadro 2.3.3. Este cuadro brinda una idea general de las limitaciones de cada método y qué parámetro mide cada uno. La información de el cuadro 2.3.2 y cuadro n 2.3.3 puede relacionarse para complementar información de cada método, basándose en estudios posteriores a 2001 permitiendo actualizar la información existente.

Metodos	Parametro-Informacion	Contexto Geológico	Tipo de Deslizamiento	Aplicación	Autor
Sísmica de reflexión	Vp,Vs,2D secciones verticales	Sedimentos blandos (arena a la arcilla)	Flujo de Escombros de tierra(a=25º)	Limite geológico(80m)	Bichler et al (2004)
Sísmica de reflexión	Vp,Vs,2D secciones verticales	Yeso, pizarra y areniscas	Deslizamiento complejo(a=10º)	Deslice la superficie(50m)dentro de una capa de yeso	Bruno and Marillier(2000)
Sísmica de reflexión	Vp,Vs,2D secciones verticales	Rocas, gneis	Desprendimiento de rocas	Geometría interna(estratificación, fallas)	Ferrucci et al (2005)
Sísmica de refracción	Vp,Vs	Desgastado por el tiempo margas y calizas	Deslizamiento complejo(a=7º)	Deslice la superficie(3 m)	Glade et al (2005)
Sísmica de refracción	Vp,Vs	Piedra caliza, pizarra y escombros	Roca, tobogans de caida de escombros activo	Profundidad de la roca base(30m) y estructura interna	Mauritsch et al (2000)
Sísmica de refracción	Vp,Vs	Margas Negras	Deslave complejo(a=26º)	Superficie de deslizamiento(9m)	Caris and Van Asch (1991)
Tomografía Sísmica	Vp,2D secciones verticales	Esquisto	Acantilado deslizamiento translacional de rocas	Geometria del deslizamiento (5-10m)	Jongmans et al (2000)
Tomografía Sísmica	Vp,2D secciones verticales	Areniscas	Deslizamiento de rocas	Caracterización del material	Méric et al (2005)
Ruido sísmico	Vs,ID Perfil vertical	Varicoloured arcilla	Deslizamiento complejo	Espesor de la capa deslizada	Lapenna et al (2005)
Ruido sísmico	Vs,ID Perfil vertical	Margas Negras	deslizamiento de lodo	Superficie de deslizamiento (35m)	Méric et al (2006)
Ruido sísmico	Vs,ID Perfil vertical	arcillas Varved	Deslizamiento translacional	Profundidad de la roca base	Méric et al (2006)
SEV	p,ID Perfil vertical	Roca arcillosa, arenosa	Slump de suelo y roca	Superficie de falla	Agnesi (2005)
SEV	p,ID Perfil vertical	Margas Negras	Deslizamiento complejo de lodo	Profundidad de la roca base	Schmutz et al (2000)
SEV	p,ID Perfil vertical	Margas Negras	Deslizamiento complejo de lodo	Superficie de falla (100m)	Caris and Van Asch (1991)
Tomografía Eléctrica	p,2D secciones verticales	Varicoloured arcilla	Deslizamiento de rocas	Profundidad de la roca base	Batayneh and Al-Diabat(2002)
Tomografía Eléctrica	p,2D secciones verticales	Sedimentos blandos (arena a la arcilla)	Flujo de Escombros de tierra(a=25º)	Profundidad de la roca base	Bichler et al (2004)
Tomografía Eléctrica	p,2D secciones verticales	Residuos en roca aluvial gnéisica	Gran deslizamiento de rocas	Superficie de falla	Lebourg et al (2005)
Tomografía Eléctrica	p,2D secciones verticales	Arcilla Y arena	Deslizamiento multiple de tierra	Limite geológico	Demoulin et al(2003)
Tomografía Eléctrica	p,2D secciones verticales	Varicoloured arcilla	Deslizamiento complejo de tierra	Superficie de falla	Lapenna et al (2005)
Tomografía Eléctrica	p,2D secciones verticales	arenita y arcilla		Superficie de falla	Havenith et al (2000)
Tomografía Eléctrica	p,2D secciones verticales	Areniscas	Gran deslizamiento de rocas	Espesor de la capa deslizada (100)m	Méric et al (2005)
Tomografía Eléctrica	p,2D secciones verticales	Arena arcillosa sobre roca cristalina		Superficie de falla	Wisen et al (2003)
Tomografía Espontanea	V,1Dhoriz. Perfiles y mapas 2D	Yeso, pizarra y areniscas	Deslizamiento complejo	Flujo de agua	Bruno (2000)
Tomografía Espontanea	V,1Dhoriz. Perfiles y mapas 2D	Varicoloured arcilla	Deslizamiento complejo	Límites laterales	Lapenna et al (2005)
Electromagnetismo	p,1Dhoriz. Perfiles y mapas 2D	Yeso, pizarra y areniscas	Deslizamiento complejo	Límites laterales	Bruno and Marillier (2000)
Electromagnetismo	p,1Dhoriz. Perfiles y mapas 2D	Areniscas	Gran deslizamiento de rocas	Límites laterales	Méric et al (2005)
Electromagnetismo	p,1Dhoriz. Perfiles y mapas 2D	Margas Negras	Deslizamiento complejo	Superficie de falla	Schmutz et al (2000)
Electromagnetismo	p,1Dhoriz. Perfiles y mapas 2D	Piedra caliza, pizarra y escombros	Flujo de Escombros	Localizar areas saturadas	Mauritsch et al (2000)
Electromagnetismo	p,1Dhoriz. Perfiles y mapas 2D	Margas Negras	Caida de rocas	Contenidos de agua	Caris and Van Asch (1991)
Georadar	Perfil vertical 2D	Sedimentos blandos (arena a la arcilla)	Deslizamiento complejo de lodo	Limites geológicos	Bichler et al (2004)
Georadar	Perfil vertical 2D	Caliza	Flujo de Escombros de tierra(a=25º)	Geometria del deslizamiento (5m)	Petinelli et al (1996)
Georadar	Perfil vertical 2D	Caliza	Deslizamiento de rocas	Localización de fracturas	Jeanning et al (2005)
Radar en pozo		Gneis	Deslizamiento de rocas	Localización de fracturas	Willenberg et al (2004)

Cuadro 2.3.2: Investigaciones mediante métodos geofísicos [12]

Método	Medida básica	Aplicación	Ventajas	Limitaciones
Sísmica de refracción	Tiempo de viaje de las ondas principales, atraves de la superficie	Determinar velocidad de las ondas principales, muestra contrastes geológicos	Rápido, preciso, económico	No capta materiales mas suaves bajo algo duro
Sísmica de reflexión	Tiempo de viaje de las ondas principales, atraves de las capas subspuerficiales	Detección de fallas, discontinuidades, mapeo en profundidad (horizontes que reflejan)	Rápido, preciso, económico	No tiene mucha resolución
Dispersión de ondas Reyleigh	Tiempo de viaje y periodo de las ondas Reyleigh	Interferncia de la onda de corte en la superficie	Rápido, preciso, económico	Se requieren largas lineas y mucha energía
Vibración	Tiempo de viaje y periodo de las ondas Reyleigh	Interferncia de la onda de corte en la superficie	Vibración controlada permite alcanzar grandes profundidades	Se requieren largas lineas y mucha energía
Perfiles de reflexion	Tiempo de viaje de las ondas principales, atravez de las capas subspuerficiales y amplitud de las ondas reflectadas	Detección de fallas, discontinuidades, mapeo en profundidad (horizontes que reflejan)	Rápido, preciso, económico, correlación directa con cambios litológicos y geológicos	La resolución y la capacidad de penetración es baja, no debe existir agua
Resistividad eléctrica	Resistencia eléctrica	Nivel freático, complemento a la sísmica de refracción, prospección de arena y grava	Económicos, pueden detectar materiales suaves	Las profundidades no son muy exactas, pueden existir interpretaciones incorrectas, debe utilizarse en conjunto con otros métodos
Acustica	Amplitud de las ondas	Buscar cavidades	Rápido y confiable, mucho equipo disponible	Sigue en etapa experimental, limitaciones todavía no establecidas
Georadar	Tiempo de viaje y amplitud de microondas	Rápido mapeo de estratos, nivel freático, anomalias.	Muy bueno para investigaciones superficiales	Poca profundidad de investigación, el agua atenua la señal.
Gravedad	Variaciones del campo gravitatorio	Detecta fallas y cavidades	Preciso	Equipos muy costosos, con personal especializado, interpretación compleja.
Magnetismo	Variaciones del campo magnético	Presencia de materiales magnéticos en la superficie	Detecta hasta presencia mínima de materiales magnéticos	Solo es adecuado para la localización de materiales magnéticos.

Cuadro 2.3.3: Aplicaciones, ventajas y desventajas de métodos geofísicos

La figura 2.3.1 presenta los distintos métodos geofísicos que son utilizados en el campo de los deslizamientos, la clasificación se basa en el cuadro 2.3.2 D. Jongman [12], que muestra los distintos métodos utilizados por distintos autores en el campo de los FRM.

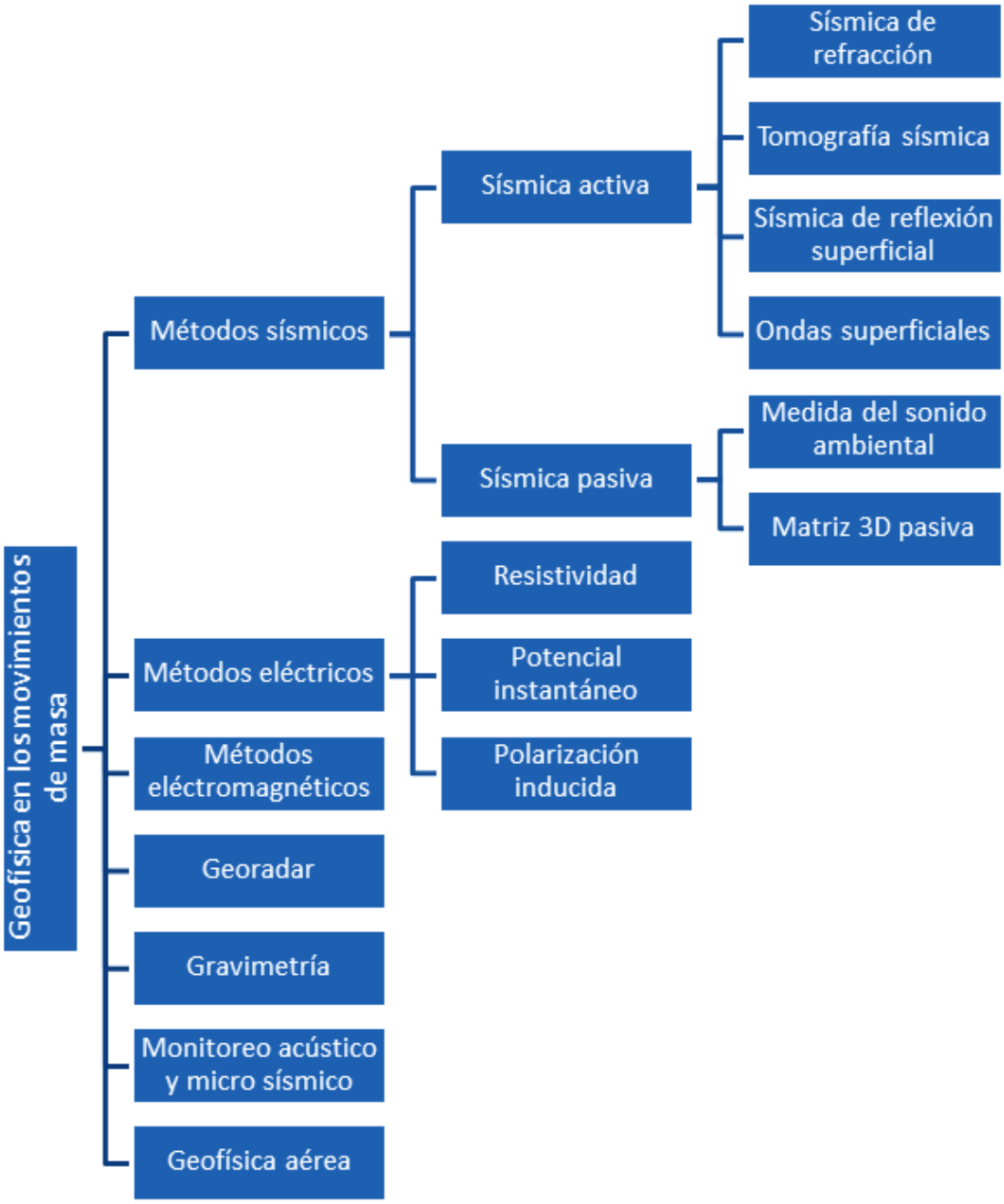

Figura 2.3.1: Geofísica en los movimientos de masa [12]

Métodos sísmicos

Los métodos sísmicos miden la propagación de ondas por el suelo, las cuales se producen por fuentes activas como: golpeo de placa con un martillo, caída de pesos por gravedad, explosivos, camiones vibradores, etc. o por fuentes pasivas como: temblores, caída de rocas, olas en el mar, ruido ambiental, entre otros.

Estas fuentes ocasionan pequeños desplazamientos elásticos en el suelo, que son receptados por medio de geófonos y transmiten la intensidad del movimiento a un equipo llamado sismógrafo, el cual captará simultáneamente las señales enviadas por varios geófonos (usualmente 24) ubicados a lo largo de un perfil. Los geófonos pueden medir las ondas verticales u horizontales. La selección del geófono adecuado a ser utilizado dependerá principalmente de la información, que se busca recopilar y del método a emplearse.

Existen 2 tipos de ondas, que se pueden medir:

- De cuerpo:
  - Ondas P: Ondas horizontales, primarias o de compresión son las más rápidas. La velocidad de estas ondas están en función de: módulo de compresión (K), módulo de cortante (G) y densidad (δ).
  - Ondas S: Ondas Verticales, secundarias o de corte son más lentas que las primarias, se propagan de forma vertical. Su velocidad solo depende del módulo de cortante (G) y densidad (δ). Estas ondas no se propagan por líquidos.

  En la sísmica, la resolución se define comúnmente como ¼ de la longitud de onda (velocidad dividida para la frecuencia), por lo tanto, las velocidades más bajas presentan mejores resoluciones (altas frecuencias). Basado en esto, Dasios (1999) ofrece 3 conceptos:

  - Las ondas S poseen menores velocidades, que las P, por lo que proporcionan una mejor resolución vertical.
  - Las ondas S se ven afectadas en menor magnitud, por cambios en la saturación del suelo, además son más sensibles a cambios litológicos, lo que favorece a los estudios de Ingeniería.
  - En casos como arenas saturadas, morrenas de fondo, sedimentos saturados con gas, las ondas S son menos absorbidas.

  Aunque las ondas S presentan ventajas, el análisis de ondas P dominan los estudios geofísicos de superficie. el cuadro 2.3.4 muestra un resumen de velocidades de onda P y S y densidad de varios materiales. Tomada de SafeLand [29] que se basa en (Lavergne, 1986).

- De superficie: como su nombre lo indica se propagan por la superficie, sea en la tierra o en el fondo marino. Estas alcanzan su amplitud máxima en la superficie y son casi nulas en profundidad. Se producen por la interacción de las ondas P y S, estas son más lentas que las de cuerpo, por cuanto poseen bajas velocidades y por lo tanto, bajas frecuencias. Son las causantes de la resonancia en edificios, por lo que se les considera las ondas sísmicas más destructivas.
  - Ondas Rayleigh: presentan un movimiento elíptico a lo largo de la dirección de propagación y se asemejan a las ondas que se producen en el agua.
  - Ondas Love: tienen un movimiento perpendicular a la dirección de propagación, es decir, son ondas de corte. Para que se den estas debe existir una capa superficial de menor velocidad en comparación con sus capas inferiores. Los usos de las ondas de superficie se han ampliado en los campos de la Sismología y de la Ingeniería. Sus aplicaciones incluyen el estudio de deslizamientos, cimentaciones, etc.

Material	**P-velocidad** $Vp(m/s)$	**S-velocidad** $Vs(m/s)$	**Densidad** $\delta(g/cm^3)$
Suelo	100-600	100-300	1.7-2.4
Arenas secas	200-1200	100-500	1.5-1.7
Arenas mojadas	1500-4000	400-1200	1.9-2.1
Morrena glacial	1500-2700	200-700	1.9-2.7
Arcilla	1000-2500	200-800	2.0-2.4
Marga/pizarra	2000-4100	750-1500	2.0-2.7
Gneis	3500-7600	2200-3600	2.7-2.8
Areniscas	1400-4500	1200-2800	2.1-2.4
Caliza	2800-7000	2000-3300	2.4-2.7
Creta	2300-2600	1100-1300	1.8-2.3
Halita	4000-5500	2500-3100	2.1-2.3
Anhidrita	3500-5500	2200-3100	2.9-3.0
Dolomita	2500-6500	1900-3600	2.5-2.9
Granito	4500-6200	2500-3300	2.5-2.7
Basalto	5000-6500	2800-3400	2.7-3.1
Carbon	2200-2700	1000-1400	1.3-1.8
Hielo	3400-4000	1700-1900	0.9
Agua	1450-1500	-	1
Aire	315-350	-	0.001

Cuadro 2.3.4: Velocidades sísmicas y posibles materiales [29]

La figura 2.3.2, es una representación gráfica de cómo se propagan las ondas por el suelo.

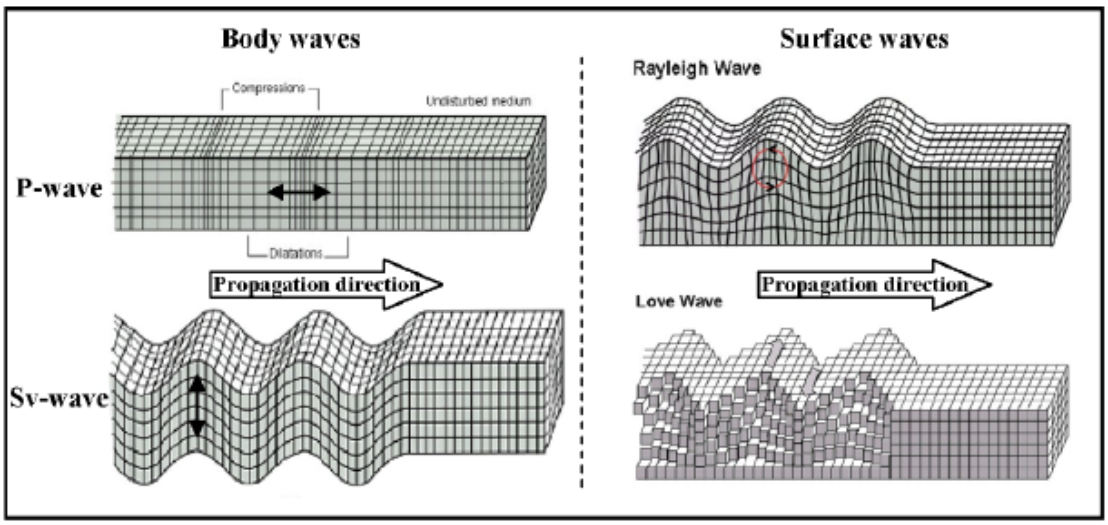

Figura 2.3.2: Propagación de ondas sísmicas [29]

Sísmica activa

Sísmica de refracción

Este método se basa en el análisis de las primeras llegadas de señales a cada uno de los geófonos, las llegadas se las determina de manera visual, basándose en la experiencia del geofísico. Con los tiempos de llegadas se generan las llamadas dromocronas, que son gráficos de posición de cada geófono versus tiempo de llegada.

Para este método se asume que la velocidad aumenta con la profundidad, es decir, que en caso de existir un estrato con menor velocidad bajo un estrato de alta velocidad, el método no lo reconocerá. Este método analiza la velocidad de propagación de las ondas P y S y para determinar la onda a estudiarse, se elige un geófono vertical u horizontal.

Para llegar a mayores profundidades se debe emplear perfiles más largos. Como mínimo se efectuarán 2 disparos en los extremos, pero la información recopilada es mínima, para definir la geometría de la superficie de cada estrato. Las últimas tendencias sugieren 3 disparos para líneas cortas menores a 60 m, mínimo 5 para líneas mayores a 60 m. El número de disparos no tiene límite y a mayor número, más detallada será la geometría de la superficie de cada estrato.

Aplicaciones Su principal función es la de estimar la velocidad de cada estrato, esto permite determinar la roca madre, nivel freático, aplicaciones en el campo petrolero, entre otros.
Debido al cambio súbito de características físicas que existe entre la masa desplazada y el perfil firme bajo esta, su utilización es adecuada en estudios de deslizamientos.
SafeLand [29] resalta investigaciones recientes efectuadas, Kearey (2002) muestra la aplicación de nuevos métodos de interpretación como: método ABC, técnica más-menos (plus-minus technique) y método recíproco generalizado, por sus siglas en Inglés GRM (Generalized Reciprocal Method). Estos nuevos métodos permiten analizar perfiles ondulados, calculando la profundidad de cada estrato bajo cada geófono.

Limitaciones Los perfiles deben ser estratificados horizontalmente, desde más suaves a más duros. Otra limitación se encuentra en la profundidad de análisis. Este método tiene una aproximación por cada 3 ó 5 metros de perfil horizontal, que permiten alcanzar 1 m de profundidad, es decir, con perfiles comunes de 110 m y 220 m se pueden alcanzar profundidades de 25 m hasta 70 m, lo que dependerá de la pendiente sobre la que se trabaja, a mayor pendiente menor profundidad.
Por lo general, con las pendientes que tienen deslizamientos se puede llegar a profundidades de 50 m, con perfiles de 220 m.
En todos los métodos sísmicos, el ruido generado por varios eventos naturales como viento y ríos, hacen necesario el filtrado previo de los resultados.
Por último, cabe recalcar que mientras más largos son los perfiles, más energía se debe generar en los extremos, por lo que la utilización de explosivos se vuelve indispensable.

La figura 2.3.3 muestra un ejemplo de 2 perfiles elaborados mediante sísmica de refracción por Jenny [18], en Route d´Arolla, Valais en Suiza el estrato rojo representa la roca sana y es estrato azul representa el material deslizado, también se puede observar la geometría aproximada del perfil de falla.

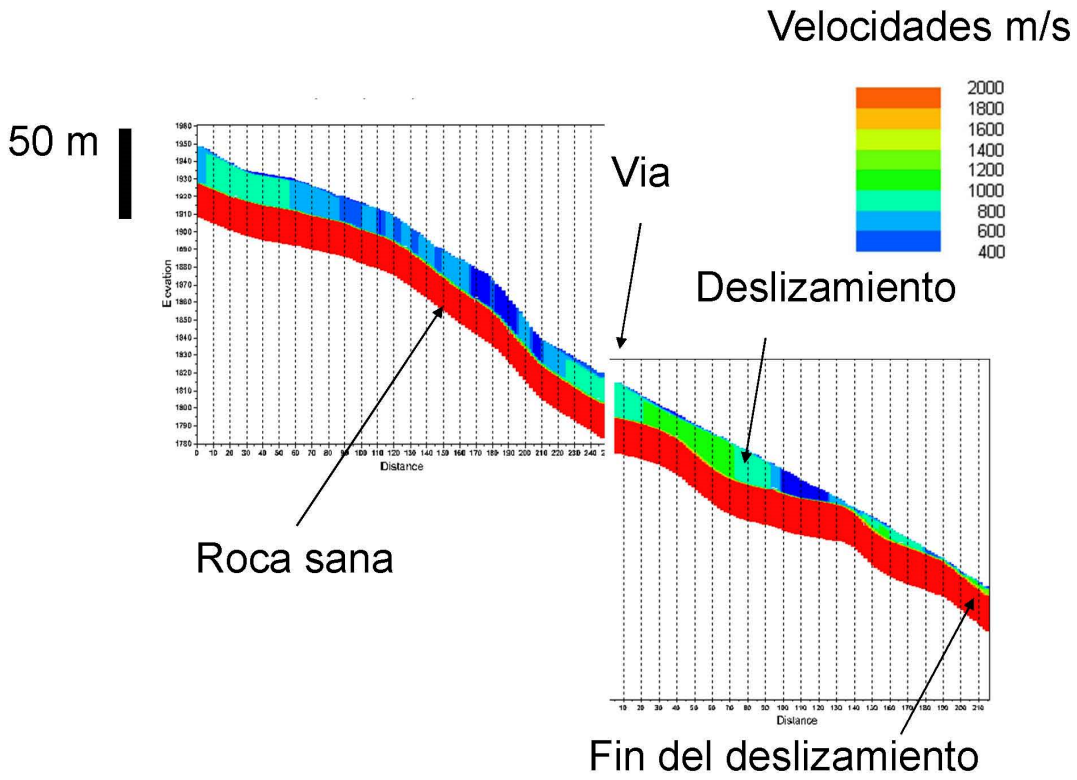

Figura 2.3.3: Perfil de sísmica de refracción [18]

Tomografía sísmica

Al igual que en la sísmica de refracción, se toma como inicio los tiempos de las primeras llegadas de las ondas a cada geófono, luego se utiliza métodos de inversión, para analizar la propagación de la velocidad en modelos de 2D y 3D. Este método perfecciona su exactitud si se tiene más shots/disparos, por lo que se recomienda utilizar al menos 7 disparos para obtener una adecuada resolución. La sísmica de refracción indica la presencia de discontinuidades marcadas, en cambio, la tomografía muestra un modelo con isolíneas de velocidad con un cambio gradual.
SafeLand [29] recomienda relacionar los 2 métodos, para una mejor interpretación.

Aplicaciones Según SafeLand [29] citando a Jongmans (2002) y Méric (2005) indica que utilizaron esta técnica para el estudio de deslizamientos en condiciones rocosas y en masas inestables o propensas a deslizamiento.

Limitaciones La principal limitación es la realización de una mayor cantidad de disparos y para asegurar una adecuada calidad de información, se aumentan los tiempos en campo y costos. Además, se pueden asociar a las limitaciones de la sísmica de refracción.

La figura 2.3.4 muestra un ejemplo de una tomografía sísmica realizada por Jenny [18] en Albinen, Valais en Suiza.

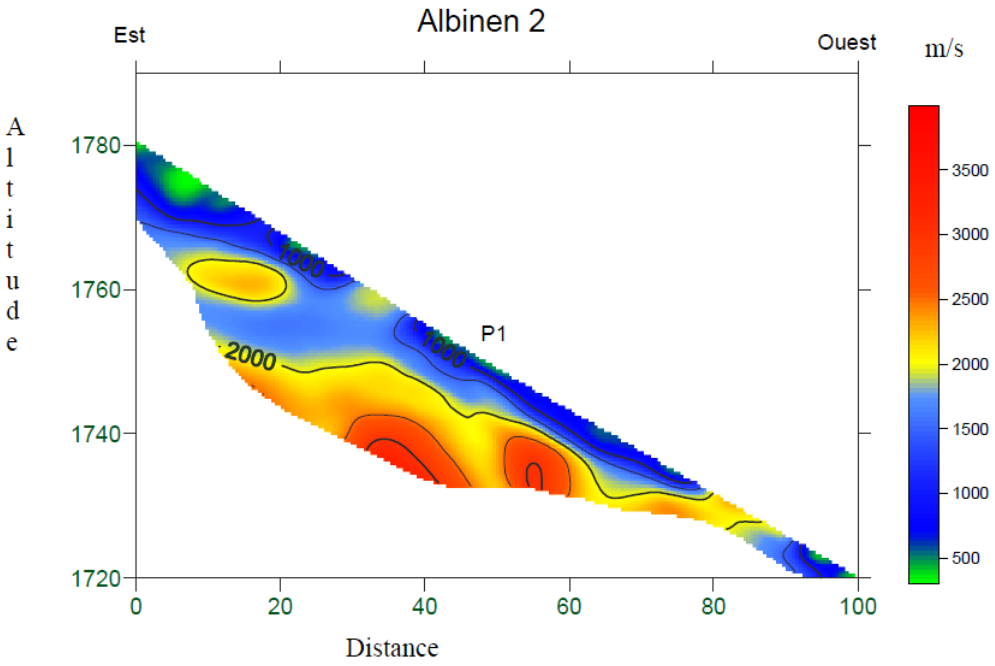

Figura 2.3.4: Tomografía sísmica [18]

Sísmica de reflexión superficial

Este método analiza las ondas reflejadas en cada uno de los cambios de estrato. Este método analiza todo el registro de señales, no solo las primeras llegadas como en la refracción. Como se trabaja con todo el registro, es importante el filtro de ruidos y dentro del mismo se debe eliminar las ondas refractadas y superficiales.

Esta técnica se utiliza para la exploración de gas y petróleo, debido a su gran profundidad de análisis. Además, este campo de aplicación ha permitido un gran avance en los equipos de geofísica y el software de análisis.

Aplicaciones Algunos autores han trabajado con esta técnica en deslizamientos, pero no es común en este campo. Esta técnica permite determinar con gran resolución las superficies de falla y es de utilidad si se encuentran a grandes profundidades (mayores a 100 m). Una ventaja es la existencia de suficiente software para su análisis y además su fiabilidad es alta. También necesita menor cantidad de energía que la sísmica de refracción y no tiene los problemas que se crean durante la inversión de velocidades.

Limitaciones Es una tecnología más pesada en cuanto al transporte, requiere mayor número de geófonos y mayor cantidad de disparos, además la información recopilada tiene un análisis más complejo. No posee detalle para profundidades menores a 20 m.

La figura 2.3.5 muestra un ejemplo de un perfil sísmico de reflexión realizado en Vallée du Rhône, Vétroz en Suiza, realizado por Jenny [18]. Se puede observar la magnitud de profundidades y el poco detalle en el estrato menor a 100 m.

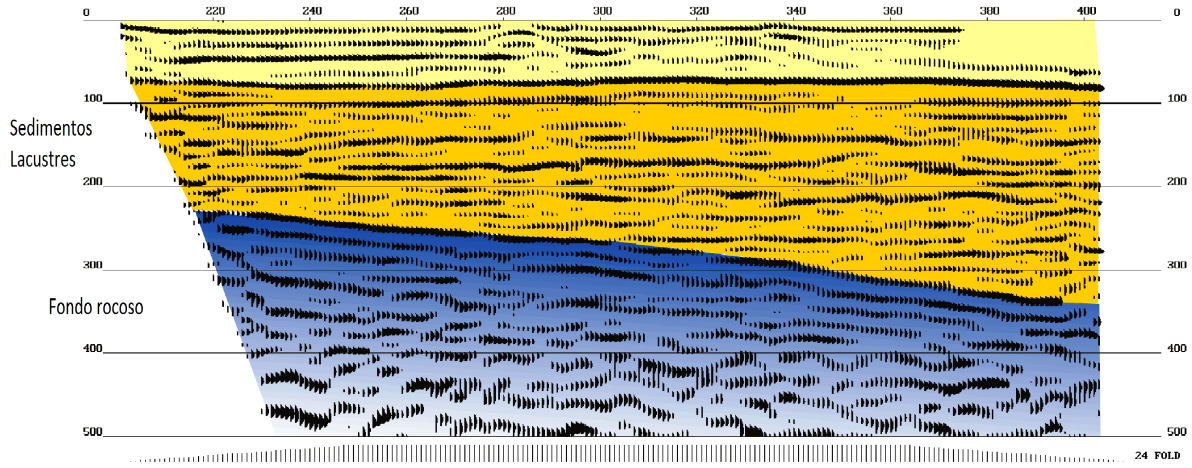

Figura 2.3.5: Sísmica de reflexion [18]

Ondas Superficiales

Las ondas superficiales presentan una dispersión considerable en la velocidad de las capas superficiales. SafeLand [29] destaca los trabajos de Socco y Jongmans (2004) y Park (1999) en el análisis espectral de ondas superficiales o SASW, por sus siglas en inglés (Spectral Analysis of Surface Waves). La principal utilidad es la evaluación de la variabilidad del módulo de cortante del suelo con la profundidad, sin utilizar ningún método invasivo.

SafeLand [29] además habla de la importancia del trabajo de Park (2001) que introdujo el análisis multicanal de ondas de superficie MASW, por sus siglas en inglés (Multi-channel Analysis of Surface Wave). Buscando mejorar la calidad de la señal afectada por problemas de ruido, con 1 disparo generaba la suficiente información para correlacionar y distinguir modos de propagación que pueden generan una distribución de ondas de corte. Esta generalmente se realiza en 1D, pero pueden combinarse varios perfiles verticales, para formar un perfil en 2D.

Aplicaciones SafeLand [29] muestra las investigaciones realizadas por Grandjean y Bitri (2006) y Meríc (2007) que han demostrado que este método puede ser utilizado ampliamente en el campo de los deslizamientos. Se ha desarrollado un método 2MASW, que ayuda al análisis de terrenos heterogéneos.

Limitaciones Para indicar la limitación más importante, SafeLand [29] se basa en las recomendaciones de Foti (2000), quien indica que este método se basa en perfiles verticales de 1D, lo que no permite realizar un análisis adecuado de estructuras complejas, que necesitan un análisis en 2D. La calidad del diagrama dependerá de la compleja dispersión, que poseen las ondas Rayleigh. La inversión de las ondas superficiales no puede resolverse directamente y dependerá de una técnica de optimización, que permita encontrar la solución más probable de una cantidad infinita de soluciones posibles. La solución final no es necesariamente exacta y SafeLand [29] recomienda que se analicen varias soluciones para observar la sensibilidad de la inversión.

La figura 2.3.6 muestra un ejemplo de un perfil en 1D y la utilización de varios perfiles de este tipo junto con un software de inversión permiten llegar a perfiles en 2D como muestra la figura 2.3.7 y en 3D.

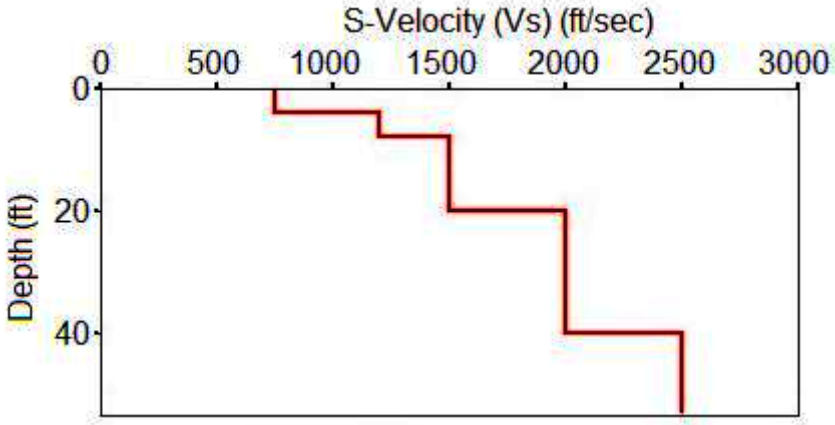

Figura 2.3.6: Perfil MASW 1D [26]

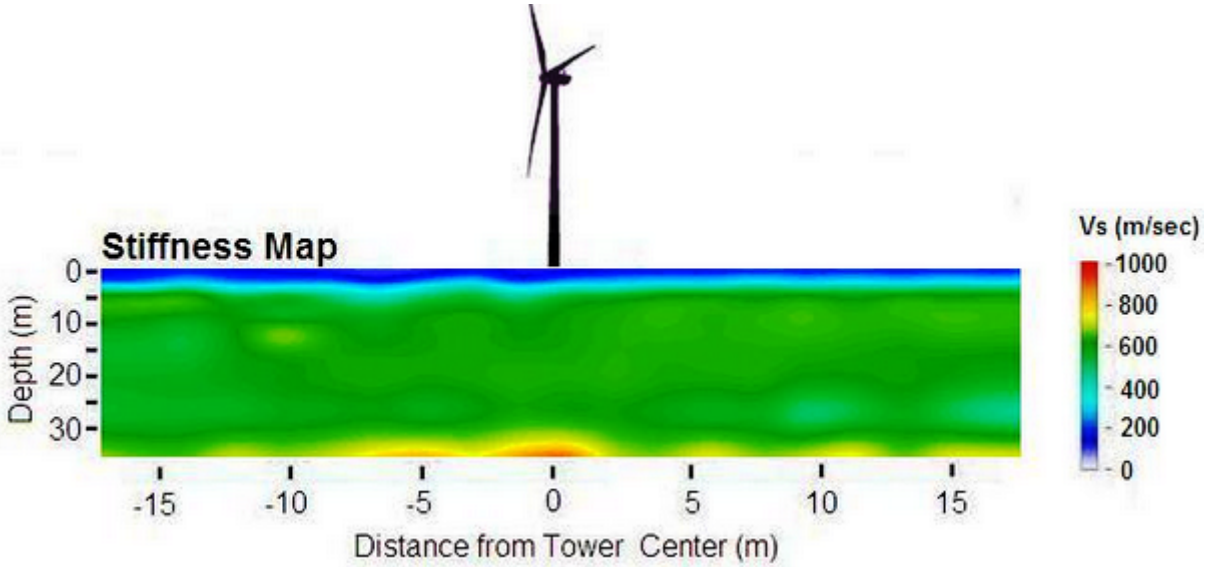

Figura 2.3.7: Perfil MASW 2D [26]

Sísmica pasiva

Medida del sonido ambiental

D. Jongman [12] utilizan este método para determinar la geometría de los estratos y velocidad de las ondas S de cada uno sobre la roca sana.

Nakamura [24] utiliza un geófono triaxial para determinar la frecuencia de resonancia de un suelo, información fundamental para el cálculo estructural.

Para la aplicación de este método se debe asumir 3 temas:

- El sonido sísmico produce ondas superficiales.
- La estructura del suelo se considera en 1D.
- Los contrastes, que existen en las Vs son amplios.

Aplicaciones Su fácil aplicación permite determinar contrastes en la velocidad de las ondas S. SafeLand [29] indica que Gallipolu (2000) y Méric (2007) han aplicado este método en terrenos arcillosos y margosos y han localizado la profundidad de la superficie de falla.

Limitaciones Presenta dificultades en suelos heterogéneos, que pueden alterar la propagación de las ondas de superficie.

La figura 2.3.8 muestra el sistema Gemini distribuido por PASI Srl, este sistema contiene 3 sensores sísmicos (geófono triaxial). Es el sistema más moderno para la aplicación del método de Nakamura [24], el cual ya se encuentra en muchas legislaciones alrededor del mundo.

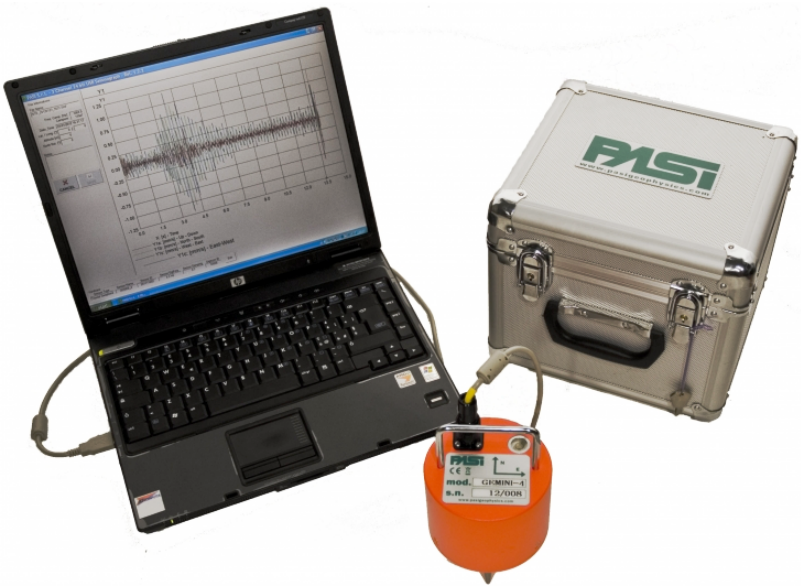

Figura 2.3.8: Geófono triaxial [27]

Matriz 3D pasiva

Se pueden instalar matrices de receptores sísmicos (geófonos/acelerómetros) cerca de los deslizamientos, para analizar eventos locales, por ejemplo, caída de rocas o microsismos pueden determinarse por la señal característica que forman.

Para el monitoreo se puede utilizar el análisis de la información contínua. Un ejemplo dado por SafeLand [29], es la red de monitoreo sísmico que se instaló en Aknes, Noruega en 2005.

Métodos eléctricos

Se basan en medir en la superficie de la tierra la resistividad eléctrica que tiene un suelo. Principalmente se necesita un equipo con 2 electrodos, que envían corriente, 2 que la reciben, 1 energizador o equipo, que genera la corriente y 1 equipo que capta la información de resistividad.

Resistividad

Para medir la resistividad se considera, que el suelo es un ambiente homogéneo e isotrópico con una resistividad uniforme, lo que se estudia es como viaja la corriente por la tierra, mediante la ley de Ohm. La propiedad medida se puede expresar en Ωm (resistividad) o como su inverso mS/m (conductividad).

No existe una correlación directa entre litología y resistividad, pero existen algunas clasificaciones, que con ayuda de un Geólogo se pueda inferir la presencia de ciertos materiales como: arcillas, pizarras, arenas, gravas, areniscas, calizas, entre otros.

Existen muchos arreglos para la adquisición de datos que el Geofísico deberá elegir dependiendo del objetivo de la investigación. Los arreglos más conocidos son: dipolo-dipolo, Werner, Schlumberger, Werner-Schlumberger, etc.

Las adquisiciones dependiendo de la longitud del perfil y del arreglo establecido, tomarán más o menos tiempo siendo relativamente prolongado, es decir, más de 2 horas en un perfil de 160 m. La profundidad de estudio dependerá de la longitud del perfil, a mayor longitud, mayor profundidad.

Principalmente existen 2 métodos, que se utilizan:

- Sondeo eléctrico vertical (SEV): obtiene la resistividad bajo un solo punto (1D)
- Tomografía eléctrica: utiliza varios electrodos a lo largo de un perfil. Se realizarán distintas combinaciones, para la obtención de información, lo que generará una serie de SEV, uno junto a otro. Esta información será tratada por un software de inversión, el cual nos permitirá tener un perfil de resistividades (2D). Un ejemplo se observa en la figura 2.3.9, es un perfil realizado por Jenny [18] en Albinen, Suiza.

Aplicaciones En el campo de los deslizamientos estos métodos permiten definir la superficie de falla, identificar posibles estratos por contraste de resistividad y ubicar el nivel freático. Además, estos métodos son utilizados para el monitoreo y se realizan modelos en 4D, que muestran el comportamiento de la masa deslizada. También, se puede analizar la variabilidad del nivel freático, información importante para el entendimiento de la cinética del deslizamiento y posteriormente la toma de decisiones adecuadas.

Limitaciones El perfil se genera a partir de una inversión, lo cual complica determinar con exactitud la profundidad de la superficie de falla. Otra limitación es la resolución de la investigación, por cuanto las lecturas dependen de variables como: ruido por torres eléctricas, topografía, contraste de resistividad entre materiales, etc.

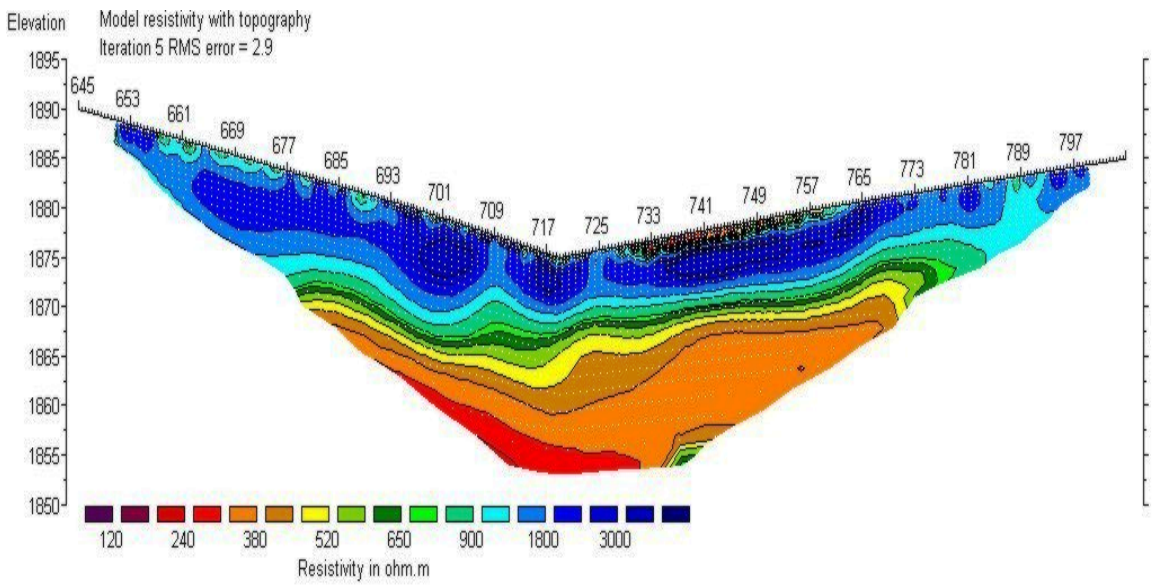

Figura 2.3.9: Tomografía eléctrica [18]

Potencial espontáneo

Este método mide la diferencia del potencial eléctrico natural entre pares de electrodos. Estos campos eléctricos naturales se generan por distintos procesos, pero se analiza el surgimiento de fluidos. La influencia del agua subterránea sobre la estabilidad de un talud, indica la importancia de este estudio. SafeLand [29] resalta el trabajo de Ruben y Hubbard (2005) que han logrado definir a gran escala el nivel freático y monitorearlo.

Aplicaciones SafeLand [29] indica que Bruno y Marillier (2000) determinaron la profundidad de flujo de agua subterránea al encontrar un alto contraste de valores de potencial espontáneo; y Lapenna (2005) identificó zonas de acumulación en un deslizamiento.
Sus aplicaciones fundamentalmente se encuentran en la localización de agua.

Limitaciones La falta de información de la fuente y de resultados cuantitativos, en cuanto a la profundidad y extensión del agua subterránea, son sus principales limitaciones y una de las razones de su uso limitado en deslizamientos.

Polarización inducida

Para este método, se aplica corriente, se suspende de la misma y se analiza la variación del voltaje en el suelo, ya que el suelo guarda cargas eléctricas. Se mide el tiempo de decaimiento del voltaje. Esto da la cargabilidad del suelo y dependerá de la presencia de materiales como pirita, magnetita, metales, arcillas, grafito, entre otros.

Aplicaciones Se usa para la localización de minerales, arcillas, contaminación y agua subterránea.

Limitaciones No se puede distinguir si la cargabilidad se da debido a presencia de minerales metálicos en una roca o flujo electrolítico. El ruido es mayor que el que se capta en las medidas de resistividad. Su interpretación cuantitativa es considerablemente más compleja. La interpretación es más cualitativa, es decir, se identifican perturbaciones, pero es complicado analizar la extensión y precisa la ubicación de la misma.

La figura 2.3.10 muestra 2 perfiles que se analizaron simultáneamente, mediante los equipos de la compañía AGI. El primero es un perfil que muestra la resistividad, mientras que el segundo permite observar la polarización inducida.

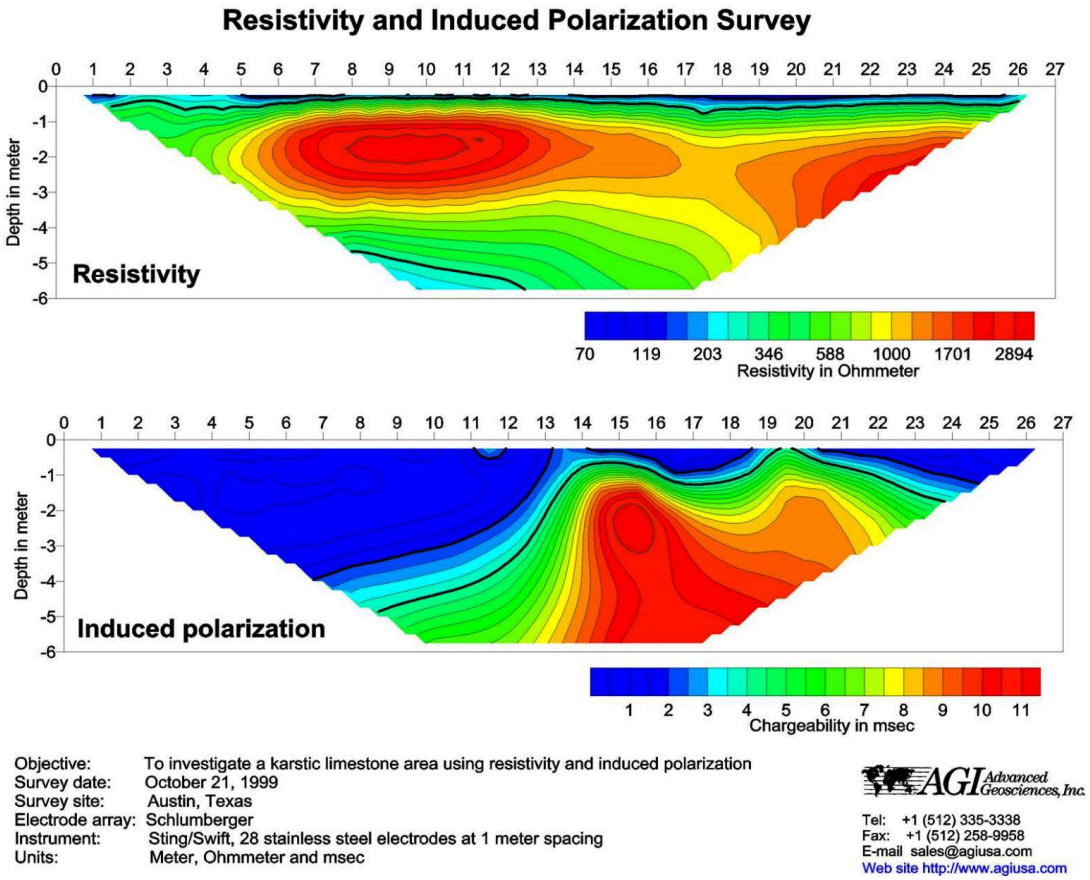

Figura 2.3.10: Perfil de resistividad y polarización inducida [3]

Métodos electromagnéticos

Los métodos electromagnéticos trabajan con frecuencias muy bajas, de 800 Hz a 10000 Hz. Hack (2000) comenta que los métodos de baja frecuencia se basan en la transmisión de un campo electromagnético a través de una bobina de transmisión. Este campo electromagnético inducido en el subsuelo generará un segundo campo electromagnético de respuesta de los materiales del subsuelo. Una bobina recibe tanto el campo electromagnético enviado como el generado por el suelo; la intensidad del segundo campo dependerá de la conductividad del material. La forma de las bobinas y su distancia dependerá de la profundidad requerida para la investigación.

Al igual que los métodos de resistividad, se puede realizar un perfil vertical (1D) o un perfil horizontal (2D). A mayor separación de las bobinas mayor profundidad. Otra forma de modificar la profundidad de análisis es la variación de la frecuencia con la que se trabaja.

Aplicaciones Principalmente este método es utilizado para determinar la geometría de la superficie de falla del FRM. SafeLand [29] indica que Schmutz (2000) correlacionó información de SEV con la obtenida por el método electromagnético transitorio. En los deslizamientos de tierra, SafeLand [29] da a conocer la investigación de Bruno y Marillier (2000) y Mauritsch (2000), quienes interpretaron cuantiosa información, la cual se obtuvo variando las separaciones de bobinas y encontraron una correlación de las profundidades a la que se encuentra la roca sana, con los resultados de la sísmica de refracción.

Limitaciones SafeLand [29] recuerda que todos los autores que han aplicado estos métodos, sugieren que sean combinados con otros métodos geofísicos para una adecuada interpretación.

La figura 2.3.11 muestra un ejemplo de 3 sondeos electromagnéticos que han sido utilizados para la generación de un prefil en 2D. El ejemplo se tomó del sitio web www.maws.com.

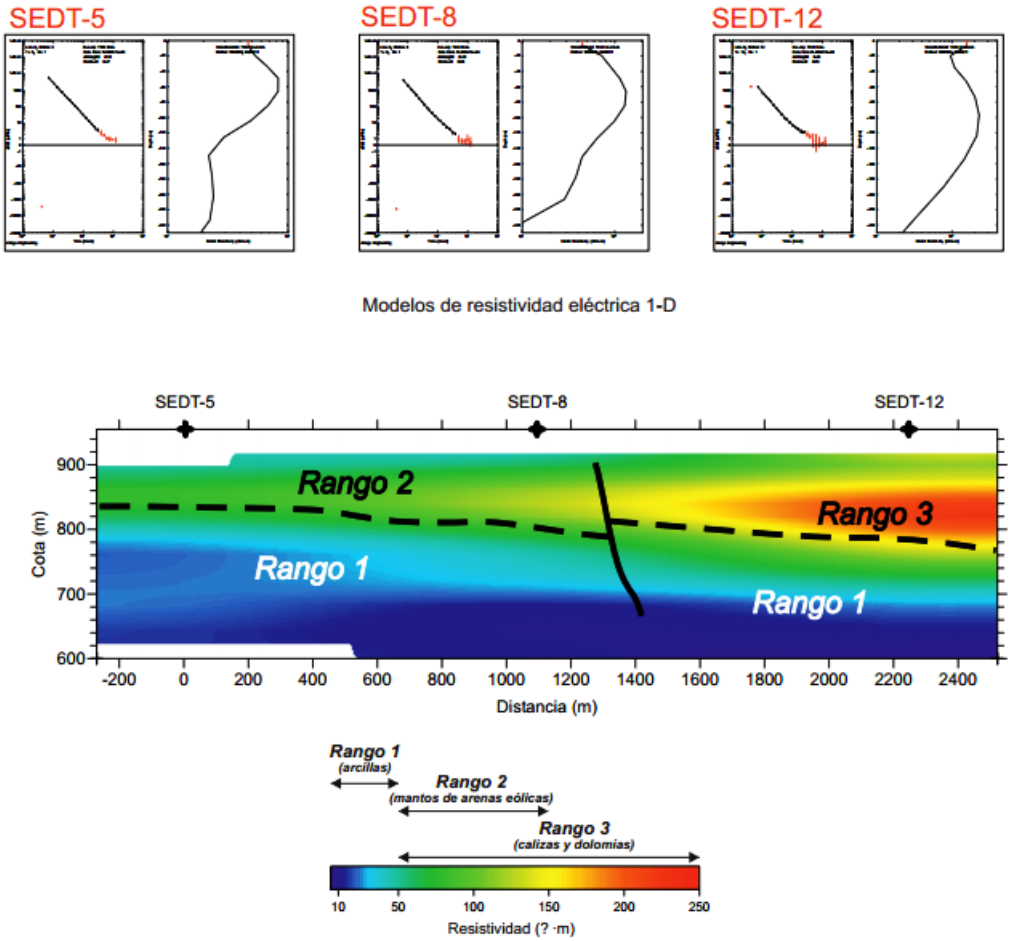

Figura 2.3.11: Sondeos electromagnéticos [26]

Georadar

El georadar usa las ondas electromagnéticas, que se reflectan en las discontinuidades. Estas ondas se emiten por antenas localizadas a lo largo de la superficie. Las discontinuidades muestran un cambio de la impedancia electromagnética, la cual depende de: permeabilidad magnética, velocidad de la onda electromagnética y permisividad eléctrica. Al igual que la sísmica de refracción se mide la velocidad, pero la diferencia es que la velocidad de las ondas electromagnéticas disminuye con la profundidad.

El rango de frecuencia en la investigación puede variar de 10 MHz a 1000 MHz, la frecuencia se relaciona directamente con la resolución y profundidad de investigación, a mayor frecuencia mayor resolución, pero menor profundidad de investigación. Otro factor, que afecta es la resistividad de los materiales investigados, a mayor resistividad mejor es la penetración, por el contrario materiales más conductivos presentan mayores problemas para ser penetrados.

Su portabilidad, facilidad de procesamiento de datos, alta resolución, adecuada penetración en glaciares, sensibilidad ante la presencia de agua, etc., lo han convertido en un método popular dentro de la geofísica superficial en los últimos 15 años.

Aplicaciones El georadar es utilizado en deslizamientos de rocas, principalmente por la alta resolución, que se puede obtener en superficie, pero también por la profundidad de alcance empleando bajas frecuencias. También, permite definir superficies de falla, niveles freáticos, diaclasamiento, rellenos, etc.

Maurer et al. [23], en la investigación del deslizamiento de roca de Randa ha realizado investigaciones tipo 3D y se espera que se sigan desarrollando investigaciones de este tipo. Por otro lado Lecomte et al. [22] destaca el uso de sistemas de georadar remolcados para investigar lugares con difícil accesibilidad.

Hasta el momento SafeLand [29], indica que no se ha registrado monitoreo de deslizamientos en (4D).

Limitaciones La presencia de capas de arcilla o materiales saturados (materiales conductivos) en los deslizamientos, absorben las ondas electromagnéticas. Sin embargo, en Noruega y Suecia el georadar ha ayudado a delimitar las zonas de arcillas. La gran cantidad de estructuras complejas en 3D, como en los deslizamientos de roca, pueden generar imágenes pobres. Además, si se le compara con la sísmica de refracción, las velocidades obtenidas no son 100 % confiables, debiendo correlacionarse con otros métodos, lo que si muestra son discordancias.

La figura 2.3.12 muestra el georadar 2450GR producido por Ditch Witch, como se puede ver son equipos de alta movilidad.

Figura 2.3.12: Equipo georadar [14]

Gravimetria

La gravimetría estudia las variaciones del campo de gravedad, por lo tanto, permite conocer las modificaciones de densidades, las cuales alteran el campo gravitatorio.

Estas variaciones se miden en unidades de aceleración (m/s^2) o en gal, que equivale a 1 cm/s^2. El Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos (1995) mide la microgravimetría, con rangos entre 1 a 10 μgal, para investigar las anomalías de las masas en el subsuelo.

Aplicaciones D. Jongman [12] destacan las ventajas que presenta la instrumentación para definir la geometría del deslizamiento. Su ligereza y fácil transporte permite realizar levantamientos rápidos y con menos esfuerzo, que los métodos sísmicos o eléctricos. Además, resaltan 2 situaciones donde puede existir un contraste en el cambio de densidad, al menos deben existir variaciones de decenas de g/cm^3:

- La superficie de falla indica un cambio brusco de materiales, como por ejemplo, un material deslizado sobre una roca sana.
- El material deslizado es muy perturbado en comparación del material, que no se desliza.

SafeLand [29] destaca la investigación de Del Gaudio (2000) que indica que en combinación con otra información como: geotécnica, geofísica, etc., para realizar un análisis de estabilidad de taludes, la gravimetría da información de importancia como:

- Estimación del espesor de la masa movida.
- Contrastes de densidad.
- Ubicación y geometría de partes heterogéneas dentro de la masa desplazada.

También SafeLand [29] habla del trabajo de Bláha (1998), quien sostiene que esté método puede ayudar en el monitoreo mediante el control dinámico en el tiempo, igualmente contribuye en la descripción de las estructuras presentes como:

- Deformaciones.
- Bloques.
- Zonas de tensión.

Limitaciones Autores como del Gaudio (2000) y Reynolds (1997) son citados por SafeLand [29] ya que muestran que el poco uso de este método en la estabilidad de taludes se debe principalmente a la dificultad del procesamiento de información y a la existencia de muchas posibles respuestas

Otro problema, que destaca SafeLand [29] basado en el trabajo de del Gaudio (2000) es la dificultad en identificar y diferenciar las anomalías de interés, de otras características del terreno, como por ejemplo puede confundirse una superficie de falla con una discontinuidad litológica.

La figura 2.3.13 es un ejemplo realizado por Geofísica Consultores, quienes analizaron problemas de hundimientos debido a la existencia de zonas kársticas.

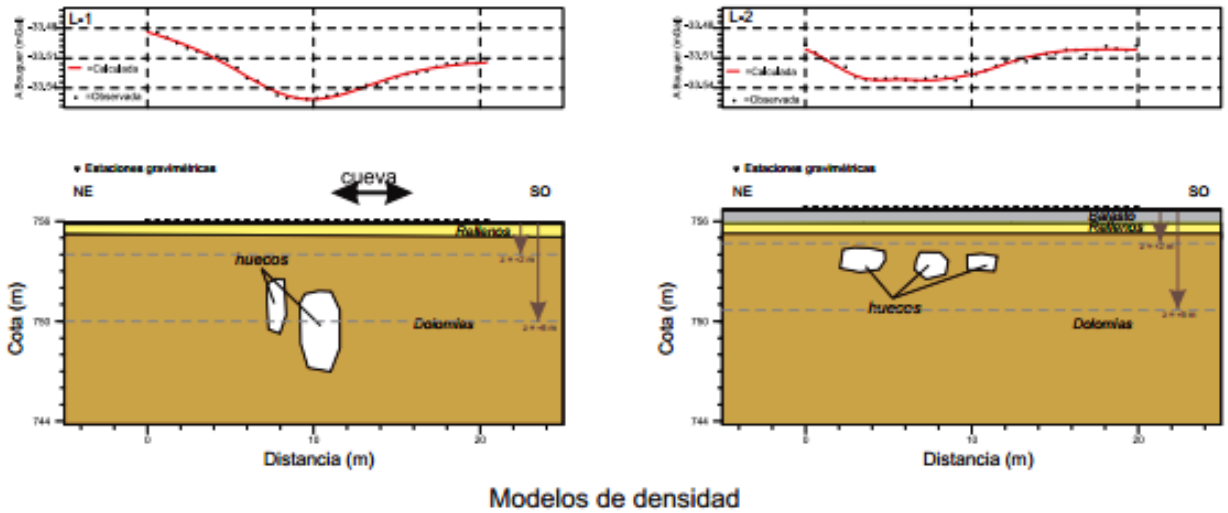

Figura 2.3.13: Gravimetría en zonas kársticas [15]

Monitoreo acústico y micro sísmico

La deformación de roca, escombros o suelos, se da desde escalas centimétricas hasta kilométricas. Estas deformaciones están relacionadas con procesos físicos como: fallas, rupturas, fricción a lo largo de discontinuidades, etc., Todos estos movimientos propagan ondas acústicas, que pueden ser captadas por sistemas de monitoreo remoto.

El monitoreo durante estos eventos liberadores de tensiones se realiza aplicando técnicas de sísmica pasiva, las cuales llevan a conocer el comportamiento y mecanismos de falla. Por lo tanto, se han aplicado adecuadamente en el estudio de deslizamientos, caída de rocas y flujo de escombros.

Se utilizan sensores sísmicos como: sismógrafos, acelerómetros, geófonos, etc., para captar este ruido ambiental que se provoca y que mediante un análisis adecuado puede ayudar a monitorear adecuadamente los FRM.

Las emisiones acústicas se producen por la liberación de energía elástica, por medio de ondas elásticas que se propagan por los materiales. Las fuentes de estas emisiones pueden ser: fallas, fricción, corte, deslizamiento, propagación de grietas, impactos y procesos de cavitación.

SafeLand [29] resalta los avances de Arratano (1999) e Itakura (2005) en el estudio de flujo de escombros y determinaron que el volumen y velocidad están estrechamente relacionados con la amplitud de las ondas recibidas. Además SafeLand [29] da a conocer la investigación de Lavigne (2000) quien agrega que utilizando esta información, se puede crear una alarma de desencadenamiento, para activar sistemas de alerta temprana o video grabaciones, que permitan conocer más información de la inestabilidad.

Nakamura [24] ha utilizado vibraciones ambientales de baja amplitud llamadas microtremors. Él analiza las componentes verticales y horizontales adquiridas simultáneamente con un geófono tipo 3D y puede detectar zonas sedimentarias, estratos, etc.

SafeLand [29] muestra la recopilación entre 1990 y 2000 de todos los estudios donde se utilizaron microtremors realizado por de Micciarelli (2001), quien considera que es una técnica de fácil aplicación y bajo costo, para caracterizar adecuadamente un deslizamiento.

SafeLand [29] resalta la utilización por parte de Helmstetter (2009) de estos métodos para monitoreo y determinar posibles desencadenantes, mediante la correlación de: precipitación, nivel freático y sismicidad, logrando mostrar que la precipitación es el evento que desencadena la falla en el deslizamiento de Vorarlberg, en Austria.

Senfaute et al. [31] busca un sistema que permita la predicción de grandes caídas de rocas, analizando 15 horas de registros previos al evento ocurrido en Mesni-Val, en Francia. Ha logrado plantear una hipótesis basada en una serie de fases y mecanismos de falla, que contribuyen con la caída de rocas.

La figura 2.3.14 muestra un registro que obtuvo Senfaute et al. [31] en Mesnil-Val se puede observar que la actividad microsísmica aumenta considerablemente cuando se produce una caída de rocas.

Limitaciones Cada material induce diferentes frecuencias desde 10 Hz hasta 500000 Hz, las frecuencias muy bajas se ven afectadas por ruidos ambientales como: ruido eléctrico, viento, ruidos antrópicos, etc., en cambio, las frecuencias altas son alteradas por las atenuaciones, que generan los materiales.

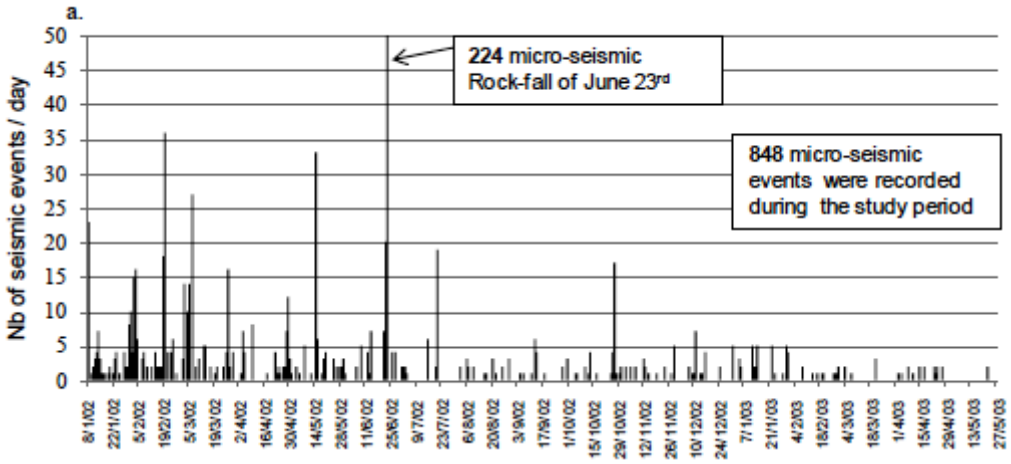

Figura 2.3.14: Monitoreo micro sísmico [31]

2.3.2 Geofísica aérea

Los métodos de geofísica aérea se han venido aplicando en la última década, SafeLand [29] destaca el trabajo de varios autores como Nakazato (2006), Pfaffhuber (2010) y Sasaki y Nakazato (2004) que han trabajado con este tipo de métodos en la investigación de los deslizamientos y en la identificación de los mismos. El desarrollo de nuevas tecnologías ha ayudado a la obtención de información detallada y muy calibrada.

Estos métodos usan sensores montados en aeronaves o son arrastradas por cables, que cuelgan decenas de metros bajo estos medios de transporte. Usualmente se utilizan helicópteros, para realizar vuelos nivelados para una adecuada recepción de la señal.

Una de sus ventajas es la realización de lecturas de amplias zonas de estudio en cortos tiempos. Además, estos métodos no solo captan información de la superficie, sino también, de la estructura interna del suelo. Aunque la utilización de un helicóptero puede sugerir un método costoso, se puede balancear los costos combinando el empleo de otros métodos simultáneamente. Si se aprovecha la suficiente información que se puede obtener de un mismo lugar con un solo vuelo de adquisición, se puede apreciar los beneficios de este método.

Los avances, tanto en los equipos como de los métodos de interpretación, permiten que los resultados sean óptimos.

2.4 Sistemas de alerta temprana basados con monitoreo en tiempo real

Es importante definir qué es monitorear a tiempo real o casi real de un deslizamiento. Un monitoreo puede entenderse como "una repetición de observaciones sistemáticas de un objeto o área" [29]. A partir de dos observaciones se puede realizar un monitoreo, mientras más contínuas sean estas, se considera que se realiza un monitoreo en tiempo casi real.

El proyecto SafeLand [29] hizo un análisis mediante encuestas que buscan determinar la efectividad, utilización, aplicabilidad a monitoreo y potencial de aplicación de sistemas de alerta temprana, estudiando métodos basados en tierra, asi como como técnicas aéreas y espaciales.

El proyecto se basó en estadísticas de 86 investigaciones realizadas en varios países Europeos y Asiáticos. Los tipos de FMR activos monitoreados se representan en la figura 2.4.1, tomada de SafeLand [29].

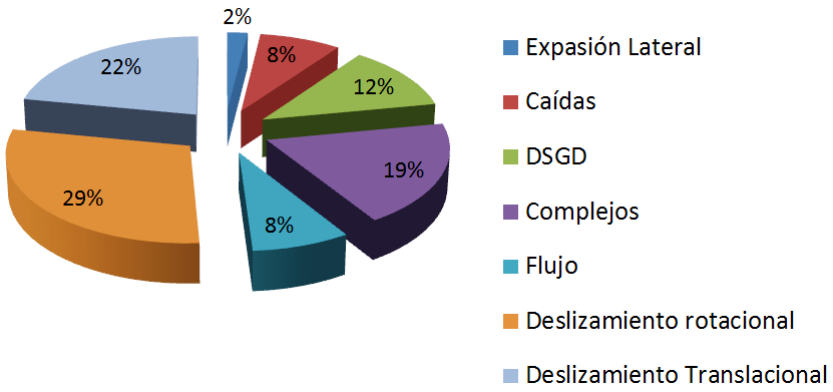

Figura 2.4.1: Clasificación de deslizamientos monitoreados [29]

Dentro del análisis de instrumentos más utilizados y su potencial en el desarrollo de sistemas de alerta temprana, se encuentran 3 campos importantes de monitoreo:

- Monitoreo de desplazamientos y deformaciones, con métodos "in situ".
- Monitoreo de factores hidrometeorológicos.
- Monitoreo de parámetros geofísicos.

La figura 2.4.2 se creó a partir de la figura 31 de SafeLand [29], entrega 4.5, tomando métodos con mayor potencial para el desarrollo de sistemas de alerta temprana, los más implantados y los que pueden ser aplicados en el medio ecuatoriano.

Dentro del monitoreo del movimiento y deformaciones superficiales se tiene diversas técnicas como: GPS, estaciones totales, cámaras de alta resolución, LiDAR, sistemas de radar, etc. Todas estas técnicas permiten conocer el movimiento de las inestabilidades con altas precisiones, puesto que pueden identificar el movimiento en 3D en detalle de hasta mm.

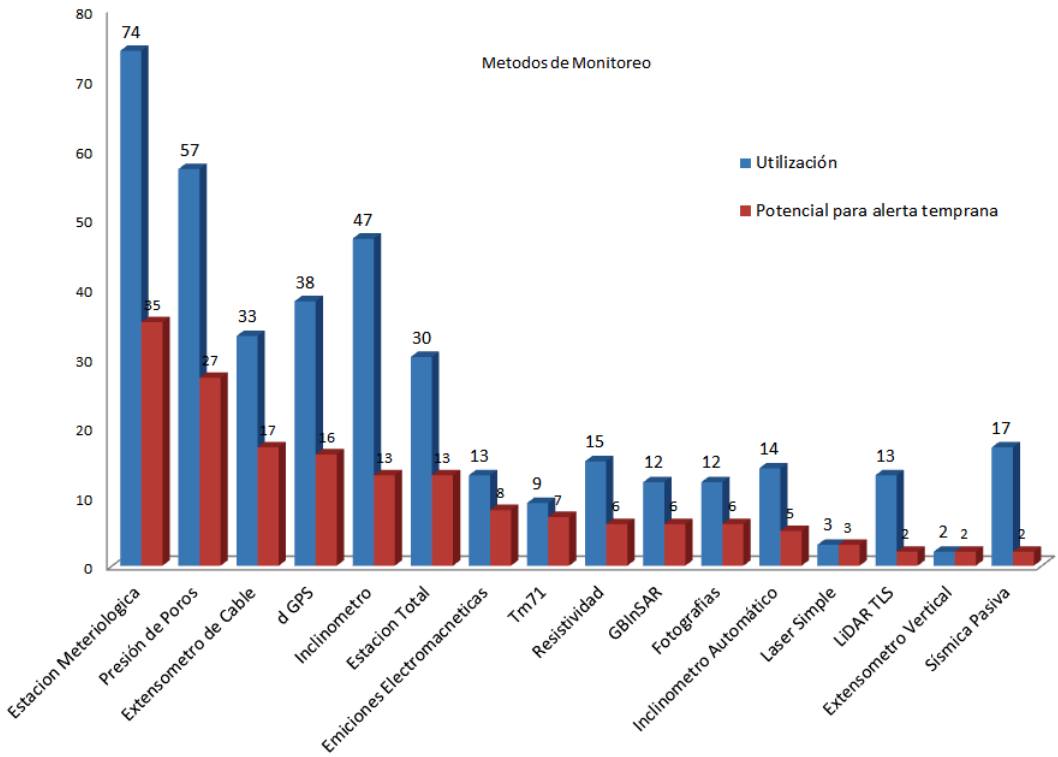

Figura 2.4.2: Métodos más utilizados y con mayor potencial para alerta temprana [29]

2.4.1 Desplazamientos y deformaciones

Extensómetros de cable

Permiten realizar lecturas contínuas del movimiento tanto en la superficie como en el interior de perforaciones. SafeLand [29] resalta las conclusiones del trabajo de Corominas (2005), que manifiesta que aunque no existe un uso masivo de estos equipos en el monitoreo de deslizamientos, por su bajo costo, simplicidad en uso y recopilación de información y su excelente desempeño, han hecho que sea el método de mayor implementación en los últimos años.

La figura 2.4.3 tomada de SafeLand [29], muestra un ejemplo de un extensómetro de cable instalado en el campo.

Figura 2.4.3: Extensómetro vertical de cable [29]

Sistemas multiparamétricos (DMS)

Los DMS también son utilizados como herramientas de monitoreo y su función principal es conocer las deformaciones bajo la superficie. Son empleados para el monitoreo de zonas en las cuales el acceso para realizar un registro manual de lecturas es muy complicado. Por otra parte, con este sistema se puede realizar un monitoreo en tiempo real, sin embargo, SafeLand [29] destaca las desventajas por su complejidad y altos costos de instrumentación y equipos.

SafeLand [29] acentúa la importancia de los avances realizados por la empresa italiana CSG srl, puesto que actualmente permiten encontrar Sistemas Multiparamétricos de 2D y 3D, que han sido desarrollados principalmente para el control en tiempo real de la estabilidad de deslizamientos, cortes, trabajos de Ingeniería, etc. Asimismo, admite el control simultáneo de otros parámetros físicos y mecánicos como: nivel freático, variaciones en la dinámica del movimiento y temperatura.

La figura 2.4.4 muestra las columnas de un DMS de cable de 2D, mientras que la figura 2.4.5 indica un DMS de 3D. Estas imágenes se tomaron del documento de SafeLand [29].

Figura 2.4.4: Sístema Multiparamétrico 2D (DMS) [29]

Figura 2.4.5: Sístema Multiparamétrico 3D (DMS) [29]

GPS diferenciales o dGPS

El GPS capta las ondas electromagnéticas emitidas contínuamente por varios satélites y obtiene su posición en el globo mediante coordenadas UTM (X, Y, Z) o Geográficas (latitud, longitud y altura). Estos equipos permiten precisiones entre 2 y 5 mm, detectando movimientos pequeños. SafeLand [29] resalta el trabajo de ClimpChalp (2008), quien realiza monitoreo contínuo utilizando GPS de bajo costo; y las propuestas de Chen (2005), que analizan la utilización de un esquema de varias antenas y envían la información recopilada a un GPS. Se utiliza toda esta información para determinar con mayor precisión la ubicación.

SafeLand [29], basada en las experiencias de monitoreo mediante GPS en Francia, indica que estas técnicas son más idóneas para el monitoreo de deslizamientos lentos, pendientes con flujo y etapas de pre falla en deslizamientos de rocas.

La figura 2.4.6 muestra una instalación típica de un sistema de monitoreo de GPS en Port Hills, Christchurch.

Figura 2.4.6: Instalación típica de un dGPS [1]

InSAR en tierra (GB InSAR)

El desarrollo de GB-InSAR, tanto en sus mejoras en equipos como en nuevas aplicaciones y nuevos software, han permitido tener una herramienta confiable para el monitoreo de FRM.

SafeLand [29] destaca la investigación de Casagli (2009) en el volcán Stromboli, donde se prueba la eficacia de los GB-InSAR, para la aplicación de sistemas de alerta temprana al detectar un

abultamiento que ayudó a predecir su actividad.

El desarrollo de este tipo de equipos en los últimos 10 años ha traído muchas ventajas como por ejemplo son más pequeños y de mayor movilidad; pueden utilizar un amplio número de bandas electromagnéticas y sobre todo ahora existen equipos que pueden realizar un levantamiento entre 3 y 5 minutos, lo cual permite monitorear deslizamientos moderadamente rápidos, como flujo de tierra como velocidades de 3 $m/día$. Todos estos avances conducieron a que algunos Centros de Investigación tengan la capacidad de producción de estos equipos y, a pesar de su costo, sea una técnica muy popular, [29].

La figura 2.4.7 es un ejemplo tomado de Alberta Geological Survey (AGS), muestra un GB-InSAR colocado frente a Turtle Mountain para su análisis.

Figura 2.4.7: Instalación típica de un GB InSAR [4]

Imagenes ópticas

Principalmente se ha utilizado para el monitoreo de desplazamientos y determinación de cambios en las características de la superficie. Las últimas tecnologías buscan realizar reconstrucciones en 3D; hasta el momento este desarrollo está solamente en estado experimental. Su ventaja permite analizar deslizamientos de escala local activos de todo tipo, con velocidades desde muy lentas a muy rápidas. Los principales problemas que presentan para la realización de un sistema de monitoreo real es la transmisión de información, debido a la creación de archivos extensos, que requieren tecnologías costosas y el tiempo de procesamiento de información.

Estación total

Dentro del monitoreo en tiempo real de desplazamientos, la estación total automática representa uno de los equipos más utilizados y con mayor proyección en este campo. Su resolución es muy alta y permite analizar deslizamientos puntuales, es decir, se monitorea la pendiente deslizada.

Principalmente se utiliza para monitorear velocidades lentas. Las desventajas que puede presentar este equipo es el costo que representa, además requiere chequeos mensuales, la toma de datos se restringe con la presencia de niebla y bruma.

En la figura 2.4.8 se observa la estación total automática implementada en el proyecto RiskYdrogéo [28] , en la figura 2.4.9 se ve cómo se debe proteger del vandalismo a estos equipos.

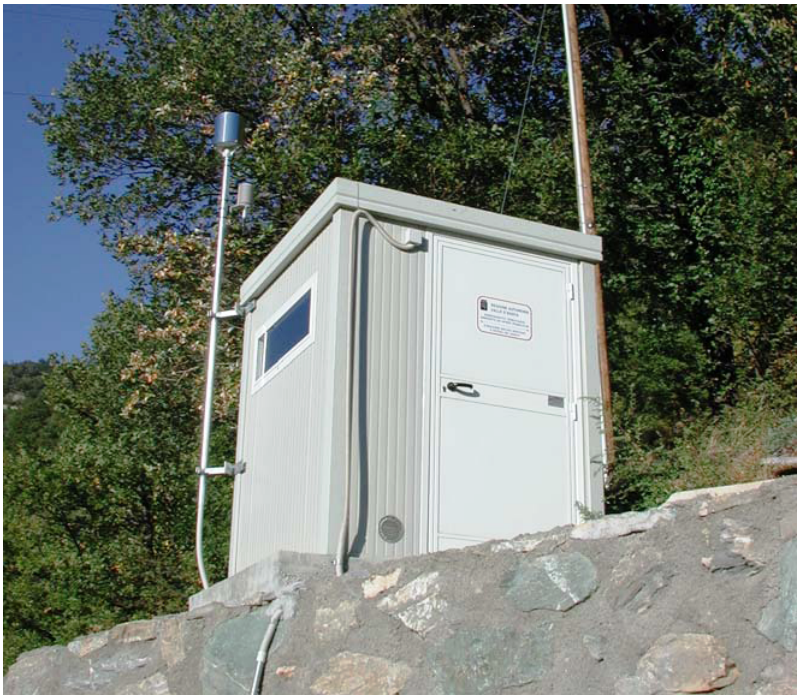

Figura 2.4.8: Estructura de protección de una estación total [28]

Figura 2.4.9: Estación total automática [28]

Extensómetro 3D TM71

Esencialmente se usa en la medición de desplazamientos de fallas en macizos rocosos. Se han podido observar muy buenos análisis en el monitoreo de fallas en Eslovenia; 7 extensómetros han monitoreado fallas que atraviesan cuevas kársticas. Los resultados son correlacionados con la variación de temperatura y la precipitación. Gosar et al. [16]

La figura 2.4.10 muestra un extensómetro TM71.

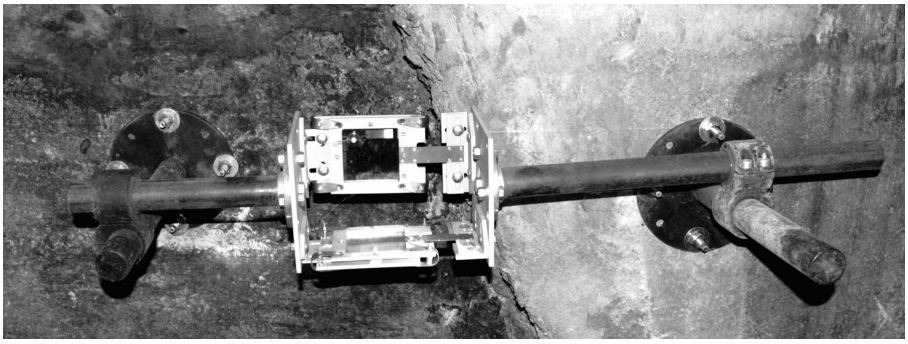

Figura 2.4.10: Extensómetro TM71 [16]

Escaner Laser Terrestre o TLS

El desarrollo del escáner laser terrestre en los últimos 10 años ha permitido monitorear los desplazamientos mediante el análisis de varias adquisiciones realizadas a lo largo del tiempo. Si se compara con métodos como el GPS o estación total, su ventaja es la capacidad de adquirir información de toda un área, no solamente de un punto. SafeLand [29] destaca el estudio de varios autores que han utilizado el TLS para obtener modelos en los cuales se detecta solo cambios de altitud (1D) o modelos más avanzados que determinan los desplazamientos en 3D. Los equipos existentes todavía no admiten realizar un monitoreo a tiempo real o cercano a tiempo real, por lo que no están adaptados para sistemas de alerta temprana. SafeLand [29] enfatiza el análisis de Jaboyedoff (2010) y Derron y Jaboyedoff (2010), donde estos Autores destacan el potencial de esta técnica para el estudio de deslizamientos, tanto en el campo de la caracterización como en el monitoreo.

Una técnica alternativa al TLS que presenta SafeLand [29] es la correlación de imágenes de alta resolución, principalmente el costo, tanto de operación como de equipos es considerablemente inferior. SafeLand [29] presenta el trabajo de Delacourt (2007) como el único que ha demostrado la eficiencia en la aplicación de estos métodos de correlación. Se utilizó para monitorear los límites y los desplazamientos en el deslizamiento de La Clapiére en los Alpes franceses. Se concluyó que esta técnica se adapta para el monitoreo de deslizamientos lentos, flujos de lodo y caída de rocas. No soporta un monitoreo a tiempo real.

La figura 2.4.11 es un ejemplo de TLS producido por la marca Topcon.

Figura 2.4.11: TLS Topcon [35]

2.4.2 Parámetros geofísicos

Geófonos

El monitoreo sísmico analiza el ruido natural que se genera. Permite monitorear y determinar el posible desencadenamiento de eventos en zonas inestables. El análisis de las emisiones acústicas producidas por la acumulación de energía elástica puede ser utilizada para el monitoreo a través de métodos conocidos como micro sismicidad o ruido de roca. El cuadro 2.4.1 indica el autor y el monitoreo realizado. Se utilizó la información recopilada por SafeLand [29].

Autor	**Año**	**Monitoreo realizado**
Hardy	1991	Estabilidad de taludes en minas abiertas y canteras.
Altamirano Kolesnikov Willenberg Eberhardt	2004 y 2005 2003 2004 2004	Investigaciones en acantilados rocosos.
Brückl y Mertl Spillmann Roth	2006 2007 2005	Monitoreo de deslizamiento debido a sismos y procesos de fractura en rocas duras
Arrantano Itakura	1999 2005	Monitoreo y alerta de flujo de escombros
Dixon	1996 y 2003	Monitoreo de flujo de lodos

Cuadro 2.4.1: Investigaciones monitoreo sísmico [29]

La atenuación de las ondas en materiales como lodos o arcillas hace que estas técnicas sean utilizadas principalmente en el monitoreo de rocas duras (deslizamiento y caída), aunque algunos Autores como Dixon (2003), han logrado monitorear deslizamientos de lodos. [29]

2.4.3 Parámetros hidrometeorológicos

Estaciones hidrometeorológicas

Están diseñadas para cuantificar y registrar de forma continua diversas características meteorológicas. Los instrumentos más comunes, que se pueden encontrar son:

- Termómetro
- Barómetro
- Pluviómetro
- Anemómetro
- Veleta

En el campo del monitoreo de FRM, lo que más interesa es medir la cantidad de agua, que cae sobre el suelo afectado, además puede ser muy importante conocer el efecto de la temperatura sobre la inestabilidad monitoreada.

Un ejemplo se ve en la figura 2.4.12, donde se puede observar una estación meteorológica alimentada por un panel solar.

Figura 2.4.12: Estación meterológica [28]

Fibra óptica

SafeLand [29] da a conocer la utilización de fibra óptica para el monitoreo de deslizamientos, puesto que se pueden distribuir sensores de fibra óptica dentro del cuerpo del deslizamiento, permitiendo realizar un monitoreo en tiempo real de características como esfuerzo de corte y compresión, temperatura, presencia de agua, etc. Aunque sus aplicaciones parecen muy amplias, todavía existen muchos problemas antes de utilizar en el monitoreo de un deslizamiento a costos adecuados.

Reflectometría o TDR (Time Domain Reflectometer)

La reflectometría o TDR por sus siglas en inglés (Time Domain Reflectometer), es una técnica que se coloca un cable coaxial en el cuerpo del deslizamiento y se envía pulso de voltaje en forma de ondas, que se reflejan. Mediante el análisis de estas reflexiones se puede localizar roturas o esfuerzos en el cable. [33]

Esta técnica se ha utilizado para determinar la profundidad de la superficie de falla y contenido de agua en el suelo. Una de sus ventajas frente a la utilización de Inclinómetros es su bajo costo y mediciones más rápidas y sencillas. Suárez [33] indica que su desventaja es el desconocimiento de la magnitud y dirección del movimiento. Estas técnicas pueden mejorar con avances tecnológicos en el futuro.

La figura 2.4.13 tomada de Suárez [33] muestra un esquema de un sistema TDR.

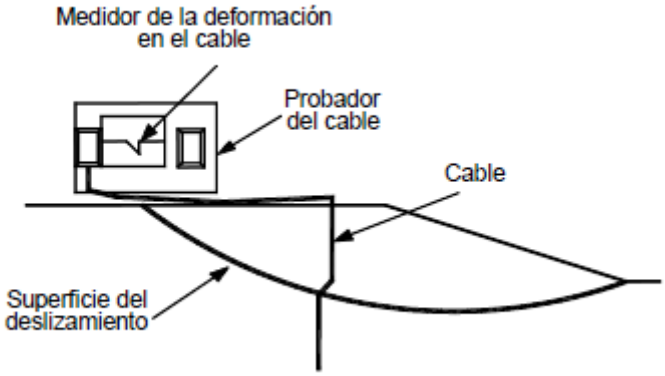

Figura 2.4.13: Esquema de sistema TDR [33]

2.4.4 Método geoeléctrico

El monitoreo geoeléctrico se refiere principalmente a la medición de resistividad, potencial espontáneo y polarización inducida. Como se conoce, una de las principales causas de los FRM es la influencia de la precipitación y el agua subterránea. La resistividad eléctrica depende de propiedades físicas de los materiales como: porosidad, saturación del agua, conductividad, contenido de arcilla, etc. D. Jongman [12] manifiesta la importancia de los métodos geoeléctricos para la determinación del nivel freático, la influencia de la precipitación en el sitio mediante cambios de resistividad del terreno y para determinar el cambio en la geometría de los poros debido a deformaciones en el cuerpo del deslizamiento. También estos Autores resaltan que en el campo de los deslizamientos no se han realizado investigaciones relacionadas con la aplicación de este método en el campo del monitoreo.

SafeLand [29] resalta la necesidad de implantar de sistemas de monitoreo geoeléctrico permanente junto con un monitoreo de desplazamientos de alta resolución, que permite determinar su aplicabilidad en el campo del monitoreo casi en tiempo real y el desarrollo de sistemas de alerta temprana. De esta necesidad el proyecto Safeland equipó a sitios con diferentes características con el sistema $Geomon^{4d}$ que obtiene información a lo largo del tiempo y que podrá ser correlacionada con la dinámica del deslizamiento.

2.4.5 Sistemas de alerta temprana SAT

SafeLand [29] resalta los 5 elementos necesarios para UN-ISDR (2004).

1. Conocimiento del riesgo
2. Monitoreo, análisis y pronóstico de los peligros
3. Centros operacionales
4. Comunicación o diseminación de alertas o advertencias
5. Capacidad local de respuesta a las advertencias recibidas

La elección de un sistema de alerta temprana depende de algunos factores como:

Tipo de FRM Se tomó la clasificación de Cruden and Varnes [10], las características de cada tipo se señalan en la figura 2.1.4.

- Deslizamientos
  - Rotacionales
  - Translacionales
- Derrumbes
- Caídas
- Flujos
  - Flujo de escombros
  - Avalancha de escombros
  - Flujo de tierra
  - Flujo de lodo
  - Reptación
- Expansiones laterales

Escala del FRM

- Sistema de múltiples pendientes tiene como objetivo monitorear independientemente y determinar la probabilidad de diferentes pendientes a deslizarse.
- Sistema de una pendiente busca determinar la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento en una unidad de terreno. Se implementan varios métodos que se complementan. Usualmente métodos geofísicos.
- Sistema de escala regional se basa en el análisis de eventos meteorológicos que pueden provocar eventos regionales; estos requieren el diseño y desarrollo de modelos que simulen el comportamiento, para así generar mapas de advertencia. Se debe interrelacionar la información adquirida para varios parámetros y realizar simulaciones numéricas simultáneas y generar advertencias de fenómenos como la precipitación.

Tiempo Es importante determinar el tiempo entre el momento que la ocurrencia del evento es razonablemente inminente y se produce el evento, siempre que se conozcan las acciones de evacuación y demás operaciones, que deben realizarse. Se distinguen dos sistemas de alerta temprana, según el tiempo.

- Pre desencadenamiento, se analiza la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento, basándose en un análisis de los elementos precursores. Una advertencia se lanza cuando se alcanza un punto determinado dentro de un precursor analizado, por ejemplo una tormenta, es decir, tomando en cuenta factores como la intensidad y duración. Puede o no desencadenar un evento de FRM.
- Post desencadenamiento, ocurre un deslizamiento y el sistema advierte una condición peligrosa previamente definida. Por ejemplo caída de rocas en carreteras o vías del tren, detendrá el tráfico. O un lahar puede generar alerta de evacuación en sectores en riesgo.

Cualquiera de estos dos sistemas pueden generar falsas alarmas que deben ser controladas de cierta manera por un sistema de video vigilancia o inspección que confirme o no la advertencia generada.

Factores a tomar en cuenta para la implementación

Elementos expuestos al riesgo Es muy importante conocer los elementos que están en riesgo para la aplicación de un SAT. Los elementos en riesgo pueden ser: población, propiedades, actividades económicas, servicios públicos, sistemas de transporte, recursos naturales, sistemas de servicios básicos, etc.

Restricciones económicas La implantación de un SAT tiene restricciones y una de las principales es la económica. Los costos de implementación se sistematizan en los siguientes:

- Costo de recolección de información: en muy pocos casos puede ser gratuita, sin embargo, para extensas áreas la utilización de equipos aerotransportados con LiDAR, con alta densidad de puntos (60 $puntos/m^2$) SafeLand [29], indica un costo en Europa de alrededor de 7 €$/m^2$.
- Costos adicionales para una respuesta rápida. (Estaciones de control, señalización, alarmas)
  - Costos de mantenimiento.
  - Costos de comunicación.
  - Costos de expertos, que operan el sistema de alerta temprana.
  - Costos de situaciones críticas.
- Costos procesamiento: dependerán del método utilizado, SafeLand [29] da un ejemplo de análisis durante 7 años, para áreas extensas tiene un costo de 20 €$/km^2$ y para áreas pequeñas 350 €$/km^2$. También, destaca que técnicas satelitales y sensores pasivos en tierra, tienen costos de procesamiento reducidos.

Restricciones de accesibilidad SafeLand [29] destaca las limitaciones que genera un sitio inaccesible por la necesidad de transportar equipos, generación de energía, transporte de un equipo de evaluación en caso de emergencia, etc. En zonas de dificil acceso se recomienda el uso de tecnología de teledetección que facilite el monitoreo.

Actores claves en un Sistema de Alerta Temprana

- Comunidades
- Gobiernos Locales
- Gobiernos Nacionales
- Instituciones y Organizaciones Regionales
- Organizaciones no Gubernamentales
- Sector Privado
- Comunidad Académica y de Investigación
- Medios de Comunicación

Análisis previo a la implantación de un SAT

SafeLand [29] analizó varios SAT y los evaluó. Es importante conocer los estudios previos que se deben realizar para el diseño de un SAT. La figura 2.4.14 se tomó de SafeLand [29], donde muestra las investigaciones previas realizadas en 23 deslizamientos monitoreados para el diseño de un SAT.

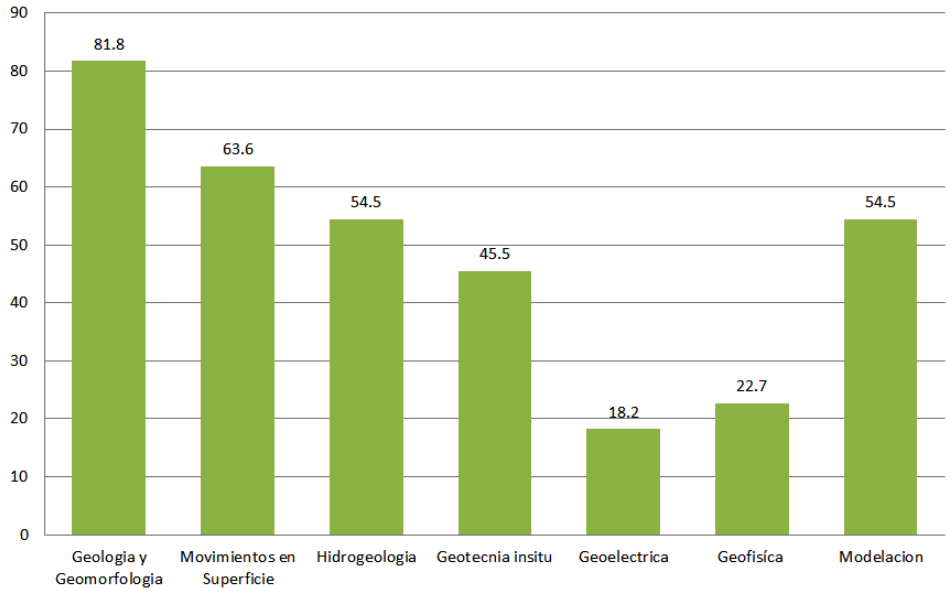

Figura 2.4.14: Estudios previos a la implantación de un SAT [29]

La figura 2.4.15 muestra la instrumentación utilizada para medir los diferentes parámetros como: desplazamiento, agua, pluviosidad y sismicidad.

Un SAT debe ser:

- Robusto
- Simple

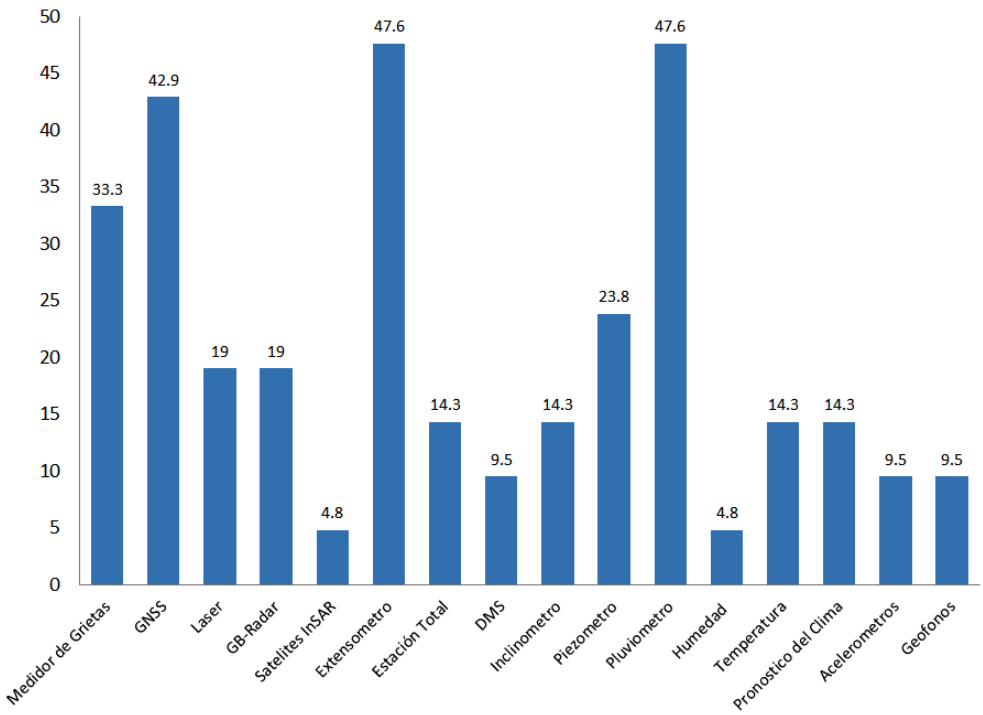

Figura 2.4.15: Instrumentación utilizada [29]

- Redundante
- Inmune ante pérdida de energía y comunicaciones.

Adicionalmente, debe evitar ser vulnerable ante el deslizamiento que monitorea y basarse solamente en información de desplazamientos superficiales; también debe considerar el clima y variaciones de niveles de agua. Por otra parte, debe integrar la información de forma contínua para realizar un análisis de estabilidad.

SAT en el mundo

Proyectos como RiskYdrogéo [28] que trabaja en la zona de los Alpes de Francia, Italia y Suiza y Entidades Estatales como USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos), tienen experiencia en la implementación de sistemas de monitoreo de deslizamientos. Basado en esta experiencia, las recomendaciones del proyecto SafeLand [29] que se refieren a la aplicación de ciertos métodos para el monitoreo y las recomendaciones de Jungwoo Lee (2009) en cuanto a la reducción de costos en monitoreo mediante la utilización de una red de sensores inalámbricos.

RiskYdrogéo [28] instaló distintos instrumentos en 5 sitios de estudio y entre los más utilizados están: piezómetros, pluviómetros, GPS manual y automático, estaciones meteorológicas, extensómetros, GB-InSAR, estación total automática, SAR satelital y escáner laser. El proyecto analiza los problemas en el monitoreo, instrumentación, etc., además estudia los resultados y su importancia.

En varios de los sitios se correlacionó la información pluviométrica con la de los desplazamientos generados y se llegó a generar umbrales de alerta, los cuales indican el valor de lluvia (mm/h),

intensidad en horas.

Se resalta la utilidad de GB-InSAR que demostraron ser precisos a grandes distancias (4 km) y con la presencia de nubes. Además resalta su utilidad en el control de movimientos lentos y rápidos, sobre todo en el caso de urgencias.

En el caso de la utilización de inclinómetros, los problemas que tuvieron fueron su duración, ya que debido a los movimientos rápidos, solo pudieron analizar un período de 2 meses. Sin embargo, fue posible determinar la profundidad del perfil de falla.

Para correlacionar resultados y determinar con precisión los factores desencadenantes, se deberán tener lecturas en períodos de verano e invierno, es decir, obtener información alrededor de 1 año.

La USGS ha basado sus estudios en un GPS colocado sobre una estructura que se asemeja a una araña, estos equipos se colocan sobre la masa deslizada y envía información en tiempo cercano a real a una antena de radio que a su vez transmite a una central de control. Junto a estos equipos tienen estaciones meteorológicas.

Asimismo han generado cuadros de decisión de alerta fundamentadas en la precipitación, que permiten generar alertas tempranas en lugares afectados, por flujo de escombros o en FRM que afectan las vías.

También se considera la utilización de técnicas remotas como imágenes de satélites pero no se destacan aplicaciones que han alcanzado un detalle a tiempo real.

La información recopilada se analiza, grafica y coloca en el sitio de internet, estando disponible para cualquier usuario.

Capítulo 3

Metodologia

3.1 Análisis de tipos de movimientos en masa

Es importante caracterizar un FRM puesto que si se conoce su dinámica se puede determinar las medidas de estabilización adecuadas, además, permite establecer los alcances en términos de riesgo que éste posee.
Se conocen varios métodos para la caracterización de movimientos de masa y dependiendo principalmente de la escala a la que se busca trabajar, se recomiendan utilizar distintos métodos.

Si se busca realizar una zonificación a gran escala por ejemplo, una zonificación de FRM en todo el país o en regiones, existen métodos modernos basados en la utilización de imágenes satelitales en combinación con herramientas informáticas como OBIA, que permiten inventariar y realizar monitoreo a largo plazo.

El aumento en la calidad de las imágenes satelitales han permitido generar DSM de mayor detalle. El análisis de DSM a lo largo del tiempo, mediante su diferenciación, permite identificar movimientos de masa, cálculo aproximado de volúmenes desplazados y caracterización de tipo de FRM.

Otro método para estudiar, tanto movimientos regionales de masa como locales, es DInSAR. Este radar tiene las mismas prestaciones que las imágenes satelitales (Sensor pasivo, luz), solamente el sensor es el que cambia (Sensor activo, ondas electromagnéticas).

Estas técnicas deben tomarse como de zonificación y caracterización preliminar, nunca deben asumirse como exactos.

SafeLand [29] recomienda analizar localmente cada inestabilidad identificada. En un análisis profundo, para conocer a detalle la dinámica del movimiento de masa, se deberán realizar visitas de campo que permitan, de forma visual, identificar la real magnitud del movimiento y su dinámica. Si existe un riesgo elevado, se debe diseñar un sistema de monitoreo a largo plazo y realizar estudios complementarios para corroborar la hipótesis asumida de la dinámica, como son estudios geológicos, geofísicos, perforaciones, instrumentación, estudios de suelos, estudios hidrológicos, etc. Con la información recopilada se pueden realizar modelaciones para conocer el estado actual de estabilidad mediante el cálculo del factor de seguridad o también analizar los alcances que el movimiento de masa tendrá en

caso de existir una emergencia. Si se considera necesario, se debe diseñar un sistema de monitoreo real, el cual permita conocer los desplazamientos, tanto superficiales como al interior de la masa, a fin de estudiar la influencia de los posibles elementos desencadenantes como la precipitación, sismos, entre otros.

El Ing. Edwin León, Coordinador de proceso de Geología Aplicada de INIGEMM (Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico), en base a la experiencia en cuanto a la zonificación de movimientos de masa en el Ecuador, recomienda analizar de forma individual cada inestabilidad y utilizar los métodos de monitoreo para calibrar los modelos de comportamiento de los FRM y así llegar a estimar con mayor exactitud la dinámica y alcances de los movimientos de masa analizados.

En el Ecuador, hasta el momento, no se han empleado métodos satelitales para la zonificación y caracterización de los movimientos en masa, sin embargo, el INIGEMM ha planteado un proyecto para su desarrollo.

Dentro del análisis de tipo de FRM SafeLand [29] destaca 4 etapas fundamentales:

- Detección: reconocer deslizamientos mediante técnicas aéreas o espaciales.
- Mapeo Rápido: mediante un proceso semi-automático, detectar cambios o lugares inestables.
- Caracterización rápida: recopilar información respecto al mecanismo de falla, volumen y dimensiones.
- Monitoreo a largo plazo: analizar patrones de deformación a lo largo del tiempo.

SafeLand [29] analiza varios métodos basándose en factores como: la velocidad, tipo de movimiento de masa, escalas de observación, costos de obtención y procesamiento.

El cuadro 3.1.1 muestra un resumen de los equipos más aptos para cada etapa anteriormente descrita, considerando los métodos más adecuados y con mayor proyección a futuro. En ésta se analizan factores importantes como la velocidad y el tipo de FRM. Es fundamental destacar que para velocidades menores a $5x10^{-3}mm/seg$, existen diversos métodos para analizar en las distintas etapas de caracterización. Se observa que la técnica ALS se aplica adecuadamente en este campo y en todas las etapas. Tecnologías nuevas como el GB InSAR se usa principalmente luego de detectada la inestabilidad, es decir, cumple una función de monitoreo y análisis cercano al tiempo real de un movimiento de masa.

Para el estudio de FRM con velocidades superiores a $5x10^{-1}mm/seg$ los sensores pasivos como cámaras de alta resolución y video son métodos precisos para conocer la dinámica del movimiento. Cabe resaltar que las inestabilidades poseen velocidades altas, solamente durante cortos períodos de tiempo.

El cuadro 3.1.2 es una recopilación de información de SafeLand [29], indicando los métodos adecuados para cada etapa de investigación en diferentes escalas. Se puede observar la amplia utilidad de ALS en todos los campos dentro de la caracterización de un movimiento de masa. Es importante indicar que el uso de técnicas como GB-InSAR permiten realizar un análisis a detalle, principalmente de inestabilidades individuales.

Descripción	Ext. rápido		Muy rápido		Rápido		Moderada		Lenta		Muy lenta		Ext. lenta
Vel. (mm/seg)		$5x10^{3}$		$5x10^{1}$		$5x10^{-1}$		$5x10^{-3}$		$5x10^{-5}$		$5x10^{-7}$	
Vel. típica	>5 m/s		5 m/s		3 m/min		1.8 m/h		13 m/mes		1.6 m/año		16 mm/año
Tipo de FRM	Caída de Rocas						Deslizamiento y flujo de materiales arcillosos, flujo de lodos y flujo de suelo						
	Deslizamiento en rocas duras y arcillas sobre consolidadas frágiles												
	Deslizamiento superficial y flujo												
Detección										InSAR satelital			
	ALS												
							Imágenes satelitales de alta resolución						
Caracterización rápida										InSAR satelital			
								GB-InSAR					
								TLS					
								ALS					
				Cámaras fotográficas									
Mapeo Rápido										InSAR satelital			
								GB-InSAR					
				Estación total									
								TLS					
		Cámaras fotográficas y video											
Monitoreo a largo plazo								InSAR satelital					
								GB-InSAR					
								TLS					
								ALS					
						Video, cámaras fotográficas							

Cuadro 3.1.1: Resumen de métodos más adecuados según velocidad [29]

Escala	Detección	Caracterización rápida	Mapeo Rápido	Monitoreo a largo plazo
1 : 1000	Clasificación de imágenes aéreas basados en pixeles	GB-InSAR	Estación total	ALS
				SAR satelital
		ALS	GB-InSAR	TLS
	ALS			GB-InSAR
		TLS	ALS	Estación total
				Cámara
1 : 5000	ALS	GB-InSAR	Estación total	ALS
		ALS	Laser SAR	SAR satelital
		TLS	GB-InSAR	TLS
	Imagen satelital (OBIA)	SAR satelital	SAR satelital	GB-InSAR
			ALS	Estación total
1 : 10000	ALS	ALS	Estación total	ALS
		SAR satelital	SAR satelital	SAR satelital
	Imagen satelital (OBIA)	TLS	ALS	TLS
				Estación total
1 : 25000	ALS	SAR satelital	Estación total	ALS
	Imagen satelital (OBIA)	TLS	SAR satelital	SAR satelital
		ALS	ALS	TLS
1 : 50000	ALS	SAR satelital	ALS	ALS
	Imagen satelital (OBIA)	ALS		SAR satelital
1 : 100000	SAR satelital	ALS	ALS	ALS
				SAR satelital
1 : 250000	SAR satelital	ALS	ALS	ALS

	Adecuado para la mayoría de casos
	Adecuado para algunos casos
	Adecuado para pocos casos

Cuadro 3.1.2: Métodos adecuados para cada etapa [29]

Ventajas	Desventajas
Alta precisión	Costoso
Software disponible	Problemas con recolección de información en presencia de nubes y niebla
Aplicable en áreas con vegetación	No muy aplicable en terrenos muy precipitados como acantilados.

Cuadro 3.1.3: Ventajas y desventajas ALS [29]

Ventajas	Desventajas
Alta precisión	Máximo escala local
Buena resolución en terrenos precipitados	Necesita post-procesamiento de la información
Información en 3D	Debe existir visual para realizar la recolección de información

Cuadro 3.1.4: Ventajas y desventajas TLS [29]

En el campo de la caracterización, se toma en cuenta factores como: velocidad, tipo de FRM y escala, la utilización de ALS (ver cuadro 3.1.3) permite realizar levantamientos en distintas escalas, desde 1:1.000 hasta 1:25.0000, de inestabilidades de todas las velocidades y de diferentes tipos. Pueden realizarse levantamientos de información diarios, mensuales o comúnmente anuales. El costo varía dependiendo de la densidad de puntos; comparado con otros métodos éste es alto.

La técnica TLS (ver cuadro 3.1.4) permite trabajar con escalas de 1:1.000 hasta 1:25.000 y analizar movimientos de masa con velocidades menores a $5x10^{-3}mm/seg$. Su costo es significativamente menor al ALS y admite realizar levantamientos con intervalos entre horas hasta años.

Otra técnica, que en algunos casos puede ser alternativa al TLS, es la de GB-InSAR (ver cuadro 3.1.5); ésta trabaja hasta escalas de 1:5.000, es decir, funciona para un análisis local de inestabilidades con velocidades menores a $5x10^{-3}mm/seg$. Tiene un costo aproximado de algunos cientos de euros por levantamiento y recopila información casi en tiempo real. Existen principalmente 3 bandas de radar, que se utilizan: Banda C, Banda X y Banda Ku.

En el caso de análisis de grandes áreas, el método más prometedor es la detección mediante imágenes

Ventajas	Desventajas
Alta precisión	Debe existir visual para realizar la recolección de información.
Casi en tiempo real	
Aplicable en áreas con vegetación y condiciones atmosféricas desfavorables (Mejor: Banda C, Medio: Banda X, Bajo: Banda Ku)	
Alta precisión en altura (Mejor: Banda Ku, Medio: Banda X, Bajo: Banda C)	

Cuadro 3.1.5: Ventajas y desventajas GB InSAR [29]

Ventajas	Desventajas
Alta precisión tomando en cuenta la escala	Costoso para monitoreo diario
Se puede identificar inestabilidades individuales y su tipo.	Todavía se puede mejorar el software de análisis
Permite generar DSM	Depende de la visibilidad en tierra

Cuadro 3.1.6: Ventajas y desventajas Imagenes satelitales [29]

satelitales (ver cuadro 3.1.6), existiendo varios métodos como: clasificación basada en los pixeles, medida de desplazamientos con fotogrametría espacial, estereofotogrametría espacial, clasificación orientada en objetos de imágenes espaciales y detección de cambios basada en objetos con imágenes satelitales. Todos estos métodos se aplican para imágenes de escalas regionales hasta continentales. Los costos son bajos para imágenes existentes, pero también son elevados si se requieren imágenes diarias.

3.2 Análisis de factibilidad de técnicas de monitoreo

Los métodos de monitoreo que se utilizan en el Ecuador están sistematizados en el cuadro 3.2.1.(INIGEMM,2013)

En el país no se han utilizado técnicas de monitoreo de escala regional mediante el estudio de imágenes satelitales. En este campo se manejan comúnmente herramientas de interpretación visual, por ejemplo el estereoscopio, el cual permite observar imágenes aéreas en 3D, lo cual ayuda en la identificación de inestabilidades. Esta técnica de interpretación visual puede tener alcances locales y regionales, su costo es bajo si se utilizan imágenes históricas y puede ser medianamente alto si se solicita imágenes actuales. Depende mucho del experto que realiza los análisis, siendo una de sus desventajas principales la subjetividad y el alto tiempo que requiere para ser analizado. Es un método adecuado para la creación de inventarios de inestabilidades que no requiere técnicas avanzadas de procesamiento.

Otra técnica económica de monitoreo es la utilización de sensores ópticos pasivos como cámaras de alta resolución o videograbadoras, que permiten monitorear áreas locales y sitios específicos a costos bajos, posibilitan realizar monitoreo en tiempo real, conocer un estimado de la velocidad, determinar los vectores de desplazamiento, etc. Entre sus ventajas se encuentra la capacidad de monitorear inestabilidades de velocidades altas, permiten comprender la dinámica del movimiento y son de bajo costo. Por el contrario trabaja, solo en el día, se ve afectado por niebla, lluvia, necesita visibilidad directa.

El Ing. Edwin León destaca la participación de la población en la identificación de inestabilidades y sostiene que se debe capacitar a la gente para que puedan identificar cambios de velocidad del movimiento e informar a las instituciones pertinentes.

Método	**Proyecto utilizado**	**Evaluacion del método ¿cumplió con las espectativas? mucho/ adecuado/ poco**	**recomendaciones en la utilización**
GB InSAR	No		
TLS	Varios		Se han realizado levantamientos de las zonas de estudios y de minas.
Laser Simple	Proyecto Rehabilitación de Nambija y otros	mucho	Puede ser utilizado para el monitoreo de la zona inestable en superficie y de manera puntual en mallas de monitoreo
Sistemas ópticos pasivos (camaras dígitales)	No		
Estación total automática	En la provincia autónoma de Trento- Italia, en Ecuador se quiere implementar	mucho	Es utilizado para movimientos lentos y en zonas donde presente seguridad para la permanencia del equipo
dGPS	Varios	mucho	Es un equipo de mucha confiabilidad y precisión, requiere buen conocimiento en el post proceso
Inclinometro clásico	varios	adecuado	Se necesita recursos económicos para perforar e instalar la tubería que será utilizada por el inclinómetro
inclinómetro nodular	No		
inclinómetro superficial	varios	adecuado	Limitantes en sitios puntuales de la zonas inestables
D.M.S combinado	No		
Extensómetros superficiales de cable manuales y electrónicos	varios (Tumba San Francisco, Chunchi, Shagli, etc)	mucho	Es necesario establecer la zona inestable con respecto a la estable, funciona muy bien si es automatizada
Extensómetros en perforaciones	No		
Extensómetros de cable en perforaciones	No		
Dilatómetro de barra	No		
Medidores de grietas	varios	adecuado	Es importante para mediciones interior de viviendas afectadas por movimientos en masa, pero debe manejar mucha precisión
TDR	No		
Fibras Ópticas	No		
Geófonos	No		
Geoeléctricos	No		
Emisiones electromagnéticas en perforaciones	No		
Piezómetros	No		
Estación meteorológica manual y elctrónica	Rehabilitación de Nambija, Tumba San Francisco	mucho	Es importante manejar equipos que tengan trasmisión de datos y se deberán colocar en diferentes partes de la zona inestable por la presencia de micro climas
Inclinómetro INCREX	Rehabilitación de Nambija	mucho	Es un equipo que se lo está probando y mide compresiones y elongaciones dentro del macizo rocoso y se utiliza dentro de una perforación donde se disponen anillos de cobre cada metro
Población	varios	mucho	Es necesario capacitar al personal para que pueda reconocer la aceleración de movimiento y la generación de nuevos indicios de inestabilidad

Cuadro 3.2.1: Métodos utilizados en el país INIGEMM (2013)

3.2.1 Escaner Laser Terrestre o TLS

El INIGEMM ha utilizado estos equipos para realizar levantamientos topográficos y monitoreo con tomas cada 15 días. Es adecuado para estudiar problemas locales y sitios específicos, además tiene gran detalle a costos de operación adecuados. Entre los problemas están su alto costo de inversión inicial y la necesidad de realizar un filtrado y corrección de la información recopilada.

SafeLand [29] destaca sus buenas prestaciones para el monitoreo en largos períodos, puesto que permite conocer volúmenes que se mueven, desplazamientos, vectores de movimiento, etc., pero por otro lado también limita su utilidad como método de monitoreo en tiempo real, debido a factores como el costo, la fuente de energía necesaria y falta de equipos con toma de datos automáticamente y la transferencia de los mismos a una central para su estudio.

3.2.2 Estación total

En el Ecuador se busca utilizar este equipo para el monitoreo, siendo una de sus desventajas el cuidado del mismo contra el vandalismo, el INIGEMM ha planteado una solución muy adecuada creando convenios con la Comunidad, para que sean los responsables de la integridad del equipo.
Su cobertura es baja, solo puede estudiar un sitio específico, y velocidades de movimiento lentas, pero los costos de procesamiento son bajos, los resultados son precisos. SafeLand [29] destaca el potencial para ser utilizado en monitoreo en tiempo real.

3.2.3 GPS diferenciales o dGPS

El INIGEMM ha utilizado estos equipos con lecturas en el campo cada 15 días, se ubicaron estaciones, tanto dentro como fuera del deslizamiento para la recolección de información. Los desplazamientos calculados permitieron generar vectores de movimiento dentro de la inestabilidad, siendo información importante que permitió conocer más respecto a la dinámica del movimiento de masa y calibrar los modelos.

Se debe tener en cuenta que ésta técnica debe tener cielo despejado para que la información recolectada sea de calidad.

3.2.4 Sistemas multiparamétricos (DMS)

Estos equipos permiten obtener información detallada en 2D y 3D de la dinámica del movimiento de masa a distintas profundidades. Uno de los inconvenientes de este método es el costo que representa la perforación.

El INIGEMM ha implementado un sistema similar, un inclinómetro tipo Increx, en la rehabilitación de Nambija, este equipo permite medir compresiones y elongaciones de los masizos rocosos. Se ha utilizado para el control de minas logrando determinar que las mismas son completamente estables, descartando posibles fallas debido a la existencia de grietas.

Por el momento, la lectura de datos se realiza de forma manual. Se ha considerado la posibilidad de implementar un equipo que permita enviar información automáticamente, permitiendo un monitoreo en tiempo real.

3.2.5 Extensómetros superficiales

En el país son muy utilizados por su fácil fabricación y utilización. Para la recolección de información se puede llegar a acuerdos con la población afectada, quienes tomarán diariamente la información y la transmitirán para su tabulación al INIGEMM. Uno de los problemas encontrados fue la calidad de información recolectada; en muchos casos existió una dispersión muy grande.

Antes de su implementación debe realizarse un correcto análisis para ubicar correctamente los instrumentos de monitoreo ya que en algunos casos se debieron reubicar equipos. La re-calibración de los mismos debe ser realizada con regularidad para mejorar la calidad de información recopilada.

3.2.6 Acelerómetros

En el Ecuador se han aplicado para determinar cómo afecta la actividad minera debido a la utilización de explosivos, obteniéndose resultados positivos, los mismos que ha permitido evaluar y regular las intervenciones mineras que pudieran afectar a zonas pobladas.

3.2.7 Estaciones meterológicas

El INIGEMM ha instalado estaciones en algunos lugares para de estudio, también se ha utilizado información proporcionada por el INAMHI para la correlación de información de movimiento y pluviosidad y analizar si el movimiento se debe a la intensidad de la lluvia. Se recomienda que los equipos permitan transmitir la información automáticamente y analizar su implementación en varios puntos de las inestabilidades grandes, permitiendo estudiar los microclimas existentes.

SafeLand [29] recomienda utilizar esta información con el objetivo de identificar la influencia del agua en el movimiento, en caso de que esta sea importante, permitirá generar los umbrales de alerta en base a la intensidad.

3.3 Análisis de sistemas de alerta temprana basados en monitoreo en tiempo real

En base a la experiencia en la implantación de las técnicas de monitoreo, SafeLand [29] ha analizado el potencial de cada una para aplicarse como un monitoreo en tiempo real que permita desarrollar sistemas de alerta temprana. Esta información se ha sistematizado para generar una herramienta que ayude a conocer cuáles son las mejores opciones en la implantación de equipos de monitoreo en tiempo real, basándose en el tipo de FRM, su velocidad y el parámetro que se desea medir.

Es importante resaltar que para la implementación de un sistema de alerta temprana se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Conocer el riesgo (tipo, escala, elemento desencadenante y umbrales de alerta.)
- Monitorear, analizar y pronosticar los peligros.
- Tener centros operacionales que permitan la comunicación o diseminación de alertas o advertencias.
- Poseer la capacidad local de respuesta a las advertencias recibidas.

Los principales estudios que se utilizan para el diseño de SAT son:

- Geológicos y geomorfológicos: InSAR, DMS, imágenes satelitales, etc.
- Monitoreo de desplazamientos: Inclinómetros, GPS, extensómetros, estación total, GB-InSAR, etc.
- Hidrogeológicos: piezómetros, estaciones meteorológicas, resistividad eléctrica.
- Geotécnicos: perforaciones, SPT, CPT, ensayos de penetración dinámica, etc.
- Geofísicos: Sísmica de refracción, sísmica de reflexión, tomografía sísmica, SEV, tomografía eléctrica, georadar, etc.
- Modelos de estabilidad: equilibrio límite, elementos finitos, etc.

Estos estudios permiten conocer la dinámica del movimiento de masa, volumen, velocidad y permite identificar los posibles factores desencadenantes.

Si se logran definir los factores desencadenantes se pueden establecer los umbrales de alerta, siendo este estudio el más importante para la implementación de un SAT. Los umbrales de alerta permiten distinguir los distintos niveles de acción que se deben tomar cuando valores como la intensidad de precipitación o la velocidad de la masa sobrepasan un valor definido.

Por ejemplo, el INIGEMM implementó un extensómetro como sistema de monitoreo en tiempo real; la información captada por el instrumento era transmitida mediante un sistema de comunicación a las oficinas del INIGEMM; además se ha creado un software que permite controlar la regularidad de toma de información, basado en la velocidad de movimiento, es decir, mientras más alta es la velocidad, más continuas eran las transmisiones de datos. También este sistema permite informar por medio de correos electrónicos, llamadas o mensajes a teléfonos móviles cuando se producen cambios en la velocidad. El sistema de transmisión y software son de elaboración nacional.

Sin embargo no se implmento un SAT por lo que no fue posible generar los umbrales de alerta.

Es importante recopilar información a lo largo de grandes períodos de tiempo para lograr calibrar los modelos de estabilidad y los umbrales de alerta. SafeLand [29] recomienda información de 1 año como mínimo, el cual incluya período de verano e invierno, además de realizar calibraciones

periódicas de los umbrales y modelos de estabilidad, utilizando la información más reciente.

RiskYdrogéo destaca la creación de Sistemas de Ayuda a la Decisión SAD que buscan apoyar a los responsables de la vigilancia, mediante sistemas gráficos y de alertas para facilitar y optimizar, tanto en tiempo real como en un tiempo posterior, la toma de decisiones. Los SAD pueden ser muy variados según los instrumentos, herramientas y tecnologías que utilice. Por ejemplo se pueden implementar SAD basados en:

- Criterios de expertos basados en conocimientos/experiencia
- Razonamientos basados en información histórica
- Previsiones estadísticas
- Modelaciones numéricas
- Representaciones de información: gráficos, cuadros, vectores de movimiento, Sistemas de Información Geográfica (SIG)
- Informes automáticos
- Combinación de varios criterios

RiskYdrogéo divide la alerta en 3 niveles:

Normal: se recopila información acerca del funcionamiento del sistema de vigilancia.

Pre-alerta: se realiza una vigilancia con mayor detalle, disminuyendo el tiempo de adquisición, expertos evalúan la situación, se activan los sistemas de crisis y deberá mantenerse hasta el regreso a estado normal.

Alerta: movilización de grupos de intervención, movilización de los equipos de crisis, activación de los planes de intervención y medidas de protección (evacuación, cierre de vías, trabajos de limpieza (minería).

Es importante implementar estos sistemas en inestabilidades que pongan en riesgo vidas de personas, vías de comunicación, obras o proyectos públicos estratégicos (petroleos, energía eléctrica), entre otros.

En el Ecuador se logró evitar la pérdida de vidas humanas mediante la reubicación de la Comunidad Tumba San Francisco en el cantón de Riobamba. Los modelamientos, tanto de alcance del movimiento de masa como las proyecciones, mediante métodos estadísticos que indicaban en cuanto tiempo se desencadenará el problema, fueron muy precisos y ayudaron a esta reubicación.

3.4 Técnicas geofísicas para deslizamientos

La geofísica se muestra como una herramienta de prospección que permite analizar distintos tipos de movimientos de masa, desde deslizamientos hasta caída de rocas. Una de las razones por la que es un método tan adaptable es su rango de estudio, que varía desde pocos metros hasta cientos.

Básicamente, se busca identificar por un lado los límites tanto laterales como verticales de la superficie de falla y por otro detectar la ubicación del nivel freático en la masa deslizada.

Para el primer caso se aplican métodos de propagación de ondas, los cuales buscan determinar los cambios litológicos; usualmente la superficie de falla coincide con un cambio litológico. Por otro lado, dependiendo de la técnica utilizada, puede ser posible determinar la geometría la superficie de falla. Por último es importante conocer los contrastes geofísicos y así determinar la influencia del medio, por ejemplo, del agua.

En el segundo caso, mediante la aplicación de métodos eléctricos y electromagnéticos, se busca determinar la profundidad del nivel freático.

Muchos deslizamientos a ser estudiados tienen longitudes que superan la extesión de tendidos sísmicos tradicionales de 100 m o 230 m. Para extender las lineas a longitudes mayores, se ha desarrollado una técnica de "rollover", que consiste en realizar superposición de perfiles, logrando con esto la longitud que fuese requerida, sin importar su dimensión y proposionando continuidad de información, es decir, este método no infiere información, sino la calcula. Para este método se recomienda superponer en técnicas sísmicas al menos 30 m en líneas de 110 m y 60 m en perfiles de 230 m. Para la tomografía eléctrica, en lineas de 155 m se superponen 60 m y en perfiles de 235 m 100 m. Esta técnica genera perfiles largos a profundidades constantes; la información recopilada permite ser corroborada al ser en ciertos tramos redundante.

SafeLand [29] destaca el uso de georadar en el estudio de glaciares, debido a la conductividad cercana a 0 del hielo y una conductividad mayor del agua, esto permite monitorear el descongelamiento en nevados y prevenir avalanchas y flujos debido a una sobresaturación de agua.

La elección del método geofísico a utilizarse dependerá de: contraste de características físicas, profundidad de alcance, volumen de estudio, morfología, factores económicos.

Uno de los mayores inconvenientes en la aplicación de la geofísica en los deslizamientos es la correlación de la información obtenida con las propiedades geotécnicas e hidrológicas necesarias para realizar un adecuado modelo de estabilidad. SafeLand [29], destaca algunos trabajos que han buscado resolver este problema, por ejemplo, relaciones experimentales con propiedades de suelos y rocas con medidas geofísicas, o también en suelos, la onda de corte Vs se ha relacionado con el ensayo de penetración de cono o CPT. Otro ejemplo es la utilización de georadar para caracterizar la calidad de la roca. SafeLand [29] resalta el trabajo de Barton (2006) y Cha (2006) quienes han relacionado las ondas Vs con la el índice de calidad de la roca o RMR por sus siglas en inglés (Rock Mass Rating), para determinar un factor geotécnico utilizado en el diseño de túneles. También se destaca el trabajo de Méric (2005) que busca relacionar parámetros geofísicos con tasas de desplazamiento.

La sísmica pasiva se ha desarrollado alrededor del monitoreo de FRM, basándose en análisis de ruido sísmico, es decir, caracterizando la amplitud, duración y frecuencia. SafeLand [29] destaca varios trabajos donde se han aplicado estos métodos, por ejemplo: deslizamientos, taludes de roca, canteras de rocas, actividades mineras, flujo de escombros, lahares, avalanchas, etc., principalmente subraya las investigaciones de Suriñach (2005) y Spillman (2007), quienes han empezado a estudiar la posibilidad de automatizar el reconocimiento de ruido sísmico. A largo plazo se espera caracterizar

los mecanismos desencadenantes, para así definir eventos potenciales mediante el análisis del ruido producido, creando una herramienta de alerta temprana para determinar cualquier tipo de movimiento en masa.

La geofísica aérea tiene gran potencial dentro de la investigación y mapeo rápido de movimientos de masa. Con el avance de estudios y métodos de inversión, esta técnica irá ganando espacio en el campo de los FRM. La utilización de sensores electromagnéticos ha mostrado poder conocer la resistividad del terreno llegando a profundidades entre 30 y 300 m. Otros sensores como microonda han permitido determinar la humedad de la capa superficial.

Aunque estos métodos son raramente usados, muestran tener una gran proyección para su utilización en el campo de los movimientos de masa. Falta desarrollar la adquisición de información, su procesamiento e interpretación.

Cada movimiento de masa es único con características variables a lo largo de toda la masa, esto hace que sea necesario desarrollar tecnologías que permitan conocer las variaciones litológicas e hidrológicas a lo largo del tiempo y no solo analizando un perfil, sino también el comportamiento de toda la masa. El desarrollo en la geofísica no solo ha permitido automatizar procesos en el cálculo de perfiles en 2D, como la tomografía sísmica, además se han desarrollado modelos en 3D, que acceden un mejor estudio de las estructuras complejas que componen los FRM. También se ha desarrollado el campo de utilización de sistemas de monitoreo geofísico mediante el estudio de modelos 4D.

A pesar de todos estos avances, siguen siendo necesarios otros estudios complementarios que permitan calibrar los modelos geofísicos de maneras exactas y además obtener características geotécnicas para realizar modelamientos de estabilidad cercanos a la realidad.

La complejidad de los movimientos de masa hacen que sea necesario la combinación de varios métodos geofísicos y apoyarse con información geotécnica para su corroboración y adecuado modelamiento.

El reto de la geofísica en el campo de la geotecnia, específicamente en el modelamiento de inestabilidades, es proporcionar una correlación adecuada entre los parámetros geofísicos y las características geotécnicas y propiedades hidrológicas de los materiales.

Capítulo 4

Análisis de resultados y discusión

4.1 Introducción

Con el propósito de aplicar la herramienta informática ejecutada mediante el software Excel que permite encontrar los métodos de monitoreo adecuados para un movimiento de masa y analizar el empleo de métodos geofísicos, se ha procedido a recopilar información de inestabilidades de los alrededores de la ciudad de Cuenca, basándose en el "Informe de áreas inestables en Cuenca y zonas aledañas" realizado por la Dirección Nacional de Geología. DINAGE [13].

4.2 Contexto general de la zona

Se localiza en la parte sur del territorio Ecuatoriano en la provincia del Azuay. Los movimientos de masa de mayor impacto se ubican en la cuenca de Cuenca, debido a su composición de sedimentos de baja resistencia ante la acción de agentes de meteorización tales como el agua, lo cual hace que las fuertes precipitaciones, combinada con la acción del hombre, sean factores desencadenantes de una gran cantidad de inestabilidades de la zona.

El clima se denomina como ecuatorial mesotérmico, presentando temperaturas entre $12°C$ y $20°C$; se observan dos estaciones, un período seco de junio a septiembre y otra estación invernal con abundantes precipitaciones. La pluviometría anual varía entre 500 a 1300 mm.

Existen accesos, tanto de primer orden como de segundo orden, a todos los sitios analizados para la aplicación de un sistema de monitoreo y la realización de un levantamiento geofísico que permita caracterizar de forma adecuada al FRM.

Se analizaron 20 deslizamientos incluidos en el "Informe de áreas inestables en Cuenca y zonas aledañas", tomando en cuenta factores como: magnitud, riesgo, vulnerabilidad y velocidad. De este análisis se elige realizar la aplicación en el deslizamiento del sector Turi.

4.2.1 Ubicación

La zona inestable comprende una franja de Loma Cruz hasta la confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay. Se encuentra en la zona sur-oeste de la ciudad de Cuenca y atraviesa aproximadamente 700 m de la autopista Cuenca-Azogues como se muestra en la figura 4.2.1.

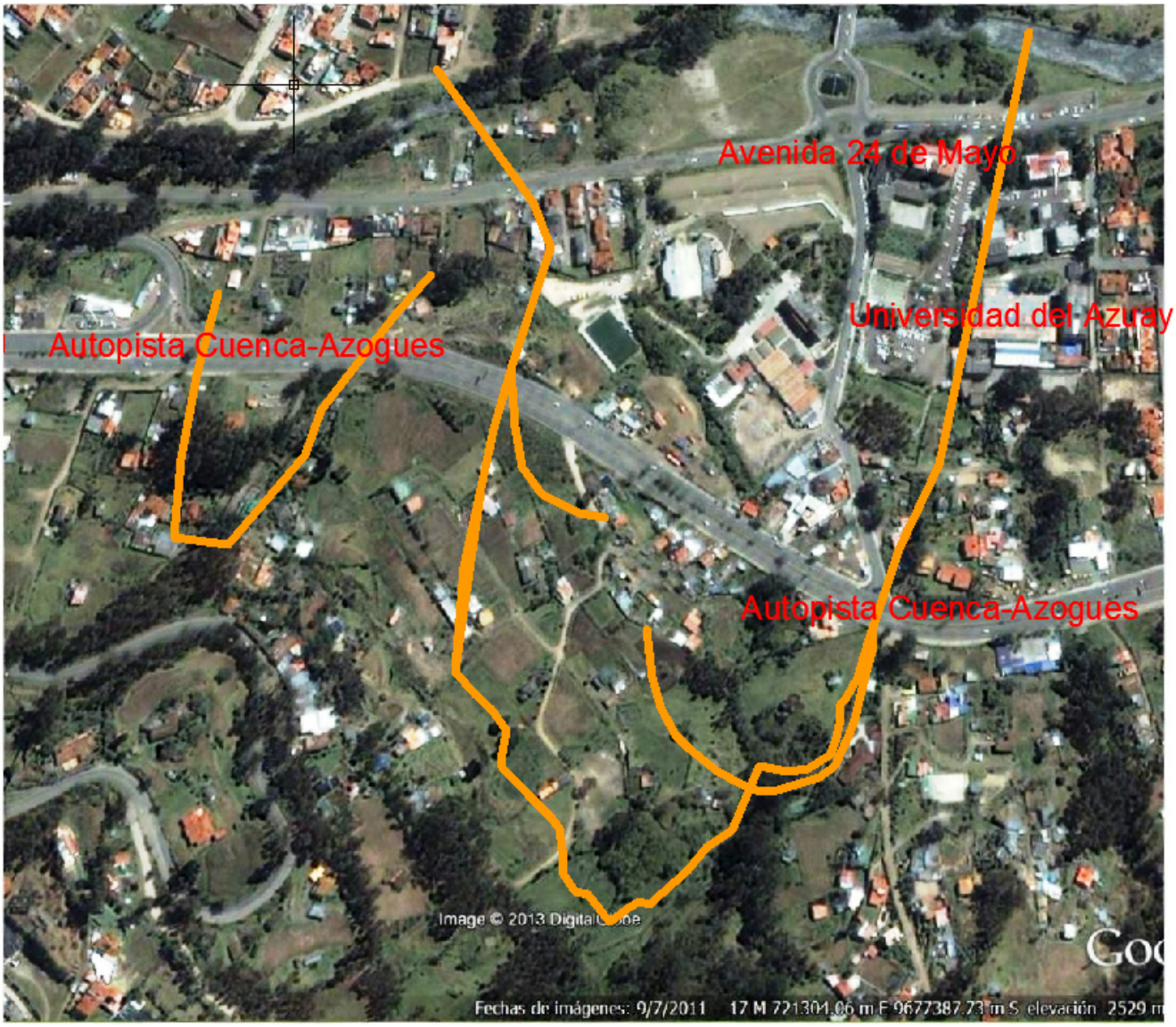

Figura 4.2.1: Ubicación inestabilidad Turi

4.2.2 Geología Local

En base al informe de la DINAGE [13] y a una visita de campo se define que la parte superior se compone de areniscas tobáceas color crema; en la parte media y baja se encuentra un depósito coluvial antiguo.

4.2.3 Geomorfología e hidrogeología

Las pendientes en la parte superior están entre $18°$ a $25°$ y mediante un reconocimiento de campo se han identificado quebradas que bajan a lo largo del movimiento de masa. Además en la mitad de la inestabilidad principal se ha identificado un empozamiento de agua.

4.2.4 Descripción del área inestable

Existen dos movimientos de masa en la zona, uno principal denominado así por su tamaño, y otro de menor magnitud, que afecta a la vía con hundimientos que pueden llegar a 1.5 m. (Ver figura 4.2.1)

Estos FRM se delimitaron con ayuda de un GPS siguiendo las grietas existentes. En el caso del movimiento de masa principal, este es el de mayor riesgo, puesto que afecta a la Universidad del Azuay y alrededor de 137 edificaciones. Su influencia se da desde Loma Cruz hasta el río Yanuncay. Con la utilización de imágenes satelitales y software tipo CAD, se ha determinado una influencia a un área de 250.000 m^2.

La DINAGE [13] lo describe como un deslizamiento complejo, además lo califica como un deslizamiento activo susceptible a la generación de flujos de tierra, estimados en 12.000 m^3, debido a la presencia de materiales arcillo limosos que se saturan.

4.2.5 Área Vulnerable

Debido a la presencia de la infraestructura de la Universidad del Azuay, de residencias dentro del área afectada y la Autopista Cuenca – Azogues, que es un eje vial no solo de la ciudad sino también del País, se considera que es un lugar adecuado para la implementación de un sistema que permita monitorear las condiciones de estabilidad, con el fin de conocer el comportamiento a detalle de la masa en movimiento.

Figura 4.2.2: Registro fotográfico Turi 1

Tomando la descripción de la DINAGE [13] como un área con características precarias de estabilidad debido a la acción del agua sobre los materiales de la zona y siguiendo las recomendaciones en cuanto a la identificación, tanto de la superficie de falla como del nivel freático y a la realización de un

Figura 4.2.3: Registro fotográfico Turi 2

monitoreo permanente, se decide trabajar sobre esta inestabilidad, para aplicar los la información recopilada, siguiendo todas las recomendaciones estudiadas.

La información más relevante de los 2 movimientos de masa se muestra en los cuadros 4.2.1 y 4.2.2.

Tipo de movimiento de masa 1	Flujo de tierra
Volumen	12 000 m^3
Características	Activo, agentes detonantes agua y/o sismos
Dimensiones	Longitud: 120 m, ancho: 25 m, espesor: 4 m
Velocidad de movimiento	Lento
Pendiente	$30°$

Cuadro 4.2.1: Resumen movimiento de masa 1

Tipo de movimiento de masa 2	Complejo
Volumen	13 000 000 m^3
Características	Activo, agentes detonantes agua y/o sismos
Dimensiones	Longitud: 950 m, ancho: 460 m, espesor: 30 m
Velocidad de movimiento	Lento
Pendiente	$25°$

Cuadro 4.2.2: Resumen movimiento de masa 2

4.3 Aplicación de herramienta de técnicas de monitoreo

El primer movimiento de masa se considera parte de todo el movimiento de masa 2, por lo que se analizará con la información del segundo movimiento. Para utilizar la herramienta creada, se debe conocer el tipo de deslizamiento y su velocidad.

4.3.1 Introducción a la aplicación

La herramienta de técnicas de monitoreo se basa en la información de SafeLand [29], la tabla matriz de donde se eligen los métodos más adecuados se puede ver en el Apéndice A.1.2. La herramienta analiza 22 técnicas, cada una posee una descripción de: ¿qué parámetro mide?, ¿qué resolución posee?, información de la lectura de datos, restricciones que presenta y costo aproximado en euros.

El objetivo de esta herramienta es presentar las técnicas más adecuadas para el estudio de un FRM, basandose en una caracterización preliminar de la inestabilidad. Se utiliza el tipo de movimiento en masa y su velocidad según la clasificación de Cruden and Varnes [10]

Estas herramientas buscan facilitar los diseños de estudios geofísicos y diseños de monitoreo, analizando una gran variedad de métodos.

4.3.2 Ejecución de la herramienta

1. Abrir la herramienta "crear tabla de técnicas de monitoreo.xlsm" y habilitar la utilización de macros. (ver figura 4.3.1)

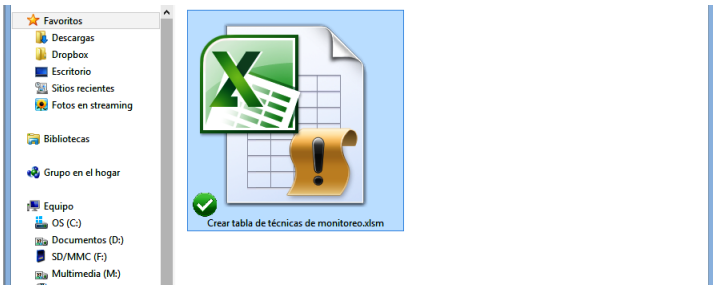

Figura 4.3.1: Abrir archivo

2. Se elige el tipo de FRM y su velocidad, insertando la letra "x" en la casilla requerida, tomar en cuenta que solo se debe elegir un tipo de movimiento de masa. (ver figura 4.3.2)

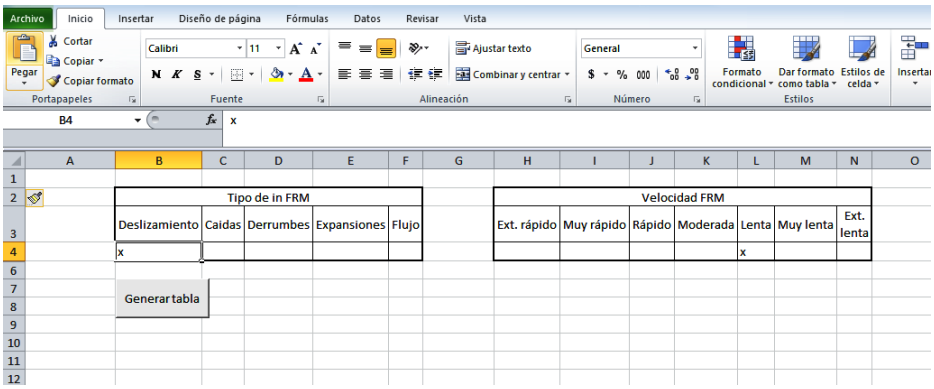

Figura 4.3.2: Elegir opciones

3. Pulsar en el botón "Generar tabla". (ver figura 4.3.3)

4. Seleccionar e imprimir el cuadro para analizar las posibilidades adecuadas para las condiciones seleccionadas. (ver figura 4.3.3)

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	General		Aplicabilidad		Lectura y procesamiento de la		Restricciones técnicas					Costos en Euros		
2	Parámetro medido	Otro parámetro	Resolución espacial	Escala	Frecuencia de lectura	Duración de procesamiento	Condiciones especiales para su correcto funcionamiento	Restricciones en fuentes de energía	Requerimientos de mantenimiento	Restricciones en otros campos	Potencial para alerta temprana	Costo de unidad	Costo de software para procesamiento	Costo de mantenimiento anual
3														
4	desplazamientos	0	2 a 5 m a 500 m de distancia	Local y Talud	Minutos	Minutos	Humedad y temperatura	Necesita fuente de energía	Chequeo periódico de	Accesibilidad y ubicación	Alto	menos 1000	Bajo	0
5	despalazamientos	0	puntual, 1 mm hasta 200m	Local y Talud	1 segundo	Tiempo Real	Niebla, lluvia y nieve	Necesita fuente de energía	Anual	Hielo y nieve	Alto	10000	0	3000
6	desplazamientos	0	hasta muy alta	Talud	Cada hora	Segundos	Niebla	Baterías o paneles solares	Mensual	Protección del equipo	Alto	30000	0	5000
7	desplazamiento 3D	0	puntual	local	10 min	10 min	antena siempre vertical	Paneles solares	Regular	cielo descubierto	Alto	25000	0	1000
8	desplazamiento, nivel freático, asentamiento	presion de poros, temperatura, vibraciones	0	Talud	.01 s	tiempo real	no	Paneles solares	Revisiones inalámbricas	perforación	Alto	1000/modulo	0	0
9	distancia entre 2 puntos	0	3 mm	Talud	1 segundo	tiempo real	Protección del equipo, correccion por temperatura	Batería o Solar	Mensual	0	Alto	1000 - 2000	3000	variable
10	Lluvia, temperatura,	0	0	Local	10 minutos	tiempo real	no	Batería o Solar	Mensual	0	Alto	6000	2000	0
11	desplazamietnos, cambios en las caracteristicas de la superficie	Reconstrucción de superficies en 3D	depende de la distancia hasta 100 pixels/m2	Local y Talud	Tiempo real	Dias	Luz natural	Paneles solares	4 - 6 meses	Ubicación	Medio	1500	0	100
12	inclinación	0	0	Talud	variable	0	temperatura constante	Batería o Solar	0	perforación	Medio	2500	0	0
13	Humedad del suelo	perfiles de humedad del suelo	1 cm	Local	1 minuto	minutos	no	Batería o Solar	Mensual	Acceso	Medio	5000	0	500
14	Deformación	0	1 m	Talud	2 minuto	minutos	temperatura constante	Batería o Solar	Mensual	Acceso	Medio	50000	0	1500
15	Ruido sísmico	0	n/a	Local	tiempo real	semanas	no	Batería o Solar	Mensual	Acceso	Medio	20000	0	2000
16	Nivel freático, presión de poros	temperatura	0	Talud	variable	0	temperaturas bajo 0	Batería o Solar	0	Perforación	Medio	1500	0	0
17	topografía	velocidad de erosion, cantidad de materiales acumulados	m2	Talud	0	Tiempo real	Clima seco	Baterías	Anual	Ubicación	Bajo	150000	0 - 10000	6000
	Resistividad, polarización,	contenido de	variable	Local	1 hora	horas	no	Batería o Solar	Cuando existen	Acceso	Bajo	25000	2200	1000

Figura 4.3.3: Tabla generada

Como se anticipó en la introducción a la aplicación, en base a la figura 4.2.1 y a los cuadros 4.2.1 y 4.2.2, se busca las técnicas más adecuadas para estudiar el movimiento de masa descrito en el cuadro 4.2.2, considerando que este es el FRM principal.

Utilizando la información del informe de la DINAGE [13] y una inspección de campo en la cual se delimitó la inestabilidad con la utilización de un GPS, se define que el movimiento en masa presenta un comportamiento complejo, siendo rotacional en la parte superior y translacional en la parte inferior.

Para determinar la velocidad de movimiento se toma como base lo indicado en el informe de la DINAGE [13], y se corrobora utilizando 2 imágenes satelitales, la primera de enero de 2008 y la segunda de marzo de 2012. Se tomaron como puntos de referencia varias construcciones, determinando que en un periodo de 50 meses se ha movido aproximadamente 8 m, siendo esto equivalente a 1.92 $m/año$, que según en cuadro 2.1.1 en el Capítulo 2, es una velocidad lenta. Los cálculos se indican en el Apéndice A.1.1.

Con esta caracterización previa y siguiendo este procedimiento descrito, eligiendo las opciones de "deslizamiento" como tipo y velocidad "lenta", se obtuvo el cuadro 4.3.1.

El cuadro 4.3.1 muestra las técnicas más adecuadas a ser utilizadas, estas están ordenadas según su potencial para crear un SAT; además muestran características comparativas como: parámetro medido, resolución espacial, escala, frecuencia de lectura, duración de procesamiento, condiciones especiales para su correcto funcionamiento, restricciones de fuentes de energía, requerimientos de mantenimiento, restricciones en otros campos, costo de unidad, costo de software para procesamiento y costo de mantenimiento anual.

Conociendo el tipo de monitoreo que se busca aplicar (largo plazo o en tiempo real), el parámetro que se desea medir (desplazamiento, sismicidad, pluviosidad, etc.) y el costo, el cuadro 4.3.1 permite elegir la o las técnicas más adecuadas para el estudio.
Con esta información obtenida, en la sección 4.6 se realiza el diseño de un sistema de monitoreo.

	Parámetro medido	Otro parámetro	Resolución espacial	Escala	Frecuencia de lectura	Duración de procesamiento	Condiciones que afectan su funcionamiento	Fuentes de energia	Mantenimiento	Restricciones	Potencial para SAT	Costo de unidad	Costo de software	Costo de mantenimiento anual
GB InSAR (Radar interferiométrico en tierra)	Desplazamiento	0	2 a 5 m a 500 m de distancia	Local y Talud	Minutos	Minutos	Humedad y temperatura	Necesita fuente de energia	Chequeo periódico de componentes	Accesibilidad y ubicación	Alto	menos 1000	Bajo	0
Laser simple	Desplazamiento	0	Puntual, 1 mm hasta 200 m	Local y Talud	1 segundo	Tiempo Real	Niebla, lluvia y nieve	Necesita fuente de energía	Anual	Hielo y nieve	Alto	10000	0	3000
Estación total automática	Desplazamiento	0	Muy alta	Talud	Cada hora	Segundos	Niebla	Baterias o paneles solares	Mensual	Protección del equipo	Alto	30000	0	5000
dGPS (GPS diferencial)	Desplazamiento	0	Alta	Local	10 min	10 min	Antena siempre vertical	Paneles solares	Regular	Cielo descubierto	Alto	25000	0	1000
D.M.S (Sistema diferencial multiparamétricos)	Desplazamiento, nivel freático, asentamiento, inclinación	Presion de poros, temperatura, vibraciones	0	Talud	.01 segundo	Tiempo real	No	Paneles solares	Revisiones inalámbricas	Perforación	Alto	1000/modulo	0	0
Extensómetros superficiales de cable	Distancia entre 2 puntos	0	3 mm	Talud	1 segundo	Tiempo real	Protección del equipo, correccion por temperatura	Bateria o Solar	Mensual	0	Alto	1000 - 2000	3000	Variable
Estación metereológica	Lluvia, temperatura, presión del aire	0	0	Local	10 minutos	Tiempo real	No	Bateria o Solar	Mensual	0	Alto	6000	2000	0
Sistemas ópticos pasivos	Desplazamientos, cambios en la superficie	Reconstrucción de superficies	Hasta 100 pixels/m2	Local y Talud	Tiempo real	Dias	Luz natural	Paneles solares	4 - 6 meses	Ubicación	Medio	1500	0	100
inclinómetro superficial	Inclinación	0	0	Talud	Variable	0	Temperatura constante	Bateria o Solar	0	Perforación	Medio	2500	0	0
TDR (Reflectometría)	Humedad del suelo	Perfiles de humedad del suelo	1 cm	Local	1 minuto	Minutos	No	Bateria o Solar	Mensual	Acceso	Medio	5000	0	500
Fibras Ópticas	Deformación	0	1 m	Talud	2 minuto	Minutos	Temperatura constante	Bateria o Solar	Mensual	Acceso	Medio	50000	0	1500
Geófonos	Ruido sísmico	0	n/a	Local	Tiempo real	Semanas	No	Bateria o Solar	Mensual	Acceso	Medio	20000	0	2000
Piezómetros	Nivel freático, presión de poros	Temperatura	0	Talud	Variable	0	Temperaturas bajo 0	Bateria o Solar	0	Perforación	Medio	1500	0	0
TLS (Escaner laser terrestre)	Topografía	Volumen de materiales acumulados	m2	Talud	0	Tiempo real	Clima seco	Baterias	Anual	Ubicación	Bajo	150000	0 - 10000	6000
Monitoreo geoeléctrico	Resistividad, polarización, potencial espontaneo	Contenido de agua, porosidad	Variable	Local	1 hora	Horas	No	Bateria o Solar	Cuando existen daños	Acceso	Bajo	25000	2200	1000

Cuadro 4.3.1: Tabla de métodos de monitoreo en tiempo real

4.4 Aplicación de la herramienta para técnicas geofísicas

4.4.1 Introducción a la aplicación

En base a la información recopilada se ha desarrollado una herramienta con dos funciones principales, la primera permite conocer: la longitud del tendido recomendado, técnicas de recolección y procesamiento de información; y la segunda es la recopilación de información por parte de Geo&Geo, con el fin de obtener características geotécnicas a partir de las velocidades sísmicas.

Para determinar la longitud de tendido recomendado se toman en cuenta tres factores: la profundidad, la pendiente y longitud total del perfil que se desea analizar. Con esta información, la herramienta recomienda, en el caso de métodos sísmicos: número de geófonos, longitud de tendido, técnicas, métodos de análisis y la cantidad de perfiles para aplicar la técnica "rollover"; en el caso de los métodos eléctricos: número de electrodos, técnica y cantidad de perfiles "rollover".

Además se proporcionan cuadros de ventajas y desventajas de los métodos propuestos para ayudar a la toma de decisiones.

La segunda parte de esta herramienta se basa en el documento de Kaptan et al. [20], quien propone una fórmula refinada para determinar la capacidad portante del suelo, a partir de la Vs. Kaptan et al. [20] basa su fórmula en información de perforaciones, ensayos de laboratorio y técnicas geofísicas de más de 550 sitios. Para validar la fórmula propuesta se realizaron 3 ensayos de placa, encontrando muy buenas correlaciones con las expresiones empíricas propuestas. Otros parámetros dinámicos que tambien se pueden determinar son: el peso unitario, coeficiente de balasto y otros parámetros elásticos.

4.4.2 Ejecución de la herramienta

1. Se abre la herramienta "métodos geofísicas.xlsm" y se habilita la utilización de macros. (Ver figura 4.4.1)

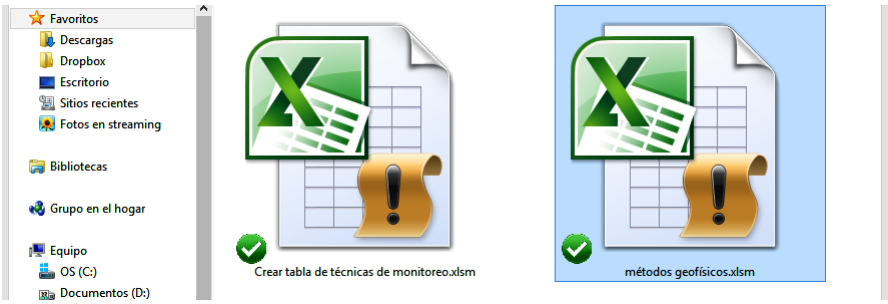

Figura 4.4.1: Abrir herramienta geofísica

2. Se ingresa la profundidad a investigarse, la pendiente en grados, la longitud total del perfil y la longitud del perfil elegido; el cálculo puede realizarse tanto para métodos sísmicos como para métodos eléctricos. (Ver figura 4.4.2)

	A	B	C	D	E	F	G	H
1		MÉTODOS SÍSIMICOS				MÉTODOS ELÉCTRICOS		
2		INGRESE Profundidad estimada de investigación (m)	30			INGRESE Profundidad estimada de investigación (m)	30	
3		Pendiente (en grados)	25			Pendiente (en grados)	25	
4		Longitud del perfil deseado (m)	400			Longitud del perfil deseado (m)	400	
5		Tendido sísmico elegido (m)	230			Tendido eléctrico elegido (m)	230	
6		Numero de geófonos (minimo)	24			Numero de electrodos	32	
		Metros de tendido sísmico (mínimo)				Metros de tendido eléctrico (mínimo)		

Figura 4.4.2: Ingresar información para cálculo de cantidades geofísicas

3. Dependiendo de las características ingresadas se recomiendan longitudes de tendidos y técnicas de recolección y cálculo. (Ver figura 4.4.3)

F11

B	C	D	E	F	G	H
MÉTODOS SÍSIMICOS				MÉTODOS ELÉCTRICOS		
INGRESE Profundidad estimada de investigación (m)	30			INGRESE Profundidad estimada de investigación (m)	30	
Pendiente (en grados)	25			Pendiente (en grados)	25	
Longitud del perfil deseado (m)	400			Longitud del perfil deseado (m)	400	
Tendido sísmico elegido (m)	230			Tendido eléctrico elegido (m)	230	
Numero de geófonos (minimo)	24			Numero de electrodos	32	
Metros de tendido sísmico (mínimo)	90			Metros de tendido eléctrico (mínimo)	150	
Metros de tendido sísmico (máximo)	150			Técnica eléctrica	Tomografía eléctrica o SEV	
Técnica sísmica	Refracción, MASW, REMI, SRAC			Rollover (numero de lineas aproximadas tomografia eléctrica)	2	
Métodos de análisis a sugerir	Distancia crítica, Tiempo de intercepción, ABC, GRM, Tomografía sísmica					
Rollover (numero de lineas aproximadas sísmica de refracción y tomografia sísmica)	3					
	Ventaja	Desventaja			Ventaja	Desventaja
MASW, REMI, SRAC	para espacios reducidos, identifica estratos suaves bajo duros, no le afecta el agua y sin explosivos	puntual, compleja interpretación		Tomografía eléctrica	datos mas confiables, análisis en 2D y 3D, alta presición de estratos encontrados	tiempo de adquisición
Refracción	datos mas confiables, análisis en 2D y 3D, varios métodos de interpretación	no identifica estratos suaves bajo duros, afectada por presencia de agua		SEV	tiempo de adquisición y profundidad	puntual
Refracción	datos mas confiables, análisis en 2D y 3D, varios métodos de interpretación	no identifica estratos suaves bajo duros, afectada por presencia de agua		SEV	tiempo de adquisición y profundidad	puntual

Figura 4.4.3: Resultados mostrados

4. Con la información obtenida, en combinación de el cuadro 2.3.3 de ventajas y desventajas, se puede realizar un diseño preliminar de investigaciones geofísicas. Cabe recalcar que los diseños propuestos deberán ser consultados con un experto para llegar a resultados óptimos.

5. En caso de conocer los resultados sísmicos, se puede aplicar la segunda parte de esta herramienta, para la cual existen dos posibilidades, la primera es conocer Vp y calcular Vs o la segunda es conocer Vp y Vs. Simplemente, se ingresa la información en la celda, y se pulsa el boton "Calcular". Esta información debe tomarse solamente como referencial, nunca como datos absolutos y se recomienda corroborar la información con métodos directos para así ajustar los cálculos para cada estudio individualmente. (Ver figura 4.4.4)

El procedimiento antes descrito se realizará para cada perfil geofísico; la primera parte de esta herramienta tiene como objetivo ayudar en la cuantificación de metros de perfiles geofísicos y a la elección de las técnicas más adecuadas para cada estudio. La segunda parte de la herramienta permite tener una caracterización geotécnica preliminar de la zona de estudio, esta información puede calibrarse al utilizar métodos de prospección directos.

Como ejemplo para aplicar, se toma una profundidad de estudio de 30 m, una pendiente de $25°$, un perfil total de 400 m y se eligen realizar perfiles individuales de 230 m tanto sísmicos como eléctricos. Con esta información se obtiene la figura 4.4.5.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Vp	800		VP	VS	DENSIDAD	MODULO POISSON	MODULO ELASTICIDAD	MÓDULO DE CORTE	MÓDULO VOLUMÉTRICO	CARGA ADMISIBLE	CARGA ADMISIBLE		
2						γ	υ	E	G	K	q_a	q_a		
3				m/s	m/s	kN/m^3	m/m	kN/m^2	kN/m^2	kN/m^2	kN/m^2	Kg/cm^2		
4				800.00	392.00	18.41	0.34	773,351.16	288,129.80	815,867.76	180.40	1.84		
5														
6													Calcular	
7														
8														
9	Vp	900		VP	VS	DENSIDAD	MODULO POISSON	MODULO ELASTICIDAD	MÓDULO DE CORTE	MÓDULO VOLUMÉTRICO	CARGA ADMISIBLE	CARGA ADMISIBLE		
10	Vs	441				γ	υ	E	G	K	q_a	q_a		
11				m/s	m/s	kN/m^3	m/m	kN/m^2	kN/m^2	kN/m^2	kN/m^2	Kg/cm^2		
12				900.00	441.00	18.96	0.34	1,008,021.78	375,561.75	1,063,439.89	418.10	4.27		
13														
14														
15	FUENTES:													
16	La determinación de la q_a ha sido tomada del siguiente documento técnico:													
17	Documento: A refined formula for the allowable soil pressure using shear wave velocities.													
18	Autor: Kubilay Kaptan													
19	Publicación: ISSN 2141-2634-2012 Academic Journals													
20	Determinación de V_s en función de V_p													

Figura 4.4.4: Cálculo de características geotécnicas

MÉTODOS SÍSIMICOS	
INGRESE Profundidad estimada de investigación (m)	30
Pendiente (en grados)	25
Longitud del perfil deseado (m)	400
Tendido sísmico elegido (m)	230
Numero de geófonos (minimo)	24
Metros de tendido sísmico (mínimo)	90
Metros de tendido sísmico (máximo)	150
Técnica sísmica	Refracción, MASW, REMI, SRAC
Métodos de análisis a sugerir	Distancia crítica, Tiempo de intercepción, ABC, GRM, Tomografía sísmica
Rollover (numero de lineas aproximadas sísmica de refracción y tomografía sísmica)	3

MÉTODOS ELÉCTRICOS	
INGRESE Profundidad estimada de investigación (m)	30
Pendiente (en grados)	25
Longitud del perfil deseado (m)	400
Tendido eléctrico elegido (m)	230
Numero de electrodos	32
Metros de tendido eléctrico (mínimo)	150
Técnica eléctrica	Tomografía eléctrica o SEV
Rollover (numero de lineas aproximadas tomografía eléctrica)	2

	Ventaja	Desventaja
MASW, REMI, SRAC	para espacios reducidos, identifica estratos suaves bajo duros, no le afecta el agua y sin explosivos	puntual, compleja interpretación
Refracción	datos mas confiables, análisis en 2D y 3D, varios métodos de interpretación	no identifica estratos suaves bajo duros, afectada por presencia de agua
Refracción	datos mas confiables, análisis en 2D y 3D, varios métodos de interpretación	no identifica estratos suaves bajo duros, afectada por presencia de agua

	Ventaja	Desventaja
Tomografía eléctrica	datos mas confiables, análisis en 2D y 3D, alta presición de estratos encontrados	tiempo de adquisición
SEV	tiempo de adquisición y profundidad	puntual
SEV	tiempo de adquisición y profundidad	puntual

Figura 4.4.5: Ejemplo de análisis

Para los métodos sísmicos se deberá tomar en cuenta un tendido entre 90 m y 150 m, estos valores indican lo necesario para estudiar la profundidad deseada, sin embargo pueden considerarse longitudes de tendidos mayores con el fin de utilizar la menor cantidad de lineas posibles para reducir los tiempos de toma de información, además con tendidos más largos se alcanzan mayores profundidades. Por esta razon se asumió perfiles individuales de 230 m. La herramienta recomienda utilizar 4 técnicas geofísicas : Refreacción, MASW, REMI o SRAC. Para la elección de la más apropiada utilizo el cuadro de ventajas y desventajas, considerando éste, adopto realizar sísmica de refracción. Por último si se decide utilizar la técnica "rollover" se estiman 3 perfiles, caso contrario 2. Es importante recalcar que la técnica "rollover" brinda una mejor calidad de información.
En el caso de los métodos eléctricos para profundidades de 30 m, la tomografía eléctrica es la más adecuada; se deberá utilizar tendidos de más de 150 m y se estima que con 2 tomografías electricas se cubre el perfil total.

Es importante destacar que utilizando ambas técnicas se puede correlacionar de mejor manera los resultados.

4.5 Diseño preliminar de estudios geofísicos

Para elegir la técnica geofísica a utilizarse, se tomó como partida los objetivos de ubicación de la superficie de falla y la ubicación del nivel freático ya que la acción del agua es el factor considerado como posible desencadenante. Las técnicas recomendadas son:

- Determinar superficie de falla: Sísmica de refracción, tomografía sísmica y/o tomografía eléctrica.
- Determinar el nivel freático: Tomografía eléctrica o SEV.

Para la ubicación de los perfiles se pretende conocer la estratigrafía, localizar la superficie de falla e identificar la ubicación del nivel freático. Para esto se recomienda un perfil longitudinal a lo largo del deslizamiento principal (LS1), los perfiles transversales (LS2 y LS3) permiten inferir el comportamiento de toda la masa y además permiten una calibración del perfil LS1. Los perfiles eléctricos tienen como objetivo determinar el nivel freático y brindar características de los cambios litológicos. Los métodos de ondas superficiales se utilizan en zonas de interés como la universidad, donde no es posible la utilización de explosivos, estos permiten conocer características físicas de la zona.
Con la información generada por la herramienta "métodos geofísicas.xlsm", se analiza utilizar la sísmica de refracción o tomografía sísmica con perfiles de 110 m y tomografía eléctrica con perfiles de 155 m.

Para obtener perfiles continuos se decide implementar la técnica de campo "rollover" y se propone la ejecución de 5 perfiles sísmicos, 6 perfiles eléctricos y 7 análisis de ondas superficiales. Su ubicación se muestra en la figura 4.5.1.

El cuadro 4.5.1 indica la longitud de cada perfil principal y el número de perfiles individuales, de 110 m para sísmica y 155 m para eléctrica, necesarios para la técnica "rollover".

Al realizar el primer análisis de cantidades de perfíles geofísicos a realizarse, se observa que se proponen realizar una alta cantidad de perfiles individuales; buscando optimizar este número de perfiles individuales se decide estudiar los rendimientos entre la cantidad de perfiles a ejecutarse y el perfil total generado. Con este análisis se puede observar un aumento de trabajo en la sísmica en alrededor de un 50 % y en la eléctrica más del 100 %, lo cual incrementa tiempos y costos.

Buscando una solución más eficiente, se decide aumentar la longitud de perfiles individuales en la sísmica a 230 m y en la eléctrica a 235 m, obteniendo los resultados que se muestran en el cuadro 4.5.2.

El cuadro 4.5.2, presenta una reducción en cuanto a la cantidad de trabajo a realizarse para los dos casos; en la sísmica se redujo un 9 % y en la eléctrica un 50 %.

La ventaja de utilizar líneas más largas es que se puede estudiar mayores profundidades; la técnica de "rollover" requiere de mayor información, lo cual mejora la precisión de los resultados al ser redundante porque superpone el registro de datos, a diferencia de unir perfiles continuos, que no proporciona información correlacionada. Asi mismo brinda continuidad en el perfil geofísico, lo cual mejora los resultados.

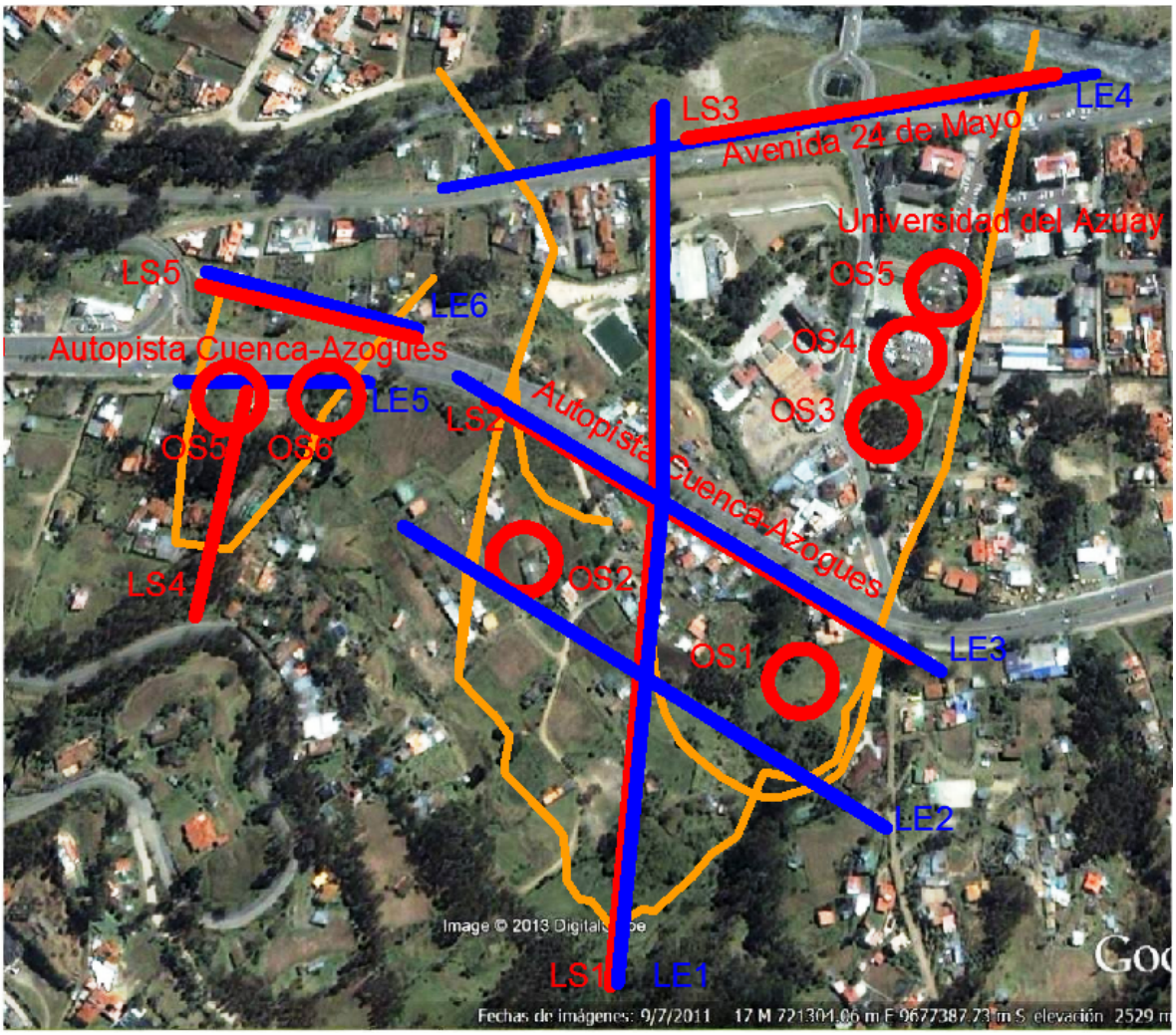

Figura 4.5.1: Propuesta de ubicación de perfiles sísmicos

En base a lo analizado, siempre que se elija utilizar la técnica "rollover", lo más recomendable es utilizar perfiles lo más largos posibles, con el fin de optimizar trabajo y tiempo. También se debe considerar que esta técnica presenta un mayor costo del estudio geofísico, siendo este un limitante para su utilización.

Nombre de perfil	Longitud total (m)	Cantidad de perfiles individuales "rollover"	Longitud de perfiles individuales "rollover"		Nombre de perfil	Longitud total (m)	Cantidad de perfiles individuales "rollover"	Longitud de perfiles individuales "rollover"
LS1	750	10	1100		LE1	750	11	1705
LS2	420	6	660		LE2	480	6	930
LS3	320	4	440		LE3	480	6	930
LS4	200	3	330		LE4	560	8	1240
LS5	190	3	330		LE5	160	2	310
LS6	0	0	0		LE6	185	1	155
Total	1880	26	2860		Total	2615	34	5270
Long. Perfil asumido (m)	110				Long. Perfil asumido (m)	155		
Total "rollover" (m)	2860				Total "rollover" (m)	5270		
Total perfiles (m)	1880				Total perfiles (m)	2615		
Rendimiento "rollover" / real	1.52				Rendimiento "rollover" / real	2.02		

Cuadro 4.5.1: Análisis 1 de cantidades de perfiles geofísicos

Nombre de perfil	Longitud total (m)	Cantidad de perfiles individuales "rollover"	Longitud de perfiles individuales "rollover"		Nombre de perfil	Longitud total (m)	Cantidad de perfiles individuales "rollover"	Longitud de perfiles individuales "rollover"
LS1	750	5	1150		LE1	750	6	1410
LS2	420	3	690		LE2	480	3	705
LS3	320	2	460		LE3	480	3	705
LS4	200	1	200		LE4	560	4	940
LS5	190	1	190		LE5	160	1	160
LS6	0	0	0		LE6	185	1	185
Total	1880	12	2690		Total	2615	18	4105
Long. Perfil asumido (m)	230				Long. Perfil asumido (m)	235		
Total "rollover" (m)	2690				Total "rollover" (m)	4105		
Total perfiles (m)	1880				Total perfiles (m)	2615		
Rendimiento "rollover" / real	1.43				Rendimiento "rollover" / real	1.57		

Cuadro 4.5.2: Análisis 2 de cantidades de perfiles geofísicos

Con las cantidades y longitudes de perfiles geofísicos definidos, se concluye el diseño de prospección geofísica, indicando en el cuadro 4.5.3, un resumen de cantidades requeridas y en la figura 4.5.1, con la ubicación de los perfiles.

Nombre de perfil	Longitud total (m)	Cantidad de perfiles individuales "rollover"	Longitud de perfil individual "rollover" (m)	Longitud total perfil a ejecutar "rollover" (m)	Numero de geófonos / electrodos	Numero de shots (refracción)	Numero de shots (ondas superficial)	Numero de shots (tomografía)
LS1	750	5	220	1100	23	5	0	7
LS2	420	3	220	660	23	5	0	7
LS3	320	2	220	440	23	5	0	7
LS4	200	1	200	200	21	5	0	7
LS5	190	1	190	190	20	5	0	7
LE1	750	6	235	1410	48	0	0	0
LE2	480	3	235	705	48	0	0	0
LE3	480	3	235	705	48	0	0	0
LE4	560	4	235	940	48	0	0	0
LE5	160	1	160	160	33	0	0	0
LE6	185	1	185	185	38	0	0	0
OS1	55	1	55	55	24	0	2	0
OS2	55	1	55	55	24	0	2	0
OS3	55	1	55	55	24	0	2	0
OS4	55	1	55	55	24	0	2	0
OS5	55	1	55	55	24	0	2	0
OS6	55	1	55	55	24	0	2	0
Total	4825	36		6750		25	12	35

Cuadro 4.5.3: Resumen de cantidades de perfiles geofísicos

4.6 Diseño preliminar de monitoreo

En base a la información generada por la herramienta "crear tabla de técnicas de monitoreo.xlsm", se analizan 15 métodos de monitoreo, indicados en la figura 4.3.1.

Al existir varios métodos disponibles, se prioriza características como: escala, potencial para implementación de SAT, mantenimiento y por último, se analiza la relación entre rendimiento y costo, para así determinar los métodos más adecuados. Es importante decir que la finalidad de este diseño es llegar a promover un SAT.

Siendo el agua el factor desencadenante de mayor influencia, es importante disponer de una Estación Meteorológica, que permita conocer a detalle la intensidad y cantidad de pluviosidad que afecta la zona. Paralelamente, se deben implementar dispositivos para recopilar información de la velocidad del movimiento; en este caso los más adecuados son: extensómetros superficiales de cable, sistemas DMS y un sistema de monitoreo local Gb InSAR.

Los extensómetros de cable se eligen por su adecuado costo, su facil implementación y la experiencia en su utilización existente en el medio local.

Siendo indispensable la realización de una perforación para la calibración de los modelos geofísicos y los modelos de estabilidad, la implementación de un sistema DMS aparece como la mejor opción, ya que no solo cumple la función de un inclinómetro, si no también la de un piezómetro; presenta ventajas sobre otros métodos ya que es un sistema automatizado con lecturas de todos los parámetros en tiempo real.

Los métodos seleccionados antes descritos, brindan información puntual y del comportamiento bajo la superficie, por lo tanto se hace indispensable la implementación de un equipo de monitoreo local. El Gb InSAR no solo permite estudiar la dinámica superficial, sino también analizar como éste FRM afecta a sus alrededores, permitiendo desarrollar soluciones para toda el área de influencia. Además de ser la técnica de monitoreo local más económica, proporciona en detalle los movimientos milimétricos.

Todos lo datos deben ser transmitidos en tiempo real o cercano a real a una central de recopilación y análisis. El INIGEMM cuenta con experiencia en la implementación de equipos de transmisión y software de monitoreo.

Se propone implementar una estación meteorológica, dos extensómetros de cable, un sistema DMS y un GB InSAR, con el fin de :

- Correlacionar la información pluviométrica con el movimiento superficial (extensómetros y GB InSAR), con el movimiento subsuperficial (DMS) y con el nivel freático (DMS) a fin de generar umbrales de decisión basados en la intensidad de lluvia.
- Analizar umbrales basados en la velocidad del movimiento y realizar proyecciones del comportamiento del FRM en el tiempo.
- Desarrollar modelos numéricos que permitan entender la dinámica de movimiento y así diseñar obras de mitigación más efectivas.
- Con la información de pluviosidad y las variaciones del nivel freático proporcionado por el DMS, se puede analizar la velocidad de infiltración, permitiendo diseñar drenajes y posterior evaluación de los mismos.

Si se tiene registros de un verano y un invierno, mínimo 1 año, se pueden proyectar umbrales, que deberán ser calibrados continuamente. También se puede confirmar si la lluvia es el factor detonante o existe otro. Es importante utilizar la información recopilada para realizar modelos precisos del movimiento; lo óptimo sería la implementación de un sistema de cálculo de estabilidad en tiempo real, que utilice la información actual de campo para el modelamiento; además permitiría tener umbrales en base a modelos en tiempo real, es decir que una alarma se enviaría si el factor de seguridad desciende de cierto valor pre establecido.

La Estación Meteorológica debe instalarse en un lugar firme cerca de la inestabilidad, además se debe estudiar la hidrogeología del sector para conocer de donde proviene el agua subsuperficial del nivel freático, los extensómetros deben analizar los desplazamientos de la masa principal ubicándose en el escarpe principal, el DMS debe ubicarse en una perforación que debe realizarse sobre el cruce de las líneas geofísicas LS1 y LE2 o entre LS1 y LS2. El sistema de monitoreo local GB InSAR puede ubicarse hasta 4 km de distancia, en un lugar con vista directa a la zona inestable.

Todas estas técnicas tienen como objetivo conocer a detalle la dinámica del movimiento de masa, analizar sus factores detonantes, pronosticar los efectos destructores sobre la ciudad, brindar información para el diseño de obras de mitigación, evaluar las medidas de mitigación implementadas y crear un SAT que permita salvar vidas de los habitantes de las inmediaciones y estudiantes de la Universidad del Azuay. Este sistema de alerta temprana permitirá además cerrar la autopista Cuenca-Azogues en caso de una falla inminente, evitando accidentes y brindando rutas alternas para

una eventualidad de este tipo.

De lograrse la estabilidad de este movimiento, los equipos de monitoreo presentan características de movilidad óptimas, pudiendo ser transferidos a otras inestabilidades para comenzar otras campañas de monitoreo.

Es importante conocer que los costos de monitoreo y prevención de desastres son más bajos que los costos de remediación, tomando en cuenta los costos sociales, posibles pérdidas humanas, pérdidas en obras civiles, destrucción de un eje vial del país, etc.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Las áreas afectadas por movimientos de masa presentan características muy variables tanto en la litología como en la hidrogeología. Esta tesis recopila un amplio número de técnicas de monitoreo y métodos geofísicos que permiten estudiar un movimiento de masa.

El desarrollo tecnológico muestra grandes avances en campos como: la detección, caracterización, mapeo y monitoreo de movimientos de masas. En el campo de la detección y caracterización remota, las imágenes satelitales muestran que los satélites proporcionan cada vez más detalles respecto a la información de la superficie terrestre; los sensores son cada vez más precisos y su utilización es más amplia, permitiendo estimar la humedad de la capa superficial de suelo y calcular desplazamientos mediante comparación de imágenes. En el campo del monitoreo y la caracterización "in situ", no ha cambiado la base de los equipos de investigación, mas bien se les ha incorporado equipos de medición automática y de transmisión de datos; en el caso de los DMS (Sistema Diferencial Multiparamétrico), éstos son una evolución de los inclinómetros, a los cuales les han incluido sensores que permiten medir el nivel freático, la temperatura del agua, el desplazamiento en 3D. Se debe mencionar que los extensómetros, por su costo y su precisión, muestran ser los más utilizados.

Hasta la presente fecha, el sistema más avanzado para monitoreo en perforación es el sistema DMS. Para su implementación se debe tener en cuenta la velocidad de movimiento, si ésta es muy alta solo se podrá monitorear durante un periodo muy corto de tiempo, siendo mejor utilizar un extensómetro vertical.

Las perforaciones cumplen una labor muy importante en cuanto permiten calibrar los modelos geofísicos y obtener características geotécnicas de la masa deslizada. Es importante analizar dónde realizar la perforación para que ésta brinde la mayor cantidad de información posible, debido a su costo elevado; en la mayoría de casos, el costo de los equipos que se implementarán para el monitoreo es menor que el costo de perforación.

El GB InSAR (Radar de apertura sintético interferiométrico en tierra), ha demostrado ser un equipo muy útil y con mucha proyección para el monitoreo en tiempo real en escala local. Entre las ventajas que presenta, es que cuenta con el software para un monitoreo en tiempo real y su costo en

comparación con otras tecnologías es adecuado.

La geofísica muestra una gran proyección para desarrollar modelos en 3D, considerando el comportamiento de toda la masa deslizada y permitiendo el estudio y detección de estructuras complejas, gracias al desarrollo de software de análisis y de equipos de computación que permiten realizar el cálculo de forma ágil. Por otro lado, el uso de geofísica en el monitoreo cada vez es mayor, por ejemplo se calibran modelos que permiten predecir la caída de rocas; también son utilizados como instrumentos que activan los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) y como sistemas de monitoreo en 4D para analizar la hidrogeología de una inestabilidad.

Es importante destacar que se deben complementar las investigaciones con varios métodos geofísicos y siempre correlacionar con información geotécnica. El desarrollo de la geofísica dependerá de las investigaciones que se den en torno a obtener información cuantitativa en términos de parámetros geofísicos y propiedades hidrogeológicas; por ejemplo ya hay estudios que relacionan la velocidad de corte (Vs) con el índice de calidad de la roca para el estudio de túneles.

El monitoreo, además de brindar información de la dinámica del movimiento, debe ser utilizado como una herramienta de evaluación para analizar la efectividad de las medidas de mitigación que se implementan. El monitoreo debe siempre enfocarse en llevar la recopilación de información a tiempo real, con el objetivo de implementar un SAT.

Los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) representan formas muy adecuadas de prevenir pérdidas humanas. En la parte de investigación, permiten generar conocimientos a fin de comprender la dinámica del movimiento.

Esta investigación estudia los métodos geofísicos y las técnicas de monitoreo más adecuados para el estudio de movimientos en masa y analiza los métodos más modernos que presenten las proyecciones más altas en cuanto a su desarrollo en el campo de los Fenómenos de Remoción en Masa (FRM).

En base a la presente investigación, se ha desarrollado herramientas informáticas que en el caso de las técnicas de monitoreo facilitan su elección, conociendo el tipo y velocidad de movimiento, es decir, basándose en una caracterización preliminar de la inestabilidad.

En cuanto a la geofísica se creó una herramienta que permite calcular la cantidad de perfil mínima necesaria, tanto en sísmica como en eléctrica, para un estudio y otra que introduciendo los resultados obtenidos de Vp y Vs nos da aproximaciones de módulo de elasticidad, poisson, densidad, módulo cortante y carga admisible. Los resultados obtenidos deben ser tomados solamente como referenciales, y deben ser siempre ser corroborados por investigaciones directas.

Se recomienda que antes de tomar la decisión de implementar un sistema de monitoreo o realizar investigaciones "in situ", se realice previamente una investigación geofísica para tener una caracterización inicial del problema. Conociendo profundidades de falla, superficie de falla, nivel freático, entre otros, se podrá tomar decisiones más acertadas al momento de diseñar una investigación o un monitoreo.

Pensando en el riesgo que representa para el país un taponamiento del río Paute debido a la posible acción de movimientos de masa, se debe analizar la implementación de monitoreo en tiempo real en el corredor del río, con el fin de generar umbrales que permitan implementar SAT, ayudando a la toma acciones rápidas y eficaces en caso de una emergencia. Por ejemplo puede implementarse en el cerro Tamuga y el cerro Mishquiyacu, para realizar una evaluación adecuada de las medidas de mitigación implementadas.

En el caso de la vía Cuenca – Puerto Inca – Guayaquil, existen muchos lugares inestables que pueden ser monitoreados con el fin de contar con un Sistema de Alerta Temprana que impida la circulación en éstos tramos en caso de emergencia y disponer de un plan de acciones emergentes para la remediación y rehabilitación de la vía. Todo esto permitirá precautelar la seguridad de personas y vehículos que transitan por la vía.

Se recomienda promover y difundir el uso de la herramienta desarrollada, de tal manera que proporcione a los técnicos una ayuda para la selección de la técnica más adecuada para su implementación.

Se deben aprovechar las nuevas tecnologias satelitales, para la detección de zonas inestables, con el fin de prevenir desastres.

5.2 Recomendaciones

Se sugiere realizar estudios que incluyan a las 4 escuelas de la Facultad de Ingeniería, con el fin de crear un Sistema de Alerta Temprana (SAT), para lo cual se deberá diseñar: los equipos a utilizar, un sistema de transmisión en tiempo real, un software que recopile, analice, ayude a la decisión y que active diferentes alertas en función de umbrales y equipos de transmisión y toma de datos, con consumos de energía bajos, de tal manera de que puedan ser alimentados por celdas fotovoltaicas.

La geofísica representa una rama muy importante en el estudio de FRM, ya que permite conocer características físicas de la zona de estudio a costos adecuados. Se deben promover investigaciones que relacionen las características geofísicas como: velocidad de transmisión sísmica en los suelos, resistividad, impedancia electromagnética, variaciones del campo de gravedad, campos electromagnéticos, con características geotécnicas como: densidad, cohesión, ángulo de fricción, resistencia a la compresión, resistencia al corte, entre otros, con el propósito de generar relaciones empíricas que permitan ser utilizadas para el cálculo y modelación de los FRM y prediseño de elementos de control, esto sin dejar de lado la realización de investigaciones directas que permitan calibrar y corroborar los modelos geofísicos.

Siendo el agua uno de los factores desencadenantes más importantes, se sugiere realizar investigaciones para entender la hidrogeología mediante un monitoreo de la dinámica del nivel freático utilizando métodos eléctricos como los sistemas $Geomon^{4d}$, investigaciones de este tipo permitirían generar conocimiento en un campo de estudio que tiene gran proyección.

Para establecer los factores detonantes de un movimiento en masa, se debe estudiar a cada factor con métodos implementados directamente en campo, no utilizar información de escala regional, por ejemplo, se recomienda implementar estaciones metereológicas en el sitio de la inestabilidad, asi se

obtendrá información en tiempo real y se podrá correlacionar con múltiples factores, determinando su influencia en el movimiento.

Calibrar las correlaciones de Barton (2006) y Cha (2006) destacadas por SafeLand [29], que permiten determinar el RMR a partir de la Vs, para su implementación en los diseños de túneles en el país, además se pueden incorporar parámetros como: Vp, resistividad o impedáncia electromagnética, para mejorar las correlaciones existentes.

Se sugiere realizar investigaciones que utilicen modelos geofísicos en 3D para crear modelos más precisos en el análisis de estabilidad, tambien pueden utilizarse modelos en 4D, con el fin de entender la dinámica de los movimientos del suelo, y adaptarlos a sistemas de monitoreo.

Se recomienda realizar estudios que permitan realizar una caracterización rápida de inestabilidades, a partir de imágenes satelitales, permitiendo así definir zonas de alto riesgo donde deben realizarse estudios a detalle que permitan evitar desastres.

Crear sistemas de cálculo de estabilidad en tiempo real que permitan ser continuamente alimentados por información "in situ", permitiendo asi implementar sistemas de alerta temprana con umbrales de decision basados en información cuantitativa, fundamentada en un cálculo matemático el cuál se genera a partir de teorías de mecánica de suelos.

Debido a la gran predisposición de apoyo por parte del INIGEMM, expresada por los técnicos de la institución, se recomienda realizar convenios entre la Universidad de Cuenca y el Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico, con el propósito de llevar adelante investigaciones relacionadas a problemas de movimiento de masas, aspecto de vital importancia por los problemas que enfrenta nuestra región.

Bibliografía

[1] Earthquake Commission and GNS Science. Electronic references, 2010. URL `http://info.geonet.org.nz`.

[2] Lee T.S. Abramson L. W. Slope stability and stabilization methods. *John Wiley New York.*, 2002.

[3] AGI Advanced Geosciencies, Inc. Electronic references, 1999. URL `www.agiusa.com`.

[4] Alberta Geological Survey. Electronic references, 2009. URL `http://www.ags.gov.ab.ca`.

[5] Proyecto Multinacional Andino. Geociencias para los comunidades andinas (pma: Gca), movimientos en masa en la region andina: Una guia para la evaluacion de amenaza. *Servicio Nacional de Geologia y Mineria Publicacion Geologica Multinacional*, 1(4):404, 2007.

[6] Denys Brunsden and JB Thornes. Landscape sensitivity and change. *Transactions of the Institute of British Geographers*, pages 463–484, 1979.

[7] Donald R Coates. Landslide perspectives. *Reviews in engineering geology*, 3:3–28, 1977.

[8] R.G. COOPER. Mass movements in great britain. *IAEG*, 1(1):10–25, 2007.

[9] Moya J. Corominas J. Measurement of landslide displacements using a wire extensometer. *Engineering Geology 55*, pages 149–166, 2000.

[10] David M Cruden and David J Varnes. Landslide types and processes. *Landslides: investigation and mitigation*, 247:36–75, 1996.

[11] DM Cruden. A simple definition of a landslide. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 43(1):27–29, 1991.

[12] S. Garambois D. Jongman. Geophysical investigation of landslides: A review. *Bulletin Societe Geologique de France 178*, pages 101–112, 2007.

[13] DINAGE. Informe de areas inestables en cuenca y zonas aledanas. *DINAGE*, 1:12–28, 2000.

[14] Ditch Witch. Electronic references, 2012. URL `http://www.ditchwitch.com/`.

[15] Geofisica Consultores. Electronic references, 2010. URL `http://www.geofisica-consultores.es`.

[16] Andrej Gosar, Stanka Šebela, Blahoslav Košt'ák, and Josef Stemberk. On the state of the tm 71 extensometer monitoring in slovenia: seven years of micro-tectonic displacement measurements. *Acta Geodyn Geomater*, 8(4):389–402, 2011.

[17] JN Hutchinson. General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology: Proc 5th international symposium on landslides, lausanne, 10–15 july 1988v1, p3–35. publ rotterdam: Aa balkema, 1988. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanics Abstracts*, volume 2, page 88. Elsevier, 1989.

[18] J. Jenny. Glissements de terrain et zones instables, apports de la géophysique: Méthodes sismiques. *Bulletin Societe Geologique de France 178*, page 13, 2003.

[19] JPL. Pia01763: Space radar image of kilauea, hawaii - interferometry 1, May 1999.

[20] Kubilay Kaptan, Z Ozdemir, and SS Tezcan. A refined formula for the allowable soil pressure using shear wave velocities. *Journal of Soil Science and Enviromental Management*, 2:175–183, July 2011.

[21] David K Keeper. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, 95 (4):406–421, 1984.

[22] I Lecomte, I Thollet, H Juliussen, S-E Hamran, et al. Using geophysics on a terminal moraine damming a glacial lake: the flatbre debris flow case, western norway. *Advances in Geosciences*, 14, 2008.

[23] H Maurer, T Spillmann, B Heinke, et al. Geophysical characterization of slope instabilities. *First Brake*, 28:53–61, 2010.

[24] Yutaka Nakamura. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, 30 (1), 1989.

[25] R Norland. Differential interferometric radar for mountain rock slide hazard monitoring. In *IGARSS 2006. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 31 July–4 August 2006, Denver, CO*, page 30, 2006.

[26] Park Seismic. Electronic references, 2010. URL `http://www.masw.com/`.

[27] Pasi slr. Electronic references, 2012. URL `http://www.pasisrl.it/`.

[28] RiskYdrogeo. Risques hydrogeologiques en montagne : parades et surveillance. *RiskYdrogeo*, 3: 242, Octobre 2006.

[29] SafeLand. Living with landslide risk in europe: assessment, effects of global change, and risk management strategies. *Deliverable 4.1, review of techniques for landslide characterization, rapid mapping and longterm monitoring*, 1(1):0–401, 2012.

[30] Pablo Sanchez. La interferometria diferencial dinsar una tecnica para el monitoreo de la subsidencia en bogota d. c. *Institut Cartografic de Catalunya*, page 15, 2010.

[31] G Senfaute, A Duperret, and JA Lawrence. Micro-seismic precursory cracks prior to rock-fall on coastal chalk cliffs: a case study at mesnil-val, normandie, nw france. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 9(5):1625–1641, 2009.

[32] AW Skempton and John Hutchinson. Stability of natural slopes and embankment foundations. In *Soil Mech & Fdn Eng Conf Proc/Mexico/*, 1969.

[33] Jaime Suárez. Deslizamientos. *Análisis geotécnico*, 1:36, 2009.

[34] Karl Terzaghi, Karl Terzaghi, Civil Engineer, Austria Czechoslowakia, Karl Terzaghi, Ingénieur Civil, Autriche Tchécoslovaquie, and Etats Unis. *Mechanism of landslides*. Harvard University, Department of Engineering, 1951.

[35] TOPCON Global Gateway. Electronic references, 2012. URL `http://global.topcon.com/`.

[36] El Universo. La josefina, el segundo desastre en magnitud en suramerica. *El Universo*, page 1, julio 2002.

[37] Strozzi T. Werner C. Gamma portable radar interferometer. *13th FIG Symposium on Deformation Measurements ad analysis, LNEC, Lisbon May*, pages 12–16, 2008.

Apéndices

Apéndice A

Herramientas generadas

A.1 Herramienta de técnicas de monitoreo

A.1.1 Cálculo de velocidad

Aqui se muestra un ejemplo del cáluclo para determinar la velocidad del movimiento.

Figura A.1.1: Ejemplo de desplazamiento entre enero 2008 y marzo 2012

Coordenadas UTM Enero 2008: 722099, 9677117
Coordenadas UTM Marzo 2012: 722099, 9677125
Diferencia: 8 m
Veolocidad: 8 m/50 $meses$
Velocidad: 1.92 $m/\text{año}$

A.1.2 Tabla matriz de métodos de monitoreo

	Parámetro medido	Otro parámetro	Resolución espacial	Escala	Frecuencia de lectura	Duración de procesamiento	Condiciones que afectan su funcionamiento	Fuentes de energia	Mantenimiento	Restricciones	Potencial para SAT	Costo de unidad	Costo de software	Costo de mantenimiento anual
GB InSAR (Radar interferiométrico en tierra)	Desplazamiento	0	2 a 5 m a 500 m de distancia	Local y Talud	Minutos	Minutos	Humedad y temperatura	Necesita fuente de energia	Chequeo periódico de componentes	Accesibilidad y ubicación	Alto	menos 1000	Bajo	0
Laser simple	Desplazamiento	0	Puntual, 1 mm hasta 200 m	Local y Talud	1 segundo	Tiempo Real	Niebla, lluvia y nieve	Necesita fuente de energía	Anual	Hielo y nieve	Alto	10000	0	3000
Estación total automática	Desplazamiento	0	Muy alta	Talud	Cada hora	Segundos	Niebla	Baterias o paneles solares	Mensual	Protección del equipo	Alto	30000	0	5000
dGPS (GPS diferencial)	Desplazamiento	0	Alta	Local	10 min	10 min	Antena siempre vertical	Paneles solares	Regular	Cielo descubierto	Alto	25000	0	1000
D.M.S (Sistema diferencial multiparamétricos)	Desplazamiento, nivel freático, asentamiento, inclinación	Presion de poros, temperatura, vibraciones	0	Talud	.01 segundo	Tiempo real	No	Paneles solares	Revisiones inalámbricas	Perforación	Alto	1000/modulo	0	0
Extensómetros superficiales de cable	Distancia entre 2 puntos	0	3 mm	Talud	1 segundo	Tiempo real	Protección del equipo, correccion por temperatura	Bateria o Solar	Mensual	0	Alto	1000 - 2000	3000	Variable
Extensómetros de cable en perforaciones	Desplazamientos transversales en perforación	0	0.5 mm	Talud	1 segundo	Tiempo real	No	Bateria o Solar	Mensual	Perforación	Alto	5000	3000	2800 / deslizamiento
Dilatómetro de barra	Separación entre discontinuidades o deslizamientos	0	0.1 mm	Talud	1 segundo	Tiempo real	Corrección por temperatura	Bateria o Solar	1 o 2 Anual	0	Alto	750	3000	0
Estación metereológica	Lluvia, temperatura, presión del aire	0	0	Local	10 minutos	Tiempo real	No	Bateria o Solar	Mensual	0	Alto	6000	2000	0
Sistemas ópticos pasivos	Desplazamientos, cambios en las caracteristicas de la superficie	Reconstrucción de superficies en 3D	Depende de la distancia hasta 100 pixels/m2	Local y Talud	Tiempo real	Dias	Luz natural	Paneles solares	4 - 6 meses	Ubicación	Medio	1500	0	100
inclinómetro nodular	Desplazamiento horizontal	0	0	Talud	Variable	0	0	Bateria o Solar	Mensual	Perforación	Medio	2000	0	0
inclinómetro superficial	Inclinación	0	0	Talud	Variable	0	Temperatura constante	Bateria o Solar	0	Perforación	Medio	2500	0	0
TM-71 (medidor de grietas)	Desplazamientos 3D de discontinuidades	Temperatura	.007 mm	Talud	1 hora	Minutos	No	Beterias	Anual	Acceso	Medio	2500	0	Costo de viaje
TDR (Reflectometría)	Humedad del suelo	Perfiles de humedad del suelo	1 cm	Local	1 minuto	Minutos	No	Bateria o Solar	Mensual	Acceso	Medio	5000	0	500
Fibras Ópticas	Deformación	0	1 m	Talud	2 minuto	Minutos	Temperatura constante	Bateria o Solar	Mensual	Acceso	Medio	50000	0	1500
Geófonos	Ruido sísmico	0	n/a	Local	Tiempo real	Semanas	No	Bateria o Solar	Mensual	Acceso	Medio	20000	0	2000
Piezómetros	Nivel freático, presión de poros	Temperatura	0	Talud	Variable	0	Temperaturas bajo 0	Bateria o Solar	0	Perforación	Medio	1500	0	0
TLS (Escaner laser terrestre)	Topografía	Velocidad de erosion, cantidad de materiales acumulados	m2	Talud	0	Tiempo real	Clima seco	Baterias	Anual	Ubicación	Bajo	150000	0 - 10000	6000
Inclinometro clásico	Desplazamiento horizontal	0	0	Talud	No	Horas	Temperatura constante	Bateria	Mensual	Perforación	Bajo	10000	2000	0
Extensómetros en perforaciones	Desplazamientos longitudinales en perforación	0	0.2 mm	Talud	1 segundo	Tiempo real	No para desplazamientos muy grandes	Bateria o Solar	Mensual	Perforación	Bajo	5000	3000	2800 / deslizamiento
Monitoreo geoeléctrico	Resistividad, polarización, potencial espontaneo	Contenido de agua, porosidad	Variable	Local	1 hora	Horas	No	Bateria o Solar	Cuando existen daños	Acceso	Bajo	25000	2200	1000
Emisiones electromagnéticas en perforaciones	Emisiones electromagnéticas	0	Variable	Talud	2 - 6 veces por año	5 horas / 100 m perforación	No	Bateria o Solar	0	Perforación	Bajo	5000	0	1000

Cuadro A.1.1: Tabla matriz de métodos de monitoreo