

**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

**“Modelado de deslizamientos de terreno utilizando GPS y
percepción remota: Caso Ahualulco, S.L.P.”**

Tesis que presenta

Fermín Villalpando Tovalín

Para obtener el grado de

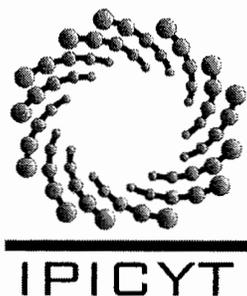
Maestro en Geociencias Aplicadas

Co - Directores de la Tesis:

Dr. José Alfredo Ramos Leal

Dr. José Tuxpan Vargas

San Luis Potosí, S.L.P., Julio de 2016



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis "**Modelado de deslizamientos de terreno utilizando GPS y percepción remota: Caso Ahualulco, S.L.P.**" presentada para obtener el Grado de Maestro en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **Fermín Villalpando Tovalín** y aprobada el **catorce de julio del dos mil dieciséis** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dr. José Tuxpan Vargas
Codirector de la tesis

Dr. José Alfredo Ramos Leal
Codirector de la tesis

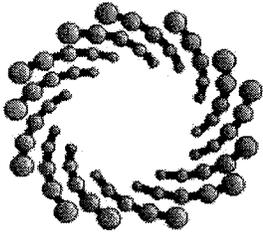
Dr. Vsevolod Yutsis
Miembro del Comité Tutorial



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en el Laboratorio de Geomática, Geofísica y Petrofísica de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la codirección de los doctores José Alfredo Ramos Leal y José Tuxpan Vargas.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (**308896**) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



IPICYT

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 019 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 14 días del mes de julio del año 2016, se reunió a las 16:15 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

Dr. Vsevolod Yutxis	Presidente	IPICYT
Dr. José Alfredo Ramos Leal	Secretario	IPICYT
Dr. José Tuxpan Vargas	Sinodal	IPICYT
Dr. José Noel Carbajal Pérez	Sinodal	IPICYT

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

MAESTRO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

sustentó el C.

Fermín Villalpando Tovalín

sobre la Tesis intitulada:

Modelado de deslizamientos de terreno utilizando GPS y percepción remota: Caso Ahualulco, S.L.P.

que se desarrolló bajo la dirección de

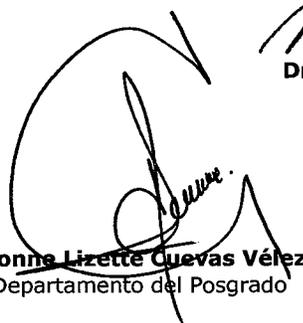
Dr. José Tuxpan Vargas
Dr. José Alfredo Ramos Leal

El Jurado, después de deliberar, determinó

APROBARLO

Dándose por terminado el acto a las 17:30 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición del interesado y para los fines que al mismo convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 14 días del mes de julio de 2016.



Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez
Jefa del Departamento del Posgrado



Dr. Marcial Bohilla Marín
Secretario Académico



Dedicatorias

Agradecimientos

Quiero expresar mi sincero agradecimiento al Dr. José Alfredo Ramos Leal y al Dr. José Tuxpan Vargas Codirectores de mi tesis, por todo el apoyo brindado, sus comentarios y sugerencias durante el desarrollo de esta investigación.

Quiero agradecer a mi Madre por su comprensión y apoyo incondicional durante toda mi vida y por creer una vez más en la realización de este proyecto.

Agradezco a Edgar Rojas, M. C. Mercedes Zavala, M. C. Simón Carranco, M. C. Sócrates Figueroa, M. C. Fred Pérez Corona, Ignacio Paz, Uriel Negrete y Luz Galván por todo el apoyo brindado durante mis salidas de campo, sus recomendaciones de geología y en el laboratorio, particularmente por sus comentarios y valiosas sugerencias que robustecieron esta investigación.

Hago extensivo mi agradecimiento a mis amigos y compañeros con los que tuve la oportunidad de convivir en estos dos años de realización de estudios, de los cuales me llevo gratos recuerdos.

Contenido

Constancia de aprobación de la tesis	ii
Créditos Institucionales	iii
Acta de examen	iv
Dedicatorias	v
Agradecimientos	vi
Contenido	vii
Lista de tablas	ix
Lista de figuras	ix
Resumen	xii
Abstract	xiv
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES	1
1.1 Introducción	1
1.1.1 Estado del arte	5
1.1.2 Planteamiento del problema	12
1.2 Objetivos	13
1.2.1 Objetivo general	13
1.2.2 Objetivos específicos	13
1.3 Justificación	14
1.4 Hipótesis	14
1.5 Caso de estudio	15
CAPÍTULO 2. MÉTODOS Y HERRAMIENTAS	16
2.1 Planteamiento de la propuesta	16
2.2 Tecnología GPS	17
2.2.1 Usos y aplicaciones	18

2.3 Técnicas de Percepción Remota	21
2.3.1 Sistemas satelitales	22
2.3.2 Dispositivos aéreos no tripulados: drones/UAV	25
2.4 Métodos geofísicos	29
2.4.1 Sondeo eléctrico	30
2.4.2 Tomografías	32
2.5 Información geológica	33
CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA	36
3.1 Adquisición de información de campo	36
3.1.1 Mediciones GPS	36
3.1.2 Imágenes Adquiridas por Drone multirrotor	45
3.1.3 Mediciones geofísicas, aplicación y consideraciones	48
3.1.4 Geología	54
3.2 Interpretación de información	68
3.2.1 Elaboración de perfiles y columnas estratigráficas	68
3.2.2 Establecimiento de cotas inter-materiales	69
3.3 Procesamiento de imágenes	70
3.3.1 Obtención de cartografía 3D de alta resolución	70
3.3.2 Obtención de Modelo Digital de Terreno (MDT) de alta resolución	72
CAPÍTULO 4. DISEÑO DE UN MÉTODO NUMÉRICO APLICADO A DESLIZAMIENTOS	73
4.1 Modelación del problema	73
4.1.1 Análisis del fenómeno	74
4.1.2 Leyes Físicas	76
4.2 Integración de información recopilada al modelo	82

4.3 Implementación computacional	83
4.3.1 Problemática en la implementación	85
CAPÍTULO 5 RESULTADOS	89
CAPITULO 6. DISCUSIÓN	91
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES	93
CAPÍTULO 8. REFERENCIAS	94

Lista de tablas

Tabla 1 Antecedentes de los UAV	26
Tabla 2 Características principales del equipo Timble R4 GNSS	42
Tabla 3 Densidad aparente de los materiales medidos.	65
Tabla 4 Relación de información obtenida a partir del procesamiento de imágenes.	71

Lista de figuras

Figura 1. a) Red trigonométrica en el Monte Arbino a finales de 1920 (Zölly, 1948). (b) Fotografía que muestra el impacto del deslizamiento de 1881 sobre la villa de Elm (Suiza) (Heim, 1882). (c) Fotografía terrestre del deslizamiento de rocas del Monte Arbino e el 2 de Octubre de 1928 (Zölly, 1948).	2
Figura 2 Composición de la estrategia propuesta en este trabajo para la modelación de deslizamientos.	16
Figura 3 Idea básica del funcionamiento del sistema GPS (Langenbacher, 2008)	18
Figura 4 Esquema de funcionamiento de la técnica RTK	19
Figura 5 Espectro electromagnético desde el ultravioleta hasta las microondas (Glackin, 2014b)	23
Figura 6 Sistema de estabilización inercial de tres ejes por medio de cardán o 3D-gimbal (KING, 1998).	27

Figura 7 Esquema básico de los métodos de resistividad (Figueroa 1987)	30
Figura 8 Rangos típicos de resistividad eléctrica de algunos materiales (Palacky, 1988)	31
Figura 9 Esquema de la disposición de campo de los aparatos para una medición de tomografía eléctrica convencional (Rodríguez, 2015)	32
Figura 10 Procedimiento de recolección de información	36
Figura 11 Evaluación del tiempo de medición vs duración de la batería.	38
Figura 12 Punto de referencia horizontal.	39
Figura 13 Banco de nivel utilizado como referencia en la componente vertical.	40
Figura 14 Ubicación y marcado de los puntos de control	41
Figura 15 Implementación de la red de puntos de control GPS.	43
Figura 16 Resultados preliminares de los primeros tres levantamientos de GPS.	44
Figura 17 Detalle Del modelo de UAV utilizado	46
Figura 18 Zona de estudio dividida en áreas de vuelo	47
Figura 19 Objetivo para referenciar y trayectorias de vuelo secciones de vuelo.	48
Figura 20 Mapa de ubicación de los SEV's implementados	49
Figura 21 Modelo de capas de los SEV 1 y 2	50
Figura 22 Mapa de Tomografías Eléctricas.	51
Figura 23 Resultados de Tomografías Eléctricas.	53
Figura 24 Mapa geológico a partir de las observaciones en campo.	55
Figura 25 Detalle del microscopio utilizado para el análisis.	56
Figura 26 Vista de andesita Casita Blanca en microscopio (Luz: natural, Objetivo: 1X, Escala: 1000 μ m).	57
Figura 27 Vista de andesita Casita Blanca (alterada) en microscopio (Luz: natural, Objetivo: 1X, Escala: 1000 μ m).	58
Figura 28 Vista de Latita Portezuelo microscopio (Luz: natural, Objetivo: 1X, Escala: 1000 μ m).	59
Figura 29 Vista de Vitrófido microscopio (Luz: natural, Objetivo: 1X, Escala: 1000 μ m)	60
Figura 30 Ignimbrita panalillo observada al microscopio (Luz: natural, Objetivo: 1X, Escala: 1000 μ m).	61

Figura 31 Material limo-Arcilla observado al microscopio (Luz: natural, Objetivo: 1X, Escala: 1000 μm)	62
Figura 32 Material arcilloso extremadamente plástico (Luz: natural, Objetivo: 1X, Escala: 1000 μm .)	63
Figura 33 Muestra de la arcilla muy plástica abundante en la zona de estudio	64
Figura 34 Detalle de comprimido de arcilla (izquierda), Terraplug KT-20, equipo utilizado en la medición de densidades (derecha).	65
Figura 35 Algunas Imágenes de locaciones donde se recabaron datos estructurales	66
Figura 36 Mapa de fracturas obtenido a partir de datos estructurales recolectados	67
Figura 37 Columna estratigráfica obtenida a partir de la información en campo y ponderada con la geología reportada.	68
Figura 38 Clasificación de los materiales de los materiales en SEV-2.	69
Figura 39 Procedimiento para el procesamiento de imágenes	70
Figura 40 Ortomosaico de alta resolución a partir de imágenes aéreas.	71
Figura 41 modelo digital de superficie de alta resolución.	72
Figura 42 Modelo digital de terreno a partir de las imágenes obtenidas.	72
Figura 43 Esquema de contactos a) entre partículas y en b) partícula-muro	76
Figura 44 Esquema de la metodología propuesta para la integración de información adquirida en este trabajo de tesis	82
Figura 45 Plataformas consideradas para el procesamiento masivo de los datos.	83
Figura 46 Modelación del eje range y azimuth utilizada para separabilidad de ejes	86
Figura 47 Estrategia de separabilidad mediante operador en azimuth y range	87
Figura 48 Visualización de una nube densa en Matlab	87
Figura 49 Elaboración de mapas de pendientes y curvas de nivel	88
Figura 50 Modelo de digital de la zona de estudio.	88

Resumen

Modelado de deslizamiento de terreno utilizando GPS y percepción remota: Caso Ahualulco, S. L. P.

PALABRAS CLAVE: Percepción remota, deslizamientos, Ahualulco, UAV, drone, GPS, modelación numérica, Modelo digital, alta resolución, métodos eléctricos.

El fenómeno de deslizamientos de terreno es un evento cuya ocurrencia puede causar severos daños a la población y medio ambiente, ya que al tratarse de fenómenos complejos en el que intervienen múltiples factores, es muy difícil poder predecirlos.

La zona de estudio se encuentra dentro del municipio de Ahualulco, S.L.P., la cual se caracteriza por una ladera de montaña con incidencia de deformaciones y escarpes pronunciados, que son fácilmente visibles a distancia. La carretera que atraviesa la zona presenta deformaciones y daños causados por el deslizamiento en el área y es reparada constantemente para su correcto funcionamiento.

Con la metodología propuesta en este trabajo de investigación se lograron integrar técnicas basadas en la percepción remota, la geofísica, la observación geológica y las técnicas informáticas para desarrollar un esquema alternativo para la modelación de deslizamientos que integre dentro de una misma metodología evidencias geológicas, monitoreo a base de puntos de medición GPS y la unificación de la información recabada con técnicas basadas en percepción remota de alta y muy alta resolución, apoyados por el uso el uso de vehículos aéreos no tripulados (AUV), también conocidos como drones empleando sensores ópticos-multiespectrales.

Se logró obtener información geológica de la zona de estudio en base a muestreos se realizados en las zonas de afloramientos y paredes expuestas, con el análisis de las muestras fue posible identificar los tipos de roca, su disposición en el subsuelo

y su densidad aparente. Asimismo, se obtuvieron datos estructurales de las fracturas y cavidades. Mediante la aplicación de métodos eléctricos fue posible determinar la distribución de las rocas en el subsuelo, conocer los espesores y profundidades de las diferentes capas bajo la superficie, con esto se alimentó el modelo numérico, siendo un factor determinante para su implementación.

Abstract

Landslides Modeling using GPS and remote sensing: Case Ahualulco, S.L.P

KEY WORDS: Remote sensing, landslides, Ahualulco, UAV, GPS, modelación numérica, Modelo digital, high resolution, métodos eléctricos

Landslides is one of the most dangerous natural phenomena to people and infrastructure, causing huge human and economic losses. It is a persistent event that can happen in any environment where gravity directly associated with subsurface instability causes the occurrence of these phenomena, which behavior is complex and difficult to predict.

The study area is located within the municipality of Ahualulco, S.L.P. The site consists of a mountain slope with incidence of deformities and pronounced escarpments, easily visible from the distance. The road that crosses through the site shows evidence of deformation and damage caused by landslides in the area, and is constantly repaired for a proper operation.

The methodology proposed in this research aims to develop an alternative scheme for landslides modeling. This method can combine geological evidence, geophysics methods, GPS technology and data collected by remote sensing techniques. All within a single methodology, all this possible by the use of using multispectral optical sensors, supported by unmanned aerial vehicles (UAV), also known as drones.

Geological information of the study area was obtained from samples of outcrops and exposed walls, with the analysis of the samples was possible to identify rock types, their distribution on the study area, and obtain its bulk density.

Structural data of fractures and cavities were found by applying electrical methods, which was possible to determine the distribution of the underground rock layers, knowing the thicknesses and depths of the layers below the surface. At the end, this information was introduced in the numerical model for its implementation.

Furthermore, to propose a unique technique for the suitable management of the huge amount of resulting data during processing. With the optimization of computing processes and the proper manipulation of massive data was possible reach the integration of different techniques in a simulation model, with which it was possible to describe the behavior of landslide.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1 Introducción

En años recientes, los desastres naturales ocurridos a nivel mundial han ido en aumento; así como, su intensidad y frecuencia. Las causas de este incremento aún no se han determinado por completo. Sin embargo, una de las teorías menciona que es a consecuencia del fenómeno denominado cambio climático, el cual afecta de manera global. Los principales fenómenos causantes de desastres naturales corresponden a complejos y anómalos fenómenos meteorológicos como la presencia de huracanes, tsunamis, terremotos, inundaciones, sequías, erupciones volcánicas, así como deslizamiento de grandes extensiones de tierra. Cada uno de ellos representa un riesgo latente que puede tener implicaciones en pérdidas de vidas humanas, ambientales y socio-económicas. De ahí la importancia de contar con estudios especializados que nos permita conocer mejor el fenómeno en cuestión, buscar estrategias de prevención e incluso y de ser posible hallar patrones o mecanismos fiables que nos permitan hacer estimaciones de predicción.

Este trabajo va enfocado al estudio de deslizamientos con características de movimiento complejas, empleando técnicas geofísicas convencionales e innovando con el uso de fotogrametría digital de alta resolución adquirida por un vehículo aéreo no tripulado (UAV) del tipo multirrotor ligero.

Uno de los ejemplos más tempranos de investigación de deslizamientos del que se conservan imágenes, es la del derrumbe que destruyó el pueblo de Elm el 11 de septiembre 1881 atribuido a prácticas mineras inadecuadas. El primer trabajo con que se considera posee una metodología sistemática en aplicaciones de percepción remota, se remonta hacia principios de 1900 (Ganz, 1914) mediante el uso de teodolitos y redes de triangulación, trabajo que tenía como objetivo caracterizar los movimientos a profundidad en los Alpes suizos, y que fue posible gracias al desarrollo de la fotografía a principios del siglo 19.

Otro de los trabajos más importantes en los primeros años de investigación del fenómeno, y que se encuentra bien documentado, se llevó a cabo entre los años 1889 y 1928 en el Monte Arbindo, Suiza (Figura 1); que logro documentar el movimiento y la aceleración de un deslizamiento de rocas en la ladera de la montaña y que permitió la evacuación de 14 viviendas antes de que fueran alcanzadas por las rocas el 2 de octubre de 1928 (Zölly, 1948), esta se puede considerar como la primera aplicación exitosa de la percepción remota para el estudio de deslizamientos, con la que fue posible además dar una alerta temprana (André Stumpf, 2013).

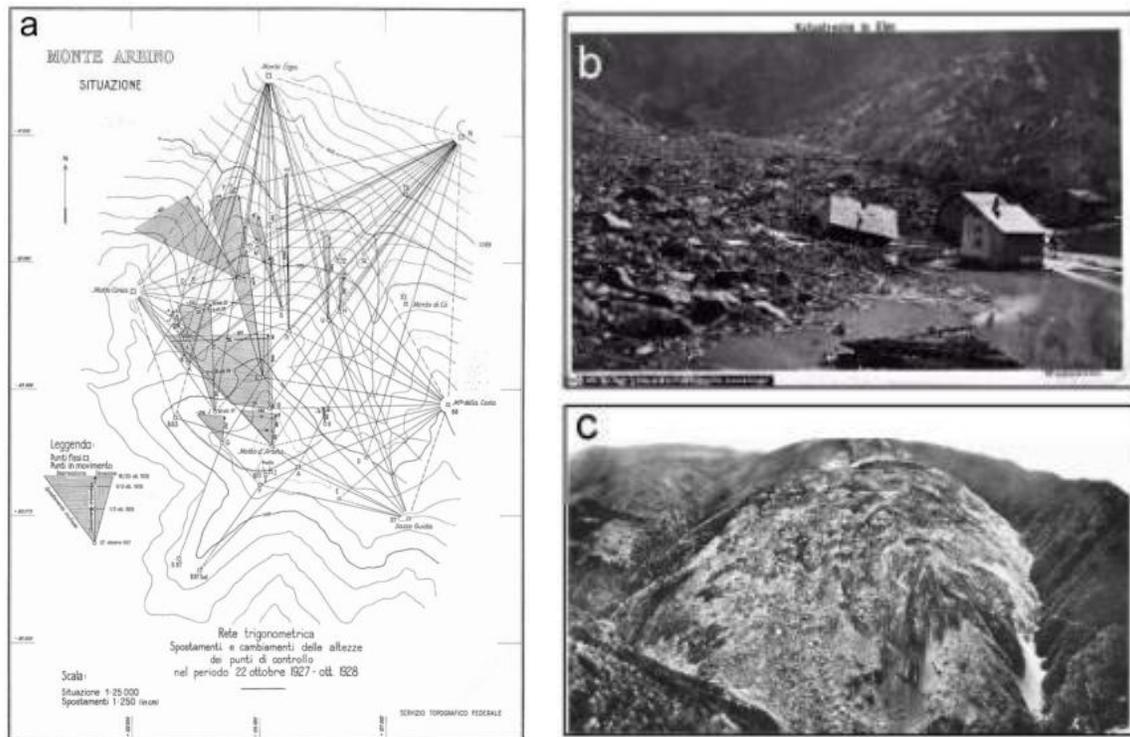


Figura 1. a) Red trigonométrica en el Monte Arbindo a finales de 1920 (Zölly, 1948). (b) Fotografía que muestra el impacto del deslizamiento de 1881 sobre la villa de Elm (Suiza) (Heim, 1882). (c) Fotografía terrestre del deslizamiento de rocas del Monte Arbindo e el 2 de Octubre de 1928 (Zölly, 1948).

Modificado de (André Stumpf, 2013).

La adquisición de la primera fotografía aérea ha sido generalmente acreditada a Gaspard Félix Tournachon (1829-1910), conocido también por su seudónimo, “Nadar”. En 1858, adquirió una foto aérea de Francia desde un globo cautivo a tierra (Campbell & Wynne, 2011). Las fotografías aéreas de Nadar se han perdido, pero afortunadamente las fotografías tomadas desde globos de otros pioneros se han logrado conservar. Otro adelanto creativo fue adherir cámaras a palomas mensajeras, a este primer grupo se le llamo “El cuerpo bávaro de palomas” en 1903 (Campbell & Wynne, 2011). En 1909 durante la exhibición internacional fotográfica de Dresden en Alemania, las fotografías tomadas por palomas se convirtieron en postales fotográficas muy populares, alrededor de esa época se continuo con la toma de fotografías aéreas con técnicas similares, además del globo y las palomas, fotografías aéreas fueron adquiridas desde cometas (Raney, 2014).

Si bien la literatura científica antes de la Segunda Guerra Mundial revela que no hay aplicaciones de estereografía a deslizamientos de tierra, la interpretación visual de las fotografías aéreas se convirtió rápidamente en una técnica comúnmente usada para su reconocimiento. Una vez concluida la segunda guerra mundial inicia a un periodo de paz relativa con fricciones entre las dos potencias dominantes tras el conflicto, este periodo de conocido “guerra fría” detono una carrera armamentista entre las dos potencias, E.U. y la entonces Unión Soviética U.R.S.S. Esto impulsó nuevamente el desarrollo de los equipos y técnicas de percepción remota con fines militares.

Durante la década de los 50 extensivas investigaciones se realizaron en el campo de sistemas de infrarrojos, sistemas de dispersión coherente de radar y el radar de apertura sintética (SAR) de la universidad de Michigan, las mayores corporaciones de la época como Westinghouse, Motorola, Philco, Goodyear, Raytheon, entre otras desarrollaron el radar aerotransportado de apertura sintética de barrido lateral (SLAR) además de sistemas (SAR) a mediados de los 50 (Raney, 2014). Así se desarrollaron los sistemas de la aeronave y de la cámara U-2 para extender la aviación y sistemas ópticos mucho más allá de sus límites esperados; y más tarde

(1960) el reconocimiento estratégico satélite CORONA proporciona la capacidad de adquirir sistemáticamente las imágenes desde el espacio (Dwayne et al., 1998). Desde la década de 1980 varios sistemas comenzaron a mostrar un gran potencial de acoplamiento entre ellos, y eventualmente permitirían obtener en su conjunto una serie de datos que posteriormente tendrían la denominación de datos geoespaciales. Estas tecnologías eran principalmente los sistemas de información geográfica (GIS), los sistemas de posicionamiento global (GPS) y la percepción remota, tecnologías que no estarían integradas por completo hasta el año 2000. A partir de este punto se hizo posible tener sistemas integrados de los que pueden obtener imágenes de alta exactitud posicional y permitían la integración de variados tipos de imágenes y datos, de esta manera se solucionó el problema, que obligaba al usuario a intentar integrar información obtenida de tecnologías que estaban vagamente conectadas, sustituyéndolas por instrumentos que trabajaban completamente integrados que funcionaban de manera sinérgica, donde cada uno reforzaba el valor de los demás (Campbell & Wynne, 2011).

En la actualidad se disponen de diferentes tecnologías que pueden complementarse para el mejor análisis de eventos de deslizamiento, entre estas tecnologías se encuentran los sistemas de posicionamiento global (GPS), los sistemas informáticos, métodos geofísicos y observaciones in situ. En los primeros años de la investigación de estos fenómenos las herramientas que tradicionalmente estaban disponibles eran la observación directa en campo, el análisis de mapas y fotografías impresas, puesto que los sistemas computacionales no estaban disponibles, el análisis e interpretación se llevaba a cabo de manera puramente visual. Este trabajo de investigación se utiliza las herramientas y técnicas anteriormente mencionadas, y se propone además el uso de un vehículo aéreo no tripulado (UAV) como plataforma de un sensor óptico con el fin de obtener información digital de muy alta resolución y precisión con la cual desarrollar un modelo que permita describir el comportamiento del fenómeno.

1.1.1 Estado del arte

Hoy en día el estudio de deslizamientos conlleva la integración e interacción de la información observada y la modelación a partir de datos obtenidos por diferentes técnicas, la percepción remota en la actualidad permite tener acceso a un conocimiento de la tierra sin precedentes gracias al creciente número de satélites con gran variedad de sensores, las plataformas aéreas y las técnicas sobre el terreno (Scaioni, 2015).

Fotogrametría terrestre y aérea

Sobre el terreno la fotogrametría terrestre permite una reconstrucción 3D de la superficie de terreno a escala sub métrica, ideal para discriminar los cambios temporales sobre la superficie observada y tener información detallada sobre su morfología (A. Stumpf, Malet, Allemand, Pierrot-Deseilligny, & Skupinski, 2014), el modelo se obtiene a partir de imágenes en dos dimensiones, para esto es necesario fotografías correctamente orientadas, la metodología implica que las imágenes sean tomadas en condiciones de luz, posición, y distancia adecuadas además de una cantidad suficiente para obtener información adecuada (Alsadik, 2014).

Otras propuestas metodológicas presentadas se basan en fotogrametría de corta distancia para la medición de deformaciones en los deslizamientos de tierra. Este enfoque presenta varias ventajas importantes, tales como la capacidad operativa sin contacto, la cobertura de gran pendiente, el alto grado de automatización, la alta tasa de adquisición, la posibilidad de obtener información sobre toda la superficie gracias a métodos ABDM (*Area-Based Deformation Measurement*), no se limitan a unos pocos puntos de control, y, generalmente a un coste inferior con respecto a la tecnología de escaneado 3D (Arosio, et al., 2014). Las aplicaciones están organizadas en dos categorías: (1) el seguimiento del punto de la superficie y (2) la comparación de superficies obtenidos a partir de la comparación de densificada de imágenes usando diferentes configuraciones de cámara y modelos geométricos

para transformar puntos desde el espacio de la imagen al espacio de objetos (Roncella & Forlani, 2014).

Técnicas geodésicas

A su vez técnicas geodésicas son necesarias para para obtener información precisa sobre la geometría y el estado actual de la posición del deslizamiento, las técnicas de muestreo pueden ser estáticas o cinemáticas dependiendo de la valoración previa al levantamiento, obteniendo un conjunto de datos de posición en los planos X-Y-Z que comparados temporalmente permiten observar la evolución del desplazamiento (Othman et al., 2011), la necesidad de implementar una adecuada red de puntos de control de referencia geodésicos es importante además para optimizar la precisión de la información obtenida por medio de plataformas aéreas o satelitales. Los deslizamientos en escalas muy pequeñas en las que redes de levantamientos GPS son utilizadas, es importante la aplicación de metodologías para el correcto análisis estadístico en el desplazamiento de los puntos medidos, para eliminar el ruido propio de las mediciones y separarlo de los datos significativos (Pirotti, F. et al., 2014).

Técnicas geofísicas

Las técnicas anteriormente descritas permiten conocer las características sobre la superficie del terreno, por regla general un deslizamiento de tierra manifiesta una modificación de la morfología de la estructura interna de la masa de terreno afectado, por lo que la aplicación de métodos geofísicos es indispensable para conocer diversas características físicas del subsuelo basándose en las propiedades físicas más importantes, como lo pueden ser la resistividad eléctrica, la propagación de ondas en el medio, la susceptibilidad magnética y la densidad de masa. Métodos sísmicos pasivos se utilizan como método para el seguimiento de la propagación de grietas dentro de una masa de roca como resultado de la tensión de carga o la congelación del agua en vista de la utilización de esta técnica para la alerta

temprana caída de rocas.(Arosio et al., 2014). Por otro lado los métodos electromagnéticos se han estado aplicando en diferentes investigaciones de deslizamientos, principalmente para determinar la geometría del fenómeno con ello se pueden conocer además las profundidades del lecho rocoso derivados de la interpretación electromagnética y los resultados sísmicos, sin discutir la resolución vertical o lateral. Diferentes investigadores destacaron que los métodos electromagnéticos pueden ser combinados con otras técnicas geofísicas para la investigación de deslizamientos. El número de estudios de casos publicados a partir de datos de georradar (GPR) se ha incrementado dramáticamente en los últimos años. Este éxito se debe principalmente a su alta resolución, que permite además el poder utilizar una gran variedad antenas, permitiendo diferentes tipos de resoluciones que van desde unos pocos centímetros a varios metros, su amplia gama de profundidad de penetración en los materiales resistivos y por ser de instrumentación ligera hacen que sea potencialmente adecuado para las investigaciones en diversos campos (Jongmans & Garambois, 2007).

Sistemas satelitales

Los sistemas satelitales continúan siendo una herramienta indispensable para el monitoreo de deslizamientos alrededor del mundo, entre sus principales ventajas se encuentran la capacidad de poder llegar a prácticamente la totalidad del planeta, poseen además una gran cantidad de sensores pasivos y activos que permiten obtener información en una gran parte del espectro electromagnético más allá del rango de la luz visible.

En la actualidad el uso de sistemas satelitales se encaminan a dar seguimiento de las actividades de deslizamientos, puesto que este fenómeno está relacionado a las dinámica hidrológica, su estudio es considerado como una tarea de alta prioridad para la prevención de desastres geológicos y gestión en zonas de embalses y ríos, en un estudio llevado a cabo para el monitoreo de deslizamientos en el área de la presa de las Tres Gargantas (provincia de Hubei, China), se investigó la aplicación

de varios métodos que utilizan radar de apertura sintética (SAR). Conjuntos de datos satelitales SAR multifrecuencia ENVISAT / ASAR, ALOS / PALSAR, y TerraSAR-X adquiridas desde diferentes órbitas se analizaron para recuperar las deformaciones históricas de diferentes deslizamientos de tierra.

Los resultados experimentales sugieren que los métodos de Interferometría SAR (InSAR) se pueden utilizar con eficacia para controlar los deslizamientos de movimiento lento, mientras que compensar píxeles método de seguimiento es más adecuado para detectar la deformación de los deslizamientos de tierra en movimiento rápido (Zhang et al. 2014). El corrección imagen por imagen es uno de los pasos de preprocesamiento necesarios para el análisis de series de tiempo por satélite en los dominios ópticos y de microondas y presenta un nuevo enfoque en el que todas las imágenes disponibles son al mismo tiempo corregidas superando los límites de las técnicas tradicionales que trabajan sobre una base de pares. Este método fue probado en la inundación y derrumbe que se produjo en Valtellina (región norte de los Alpes, Italia) durante el verano de 1987 que resultó en un gran desprendimiento de rocas (Azzoni et al., 1992). Se procesaron un conjunto de datos compuestos por imágenes de satélite de mediana resolución recogidos con Landsat-4 y Landsat-5, durante un período de 30 años los resultados mostraron que el nuevo enfoque puede proporcionar una precisión sub-píxel en mediciones manuales, este método hoy en día se considera el más preciso para el registro de imágenes, que además demostró ser confiable frente a los efectos atmosféricos y robusto frente a cambios de cobertura del suelo, nieve, y la nubosidad.

Vehículos aéreos no tripulados (UAV)

Actualmente los vehículos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) también conocidos como Drones, ofrecen una plataforma eficiente para la investigación de fenómenos de deslizamientos y constituye una novedosa plataforma de adquisición remota de información, su versatilidad y bajo costo respecto de otras plataformas como satélites y aviones convierte a estos vehículos en una de las principales

opciones a considerar en tareas de investigación. Las imágenes tomadas por un UAV multirrotor pequeño controlado por radio, en el área del deslizamiento Super-Auze, Francia, se han utilizado para producir un ortomosaico y modelos digitales del terreno (DTM) de alta resolución de varias regiones. Además se evaluó la capacidad de UAV para detectar las fisuras superficiales y el desplazamiento en la superficie de deslizamiento, además de los enfoques del procesamiento de imágenes para georrectificar adecuadamente los datos. Demostrado su capacidad para producir datos excelentes sobre deslizamientos, sin embargo son necesarias mejoras para reducir el tiempo de procesamiento de datos para la generación eficiente de ortomosaicos en base a los DTM fotogramétricos, con el fin de minimizar los errores de Georreferenciación.

Esto hace posible realizar levantamientos topográficos muy precisos y de muy alta resolución, ejemplo de ello es modelo digital del fondo del cráter tipo maar ubicado en Parangeo, México, en el cual se utiliza una metodología para desarrollar un Modelo Digital de superficie (DSM) de ultra-alta resolución para observar las estructuras causadas por la deformación tales como taludes, fracturas y cúpulas. Mediante el uso de un pequeño multirrotor con el cual fue posible obtener una ortofoto con una resolución de 4,7 cm por 1,44 km². Aunque este método puede ser aplicado a proyectos a gran escala es factible, las principales restricciones de esta metodología son: la altitud de vuelo del UAV, las restricciones a las operaciones de UAV y la capacidad de cálculo disponible para procesar todas las imágenes requeridas. (Carrera et al., 2016).

Otro estudio reciente publicado en el presente año aborda el problema de la caracterización de deslizamientos con énfasis en la identificación de fracturas y escarpes, el estudio se llevó a cabo en una carretera principal en una región montañosa en el Jordán (área de Al-Juaidieh en el centro norte de Jordania) que presenta evidencias de deslizamientos de tierra provocados por las fuertes lluvias. La identificación de los escarpes de deslizamientos en este estudio se llevó a cabo a través de una nube de puntos 3D densa de la información topográfica generada a

partir de imágenes de alta resolución captadas utilizando un UAV de bajo y un procedimiento de calibración de imágenes con objetivos en tierra con una cámara de gran campo de visión. Un enfoque automatizado se utiliza para detectar con precisión los escarpes basado en factores geomorfológicos: la relación de valores propios normalizados obtenida con el análisis de componentes principales, los valores del índice de rugosidad superficial topográficos, y la pendiente local en la vecindad de las mediciones de la nube de puntos basado en imágenes 3D (Al-Rawabdeh, et al., 2016).

La percepción remota y su adhesión en el sector civil

Para la década del 2000 el creciente poder de internet comenzó a influir en el acceso público a imágenes remotamente adquiridas, en parte, a través del diseño de productos que consisten en la distribución de imágenes adquiridas de manera remota y su distribución a través de internet, si bien en tiempos anteriores se había hecho énfasis en la creación de productos y servicios especializados para el uso de profesionales, durante esta nueva etapa se hizo hincapié en el desarrollo de nuevos productos y servicios que estuvieran disponibles para el público en general (Campbell & Wynne, 2011). En 2001 la compañía Keyhole Incorporated logró un avance importante para el desarrollo para la integración de la percepción remota en una aplicación que estuviera disponible para el público en general, con el desarrollo de EarthViewer 3D. Posteriormente, la compañía sería comprada por Google en 2004, y el proyecto pasaría a manos de los nuevos compradores y a partir de la tecnología del núcleo de Keyhole, se hizo posible el desarrollo de Google Earth.

Este nuevo producto estaba diseñado para llegar a un amplio sector de la población, puesto que para su uso no era necesario tener una formación técnica o científica, bastaba con estar familiarizado en el uso de internet, medio por el cual se hacían llegar los datos del programa, este producto logró con éxito integrar una amplia colección de imágenes georreferenciadas de diferentes tipos, y adquiridas en diferentes fechas y resoluciones, además de ofrecer una interfaz intuitiva para

navegar y viajar entre lugares, también el cambio de escala la orientación y el detalle, aspectos en los cuales se ha estado mejorando conforme las nuevas versiones del producto se hacen disponibles (Campbell & Wynne, 2011).

Con la aparición de este tipo de herramientas se logra atraer a una numerosa población de usuarios que no eran especialistas mientras que al mismo tiempo proporciona capacidades especializadas para una comunidad de los usuarios en la defensa, la seguridad, la respuesta de emergencia, y el comercio que requieren de manera inmediata y simultánea el acceso a un cuerpo común de datos geoespaciales. Google Earth y servicios en línea similares representan una nueva clase de aplicaciones de imágenes remotamente adquiridas que contrastan fuertemente con las de épocas anteriores. Y podemos destacar factores clave para el desarrollo de estas nuevas aplicaciones (1) una política pública que ha mantenido limitaciones relajadas en la adquisición de datos de satélites de alta resolución, (2) políticas de privacidad personales que favorecen la recolección generalizada de las imágenes, (3) la disponibilidad y la popularidad de los dispositivos de navegación personal confiables y (4) el aumento de la migración de aplicaciones a dispositivos móviles o portátiles (Habib, 2010). Esta evolución ha dado lugar a una clase de productos cartográficos derivados de los datos de sensores remotos, incluyendo, por ejemplo, los creados por MapQuest y su software de navegación asociado, que se basan en la red de carreteras que se actualizan sistemáticamente a partir del análisis de imágenes de obtenidas remotamente, además del trabajo realizado por autores que han descrito las aplicaciones prácticas de muchas de estas tecnologías y el cómo usarlas de manera eficiente en beneficio del usuario de las mismas (Ryerson & Aronoff, 2010).

Desde el momento que se logró comprender el poder y potencial de la percepción remota, su uso para estudios de la Tierra y el atmósfera ha crecido hasta el punto de que ahora es una herramienta verdaderamente fundamental en los estudios científicos y las aplicaciones implicadas en el seguimiento y la evaluación de la los recursos naturales de la Tierra y su entorno. El alcance y la extensión de los

sistemas espaciales en todo el mundo están logrando una integración de los sistemas operativos y de investigación, ambos aspectos que ya son operadas por muchas naciones y organismos comerciales. Además existe un progreso considerable en la coordinación entre los países y las organizaciones para lograr una mejor utilización más eficiente de los recursos espaciales para su uso en ciencias de la tierra y otras aplicaciones, actualmente se llevan a cabo esfuerzos internacionales para construir un Sistema Global de Observación de la Tierra (GEOSS, por sus siglas en inglés), tiene como objetivo la interconexión de un conjunto diverso y creciente de instrumentos y sistemas para el monitoreo y pronóstico en el entorno global de la Tierra (Raney, 2014).

1.1.2 Planteamiento del problema

El fenómeno de deslizamiento al que hace referencia este documento ocurre en un área concreta y de limitada extensión, que consiste en una ladera que presenta deslizamiento de importante magnitud a pesar de la poca pendiente de la misma, con las características de un deslizamiento de tipo rotacional que ha modificado de gran manera el relieve del lugar además de provocar daños a la carretera que atraviesa la zona de estudio, y que requiere de reparaciones periódicas para su correcto funcionamiento, se trata de un fenómeno de comportamiento complejo que depende de interacciones complejas de un gran número de factores interrelacionados (características geológicas y geomorfológicas, propiedades del suelo, características de la cobertura superficial y los procesos hidrológicos).

Puesto que no se dispone de información específica del área de estudio, esta será adquirida por cuenta propia, utilizando diferentes técnicas que incluyen el uso de un UAV, técnicas geodésicas, métodos geofísicos, observación de la geología y técnicas informáticas que permitan identificar los procesos que intervienen en el mismo, y que esta información en su conjunto, pueda ser tratada con la intención de modelar y dar una aproximación acerca de su comportamiento futuro.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar una metodología robusta que incorpore mediciones GPS, levantamientos geofísicos, observación de la geología y técnicas basadas en percepción remota, para el análisis de fenómenos de deslizamiento complejos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Establecer una red de puntos de control geoméricamente uniforme mediante GPS diferencial.
- Aplicar métodos geofísicos para la caracterización del subsuelo
- Adquirir imágenes aéreas del área estudio mediante el uso de un UAV.
- Construir un modelo digital de elevación y de terreno a partir de las imágenes obtenidas para la caracterización cualitativa y cuantitativa del área del estudio.
- Diseño de un modelo numérico que describa el comportamiento general del deslizamiento.

1.3 Justificación

Los deslizamientos son eventos persistentes y pueden suceder en cualquier ambiente donde la gravedad directamente ligada a la inestabilidad del subsuelo propicie la ocurrencia de estos fenómenos, que presentan un comportamiento complejo y de difícil predicción, por lo que pueden representar una amenaza para la población y la infraestructura. La complejidad en el comportamiento de los fenómenos de deslizamiento hace que su caracterización, y predicción sean tareas particularmente complicadas. Por esta razón es importante desarrollar metodologías propias que permitan entender de mejor manera el fenómeno. En este trabajo de investigación está motivado en aplicación de técnicas modernas de percepción remota, basadas en el uso de vehículos aéreos no tripulados UAV también conocidos como Drones, aplicando métodos novedosos de fotogrametría aérea y terrestre obteniendo información de muy alta resolución en el orden de los tres centímetros por pixel, además geofísica, geología e informática, con el fin de obtener modelos numéricos capaces de describir el comportamiento de fenómenos de deslizamiento.

1.4 Hipótesis

El fenómeno posee las características de un deslizamiento rotacional cuyo movimiento es controlado por un arroyo que corre en dirección Norte-Sur, que se encuentra al pie de la zona de deslizamiento, y que provoca que el material acumulado al pie sea constantemente removido por la corriente de agua, con lo que la masa de material no llega a entrar a un estado de equilibrio y se mantiene en constante movimiento. Debajo de la superficie del terreno existe una capa de rocas inestables de características de limo-arcilla que funciona como superficie deslizante, provocando que la masa de roca que se encuentra sobre la misma este desplazándose, dado la gran cantidad de fracturas en la zona el agua que se infiltra por las mismas estaría en contacto con la roca del subsuelo provocando mayor inestabilidad.

1.5 Caso de estudio

La zona de estudio se encuentra a aproximadamente a 55 kilómetros de la ciudad de San Luis Potosí, en un tramo de la ruta Ahualulco-Charcas de la carretera 63 a la altura del kilómetro 21, y frente a la localidad de Cañón de la Yerbabuena, el área estudiada cubre 1100 metros cuadrados distribuida en un perímetro de 4000 metros aproximadamente, el área se caracteriza por una ladera de montaña con incidencia de deformaciones y escarpes pronunciados que son fácilmente visibles a distancia, la carretera que atraviesa la zona presenta deformaciones causadas por el deslizamiento en el área y es reparada constantemente para su correcto funcionamiento.

CAPÍTULO 2. MÉTODOS Y HERRAMIENTAS

2.1 Planteamiento de la propuesta

EL fenómeno de los deslizamientos de terreno es un evento que de ocurrir puede causar severos daños a la población y medioambiente. Y al ser un fenómeno complejo, en el que intervienen múltiples factores es muy difícil poder predecirlos. En este trabajo de tesis se propone desarrollar un esquema alternativo para la modelación de deslizamientos que integre dentro de una misma metodología evidencias geológicas, mediciones in situ, monitoreo a base de puntos de medición GPS e involucre la unificación de la información recabada con técnicas basadas en percepción remota de alta y muy alta resolución (Figura 2). Propiamente se pretende desarrollar una metodología nueva que fusione el uso de drones y sensores ópticos-multiespectrales con métodos tradicionales de monitoreo; con fines de modelación de deslizamientos y dar un primer paso a la elaboración de una estrategia que en un futuro pueda estimar posibles escenarios de ocurrencia de deslizamientos.



Figura 2 Composición de la estrategia propuesta en este trabajo para la modelación de deslizamientos.

Un aspecto importante del trabajo desarrollado y que representa una innovación con respecto de otros corresponde al uso de vehículos aéreos no tripulados para la

recolección de información geoespacial de alta y muy alta resolución. El beneficio de usar drones se refleja en una mejor resolución espacial, permitiendo caracterizar con una precisión mucho mayor a la otorgada con sistemas satelitales.

En las secciones siguientes, se explica de forma concisa cada componente que se ha integrado en la metodología implementada en este trabajo de tesis. Mencionando sus principales usos y aplicaciones, ventajas y desventajas; así como la información relevante que nos puede otorgar para el estudio de deslizamientos.

2.2 Tecnología GPS

La tecnología se ha convertido en una herramienta útil, de bajo costo, y precisa de la medición de la localización absoluta y ha mejorado enormemente la utilidad de los datos de percepción remota, especialmente cuando es necesario integrar los datos de imagen con los datos de campo. Un receptor GPS funciona recibiendo señales transmitidas por una red de satélites que orbitan la Tierra situados en órbitas de tal manera que cada punto de la superficie de la Tierra estará a la vista de al menos cuatro, satélites en cualquier momento el sistema de 24 satélites que se coloca a una altitud de aproximadamente 21,000 kilómetros que orbitan la Tierra a intervalos de 12 horas y distanciados entre sí para proporcionar una cobertura completa de la superficie terrestre (Campbell & Wynne, 2011). La idea detrás del funcionamiento del GPS es bien conocida. Si se saben las distancias de un punto de la Tierra (un receptor GPS) a tres satélites del GPS, junto con las localizaciones del satélite, la ubicación del punto (o receptor) puede ser determinada por la simple aplicación de la técnica llamada trilateración, cada satélite GPS transmite continuamente una señal de radio de microondas compuesta de dos vehículos, dos códigos, y un mensaje de navegación. Cuando un receptor GPS está encendido, que captará la señal GPS a través de la antena del receptor. Una vez que el receptor adquiere la señal GPS, que lo procesará utilizando su software incorporado. El resultado parcial del procesamiento de la señal se compone de las distancias a los satélites GPS a través de los códigos digitales (conocidos como los pseudorángos)

y coordenadas del satélite a través del mensaje de navegación, en teoría, sólo se necesitan tres distancias a tres satélites de manera simultánea. En este caso el receptor se encuentra en la intersección de tres esferas donde cada una tiene un radio de distancia por satélite (Figura 3). Desde el punto de vista práctico, sin embargo, se necesita un cuarto satélite para tener en cuenta el reloj del receptor (Langenbacher, 2008).

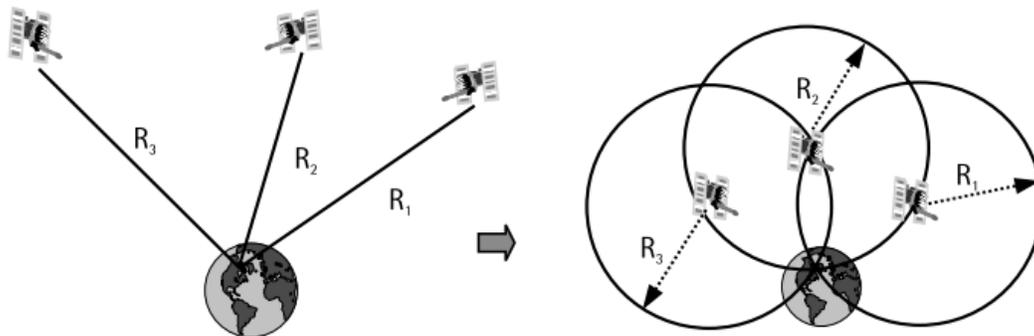


Figura 3 Idea básica del funcionamiento del sistema GPS (Langenbacher, 2008)

2.2.1 Usos y aplicaciones

El sistema de posicionamiento global GPS ha revolucionado los campos de topografía y de navegación desde sus primeras etapas de desarrollo. Aunque GPS fue diseñado originalmente como un sistema militar, sus aplicaciones civiles han crecido a un ritmo mucho más acelerado. A nivel de aplicaciones para topografía este sistema ha sustituido a los métodos convencionales en muchas aplicaciones, además de ser considerado un proceso rentable, en la que se puede obtener la reducción de costes al menos 50%, siempre que sea posible utilizar el método cinemático en tiempo real (RTK) GPS, en comparación con las técnicas convencionales.

En términos de productividad y ahorro de tiempo, GPS podría proporcionar más de un 75% de ahorro de tiempo siempre que sea posible utilizar dicho método. El hecho de que el GPS no requiere intervisibilidad entre las estaciones y el rover lo convierte

en una opción más atractiva para los topógrafos, comparados con los métodos convencionales. RTK es una técnica de posicionamiento relativo en función de fase de portadora que, al igual que los métodos estáticos, emplea dos o más receptores que simultáneamente están dando seguimiento a los mismos satélites. Este método es adecuado si: (1) El levantamiento implica un gran número de puntos desconocidos situados en las proximidades (es decir, dentro de hasta aproximadamente 10 a 15 km) de un punto conocido; (2) Se requieren las coordenadas de los puntos desconocidos en tiempo real; y (3) la línea de visión, la trayectoria de propagación, es relativamente sin obstáculos. En este método, el receptor base permanece estacionaria sobre el punto conocido y está conectado a un transmisor de radio, similar al método cinemático convencional, se requiere una velocidad de datos tan alta como 1 Hz. Las mediciones receptor base y coordenadas se transmiten al receptor móvil a través de la comunicación (radio) enlace (Figura 4). El software incorporado en un vehículo receptor combina y procesa las mediciones GPS recogidos en la base y los receptores móviles para obtener las coordenadas de los Rover (Langenbacher, 2008).

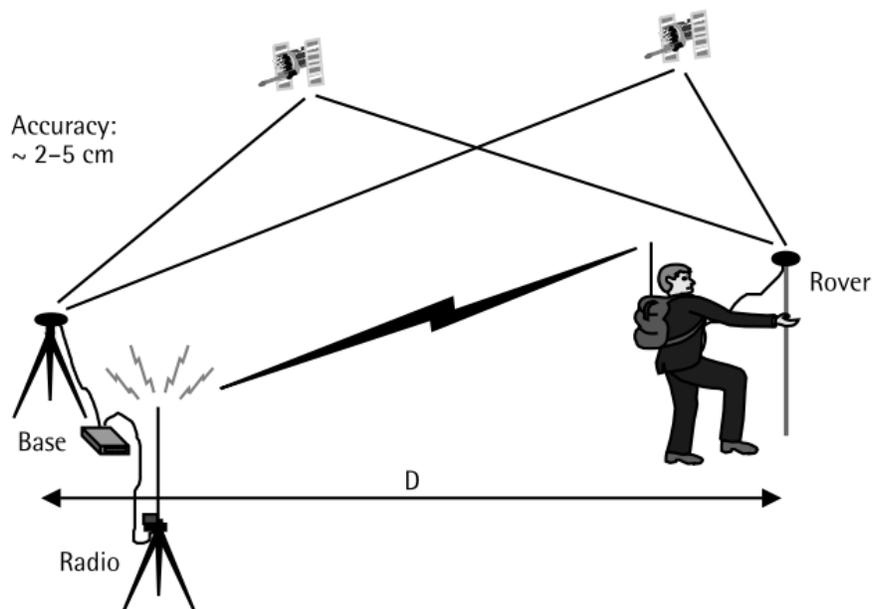


Figura 4 Esquema de funcionamiento de la técnica RTK

Ventajas y limitantes

Las técnicas han evolucionado de medición estática, a medición estática rápida, y luego a post-proceso de medición de alta precisión y medición RTK. Y la precisión de medición ha cambiado desde el nivel inferior a un metro de precisión, centimétrica, e incluso a nivel milímetro. Sus principales ventajas incluyen la capacidad de operar las 24 del día en diferentes en todo tipo de condiciones climáticas, no requiere de línea directa de visión con la base y los puntos a monitorear, permite la adquisición de gran cantidad de información con relativa rapidez además de la posibilidad de cubrir grandes áreas sin que esto disminuya la precisión de los datos tridimensionales (Abidin & Surono, 2004), dado que la corrección diferencial se realiza en tiempo real durante el propio levantamiento es posible obtener en el instante los datos obtenidos por el Rover, es decir, no se requiere un post-procesamiento. **La precisión de posicionamiento esperado es del orden de 2 a 5 cm (RMS).**

Esto se puede mejorar por permanecer sobre el punto durante cierto período de tiempo, por ejemplo, unos 30 segundos, para permitir un promediado en la posición. El Rover contiene una unidad de procesamiento de datos internamente construida y las coordenadas de todo el levantamiento pueden ser almacenadas internamente y descargadas en un momento posterior en el software adecuado para su posterior análisis. Este método se utiliza principalmente, aunque no exclusivamente con los receptores de doble frecuencia.

En las mismas condiciones, la precisión de posicionamiento del método la RTK es ligeramente inferior en comparación con la del método GPS cinemático convencional. Esto se debe principalmente a las etiquetas o sellos de tiempo de los datos cinemáticos convencionales, pues los datos tanto de la base y el móvil se acomodan perfectamente en el procesamiento. Con RTK; sin embargo, los datos de receptor base alcanza el Rover después de un cierto retraso (o latencia) de datos se produce como resultado de formato, empaquetamiento, transmisión y

decodificación de los datos de la base y para que estos coincidan respecto de las marcas de tiempo del Rover, los datos de la base deben ser extrapolados, lo que degrada la precisión de posicionamiento. Sin embargo, en cuanto más se busca una alta precisión, aumenta en gran medida la inversión de mano de obra y materiales, más horas de monitoreo tienen que agregarse y los costos de aplicación se elevan (Langenbacher, 2008). En la actualidad, se han producido sistemas de monitoreo GPS de escala milimétrica que podrían utilizarse en la construcción de obras que requieren de muy alta precisión así como aplicaciones geodésicas, estos sistemas que suelen ser demasiado costosos (Lei et al., 2011), en muchos requieren la construcción de instalaciones de monitoreo permanentes, con lo que su campo de aplicación se reduce a casos muy particulares.

2.3 Técnicas de Percepción Remota

La percepción remota se refiere al grupo de técnicas basadas en instrumentos utilizados en la adquisición y medición de datos espacialmente organizados sobre algunas propiedades en la matriz de puntos objetivo que se encuentran dentro de la escena censada. Estos datos ofrecen características correspondientes a objetos y materiales. Estas técnicas implican la acumulación de información pertinente de la escena censada mediante la utilización de la radiación electromagnética, campos de fuerza, o energía acústica empleando cámaras, radiómetros, laser, receptores de radiofrecuencias, sistemas de radar, sonar, dispositivos térmicos, sismógrafos, magnetómetros, gravímetros y escintilómetros entre otros dispositivos (Raney, 2014).

Existen muchos tipos de plataformas de que pueden albergar una gran variedad de instrumentos, con lo que la observación de la Tierra se puede llevar a cabo desde muchos tipos de plataformas, incluyendo torres, globos, vehículos aéreos no tripulados (UAV), aviones tripulados, satélites y estaciones espaciales, utilizando técnicas principalmente en el ultravioleta (UV), visible, infrarroja (IR), y las porciones de microondas, puesto que sería imposible instrumentar todo el globo con sensores

terrestres, boyas oceánicas, globos meteorológicos, etc., adquirir información de manera remota sigue siendo la opción más eficiente,. Al presente la tendencia más moderna hace énfasis en los métodos de percepción remota desde satélites y plataformas aéreas no tripuladas (Glackin, 2014b).

2.3.1 Sistemas satelitales

Como se ha mencionado anteriormente, el desarrollo de los sistemas satelitales nace a partir de la necesidad de contar con un sistema para el estudio de la Tierra y su medio ambiente (atmósfera, los océanos, el hielo, la superficie terrestre, el entorno espacial de la Tierra sólida, y cercano a la Tierra) desde el espacio. El sistema incluye de manera integral: la nave espacial, plataforma que aloja los instrumentos de teledetección y les proporciona dirección, energía, los comandos de acción y el almacenamiento de datos entre otros. Enseguida tenemos los instrumentos de detección o sensores con los que observar y medir las características del entorno de la Tierra, y finalmente las operaciones de control de misión en tierra. El término "satélite" se utiliza generalmente para definir la combinación de la nave y los instrumentos, pero en algunas comunidades, el término "nave espacial" se utiliza para esa combinación, con el término "satélite" que indica la plataforma(Glackin, 2014b).

La mayoría de los satélites de observación de la Tierra se colocan en órbitas circulares, casi polar, heliosíncrona a altitudes de entre 600 a 900 km sobre la superficie de la Tierra. Un satélite en una órbita sincronizada con el sol pasa por encima de una región determinada en el suelo aproximadamente a la misma hora local cada día. Esto significa que el ángulo de iluminación solar cambia de forma relativamente lenta para esa área de día a día, lo que simplifica la interpretación de datos. Algunos satélites sincrónicos al sol están en órbitas exactas de la repetición, es decir, que vuelan sobre la misma región exactamente a la misma hora local todos los días (Glackin, 2014a).

Las porciones del espectro electromagnético que son más útiles para la detección a distancia se puede definir de la siguiente manera: la radiación ultravioleta (UV) se extiende desde aproximadamente 0,1 a 0,4 μm , el visible (VIS) 0,4 a 0,7 μm , la infrarrojo cercano (NIR) 0,7 a 1,0 μm , el infrarrojo de onda corta (SWIR) de 1 a 3 μm , el infrarrojo de onda media (MWIR) 3-5 μm , el infrarrojo de onda larga (LWIR) de 5 a 15 μm , y el infrarrojo lejano (FIR) de 15 a 100 μm . Estos rangos se definen típicamente en términos de longitud de onda, pero otros rangos pueden ser definidos en términos de frecuencia también.

Por lo tanto, el rango de sub-ondas milimétricas (sub-mm o sub-onda mm) abarca las longitudes de onda de aproximadamente 100 a 1000 μm o frecuencias de aproximadamente 3 THz a 300 GHz como se expresa en la figura 5. La onda milímetro (onda-mm) rango se extiende desde 300 hasta 30 GHz o 1 mm a 1 cm (cm) y la región de microondas de 30 a 1 GHz o de 1 a 30 cm (Glackin, 2014b).

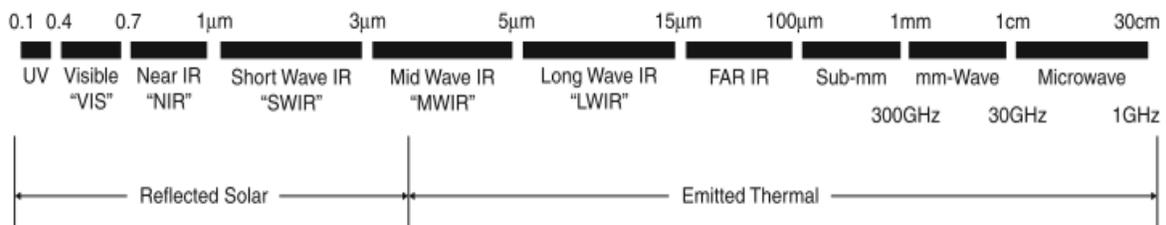


Figura 5 Espectro electromagnético desde el ultravioleta hasta las microondas (Glackin, 2014b)

Métodos pasivos

El método pasivo consiste en adquirir información a partir de la radiación natural del medio ambiente, esto es usando la luz del sol, la energía es detectada por medio del sensor, generalmente óptico que detecta las señales eléctricas reflejadas de la superficie de la tierra y a partir del procesamiento de esas señales se obtiene información importante de las características del objeto censado. Instrumentos electro-ópticos pasivos incluyen generadores de imágenes multispectrales,

lectores de imagen hiperespectral, prospectores atmosféricos o sondas, espectrómetros, radiómetros, polarímetros y todo tipo de cámaras.

Hay tres clases básicas de las imágenes obtenidas por métodos pasivos: pancromática, multiespectral, y hiperespectral. Las Imágenes pancromáticas en una sola banda espectral ancha ("blanco y negro") son útiles para la resolución espacial máxima, porque más luz está disponible en la amplia gama espectral. Las imágenes multiespectrales en varias decenas de bandas espectrales no muy anchos (color) añaden información para la discriminación, clasificación y análisis de objetos en función de sus propiedades espectrales. Las imágenes hiperespectrales en cientos de bandas espectrales contiguas estrechas mejoran aún más la discriminación, clasificación y análisis.

Métodos activos

Los instrumentos activos emiten su propia radiación y miden las señales de retorno, esto lo hacen por medio de un pulso de radiación que interactúa con el medio ambiente que la refleja o la dispersa. Parte de la radiación viaja de nuevo al instrumento es censada para su procesamiento. Los instrumentos activos incluyen radares de apertura real, radares de apertura sintética (SAR), altímetros, y dispersómetros. Otros instrumentos miden las señales de los satélites GPS cuando se propagan a través de la atmósfera y la superficie de la Tierra, es decir, instrumentos de ocultación de GPS y reflectómetros GPS, se organizan bajo los instrumentos de microondas activos, debido a que las señales GPS son activamente transmitidas.

El término "Apertura", para los instrumentos de microondas, se refiere al tamaño efectivo de la antena. En tanto que la "Apertura sintética" se refiere al proceso de hacer la función de instrumento como si hubiera una antena más grande o más continua que lo hace. Por SAR, esto se realiza explotando el movimiento del satélite para que la antena con eficacia más grande. Para los radiómetros, esto se hace

mediante la explotación de las propiedades de un conjunto de antenas delgadas que sólo rellenan parcialmente la abertura deseada o "apertura escasa" (Glackin, 2014b).

2.3.2 Dispositivos aéreos no tripulados: drones/UAV

Las plataformas aéreas se utilizan normalmente para obtener observaciones de alta resolución espacial o temporal que no puede ser prácticamente conseguida con sistemas basados en tierra o en satélites. Estos incluyen observaciones de teledetección de eventos dinámicamente cambiantes (por ejemplo, erupciones volcánicas o los sistemas meteorológicos convectivos), que no se podrían hacer por los satélites debido a que sus itinerarios orbitales están predeterminados. Las plataformas aéreas pueden operar de forma selectiva haciendo vuelos en las zonas que presentan una nubosidad persistente, por ejemplo las imágenes en algunas regiones tropicales, montañosas y árticas por ejemplo, y que no pueden ser obtenidas de los satélites en órbita polar de forma convencional. La resolución espacial de las imágenes obtenidas a partir de una plataforma en el aire puede ser controlada con precisión mediante la variación de la altitud de la aeronave por encima del suelo.

Como muchas otras tecnologías el UAV tiene un origen militar con un trasfondo histórico muy importante pero poco conocido en sus primeros años de existencia, la era civil del vehículo no tripulado inicia en la década de 1990 con el inicio de un programa de la NASA con socios de la industria, con el fin de llevar los UAV al mercado civil, el programa de 9 años conocido como ERAST (*Environmental Research Aircraft and Sensor Technology*) dio como resultado mejoras en los sensores, motores y diseño de vehículos capaces sobrepasar los límites de altitud y distancia de vuelo, como se describe en la Tabla 1.

Tabla 1 Antecedentes de los UAV

Año		
1917	Sperry Aerial Torpedo	El Dr. Peter Cooper y Elmer A. Sperry inventaron el estabilizador giroscópico automático, que permitió construir una aeronave estable que navegara recta y nivelada.*
1935	Queen Bee	Primer UAV reutilizables, el cual era controlado por radio y podía volar tan alto como 17.000 pies y viajar una distancia máxima de 300 millas en más de 100 mph. *
1944	V-1	Este UAV era impulsado por un motor jet de pulsos, podía transportar una ojiva de 2000 libras y estaba pre programado para lanzar su carga tras haber volado 150 millas.*
1964	AQM-34 ,	Lanzado desde el aire y controlado remotamente desde un avión DC-130, se le utilizo para misiones de reconocimiento. Tras completar su misión, este UAV se dirigía a un área de recuperación segura, donde desplegaba su paracaídas y era recogido por un helicóptero.*
1970	SPA 147	Vehículo aéreo de reconocimiento, tenía la misión de tomar fotografías e interceptar mensajes de radio, este UAV podía volar por ocho horas continuas y lograba una altura de 60,000 pies*
1978-1980	Scout Pioneer	La Fuerza Aérea de Israel, logro avances importantes en el desarrollo de nuevos vehículos aéreos no tripulados, las versiones de los cuales se integraron en las flotas de vehículos aéreos no tripulados de muchos otros países.*
1990	Uso civil del UAV	Iniciativa de la NASA con socios de la industria, con el fin de llevar los UAV al mercado civil, el programa de 9 años conocido como ERAST (<i>Environmental Research Aircraft and Sensor Technology</i>) dio como resultado mejoras en los sensores, motores y diseño de vehículos capaces sobrepasar los límites de altitud y distancia de vuelo**
Actualidad	UAV de ala rotatoria	pequeños UAV de múltiples rotores son hoy herramientas indispensables en la adquisición de información, con diferentes tipos de instrumentos y mejoras son importantes se han ganado un lugar de importancia en ámbito civil, en el cual se han popularizado bajo el término: "Drone"

*Nova. *Time Line of UAVs. Time Line of UAVs 1 (2002)*. (Nova, 2002)

**Yuhas, C. *Civil UAV. Assessment 1-7 (2004)*.(Yuhas, 2004)

En años recientes, el uso de vehículos aéreos no tripulados civiles como plataformas de sensores remotos ha ido en aumento, debido principalmente a la mejora de la disponibilidad de sistemas de posicionamiento global (GPS) precisos de reducido tamaño y sistemas de medición inercial de unidades (IMU) (Turner et al., 2014). El dispositivo IMU es vital en los UAV, pues permite el vuelo autónomo en este tipo de dispositivos, para entender su funcionamiento podemos considerar a un acelerómetro como un instrumento que mide la aceleración a lo largo de un solo eje. Incorporando una dimensión más se obtiene la velocidad, e Integrando uno nuevo eje se obtiene tiene la posición, o más bien, el cambio de posición a lo largo del eje del acelerómetro.

Si se conoce la dirección de recorrido, es posible deducir la posición actual, por lo que podemos considerar que la navegación inercial es simplemente una forma de “navegación a estima”, siendo muy necesario conocer el punto de partida del dispositivo de navegación inercial, pues éste no puede encontrar la posición inicial en la tierra sin esta información (se puede encontrar la latitud, con dificultad, pero no la longitud). Tomando tres acelerómetros, con su sensor de ejes ortogonales que estén organizarlos de manera que sus ejes están alineados de norte a sur, de este a oeste, y verticalmente, los acelerómetros se suspenden en un conjunto de tres cardanes (junta de cardán o gimbal) que son estabilizadas giroscópicamente para mantener la dirección y la orientación cuando los vehículos realicen maniobras (KING, 1998).

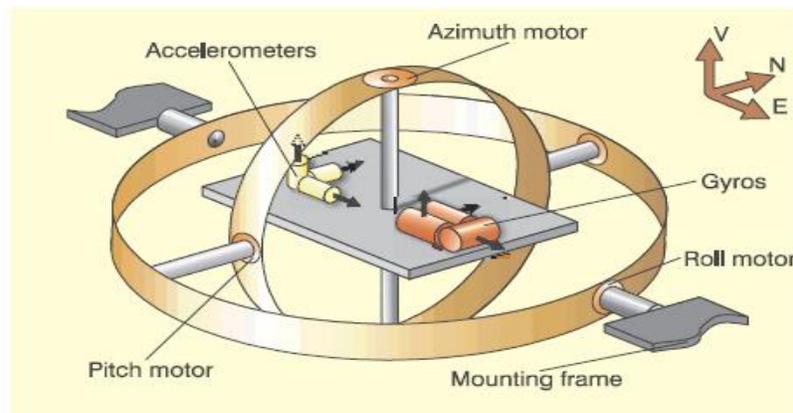


Figura 6 Sistema de estabilización inercial de tres ejes por medio de cardán o 3D-gimbal (KING, 1998).

Los cardanes, como se muestra en la figura 6, tienen un cojinete en cada extremo. Cada uno tiene un motor, construido en torno a uno de los cojinetes, y en el otro extremo un dispositivo de medición de ángulos electromagnética (sincro). De este modo no importa como sean las maniobras del UAV, el cardán (gimbal) mantendrá en su orientación en el espacio inercial (KING, 1998).

Todos estos adelantos permitieron el desarrollo del UAV de bajo costo. Estos incluyen una amplia gama de clases y tamaños, la complejidad de la operación, junto con capacidad de carga útil y rango, también varían. La mayoría de estos vehículos aéreos no tripulados están dirigidos por control remoto por una persona en el suelo, utilizando un enlace de radio para enviar comandos al sistema de control de vuelo de la aeronave. Sin embargo, algunos están configurados para funcionar de forma autónoma, utilizando un ordenador de a bordo con un plan de vuelo preprogramado, junto con un sistema de guiado inercial de un satélite del Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Estos dispositivos ofrecen varias ventajas significativas sobre las plataformas tripuladas. Por ejemplo, pueden operar en ambientes peligrosos (por ejemplo, cerca de la actividad volcánica o en columnas de humo tóxico) sin poner en peligro un piloto humano (Myers, 2014).

Las plataformas aéreas también se utilizan como bancos de pruebas para el desarrollo de nuevos instrumentos. Ellos proporcionan un método económico de sensores de satélites prototipo de pruebas previas al lanzamiento y también para la recogida de los datos empíricos necesarios para desarrollar los algoritmos de recuperación asociados para los nuevos sistemas orbitales. Una vez que un sistema de satélite está en órbita, sensores aerotransportados a menudo se utilizan para llevar a cabo, observaciones simultáneas de alta resolución para la validación de datos y la calibración del instrumento.

2.4 Métodos geofísicos

Desde los primeros trabajos reportados usando técnicas geofísicas en la década de 1970 (Bogoslovsky & Ogilvy, 1977), éstas han sido cada vez más utilizadas, aunque se reportan relativamente pocos trabajos referenciados a la investigación deslizamiento de tierra, se percibe un aumento del interés en estos últimos años. Entre las razones que explican la renuencia a emplear técnicas geofísicas, se puede mencionar la dificultad relativa de la implementación de diseños geofísicos (aunque el gasto es mucho menor que la requerida para la perforación), las limitaciones de la mayoría de los métodos geofísicos antiguos para investigar adecuadamente una estructura 3D, y el problema de la vinculación de los parámetros geofísicos medidos a las propiedades geotécnicas.

Ventajas y limitantes

Por un lado, las ventajas de las técnicas geofísicas son que (1) que son flexibles, relativamente rápido y desplegable en ciertas pendientes, (2) que son no invasivos y pueden dar información sobre la estructura interna de la masa de suelo o roca, y (3) que es posible abarcar un gran volumen para ser investigado. Por otra parte, sus principales inconvenientes son: (1) la resolución disminuye con la profundidad, (2) la no unicidad de la solución para un conjunto de datos y la necesidad resultante de calibración y (3) la información indirecta que con ellos se obtiene (parámetros físicos en lugar de las propiedades geológicas o geotécnicas), y que necesita ser correlacionada posteriormente.

Métodos eléctricos

La prospección geoelectrica es una de las técnicas geofísicas más antiguas y ha ido evolucionando en función de las capacidades de los equipos de adquisición y procesamiento de datos (Rodríguez, 2015) este método basado en resistividad eléctrica es uno de los métodos geofísicos más utilizados en investigación superficial y Se

basa en la medición de los potenciales eléctricos entre un par de electrodos, mientras que la transmisión de una corriente continua entre otro par de electrodos. La técnica se puede utilizar de tres maneras: 1) sondeos eléctricos verticales (SEV), donde los electrodos se mueven de un punto medio; 2) perfilado, donde la matriz se mueve a lo largo de una dirección con separación entre electrodos constante, y (3) Tomografía eléctrica donde se utiliza un gran número de electrodos y combinaciones de pares de electrodos (Figura 7).

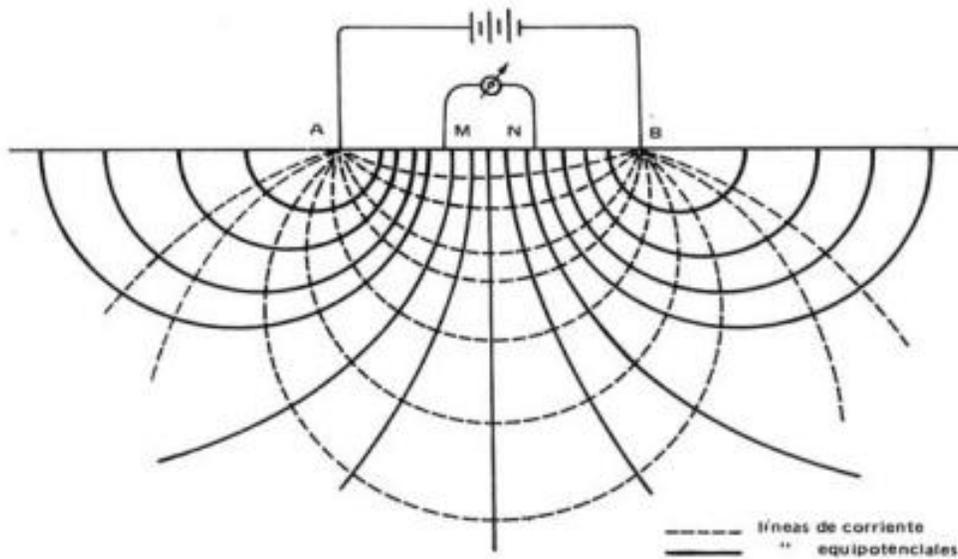


Figura 7 Esquema básico de los métodos de resistividad (Figuroa 1987)

2.4.1 Sondeo eléctrico

Consiste en un conjunto de determinaciones de la resistividad aparente, efectuadas con el mismo tipo de dispositivos lineal y separación creciente entre los electrodos de emisión y recepción. El objetivo de un SEV, es la obtención de un modelo de variación de la resistividad aparente en función de la profundidad, a partir de mediciones realizadas en superficie. La profundidad alcanzada por la corriente aumenta a medida que crece la distancia de apertura del arreglo, aunque generalmente no existe una relación de proporcionalidad entre ambas (Auge, 2008). Distintos materiales ofrecen distintas resistencias al flujo de electrones que pasa a través de ellos. Por ejemplo un alambre de cobre deja pasar más fácilmente la

corriente que un alambre de hierro, es decir, el hierro ofrece una mayor resistencia al flujo de electrones. Esta diferencia es debida a una propiedad intrínseca de cada material que se denomina Resistividad (Figura 8).

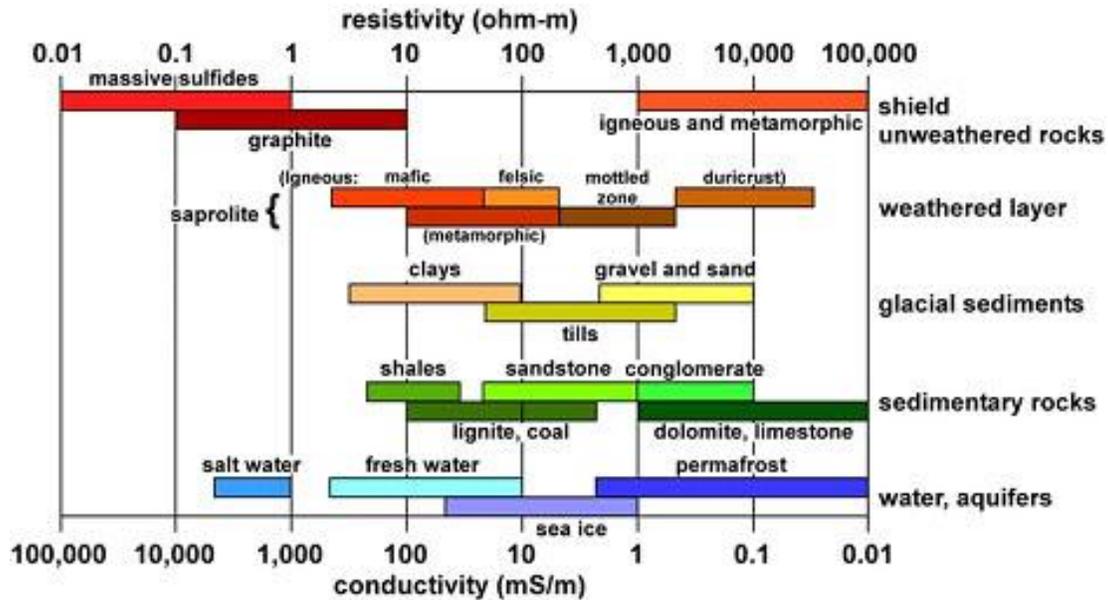


Figura 8 Rangos típicos de resistividad eléctrica de algunos materiales (Palacky, 1988)

Consideraciones del método SEV

Los sondeos eléctricos verticales son rápidos de implementar. No obstante, presenta dos inconvenientes importantes: en primer lugar solamente variaciones verticales de resistividad pueden ser considerados (hipótesis 1 Dimensional), aunque las mediciones deben ser adquiridos a través de una gran distancia para llegar a gran profundidad, y en segundo lugar, es probable que la explicación de los datos pueda tender a gran variedad de soluciones, (no singularidad del problema). Los deslizamientos de tierra por lo general presentan material heterogéneo y las variaciones laterales de parámetros físicos, que hacen difícil la interpretación de SEV. La tomografía eléctrica, que proporciona una imagen de 2D (o 3D) de la resistividad eléctrica, ha tomado progresivamente el relevo de los dos primeros métodos en la última década y se ha convertido en una técnica de obtención de imágenes geofísicas estándar conocido por su sencillez. Sin embargo, la elección

de la configuración de la matriz antes de la adquisición debe ser diseñada con cuidado, dependiendo de la profundidad de penetración deseada, la resolución vertical y lateral y el ruido eléctrico ambiente. También, como se ha discutido antes, la interpretación de las imágenes obtenidas puede ser complejo y debe ser a veces comprobado mediante modelización (Jongmans & Garambois, 2007).

2.4.2 Tomografías

La tomografía tiene por objetivo lo mismo que sus homólogos más clásicos, determinar el valor de la resistividad real del subsuelo a lo largo de un perfil o superficie. Compartiendo los mismos principios que el SEV, se obtienen imágenes resistivas del subsuelo, con la mejora de la obtención de una gran cantidad de medidas, tanto en profundidad como lateralmente, permitiendo además modelado tanto en 2D como 3D (Rodríguez, 2015). Esta técnica de exploración tiene un amplio abanico de aplicaciones: en geología, en geotecnia, en hidrogeología o medioambiente. El procedimiento para obtener los modelos de resistividad del terreno consiste en inyectar una cantidad conocida de corriente al subsuelo y medir la diferencia de potencial entre dos puntos. (Teixidó & Quintana, 2013)

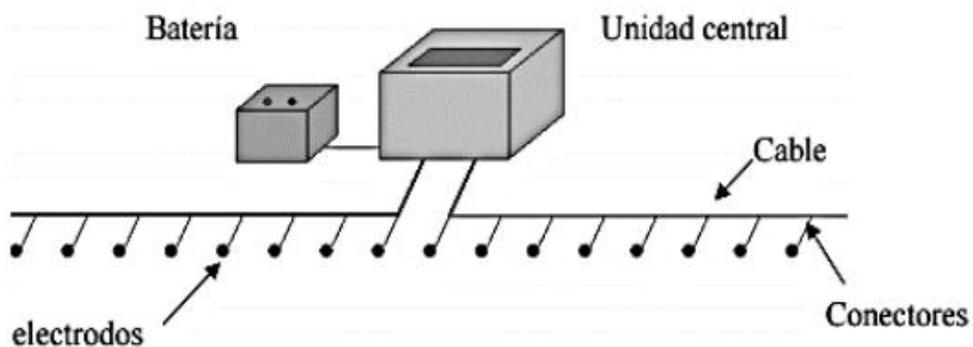


Figura 9 Esquema de la disposición de campo de los aparatos para una medición de tomografía eléctrica convencional (Rodríguez, 2015)

Dado que el subsuelo es heterogéneo, este conjunto de resistividades no corresponde a la distribución real sino que representa una amalgama de ellas; el cálculo para obtener el modelo de resistividades reales del subsuelo se realiza a

través de técnicas de inversión utilizando un sistema iterativo (Teixidó & Quintana, 2013). Entre sus principales ventajas se encuentran podemos destacar: (1) métodos convencionales solo utilizan 4 electrodos, siendo necesario para cada medida variar manualmente sus posiciones en el terreno (proceso relativamente lento y pesado). En cambio el método de Tomografía eléctrica es una técnica multielectrónica, en el que todo el proceso de adquisición de datos está totalmente automatizado, lo que permite poder realizar un gran número de medidas, tanto en profundidad como lateralmente, en un breve espacio de tiempo (del orden de 500 medidas en una hora y media), obteniendo por tanto modelos 2-D de gran resolución. y (2) la ventaja empleo de técnicas numéricas que nos permitirán poder procesar eficazmente todo este gran volumen de información (Rodríguez, 2015).

La resistividad eléctrica es un parámetro que muestra una amplia gama de valores (Telford, 1990) sensible a varios factores como la naturaleza del material (especialmente porcentaje de arcilla), el contenido de agua y su conductividad, así como la erosión de las rocas y la fracturación. Esto explica por qué este método ha sido el más solicitado la investigación deslizamiento de tierra .El principal objetivo de los métodos de resistividad de prospección para la investigación deslizamiento de tierra es la ubicación de la superficie de ruptura.

2.5 Información geológica

El enfoque geológico de investigación se basa principalmente en la obtención de datos básicos para la preparación de mapas geológicos, esta información se obtiene por los medios tradicionales que consisten en la observación en campo, siempre buscando que el estudio geológico permita la producción de un mapa que represente de manera adecuada los tipos de roca, sus características principales y su disposición general dentro del área de estudio Los mapas son una herramienta útil y conveniente para la presentación de información sobre los peligros de deslizamiento, pueden presentar muchos tipos y combinaciones de información en diferentes niveles de detalle (Geological Society of London, 2002).

Comúnmente, hay un enfoque de tres etapas para la cartografía del peligro de deslizamiento. La primera etapa es la cartografía regional o de reconocimiento, que sintetiza los datos disponibles e identifica las áreas problemáticas generales. La siguiente etapa es la cartografía a nivel de comunidad, un programa de mapeo superficial y subsuperficial más detallado en las áreas problemáticas complejas. Por último, se preparan mapas a gran escala específicos de la zona de estudio. Si los recursos son limitados, puede ser más prudente pasar por alto mapeo regional y concentrarse en unas pocas áreas de interés conocidas.

Mapeo regional

Mapeo regional o de reconocimiento suministra datos básicos para la planificación regional, proporcionando información de base para la realización de estudios más detallados en la comunidad y los niveles específicos del sitio y para el establecimiento de prioridades para la futura asignación.

Mapeo a nivel local

Este tipo de asignación identifica tanto el potencial tridimensional de tierra deslizante y considera sus causas. La orientación relativa a la utilización del suelo, zonificación, y la construcción, y las recomendaciones para futuras investigaciones específicas del lugar también se hacen en esta etapa. Las investigaciones deben incluir trabajos de exploración del subsuelo con el fin de producir un mapa con secciones transversales. Escalas de mapa a este nivel generalmente varían de 1: 1.000 a 1: 10.000.

Mapeo de sitio específico

Se refiere a la identificación, análisis y solución de los problemas reales de esos lugares, a menudo se presenta en el tamaño de un lote residencial. Por lo general, se lleva a cabo por consultores privados para los propietarios que proponen el

desarrollo del sitio y por lo general implica un programa de perforación con el registro detallado del fondo del pozo, toma de muestras y análisis de laboratorio a fin de obtener la información necesaria para el diseño y la construcción. Escala de mapa varían, pero generalmente son alrededor de 1: 600 o 25 mm (1 pulgada) a 16 metros (50 pies) (Highland & Bobrowsky, 2008).

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

3.1 Adquisición de información de campo

El procedimiento para adquirir la información en campo se desarrolló como se muestra en la figura 10.

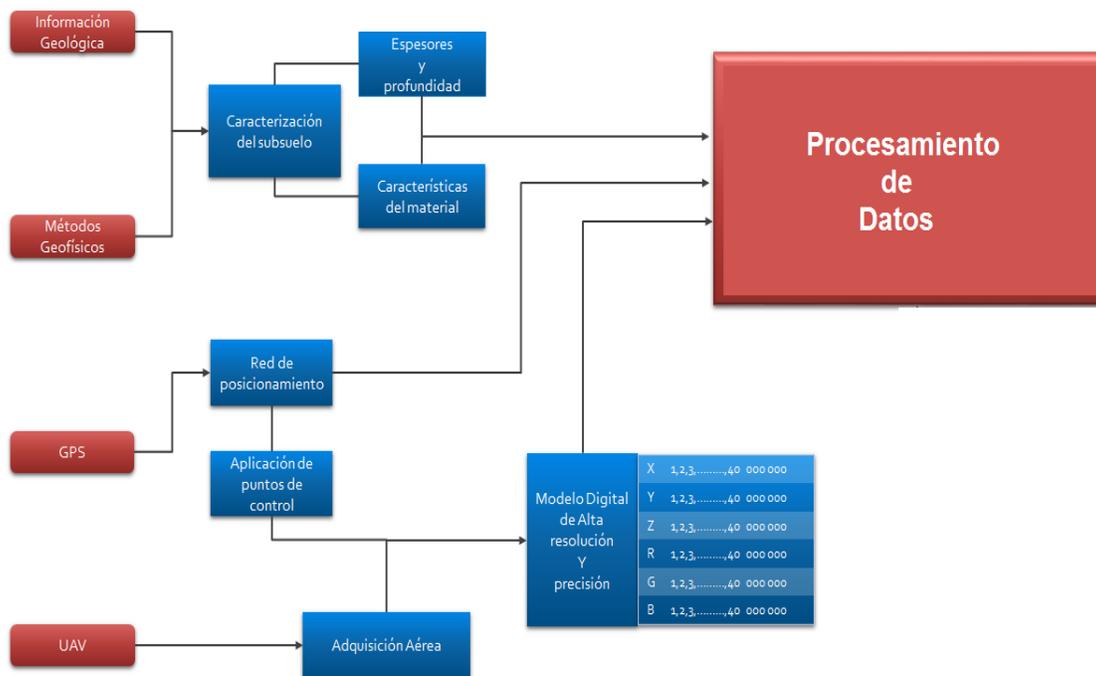


Figura 10 Procedimiento de recolección de información

3.1.1 Mediciones GPS

El primer paso en la metodología propuesta está relacionado con la necesidad de obtener información precisa sobre la geometría del deslizamiento, con el fin de conocer el estado actual del fenómeno respecto de su distribución espacial. Tras haber realizado inspecciones en el área de estudio previas al inicio del levantamiento topográfico fue posible observar que existe una gran variabilidad en la forma que el deslizamiento evoluciona en diferentes partes del área, por lo que el criterio que se debía elegir para el levantamiento de datos topográficos debía ser

capaz de cubrir todas las zonas de manera informe, y así evitar zonas con vacíos de información. Sin embargo durante dichas evaluaciones previas otro aspecto muy importante, y en apariencia opuesto al anterior quedo de manifiesto, y era el hecho de que el levantamiento de la información debía ser eficiente en cuestiones de tiempo.

Otro aspecto importante era además la elección del tamaño de muestra, ya que era necesario contar con un juego de datos significativo en cuestiones de área censada y con las muestras suficientes para las inferencias estadísticas que pudieran surgir, y finalmente y no menos importante era la viabilidad en el uso del equipo utilizado, pues este aspecto introduce nuevas variables como los son la duración de la batería, tiempo de medición, ubicación del punto de referencia sobre el cual la base GPS se estaría georreferenciando.

Tomando en cuenta todo lo anterior se decide diseñar un plan de muestreo que consiste en red de puntos control ubicados a una distancia de 100 metros entre sí, sí, éste distanciamiento entre puntos se eligió así, después de haber recorrido a pie la zona y determinar los tiempos tomando en cuenta lo siguiente:

- Tiempo de transcurrido en desplazarse 100 metros: de 8 a 15 minutos dependiendo de la topografía (11.5 minutos tiempo promedio).
- Duración de funcionamiento óptimo del equipo: 5 horas aproximadamente (duración aproximada de la batería de la batería del radio transmisor RTK 300 minutos).
- Tiempo de medición planeado en cada punto: al menos 30 segundos (.5 minutos).

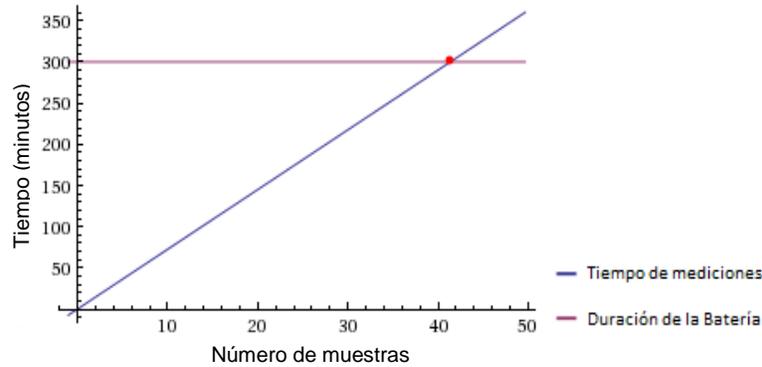


Figura 11 Evaluación del tiempo de medición vs duración de la batería.

Alrededor de 40 puntos de control podrían ser medidos en un solo levantamiento, puesto que se habían considerado periodos de 3 días por campaña de medición, se podrían levantar 120 teóricamente, pero tomando en cuenta que a nivel operativo contratiempos suelen ocurrir, se acordó la cantidad menor de control para que los mismos pudieran ser cubiertos en 3 sesiones considerando las posibles contingencias (Figura 11). En las evaluaciones previas a los trabajos se determinó mediante observaciones en campo la geometría del deslizamiento, sobre la cual colocar la red de puntos de control de manera interna, sin embargo se consideró también incluir puntos fuera de los límites observados, esto para tener más certeza sobre el verdadero alcance del movimiento observable superficialmente.

Bajo todo lo anterior se llegó al diseño final de la campaña de muestreo que consistió en una red de 100 puntos de control espaciados 100 metros entre sí, cubriendo el interior del área de estudio y parte de la zona que se consideró, estaba fuera de la zona inestable.

Una vez superada la etapa de planeación viene la etapa de implementación, para esto es necesario fijar un punto de control principal, este punto es sobre el cual se instalara la base del GPS y debe cumplir con una alta precisión, dado que no existían puntos de la red geodésica nacional activa lo suficientemente cercanos, se

tuvo que crear uno propio ligado a un punto de referencia horizontal de GPS y a un banco de nivel topográfico de INEGI en la cercanías de la zona de estudio.

Los datos del punto de referencia horizontal se describen en la figura 12.

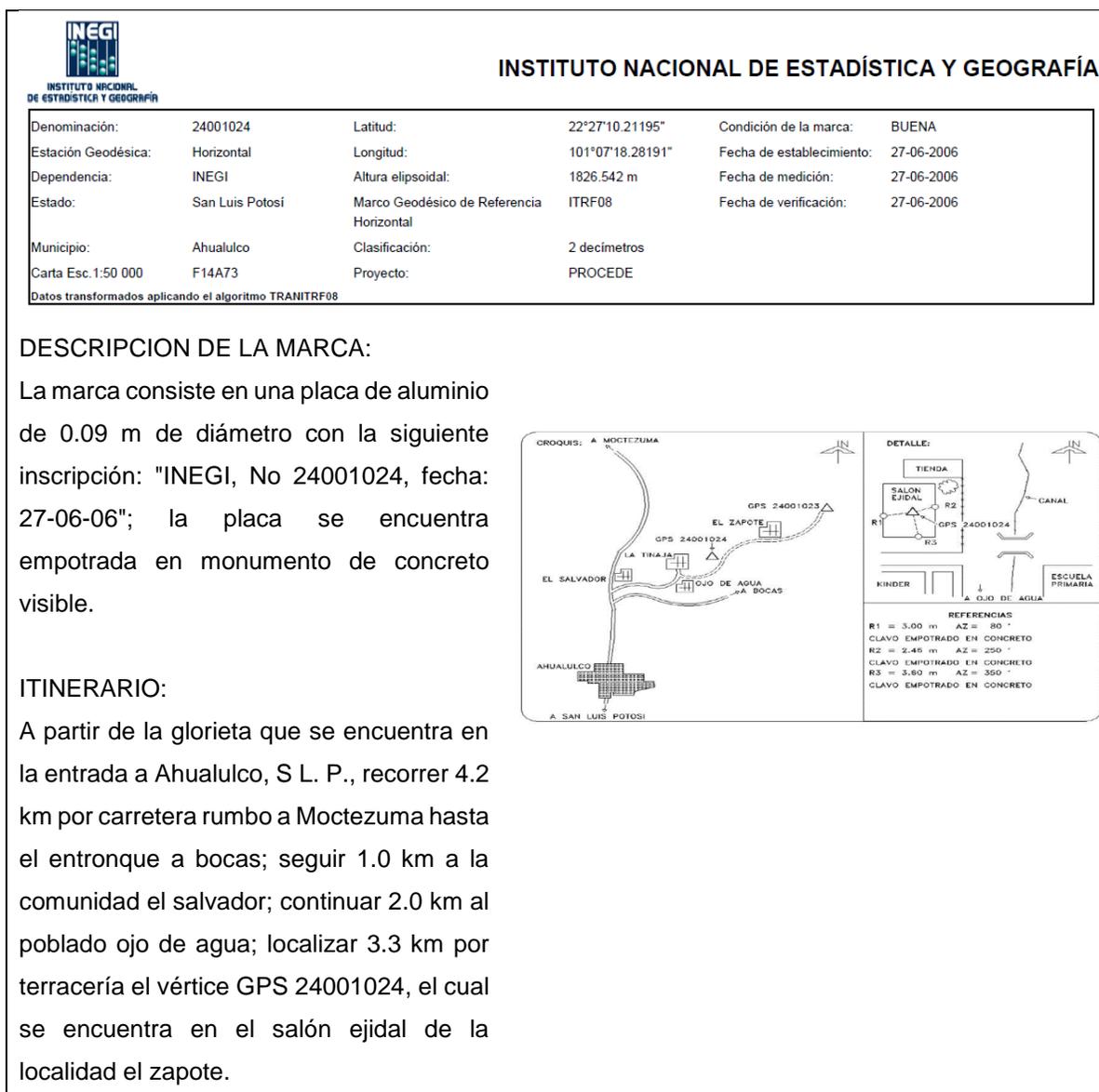


Figura 12 Punto de referencia horizontal.

El segundo es un punto de referencia vertical, también conocido como banco de nivel como se ilustra en la figura 13.



INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA

Denominación:	997	Latitud:	22°27'08.99779"	Condición de la marca:	BUENA
Estación Geodésica:	Vertical (BN)	Longitud:	101°08'52.00772"	Fecha de establecimiento:	
Dependencia:	INEGI	Altura Ortométrica:	1886.5500 m	Fecha de medición:	01-01-1969
Estado:	San Luis Potosí	Marco Geodésico de Referencia Vertical:	NAVD29	Fecha de verificación:	01-01-1975
Municipio:	Ahualulco	Clasificación:	Segundo Orden, Clase II Fecha de validación:		
Carta Esc. 1:50 000:	F14A73	Proyecto:	CHARCAS-AHUALULCO		

** Coordenadas aproximadas

DESCRIPCION DE LA MARCA:
 La marca consiste en una placa de aluminio de 9 cm de diámetro con la siguiente inscripción "SECRETARIA DE LA PRESIDENCIA CETENAL BNT-997, diciembre de 1969", empotrada en alcantarilla

ITINERARIO:
 EL BNT-997 se encuentra empotrada en la dala oeste de una alcantarilla localizada a 65 m al sur del entronque del camino que comunica al rancho yerbabuena, San Luis Potosí. El entronque mencionado, se encuentra al norte de Ahualulco, San Luis Potosí, a 6 km



Figura 13 Banco de nivel utilizado como referencia en la componente vertical.

Una vez proyectados los puntos de referencia hacia la nueva posición, se procedió a realizar una medición estática durante algunas horas para aumentar la precisión, una vez obtenida la coordenada exacta de la que sería la nueva posición de referencia de la estación base, se procedió a la construcción de un monumento de concreto, con una placa de aluminio y una maraca circular central de forma esférica para referencia.

Una vez realizado este procedimiento se procede a ubicar las posiciones de los puntos de control sobre el terreno, ya que para que puedan ser medidos en diferentes ocasiones, estos deben de estar instalados en lugares estables y

fácilmente identificables para asegurar la precisión y la rapidez de toma de los datos. Puesto que construir un monumento de concreto para cada uno de los puntos sería una tarea imposible, se decide utilizar las rocas solidas como monumento natural, y la referencia sobre la cual se colocaría el GPS sería la cabeza de un clavo de concreto firmemente fijado a la roca, además de estar marcado con pintura para que encontrarlo sea bastante más rápido (Figura 14).



Figura 14 Ubicación y marcado de los puntos de control

El levantamiento se llevó a cabo por medio de un equipo GPS diferencial de una banda para recabar información topográfica en la zona de estudio. El equipo consta de una estación que hace de receptora de GPS, un transmisor de radio para la corrección inferencial en tiempo real y un dispositivo GPS móvil asociado y sus características principales se describen en la Tabla 2:

Tabla 2 Características principales del equipo Trimble R4 GNSS

Tipo de dispositivo	TRIMBLE R4 GNSS
Red satelital	GLONASS
Banda	L1
Rango de banda	1592.9525 MHz / 1610.485 MHz
Rendimiento del Posicionamiento	Posicionamiento GNSS de corrección diferencial Horizontal. 0,25 m + 1 ppm (RMS) Vertical. 0,50 m + 1 ppm (RMS)
Medición cinemática en Tiempo Real	Horizontal. 8 mm + 1 ppm (RMS) Vertical. 15 mm + 1 ppm (RMS)

Con lo anterior quedo finalmente establecida la red de puntos de control, con cada punto referenciado y marcado, con lo que se concluyó el primer levantamiento de puntos de control (Figura 15).

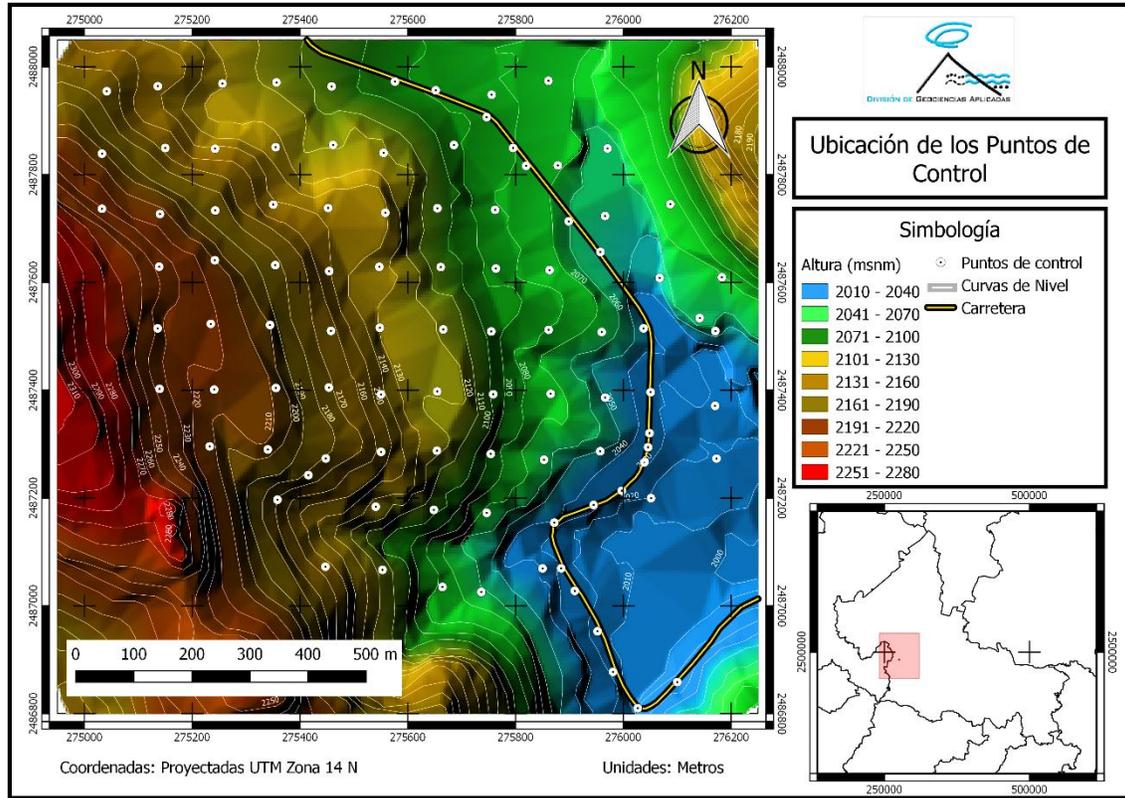


Figura 15 Implementación de la red de puntos de control GPS.

Los levantamientos posteriores seguirían la misma metodología, habiéndose planeado 3 en total con espacios de tres meses entre los mismos.

Quedando la calendarización de la siguiente manera:

- Primer levantamiento – Abril 2015
- Segundo levantamiento - Junio 2015
- Tercer levantamiento – Agosto 2015

Adicionalmente un cuarto levantamiento sería realizado para ajustar la varianza en los datos recabados. Las razones para haber muestreado en una ocasión se debió al comportamiento variable en la posición de la mayoría de los puntos muestreados.

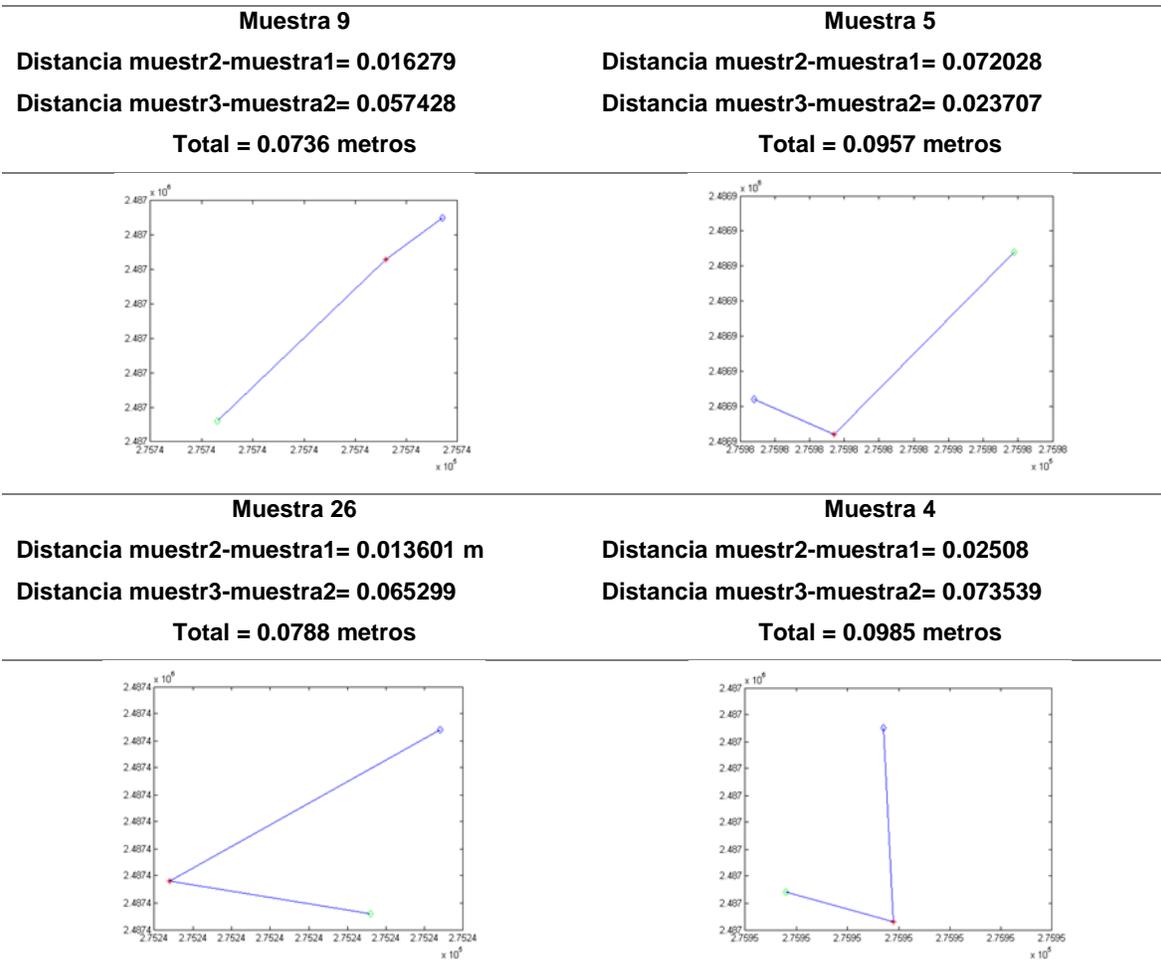


Figura 16 Resultados preliminares de los primeros tres levantamientos de GPS.

En la figura 16 se muestra el comportamiento en las posiciones relativas de los puntos respecto de cada levantamiento de datos, así pues cada imagen corresponde a un mismo punto de control, y los puntos internos representan a cada punto de muestreo y su recorrido se ilustra por medio de un vector en color azul. Como es posible observar existe una variación entre muestreos, si bien la diferencia entre las distancias pudiera ser hasta cierto punto aceptable, los cambios en la dirección generan incertidumbre respecto de la confiabilidad de los datos obtenidos. Una posible explicación a este comportamiento se puede dar por diferentes razones: la interferencia causada por la vegetación, el rebote de la señal de radio en la topografía escarpada, el tiempo de medición y la configuración de los satélites.

Para descartar posibles anomalías causadas por el equipo, o por la técnica de medición, se decide realizar un cuarto muestreo para averiguar la causa de las variaciones, pero en esta ocasión aumentando el tiempo de medición a 2 minutos, esto nos permite tener una mayor certidumbre en la calidad de la medición, para poder comparar con las muestras tomadas anteriormente.

3.1.2 Imágenes Adquiridas por Drone multirotor

Con la finalidad de obtener un conjunto adecuado de datos geoespaciales, técnicas de percepción remota se consideraron como complemento de las aplicadas mediante GPS, como se mencionó anteriormente la información disponible mediante imágenes satelitales a través de medios tradicionales era inadecuada dada la escala y precisión que se requería, por consiguiente se consideró la opción de adquirir esa información por cuenta propia utilizando un UAV (vehículo aéreo no tripulado) con el cual lograr capturar imágenes aéreas de la zona de estudio que cumplieran con características requeridas para el estudio.

El dispositivo elegido es un multi-rotor liviano de 4 hélices con una cámara ultraliviana montada sobre un sistema giroscópico de estatización que permite mantener la imagen estable independientemente de los movimientos propios del vuelo y las influencias externas del viento, las características principales del equipo se describen en la figura 17.

Tipo de dispositivo	PHANTOM 2 VISION V3.0
Precisión en el Desplazamiento GPS	Vertical: 0.8 m Horizontal: 2.5 m
Estabilizador giroscópico de cámara (Gimbal)	Precisión en el control. $\pm 0.03^\circ$ Máxima velocidad Angular. (cabeceo) $90^\circ/\text{seg}$
Cámara	Tamaño del sensor. 1/2.3 Píxeles efectivos. 14 Megapíxeles Resolución. 4384 x 3288 Campo de visión. $110^\circ/85^\circ$
Características del Multi-rotor	Numero de rotores. 4 Peso total. 1242g Velocidad máxima. 15m/seg Velocidad máxima ascenso.6m/seg Velocidad máxima descenso. 3m/seg Tiempo de vuelo. 15-20 minutos*
	

Figura 17 Detalle Del modelo de UAV utilizado

Para la estrategia de vuelo que se implementó se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones (Figura 18):

- Orientación de las imágenes
- Numero de tomas
- Traslape
- Área máxima de transmisión-recepción
- Duración de la batería
- Topografía

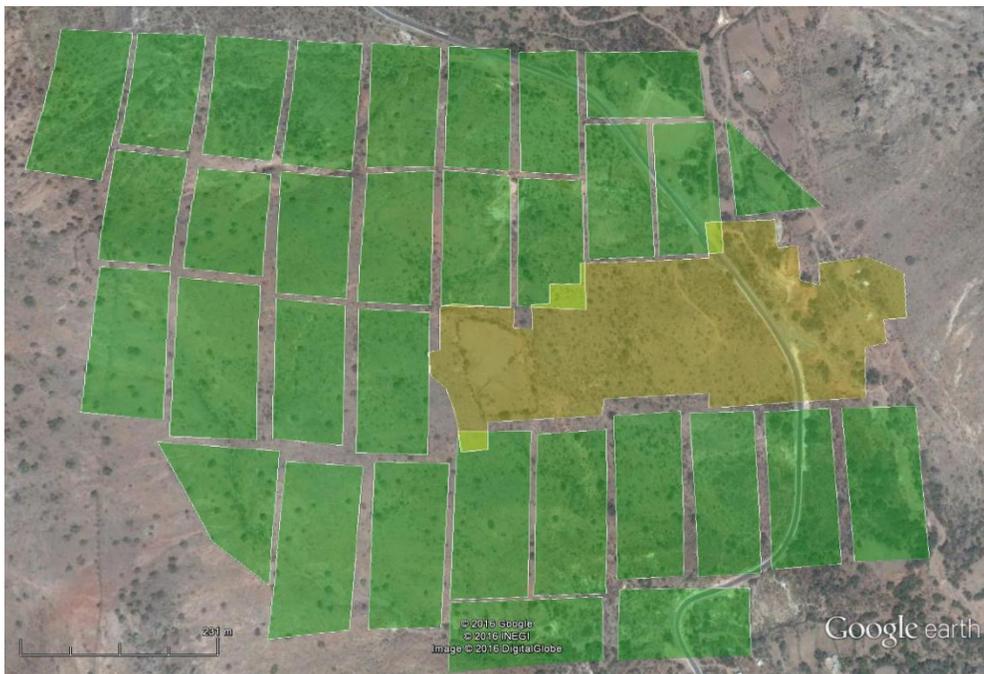


Figura 18 Zona de estudio dividida en áreas de vuelo

Para que el resultado final posea la suficiente exactitud es necesario que las áreas que se han sobrevolado tengan la correcta georreferenciación, para esto nos valemos de un objetivo especialmente diseñado, que consiste en un cuadrado de 40x40 centímetros debidamente señalado y con patrones geométricos contrastantes para ser rápidamente identificable, el cual se coloca sobre los puntos de control GPS (Figura 19), gracias a la alta resolución de las imágenes, se pueden obtener precisiones centimétrica en la referenciación de alrededor de 3 cm (el diámetro de una moneda).

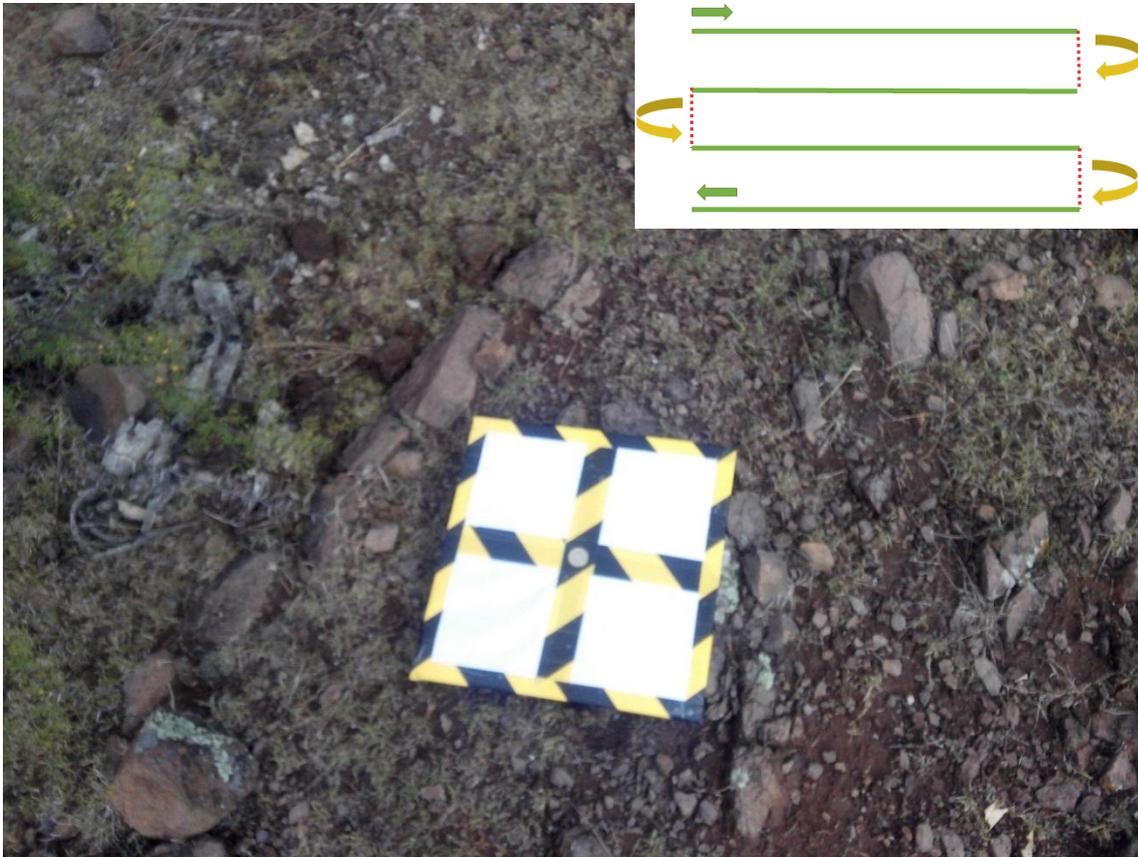


Figura 19 Objetivo para referenciar y trayectorias de vuelo secciones de vuelo.

3.1.3 Mediciones geofísicas, aplicación y consideraciones

Los métodos geofísicos lograron aplicarse en la zona de estudio para conocer las características del subsuelo, dada la topografía accidentada los lugares idóneos para aplicar sondeos eléctricos verticales eran difíciles de encontrar, además que se buscaba que tuvieran las condiciones para poder relacionar ambos resultados de manera adecuada. Así pues se eligieron dos lugares para implementar el método (Figura 20).

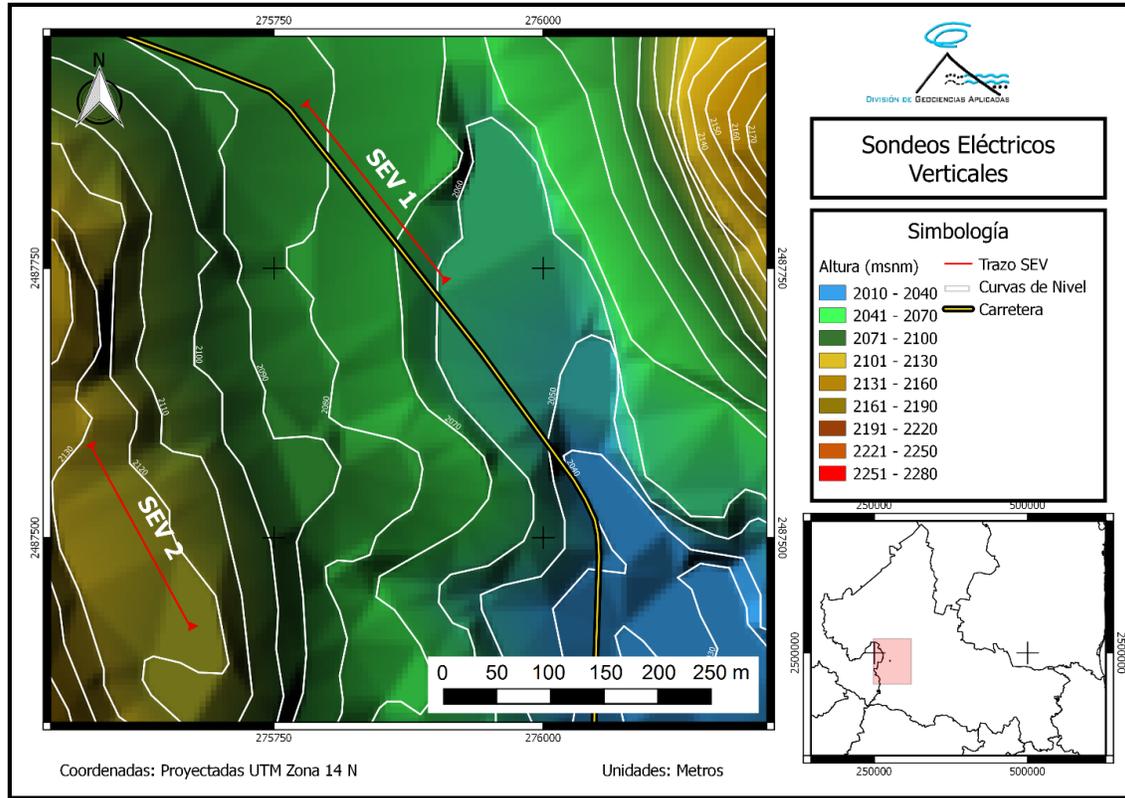


Figura 20 Mapa de ubicación de los SEV's implementados

La apertura ($AB/2$) fue de 100 metros, las profundidades obtenidas fueron de 35 metros, la distancia entre los sondeos fue de alrededor de 400 metros y la diferencia en altura de alrededor de 50 metros, con esto se busca que la diferencia entre alturas sea similar a la profundidad censada, para poder relacionar ambos modelos de manera más adecuada. Una vez hecho el tratamiento de la información logramos obtener un modelo de capas basado en la resistividad de los materiales (Figura 21).

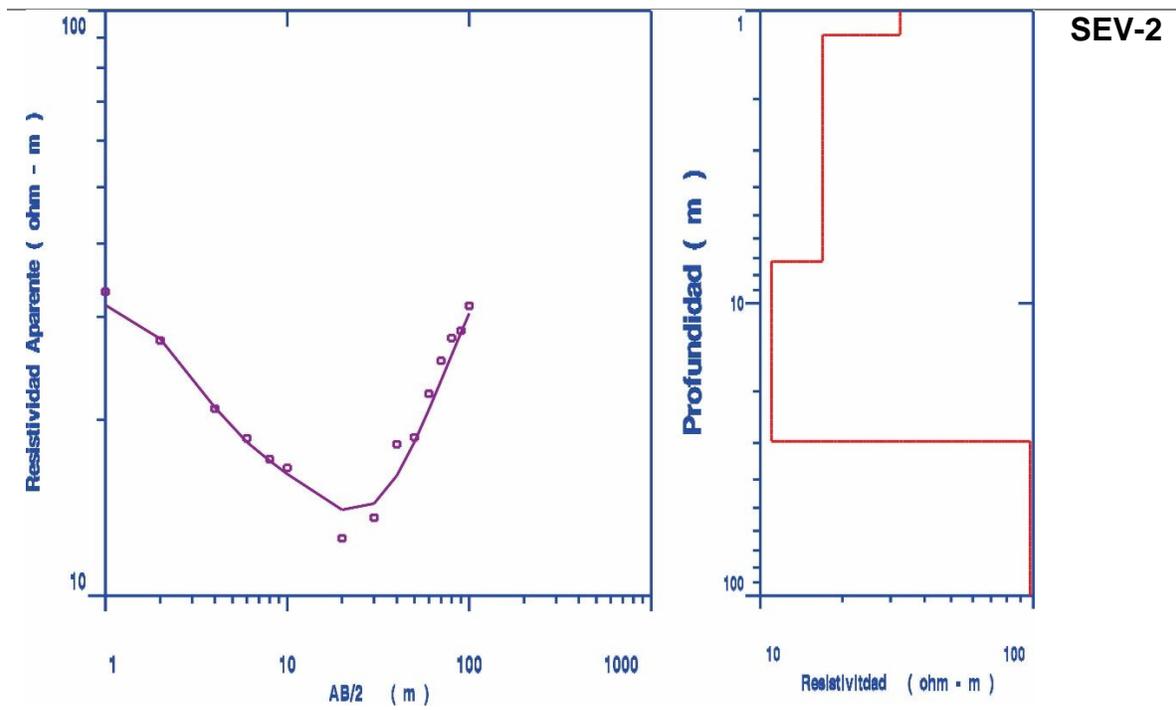
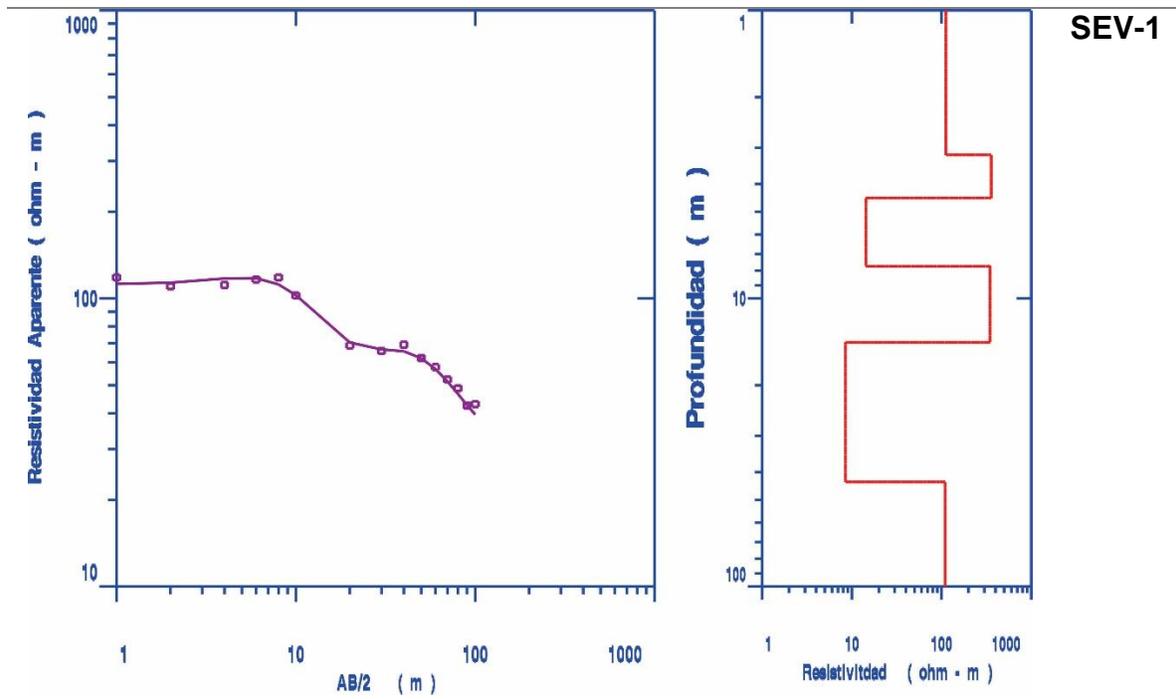


Figura 21 Modelo de capas de los SEV 1 y 2

De igual manera se implementaron tomografías eléctricas, en una zona intermedia entre los SEV, con el fin de obtener información más a detalle de la parte superficial del terreno, más específicamente, obtener información sobre las fracturas y cavidades encontradas en el área de estudio (Figura 22).

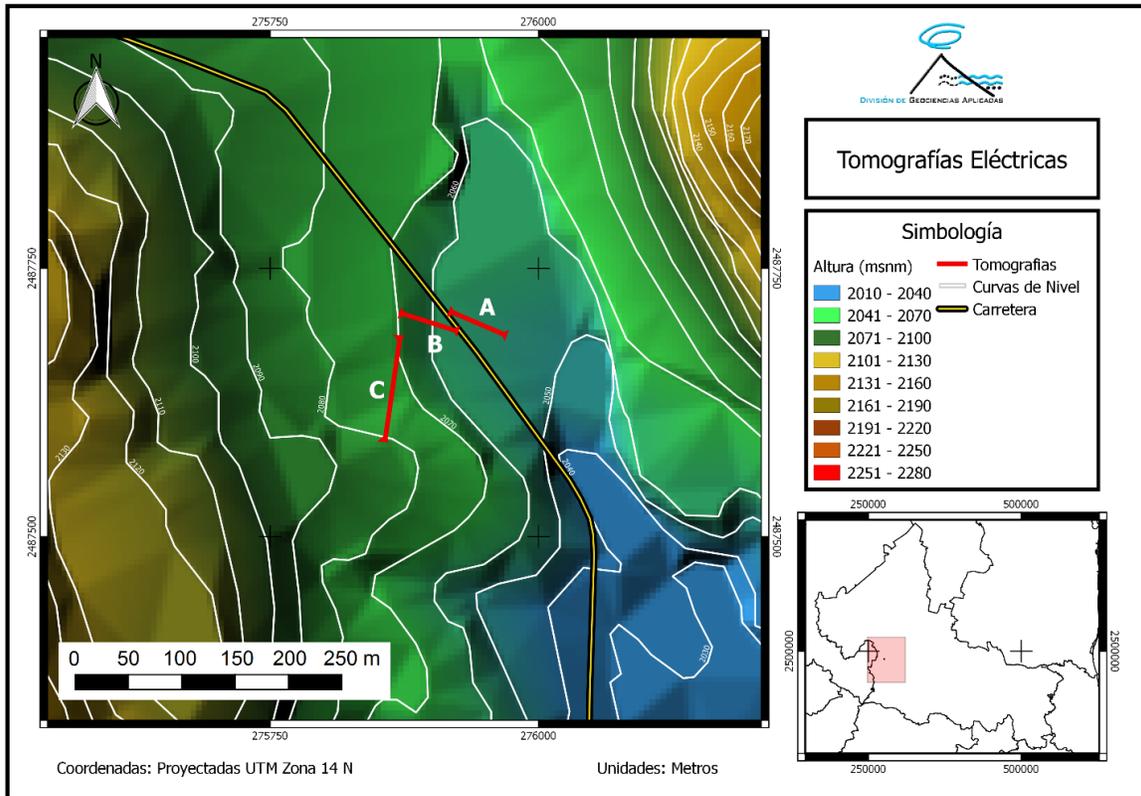


Figura 22 Mapa de Tomografías Eléctricas.

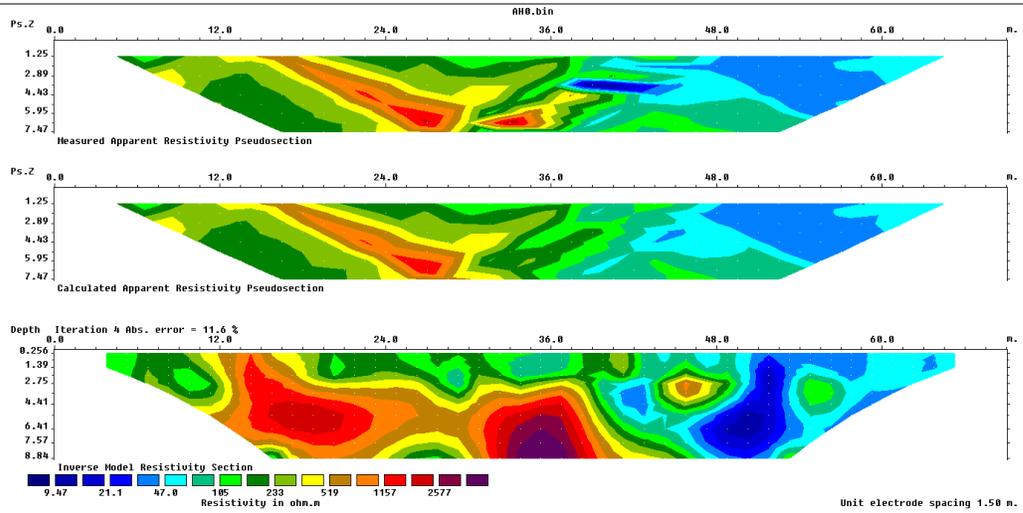
Las secciones obtenidas correspondían a un área con importante incidencia de fracturas y cavidades, algunas de importante tamaño que contribuyeron a dificultar la implementación, sin embargo se logró obtener la información que se buscaba. Los resultados de ambos métodos se analizan en la sección 3.2.

En las figuras 23 a, se muestra en la parte inferior un modelo de resistividad con resistividades de $>2500 \text{ ohm} \cdot \text{m}$ que se puede interpretar como una cavidad. De presentan valores menores a $10 \text{ ohm} \cdot \text{m}$, que forman la matriz que soporta los bloques del material de arrastre. Algunos polígonos de resistividades de 100 a 500

ohm*m, son asociados a bloques de riolita inmersos en la matriz del material de arrastre. La presencia de estos bloques en una matriz areno-limosa puede observarse en la figura 23b. La tomografía representada en la figura 23c, muestra claramente una fisura con resistividades altas debido a la presencia de cavidades.

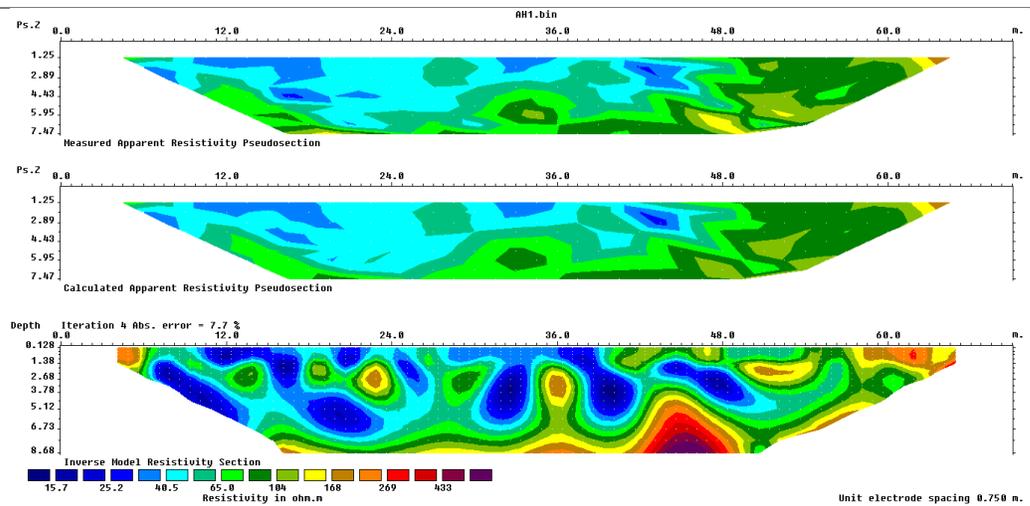
Tomografía

A



Tomografía

B



Tomografía

C

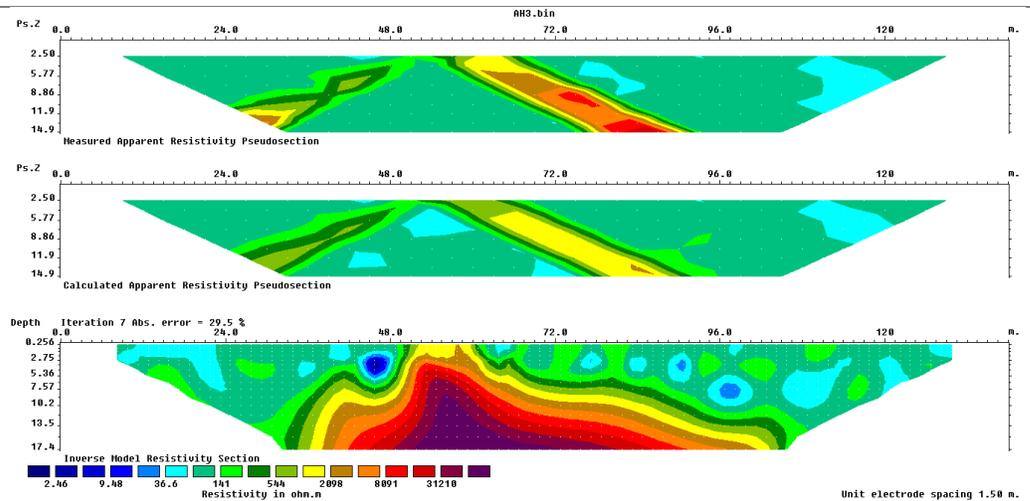


Figura 23 Resultados de Tomografías Eléctricas.

3.1.4 Geología

Para conocer las características geológicas del área de estudio, la metodología que se aplicó fue la más tradicional, que consiste esencialmente en recorrer el área de estudio, y registrar las observaciones que se hagan.

El primer paso fue identificar la geología de la zona mediante mapas geológicos, por lo que se hizo uso de la carta geológico-minera de Ahualulco, y bajo el código F14-A73, esta carta la proporciona el Servicio Geológico Mexicano (SGM), y es la que otorga mayor información de la zona. Sin embargo esta carta posee una escala inadecuada a las necesidades del estudio, por lo que para obtener información adecuada la geología debía llevarse a cabo mediante trabajo de campo.

El levantamiento geológico en su primera etapa consistió en recorrer la zona de estudio de manera exhaustiva con el fin de encontrar e identificar las diferentes unidades de rocas que se encuentran en el área, así como identificar sus contactos y realizar un mapeo lo más detallado posible, auxiliados de un mapa cartográfico con curvas de nivel a intervalos de 10 metros, y con navegador GPS se recorrió la zona buscando los diferentes tipos de rocas y mapeando los contactos que se iban encontrando y se lograron identificar 4 tipos de rocas diferentes que afloran en la zona, se tomaron las muestras de cada una de ellas para su mejor descripción con ayuda del microscopio.

Con los datos recabados fue posible la elaboración de un mapa geológico a detalle identificando los contactos y el tipo de roca (Figura 24).

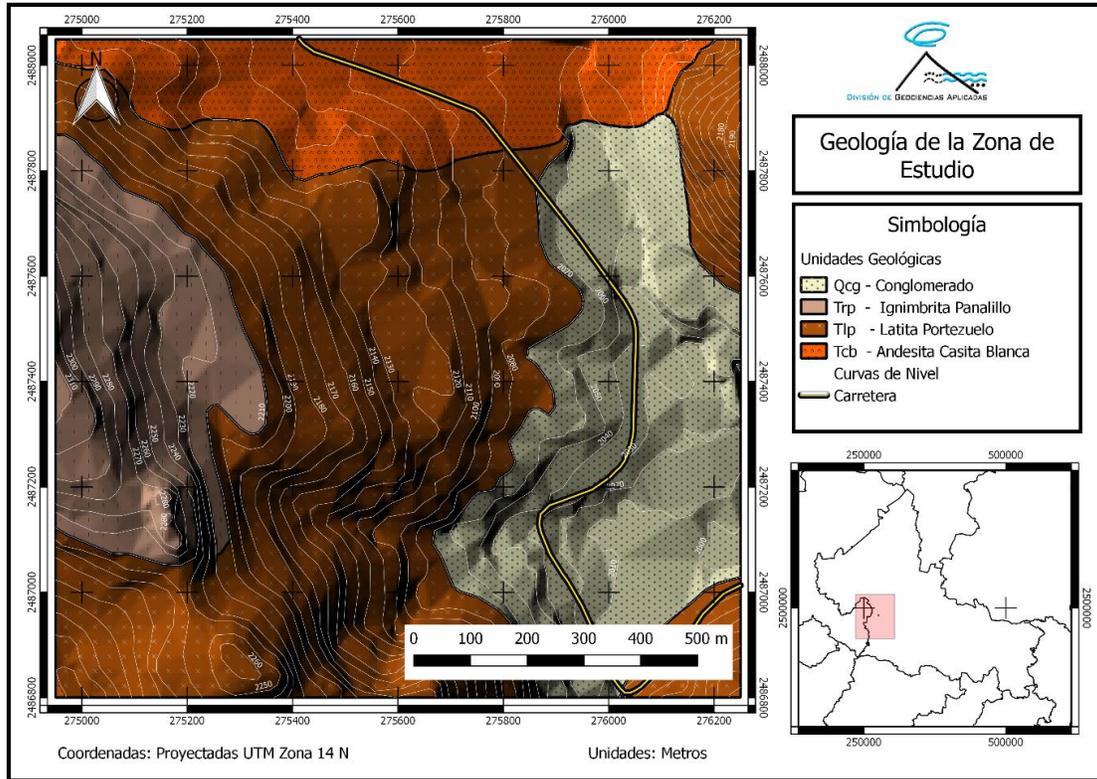
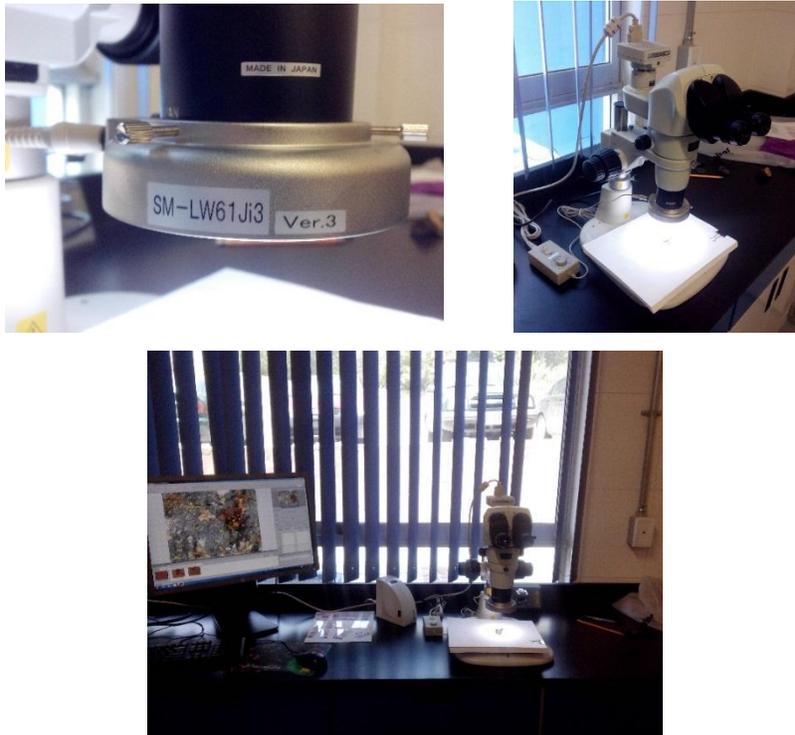


Figura 24 Mapa geológico a partir de las observaciones en campo.

Enseguida se procedió al análisis de las muestras se procedió al análisis de las muestras de mano, el equipo utilizado fue un microscopio binocular (Figura 25).

NIKON SMZ 800N



Tipo de Luz	Natural
Objetivo	1x

Figura 25 Detalle del microscopio utilizado para el análisis.

Andesita Casita Blanca: Es la roca más antigua de la secuencia volcánica de la sierra de Ahualulco, estas están formadas por derrames de lavas que descansan sobre la Formación Caracol, se caracterizan por tener color gris oscuro (figura 26), en muestras de mano vistas al microscopio, se observa una matriz afanítica de textura porfídica con 10-15% cristales subhedrales de color rojizo (posible hematita) aproximadamente 2% de fenocristales de anhedral a subhedrales de piroxeno, cristales anhedral de color blanco lechoso de plagioclasa, alrededor de un 40% de feldespatos con forma anhedral, el grado de cristalinidad es de tipo holocristalina y escaso contenido de cuarzo (menor al 2%).



Figura 26 Vista de andesita Casita Blanca en microscopio (Luz: natural, Objetivo: 1X, Escala: 1000 μ m).

Su espesor reportado es de aproximadamente 50 metros, hacia su cima, los afloramientos de andesita contienen abundantes vesículas principalmente rellenas de calcita, sobre la andesita Casita Blanca se encuentran la latita portezuelo (Labarthe et al., 1995).

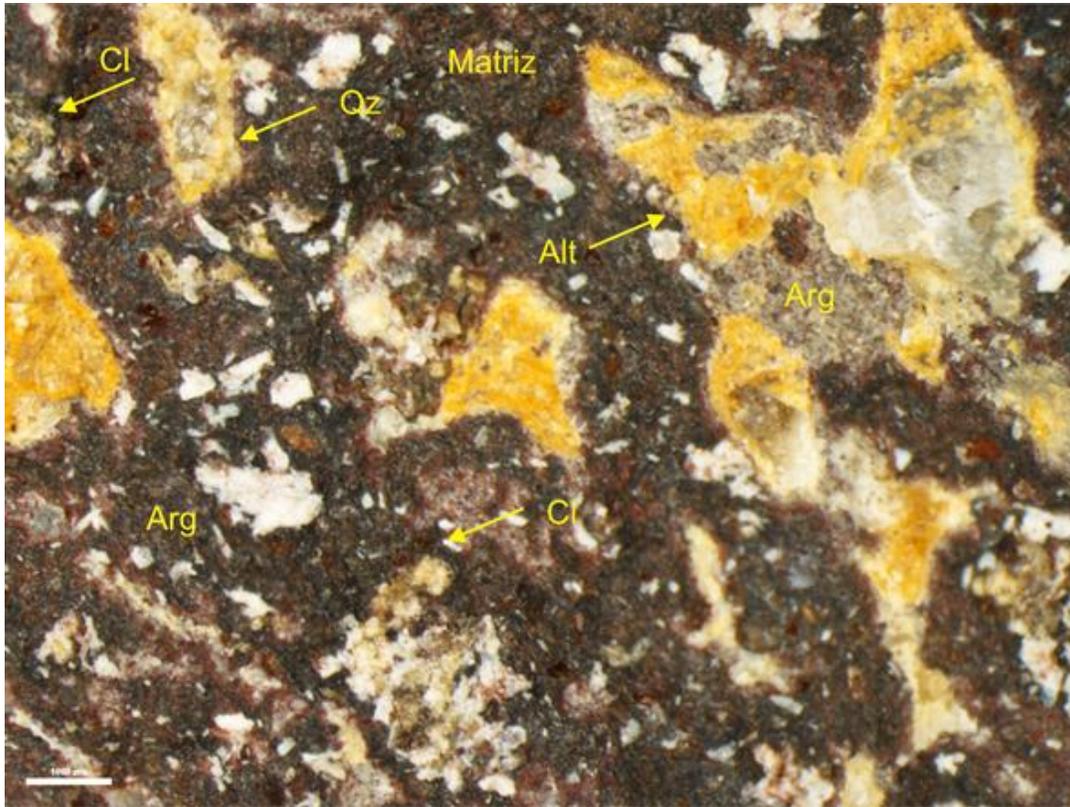


Figura 27 Vista de andesita Casita Blanca (alterada) en microscopio (Luz: natural, Objetivo: 1X, Escala: 1000 μ m).

La parte superior del estrato de los afloramientos de andesita (figura 27), presenta textura porfídica, con evidencias de alteración hidrotermal y muy probablemente por cloro, además de zonas propensas a la formación de arcillas (argilización de minerales).

El espesor de esta unidad en la región se estima en el orden de los 50 metros, hacia su cima , los afloramientos de andesita contienen abundantes vesículas principalmente rellenas de calcita , sobre la andesita Casita Blanca se encuentran la Latita Portezuelo (Labarthe Hernández et al., 1995).

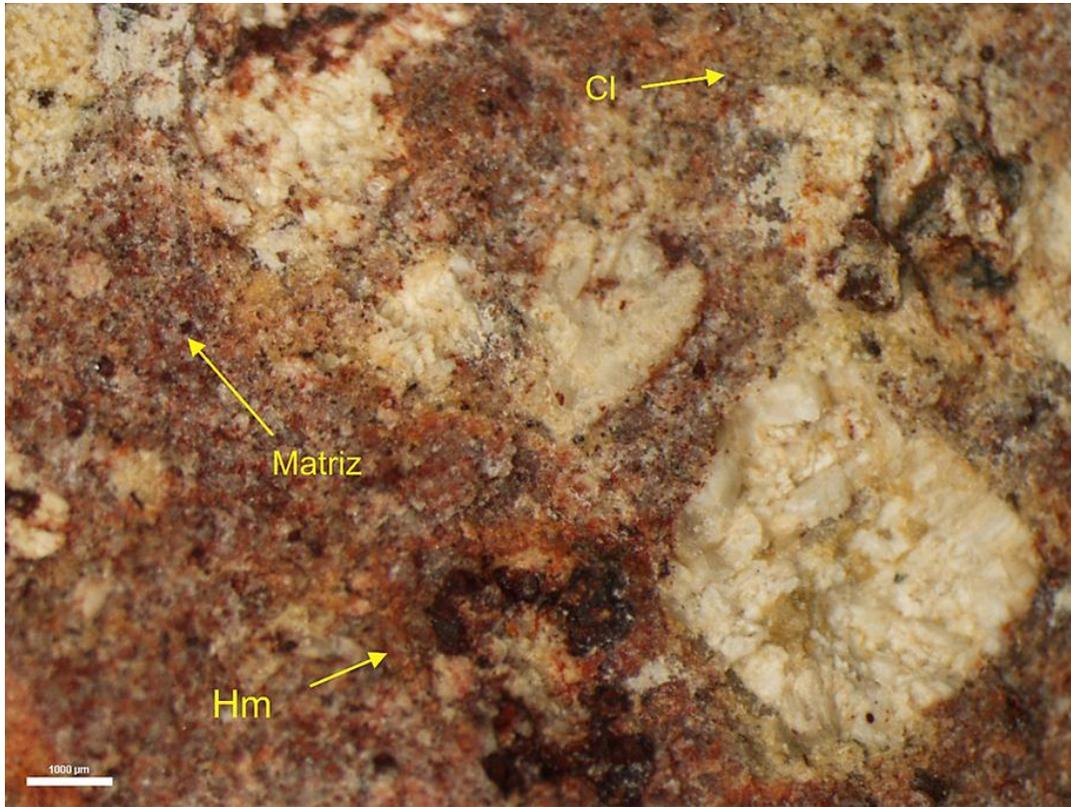


Figura 28 Vista de Latita Portezuelo microscopio (Luz: natural, Objetivo: 1X, Escala: 1000 µm).

Latita Portezuelo: Latita Portezuelo: En muestras de mano se observó al microscopio (Figura 28) que está compuesta por lava de color rojizo intermedio, con textura porfídica holocristalina, contienen 5 a 10% de fenocristales subhedrales de color rojo oscuro posiblemente hemátita, además de un 30% de cristales subhedrales de color blanco lechoso (feldespato-sanidino), la matriz es hipocristalina (desvitrificada cuarzosa), con 1 a 3% de piroxeno rojizo oscuro, además se observa alteración clorítica(Cl), este material muestra además se muestra propenso a la formación de arcillas.

El espesor estimado es de 200 metros pudiendo alcanzar 450 a 500 metros en otras regiones(Labarthe Hernández et al., 1995), y las características de sus afloramientos se cree representa una serie de domos volcánicos.

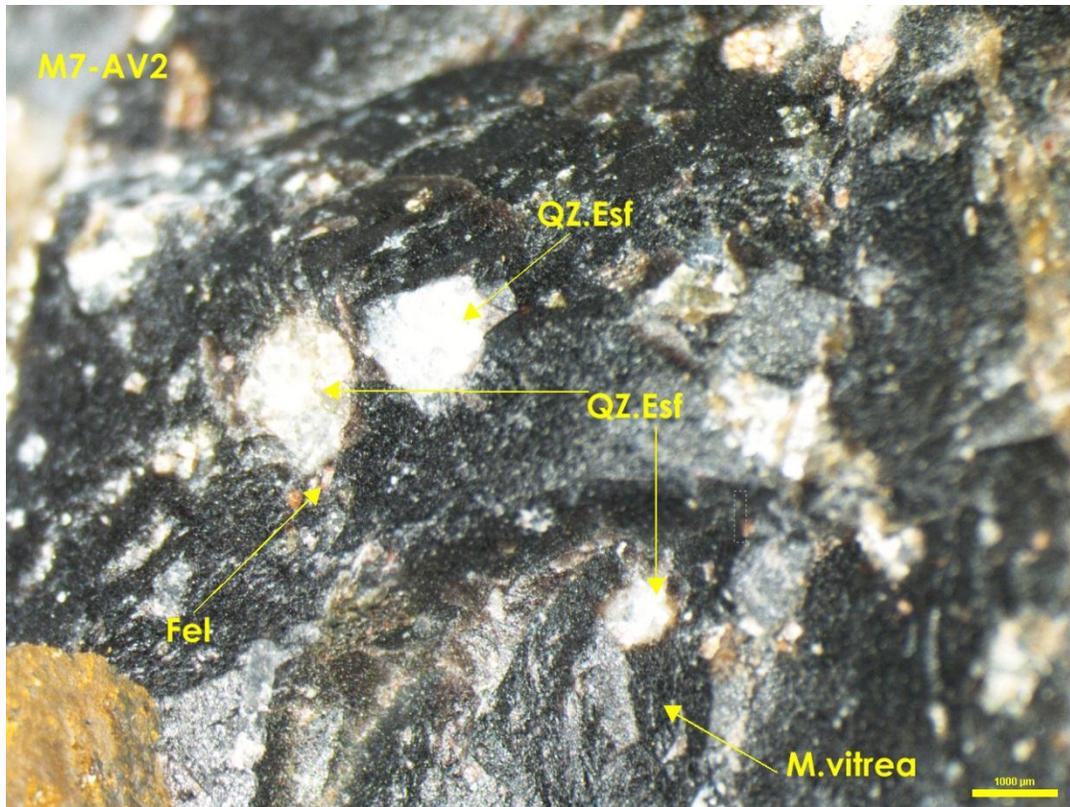


Figura 29 Vista de Vitrófido microscopio (Luz: natural, Objetivo: 1X, Escala: 1000 μm)

Afloramientos de vitrófido (Figura 29) fueron encontrados dentro de la formación Portezuelo, esta roca de color oscuro verdoso presenta principalmente conteniendo componentes de cuarzo en forma de esferolitas, además de feldespato y óxido de hemátita, sostenidos en una matriz vítrea. Esto de acuerdo a la bibliografía (Labarthe-Hernández et al., 1995) se interpreta como vestigios del caparazón vítreo de estas estructuras volcánicas y que en ciertos lugares pueden alcanzar hasta los 20 metros de espesor.

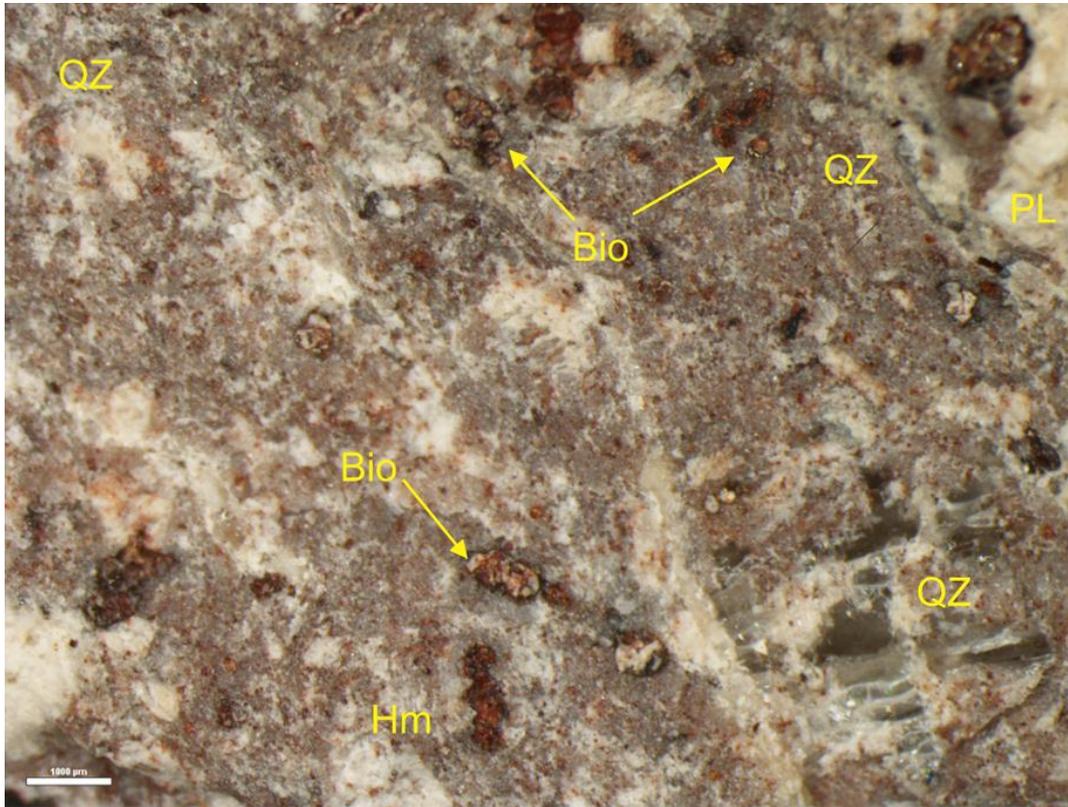


Figura 30 Ignimbrita panalillo observada al microscopio (Luz: natural, Objetivo: 1X, Escala: 1000 µm).

Ignimbrita panalillo: En muestra de mano se observa una roca de color gris rojizo de textura porfídica, contiene de 5 a 8% de cristales subhedrales de color rojizo con características de hemátita (Hm), presenta 8 a 10% de cristales euhedrales a subhedrales de cuarzo(QZ) de hasta 4 milímetros dentro de una matriz holocristalina con un 10 - 12% de feldespatos y presencia de fenocristales blancos de plagioclasas (Figura 30).

De acuerdo a la bibliografía consultada (González et al., 2012), esta formación se encuentra constituida por dos miembros. El miembro inferior (Ignimbrita Panalillo Inferior) está formado por una toba de caída color crema a ligeramente rojiza (Torres-Hernández, 2009), bien estratificada, en capas de 5 a 30 cm de espesor, que varían de ceniza fina a gruesa y por depósitos epiclástico-volcánicos, en lugares conglomeráticos, con clastos líticos de 2 – 10 cm.

El miembro superior es una ignimbrita color gris rosáceo, café o gris rojizo, con textura inequigranular- porfídica, con 10-15 % de fenocristales de 1 - 4 mm de cuarzo, sanidino y algunas plagioclasas. En el campo, el miembro superior tiene una estructura columnar característica. Normalmente se encuentra afectada por fallas normales que bascularon estas mesetas al NE. El espesor total del miembro superior es 20 m (González et al., 2012).

Material Limo arcilloso: Este material se encuentra de manera abundante principalmente entre los contactos de la latita Portezuelo con otros estratos, este material con estructura limo arenosa se observa lo largo de los escarpes las fracturas de las partes más elevadas (Figura 31).



Figura 31 Material limo-Arcilla observado al microscopio (Luz: natural, Objetivo: 1X, Escala: 1000 μm)

En las partes más bajas presentan un comportamiento extremadamente plástico, similar a la plastilina, como se puede observar la matriz es extremadamente fina y

las muestras recolectadas mostraron altos niveles de humedad, poniendo de manifiesto la gran facilidad del material para absorber agua (Figura 32).



Figura 32 Material arcilloso extremadamente plástico (Luz: natural, Objetivo: 1X, Escala: 1000 µm).

Este material se estaría comportando como lubricante entre las capas de andesita y latita, provocando inestabilidad en la zona (Figura 33).



Figura 33 Muestra de la arcilla muy plástica abundante en la zona de estudio

Finalmente, el conocer la densidad de las rocas es un parámetro físico importante que nos permite inferir el comportamiento de los materiales que intervienen en el fenómeno, se utilizaron muestras frescas de cada tipo de roca y se procedió a medir sus respectivas densidades (Figura 34).

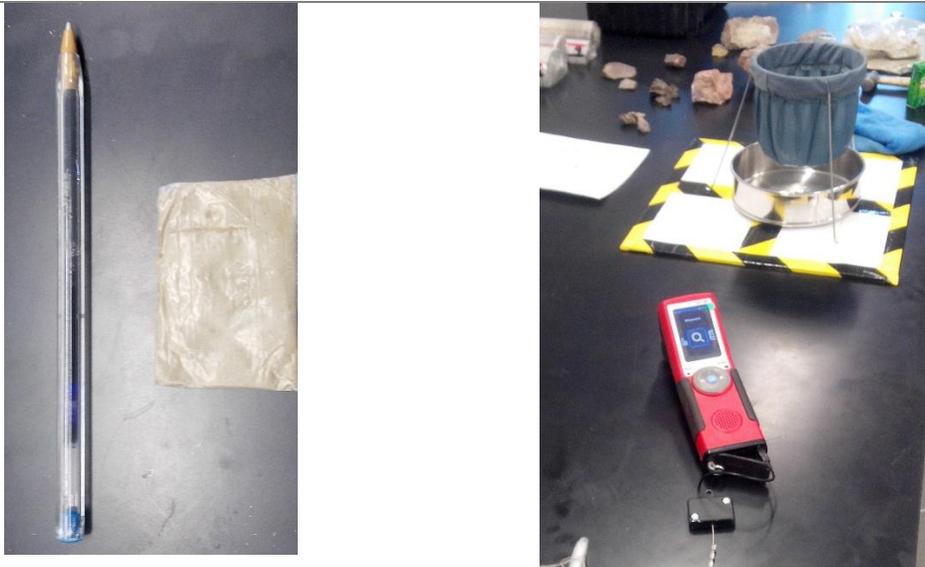


Figura 34 Detalle de comprimido de arcilla (izquierda), Terraplus KT-20, equipo utilizado en la medición de densidades (derecha).

Se midieron diferentes muestras de cada tipo para obtener un promedio en los valores, en total 5 muestras de cada uno, en el caso de la arcilla, se elaboró un comprimido del material arcilloso para extraer todo el aire de la muestra y se aisló con una película plástica muy delgada, para pudiera ser medible al sumergirla en agua y obtener su densidad. Por lo cual, las densidades aparentes para cada material se describen en la tabla 3.

Tabla 3 Densidad aparente de los materiales medidos.

Tipo de roca	Densidad Aparente
Andesita Sana	2.68 g/cm ³
Andesita Alterada	2.40 g/cm ³
Latita Portezuelo	2.38 g/cm ³
Vitrófico	2.49 g/cm ³
Ignimbrita Panalillo	2.41 g/cm ³
Arcilla	1.46 g/cm ³

Otra etapa del levantamiento de datos sobre el terreno consistía en localizar fracturas (figura 36), debido a la gran cantidad de ellas, el criterio para realizar un inventario de las mismas consistía registrar las Los datos se tomaron con ayuda de un mapa topográfico, navegador GPS y una brújula geológica, como se observa en la figura 35.



Figura 35 Algunas Imágenes de locaciones donde se recabaron datos estructurales

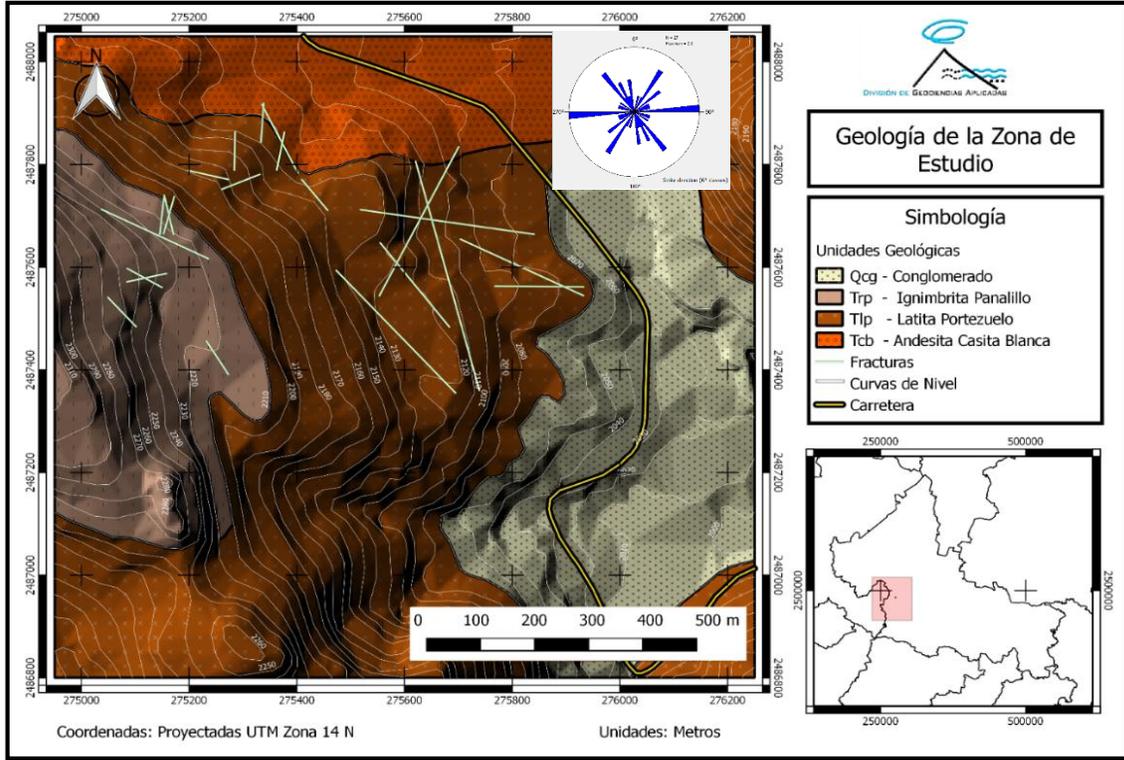


Figura 36 Mapa de fracturas obtenido a partir de datos estructurales recolectados

3.2 Interpretación de información

3.2.1 Elaboración de columna estratigráfica

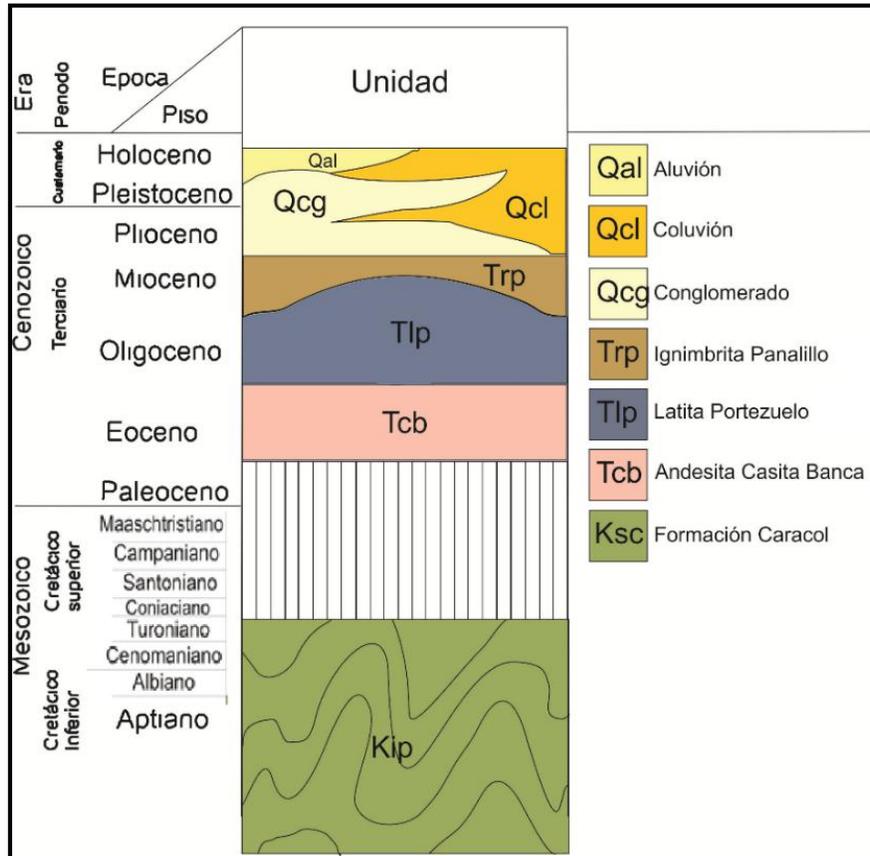


Figura 37 Columna estratigráfica obtenida a partir de la información en campo y ponderada con la geología reportada.

3.2.2 Establecimiento de cotas inter-materiales

A partir de la geología obtenida se propone la siguiente relación, en la que se asocian las resistividades con el tipo de material observado en campo.

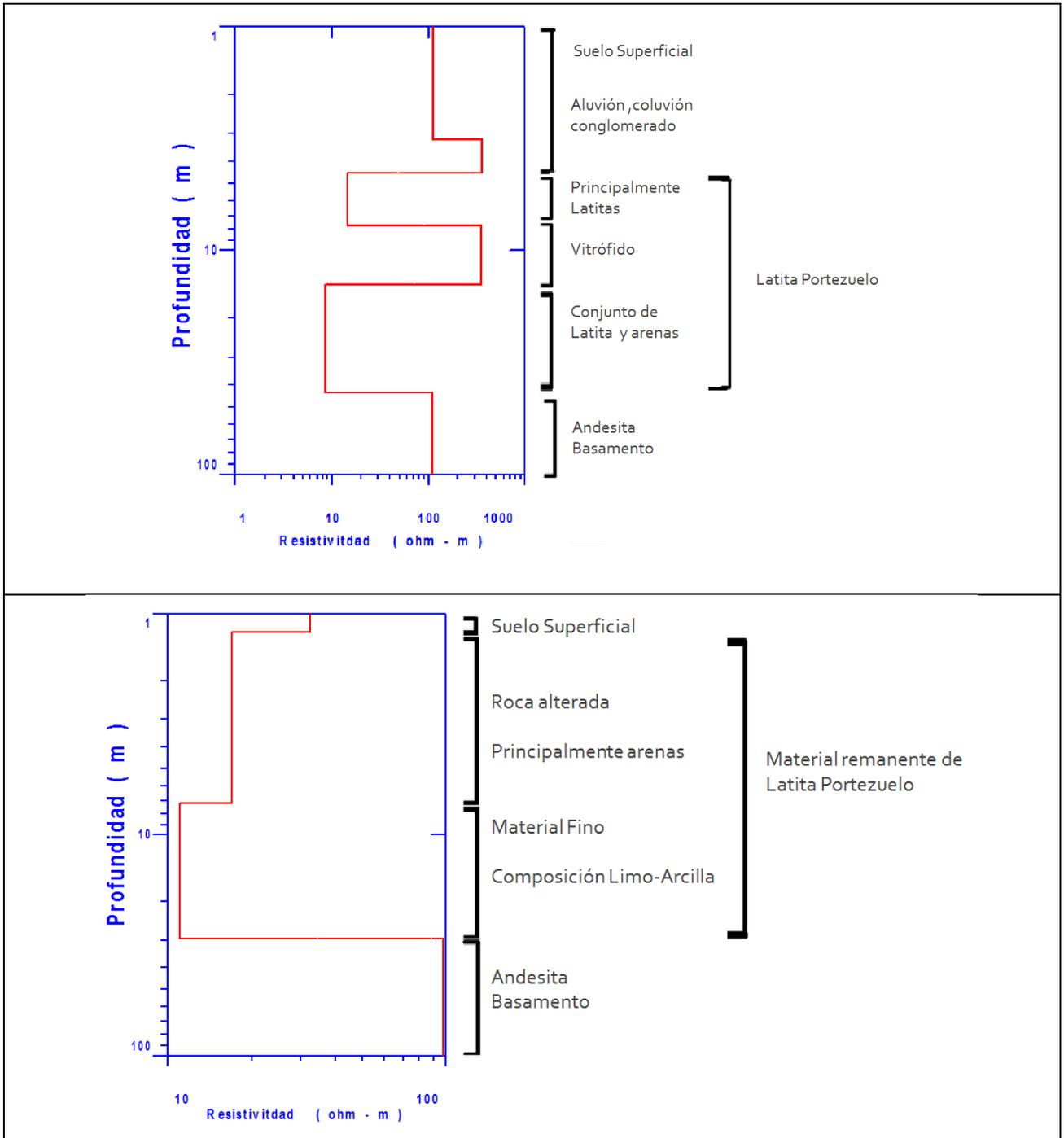


Figura 38 Clasificación de los materiales de los materiales en SEV-2.

3.3 Procesamiento de imágenes

Una vez que se han obtenido la información de los puntos de control y es posible referenciar las posiciones con precisión podemos continuar con el procesamiento de las imágenes de acuerdo al siguiente método (figura 39).

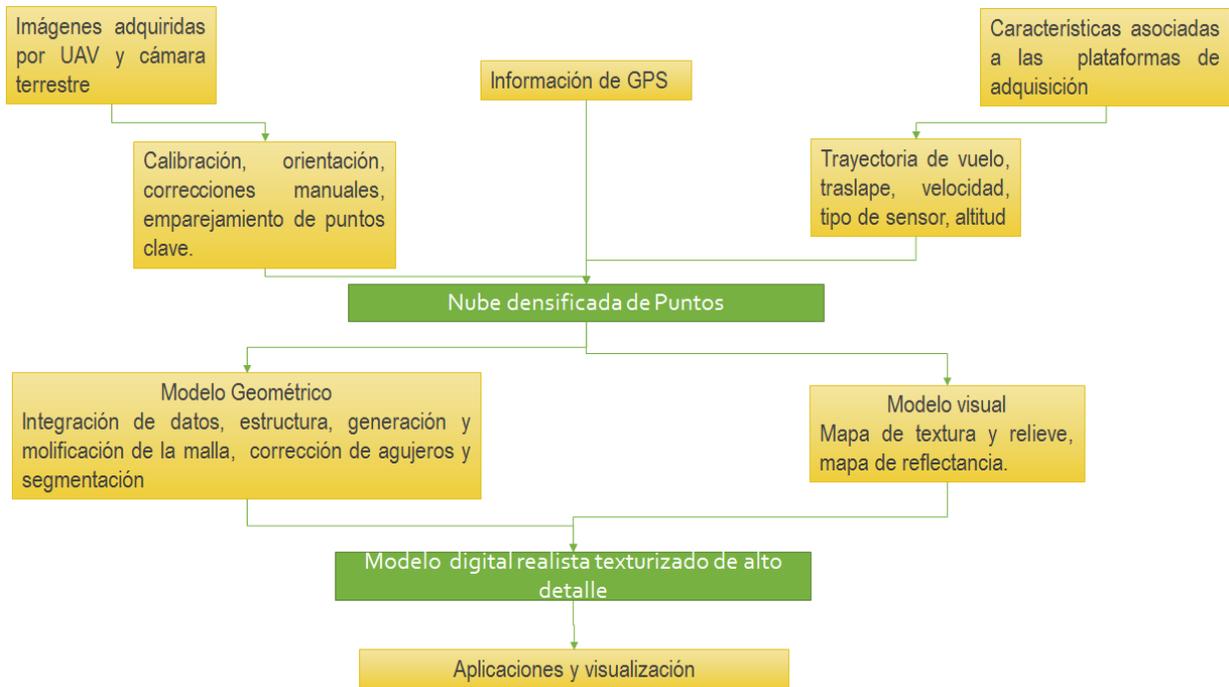


Figura 39 Procedimiento para el procesamiento de imágenes

3.3.1 Obtención de cartografía 3D de alta resolución

Al terminar el procesamiento se obtuvieron los mapas de superficie, terreno, y ortomosaico con de alta resolución, necesarios para continuar con la etapa de modelación numérica (Figura 40 y 41).

Tabla 4 Relación de información obtenida a partir del procesamiento de imágenes.

Georreferenciación	Error medio cuadrático = 0.186 metros
Resolución	3.29 [cm / pixel]
Puntos clave	Promedio de 51643 puntos clave por imagen
Imágenes	2700 conjunto de datos de imágenes calibradas (95%),
Optimización de la cámara	0.06% de diferencia relativa entre los parámetros internos de la cámara inicial y optimizados
Emparejamiento	Promedio de 7348.24 de coincidencias por imagen calibrada
Puntos de ajuste manuales	64

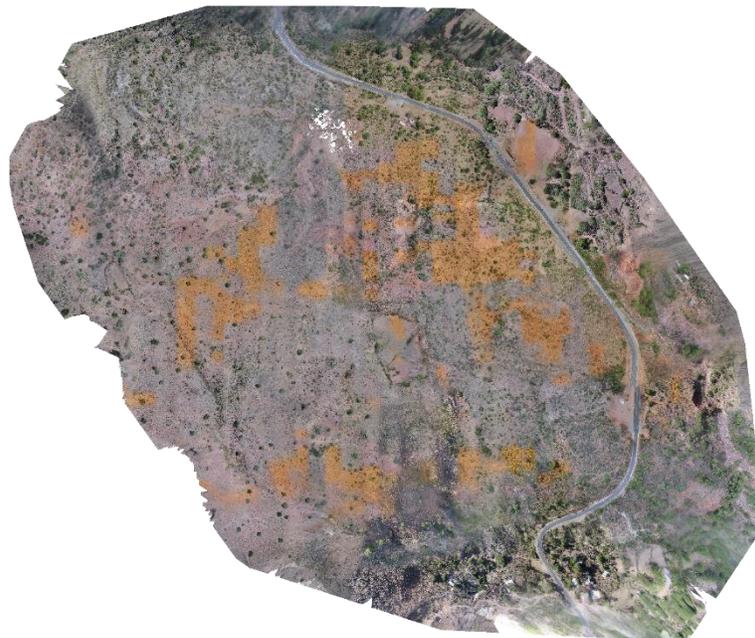


Figura 40 Ortomosaico de alta resolución a partir de imágenes aéreas.

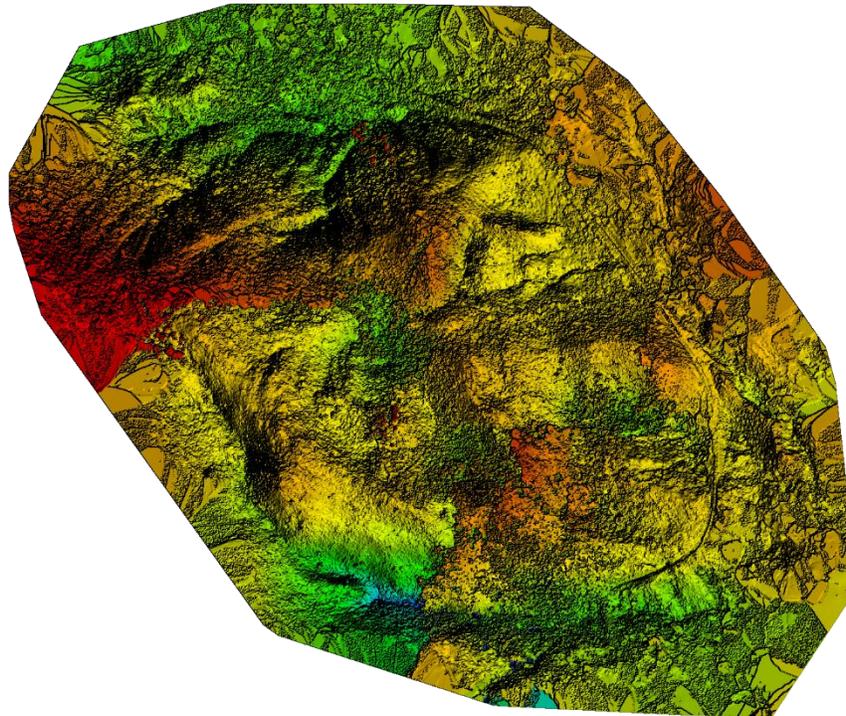


Figura 41 modelo digital de superficie de alta resolución.

3.3.2 Obtención de Modelo Digital de Terreno (MDT) de alta resolución

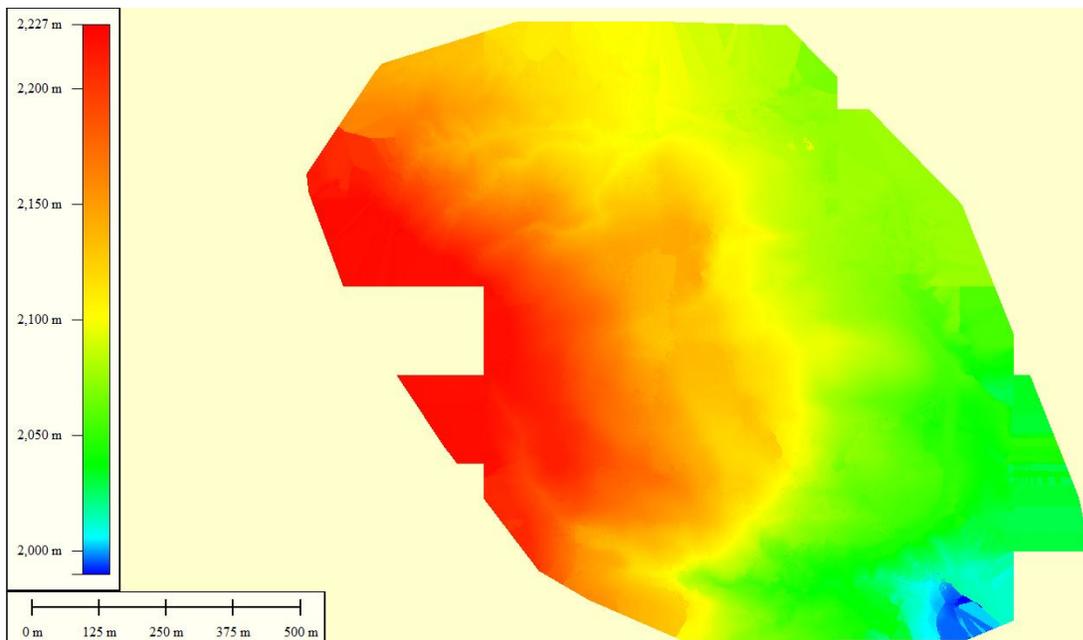


Figura 42 Modelo digital de terreno a partir de las imágenes obtenidas.

CAPÍTULO 4. DISEÑO DE UN MÉTODO NUMÉRICO APLICADO A DESLIZAMIENTOS

En este capítulo se expone la manera en la que se logró integrar bajo una misma metodología la información adquirida desde diversas perspectivas (inspección geológica, monitoreo GPS, métodos geofísicos, adquisición de información aeroespacial de alta resolución). Cabe señalar que debido a la naturaleza de la información obtenida (datos cualitativos y cuantitativos) fue necesario el establecimiento de criterios de coexistencia y coherencia entre la información recolectada. A continuación se describe la fenomenología del problema, el modelo utilizado así como la experimentación y consideraciones.

4.1 Modelación del problema

El fenómeno de deslizamiento de tierra es un evento complejo de modelar debido a la cantidad de parámetros o factores involucrados. En la literatura existen diversos métodos dedicados a la modelación de este fenómeno. De acuerdo con Carrara, 1983; Hartlen and Viberg, 1988), los métodos los podemos clasificar en:

- Modelos de caja blanca (White box models), Basados en modelos físicos (estabilidad de la pendiente y modelos hidrológicos), también referidos como modelos determinísticos;
- Modelos de caja negra (Black box models), No se basan en modelos físicos, sino en análisis estadístico;
- Modelos de caja gris (Grey box models), Basados parcialmente en modelos físicos y parcialmente en modelos estadísticos.

La estrategia diseñada en este trabajo posee características de modelo caja gris, es decir se consideraron aspectos físicos y estadísticos.

4.1.1 Análisis del fenómeno

Las zonas susceptibles a deslizamientos o inestabilidad del terreno corresponden con las zonas de pendientes medias o altas en las que por alguna condición detonante externa, como condiciones especiales de humedad, avance de procesos como socavación o erosión u ocurrencia de un evento sísmico, se generan condiciones de inestabilidad con el consecuente movimiento de volúmenes importantes de masas de tierra.

Para el caso de la inestabilidad de las laderas, la zona de influencia está limitada normalmente al lugar donde se presenta el mecanismo de falla o colapso, más la zona afectada por la masa deslizante, es decir, el lugar donde se termina depositando la masa de material inestable, ya que en algunos casos los daños y pérdidas pueden estar concentrados en estas zonas.

En general, los eventos detonantes son las precipitaciones intensas, los elevados contenidos de humedad del suelo, la acción de aguas subterráneas, la ocurrencia de sismos o explosiones, los procesos de socavación o erosión, la realización de excavaciones u obras y cualquier acción natural o antrópica que genere una alteración significativa de las condiciones originales de la ladera.

Una forma de clasificar la influencia de los factores que intervienen en este tipo de fenómenos es de acuerdo a su influencia en el equilibrio debido a la relación entre la fuerza de gravedad y la fuerza resistente. De tal forma que dichos factores pueden influir rompiendo el equilibrio de 2 maneras:

1. Aumentando la fuerza al aumentar el peso de la masa a deslizar, por ejemplo mediante la lluvia, granizo.
2. Disminuyendo la resistencia del terreno
 - a. Disminuyendo o eliminando el soporte lateral, este efecto puede ser causado debido al poder erosivo de la lluvia, las corrientes.

- b. Vibraciones en el terreno. Factores como sismos, explosiones o maquinaria.
- c. Disminución del soporte del subsuelo debido a la disolución de materiales granulares y solubles.
- d. Aumento de la presión lateral de grietas y cavernas debido a hidratación de minerales o movilización de tensiones residuales.

4.1.2 Leyes Físicas

Ley de fuerza-desplazamiento

Esta ley permite relacionar los desplazamientos relativos entre dos entidades en contacto con la fuerza de contacto actuante entre ellas aplicada en el punto de contacto entre ambas entidades.

La fuerza en el contacto la podemos descomponer en un vector normal al plano de contacto (\mathbf{n}_i). En el caso que el contacto sea entre dos partículas la dirección del vector será una línea que une los centros de ambas partículas, como se muestra en la Figura 41 izquierda. En el caso que el contacto se produzca entre partícula y muro, el vector tendrá dirección que defina la mínima distancia entre el centro de la partícula y el muro.

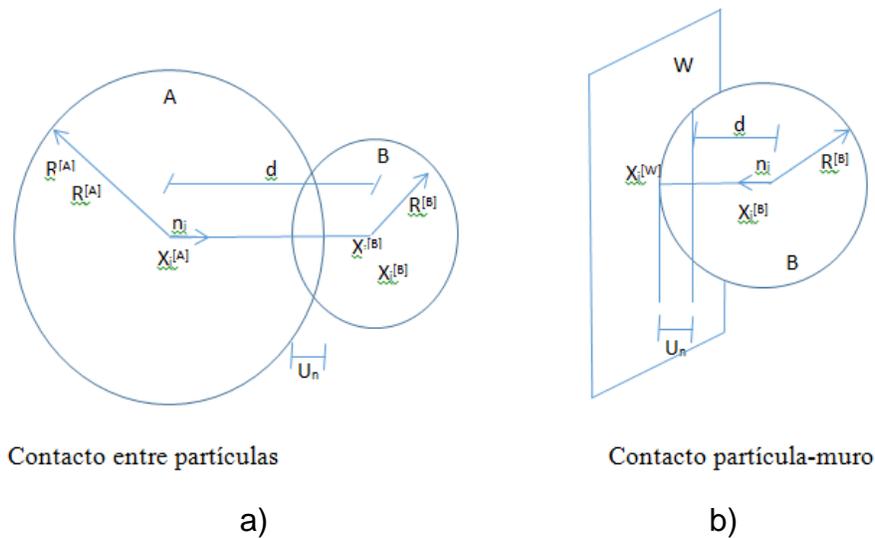


Figura 43 Esquema de contactos a) entre partículas y en b) partícula-muro

.Considerando la Figura 41 se puede definir:

a) El vector normal (\mathbf{n}_i) está dado por:

$$\mathbf{n}_i = \frac{\mathbf{X}_i^{[B]} - \mathbf{X}_i^{[A]}}{d}, \quad (1)$$

Donde $\mathbf{X}_i^{[A]}$ y $\mathbf{X}_i^{[B]}$ representan la posición del centro de gravedad de las partículas A y B, siendo d la distancia entre ambos centros

$$d = \left| \mathbf{x}_i^{[B]} - \mathbf{x}_i^{[A]} \right| = \sqrt{\left(\mathbf{x}_i^{[B]} - \mathbf{x}_i^{[A]} \right)^2 + \left(\mathbf{x}_i^{[B]} - \mathbf{x}_i^{[A]} \right)^2} . \quad (2)$$

- b) El desplazamiento relativo que se produce en la dirección normal si las entidades en contacto son partículas está dado por:

$$U^n = \mathbf{R}^{[A]} + \mathbf{R}^{[B]} - d , \quad (3)$$

en el caso de ser un muro en contacto con una partícula el desplazamiento relativo se representa por:

$$U^n = \mathbf{R}^{[B]} - d . \quad (4)$$

- c) La posición de punto de contacto vendrá dada por las siguientes expresiones:
a. Si el contacto es entre partículas

$$\mathbf{x}_i^{[C]} = \mathbf{x}_i^{[A]} + \left(\mathbf{R}_i^{[A]} - \frac{1}{2} U^n \right) \mathbf{n}_i \quad (5)$$

- b. Si el contacto es entre muro y partícula:

$$\mathbf{x}_i^{[C]} = \mathbf{x}_i^{[B]} + \left(\mathbf{R}_i^{[B]} - \frac{1}{2} U^n \right) \mathbf{n}_i \quad (6)$$

La fuerza en el contacto es definida como la acción de una partícula sobre la otra o en el otro caso una partícula sobre un muro. Esta fuerza (rigidez) se puede expresar en sus componentes normal y tangencial de la siguiente forma:

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{F}_i^n + \mathbf{F}_i^S . \quad (7)$$

La componente normal relaciona la fuerza normal de contacto con el desplazamiento normal, mediante la expresión dada en (8)

$$\mathbf{F}_i^n = K^n U^n \mathbf{n}_i \quad (8)$$

Donde:

\mathbf{F}_i^n Es la componente normal de la fuerza de contacto

K^n Es la rigidez normal en el contacto

U^n Es el desplazamiento relativo en la dirección normal

\mathbf{n}_i es un vector unitario con dirección normal.

La rigidez tangencial relaciona el incremento de la componente tangencial de la fuerza con el incremento del desplazamiento tangencial.

$$\Delta \mathbf{F}_i^s = -k^s \Delta U_i^s, \quad (9)$$

Donde:

\mathbf{F}_i^s Es la componente tangencial de la fuerza de contacto

k^s Es la rigidez tangencial en el contacto

U_i^s Es el desplazamiento relativo en la dirección tangencial

El modelo de contacto puede ser lineal ó no lineal. En el primer caso para calcular las rigideces se tiene:

$$\mathbf{F}^n = K^n U^n \mathbf{n} \quad (10)$$

$$\mathbf{k}^n = \frac{d\mathbf{F}^n}{dU^n} = \frac{d(K^n U^n)}{dU^n}, \quad (11)$$

Donde K^n se define como $K^n = \frac{k_n^{[A]} k_n^{[B]}}{k_n^{[A]} + k_n^{[B]}}$.

Para el caso no lineal se tiene:

$$\mathbf{F}_n = K^n U^n \mathbf{n} = \frac{2|G|\sqrt{2\tilde{R}}}{3(1-|\nu|)} \sqrt{U^n} U^n \mathbf{n} \quad (12)$$

$$\mathbf{k}^n = \frac{d\mathbf{F}^n}{dU^n} = \frac{3}{2} \frac{2|G|\sqrt{2\tilde{R}}}{3(1-|\nu|)} \sqrt{U^n} = \frac{3}{2} K^n, \quad (13)$$

El modelo no lineal o también conocido como Hertz-Mindlin, está basado en la teoría de Mindlin y Deresiewicz (1953). El modelo considera el módulo de elasticidad tangencial (G) y por el coeficiente de Poisson (ν).

De acuerdo al tipo de entidades (partículas o muro-partícula) se ajustan los valores para R, G y ν .

Si se consideran como entidades en contacto dos partículas se tiene:

$$\tilde{R} = \frac{2R^{[A]}R^{[B]}}{R^{[A]} + R^{[B]}}, \quad |G| = \frac{1}{2}(G^{[A]} + G^{[B]}), \quad |\nu| = \frac{1}{2}(\nu^{[A]} + \nu^{[B]}),$$

Si el contacto se realiza entre muro y partícula se tiene:

$$\tilde{R} = R^{[partícula]} \quad |G| = G^{[partícula]}, \quad |V| = V^{[partícula]}.$$

Un aspecto de interés es la velocidad en el contacto, definida como la velocidad de una partícula con respecto de la otra, o también, como la velocidad relativa de una partícula con respecto de un muro. En el punto de contacto la velocidad se define como:

$$V_i = (\dot{x}_i^{[C]})_B - (\dot{x}_i^{[C]})_A = (\dot{x}_i^{[B]} + e_{i3k} \varpi_3^{[B]} (x_k^{[C]} - x_k^{[B]})) - (\dot{x}_i^{[A]} + e_{i3k} \varpi_3^{[A]} (x_k^{[C]} - x_k^{[A]})), \quad (14)$$

Donde:

$\dot{x}_i^{[A]}$ Es la velocidad de la partícula A

$\dot{x}_i^{[B]}$ Es la velocidad de la partícula B

$\varpi_3^{[A]}$ Representa la velocidad angular de la partícula A

$\varpi_3^{[B]}$ Representa la velocidad angular de la partícula B, o la velocidad angular del muro con respecto de su centro de gravedad.

Descomponiendo ahora la velocidad según sus direcciones normal y tangencial con respecto al plano de contacto se obtiene:

$$V_i = v_i^s + v_i^n \Rightarrow v_i^s = V_i - v_i^n, \quad (15)$$

Y conociendo la velocidad es posible estimar los desplazamientos relativos en cada incremento de tiempo, y por lo tanto es posible obtener las nuevas fuerzas de contacto.

Ecuaciones de movimiento

Las expresiones dadas en (10) y (12) nos permite obtener las fuerzas de contacto para el caso lineal y no lineal respectivamente. Mediante la expresión en (14) obtenemos desplazamientos relativos entre dos entidades en contacto; para conocer velocidades y posiciones de todas las partículas que forman el sistema

discretizado se aplica la ley del movimiento. Debemos considerar existen 2 tipos de movimientos que pueden afectar a una partícula:

- a) El movimiento traslación de centro de masa, definido en términos de su posición (x_i), su velocidad (\dot{x}_i) y su aceleración (\ddot{x}_i).
- b) El movimiento de rotación descrito en función de velocidad angular (ω_i) y su aceleración angular ($\dot{\omega}_i$).

Las ecuaciones que rigen ambos movimientos son:

- a) Movimiento de traslación

$$\mathbf{F}_i = m(\ddot{x}_i - g_i), \quad (16)$$

Donde:

\mathbf{F}_i Representa el resultante de todas las fuerzas externas aplicadas sobre la partícula

m indica la masa de la partícula

g representa la fuerza de gravedad

- b) Movimiento de rotación

$$\mathbf{M}_i = \dot{\mathbf{H}}_i, \quad (17)$$

Donde

\mathbf{M}_i Indica el momento resultante de la partícula

\mathbf{H}_i Representa el momento angular de la partícula.

Ambas ecuaciones están escritas con respecto de un sistema de coordenadas local con origen en el centro de masas de cada partícula.

Para el caso cuando el sistema local de ejes esté orientado como los ejes principales de inercia de la partícula se obtienen las ecuaciones de Euler:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_1 &= \mathbf{I}_1 \dot{\omega}_1 + (\mathbf{I}_3 - \mathbf{I}_2) \omega_3 \omega_2 \\ \mathbf{M}_2 &= \mathbf{I}_2 \dot{\omega}_2 + (\mathbf{I}_1 - \mathbf{I}_3) \omega_1 \omega_3 \\ \mathbf{M}_3 &= \mathbf{I}_3 \dot{\omega}_3 + (\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_1) \omega_2 \omega_1 \end{aligned}, \quad (18)$$

Donde:

I_1, I_2, I_3 representan los momentos principales de inercia de la partícula
 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ Indican las aceleraciones angulares con respecto de los ejes principales
 M_1, M_2, M_3 son los componentes resultantes con respecto a los ejes principales.

Las ecuaciones del movimiento de traslación y rotación son integradas usando un método de diferencias finitas, con lo que se obtiene la aceleración $(\ddot{x}_i^{(t)})$ y la aceleración angular $(\ddot{\omega}_3^{(t)})$ de acuerdo al siguiente esquema:

$$\begin{aligned}\ddot{x}_i^{(t)} &= \frac{1}{\Delta t} \left(\dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)} - \dot{x}_i^{(t-\Delta t/2)} \right) \\ \ddot{\omega}_3^{(t)} &= \frac{1}{\Delta t} \left(\dot{\omega}_3^{(t+\Delta t/2)} - \dot{\omega}_3^{(t-\Delta t/2)} \right),\end{aligned}\tag{19}$$

Introduciendo las ecuaciones del movimiento de traslación y rotacional e integrando se obtienen las nuevas velocidades

$$\begin{aligned}\dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)} &= \dot{x}_i^{(t-\Delta t/2)} + \left(\frac{\mathbf{F}_i^{(t)}}{m} + g_i \right) \Delta t \\ \dot{\omega}_3^{(t+\Delta t/2)} &= \dot{\omega}_3^{(t-\Delta t/2)} + \left(\frac{\mathbf{M}_i^{(t)}}{\mathbf{I}} \right) \Delta t,\end{aligned}\tag{20}$$

Y la nueva posición de las partículas:

$$x_i^{(t+\Delta t/2)} = x_i^{(t)} + \dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)} \Delta t.\tag{21}$$

4.2 Integración de información recopilada al modelo

La manera en como interactúa la información entre sí, y como se diseñó la estrategia para la formulación del modelo 3D se muestra en la Figura. 44

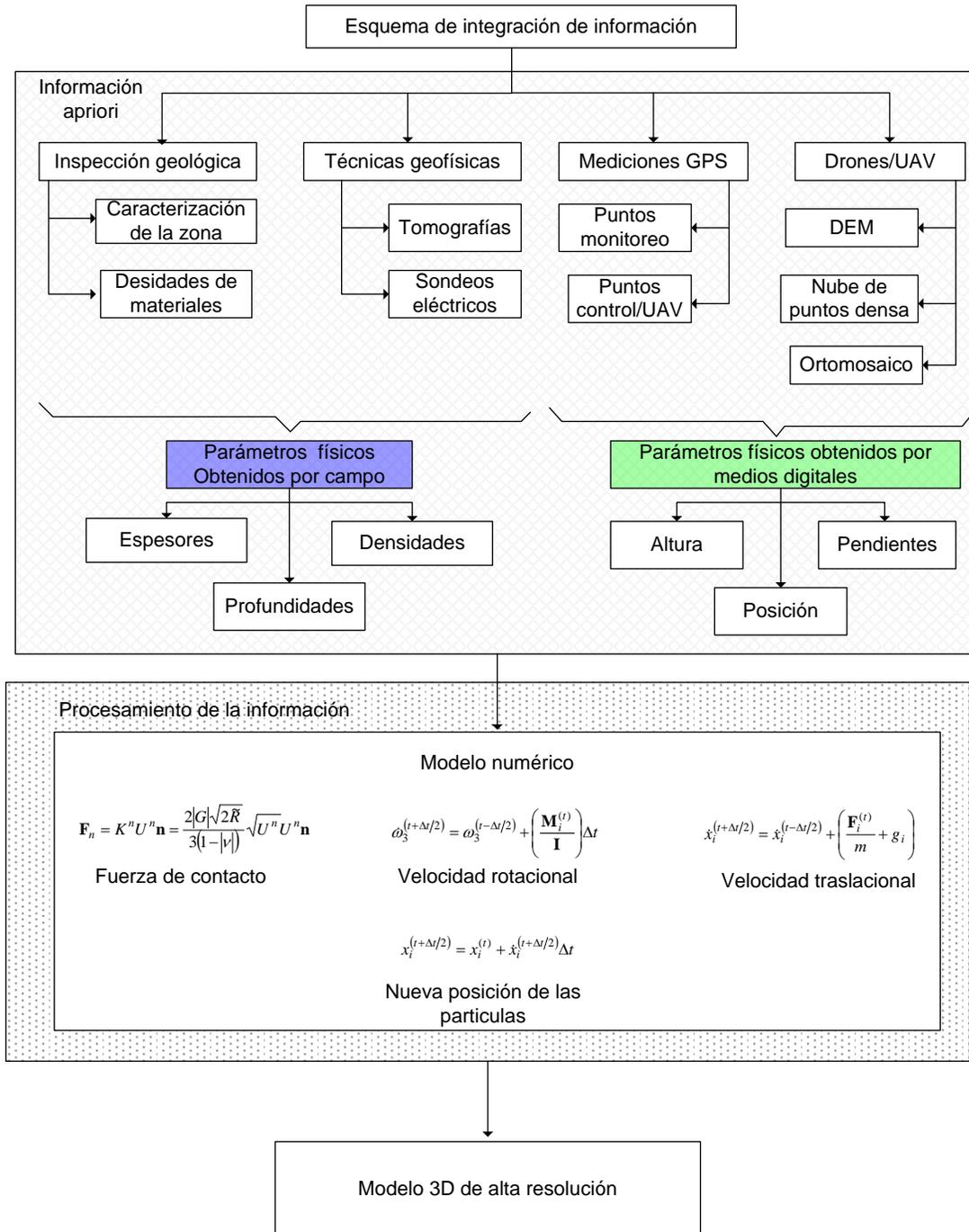


Figura 44 Esquema de la metodología propuesta para la integración de información adquirida en este trabajo de tesis

La estrategia de solución está integrada por 2 etapas principales. La primera consiste en la adquisición de información, su pre-procesamiento, así como su procesamiento de los datos. A esta etapa inicial se ha nombrado como etapa 1 o bien de información a priori. Los resultados obtenidos en la etapa 1 servirán como parámetros de entrada para la segunda etapa, la cual lleva por nombre etapa 2: Procesamiento de la información. En la subsección anterior se mostró una manera viable de modelación básicamente se analizaron 2 casos. La interacción entre partículas y el caso partícula-muro. Donde se establecieron las ecuaciones básicas para su implementación.

4.3 Implementación computacional

Para la implementación computacional se buscaron y analizaron diversas plataformas, basándonos principalmente en aquellas conocidas como especialistas en el manejo, proceso y visualización de datos geo-espaciales. Sistemas como Arcgis, Matlab, Global mapper, Pix4d y Blender (figura 45), fueron considerados como plataformas posibles para la visualización y proceso de nuestros datos. Sin embargo, cada uno de estos programas presentaron deficiencias en el manejo de cantidades masivas de información y en algunos casos no disponían de la función deseada para el manejo de información.



Figura 45 Plataformas consideradas para el procesamiento masivo de los datos.

Antes de continuar con la implementación debemos considerar algunos aspectos muy importantes.

- Se tomaron aproximadamente 2700 imágenes con el dron, para la recreación de un modelo 3D de alta resolución (aproximadamente. 3.5 cm)
- El modelo 3D generado es el resultado de un proceso de mallado texturizado, a partir de una nube de puntos densificada
- Para el desarrollo de este trabajo se consideró más importante la nube densificada, para efectos de aprendizaje, su manipulación e interacción entre puntos (partículas)
- La nube densificada se almacenó en un formato estándar con extensión .xyz
- El archivo .xyz está ordenado por filas y columnas con datos numéricos de la siguiente manera:

$$\begin{array}{cccccc}
 x_1 & y_1 & z_1 & R_1 & G_1 & B_1 \\
 x_2 & y_2 & z_2 & R_2 & G_2 & B_2 \\
 x_3 & y_3 & z_3 & R_3 & G_3 & B_3 \\
 & & & & & , \\
 x_n & y_n & z_n & R_n & G_n & B_n
 \end{array}$$

Donde las primeras 3 columnas de cada fila nos indican las coordenadas de posición geográfica de un elemento en específico representado como un punto. Las columnas de la 4 a la 6 de cada fila indican una composición RGB, es decir mediante su integración nos muestra el color verdadero del punto representado por las posiciones 1 a 3 de la misma fila. El termino **n** indica el número de puntos (filas) que contiene nuestro archivo .xyz.

- A partir de las 2700 imágenes, que cubren un área aproximada de 1km², de la zona de estudio en Ahualulco, se obtuvo una nube densificada cuyo valor de n~ 40M de puntos.
- Por lo que antes de continuar con el proceso de implementación, fue necesario buscar herramientas/estrategias adecuadas para el procesamiento masivo de los datos.

4.3.1 Problemática en la implementación

Debido a la enorme cantidad de datos a procesar (~ 240M), los softwares convencionales no eran adecuados para el propósito buscado en este trabajo, y la razón es la siguiente:

Si consideramos un modelo 3D/ nube de puntos como un espacio tridimensional que se representa mediante un plano sus posiciones geográficas: latitud y longitud y cuyo elemento en cada posición viene dado por un valor de elevación de la zona en específico. De tal forma que de forma general es posible representarlo matemáticamente mediante una matriz, cuyos elementos son directamente el valor de elevación y las intersecciones entre filas y columnas representan directamente la intersección latitud vs longitud.

Bajo esa consideración y conociendo de la teoría de procesamiento de imágenes y de señales digitales una de las operaciones básicas que permite realizar proceso de filtrado espacial, atenuación de componentes, suavizado de ruido es mediante la convolución.

Sin embargo, el orden de complejidad computacional necesario para realizar esta operación es de (O^3), considerando que nosotros tenemos aproximadamente 4M efectuar una operación básica representa un reto enorme computacionalmente hablando. Y este inconveniente se vio reflejado al momento de tratar de manipular la información mediante arcgis, global mapper, Matlab, pix4d y blender. Algunos de estos softwares abrieron la imagen correctamente, pero no era posible manipular directamente la nube de puntos. El proceso de manipulación de nube de puntos es deseado para cuestiones de simulación de eventos realistas, calculo preciso de volúmenes, estimación de trayectorias y tendencias, así como posibles pronósticos en predicciones de eventos. Por todo lo anterior y debido a la capacidad de obtener la información otorgada para la nube de puntos, se consideró en este trabajo buscar

la manera de minimizar la carga computacional sin sacrificar resolución espacial (es decir sin tener la necesidad de sesgar información).

La solución fue mediante el empleo de separación ortogonal de ejes. Sabiendo que las imágenes son el resultado de un vuelo de dron el cual sigue una trayectoria bajo un patrón establecido, se planteó como posible solución descomponer el arreglo que representa la nube de puntos en 2 ejes: sobre azimuth y en range. Los cuales fueron modelados por conveniencia mediante matrices teoplitz con distribución normal. De la siguiente manera (figura 46):

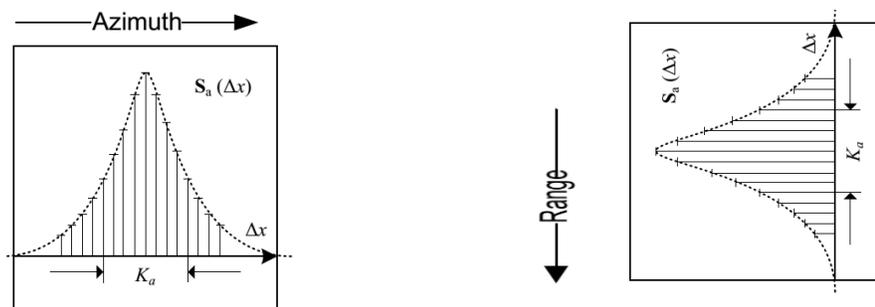


Figura 46 Modelación del eje range y azimuth utilizada para separabilidad de ejes

La intención de emplear funciones de separabilidad de ejes(figura 46) es básicamente para la reducción de orden de complejidad computacional, mediante la elaboración de matrices del tipo Teoplitz operaciones como la convolución se pueden emular mediante simple aplicación de matrices punto en cada eje, reduciendo significativamente el número de operaciones y en consecuencia el tiempo de ejecución.

La figura 47 muestra cómo se realizó el proceso:

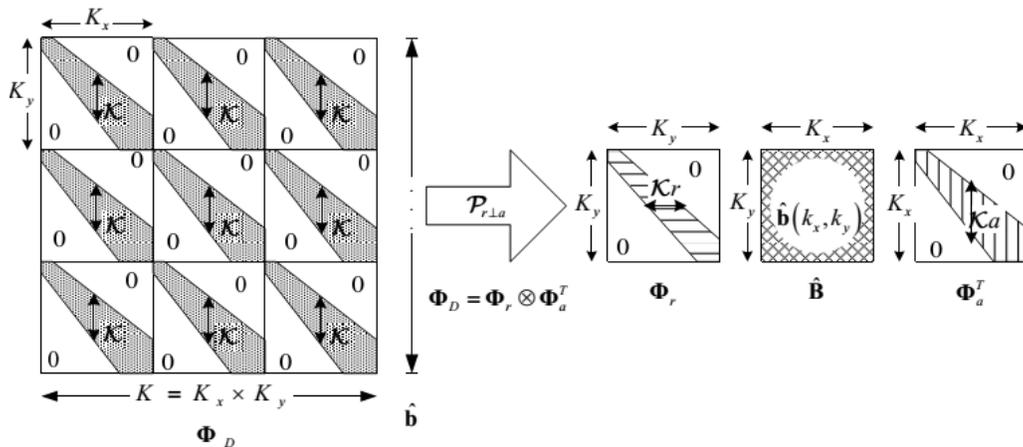


Figura 47 Estrategia de separabilidad mediante operador en azimuth y range

Tras efectuar la transformación de la información mediante el operador de separabilidad, fue se logró disminuir el número de operaciones de un orden (O^3) a (O^2), siendo un avance muy significativo para procesos que incluyan la manipulación de datos masivos. Ejemplos de datos masivos información lidar, así como, la procesada mediante fotogrametría digital.

La información transformada puede ser ahora manipulable mediante Matlab para procesos específicos que se deseen desarrollar (Figura 48, 49 y 50).

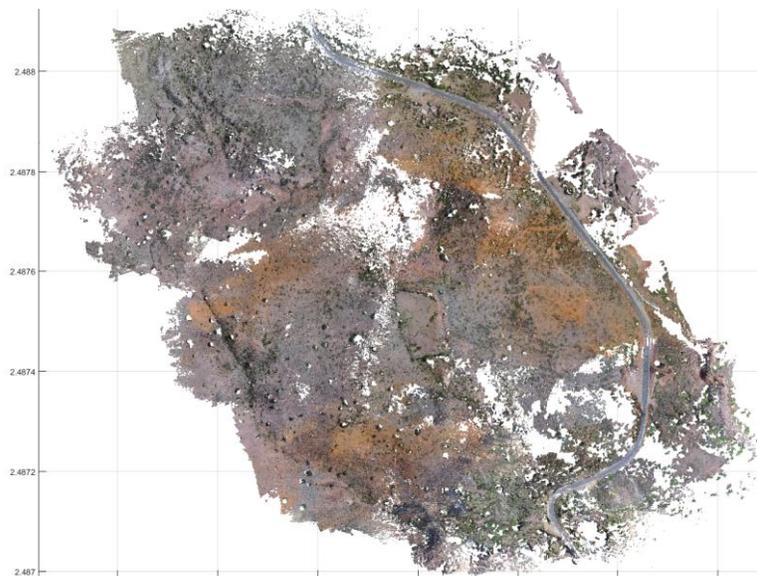


Figura 48 Visualización de una nube densa en Matlab

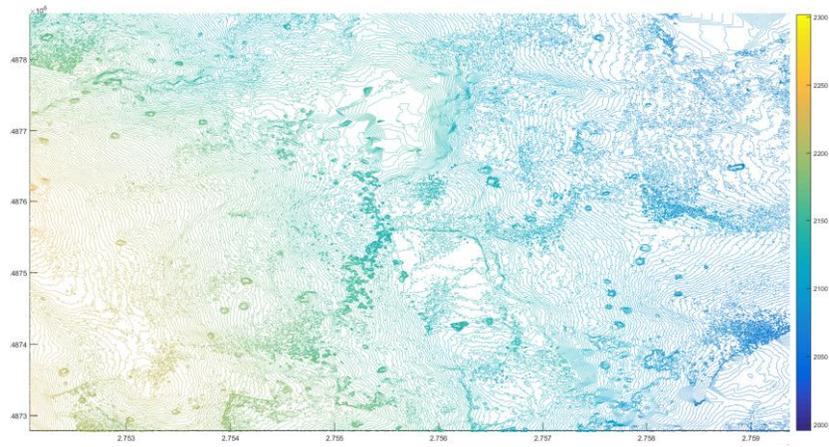


Figura 49 Elaboración de mapas de pendientes y curvas de nivel

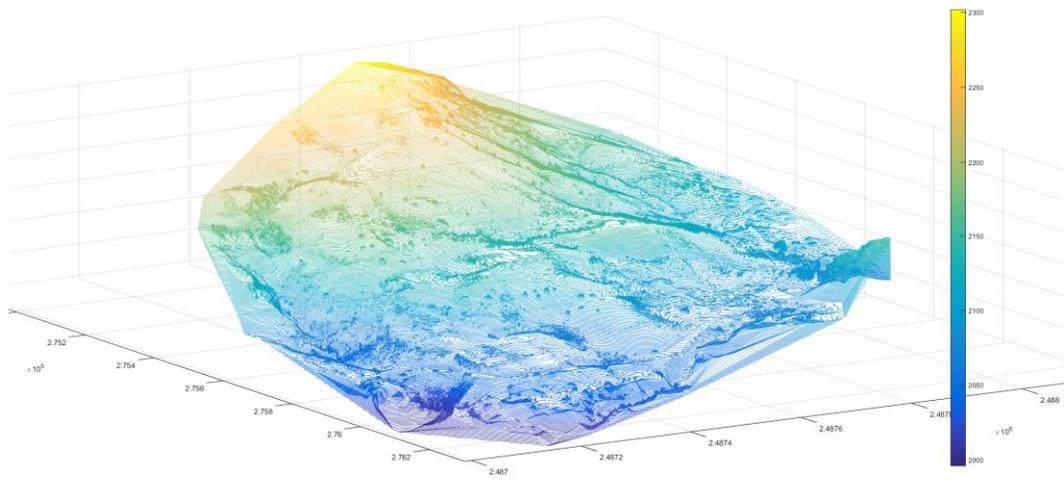


Figura 50 Modelo de digital de la zona de estudio.

CAPÍTULO 5 RESULTADOS

Para construir el modelo numérico desarrollado en el presente trabajo es necesario obtener los siguientes resultados:

Durante las mediciones de GPS se diseñó la red de puntos control ubicados a una distancia de 100 metros entre sí y se realiza una estimación del número de muestras que se podrían obtener para por levantamiento, resultando de esto 100 puntos de medición permanentes, con algunos puntos adicionales como respaldo, como se observa en la figura 11. De acuerdo a lo estimado y realizado en campo existe una pequeña variación derivado de los diversos inconvenientes al estar realizando las mediciones, en este caso se realizaron 100 muestreos por salida, dándonos un total de 400 puntos de muestreo, lo cual permito conocer información topográfica precisa y sirvió como base para la georreferenciación, representada en la figura 15.

Para lograr obtener un conjunto adecuado de datos geoespaciales se realizó la obtención de imágenes a través de un UAV modelo Phantom 2 Vision + V3 y cámara multiespectral con resolución 14 megapíxeles, de la cual se obtuvieron 2700 imágenes, realizando 32 vuelos, como se observa en la figura 18, es necesario que las áreas que se han sobrevolado tengan la correcta georreferenciación para una mejor precisión.

Se realizaron dos SEV's en que la apertura ($AB/2$) fue de 100 metros, las profundidades obtenidas fueron de 35 metros, la distancia entre los sondeos fue de alrededor de 400 metros y la diferencia en altura de alrededor de 50 metros y los resultados se pueden apreciar en la figura 21. De igual manera se realizaron tres tomografías en una zona intermedia entre los SEV, con el fin de obtener información más a detalle de la parte superficial del terreno como se observa en la figura 23. Esto permitió conocer las características del suelo superficial, presencia de bloques sostenidos en una matriz arenosa y presencia de cavidades.

Las características geológicas presentes en el área de estudio se obtuvieron a través diferentes procedimientos, desde el reconocimiento de la zona de estudio hasta la obtención del tipo de material geológico. La zona de estudio se encuentra ubicada dentro de la Formación Caracol compuesta principalmente por material volcánico de la sierra de Aqualulco. Para lo cual se obtuvo el mapa de la geología en el cual se lograron caracterizar diferentes tipos de rocas (figura 24). Asimismo, esto se corroboró con las muestras vistas en el microscopio detalladas en las figuras 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31 y 32. De igual manera se obtuvieron las densidades de las rocas y sus resultados se reflejan en la tabla 3.

Una vez obtenidos todos los datos se procedió a integrar y procesar la información en los que se establecen puntos de control y con ello es posible referenciar las posiciones con precisión podemos continuar con el procesamiento. Después del procesamiento se obtuvieron los mapas de superficie, terreno, y ortomosaico con de alta resolución, necesarios para continuar con la etapa de modelación numérica como se ilustran en las figuras 40 y 41.

Se obtuvieron modelos digitales de superficie y de terreno de muy alta resolución, y la nube densificada de puntos (figura 48) a partir de las imágenes capturas por el UAV, se desarrolló un método optimizado para la manipulación de dicha información que permitió el manejo de datos masivos para integrarlo en el modelo numérico. Dicho modelo tiene como fundamentos: la interacción de las partículas entre si y el caso partícula-muro. Donde en base a los aspectos de:

- Fuerza de contacto
- Velocidad rotacional
- Velocidad trasnacional
- Nueva posición resultante de las partículas

Mediante operaciones iterativas en un modelo construido a partir de las ecuaciones de cada uno de los aspectos antes mencionados, como se observa en la figura 44.

CAPITULO 6. DISCUSIÓN

La metodología propuesta nos permitió obtener información detallada del fenómeno de estudio, con la cual relacionamos datos geológicos, geofísicos, geodésicos, así como, imágenes aéreas de alta resolución.

La red de puntos de control de GPS nos permitió obtener información precisa de la posición (x,y,z), en cada punto de la zona de estudio, se establecieron puntos de control con la finalidad de georeferenciar los mapas topográficos obtenidos a partir del uso de drones y sensores ópticos multi-espectrales.

El enfoque geológico que se propuso, estuvo basado en las propias condiciones del terreno, una zona con escarpes pronunciados, topografía accidentada y estructura geológica compleja. Dadas las condiciones del área de estudio, Ahualulco, el muestreo se realizó en las zonas de afloramientos y paredes expuestas, Se realizaron análisis de muestras recolectadas y fue posible identificar los tipos de roca, así como sus densidades relativas y su disposición en el subsuelo. Asimismo, se obtuvieron datos estructurales de las fallas y fracturas importantes a lo largo del área de estudio para construir un mapa con dicha información.

Los métodos eléctricos nos permitieron conocer características de la capa más superficial, así como, de las capas más profundas. Se identificaron las condiciones de fracturamiento en superficie con la aplicación de tomografías eléctricas. Por otro lado, mediante los sondeos eléctricos verticales fue posible determinar la distribución de las rocas en el subsuelo, conocer los espesores y profundidades de las diferentes capas bajo la superficie, con esto se alimentó el modelo numérico, siendo un factor determinante para su implementación.

Un elemento novedoso utilizado en nuestro estudio corresponde al uso de vehículos aéreos no tripulados, este tipo de tecnología es particularmente notable en confiabilidad y precisión, cuya característica más importante es la de realizar vuelos completamente autónomos sin necesidad del factor humano. A partir de un itinerario de vuelos se logró obtener de manera autónoma un conjunto de imágenes aéreas. Una vez procesadas se obtuvo un modelo digital de terreno de alta resolución en el orden de 3.2 centímetros por pixel con una precisión en la geo localización de 0.18 metros, con estos datos fue posible alimentar el modelo numérico en base a la topografía, identificar tendencias en el deslizamiento, identificar zonas más inestables, llevar un inventario de fallas y fracturas.

Es bueno destacar de manera especial, la optimización de los procesos informáticos que se llevaron a cabo, y que permitió poder realizar la manipulación de la información de manera adecuada, puesto que durante el procesado de los datos quedo de manifiesto la dificultad de manejar conjuntos de datos masivos, y lo complicado que resulta su proceso computacional, por lo que, la paralización de operaciones desarrollada para este trabajo, supone una ventaja notable para realizar procesamientos de datos masivos, método que puede utilizarse para futuros trabajos que así lo requieran trabajos que así lo requieran.

Sin embargo, la metodología que se propone tiene aspectos que requieren de ser perfeccionadas para mejora la confiabilidad de los resultados, uno de esos aspectos

corresponde a los datos en las posiciones de GPS, como se mencionó en el capítulo 3, dichas mediciones presentaban variaciones en su posición, respecto de otras mediciones en el tiempo, estas variaciones eran de tipo aleatorios que asociamos al hecho de que la topografía jugó un factor importante, pues muchas mediciones se hicieron en zonas escarpadas y quebradas que propiciaban el rebote de la señal de radio entre la estación GPS y el Rover. Además, la configuración geométrica en los satélites era inadecuada durante una hora del día específica, durante la cual se detenía el levantamiento hasta que los satélites lograban una posición orbital adecuada y era posible continuar con el levantamiento.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

De acuerdo a lo realizado en este trabajo de investigación, podemos concluir:

- La estrategia presentada en este trabajo de tesis promueve el uso e integración de técnicas multidisciplinarias con el objetivo de obtener modelos que describan con mayor precisión el comportamiento de fenómenos de deslizamientos complejos de tierra.
- Se estableció una red de 100 puntos de medición geoméricamente distribuidos a través de GPS diferencial con el objetivo de conocer las características topográficas de la zona de estudio.
- El uso de métodos eléctricos permite obtener parámetros de profundidad y espesores de las capas del subsuelo.
- El uso de metodologías adecuadas para la planificación de vuelos y trayectorias en UAV permite maximizar la eficiencia en distancias de vuelo, área cubierta y solapamiento entre imágenes, obteniendo un mayor aprovechamiento del tiempo de autonomía de la aeronave.
- El uso de técnicas de fotogrametría digital permite obtener de manera confiable modelos realistas tridimensionales con un alto grado de certeza,

cuyas aplicaciones puedan ser orientadas para la prevención y determinación de riesgos potenciales como los son los procesos de remoción en masa.

- La fusión de paradigmas basadas en obtención de información cualitativa y cuantitativa y su correcta integración en un modelo numérico, representa una nueva alternativa para el estudio y conocimiento de fenómenos relacionados con eventos de deslizamiento.

CAPÍTULO 8. REFERENCIAS

Abidin, H., H., A., & Surono, G. M. M. H. (2004). On the Use of GPS Methods for Studying Land Displacements on the Landslide Prone Area.

Al-Rawabdeh, A., He, F., Mousaa, A., El-Sheimy, N., & Habib, A. (2016). Using an Unmanned Aerial Vehicle-Based Digital Imaging System to Derive a 3D Point Cloud for Landslide Scarp Recognition. *Remote Sensing*, 8(2), 95.

Alsadik, A. (2014). *Guided Close Range Photogrammetry for 3D Modelling of Cultural Heritage Sites*. <http://doi.org/10.3990/1.9789036537933>

Arosio, D., Longoni, L., Papini, M., & Zanzi, L. (2014). Analysis of microseismic activity within unstable rock slopes. In *Modern technologies for landslide investigation and prediction* (pp. 141 –154). Berlin, Heidelberg: Springer.

Auge, M. (2008). Métodos Geoeléctricos para la Prospección de Agua Subterránea.

Azzoni, A., Chiesa, S., Frassoni, A., & Govi, M. (1992). The Valpola landslide. *Engineering Geology*, 59–70.

Bogoslovsky, V., & Ogilvy, A. (1977). Geophysical methods for the investigation of landslides. – Geophysics.

Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to Remote Sensing*. *Introduction to Remote Sensing* (Vol. 1).

Carrera hernández, J. J., Levresse, G., Lacan, P., & Aranda gómez, J. J. (2016). A low cost technique for development of ultra-high resolution topography : application to a dry maar's bottom. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*,

33(1), 122–133.

Ganz, J. (1914). Die Gipfelbewegung der Rosablanche, SAC-Jahrbuch, 50, cited in Zölly, H., 1948.

Geological Society of London. (2002). *Mapping in Engineering Geology key issues in earth sciences*. (J. S. Griffiths, Ed.).

Glackin, D. L. (2014a). OBSERVATIONAL SYSTEMS, SATELLITE. In *Encyclopedia of Remote Sensing*.

Glackin, D. L. (2014b). REMOTE SENSING, PHYSICS AND TECHNIQUES. In *Encyclopedia of Remote Sensing*.

González-Naranjo, G. A., Molina-Garza, R. S., Aranda-Gomez, J. J., & Tristán-González, M. (2012). Paleomagnetismo y edad de la Ignimbrita Panalillo Superior, Campo Volcánico de San Luis Potosí, Mexico. *Boletín de La Sociedad Geologica Mexicana*, 64(3), 387–409.

Habib, A. F. (2010). Manual of Geospatial Science and Technology. *Manual of Geospatial Science and Technology*, 439–465.

Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). The Landslide Handbook— A Guide to Understanding Landslides, 147.

Jongmans, D., & Garambois, S. (2007). Geophysical investigation of landslides : a review. *Bulletin Société Géologique de France*, 101 – 112.

KING, A. D. (1998). Inertial Navigation – Forty Years of Evolution. *GEC REVIEW*, 13, 140–141.

Labarthe Hernández, G., Jiménez López, L. salvador, & Aranda gómez, J. J. (1995). *REINTERPRETACION DE LA GEOLOGIA DEL CENTRO VOLCANICO DE LA SIERRA DE AHUALULCO, S.L.P.*

Langenbacher, E. (2008). *Introduction to GPS. Communications* (Vol. 26).

Lei, B., Li, Q., & Li, X. (2011). Landslide monitoring system based on RTK technology. *Proceedings of 4th International Workshop on Advanced Computational Intelligence, IWACI 2011*, 525–528.

Myers, J. (2014). OBSERVATIONAL PLATFORMS, AIRCRAFT, AND UAVS. In *Encyclopedia of Remote Sensing*.

Nova. (2002). Time Line of UAVs. Retrieved from <http://www.pbs.org/wgbh/nova/spiesfly/uavs.html>

Othman, Z., Wan, A. W. A., & Anuar, A. (2011). Evaluating the performance of GPS survey methods for landslide monitoring at hillside residential area: Static vs rapid static. *Proceedings - 2011 IEEE 7th International Colloquium on Signal Processing and Its Applications, CSPA 2011*, 453–459.

Palacky, G. J. (1988). Resistivity characteristics of geologic targets. *Investigations*

in Geophysics: Electromagnetic Methods in Applied Geophysics-Theory, Vol. 1, 3.

- Pirotti, F., Guarnieri, A., Masiero, A., Gregoretti, C., Degetto, M., & Vettore, A. (2014). Micro- scale landslide displacements detection using Bayesian methods applied to GNSS data. In M. Scaioni (Ed.). In *Modern technologies for landslide investigation and prediction*.
- Raney, K. (2014). *Encyclopedia of Remote Sensing*.
- Rodríguez, D. F. ESTUDIO DE TÉCNICAS ELÉCTROMAGNÉTICAS DE PROSPECCIÓN DEL SUBSUELO (2015).
- Roncella, R., & Forlani, G. (2014). A fixed terrestrial photogrammetric system for landslide monitoring. In M. Scaioni (Ed.) (pp. 43–67).
- Ryerson, R., & Aronoff, S. (2010). Why'where'Matters: Understanding and Profiting from GPS, GIS, and Remote Sensing: Practical Advice for Individuals, Communities, Companies and. Retrieved from https://scholar.google.com.mx/scholar?q=Why+where+Matters%3A+Understanding+and+profiting+from+GPS%2C+GIS%2C+and+Remote+Sensing&btnG=&hl=es&as_sdt=0%2C5&as_ylo=2009&as_yhi=2011#0
- Scaioni, M. (2015). *Modern Technologies for Landslide Monitoring and Prediction*. <http://doi.org/10.1007/978-3-662-45931-7>
- Stumpf, A. (2013). Landslide recognition and monitoring with remotely sensed data from passive optical sensors.
- Stumpf, A., Malet, J.-P., Allemand, P., Pierrot-Deseilligny, M., & Skupinski, G. (2014). Ground-based multi-view photogrammetry for the monitoring of landslide deformation and erosion. *Geomorphology*, 231, 130–145. <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.10.039>
- Teixidó, T., & Quintana, Á. R. (2013). Aplicación de la Tomografía Eléctrica en la Caracterización del Deslizamiento de Doña Mencía, 56.
- Turner, D., Lucieer, A., & Wallace, L. (2014). Direct georeferencing of ultrahigh-resolution UAV imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(5), 2738–2745. <http://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2265295>
- Yuhas, C. (2004). Civil UAV. *Assessment*, (December), 1–7.
- Zhang, L., Liao, M., Balz, T., Shi, X., & Jiang, Y. (2014). Monitoring landslide activities in the three gorges area with multi-frequency satellite SAR data sets. In *Modern technologies for landslide investigation and prediction*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Zölly, H. (1948). Geschichte der geodätischen Grundlagen für Karten und Vermessungen in der Schweiz. Stiftung Dr. Joachim de Giacomi, Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft, Eidgenössischen Landestopographie.

