



**Análisis comparativo entre levantamiento topográfico con estación total, y  
levantamientos no convencionales como posicionamiento GNSS RTK y fotogrametría de  
corto alcance**

Duque Páramo, Patricio Alexander

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geoespacial

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Geoespacial

Ing. Luna Ludeña, Marco Patricio, PhD.

06 de agosto de 2025



CERTIFICADO DE ANÁLISIS  
magister

# MIC\_DUQUE\_A



Firmado electrónicamente por:  
MARCO PATRICIO LUNA  
LUDEÑA

**4%**  
Textos sospechosos



**0.5% Similitudes**  
< 1% similitudes entre comillas  
0% entre las fuentes mencionadas  
**< 1% Idiomas no reconocidos**  
**3.5% Textos potencialmente generados por la IA**

Nombre del documento: MIC\_DUQUE\_ALEX.pdf  
ID del documento: 2b6267df4d035598da06d329582  
Tamaño del documento original: 13,5 MB  
Autor: Alexander Duque

Depositante: Alexander Duque  
Fecha de depósito: 23/8/2024  
Tipo de carga: url\_submission  
fecha de fin de análisis: 23/8/2024

Número de palabras: 39.449  
Número de caracteres: 187.536

.....  
**Ing. Luna Ludeña, Marco Patricio, PhD.**

**Director**



## Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

### Carrera de Ingeniería Geoespacial

#### Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **“Análisis comparativo entre levantamiento topográfico con estación total, y levantamientos no convencionales como posicionamiento GNSS RTK y fotogrametría de corto alcance”** fue realizado por el señor **Duque Páramo, Patricio Alexander** el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 06 de enero de 2025

.....

**Ing. Luna Ludeña, Marco Patricio, PhD**

C. C. 110259604-4



**Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción  
Carrera de Ingeniería Geoespacial**

**Responsabilidad de Autoría**

Yo, Duque Páramo, Patricio Alexander, con cédula de ciudadanía n° 172440124-3, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **Análisis comparativo entre levantamiento topográfico con estación total, y levantamientos no convencionales como posicionamiento GNSS RTK y fotogrametría de corto alcance** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

**Sangolquí, 06 de enero de 2025**

**Duque Páramo, Patricio Alexander**

**C.C.: 172440124-3**



**Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción**

**Carrera de Ingeniería Geoespacial**

**Autorización de Publicación**

Yo **Duque Páramo, Patricio Alexander**, con cédula de ciudadanía n° 172440124-3, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Análisis comparativo entre levantamiento topográfico con estación total, y levantamientos no convencionales como posicionamiento GNSS RTK y fotogrametría de corto alcance en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.**

**Sangolquí, 06 de enero de 2025**

**Duque Páramo, Patricio Alexander**

**C.C.: 172440124-3**

### **Dedicatoria**

Quiero dedicar el presente trabajo de investigación e integración curricular a Dios, por las oportunidades brindadas durante el transcurso de mi vida personal y académica. Al pueblo ecuatoriano, como principal partícipe de la educación pública, gratuita y de calidad, por su confianza depositada en las instituciones de educación superior públicas, y como principales propietarios de los resultados obtenidos en la investigación científica realizada, para el progreso, desarrollo y mejora de la nación a través de las geociencias.

A mi familia, a mi madre Silvia por ese sostén inquebrantable, infalible, infaltable, incondicional y amoroso en mi vida, a mi abuelita Susana por todo su cariño expresado hacia de mí, a mis tíos Lenin y Jaime junto con su esposa Erika por ser una guía, una luz, un apoyo en cada aspecto de mi vida, de mis estudios, de todo, por ser como mis padres, a mis primitos Samantha Daniela y Maximiliano que sea una guía y un ejemplo de superación y motivación para ustedes en su crecimiento futuro niños, a mi padre, por brindarme las herramientas necesarias para realizar y continuar con mis estudios, en general son las personas que nunca me han abandonado, siempre me han apoyado, nunca me han defraudado y siempre han confiado en mí.

Finalmente, quiero dedicar este proyecto a aquellas personas que he conocido en el largo trayecto académico universitario, a aquellas personas que me han permitido convivir con ellas, juntarme, compartir momentos únicos y especiales en esta etapa única, en especial a Leo con quien estuve en mis mayores logros y en mis peores momentos, quien ha estado de forma sincera e incondicional junto a mí, por cada momento que hemos pasado en la universidad, por todo el apoyo mutuo en cada paso que hemos dado, por todo lo bueno y malo, gracias por todo, sigue adelante y jamás te rindas. A Monse quien siempre me ha escuchado y aconsejado en el transcurso del tiempo, la primera persona que conocí y se ganó mi aprecio y afecto entero por la gran persona que es, sigue adelante que te quiero mucho.

**- Alex**

## **Agradecimientos**

Mi profundo agradecimiento al Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción, a través de su Laboratorio de Geodesia y Topografía en el cual se puso a disposición todo su continente humano, logístico y material para la correcta ejecución del proyecto, haciendo énfasis en todo el apoyo brindado por el asistente técnico del laboratorio Geom. Carlos Alvares, cuyo aporte técnico, logístico y personal es invaluable, no solo durante el proyecto si no también durante el transcurso de la carrera.

Al Laboratorio de Fotogrametría, Sensores Remotos e IDE, a través del Ing. Eduardo Kirby Powney, MSc., quien muy gentilmente nos facilitó el ortomosaico de su proyecto de investigación del año 2023, el cual es un insumo primordial del presente trabajo.

A nuestros docentes por todos los conocimientos brindados en las aulas durante el transcurso de la carrera, por formar profesionales de bien y con conocimientos sólidos para el desarrollo y el progreso del país.

A mi tutor de proyecto, el Ing. Marco Luna Ludeña, PhD por la confianza depositada en mí durante la realización del trabajo, por su guía académica, profesional y camaradería.

A Stefy Ruiz, que empezó el proceso de MIC conmigo, pero dadas las circunstancias que sucedieron un día ya no pudo continuar con el proyecto, pero que sin embargo su trabajo y esfuerzo fueron fundamentales en este proyecto.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al grupo de chicas y chicos del periodo PREGRADO 202450 S-I MAY24-SEP24 de la carrera de Ingeniería Geoespacial e Ingeniería Civil cuyo esfuerzo, sacrificio, valor y arduo trabajo fue fundamental para la ejecución del presente trabajo investigativo, sin su ayuda ningún objetivo de este proyecto se hubiera podido realizar, fueron el pilar fundamental durante los dos meses de trabajo en campo en la cual nos apoyamos mutuamente en nuestro crecimiento profesional y una experiencia personal inigualable, estamos convencidos que su esfuerzo merece una recompensa mayor, y que jamás podremos dejar de agradecer por todo su apoyo hacia nosotros. Les deseamos el mejor

de los éxitos a todos usted chicos en su vida académica, personal y profesional, son capaces de llegar muy lejos, recuerden que tienen un amigo en nosotros.

Nuevamente, gracias a Alejandro Toapanta, Alissón Lema, Carla Portero, Daniel Yaguana, Diana Bacuy, Elam Álvarez, Israel Arteaga, Jessica Llumiquinga, Josselyn Navarrete, Juan Fernando Guerra, Karen Choez, Katherine Benavidez, Leonela Comina, Lida Vegay, Mateo Ruales, Melissa Pérez, Paul Escobar, Sandy Quishpe, Sebastián Borja, Shirley Sarzosa, Sofia Pazmiño, y Steven Loachamin por todo su apoyo.

## Índice

|                                        |    |
|----------------------------------------|----|
| Dedicatoria.....                       | 6  |
| Agradecimientos .....                  | 7  |
| Resumen .....                          | 17 |
| Abstract.....                          | 18 |
| Capítulo I .....                       | 19 |
| Introducción y estado del arte .....   | 19 |
| Introducción.....                      | 19 |
| Estado del arte .....                  | 20 |
| Casos de estudio nacionales .....      | 20 |
| Casos de estudios internacionales..... | 21 |
| Objetivos .....                        | 23 |
| General.....                           | 23 |
| Específico .....                       | 23 |
| Capitulo II .....                      | 23 |
| Marco teórico/Marco Conceptual.....    | 23 |
| Superficies de referencia .....        | 23 |
| Elipsoide.....                         | 24 |
| Geoide .....                           | 24 |
| WGS84 .....                            | 24 |
| GRS80.....                             | 25 |
| EGM08 .....                            | 25 |

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
|                                                    | 10 |
| Marcos de referencia.....                          | 26 |
| Sistemas de coordenadas .....                      | 27 |
| Sistema de coordenadas cartesianas – ECEF .....    | 27 |
| Sistema de coordenadas geodésicas.....             | 27 |
| Sistemas de coordenadas locales.....               | 27 |
| GNSS.....                                          | 27 |
| Constelaciones GNSS.....                           | 28 |
| NAVSTAR/GPS .....                                  | 28 |
| GLONASS .....                                      | 28 |
| GALILEO .....                                      | 28 |
| COMPASS/BEIDOU .....                               | 28 |
| Métodos de posicionamiento GNSS .....              | 28 |
| Método estático .....                              | 28 |
| Posicionamiento RTK .....                          | 29 |
| Posicionamiento NTRIP .....                        | 29 |
| Consideraciones para el posicionamiento GNSS ..... | 29 |
| PDOP (Geometría de Posición Diluida) .....         | 29 |
| Intervalos de registro .....                       | 30 |
| Épocas.....                                        | 31 |
| Angulo de corte.....                               | 31 |
| Nivelación .....                                   | 31 |

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| Levantamiento topográfico – Método de poligonales ..... | 32 |
| Precisión relativa .....                                | 32 |
| Estación total.....                                     | 33 |
| Fotogrametría.....                                      | 33 |
| Fotografía aérea .....                                  | 33 |
| Ortofoto.....                                           | 33 |
| Errores de la ortofoto .....                            | 34 |
| Ortomosaico .....                                       | 34 |
| Restitución fotogramétrica digital.....                 | 35 |
| Digitalización .....                                    | 35 |
| Aeronaves UAS.....                                      | 36 |
| Puntos de control terrestre (GCP) .....                 | 36 |
| Geoetiquetado de imágenes.....                          | 37 |
| Modelo Digital del Terreno – MDT .....                  | 37 |
| Modelo Digital de Elevaciones – MDE.....                | 37 |
| Modelo Digital de Superficies – MDS.....                | 37 |
| Software SIG .....                                      | 38 |
| Software CAD.....                                       | 38 |
| Geodatabase.....                                        | 39 |
| Control de calidad de datos geográficos.....            | 39 |
| Normas de calidad.....                                  | 40 |

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
|                                                               | 12 |
| Norma ISO.....                                                | 40 |
| Norma NTE INEN .....                                          | 40 |
| Norma NSSDA.....                                              | 41 |
| Exactitud posicional.....                                     | 41 |
| Capitulo III.....                                             | 42 |
| Metodología .....                                             | 42 |
| Justificación.....                                            | 44 |
| Establecimiento de una red de control básico horizontal ..... | 45 |
| Establecimiento de una red de control básico vertical .....   | 60 |
| Nivelación Geométrica Diferencial. ....                       | 62 |
| Nivelación GNSS .....                                         | 64 |
| Levantamiento topográfico .....                               | 66 |
| Generación del producto topográfico .....                     | 73 |
| Levantamiento fotogramétrico .....                            | 74 |
| Digitalización del producto fotogramétrico .....              | 75 |
| Control de calidad con técnicas GNSS .....                    | 78 |
| Capitulo IV .....                                             | 87 |
| Resultados.....                                               | 87 |
| Establecimiento de una red de control básico horizontal ..... | 87 |
| Establecimiento de una red de control básico vertical .....   | 94 |
| Levantamiento topográfico .....                               | 98 |

|                                                  |     |
|--------------------------------------------------|-----|
| Generación del producto topográfico .....        | 99  |
| Levantamiento fotogramétrico .....               | 101 |
| Digitalización del producto fotogramétrico ..... | 101 |
| Control de calidad con técnicas GNSS .....       | 104 |
| Comparativa entre métodos de captura .....       | 107 |
| Capítulo V .....                                 | 110 |
| Conclusiones y recomendaciones .....             | 110 |
| Conclusiones .....                               | 110 |
| Recomendaciones .....                            | 113 |
| Referencias bibliográficas .....                 | 113 |
| Apéndices .....                                  | 117 |

### Índice de tablas

|                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabla 1</b> <i>Inventario de hitos de control geodésico Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”.</i>           | 46  |
| <b>Tabla 2</b> <i>Materiales empleados para el control horizontal.</i>                                              | 50  |
| <b>Tabla 3</b> <i>Parámetros elaboración Red Geodésica IGM.</i>                                                     | 50  |
| <b>Tabla 4</b> <i>Parámetros Red Geodésica Local.</i>                                                               | 57  |
| <b>Tabla 5</b> <i>Parámetros de conversión entre marcos de referencias terrestre IGS20 – ITRF2008.</i>              | 58  |
| <b>Tabla 6</b> <i>Modelo de velocidades SIRGAS2022</i>                                                              | 59  |
| <b>Tabla 7</b> <i>Equipo utilizado para el control vertical.</i>                                                    | 62  |
| <b>Tabla 8</b> <i>Equipos utilizados para realizar el levantamiento topográfico.</i>                                | 71  |
| <b>Tabla 9</b> <i>Parámetros utilizados para la toma de datos</i>                                                   | 81  |
| <b>Tabla 10</b> <i>Equipo utilizado para la toma de datos RTK.</i>                                                  | 83  |
| <b>Tabla 11</b> <i>Equipo utilizado para el método NTRIP</i>                                                        | 86  |
| <b>Tabla 12</b> <i>Coordenadas ECEF transformadas a SIRGAS ECUADOR</i>                                              | 89  |
| <b>Tabla 13</b> <i>Coordenadas geodésicas transformadas a SIRGAS ECUADOR</i>                                        | 90  |
| <b>Tabla 14</b> <i>Coordenadas planas transformadas a SIRGAS ECUADOR.</i>                                           | 90  |
| <b>Tabla 15</b> <i>Comparación entre coordenadas IGS20 procesadas y coordenadas transformadas a SIRGAS-ECUADOR.</i> | 91  |
| <b>Tabla 16</b> <i>Diferencias de alturas elipsoidales entre ambos marcos.</i>                                      | 93  |
| <b>Tabla 17</b> <i>RMSE y Exactitud posicional entre marcos de referencia</i>                                       | 93  |
| <b>Tabla 18</b> <i>Desniveles observados.</i>                                                                       | 94  |
| <b>Tabla 19</b> <i>Ondulación geoidal determinada.</i>                                                              | 95  |
| <b>Tabla 20</b> <i>Diferencia entre desniveles.</i>                                                                 | 96  |
| <b>Tabla 21</b> <i>Resultados de nivelación GNSS con diferentes modelos geoidales.</i>                              | 97  |
| <b>Tabla 22</b> <i>Diferencias entre marco y época de la estación EPEC</i>                                          | 105 |
| <b>Tabla 23</b> <i>Comparativa entre estación total y RTK.</i>                                                      | 107 |
| <b>Tabla 24</b> <i>Resultados comparativos entre RTK y NTRIP</i>                                                    | 107 |
| <b>Tabla 25</b> <i>Resultados comparativos entre NTRIP y estación total.</i>                                        | 108 |
| <b>Tabla 26</b> <i>Resultados comparativos entre NTRIP y dron</i>                                                   | 108 |
| <b>Tabla 27</b> <i>Resultados comparativos entre dron y estación total</i>                                          | 109 |
| <b>Tabla 28</b> <i>Costos unitarios</i>                                                                             | 109 |

## Índice de figuras

|                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> <i>Relación de superficies de referencia vertical</i> .....                                                     | 24 |
| <b>Figura 2</b> <i>Modelo EGM08 para Ecuador</i> .....                                                                          | 25 |
| <b>Figura 3</b> <i>ITRF Distribución de las Estaciones</i> .....                                                                | 26 |
| <b>Figura 4</b> <i>Ortofoto con fotografías de la cámara WILD RC30</i> .....                                                    | 33 |
| <b>Figura 5</b> <i>Ortomosaico</i> .....                                                                                        | 34 |
| <b>Figura 6</b> <i>Ubicación del área de estudio respecto al cantón Rumiñahui</i> .....                                         | 42 |
| <b>Figura 7</b> <i>Delimitación del área de estudio</i> .....                                                                   | 43 |
| <b>Figura 8</b> <i>Mapa de hitos de control geodésico Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”</i> ....                        | 47 |
| <b>Figura 9</b> <i>Diseño geométrico Red Geodésica Local ESPE 2024</i> .....                                                    | 49 |
| <b>Figura 10</b> <i>Ubicación de las estaciones CORS REGME – Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador</i> .....               | 53 |
| <b>Figura 11</b> <i>Serie temporal de movimiento de la estación REGME EPEC</i> .....                                            | 56 |
| <b>Figura 12</b> <i>Parámetros geodésicos utilizados en el ajuste</i> .....                                                     | 57 |
| <b>Figura 13</b> <i>Tolerancia de cierre geométrico de nivelación</i> .....                                                     | 62 |
| <b>Figura 14</b> <i>Diagrama de nivelación</i> .....                                                                            | 62 |
| <b>Figura 15</b> <i>Principio de nivelación GNSS</i> .....                                                                      | 64 |
| <b>Figura 16</b> <i>IDE GEO RUMIÑAHUI</i> .....                                                                                 | 67 |
| <b>Figura 17</b> <i>Ubicación del predio matriz ESPE</i> .....                                                                  | 67 |
| <b>Figura 18</b> <i>Ubicación del predio Fabril FAME</i> .....                                                                  | 68 |
| <b>Figura 19</b> <i>Ubicación del predio Santa Barbara</i> .....                                                                | 69 |
| <b>Figura 20</b> <i>Distribución áreas de trabajo estación total</i> .....                                                      | 71 |
| <b>Figura 21</b> <i>Catálogo de objetos IGM escala 1:1000</i> .....                                                             | 75 |
| <b>Figura 22</b> <i>Importación información base digitalización ESPE</i> .....                                                  | 77 |
| <b>Figura 23</b> <i>Distribución hojas cartografía 1:1000</i> .....                                                             | 80 |
| <b>Figura 24</b> <i>Tamaños de muestra recomendados en función de la superficie del proyecto</i> .....                          | 80 |
| <b>Figura 25</b> <i>Distribución con muestra hojas escala 1:1000</i> .....                                                      | 82 |
| <b>Figura 26</b> <i>Distribución de la muestra NTRIP</i> .....                                                                  | 85 |
| <b>Figura 27</b> <i>Elenco coordenadas ECEF ajustadas red geodésica local</i> .....                                             | 87 |
| <b>Figura 28</b> <i>Elenco coordenadas geodésicas ajustadas redes geodésica local</i> .....                                     | 87 |
| <b>Figura 29</b> <i>Elenco coordenadas UTM ajustadas red geodésica local</i> .....                                              | 88 |
| <b>Figura 30</b> <i>Informe de cierres geométricos GNSS tras el ajuste</i> .....                                                | 89 |
| <b>Figura 31</b> <i>Mapa de vectores de desplazamiento entre marcos de referencia de la Red Geodésica Local ESPE 2024</i> ..... | 92 |

|                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 32</b> <i>Mapa del modelo de ondulaciones geoidales local</i> ..... | 95  |
| <b>Figura 33</b> <i>Plano topográfico ESPE 2024</i> .....                     | 100 |
| <b>Figura 34</b> <i>Ortoimagen obtenida</i> .....                             | 101 |
| <b>Figura 35</b> <i>Vectorización sobre la ortofoto</i> .....                 | 102 |
| <b>Figura 36</b> <i>Elementos que dificultan el dibujo</i> .....              | 103 |
| <b>Figura 37</b> <i>Desplazamiento debido al relieve</i> .....                | 103 |
| <b>Figura 38</b> <i>Error de exactitud temática</i> .....                     | 104 |
| <b>Figura 39</b> <i>Incompatibilidad con sensor IMU</i> .....                 | 105 |
| <b>Figura 40</b> <i>Entornos muestrales</i> .....                             | 106 |

## Resumen

Las tecnologías de captura geoespacial han avanzado desde métodos tradicionales, como la estación total, hasta técnicas más modernas como GNSS y drones. Este estudio se centra en un análisis comparativo entre levantamientos topográficos realizados con estación total y métodos no convencionales como GNSS RTK y fotogrametría de corto alcance, todos enlazados al sistema SIRGAS-ECUADOR. Se estableció una red de control horizontal en el campus ESPE Matriz, determinando la posición de 13 vértices geodésicos y sus cotas a través de nivelación geométrica.

Se levantaron 66 hectáreas a escala 1:1000 usando estación total, generando un plano de la universidad. Además, se vectorizó una ortofoto del área según la Guía de Extracción Catastral del IGM. Para garantizar la calidad, se aplicó un muestreo siguiendo el protocolo de fiscalización del IGM. Los resultados mostraron que SIRGAS-Ecuador presenta un desplazamiento de 8.25 cm respecto al marco actual y un desfase de 6.5 mm en altura elipsoidal.

Al comparar los métodos, se encontró que la precisión posicional de la estación total con GNSS RTK es de 10.3 cm, mientras que GNSS RTK y NTRIP alcanzan 17.6 cm. El dron mostró limitaciones al capturar solo detalles foto identificables, pero es más económico. En conclusión, aunque la estación total es más costosa y lenta, ofrece alta precisión; el GNSS es casi tan eficiente, pero depende de condiciones externas; el dron es el método más accesible pero limitado en detalle. Se recomienda combinar estas tecnologías según el propósito y el entorno para obtener resultados óptimos en levantamientos topográficos.

*Palabras clave:* Topografía, Sistema de Navegación Global por Satélite, Cinemático en Tiempo Real, Dron, Control de calidad, levantamientos

### **Abstract**

Geospatial capture technologies have advanced from traditional methods, such as total station, to more modern techniques such as GNSS and drones. This study focuses on a comparative analysis between total station surveying and non-conventional methods such as GNSS RTK and short-range photogrammetry, all linked to the SIRGAS-ECUADOR system. A horizontal control network was established on the ESPE Matrix campus, determining the position of 13 geodetic vertices and their elevations through geometric levelling.

A total of 66 hectares were surveyed at a scale of 1:1000 using a total station, generating a plan of the university. In addition, an orthophoto of the area was vectorised according to the IGM Cadastral Extraction Guide. To ensure quality assurance, sampling was applied following the IGM survey protocol. The results showed that SIRGAS-Ecuador presents a displacement of 8.25 cm with respect to the current frame and an offset of 6.5 mm in ellipsoidal height.

When comparing the methods, the positional accuracy of the total station with GNSS RTK was found to be 10.3 cm, while GNSS RTK and NTRIP reach 17.6 cm. The drone showed limitations in capturing only photo-identifiable details, but it is more economical. In conclusion, although the total station is more expensive and slower, it offers high accuracy; GNSS is almost as efficient but depends on external conditions; the drone is the most affordable method but limited in detail. It is recommended to combine these technologies according to the purpose and environment to obtain optimal results in topographic surveys.

*Keywords:* Surveying, Global Navigation Satellite System, Real Time Kinetics, Drone, Quality control.

## **Capítulo I**

### **Introducción y estado del arte**

#### **Introducción**

La geomática es un arte y una ciencia que ha existido desde la antigüedad y ha venido sufriendo una variación en el espacio y el tiempo al punto de hoy en día ser una rama muy extendida de las geociencias y que el avance tecnológico ha provisto de nuevas herramientas para la captura de la información geoespacial. Sin embargo, dicha tecnología responde a métodos directos e indirectos de observación, cada uno con un campo específico de acción definido por lo que se requiere analizar por separado en diferentes entornos para determinar la fiabilidad de los productos entregables en cada tecnología existente actualmente.

Actualmente ya no existen las limitantes de los topógrafos clásicos, se cuenta con tecnología de navegación satelital GNSS con métodos a tiempo real, las cuales pueden entregar coordenadas a tiempo real de cualquier punto que deseemos sobre la superficie terrestre de forma rápida y sencilla, se cuenta con aeronaves no tripuladas las cuales están a la disposición de cualquier usuario que pueden generar fotografía aérea a bajo costo, y finalmente la clásica estación total muy popular y utilizada en muchos trabajos geomáticos, la cual ha ido avanzando de acuerdo a las necesidades de los usuarios, sin embargo cada una de ellas cuenta con limitaciones en su efectividad y resultados, por lo que a través del método de observación directa en el Campus Matriz de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” se puso a prueba los tres métodos para capturar información y generar productos topográficos, siendo el principal instrumento que se utilizó la Estación Total Trimble M3 5” DR, seguido de los equipos GNSS Trimble R8s y el UAV DJI Mavic 3 Enterprise, con los cuales se levantó la misma área de estudio para finalmente aplicar medios de control de calidad para determinar el mejor de los tres métodos.

## **Estado del arte**

Al ser un tema de relevancia mundial se han realizado una serie de estudios en este campo para su discusión en academia y campo. Para el desarrollo del presente trabajo se realizó una revisión de la literatura preexistente donde se hallaron publicaciones científicas de índole nacional e internacional relacionados al tema de estudio.

### ***Casos de estudio nacionales***

- Martínez y Bermeo (2023) en su tesis de grado realizan un análisis entre tecnología GNSS y UAV LIDAR donde demuestran que las precisiones son idénticas para trabajos de topografía en general a través del análisis del RMSE.
- Baque-Solis et al. (2022) con el artículo de investigación “Análisis comparativo topográfico sobre levantamientos altimétricos con RTK GNSS, Estación Total y Drone” en Manta demostró que en un terreno llano los tres métodos tienen los mismos resultados. El análisis de costos y actividades realizadas en cada sistema determinaron que el levantamiento topográfico con RTK GNSS, es el más eficiente en cuanto a tiempo, pero demanda de alta cantidad de costos y poca mano de obra, no obstante, es muy sensible en lo referente a la accesibilidad al área de estudio, de igual forma el dron sufre limitaciones en terrenos boscosos. Sin embargo, la estación total demuestra ser el método más fiable de los tres analizados.
- Yamasqui (2022) en su tesis de grado concluyo lo siguiente: El levantamiento topográfico mediante la aerofotogrametría resulta 66,09% más económico y el 63,23% más rápido que el levantamiento mediante GPS diferencial, lo cual demuestra que este método alternativo resulta más factible al momento de realizar un levantamiento topográfico en una zona de estudio con un terreno clasificado como plano y ondulado, con pequeños accidentes topográficos y una importante vegetación. Adicional afirma que la variación entre las coordenadas

planas entre métodos es mínima, sin embargo, en la parte vertical se observa un error medio de 44.8 cm.

- Jiménez & Prado (2017) demostró que la precisión de técnicas aerofotogramétricas en promedio en zonas con y sin vegetación es de 0.2815 m. y se recomienda utilizar estas técnicas para la captura de información, dicha conclusión lo logro mediante regresiones lineales entre los métodos.
- Tacuri et al. (2017) publicó un artículo titulado “USO DE IMÁGENES DE RPAS PARA GENERACIÓN DE TOPOGRAFÍA A DETALLE” donde mediante técnicas GNSS y fotogramétricas se evaluó la calidad en un MDT obtenido con una aeronave UAV, en el cual de 30 puntos de muestra 28 cumplen la norma IGM para generar cartografía escala 1:1000.

### ***Casos de estudios internacionales***

- Tamimi & Toth (2024) demostró que un UAV con LIDAR incorporado logra precisiones de 7 cm en vías siendo una alternativa a métodos convencionales, pero en zonas de vegetación frondosa el RMSE aumenta a 21 cm por lo que lo convierte en una limitante.
- Bejarano & Palomino (2022) afirma que el costo unitario del levantamiento topográfico convencional con estación total es la mitad del costo del uso del dron, adicional la precisión alcanzada por la estación total es la mitad de la del dron, es un 98.39% más optimo la estación total, pero con el uso de la aeronave UAS es 57.35% más eficiente el tiempo de trabajo de campo y gabinete.
- Hussein & Yaseen (2021). Demuestra lo siguiente: Según los resultados obtenidos, la precisión de la red de referencia con Estación Total (ET) determinada fue inferior a 1.3 mm de desviación típica tanto para las coordenadas horizontales como verticales de todos los puntos. Este resultado se

ha logrado gracias a las mediciones redondas y a las mediciones de dos caras de la ET. En los mismos puntos de control de la red, se realizó el método RTK-GNSS y según el resultado obtenido, las desviaciones estándar para Este fueron de 9 mm en Norte 11.8mm y 9 mm en coordenada de elevación, esto indica que las mediciones repetidas fueron bastante cercanas entre sí. La precisión de las mediciones RTK en la red, que se expresa por RMSE son, este 8 mm, en norte 10,6 mm, y 8,4 mm en coordenadas de elevación, mientras que la precisión obtenida utilizando observaciones ET fue representada por RMSE, son 11.69 mm para norte, 9.93 mm en este y 1.34 mm en coordenadas de elevación.

- Urtega (2021) afirma que, empleando estación total, se obtiene una buena calidad de acuerdo con la precisión con un costo y tiempo de trabajo alto, obteniendo una productividad de 59 % con respecto a los otros equipos y cercana a la media. Empleando GPS diferencial se obtiene una calidad de precisión baja, un tiempo de trabajo medio y un precio alto; obteniendo una productividad de 22 % con respecto a los otros equipos. Empleando Dron, se obtiene una precisión alta, un tiempo de trabajo y precio bajo, obteniendo una productividad de 90 % con respecto a los otros equipos, superior a la media. Con respecto a la precisión, el levantamiento topográfico con Dron y la Estación Total, resultan ser 3 veces mayor que el levantamiento con GPS Diferencial. Al efectuar el trabajo topográfico con el Dron, se requiere 6 veces menos tiempo que el trabajo con la estación total y 3 veces menos tiempo que el trabajo con GPS diferencial. Respecto al costo, el levantamiento topográfico con el Dron es 1.333 veces mayor que el levantamiento topográfico con la Estación Total y 1.31 veces menor que el levantamiento con el GPS Diferencial. Este resultado nos muestra que los tres instrumentos de medición no difieren tan ampliamente y dichos datos son válidos para trabajos de precisión, no obstante, al aplicar

métodos más rigurosos y compararlos entre sí, se obtiene que, si existe diferencia significativa (pero esta es relativamente mínima), dando como resultado que el dron es el equipo con más precisión.

- Jiménez et al. (2019) determino que las comparativas entre estación total, GNSS y UAV se obtiene un error similar en planimetría, pero se obtiene un error mayor en la componente vertical, determina que el dron tiene un mayor tiempo de trabajo en gabinete.

## **Objetivos**

### **General**

- Realizar el análisis comparativo entre levantamiento topográfico con estación total y levantamientos no convencionales como posicionamiento GNSS – RTK y fotogrametría de corto alcance.

### **Específico**

- Realizar el análisis comparativo entre levantamiento topográfico con estación total y levantamientos de posicionamiento GNSS – RTK.
- Realizar el análisis comparativo entre levantamiento topográfico con estación total y fotogrametría de corto alcance.

## **Capítulo II**

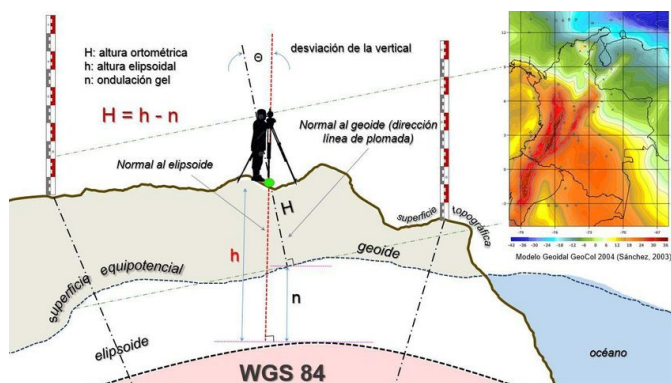
### **Marco teórico/Marco Conceptual**

#### **Superficies de referencia**

Las superficies de referencia (SR) son modelos matemáticos que representan la forma de la Tierra. Son esenciales en cartografía, geodesia y otras disciplinas que se ocupan de la medición y representación de la superficie terrestre. De Vries (2009). Su comprensión es fundamental para proyectos que involucran la forma y dimensiones del planeta, como la creación de mapas, la navegación y el modelado de la Tierra. Smith & Rignot (2015).

**Figura 1**

Relación de superficies de referencia vertical.



Fuente: Jiménez et al (2017)

### Elipsoide

Un elipsoide es una figura geométrica tridimensional que se genera al rotar una elipse alrededor de su eje mayor Wylie (1982, p. 187). Al igual que la esfera, todos los puntos de su superficie equidistan de un centro, pero en este caso las distancias varían según el eje de rotación.

### Geoide

El geoide es una superficie equipotencial aproximada de la Tierra, es decir, la forma que tendría el nivel del mar si no estuviese afectado por la distribución irregular de las masas terrestres Torge (2001, p. 9). Se considera la figura más cercana a la forma real de la Tierra.

### WGS84

Según la NGA (National Geospatial-Intelligence Agency), el WGS84 (World Geodetic System 1984) es un sistema de coordenadas geográficas globalmente utilizado para la ubicación precisa en la superficie terrestre. Fue desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos y la Agencia Espacial Nacional en 1984. Este sistema proporciona un marco de referencia estándar para la cartografía, sistemas de posicionamiento global (GPS) y otras aplicaciones que requieren coordenadas geoespaciales precisas a nivel mundial NGA Geomatics - WGS 84 (s. f.).

### **GRS80**

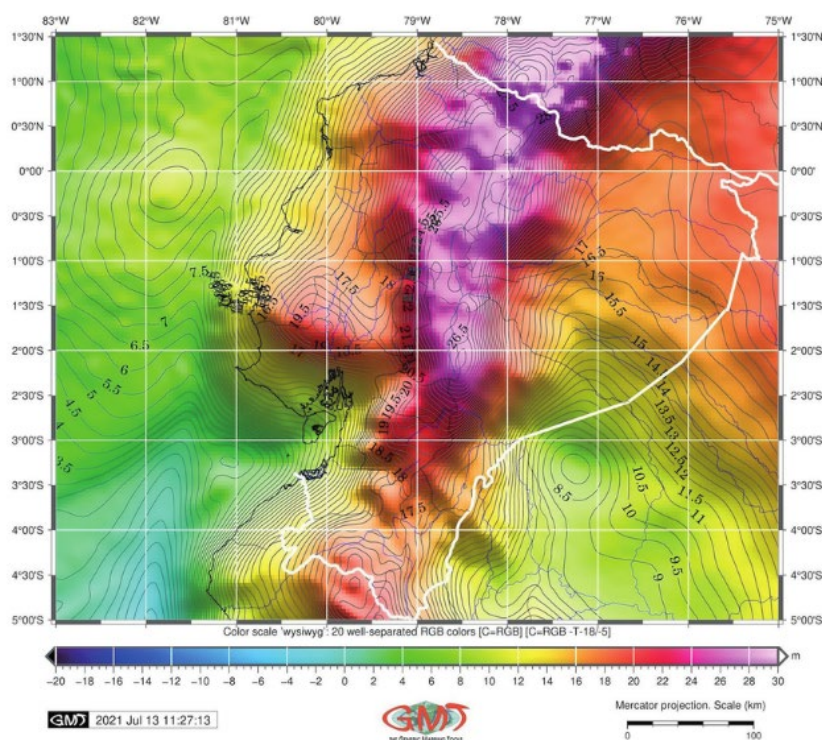
El GRS80 (Geodetic Reference System 1980) es un modelo geodésico que define las dimensiones y la forma de la Tierra utilizadas como base para la medición y la representación cartográfica en América Latina. SIRGAS (2010).

### **EGM08**

El Modelo Gravitatorio de la Tierra 2008 (EGM08), desarrollado por la NGA, representa la forma de la Tierra con alta precisión, similar al nivel del mar en ausencia de perturbaciones. Es fundamental para corregir alturas en GPS, crear mapas de altura precisos, realizar cálculos geodésicos y estudiar la estructura interna de la Tierra. Basado en datos de gravedad terrestre y altimetría satelital, ofrece una precisión de hasta 10 cm en la mayoría de las regiones, convirtiéndolo en una herramienta invaluable para diversas disciplinas científicas y técnicas Pavlis et al., (2012).

### **Figura 2**

#### *Modelo EGM08 para Ecuador*



Fuente: Lemenkova (2022)

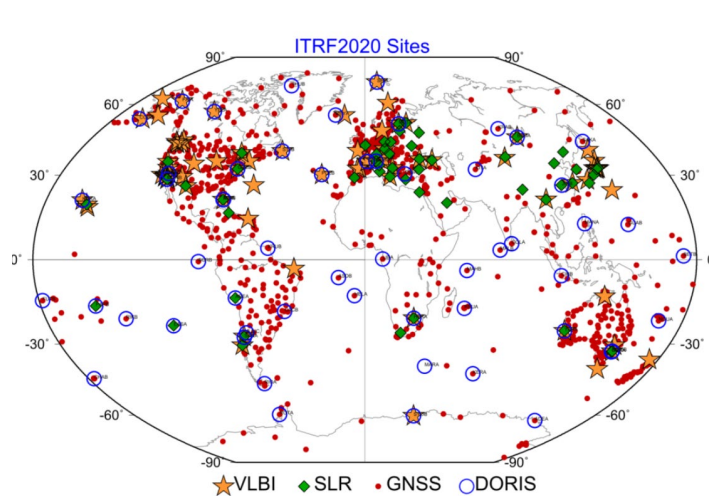
### Marcos de referencia

Los marcos de referencia geodésicos son sistemas de coordenadas que permiten ubicar puntos en la superficie terrestre de manera precisa y consistente. Estos marcos definen un origen, unas direcciones y una escala, proporcionando una base para la medición y representación de la Tierra. Son esenciales para diversas aplicaciones, como la cartografía, la navegación, la geodesia y la ingeniería IAG (2012).

El International Terrestrial Reference Frame (ITRF) es un marco de referencia geodésico global utilizado para determinar posiciones precisas en la superficie terrestre. Se basa en una red de estaciones geodésicas alrededor del mundo y se determinan mediante técnicas como GNSS, VLBI, SLR y DORIS. Proporciona un sistema de coordenadas tridimensional y temporal, permitiendo la medición precisa de movimientos tectónicos, niveles del mar y otros fenómenos geofísicos. Altamimi et al. (2016).

### Figura 3

*ITRF Distribución de las Estaciones*



Fuente: Altamimi et al. (2016).

En el marco del Sistema de Referencia Geodésico para las Américas (SIRGAS), el IGS20 (International GNSS Service 2020) representa la más reciente realización del marco de referencia IGS (International GNSS Service). Esta nueva versión, implementada a partir de la

semana GPS 2238 (27 de noviembre de 2022), se caracteriza por una mayor precisión y estabilidad, consolidándose como un referente fundamental para las actividades geodésicas y científicas en la región. SIRGAS (2024).

### **Sistemas de coordenadas**

En el ámbito de la geodesia y las ciencias de la Tierra, los sistemas de coordenadas son conjuntos de valores numéricos que se utilizan para identificar la posición de un punto en el espacio (Ahlgren & Moudrost, 2016). Estos sistemas son esenciales para diversas aplicaciones, como la cartografía, la navegación, la geodesia y la ingeniería. Kaplan (2005).

#### ***Sistema de coordenadas cartesianas – ECEF***

Utilizan tres ejes ortogonales (X, Y, Z) para definir la posición de un punto en el espacio (Ahlgren & Moudrost, 2016). Las coordenadas cartesianas se expresan como un triplete de números (x, y, z), donde cada número representa la distancia del punto a cada uno de los ejes.

#### ***Sistema de coordenadas geodésicas***

Utilizan latitud y longitud para definir la posición de un punto en la superficie terrestre Kaplan (2005). La latitud es el ángulo que forma la vertical del punto con el plano del ecuador, y se mide en grados (°) norte o sur. La longitud es el ángulo que forma el meridiano del punto con el meridiano de Greenwich, y se mide en grados (°) este u oeste.

#### ***Sistemas de coordenadas locales***

El Sistema de Coordenadas Locales UTM (Universal Transversa de Mercator) (Kraus, 1997) es un sistema de referencia bidimensional que facilita la ubicación y representación de puntos en la Tierra. Este sistema se basa en la proyección cilíndrica transversa de Mercator, dividiendo la superficie terrestre en zonas y cuadrículas rectangulares.

### **GNSS**

Según Goodchild (2010), en su Manual de la Tierra Digital, los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) se definen como redes de satélites artificiales que orbitan la

Tierra y emiten señales que permiten determinar la posición, velocidad y tiempo de un receptor en cualquier punto de la superficie terrestre con una precisión extremadamente alta.

### **Constelaciones GNSS**

#### ***NAVSTAR/GPS***

El GPS, desarrollado por Estados Unidos, ha sido fundamental en la evolución de los sistemas de navegación. Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Collins (2008).

Tiene su origen en Estados Unidos, fue el primer sistema GNSS en ser desarrollado y sigue siendo el más utilizado a nivel.

#### ***GLONASS***

GLONASS, el sistema ruso de navegación por satélite, ha experimentado un resurgimiento en los últimos años. Kaplan & Hegarty (2006).

#### ***GALILEO***

Galileo, el sistema europeo de navegación por satélite, ofrece una alternativa civil al GPS y GLONASS. Gálvez (2012).

#### ***COMPASS/BEIDOU***

BeiDou, el sistema chino de navegación por satélite ha ganado importancia en los últimos años, especialmente en la región Asia-Pacífico. Yang (2019), ofrece una cobertura regional que se está expandiendo a nivel global.

### **Métodos de posicionamiento GNSS**

Los métodos de posicionamiento GNSS son diversos y se ajustan a distintas necesidades y niveles de precisión. Entre los más importantes están el método estático, el RTK (Real-Time Kinematic) y el NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle (2008).

#### ***Método estático***

El posicionamiento estático implica que los receptores GNSS permanezcan en un punto fijo durante un tiempo prolongado. Esto permite la recopilación de datos muy precisos que luego se

procesan para obtener coordenadas exactas. Este método es ideal para aplicaciones geodésicas y topográficas que requieren alta precisión. Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle (2008); Leick (2004).

### ***Posicionamiento RTK***

El método RTK, por otro lado, usa correcciones en tiempo real enviadas desde una estación base a los receptores móviles. Esto permite obtener precisiones de hasta unos pocos centímetros de forma instantánea. RTK es especialmente útil en aplicaciones que requieren alta precisión y rapidez, como la agricultura de precisión, la construcción y la ingeniería civil. Hofmann-Wellenhof et al. (2008).

### ***Posicionamiento NTRIP***

El método NTRIP permite transmitir datos de corrección en tiempo real a través de Internet, lo que facilita el uso de RTK sin necesidad de tener una estación base cercana. Los datos de corrección se envían desde una red de estaciones base a los receptores móviles, mejorando la precisión y reduciendo la dependencia de infraestructura local. Rizos & Han, (2003).

### **Consideraciones para el posicionamiento GNSS**

Los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS), como GPS, GLONASS, BeiDou y Galileo, han revolucionado la forma en que determinamos nuestra posición en el mundo. Sin embargo, la precisión y confiabilidad de las medidas GNSS dependen de diversos factores como la visibilidad del cielo, multitud de satélites, calidad de señal, tipo de receptor GNSS, posicionamiento, estos deben ser considerados para obtener resultados confiables. Bickel & Mohamed (2013).

### ***PDOP (Geometría de Posición Diluida)***

El PDOP (Position Dilution of Precision) es un indicador de la calidad de la geometría satelital para el posicionamiento GNSS. Leick, Tiberius, & Kouba (2015).

Un PDOP bajo (menor a 4) indica una buena geometría, con satélites bien distribuidos en el cielo, lo que resulta en mayor precisión en la determinación de la posición. Por el contrario, un

PDOP alto (mayor a 8) indica una geometría deficiente, con satélites concentrados en una zona del cielo, lo que puede llevar a errores significativos en la posición. Kaplan & Hegarty (2006).

### ***Intervalos de registro***

La frecuencia de registro de los datos GNSS también influye en la precisión del posicionamiento. En general, un mayor intervalo de registro (por ejemplo, cada segundo) permite capturar más datos y mejorar la precisión, especialmente en entornos dinámicos. Sin embargo, esto también aumenta el volumen de datos a procesar, lo que puede ser un problema para dispositivos con recursos limitados. Wolf & Ghilani (2015)

### **Precisión moderada.**

Intervalos de registro de 1-5 segundos son adecuados para mapeo general, levantamientos catastrales y aplicaciones donde la precisión moderada es suficiente. Parkinson et al. (1996) Parkinson et al. (1996) en su investigación sobre el uso de GNSS para mapeo general, encontraron que un intervalo de registro de 2 segundos proporcionaba un equilibrio adecuado entre precisión y eficiencia en la recolección de datos, cubriendo áreas extensas sin comprometer la calidad de la información posicional.

### **Alta precisión.**

Una de las principales ventajas de los receptores de alta precisión radica en la posibilidad de utilizar intervalos de registro más cortos, que oscilan entre 0.1 y 1 segundo. Esta característica permite capturar una mayor cantidad de datos en un período de tiempo determinado, lo que se traduce en una mayor precisión posicional. Gendt & Reigber (2000).

En un estudio de investigación científica que utiliza un receptor GNSS de alta precisión para medir movimientos tectónicos, se emplea un intervalo de registro de 0.5 segundos. Gendt & Reigber (2000). Esto permite capturar datos detallados de la deformación de la corteza terrestre con una alta precisión, lo cual es crucial para comprender los procesos geofísicos que ocurren en el interior del planeta.

### ***Épocas***

En el contexto del posicionamiento GNSS, una época se refiere a un conjunto de mediciones GNSS realizadas en un instante específico. La precisión de la posición se calcula a partir de la información contenida en una época. En algunos casos, puede ser necesario promediar varias épocas para obtener una estimación más precisa de la posición, especialmente en entornos con ruido o señal débil. Kraus (2007).

### ***Angulo de corte***

El ángulo de corte es el ángulo entre la línea de visión hacia un satélite y el horizonte. Un ángulo de corte bajo (menor a 15 grados) indica que el satélite está cerca del horizonte, lo que aumenta la susceptibilidad a errores atmosféricos y multitrayectoria. Por lo tanto, se recomienda excluir satélites con ángulos de corte bajos de los cálculos de posicionamiento para mejorar la precisión y confiabilidad. Bickel & Mohamed (2013).

### ***Nivelación***

Wolf & Ghilani (2015) afirman que “Nivelación es un término que se aplica a cualquiera de los diversos procedimientos a través de los cuales se determinan elevaciones o diferencias entre las mismas” (p. 72.).

#### **Tipos de nivelación.**

De acuerdo Casanova, L. (2002). Existen diferentes nivelaciones.

#### **Nivelación diferencial.**

Es el procedimiento topográfico que nos permite determinar el desnivel entre mediante el uso de nivel y la mira vertical.

#### **Nivelación taquimétrica.**

Es un procedimiento topográfico que se apoya en la medición óptica de distancias para la ubicación plano-altimétrica de puntos sobre la superficie terrestre

### **Nivelación trigonométrica.**

La diferencia de elevación o desnivel entre dos puntos puede determinarse midiendo: (1) la distancia inclinada u horizontal entre los puntos y (2) el ángulo cenital o el ángulo vertical entre los puntos.

### **Nivelación GNSS.**

La nivelación GPS es un término que cubre la determinación eficiente de alturas físicas o en su defecto alturas geométricas referidas al nivel medio del mar, mediante posicionamiento GNSS, y la inclusión de la ondulación geoidal. Este método es asequible para aplicaciones, donde la precisión de centímetros es suficiente o para regiones donde la infraestructura de referencia de altura no está disponible. Existe, así también, limitaciones para el método nivelación GPS, que se relacionan con la sensibilidad del tipo de observaciones satelitales ya que se debe considerar las circunstancias ambientales, incluido el estado de la ionosfera/troposfera, los trayectos múltiples y los objetos de bloqueo de señales; por lo tanto, se debe prestar especial atención a la selección del sitio y las mediciones GNSS. Kenyeres (2016).

### **Levantamiento topográfico – Método de poligonales**

Según Wolf & Ghilani “Una poligonal es una serie de líneas consecutivas cuyos extremos se han marcado en el campo, así como sus longitudes y direcciones se han determinado a partir de mediciones en el campo”. (p.255).

### **Precisión relativa**

Según García González, G. (2005). La precisión relativa se refiere a la relación o proporción que existe entre la precisión de una medición dada y el valor de la medición es sí. Entonces si  $D$  es la distancia medida y  $OD$  es la medición, la precisión relativa será  $OD/D$

La precisión relativa es una cantidad que puede expresarse con un porcentaje o una proporción fraccionaria como 1:5000, 1:10000 o como partes por millón (PPM). Esta última es la que utilizan los distanciómetros electrónicos (EDM) de alta precisión en la medición de distancias.

La precisión relativa se puede evaluar después de que una medición y su precisión se han determinado o pueden ser dadas al principio y empleadas para determinar la tolerancia requerida en las mediciones.

### **Estación total**

Según Wolf, P., & Ghilani, C (2015) “Los instrumentos de estación total (llamados también taquímetros electrónicos) combinan un instrumento de MED, un teodolito digital electrónico y una computadora en una sola unidad. Estos dispositivos, miden automáticamente ángulos horizontales y cenitales (o verticales), así como distancias y transmiten los resultados en tiempo real a una computadora incorporada” (p.153).

### **Fotogrametría**

Según Peña, J. S., & Méndez, T. S. (1998) “Es la ciencia por medio de la cual, a partir de fotografías del terreno, se consigue deducir su planta y su alzado, llegando a formar un plano topográfico del mismo” (p.9)

### **Fotografía aérea**

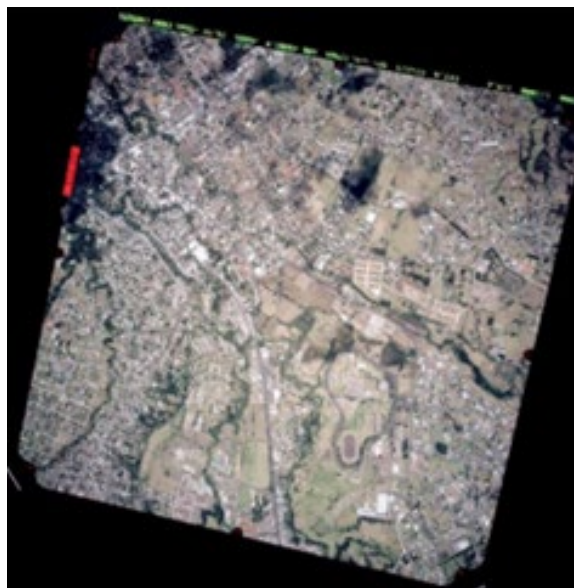
Según Ricouz (2010) la fotografía aérea es la captura de imágenes del suelo desde una plataforma elevada, generalmente un avión, helicóptero, o dron, cuyas imágenes pueden ser utilizadas para diversas aplicaciones como cartografía, monitoreo ambiental, y planificación urbana.

### **Ortofoto**

Según IGM (2023), es una presentación fotográfica de una zona de la superficie terrestre, en la que todos los elementos presentan la misma escala, libre de errores y deformaciones, con la misma validez de un plano cartográfico, se obtiene a partir de las perspectivas de la imagen y se ha rectificado la imagen del terreno según una proyección ortogonal vertical.

### **Figura 4**

*Ortofoto con fotografías de la cámara WILD RC30*



*Fuente: (IGM, 2002)*

### ***Errores de la ortofoto***

Algunos de los principales errores que pueden presentar las ortofotos según diversos autores son que según Parracho (2021) son:

- Errores de desplazamiento por relieve.
- Errores de distorsión de lentes.
- Errores de calibración.
- Errores de muestreo y cuantificación.
- Errores de datos auxiliares.
- Errores de procesamiento.

### ***Ortomosaico***

Proviene de la fusión y/o unión de varias ortofotos de una zona conocida, como se ve en la figura 5, luego con las mismas características obtenidas del proceso fotogramétrico pre ejecutado, llegando a tener una vista global del área de estudio y ayudando a interpretar elementos espaciales, deformaciones, entre otros usos.

### ***Figura 5***

## Ortomosaico



*Fuente: DJI (2021)*

### **Restitución fotogramétrica digital**

Una restitución fotogramétrica puede ser considerada como el proceso principal de extracción de datos a partir de imágenes digitales, el objetivo de la restitución es obtener la interpretación de diversas características evidentes en el suelo y la adquisición estos elementos geográficamente referenciados (coordenadas en el espacio-objeto) con el fin de componer el mapa base de esa región, a una escala dada, mediante la utilización de los sistemas CAD ( Dibujo asistido por computadora) con soporte para los sistemas de coordenadas cartográficas Coelho & Núñez Brito (2007).

### **Digitalización**

La captura de la información se realiza en dos dimensiones mediante fotoidentificación de los elementos con el uso de ortofotos / ortomosaico y las especificaciones requeridas a la escala para el levantamiento espacial de la cartografía vectorial; considerando los catálogos de objetos IGM escalas 1: 1 000 y 1:5 000. Para realizar la digitalización es necesario definir un SIG con las diferentes herramientas de edición y análisis espacial para el correcto trazo de la información. Posterior al trazo, se debe garantizar una correcta estructuración, catalogación y control topológico de la cartografía. Instituto Geográfico Militar (2022),

### **Aeronaves UAS**

Según Valverde, S. A., Appel, A. F., & Rimolo-Donadio, R. (2018). Las tecnologías de sistemas aéreos no tripulados (UAV, del inglés Unmanned Aerial Vehicle), popularmente conocidas como drones, se han diversificado y popularizado masivamente en la última década con un amplio espectro de aplicaciones, desde recreativas hasta científicas. Según la estructura de la aeronave, los drones pueden ser multirrotores o de ala fija.

Mientras que los primeros asemejan más un helicóptero con múltiples rotores, los segundos funcionan bajo el principio de sustentación de un avión. Los sistemas multirrotores usualmente poseen entre cuatro y ocho rotores, son altamente maniobrables y pueden mantenerse en una posición fija durante el vuelo. Al poder sortear mejor los obstáculos pueden volar a muy baja altura, por lo que logran obtener mejor resolución espacial; sin embargo, son más lentos y tienen una autonomía limitada debido al alto consumo de los múltiples rotores, casi siempre por debajo de 30 minutos para sistemas de escala pequeña (menor a 2 kg). Los vehículos de ala fija usan uno o dos motores, lo que les confiere una autonomía mayor. Al volar más rápidamente y con menor esfuerzo cubren extensiones más amplias, pero deben volar a mayor altura, lo que limita la resolución espacial.

### **Puntos de control terrestre (GCP)**

Un punto de control es un sitio físico en tierra del cual es conocida su posición respecto a un sistema de coordenadas, y puede utilizarse como guía. Cruz (2008).

Generalmente estos puntos se establecen con la finalidad de ofrecer información de gran utilidad en los procesos de georreferenciar objetos espaciales y/o fenómenos de interés de acuerdo con las necesidades o naturaleza específica de cada proyecto.

Pérez (2001) establece que para tener un mayor control en la corrección plani-altimétrica de las imágenes, es necesario el establecimiento de cinco (05) puntos, distribuidos en las esquinas y uno en el centro, esto con la finalidad de obtener una mayor precisión al momento de efectuar el proceso de restitución, ya que resulta arriesgado realizarla fuera de los límites que encierra

el cuadrilátero que une estos puntos. De igual forma poder corregir las inclinaciones longitudinales y transversales de la fase de orientación absoluta.

### **Geoetiquetado de imágenes**

El geoetiquetado de imágenes es un proceso mediante el cual se asocian coordenadas geográficas (latitud y longitud) a una imagen digital. Esta técnica, también conocida como georreferenciación, permite que las fotografías tengan información espacial precisa sobre el lugar donde fueron capturadas. Buitrago (2019).

### **Modelo Digital del Terreno – MDT**

Se denomina MDT al conjunto de capas (generalmente ráster) que representan distintas características de la superficie terrestre derivadas de una capa de elevaciones a la que se denomina Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Aunque algunas definiciones incluyen dentro de los MDT prácticamente cualquier variable cuantitativa regionalizada, aquí se prefiere limitar el MDT al conjunto de capas derivadas del MDE. Felicísimo (1994)

### **Modelo Digital de Elevaciones – MDE**

Un modelo digital de elevación (MDE) es uno de los conjuntos de datos espaciales más importantes en muchos sistemas de información geográfica (SIG). Se define como un conjunto digital ordenado o desordenado de elevación del terreno (altura del punto).

Un MDE es un modelo de superficie del terreno "desnudo", supuestamente libre de árboles, edificios u otros objetos "no terrestres". Zhou (2017)

Formato ráster, es el más adecuado para la integración de las elevaciones en un SIG ya que va a permitir la utilización de diversas herramientas para la obtención de nuevos mapas a partir del MDE; por tanto, va a ser el que se trate en este tema. Felicísimo (1994)

### **Modelo Digital de Superficies – MDS**

Un MDS es un modelo de elevación que incluye la parte superior de todo, incluidos los edificios, las copas de los árboles, y el suelo donde no hay nada encima. Zhou (2017).

### **Software SIG**

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) se puede conceptualizar como un enfoque o técnica de manipulación de datos geográficos que permite eficientemente fusionar datos fundamentales con el propósito de obtener información resultante. Para lograrlo, se utilizan tanto las fuentes de información como un conjunto de recursos informáticos (tanto hardware como software) diseñados para facilitar esta labor. Todo este proceso se enmarca en un proyecto delineado por un grupo de individuos y es supervisado por expertos técnicos que se encargan de su implementación y evolución. En resumen, un SIG representa una herramienta con la capacidad de unir información visual (como mapas) y datos numéricos (como estadísticas) para generar información derivada relativa al espacio geográfico. Domínguez (2000).

### **Software CAD**

La aplicación del software CAD en la ingeniería abarca la elaboración de cuadros sinópticos, diagramas de diversos tipos, gráficos estadísticos, representación normalizada de piezas para su diseño y fabricación, representación tridimensional de modelos dinámicos en multimedia, análisis con elementos finitos, aplicaciones en realidad virtual, robótica, etc.

Los softwares CAD pueden ser usados de dos maneras generales, a través de lenguajes de programación y de paquetes aplicativos. Semco (2005)

El desarrollo a través de lenguajes de programación abiertos implica un amplio dominio, conocimiento de las tecnologías de exhibición, manejo del análisis matemático, geométrico y vectorial (softwares abiertos más usados: Java y Visual Basic); en cambio el uso de paquetes aplicativos debido a su amplio desarrollo acelerado, su especialización en los diferentes campos de aplicación, su diseño de arquitectura abierta y su facilidad de uso han permitido su rápida aceptación y adopción. El CAD es una técnica de análisis, una manera de crear un modelo del comportamiento de un producto aún antes de que se haya construido. Los dibujos en papel pueden no ser necesarios en la fase del diseño.

## **Geodatabase**

Es un conjunto de datasets geográficos de distintas clases que están almacenados en una carpeta común del sistema de archivos o en un sistema de administración de bases de datos relacionales multiusuario, como IBM Db2, Microsoft SQL Server, Oracle, PostgreSQL o SAP HANA. Las geodatabases pueden tener muchos tamaños, poseer un número variado de usuarios y ser bases de datos pequeñas de un solo usuario creadas en archivos o bases de datos más grandes de grupos de trabajo, departamentos y geodatabases corporativas a las que acceden muchos usuarios. Bajjali (2018).

Pero una geodatabase es algo más que un conjunto de datasets. El término geodatabase tiene los siguientes significados en ArcGIS:

- La geodatabase es la estructura de datos nativa de ArcGIS y es el formato de datos primario para la edición y la administración de datos. Aunque ArcGIS trabaja con información geográfica en una gran cantidad de formatos de archivos de sistema de información geográfica (SIG), está diseñado para trabajar con los recursos de la geodatabase y aprovecharlos.
- Es el almacenamiento físico de la información geográfica y usa, principalmente, un sistema de administración de bases de datos o un sistema de archivos. Puede acceder a la instancia física del conjunto de datasets y trabajar con ella en ArcGIS o mediante un sistema de administración de base de datos que utilice SQL.

## **Control de calidad de datos geográficos**

El control de calidad de datos geográficos se refiere al conjunto de procesos y procedimientos destinados a garantizar que los datos geoespaciales cumplan con los estándares y requisitos necesarios para su uso efectivo y confiable. Este control implica varias etapas, que incluyen:

- Evaluación de la calidad: Se lleva a cabo mediante la verificación de la exactitud, consistencia, completitud y actualidad de los datos geográficos. Esto permite identificar y

medir errores que pueden surgir en diferentes fases del ciclo de vida de los datos, desde su captura hasta su análisis y presentación.

- Detección y corrección de errores: Los errores pueden ser introducidos durante la recolección, procesamiento o almacenamiento de los datos. Por lo tanto, es crucial implementar métodos para detectar estos errores, que pueden incluir análisis visual y análisis automatizado, así como el uso de métricas específicas como el error medio cuadrático y la matriz de confusión.
- Documentación y metadatos: Un aspecto esencial del control de calidad es la creación de metadatos que describan la calidad de los datos, su origen y las metodologías utilizadas en su producción. Esto permite a los usuarios evaluar la idoneidad de los datos para sus necesidades específicas.
- Establecimiento de estándares: La adopción de normas y estándares internacionales, como la norma ISO 19157:2013, ayuda a establecer criterios claros para la calidad de los datos geográficos, facilitando la comparación y el intercambio de datos entre diferentes organizaciones y usuarios.

### **Normas de calidad**

#### ***Norma ISO***

Las normas ISO, especialmente la serie ISO 19100, proporcionan un marco global para la gestión de información geográfica, abarcando aspectos de calidad, metadatos y estándares de intercambio. Son ampliamente reconocidas y aplicadas internacionalmente. Zanetti et al. (2018).

#### ***Norma NTE INEN***

Las Normas NTE INEN (Normas Técnicas Ecuatorianas del Instituto Ecuatoriano de Normalización) son un conjunto de regulaciones y estándares que establecen requisitos técnicos y de calidad para productos, servicios y procesos en Ecuador. Estas normas buscan

asegurar la calidad, seguridad y eficiencia de los bienes y servicios ofrecidos en el país, promoviendo la competitividad y protección del consumidor. INEN (2024)

### ***Norma NSSDA***

Los NSSDA proporcionan métodos específicos para evaluar la precisión posicional de datos geoespaciales en Estados Unidos. Se centran en la cuantificación de errores y la implementación de controles de calidad rigurosos. Zanetti et. al. (2018)

### **Exactitud posicional**

La exactitud posicional en el ámbito de la cartografía y la geo informática, focalizándose en la evaluación detallada y precisa de la ubicación geoespacial de objetos. Se exploran diversas metodologías para medir y mejorar la precisión posicional, considerando la influencia de factores técnicos, tecnológicos y metodológicos en la calidad de los datos cartográficos. López (2014).



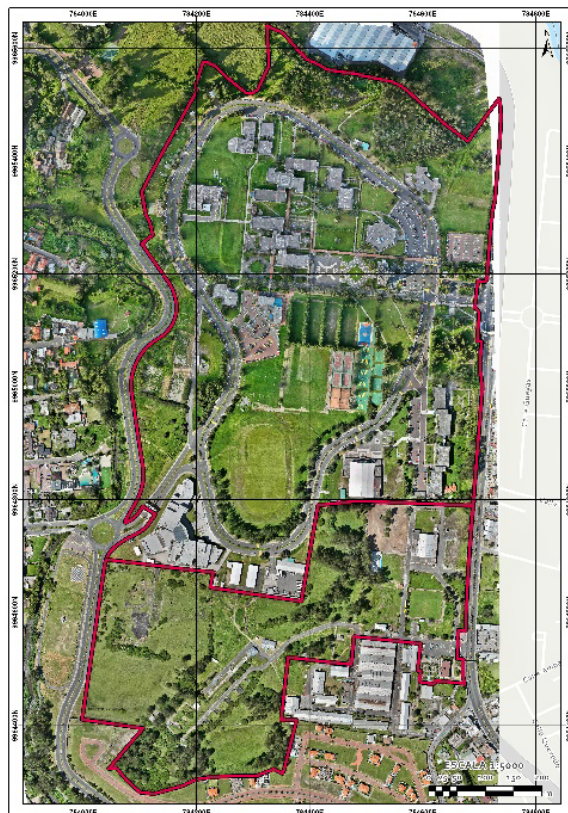
escarpada y zonas de pendiente moderada alrededor de todo el campus, cuyo rango de elevaciones varia desde los 2 476.323 msnm hasta los 2 513.131 msnm.

De forma empírica se conoce que los límites del predio del campus Matriz Sangolqui son, Norte, Bosque y quebrada colindante con el centro comercial Hipermarket, Sur, muro de ladrillos colindante con el predio de FAME, Este, Av. Boulevard Santa Clara, Oeste, Av. General Rumiñahui

Los límites del objeto legal del predio establecido a través de un documento jurídico no se pudieron rescatar de la Unidad de Desarrollo Físico de la universidad, sin embargo, se logró obtener los límites del predio del visor catastral oficial del cantón Rumiñahui, GEORUMIÑAHUI donde se determinó que el predio de 20 hectáreas, y es colindante al campus matriz perteneciente a FAME ha sido donado a la Universidad y se encuentra a registrado en el portal de catastro a nombre de esta. En la figura 7 se aprecian los límites de forma gráfica.

**Figura 7**

*Delimitación del área de estudio.*



Fuente: Autor (2024).

### Justificación

El requerimiento de realizar dicho proyecto nace de la necesidad de generar un producto cartográfico oficial para la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” a detalle y a gran escala, el mismo que será utilizado para realizar el Plan MASA de la ESPE, por tal motivo se puso a disposición del ejecutor del proyecto todo el contingente logístico disponible por la universidad, sustentándose en la hipótesis de que los resultados más fiables se obtendrán con técnicas topográficas convencionales. Adicional fue la ocasión idónea donde se logró comparar y contrastar resultados entre las diferentes técnicas de captura geomática utilizadas hoy en día. Para ello el proyecto se desarrolló en siete fases:

- |                                                             |                                                            |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| I. Establecimiento de una red de control básico horizontal. | II. Establecimiento de una red de control básico vertical. |
|                                                             | III. Levantamiento topográfico.                            |

- |                                          |                                                      |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| IV. Generación del producto topográfico. | VI. Digitalización sobre el producto fotogramétrico. |
| V. Levantamiento fotogramétrico.         | VII. Control de calidad con técnicas GNSS.           |

### **Establecimiento de una red de control básico horizontal**

Como primer paso de todo trabajo cartográfico profesional este debe ser georreferenciado, lo que significa que cada objeto levantado se encuentra sobre su verdadera posición en la Tierra, respecto a un sistema de referencia terrestre, correctamente escalado, trasladado y rotado respecto al mismo. Para el Ecuador este sistema de referencia es el SIRGAS-ECUADOR, una realización del IRTS para América Latina que se materializa a través de la REGME, la proyección cartográfica utilizada es la Universal Transversa de Mercator (UTM) en la zona 17 Sur, y los vértices de control geodésico deben estar materializados a través de hitos perenes en el territorio, en sitios estables, seguros y accesibles que garanticen la fiabilidad del proyecto a futuro.

El campus Matriz ESPE cuenta ya con hitos de control geodésico materializados de proyectos anteriores, dichos hitos se distribuyen de forma homogénea a través de toda la universidad, mismos que se materializan a través de mojones de concreto IGM Tipo B, pilares de hormigón con placa de centrado forzado, pilar de hormigón con clavo, placas de aluminio a ras de piso, geoclavos, dianas terrestres de apoyo fotogramétrico, y en general clavos y estacas de proyectos de topografía varios los cuales no fueron utilizados debido a que no se puede garantizar su permanencia en el espacio y tiempo como vértices de control geodésico básico. Al tener una gran cantidad de hitos materializados en el área de estudio no existe la necesidad de crear nuevos hitos en campo lo cual reduce costos y tiempo.

Realizando el inventario de puntos de control geodésico se determinó que existen dentro del área de estudio y en sus alrededores un total de 74 puntos de control geodésico como se muestra en la Tabla 1 y se grafica en la Figura 8.

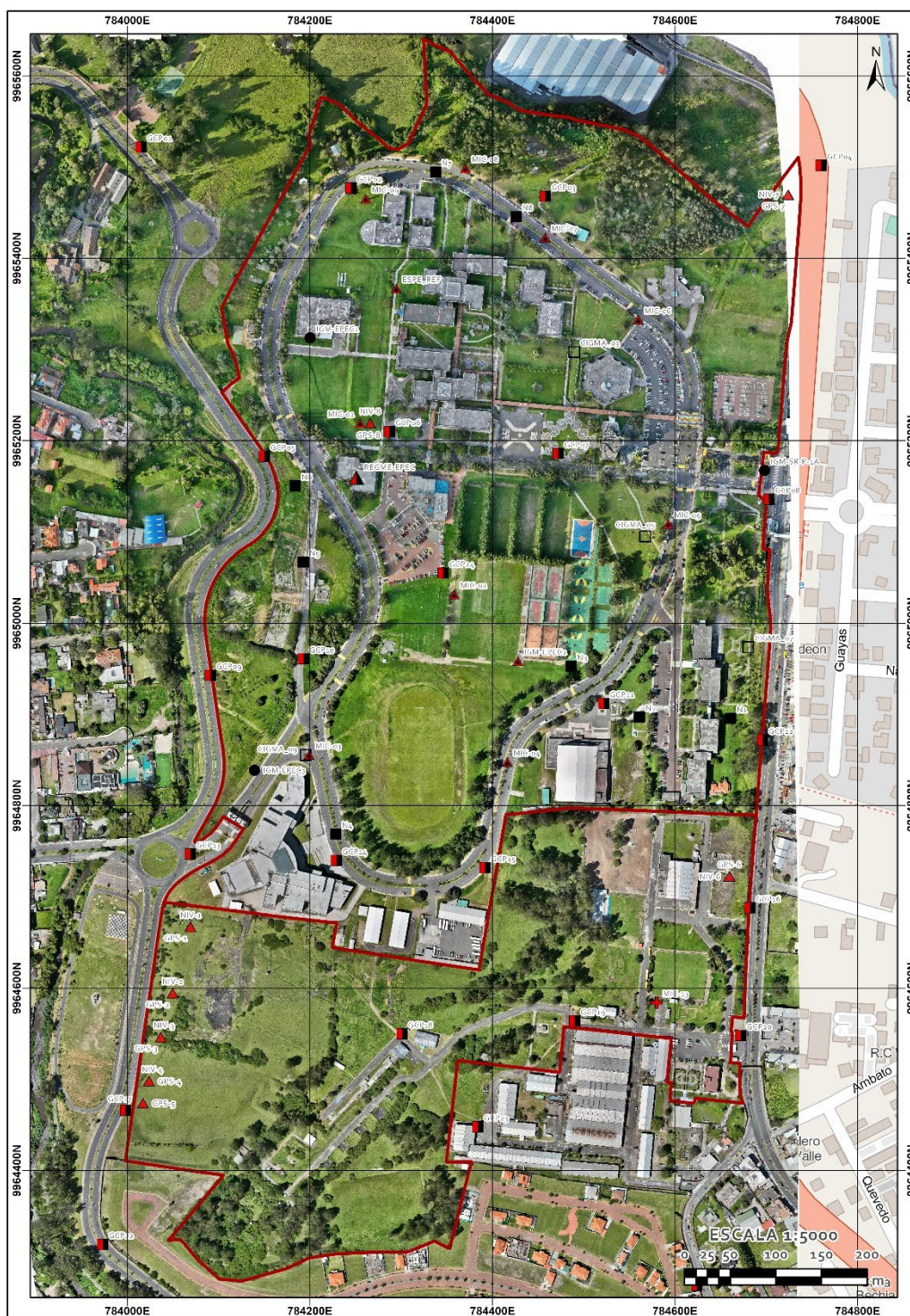
**Tabla 1**

*Inventario de hitos de control geodésico Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE".*

| Monumentación                 | Disponible | Imagen                                                                            | Monumentación     | Disponible | Imagen                                                                              |
|-------------------------------|------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Hito IGM-B                    | 8          |  | Geoclavo          | 2          |  |
| Hito tubular centrado forzoso | 8          |  | Placa de aluminio | 13         |  |
| Pilar de hormigón             | 8          |  | GCP               | 35         |  |

Figura 8

Mapa de hitos de control geodésico Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”



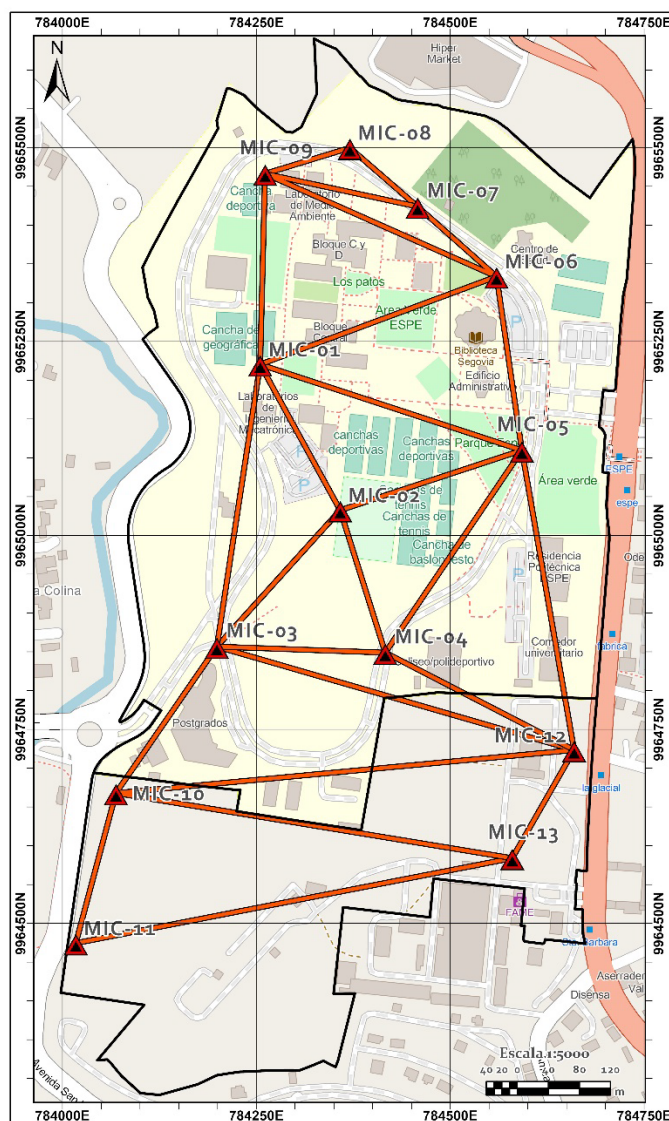
Una vez definido todo el control geodésico existente se definió los vértices a utilizar bajo las siguientes consideraciones:

- Vértices en campo abierto cuyas obstrucciones sean mínimas para receptar señales GNSS y se ubiquen en sitios estables.
- Permanencia in situ hasta la finalización del proyecto, que garanticen su uso a futuro, adicional debe existir seguridad.
- La red de control horizontal debe cubrir la totalidad del área de estudio, siendo esta el campus matriz de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” y los terrenos donados por parte de FAME.
- La finalidad de estos vértices geodésicos es para realizar trabajos de topografía convencional, por lo que se requiere que exista una perfecta línea de vista por lo menos entre dos vértices, los cuales deben estar ubicados a una distancia entre 150 a 300 metros para reducir el error angular de la estación total. (Wolf, 2015).

Con la determinados de los hitos que cumplen dichas condiciones se diseñó una red de 12 vértices, los cuales ocupan diferentes tipos de monumentaciones, reciben la denominación de “MIC-xx”, y se reparten de la siguiente manera, tres vértices en el predio de FAME (MIC-10, MIC-11, MIC-12), y 9 vértices dentro del predio de la ESPE (MIC-01, MIC-02, MIC-03, MIC-04, MIC-05, MIC-06, MIC-07, MIC-08, MIC-09) en el diseño ilustrado en la Figura 9.

**Figura 9**

*Diseño geométrico Red Geodésica Local ESPE 2024.*



De los 12 vértices seleccionados, era necesario materializar un nuevo hito de control, se seleccionó la forma más simple que fue a través Geoclavo de acero empotrado en el concreto de la cancha de vóley de FAME bajo las condiciones expresadas previamente.

La opción más viable fue diseñar y ejecutar una Red GNSS debido a que los vectores que se trabajan son independientes y están condicionados por la geometría de los satélites y la estación base, adicional que se obtiene la posición real de cada vértice de forma directa, el equipo técnico utilizado se detalla en la Tabla 2.

**Tabla 2***Materiales empleados para el control horizontal.*

| Orden | Equipo                  | Cantidad |
|-------|-------------------------|----------|
| 1     | Equipo GNSS Trimble R4  | 1        |
| 2     | Equipo GNSS Trimble R8s | 8        |
| 3     | Trípode                 | 9        |
| 4     | Base nivelante          | 9        |
| 5     | Extensión 0.25 m        | 9        |
| 6     | Hoja de campo           | 26       |
| 7     | Flexómetro              | 9        |
| 8     | Aplicativo Trimble DL   | 9        |

Al trabajar con técnicas GNSS se debe realizar una planificación previa y definir los parámetros geodésicos que se van a utilizar, el Instituto Geográfico Militar en su protocolo de fiscalización de la tabla 3, para generación de proyectos de cartografía catastral 1:1000 define que se debe seguir los siguientes parámetros para el posicionamiento de puntos de control básico horizontal con las respectivas consideraciones a seguir para la validación de los vértices de la red.

**Tabla 3***Parámetros elaboración Red Geodésica IGM.*

| Equipo Utilizado                   | GNSS de precisión Doble Frecuencias |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| Tipo de posicionamiento            | Estático Diferencial                |
| Estaciones de monitoreo utilizadas | Se especificarán EMC utilizadas     |
| Distancia de la línea base         | Se especificarán distancias         |
| Numero de satélites enganchados    | Mínimo 5                            |
| Angulo de enmascaramiento          | 10 grados                           |
| Intervalo de grabación             | 1 segundo                           |
| GDOP                               | < 5                                 |

Fuente: Instituto Geográfico Militar (2022).

Adicional nos indica las siguientes consideraciones

- Correcto nivelado y centrado de la antena sobre el punto, considerando que el eje vertical de la antena sea perpendicular al centro geométrico del punto a determinarse.
- Correcta orientación de la antena, de forma que señale al norte magnético.
- Correcto enlace de la Red Geodésica Local, a la Red oficial del IGM - REGME, a través de un mínimo de dos estaciones de monitoreo continuo.
- Todos los vértices de la red geodésica local deben estar directamente conectados entre sí, por medio de vectores GNSS.
- Para el procesamiento y ajuste de la Red, se deben ejecutar por lo menos una sesión de levantamiento GNSS, con una duración de posicionamiento acorde a lo establecido por la Tabla 3, dependiendo de la distancia del punto de red geodésico a la estación más cercana.
- Para el procesamiento y ajuste de la Red, se deben utilizar vectores con criterios de aceptación favorable dentro de una Solución Fija.
- Método de observación GNSS, Estático Diferencial.
- Para el procesamiento de los datos y el correspondiente ajuste final de la Red GNSS Local se fijarán, como mínimo, dos estaciones de monitoreo continuo de la REGME. Instituto Geográfico Militar (2022).

Con dichas consideraciones técnicas dictadas por el Instituto Geográfico Militar, se elaboró el plan de captura diseñado de la siguiente manera:

- Se realizó tres sesiones de observaciones, y se utilizó lados en común del triángulo para densificar la red.
- La red está enlazada a la red del IGM a través bases CORS REGME, por lo tanto, está enlazado a SIRGAS.

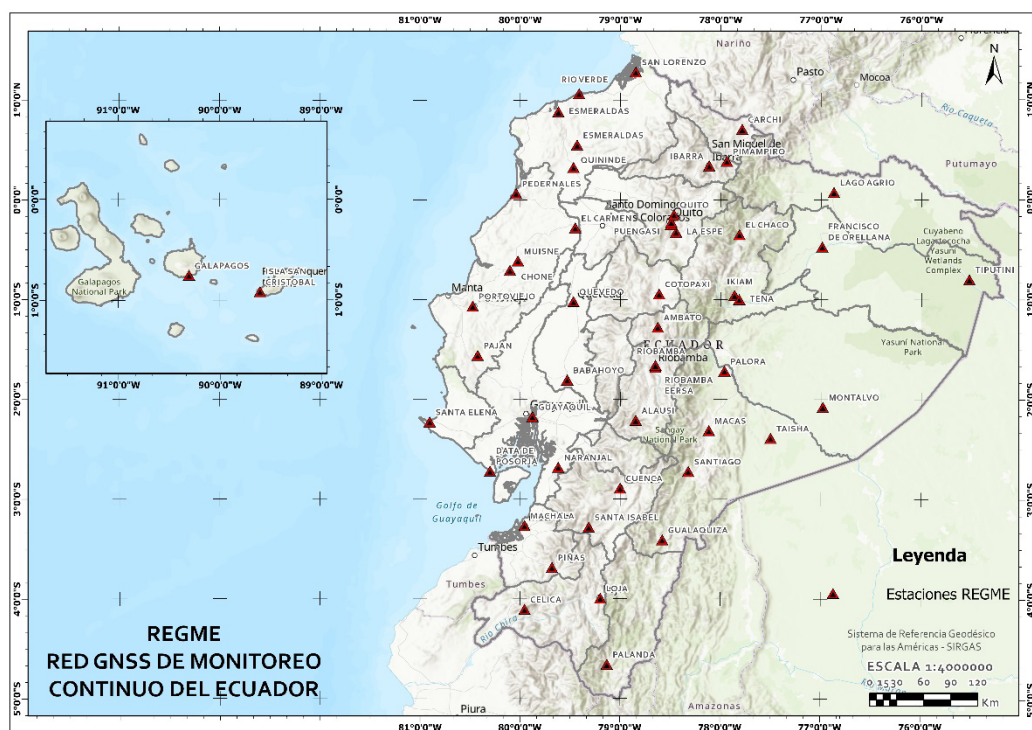
- Se observó todas las constelaciones satelitales disponibles en Ecuador, NAVSTAR-GPS, GLONASS, GALILEO, y COMPASS-BeiDou para su estudio y tratamiento a futuro en posicionamiento GNSS.
- Se rotó los equipos en cada sesión.
- Se realizó rastreos simultáneos con un desfase máximo de  $\pm 10$  minutos.
- En cada sesión se cambió las baterías de los receptores, se trabajó con el aplicativo TrimbleDL y en caso de pérdida de conexión entre colector y receptor GNSS se debe continuar con el rastreo. Los datos crudos nativos de observación .T02 pueden ser descargados directamente al finalizar la observación mediante el aplicativo TrimbleDL que es la forma más fácil de descargar datos, de igual forma se puede enviar directamente el archivo a través de WhatsApp. Otra forma de descargar la información es con el cable bajar datos.
- La altura de la antena en todo momento fue el tope del centro protector, exceptuando el caso cuando se ocupe los pilares de concreto de centrado forzado donde se referirá la altura a la base de la antena con el uso de la extensión de 25 cm.
- La altura de la antena fue medida dos veces, una al inicio de la observación y una al final de esta, con lo cual se reduce el error al momento de apreciar la altura inclinada de la antena.

En términos mandatorios se requiere por lo menos dos estaciones REGME como bases para el procesamiento y ajuste de la Red GPS Local. Las precisiones establecidas para la Red GPS Local, deberá contener un error medio máximo en la componente horizontal de 5 centímetros  $\pm 3$  mm (Tremel y Urbina, 2000); es decir, corresponde a una Categoría B, con precisión centimétrica. Instituto Geográfico Militar (2022).

En base a la ubicación del proyecto y la distribución de las estaciones CORS IGM, las cuales se recomienda utilizar debido a que sus datos son continuos, libres y accesibles, adicional mantiene un ajuste de coordenadas semanales por parte de SIRGAS lo que garantiza la fiabilidad de las coordenadas y la actualización periódica de las mismas, su distribución geográfica se aprecia en la Figura 10.

**Figura 10**

*Ubicación de las estaciones CORS REGME – Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador.*



Fuente: Instituto Geográfico Militar (2024).

Elaboración: Autor (2024).

Para un método estático el tiempo mínimo de observación es de una hora, para que cambie la geometría de los satélites, la forma de definir el tiempo mínimo de observación GNSS viene en función de la distancia a la base, la cual mediante una correlación empírica definida por el Instituto Geográfico Militar se establece en la ecuación 1.

#### **Ecuación 1**

*Tiempo mínimo de observación GNSS en función de una línea base.*

$$t_{[min]} = 30_{[min]} + 2_{[min]} * d_{[km]}$$

Con ello se obtiene un tiempo mínimo aproximado, para garantizar los resultados de cualquier posicionamiento se sigue aumentando y redondeando dichos tiempos ya que únicamente corresponde a aproximaciones.

Una vez definido el diseño geométrico de la red (figura 9), los parámetros geodésicos se definió la planificación de observación en campo, al contar únicamente con 9 receptores GNSS y 13 vértices en el diseño se elaboró un plan de posicionamiento por sesiones y líneas base comunes, la ejecución de campo se obtuvo en tres campañas de medición GNSS.

Para las dos primeras campañas GNSS se estableció una observación de dos horas cada una, y se debía rotar los equipos GNSS para evitar así errores sistemáticos ya que la logística lo favorecía. Para la tercera campaña GNSS se estableció una sesión con una duración de cuatro horas, la cual serviría de enlace a la REGME, donde las bases seleccionadas fueron QUI1 y CXEC debido a su cercanía.

Una vez finalizadas las campañas de observación GNSS se debe descargar el archivo de observación de datos crudos GNSS propio de Trimble el cual se caracteriza por generar archivos con la extensión .T02. La forma de codificar el archivo de observación GNSS cruda de Trimble es la siguiente:

*12340010.t02*

Los cuatro primeros dígitos corresponden al número de serie del receptor, los siguientes tres dígitos son el día del año en el que se realizó la observación, y el último dígito corresponde a la sesión realizada, por defecto inicia en 0.

Con dichas consideraciones se procedió a juntar toda la información, se obtuvo 35 archivos crudos de observación, tres archivos de efemérides precisas finales, ocho archivos de observación REGME IGM y el listado de coordenadas semanales SIRGAS para la semana 2306.

Los archivos crudos de observación se obtienen de las antenas a través de Trimble DL, los archivos de observación de las bases CORS IGM se obtienen a través del Geoportal IGM,

en la sección de datos GNSS (requiere tener una cuenta activa), para las efemérides precisas finales se utilizó las del Centro Europeo para la Determinación de Orbitas – CODE, un centro oficial y autorizado de procesamiento del IGS, adicional dicho archivo cuenta con las orbitas precisas de 121 satélites de varias constelaciones satelitales del sistema GNSS alineado a la solución IGS20, por lo que se decidió procesar todas las constelaciones satelitales en TBC ya que se cuenta con las efemérides de dichas constelaciones.

Finalmente, para realizar el ajuste de la red geodésica se debe realizar en el mismo marco y en la misma época en la que se encuentran los satélites y se realizó la observación, por lo que el punto base debe tener coordenadas conocidas y actualizadas, y en el caso de requerir los puntos de red en un marco de referencia específico diferente se debe utilizar parámetros de transformación y modelos de velocidades, el marco geodésico utilizado en el presente trabajo es el IGS20 época 2024.22.

La REGME es la materialización del sistema SIRGAS-ECUADOR, cuya realización se encuentra alineada al ITRF2008 en la época 2016.43, se trata de un ajuste postsísmico del marco de referencia geodésico nacional del Ecuador, misma que se trata de una realización temporal cuya vigencia termina en diciembre de 2024. Las coordenadas oficiales de todas las estaciones REGME se encuentran observadas en la semana GPS 1900 que se pueden obtener de las fichas de estaciones permanentes disponibles en el Geoportal del IGM, dichas monografías corresponden al sistema SIRGAS Ecuador el cual se encuentra obsoleto. Todas las estaciones REGME están alineadas a la red SIRGAS Continental de Operación Continua, SIRGAS-CON, la cual es un marco de referencia geodésico cinemático para América.

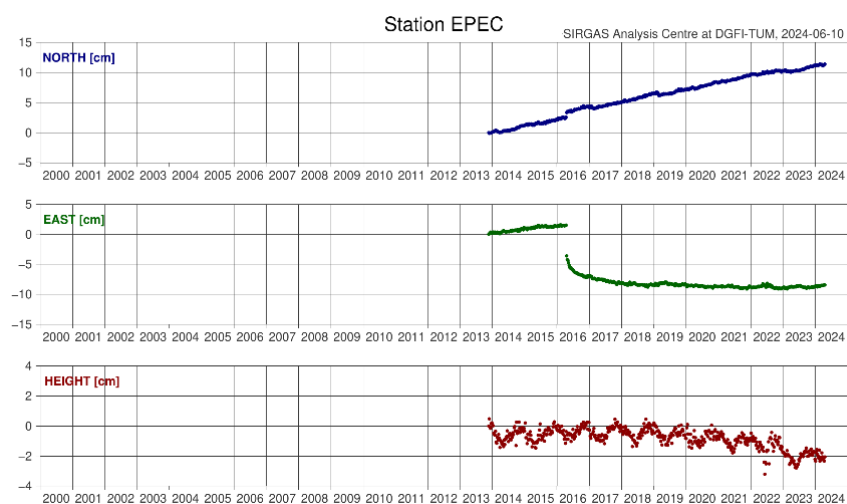
En el Ecuador se debe tener una serie de consideraciones para definir el marco de referencia geodésico debido a que se encuentra en el Cinturón de Fuego del Pacífico, por lo que está sometido a fuerzas geofísicas de gran magnitud de forma constante, como lo son actividad volcánica y actividad tectónica, en especial el movimiento de la placa continental por la subducción con la placa oceánica, que deforman la corteza terrestre y afectan a la posición

geodésica de las estaciones REGME, por lo que los marcos de referencia geodésicos deben ser actualizados de forma periódica para minimizar los efectos de la actividad geofísica.

Dentro del área de Quito existe un complejo de fallas activas, lo que desajusta las redes geodésicas en el área de estudio, de igual forma si se revisa el archivo LOG de la EPEC se puede apreciar los cambios que sufrido la estación y de igual forma su serie temporal (figura 11) toda esta información se encuentra en la página de SIRGAS. Se selecciono como muestra la estación EPEC dado que su serie temporal es equivalente a la de la Red Geodésica Local ya que se encuentra en la misma área de estudio.

**Figura 11**

*Serie temporal de movimiento de la estación REGME EPEC*



Fuente: SIRGAS (2024).

Al tener monitoreo continuo, una red activa, las coordenadas de referencia están actualizadas de forma periódica al marco de referencia geodésico actual de los satélites y ajustada de manera semanal por parte de SIRGAS, por lo que en su página web se descargó el ajuste semanal SIR24P2306 correspondiente a la semana del rastreo, misma que fue liberada el 16 de mayo de 2024, las coordenadas liberadas por SIRGAS se encuentran en el sistema ECEF; al momento de fijar las coordenadas de los vértices de control Trimble Buisness Center solo acepta coordenadas en un sistema geodésico, por lo que se debe transformar dichas

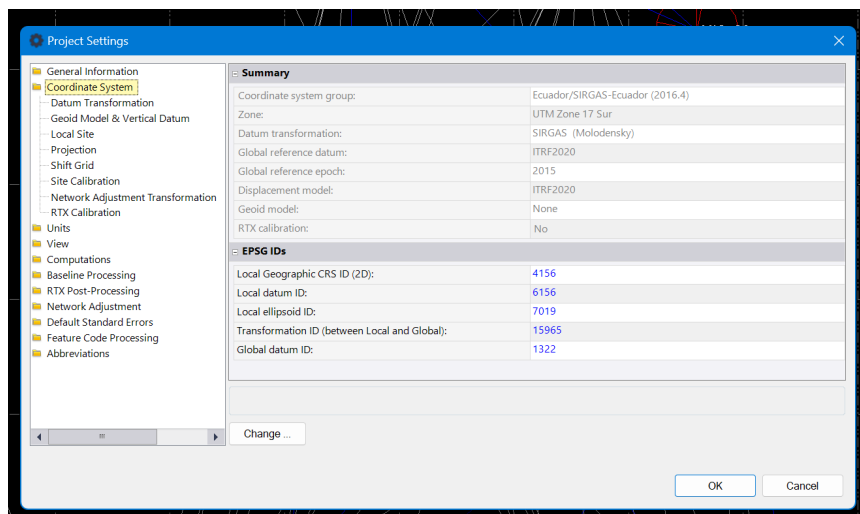
coordenadas con las ecuaciones definidas por Moritz a un sistema geodésico (latitud, longitud, altura elipsoidal) referido al elipsoide GRS80 que es el que SIRGAS adopta como oficial para fines geodésicos basado en la Resolución N° 7 de la XVII Asamblea General de la IUGG en Canberra, diciembre de 1979.

Una vez convertidos entre sistemas de coordenadas, obtenemos las coordenadas geodésicas de los puntos fijos bases REGME en el marco y época del día de la observación ya que la teoría GNSS nos obliga a realizar posicionamiento con los parámetros actualizados.

Se proceso en el sistema de referencia basado en IGS20, de igual forma se definió como referencia de las alturas el modelo geoidal gravimétrico global EGM08 y medir diferencias de ondulación geoidal, ver figura 12 y en la tabla 4 se aprecia los parámetros del ajuste.

**Figura 12**

*Parámetros geodésicos utilizados en el ajuste*



**Tabla 4**

*Parámetros Red Geodésica Local.*

|                                   |                                      |
|-----------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Proyección</b>                 | SIRGAS/UTM Zona 17 Sur               |
| <b>Mascara de elevación</b>       | 10°                                  |
| <b>Intervalo de procesamiento</b> | 10 segundos                          |
| <b>Tipo de efemérides</b>         | CODE Precisas Finales                |
| <b>Tipo de trayectoria</b>        | Fija Únicamente                      |
| <b>Precisión</b>                  | Horizontal $0.005 \pm 1 \text{ PPM}$ |

Vertical  $0.010 \pm 2 \text{ PPM}$

### Satélites

GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU

Se exportó en TBC los archivos, las efemérides, los archivos de la base en formato RINEX, se procesa todos los vectores y luego se realiza la selección de vectores independientes para el ajuste los que fueron un total de 28, tras realizar el ajuste se obtuvo las coordenadas procesadas en el sistema de coordenadas ECEF, geodésicas y planas (UTM).

Se realizó de forma similar un ajuste dentro del Marco de Referencia SIRGAS-ECUADOR, cuyos parámetros geodésicos se encuentran referidos al ITRF08 en la época 2016.43 y al elipsoide GRS80, para ello se utilizaron los parámetros de transformación entre marcos de referencia geodésicos, mismos que se encuentran disponibles en la página del ITRF (ver tabla 5) que es la forma técnica de convertir coordenadas al sistema SIRGAS-ECUADOR, para ello se requiere las coordenadas ECEF.

**Tabla 5**

*Parámetros de conversión entre marcos de referencias terrestre IGS20 – ITRF2008*

| Parámetro | $T_x$ [mm] | $T_y$ [mm] | $T_z$ [mm] | $\delta$ | $R_x$ [mas] | $R_y$ [mas] | $R_z$ [mas] | Época   |
|-----------|------------|------------|------------|----------|-------------|-------------|-------------|---------|
| Valor     | -1.4       | -0.9       | 1.4        | -0.42    | 0.00        | 0.00        | 0.00        | 2015.00 |

Nota: Los valores de rotación  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ , se encuentran expresados en “mas” que es el acrónimo de milésima de arco de segundo.

Fuente: ITRF(2024)

Una vez definido los parámetros de transformación procedemos a elaborar la matriz definida por Helmert en la ecuación 2.

### Ecuación 2

*Transformación entre marcos de referencia terrestre.*

$$\begin{pmatrix} X_{08} \\ Y_{08} \\ Z_{08} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} + (1 - \delta) \begin{pmatrix} 1 & r_z & -r_y \\ -r_z & 1 & r_x \\ r_y & -r_x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{20} \\ Y_{20} \\ Z_{20} \end{pmatrix}$$

Obteniendo las coordenadas ECEF en el marco ITRF08 época 2024.22, con lo que se debe aplicar un modelo de velocidades para cambiar la época a 2016.43, en este caso se

trabajó con el modelo SIRGAS2022 elaborado por Sánchez en 2022 para las estaciones de la red SIRGAS-CON, se seleccionó el modelo de velocidades de la estación EPEC, ver tabla que se encuentra disponible en la página de SIRGAS, debido a que su velocidad es equivalente a la velocidad de los vértices de la red ya que están en la misma área. Para aplicar una nueva transformación entre época de referencia utilizando la ecuación 3.

### Ecuación 3

*Transformación entre épocas de referencia*

$$\begin{pmatrix} X_{2016.43} \\ Y_{2016.43} \\ Z_{2016.43} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{2024.22} \\ Y_{2024.22} \\ Z_{2024.22} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_X \\ v_Y \\ v_Z \end{pmatrix} (t_{2024.22} - t_{2016.43})$$

Donde las variables de las velocidades son  $v_X$ ,  $v_Y$ ,  $v_Z$  están establecidas en la tabla 6

**Tabla 6**

*Modelo de velocidades SIRGAS2022*

| Parámetro | $v_X$ [m/a] | $v_Y$ [m/a] | $v_Z$ [m/a] | Fecha inicio | Fecha fin  |
|-----------|-------------|-------------|-------------|--------------|------------|
| Valor     | -0.00191    | 0.0012      | 0.01166     | 2016-04-17   | 2022-04-30 |

Fuente: Sánchez et. al (2022).

Finalmente se obtiene las coordenadas de los vértices en el sistema SIRGAS-ECUADOR en el sistema de coordenadas ECEF, que se puede convertir a coordenadas Geodésicas y planas UTM.

Se comparó la diferencia entre usar el marco geodésico oficial del Ecuador y el marco actual de referencia satelital se utilizó el estadístico del error absoluto y el error total con la ecuación 4, en la primera comparativa se la realizó de la parte horizontal plana (este, norte).

### Ecuación 4

*Definiciones de diferencia*

$$diferencia_{este} = Este_{IGS20} - Este_{SIRGAS-Ecuador}$$

$$diferencia_{norte} = Norte_{IGS20} - Norte_{SIRGAS-Ecuador}$$

$$diferencia_{xy} = \sqrt{(diferencia_{este})^2 + (diferencia_{norte})^2}$$

### **Establecimiento de una red de control básico vertical**

El control vertical resulta en la determinación de las elevaciones de cada vértice y sus diferencias de nivel respecto a un plano de referencia vertical, en este caso en cumplimiento a la norma legal cartográfica vigente del Ecuador, la ley de la cartografía y su reglamento, los manuales y normas técnicas IGM basados en estudios geodésicos internacionales declaran a nuestro plano de referencia vertical y oficial del Ecuador continental al nivel medio del mar medido en un sitio específico y una época determinada, para nuestro caso es la estación Mareográfica INOCAR “La Libertad”, ubicado en la Terminal Marítima de Petroecuador “La Libertad”, cerca de Salinas, en la provincia de Santa Elena.

Una vez determinado el plano de referencia vertical del Ecuador, el Instituto Geográfico Militar estableció una red de control básico vertical en todo el territorio continental, la cual fue determinada con nivelación geométrica cuya tolerancia permitida es de  $4\text{mm}\sqrt{k}$ , sin embargo, existe una red de control suplementario cuya tolerancia es de  $8.4\text{mm}\sqrt{k}$ .

Aproximadamente, entre 1960 y 1961, se calcula el nivel medio del mar, utilizando los datos extraídos de los mareogramas del periodo de 1950 a 1959. A este datum se refirieron las cotas que el IGM transportó a casi todas las ciudades, mediante nivelaciones geométricas, cuya cota de partida en el BM8 es de 12.0823 m. con 10 años de observación. (Paredes, 1986). En un estudio más reciente se afirma que: La cota de marca de nivel “BM3” la misma que es considerada como punto de partida para el arrastre de la nivelación de toda la Red de Control Básico Vertical del País, es de 6.2707 metros, el mismo que corresponde al período de 1988-2009. (Carranco, s/f). La Red de Control Básico Vertical – RCBV se compone mediante anillos (polígonos), líneas y placas. Las placas donde se unifican dos líneas de nivelación se conocen como puntos nodales, todos los vértices de control se distribuyen a lo largo de la red vial nacional. En un informe de Sánchez (2005) afirma que la RCBV del Ecuador cuenta de 7 500 vértices de control distribuidos en 11 200 Km.

La RCBV del Ecuador es de carácter geométrico, nuestro sistema carece de la componente física, por lo que no existe un modelo geoidal gravimétrico para el Ecuador enlazado a nuestra superficie de referencia vertical, por lo que se debe trabajar con las alturas de tipo geométrico mediante redes de nivelación debido a que la teoría geodésica antigua establecía que el nivel medio del mar es uniforme para todo el mundo, por lo que cada nación era la responsable de establecer su propio datum vertical local. Hoy en día esa teoría es obsoleta ya que las mareas sufren variaciones espacio temporales por una diversidad de variables, se requiere trabajar en conjunto para establecer un sistema de referencia vertical global, trabajo a cargo del SIRGAS GT III para el Ecuador.

Sin embargo, la Resolución 2017-011-IGM-JUR en su sección TERCERA: RED VERTICAL Y RED GRAVIMÉTRICA nos explica “Respecto de la Red Vertical y Red Gravimétrica, los valores determinados en las placas que conforman estas, se recomienda utilizar como valores referenciales en la zona de trabajo hasta realizar las observaciones de campo correspondientes que permitan corregir y realizar un nuevo ajuste.” Instituto Geográfico Militar (2022)

Dentro del área de estudio cuenta con dos vértices de control vertical previamente determinado por el Instituto Geográfico Militar, ente rector de la cartografía nacional por lo que son considerados vértices de alta confiabilidad en sus datos, la placa SR-P-1A, y la placa PE 28159-X.

La placa SR-P-1A, es una placa de aluminio empotrada en la acera junto a la Av. General Rumiñahui, determinada en enero de 2009, misma que pertenece a la línea Santa Rosa-Desvió de la RCBV del Ecuador de primer orden, cuyo error de cierre es de orden  $I \ 4mm\sqrt{k}$ .

La placa PE 28159-X es una placa de aluminio empotrada en la acera junto a la Biblioteca Alejandro Segovia, determinada en julio de 2005, misma que es parte del apoyo fotogramétrico suplementario del plano de Quito, al ser apoyo suplementario su precisión es de orden II  $8.4mm\sqrt{k}$  según la norma IPGH de la figura 13.

**Figura 13***Tolerancia de cierre geométrico de nivelación*

|                                                                                                                                      | Primer Orden          | Segundo Orden           |                         | Tercer Orden           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
|                                                                                                                                      |                       | Clase I                 | Clase II                |                        |
| Espaciado de las líneas y las transversales* .....                                                                                   | 72 km.                | 40 km.                  | 10 km.                  | No especificado        |
| El espaciado promedio de las estaciones marcadas permanentemente no debe exceder .....                                               | 2 km.                 | 2-5 km.                 | 2-5 km.                 | 5-8 km.                |
| Longitud de la sección .....                                                                                                         | 1-2 km.               | 1-5 km.                 | 1-2 km.                 | 1-2 km.                |
| La comprobación entre el recorrido hacia adelante y el inverso, entre elevaciones fijas o cierres de circuito, no debe exceder ..... | $3\text{mm} \sqrt{k}$ | $8.4\text{mm} \sqrt{k}$ | $8.4\text{mm} \sqrt{k}$ | $12\text{mm} \sqrt{k}$ |

Fuente: IPGH (1978)

***Nivelación Geométrica Diferencial.***

La nivelación geométrica es el método más fiable para determinar diferencias de nivel, sin embargo, es un proceso largo en campo y muy costoso. Para fines académicos se realizó un circuito de nivelación dentro del área de estudio, el listado de materiales se detalla a continuación en la tabla 7.

**Tabla 7***Equipo utilizado para el control vertical.*

| Orden | Equipo                      | Cantidad |
|-------|-----------------------------|----------|
| 1     | Nivel Automático Sokkia E32 | 1        |
| 2     | Mira topográfica            | 2        |
| 3     | Trípode plato cóncavo       | 1        |
| 4     | Hoja de campo               | 1        |

Fuente: Autor (2024).

La forma en la que se realizó el circuito cerrado de nivelación es el siguiente, se partió de la placa de orden I SR-P-1A hacia el sur y luego se regresó al mismo punto de partida, la sección más complicada fue el tramo entre el MIC-12 al MIC-11 el cual tuvo una longitud de 1 km, el croquis de nivelación se ilustra en la figura 14.

**Figura 14***Diagrama de nivelación.*



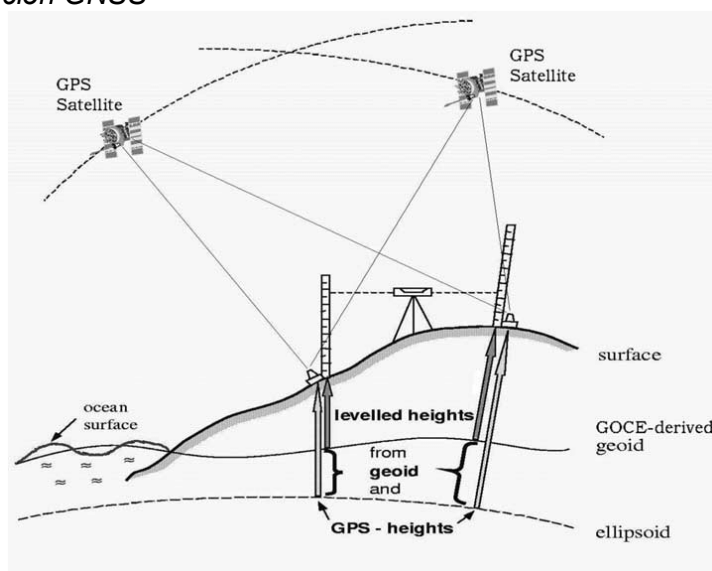
Mediante el uso de un sistema SIG y sus módulos geoestadísticos se generó el modelo de ondulaciones geoidales a forma de ráster con el interpolador de Kriging Universal.

Una vez determinado el control horizontal y ajustado el control vertical se procedió a elaborar las monografías de los vértices de control geodésico las cuales contienen toda la información necesaria de los hitos, mismos que se encuentra en el Apéndice 01.

### ***Nivelación GNSS***

Para realizar nivelación GNSS se requiere obtener tres variables, la primera es la obtención de las alturas elipsoidales de los vértices a determinar, dicho proceso se obtuvo del rastreo y ajuste de las observaciones GNSS del control horizontal. La segunda variable, es el valor de ondulación geoidal de cada vértice, en este apartado da igual el modelo que se utilice debido a que es únicamente para trasladar las alturas elipsoidales a ortométricas. Finalmente se debe fijar la cota del punto base desde el cual vamos a arrastrar la cota, de forma que se ilustra en la figura 15.

**Figura 15**  
*Principio de nivelación GNSS*



**Nota:** El gráfico ilustra como superficie geoidal al GOCE para fines ilustrativos, misma que puede ser sustituida por la superficie equipotencial del EGM2008 utilizado.

Fuente: Johannessen et al. (2003)

Debido a que la placa SR-P-1A, se ubica en la prevención a la entrada de la universidad junto a la Av. General Rumiñahui se complica el posicionamiento del punto, ya que está rodeado de obstrucciones y por seguridad es preferible no salir con los equipos fuera del campus universitario se consideró la segunda placa dentro del predio, la cual es más factible su posicionamiento y es parte de la red de control horizontal diseñada previamente, su altura nivelada de acuerdo a la monografía oficial IGM es de 2 495.595 msnm.

Para determinar los valores de ondulaciones geoidales al ser un área de estudio tan pequeña puede ser despreciable, ya que se concluye que la ondulación geoidal es equivalente a una distancia corta ( $n_A = n_B = 0$ ), una vez realizado el control vertical de la red local, mediante un circuito de nivelación geométrica se generó un modelo de ondulaciones geoidales a nivel local. Una vez definidas las tres variables, se partió del vértice MIC-06 el cual ya cuenta con control vertical preexistente al ser posicionado sobre la placa IGM PE 28159-X, por lo que debemos determinar las diferencias de altura elipsoidal desde el vértice MIC-06 hacia los demás vértices, mediante la ecuación 07.

#### **Ecuación 7**

$$\Delta h_A^B = h_{MIC_{xx}} - h_{MIC_{06}}$$

Con las tres variables se procede a aplicar el principio de nivelación GNSS

#### **Ecuación 8**

$$H_n^B = H_n^A + \Delta h_A^B - (n_B - n_A)$$

Donde la cota  $H_n^A = 2\,495.545$  msnm y recordando que  $n_B = n_A$ .

Para un segundo caso se tomó en cuenta la ondulación geoidal del ajuste del TBC referidas al EGM08, únicamente para medir desniveles y ondulaciones, donde la forma de obtenerla es haciendo una reducción de la forma geométrica definida por la ecuación 7, ya que la cota de partida esta enlazada a la RBCV del Ecuador.

#### **Ecuación 9**

$$n = h - H_n$$

Donde nuevamente se aplicó el principio de nivelación GNSS de la ecuación 8, donde la cota  $H_n^A = 2\,495.545$  msnm y ahora aplicando que  $n_B \neq n_A$ , y  $n_A = 26.498$  m.

Como un último caso se procedió a utilizar el modelo de ondulaciones geoidales locales generado para determinar las diferencias entre las tres formas de nivelar continuando con el criterio establecido en el presente apartado.

### **Levantamiento topográfico**

El requisito del proyecto fue elaborar un plano a escala 1:1000, cuya tolerancia de acuerdo con norma IPGH/IGM es  $1/3$  del módulo de la escala en horizontal y en vertical es  $1/4$  del intervalo de curva, con intervalo de curva de un metro.

Para la presente practica se partió de la red de control geodésico determinada en los apartados anteriores cuya materialización esta alineada al IGS20 en la época 2024.22, la cual estandariza la componente vertical y horizontal de la totalidad del área de estudio, con ello se minimiza los errores y equivocaciones que se puede ocasionar al utilizar diferentes hitos de la red de control geodésico preexistente de la universidad.

Se contó con cuatro estaciones totales marca Trimble M3 5" DR que dispone la universidad, cuya precisión angular es de 5 segundos, cuenta con modo de lectura de prisma y reflexión directa, y su precisión horizontal  $\pm 3\text{mm} + 3\text{ PPM}$ .

El primer paso antes de salir a campo es delimitar los linderos del área de estudio, se subdividieron en tres predios diferentes que sumados dan una extensión cercana a 75 ha, que corresponde al predio más grande del área urbana del cantón Rumiñahui, el predio matriz de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE" corresponde a una extensión de 48 hectáreas, colinda con dos vías públicas al este y al oeste siendo la Av. General Rumiñahui y la Av. Santa Clara respectivamente, al sur colinda con el predio de Fabril FAME donado a la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE", y al norte colinda con cinco predios privados. La forma de obtener dicha información para verificar los linderos constituidos de forma legal es a través de las escrituras de propiedad del predio, o a través de una IDE donde se visualice la base catastral disponible por el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal Cantonal en cumplimiento al COOTAD, LOTUGS y otras normas vigentes, se utilizó la IDE cantonal de

Rumiñahui GEORUMIÑAHUI la cual contiene datos de acceso libre y público, cuenta con límites catastrales del predio de estudio y aledaños como se muestra en la figura 16. Adicional se cuenta con ortofotografía de la zona de estudio lo que facilita la distinción de los límites del predio.

**Figura 16**

*IDE GEO RUMIÑAHUI*



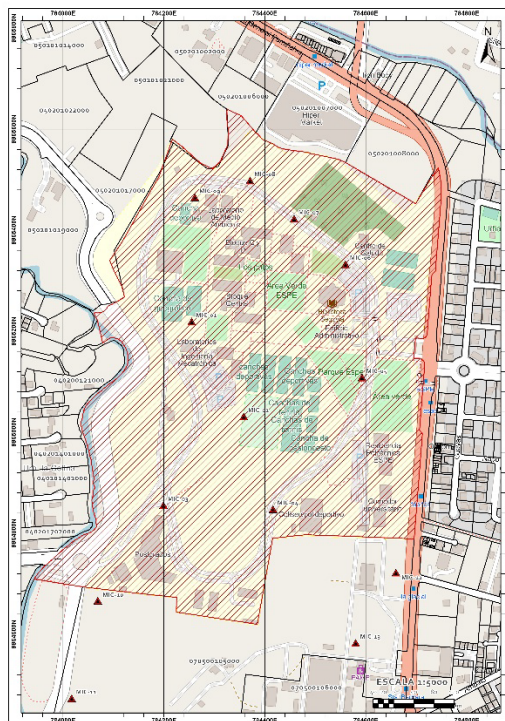
Fuente: GAD Rumiñahui (2024).

Los límites legales del predio llegan hasta el Rio San Clara, sin embargo, esta zona se convierte en una de acceso público.

Las marcas físicas que limitan el predio se componen de un muro de ladrillo, barrotes de metal, cerca de madera, y cercas vivas. El área según escrituras del predio es de 489 470.81 m<sup>2</sup> y su clave catastral es 070500103000, su croquis corresponde a la figura 17.

**Figura 17**

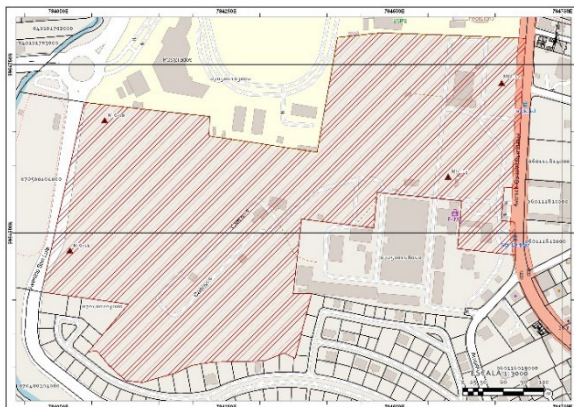
*Ubicación del predio matriz ESPE.*



El siguiente predio corresponde a los terrenos donados por parte de Fabril FAME a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE que figura como su propietario, son predios colindantes con el predio matriz por lo que están conectados, los linderos físicos del terreno corresponden a un muro de ladrillos y barrotes de metal. Su área de acuerdo con escrituras es de 196 765.01 m<sup>2</sup> con clave catastral 070500105000, su croquis corresponde a la figura 18.

### Figura 18

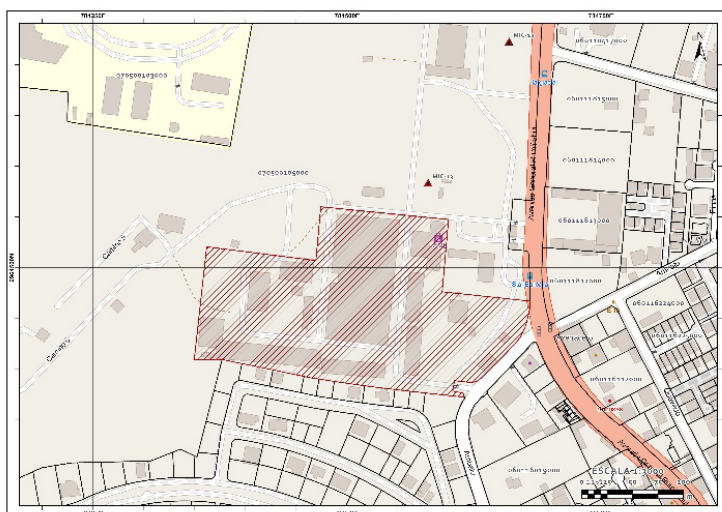
*Ubicación del predio Fabril FAME.*



El último predio corresponde a la Fábrica de Municiones Santa Bárbara, que de acuerdo con el visor catastral se encuentra dentro del predio de Fabril FAME, cuyo propietario es la empresa HOLDIGNE S.A., su clave catastral es 070500106000, y su área de escritura es de 40 299.37 m<sup>2</sup>. Al no estar registrado legalmente a nombre de la universidad no será considerado dentro del área de estudio, sin embargo, la delimitación del predio es confusa y no sé puede establecer con claridad el lindero del predio, se tomó referencias en terreno basado en la información del portal GeoRumiñahui, su croquis corresponde a la figura 19.

**Figura 19**

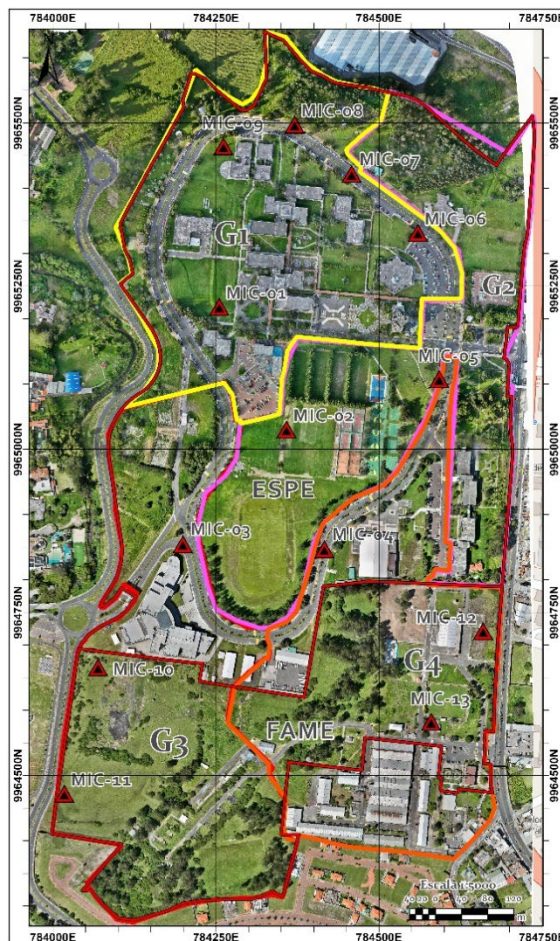
*Ubicación del predio Santa Barbara.*



Una vez definida el área de estudio, sus límites externos del predio se procedieron a segmentar el predio de forma interna para poder utilizar la totalidad de equipos disponibles en el laboratorio de forma simultánea con un grupo de personal cualificado y seleccionado, cada equipo debía levantar un área aproximada de 17 hectáreas cada uno de los dos predios principales a trabajar como se detalla en la Figura 20 y a continuación:

- Grupo I: Equipo 132408, correspondientes a los límites norte y oeste del predio en el sector del laboratorio de Electrónica hasta la Cruz, siguiendo por el anillo vial hasta la biblioteca, bajando por el camino central hasta el bar y cerrando el lindero occidental de la universidad.

- Grupo II: Equipo 132424, corresponder al lindero oriental de la universidad desde el sector de la Cruz hasta las residencias, incluyendo el área central de la universidad que contiene los sectores del estadio y las canchas.
- Grupo III: Equipo 132427, conformado por estudiantes de la carrera de ingeniería civil corresponde al lindero oriental de la universidad y FAME, desde el límite demarcado por el Grupo I, siguiendo el anillo pasando por el centro de investigación, CICTE y FAME hasta el lindero sur de FAME y el lindero con Santa Barbara.
- Grupo IV: Equipo 132438, corresponde al predio de FAME en su parte oriental, desde el lindero con la universidad hasta el límite con Santa Barbara, en la parte occidental corresponde al predio de FAME hasta el camino que conduce a la universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” donde le corresponde el área de transportes, siguiendo por el anillo vial hasta el coliseo y el parqueadero de la residencia.

**Figura 20***Distribución áreas de trabajo estación total***Tabla 8***Equipos utilizados para realizar el levantamiento topográfico.*

| Ord | Equipo                          | Cantidad |
|-----|---------------------------------|----------|
| 1   | Estación Total Trimble M3 5" DR | 4        |
| 2   | Trípode                         | 4        |
| 3   | Bastón de aluminio              | 8        |
| 4   | Prisma -30 mm                   | 8        |
| 5   | Clavos                          | IND      |
| 6   | Estacas                         | IND      |
| 7   | Combo                           | 4        |
| 8   | Pintura en aerosol              | 4        |
| 9   | Radios                          | 4        |
| 10  | Machete                         | 1        |

Los objetos espaciales levantados fueron más grandes que 0.50 m, para la parte topográfica el intervalo de curvas de nivel es de un metro, con lo que con se debe densificar la nube de puntos de la parte planimétrica con puntos altimétricos, para ello se debe tomar líneas de quiebre, puntos de cambio de pendiente, y puntos en malla en función de la pendiente, todos los detalles deben ser tomados a ras de piso. Finalmente, se sugirió que las curvas de las vías se tomen en tres puntos, inicio, medio y fin. No representar escaleras a detalle, ni diseños internos de canchas, ni arcos, aros o astas. No tomar sumideros y rejillas, ni bancas, ni otros elementos menores. Se sugirió levantar por fajas, para evitar cambiar de código de forma constante, primero empezar a levantar un elemento como edificios y levantar todos los elementos visibles antes de levantar otro elemento.

En el caso de usar los hitos de centrado forzoso se debe utilizar el perno sobre la placa, y medir la altura de la estación total desde la placa sobre el hito hasta la referencia del equipo.

Una vez la estación esta lista a trabajar, se debe tomar la altura desde la referencia en el terreno hasta la marca De referencia de medición de la altura del equipo topográfico, al tratarse de una altura del tipo inclinado, se debe restar 2 mm en cada observación, es importante manejar una hoja de campo en la cual se apunte todo este tipo de parámetros coordenadas del punto de partida altura de la estación y punto de referencia. Adicional, se debe hacer una calibración de los bastones. Para ello se debe medir con el fluxómetro desde el centro del prisma hasta el punzón del bastón y verificar con la altura graduada del bastón en caso de no estar correcto, se debe ajustar la altura del prisma con los tornillos de ajuste hasta que coincida con la lectura del flexómetro. las condiciones son siempre orientar al punto anterior, y al final realizar el cierre poligonal midiendo al punto GNSS de coordenadas conocidas. Como sugerencia los dos primeros puntos tomados desde cualquier estación deben corresponder al punto de

orientación anterior para verificar la precisión de partida y al siguiente punto para el cambio de estación.

Una vez separada y depurada la información en un libro de Excel se procedió a realizar el ajuste poligonal, con dicho procedimiento se obtiene un error de cierre en las tres componentes y precisión relativa. Según Wolf (2015) una forma de realizar el ajuste poligonal es mediante el método de la brújula o de Bowditch, el cual es un método topográfico simple que consiste en usar proporciones matemáticas para ajustar las coordenadas observadas con estación total.

Una vez determinado las coordenadas corregidas se procede a calcular las coordenadas del resto de puntos radiados.

### **Generación del producto topográfico**

Para la parte del uso de Autodesk Civil 3D y la generación del plano topográfico se utilizó como referencia el Manual de presentación de planos catastrales del Municipio de Quito que se puede acceder al mismo a través del Portal de Servicios Metropolitanos de Quito, en el cual menciona el color, tramado y elementos requeridos para la presentación de un plano topográfico, de igual forma se complementó la información con el catálogo de objetos del Instituto Geográfico Militar de Ecuador para escala 1:1000 y 1:5000 que de igual forma es de acceso libre a través del Geoportal del IGM.

Luego se procedió a exportar la nube de puntos con el formato TXT y el perfil PENZD el cual permite la carga de la información separada por espacios y las columnas corresponden a Punto Este Norte Elevación Descripción, depurada para cargar en Civil 3D, con los puntos se manejó la etiqueta de numero de punto y descripción para el dibujo.

Las curvas de nivel fueron generadas mediante una interpolación TIN de la totalidad de puntos disponibles con un nivel de suavizado alto, de igual forma se editó la superficie con líneas de quiebre y modificando los triángulos de la interpolación para tener un mejor resultado se extrajo

la superficie a manera de polilíneas las cuales fueron editadas de forma manual para tener un aspecto visual mejorado ya que los algoritmos de interpolación son susceptibles a errores. Finalmente, tras unir todos los puntos, generar el dibujo, y editar las curvas de nivel se realiza un Layout, que es el diseño de impresión, en este caso será en una hoja A1, el plano se encuentra como Apéndice del presente trabajo. El croquis de ubicación del predio fue obtenido a través de la plataforma de mapeo colaborativo y libre OpeenStreetMap y exportado a formato vectorial CAD a través de QGIS, y la base catastral del cantón Rumiñahui de la Zona 07 y Zona 05.

### **Levantamiento fotogramétrico**

La fotogrametría antiguamente estaba reservada para empresas e instituciones públicas que podían costearse todo el proceso, generalmente se utilizaban aeronaves de ala fija y procesos de restitución en 3D. Actualmente con la aparición de aeronaves no tripuladas controladas remotamente el proceso de fotogrametría se abrió a todo el público en general, y se popularizo rápidamente por sus ventajas. Hoy en día las aeronaves UAS cuentan con sensores GNSS RTK incorporados en la aeronave con lo que pueden determinar la posición del centro de la imagen con precisión lo cual reduce el número de puntos de control terrestre que se deben colocar para el ajuste fotogramétrico.

Para la obtención de fotografía aérea del área de estudio con su respectivo ajuste posterior, se utilizó la ortofoto determina por Abad et. al en 2024, la cual cubre en su totalidad el área de estudio, reduce costos y tiempo en este proyecto.

Los parámetros de la imagen utilizada son las siguientes:

El vuelo fue realizado en enero de 2024.

Se elaboro el plan de toma de tal forma que la aeronave voló a 80 m AGL, el tamaño del GSD es de 2 cm y las imágenes se encuentran geoetiquetadas por RTK, la aeronave utilizada fue el DJI Mavik 3E, el ajuste se lo realizo a través del software Pix4D. El sistema de referencia de la imagen es SIRGAS Ecuador.

El modelo digital del terreno en este caso corresponde a un modelo digital de superficies en el cual incluye todos los obstáculos en la superficie, dicho modelo tiene como superficie de referencia al elipsoide, por lo que todas las alturas son de carácter geométrico y no sirven para ningún trabajo de ingeniería práctico.

No se decidió ejecutar una nueva toma para este proyecto debido a las limitantes de tiempo, y productividad. Al no tener un modelo del terreno fiable únicamente se compararán los resultados de la planimetría

### **Digitalización del producto fotogramétrico**

El proceso de digitalización o vectorización se lo realizó a través del software Autodesk Civil 3D 2025 con el uso de la licencia académica que dispone la universidad.

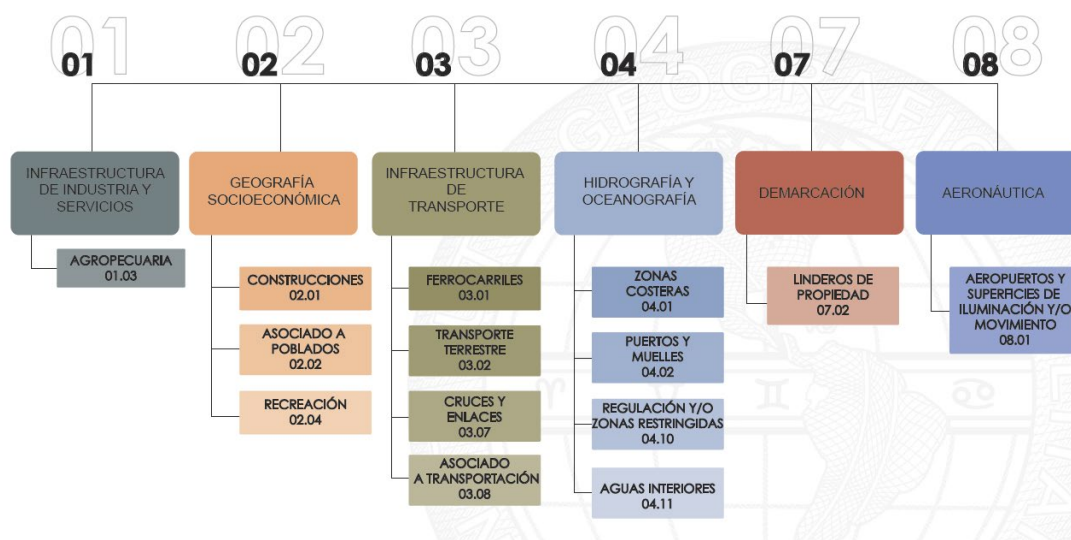
Para ello se requiere un cierto grado de experiencia sobre los objetos a ser digitalizados ya que se puede llegar a cometer equivocaciones sobre los objetos a dibujar. El Instituto Geográfico Militar en convenio con el Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda lanzaron en 2022 una guía para extracción de elementos para la generación de cartografía base catastral, misma que es el documento base y guía para realizar cualquier trabajo de generación de cartografía a nivel nacional que se deba presentar al IGM u otras entidades la cual fue la guía a seguir en este apartado siguiendo los criterios técnicos de extracción.

Por lo general se trabaja en aplicaciones SIG para generar GDB donde se encuentra la información catalogada y estructurada, el software SIG es interoperable con software CAD, el uso de un archivo CAD en el presente proyecto es debido a que el producto será utilizado para la generación de obra civil y que la mayoría de los planos topográficos son elaborados en sistemas CAD, y no en sistemas SIG. Lo primero fue determinar los elementos a extraer, para ello nos guiamos del catálogo de objetos de la figura 21.

### **Figura 21**

*Catálogo de objetos IGM escala 1:1000*

## ESTRUCTURA POR CATEGORÍAS DEL CATÁLOGO DE OBJETOS DE CARTOGRAFÍA BASE CON FINES CATASTRALES



Fuente: Instituto Geográfico Militar (2022).

Donde los objetos a dibujar según la guía de extracción y especificaciones del contrato con el cliente son los siguientes:

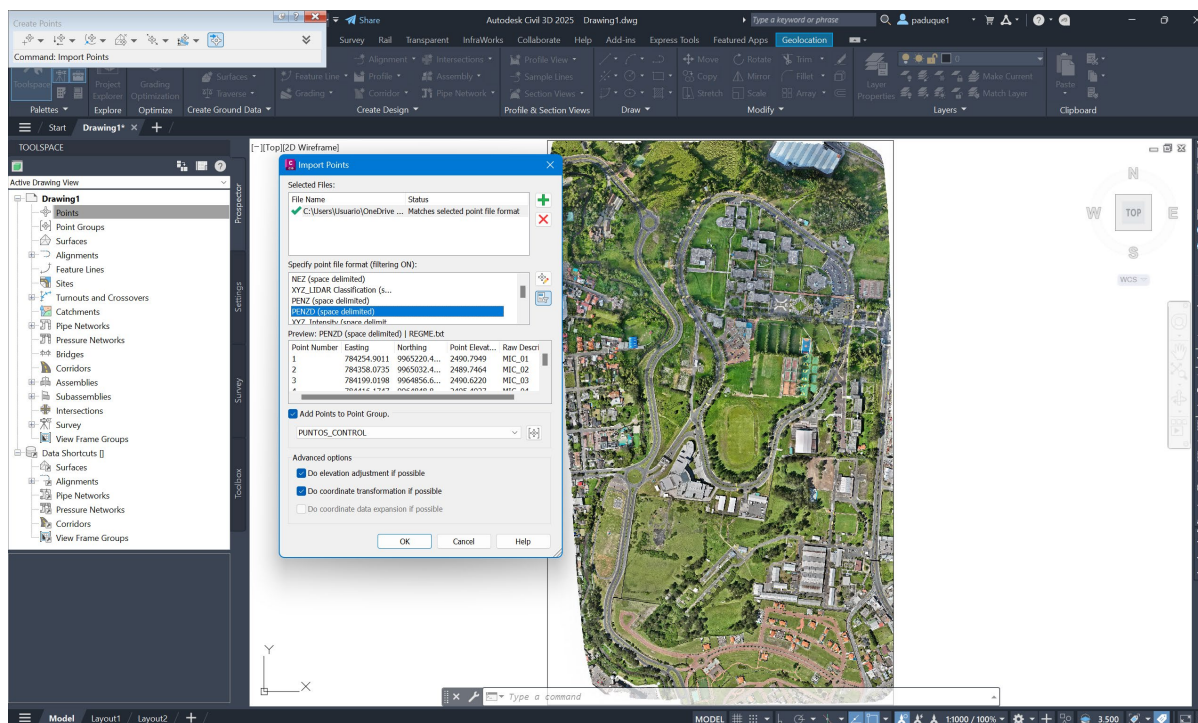
- Acera
- Alcantarilla
- Caja de revisión
- Cancha
- Cerca
- Edificio
- Escalinata
- Estadio
- Gasolinera
- Invernadero
- Muro
- Parqueadero
- Plaza Publica
- Poste
- Puente
- Puntos de control
- Rio
- Rodera
- Sendero
- Vía/Ruta

Una vez definido los elementos requeridos se procedió a georreferenciar el dibujo en Civil 3D bajo el sistema de referencia SIRGAS UTM 17 SUR, crear el espacio para las capas, lo primero es que se añadirá la ortofoto mediante el comando “MAPIINSERT” y posterior se añado los puntos de control en el sistema SIRGAS-ECUADOR dado que la imagen se encuentra en ese sistema de referencia, los puntos de control se añadirán en una capa diferente y en un grupo

de puntos exclusivos, la forma de importar es bajo la extensión TXT y el formato PENZD como indica la figura 22.

**Figura 22**

*Importación información base digitalización ESPE*



Una vez con la información base cargada se procede a generar las demás capas a ser utilizadas según lo descrito previamente.

Al momento de hacer fotogrametría se debe considerar un área de reserva, dado que los bordes de la ortofoto siempre son las zonas que generan más distorsión, por lo que los elementos que se sitúen más cerca de las orillas no serán tomados en cuenta en este proceso. El siguiente paso es empezar a discriminar objetos fotoidentificables, primero se empieza con la parte hidrográfica, luego las curvas de nivel (no aplica en este caso), seguido de la parte vial, posteriores construcciones, y otros detalles al final. Siempre se utilizará la herramienta de polilínea exceptuando al momento de realizar arcos, al final debe existir únicamente una sola línea siguiendo los principios lógicos de bases de datos.

Se utilizó las herramientas propias de Civil 3D para evitar ciertos errores, como es el caso de no cerrar el polígono, en ese caso se utilizó la herramienta de intersection, center y endpoint. Al ser un producto no entregable no existe la necesidad de armar un Layout, crear tramados o usar toponimia.

Finalmente se carga en una nueva capa los puntos de muestra utilizados en RTK para extraer las coordenadas de los vértices necesarios, desde la sección de propiedades de cada polilínea y modificando el vértice, fijándonos de que se marca la cruz sobre el vértice.

### **Control de calidad con técnicas GNSS**

Una vez obtenida la información de campo de la estación total, y la digitalización del dron se obtuvo los datos de campo GNSS, dado que el área de estudio es extensa no se va a volver a tomar la totalidad de los puntos para comprobación, únicamente se realizará un muestreo aleatorio simple estratificado.

Para ello se tomaron como referencia la norma ISO 19157-1:2013 relacionada a la calidad de los datos geográficos, la NTE INEN 2859-1:2009 que da los lineamientos sobre muestreo para control de calidad, y el protocolo de fiscalización IGM que nos especifica los lineamientos a seguir para determinar el grado de aceptación de una cartografía fundamentada en la norma NSSDA.

Los contenidos de la norma ISO 19157:2013 nos explica que existen varios elementos relacionados a la calidad de los datos geográficos, en este caso únicamente se considerara el tema de exactitud posicional, exactitud temática, y consistencia lógica. En el tema de muestras GNSS únicamente se puede utilizar el criterio de exactitud posicional, mientras que en el tema de digitalización de ortofoto se puede aplicar los demás principios de calidad establecidos en la norma ISO.

La norma NTE INEN 2859-1 establece los principios de control de calidad mediante muestreo por lotes, lo que nos habla del tipo de muestra a seleccionar, el tamaño de la muestra y las condiciones de aprobación: *“Uso de un plan de muestreo (3.1.17) con un tamaño de muestra*

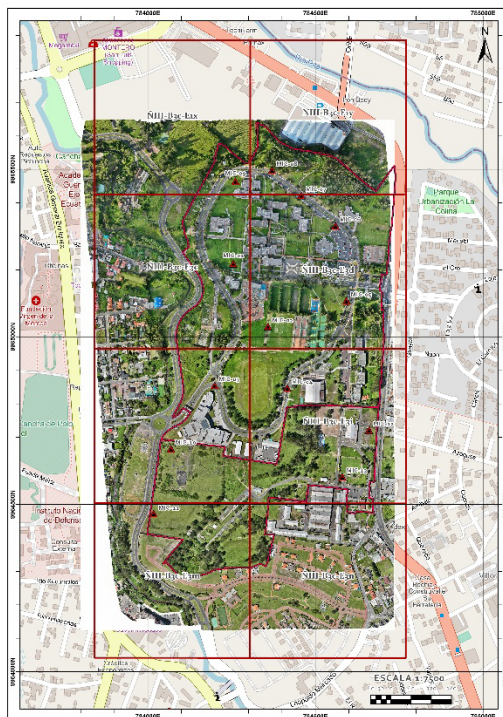
*(3.1.16) inferior al del correspondiente plan de inspección normal (3.1.20) y con un criterio de aceptación comparable al del respectivo plan de inspección normal.” Instituto Geográfico Militar (2022)*

Con el Protocolo de Fiscalización IGM establece los parámetros de la NSSDA para valoración de la exactitud posicional y adicional nos explica la forma de evaluar una cartografía es: “La cartografía a ser fiscalizada, será cortada en unidades o segmentos regulares según grillas para hojas a escalas 1: 1 000. La grilla para la escala 1: 1 000 se encuentra dividida cada 15 segundos de longitud y latitud que representan una hoja que será considerada como la unidad espacial de la cartografía. La suma de todas las hojas contenidas en el levantamiento será considerada como población muestral. Para la definición del tamaño de la muestra de la población (cantidad de hojas a evaluarse), se aplicará la NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN- ISO-2859-1:2009. El nivel de inspección con el que se trabajará será el “reducido”, el cual permite tener un criterio de aceptación suficiente para asegurar la calidad promedio de los productos generados. La selección de hojas de la muestra se realizará de acuerdo con el método aleatorio estratificado, de forma que se asegure la evaluación adecuada de la hoja a evaluar.” (Instituto Geográfico Militar, 2022).

Siguiendo el protocolo lo primero que se hizo es seccionar el área de interés en hojas cartográficas escala 1:1000 de tamaño 15"x15" de arco, para ello se partió del meridiano W078°27'30" y el paralelo S00°17'30" que es donde se ubica la carta 1:5000 - ÑIII-B3c-E1 cuyas dimensiones conocidas son de 1'15"x1'15" de arco, a partir de ese punto se fue elaborando la malla de cartas 1:1000, una vez definido todo el polígono de cartas se seleccionó las que cruzan el área de interés, en total son ocho cartas que carecen de una codificación específica, sin embargo continuando con la lógica de nomenclatura IGM se les ha asignado el nombre de ÑIII-B3c-E1x, ÑIII-B3c-E1y, ÑIII-B3c-E3c, ÑIII-B3c-E3d, ÑIII-B3c-E3h, ÑIII-B3c-E3i, ÑIII-B3c-E3m, ÑIII-B3c-E3n y se distribuyen de acuerdo a la figura 23.

### Figura 23

*Distribución hojas cartografía 1:1000*



La norma INEN 2859-1 dice que con ocho lotes (hojas muestrales) se debe revisar dos hojas cartográficas de forma aleatoria por sorteo, donde el contenido muestral de cada hoja debe ser superior a 30 puntos, ya que con una muestra significativa de 30 puntos se cumple con la tendencia del límite central que sigue una distribución normal con lo que se garantiza los resultados de exactitud posicional como lo define Ariza en 2012. Por su parte el IPGH en 2019 a través de su comité técnico elaboro la Guía Para La Evaluación De La Exactitud Posicional De Datos Espaciales especifica la gráfica de la figura 24.

### Figura 24

*Tamaños de muestra recomendados en función de la superficie del proyecto*

| Superficie del proyecto (km <sup>2</sup> ) | Evaluación de la exactitud horizontal de ortoimágenes y planimetría      | Evaluación de la exactitud horizontal y vertical de conjuntos de datos de elevaciones |                                                             |                                               |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                                            | Nº total de puntos estáticos de evaluación 2D/3D (puntos bien definidos) | Nº de puntos estáticos de evaluación 3D en terreno no vegetado                        | Nº de puntos estáticos de evaluación 3D en terreno vegetado | Nº total de puntos estáticos de evaluación 3D |
| ≤500                                       | 20                                                                       | 20                                                                                    | 5                                                           | 25                                            |
| 501-750                                    | 25                                                                       | 20                                                                                    | 10                                                          | 30                                            |
| 751-1000                                   | 30                                                                       | 25                                                                                    | 15                                                          | 40                                            |
| 1001-1250                                  | 35                                                                       | 30                                                                                    | 20                                                          | 50                                            |
| 1251-1500                                  | 40                                                                       | 35                                                                                    | 25                                                          | 60                                            |
| 1501-1750                                  | 45                                                                       | 40                                                                                    | 30                                                          | 70                                            |
| 1751-2000                                  | 50                                                                       | 45                                                                                    | 35                                                          | 80                                            |
| 2001-2250                                  | 55                                                                       | 50                                                                                    | 40                                                          | 90                                            |
| 2251-2500                                  | 60                                                                       | 55                                                                                    | 45                                                          | 100                                           |

Fuente: IPGH (2019)

Para esta sección se realizó el chequeo de puntos de dos formas distintas, una mediante RTK Radio y otra mediante RTK por IP, también llamado NTRIP que son los dos métodos de posicionamiento GNSS a tiempo real más utilizado en la actualidad y por ende los métodos más comunes con los que se realizan levantamientos topográficos, para ambos métodos los parámetros fueron configurados se definen en la tabla 9.

**Tabla 9**

*Parámetros utilizados para la toma de datos*

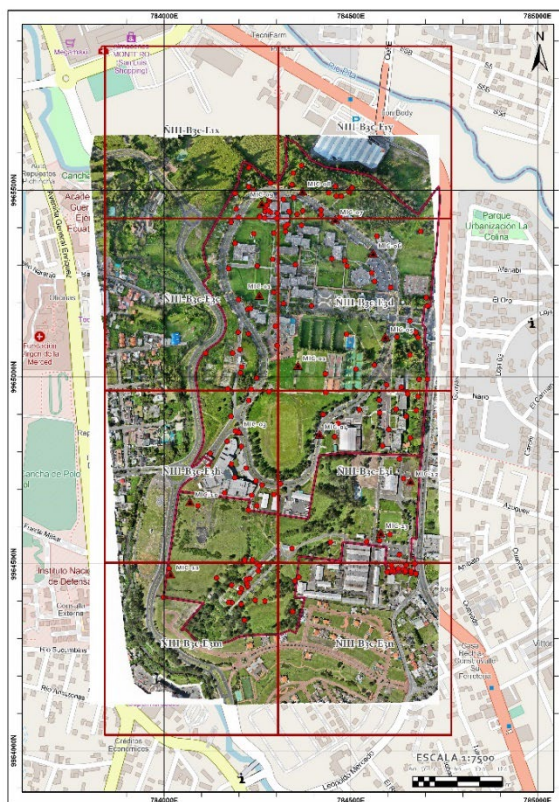
|                       |                            |
|-----------------------|----------------------------|
| Proyección            | GRS80/UTM Zona 17 Sur      |
| Modelo geoidal        | EGM2008 Ecuador            |
| Mascara de elevación  | 10°                        |
| Tiempo de observación | 5 segundos                 |
| Épocas de observación | 3                          |
| Tipo de trayectoria   | Fija                       |
| Precisión             | Horizontal 0.050           |
|                       | Vertical 0.100             |
| Satélites             | GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU |

Para la selección de puntos muestrales se siguió el criterio de que debe coincidir exactamente el punto levantado con estación total con el punto tomado con GNSS, para ello se escogieron puntos foto identificables, como esquinas bien definidas de edificios, canchas, vías, aceras, centros de alcantarillas, y puntos topográficos de control. En total

para la primera fase, se seleccionaron 180 puntos del total de elementos levantados, los cuales se encontraban distribuidos de forma aleatoria en las ocho hojas cartográficas escala 1:1000 que indica la figura 25, para esta primera fase se utilizó el método RTK por radio, donde los puntos fijos utilizados de base son los que se determinaron la sección de control horizontal del presente trabajo, y la parte vertical se utilizó el modelo geoidal EGM08 para aplicar el principio de nivelación GNSS demostrado por Enríquez en 2019 siendo únicamente para determinar diferencias de ondulación geoidal, pero la elevación de partida fue la determinada con el control vertical establecido previamente. En todos los casos se debe verificar que la solución de la trayectoria sea del tipo fijo. Para la validación se utilizó equipos GNSS doble frecuencia Trimble R8s.

**Figura 25**

*Distribución con muestra hojas escala 1:1000*



**Tabla 10***Equipo utilizado para la toma de datos RTK.*

| Orden | Equipo                    | Cantidad |
|-------|---------------------------|----------|
| 1     | Equipo GNSS Trimble R8s   | 4        |
| 2     | Trípode                   | 2        |
| 3     | Base nivelante            | 2        |
| 4     | Extensión de 0.25 cm      | 2        |
| 5     | Radio RTK                 | 2        |
| 6     | Bastón de aluminio        | 2        |
| 7     | Sujetador receptor bastón | 2        |
| 8     | Colectora de campo GNSS   | 2        |

Para realizar el método RTK se requiere que un equipo se quede en el punto fijo de coordenadas conocidas en el marco y en la época actual ya que es un método de posicionamiento a tiempo real donde las correcciones RTCM viajan a través de radio, adicional es importante que la configuración del enlace por radio sea correcta ya que si no existen enlaces de radio en el mismo protocolo no se puede posicionar un punto dentro del método RTK.

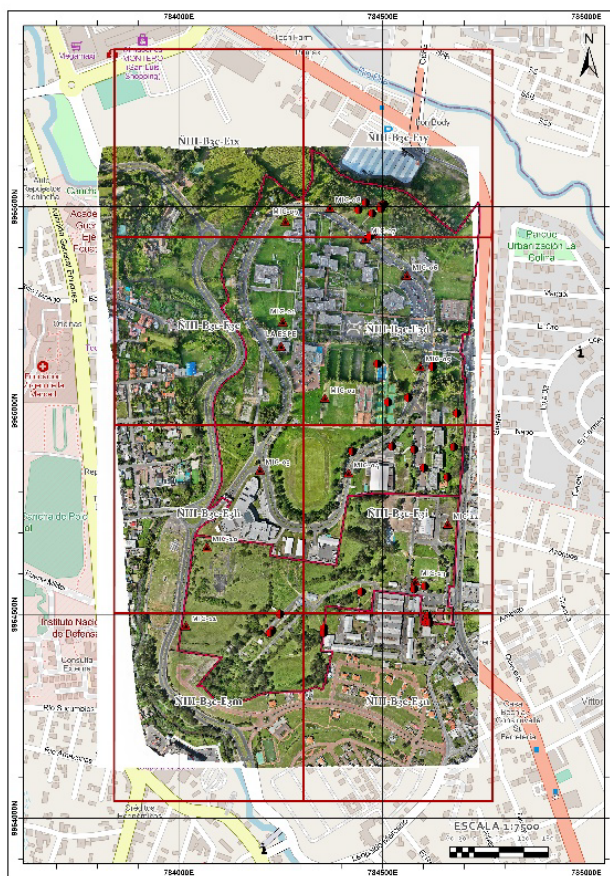
En el caso de los receptores Trimble es importante saber discriminar la configuración de fábrica que manejan, ya que solo admiten la configuración de base o la configuración de móvil según sea el caso, y no pueden ser intercambiados ya que no permiten iniciar el trabajo, una forma de evidenciar dicho problema es al tratar de iniciar el modo base del equipo no permite avanzar. Otro inconveniente es que con el modelo Trimble R8s no permite realizar levantamientos RTK sin el aplicativo Trimble Access que únicamente funciona en las colectoras de campo GNSS Juno T31 o Trimble TSC3, no cuenta con la misma facilidad del Trimble DL para realizar levantamientos en modo estático desde cualquier dispositivo Android.

Se requiere un mínimo de cuatro personas para realizar el levantamiento RTK por radio, dos se quedan en la base y dos se van a campo a realizar la toma de datos. Se planificó utilizar dos pares de equipos para tomar la mayor cantidad de puntos en menor tiempo.

Un nuevo muestreo RTK esta vez con IP bajo el protocolo NTRIP enlazado al cáster IGM de la estación CORS EPEC, las longitudes de las líneas base son muy similares al estar ubicada la EPEC dentro del área de estudio. Para utilizar el servicio NTRIP se debe tener una cuenta activa en el servicio del IGM la cual es un servicio libre y gratuito que ofrece esta institución.

Mediante el protocolo NTRIP se utiliza como punto fijo de coordenadas conocidas las estaciones REGME con capacidad de conectarse a internet, sin embargo, dichas estaciones carecen de control vertical por lo que la altura que determina como base se obtiene mediante un modelo de ondulaciones geoidales, en este caso el EGM08 mismo que Portilla et. al (2021) demostró que sirve para proyectos con una escala 1:5000 o superior, que es el que cuenta el colector y sirve para cumplir el principio de nivelación GNSS. Adicional las coordenadas que fija son las de la monografía oficial de la estación, misma que se encuentra en SIRGAS ECUADOR en una proyección UTM zona 17 Sur a través del elipsoide GRS80, no permite introducir otras coordenadas.

Dado que se tiene una discrepancia de partida respecto al marco actual de los satélites y el marco de referencia geodésico oficial del Ecuador se puede decir que el método NTRIP en términos geodésicos no es un método apto de validación, sin embargo, para otras aplicaciones prácticas se encuentra dentro de la tolerancia IPGH para escala 1:1000, menor a 30 cm por lo que se decidió utilizar este método para validar un total de 30 puntos dentro de toda el área de estudio que se convierte en otra forma de validación de la información obtenida. Los 30 puntos corresponden a una muestra aleatoria estratificada simple bajo el mismo criterio utilizado para el muestreo RTK, donde se somete al equipo GNSS a diversos entornos de captura de información, los 30 puntos muestreados corresponden a la misma lista de puntos muestreada con RTK por Radio, como detalla la figura 26.

**Figura 26***Distribución de la muestra NTRIP.*

Los tres entornos o estratos que se trabaja corresponden a entornos libres de obstrucción, entornos urbanos rodeados de infraestructura, y entornos semejantes a rurales con frondosa cobertura vegetal cercana.

Al tener un enlace por IP a la estación base, las correcciones diferenciales GNSS en tiempo real RTCM viajan por un medio distinto al radio, por lo que no existen obstrucciones de alcance y cobertura desde la estación base, se debe considerar que en entornos urbanos la cobertura de radio RTK es muy limitada por las interferencias de infraestructura, humanas, y electromagnéticas son altas, en NTRIP únicamente se depende de la cobertura de la red celular o Wifi, adicional solo se requiere el equipo Róver para realizar el levantamiento ya que

la estación base la proporciona e IGM y el personal que se requiere en campo es menor, necesitando dos personas únicamente.

**Tabla 11**

*Equipo utilizado para el método NTRIP*

| Orden | Equipo                    | Cantidad |
|-------|---------------------------|----------|
| 1     | Equipo GNSS Trimble R8s   | 2        |
| 2     | Bastón de aluminio        | 2        |
| 3     | Sujetador receptor bastón | 2        |
| 4     | Colectora de campo GNSS   | 2        |

Con todos los datos recopilados se tabuló los resultados, donde el estadístico a utilizar es el RMSE y el error medio, el error está definido por la ecuación 5, donde al final se promedia los valores y se obtiene el error medio, adicional se construye un intervalo de confianza al 95%. Para el cálculo del RMSE y la exactitud posicional se sigue la metodología explicada en el protocolo de fiscalización del IGM para escala 1:1000 al 90% de confianza donde define la ecuación 10.

#### **Ecuación 10**

*Error cuadrático medio*

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_j)^2}$$

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_j)^2}$$

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - z_j)^2}$$

$$RMSE_r = \sqrt{(RMSE_x)^2 + (RMSE_y)^2}$$

### Ecuación 11

*Criterios de exactitud posicional al 90%.*

$$\text{Exactitud } r = 1.073 * (RMSE_x + RMSE_y)$$

$$\text{Exactitud } z = 1.96 * RMSE_z$$

## Capítulo IV

### Resultados

#### Establecimiento de una red de control básico horizontal

Tras el establecimiento de la red y su ajuste posterior se determinó los siguientes resultados, coordenadas en tres sistemas de coordenadas distintos para dos sistemas de referencia diferentes, el informe de cierres de bucles GNSS, los estadísticos de error medio, RMSE y exactitud posicional de las componentes planimétricas y altimétricas.

### Figura 27

*Elenco coordenadas ECEF ajustadas red geodésica local.*

Adjusted ECEF Coordinates

| Point ID | X<br>(Metre)  | X Error<br>(Metre) | Y<br>(Metre)   | Y Error<br>(Metre) | Z<br>(Metre)  | Z Error<br>(Metre) | 3D Error<br>(Metre) | Constraint |
|----------|---------------|--------------------|----------------|--------------------|---------------|--------------------|---------------------|------------|
| CXEC     | 1259454.40100 | ?                  | -6254555.56141 | ?                  | -103452.51048 | ?                  | ?                   | LLh        |
| MIC_01   | 1277940.00325 | 0.005              | -6251272.85330 | 0.013              | -34772.29486  | 0.004              | 0.014               |            |
| MIC_02   | 1278040.64916 | 0.005              | -6251249.94105 | 0.014              | -34960.13175  | 0.004              | 0.015               |            |
| MIC_03   | 1277884.88406 | 0.005              | -6251281.74811 | 0.013              | -35135.92661  | 0.004              | 0.015               |            |
| MIC_04   | 1278098.57464 | 0.005              | -6251243.03033 | 0.014              | -35143.71957  | 0.004              | 0.015               |            |
| MIC_05   | 1278272.00026 | 0.005              | -6251212.58986 | 0.013              | -34882.99168  | 0.004              | 0.014               |            |
| MIC_06   | 1278239.49355 | 0.005              | -6251217.02135 | 0.013              | -34658.89183  | 0.004              | 0.015               |            |
| MIC_07   | 1278141.09089 | 0.004              | -6251243.59038 | 0.013              | -34568.96074  | 0.003              | 0.015               |            |
| MIC_08   | 1278055.37676 | 0.006              | -6251260.30221 | 0.016              | -34493.20053  | 0.005              | 0.018               |            |
| MIC_09   | 1277946.41519 | 0.004              | -6251272.66162 | 0.013              | -34526.52041  | 0.003              | 0.014               |            |
| MIC_10   | 1277756.94932 | 0.005              | -6251304.86784 | 0.013              | -35324.78456  | 0.004              | 0.015               |            |
| MIC_11   | 1277706.50172 | 0.005              | -6251316.04886 | 0.014              | -35518.19789  | 0.005              | 0.015               |            |
| MIC_12   | 1278339.67933 | 0.005              | -6251206.97331 | 0.013              | -35269.22194  | 0.004              | 0.015               |            |
| MIC_13   | 1278261.43717 | 0.005              | -6251222.10980 | 0.014              | -35408.35929  | 0.005              | 0.015               |            |
| QUIT     | 1272867.28241 | ?                  | -6252772.05182 | ?                  | -23801.55207  | ?                  | ?                   | LLh        |

### Figura 28

*Elenco coordenadas geodésicas ajustadas redes geodésica local.*

## Adjusted Geodetic Coordinates

| Point ID | Latitude        | Longitude        | Height (Metre) | Height Error (Metre) | Constraint |
|----------|-----------------|------------------|----------------|----------------------|------------|
| CXEC     | S0°56'06.78862" | W78°36'53.40727" | 2808.47680     | ?                    | LLh        |
| MIC_01   | S0°18'51.64784" | W78°26'46.63159" | 2518.15416     | 0.013                |            |
| MIC_02   | S0°18'57.76119" | W78°26'43.29558" | 2516.89838     | 0.014                |            |
| MIC_03   | S0°19'03.48224" | W78°26'48.43492" | 2517.83484     | 0.014                |            |
| MIC_04   | S0°19'03.73498" | W78°26'41.41622" | 2522.74585     | 0.014                |            |
| MIC_05   | S0°18'55.24901" | W78°26'35.72640" | 2526.22344     | 0.013                |            |
| MIC_06   | S0°18'47.95633" | W78°26'36.78464" | 2522.82342     | 0.014                |            |
| MIC_07   | S0°18'45.02850" | W78°26'40.07328" | 2528.65008     | 0.014                |            |
| MIC_08   | S0°18'42.56312" | W78°26'42.89622" | 2527.44097     | 0.016                |            |
| MIC_09   | S0°18'43.64920" | W78°26'46.42727" | 2517.90694     | 0.013                |            |
| MIC_10   | S0°19'09.62895" | W78°26'52.63657" | 2515.91480     | 0.014                |            |
| MIC_11   | S0°19'15.92321" | W78°26'54.30674" | 2517.84793     | 0.014                |            |
| MIC_12   | S0°19'07.81696" | W78°26'33.54652" | 2536.41720     | 0.014                |            |
| MIC_13   | S0°19'12.34516" | W78°26'36.12260" | 2536.34738     | 0.014                |            |
| QU11     | S0°12'54.55879" | W78°29'36.98970" | 2922.45598     | ?                    | LLh        |

*Nota: La columna 4 corresponde a la altura elipsoidal referida al elipsoide GRS80.*

**Figura 29**

*Elenco coordenadas UTM ajustadas red geodésica local.*

## Adjusted Grid Coordinates

| Point ID | Easting (Metre) | Easting Error (Metre) | Northing (Metre) | Northing Error (Metre) | Elevation (Metre) | Elevation Error (Metre) | Constraint |
|----------|-----------------|-----------------------|------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|------------|
| CXEC     | 765451.14580    | ?                     | 9896539.87977    | ?                      | 2782.38303        | 0.000                   | LLh        |
| MIC_01   | 784254.88018    | 0.004                 | 9965220.47764    | 0.004                  | 2491.65938        | 0.013                   |            |
| MIC_02   | 784358.05090    | 0.004                 | 9965032.56749    | 0.004                  | 2490.40354        | 0.014                   |            |
| MIC_03   | 784198.99542    | 0.004                 | 9964856.77864    | 0.004                  | 2491.34237        | 0.014                   |            |
| MIC_04   | 784416.15336    | 0.004                 | 9964848.95750    | 0.004                  | 2496.25102        | 0.014                   |            |
| MIC_05   | 784592.26216    | 0.004                 | 9965109.71824    | 0.004                  | 2499.72581        | 0.013                   |            |
| MIC_06   | 784559.57480    | 0.004                 | 9965333.85656    | 0.004                  | 2496.32511        | 0.014                   |            |
| MIC_07   | 784457.84534    | 0.004                 | 9965423.86391    | 0.003                  | 2502.15232        | 0.014                   |            |
| MIC_08   | 784370.52139    | 0.005                 | 9965499.65522    | 0.005                  | 2500.94364        | 0.016                   |            |
| MIC_09   | 784261.26182    | 0.003                 | 9965466.30272    | 0.003                  | 2491.41077        | 0.013                   |            |
| MIC_10   | 784068.94891    | 0.004                 | 9964667.90113    | 0.004                  | 2489.42439        | 0.014                   |            |
| MIC_11   | 784017.22540    | 0.005                 | 9964474.46949    | 0.005                  | 2491.35881        | 0.014                   |            |
| MIC_12   | 784659.61275    | 0.004                 | 9964723.44330    | 0.004                  | 2509.91993        | 0.014                   |            |
| MIC_13   | 784579.87340    | 0.005                 | 9964584.29506    | 0.005                  | 2509.85129        | 0.014                   |            |
| QU11     | 778986.28608    | ?                     | 9976195.95707    | ?                      | 2895.66603        | 0.000                   | LLh        |

*Nota: La columna 6 corresponde a la altura ortométrica referida al modelo geopotencial gravimétrico global EGM08.*

La razón por la cual los PPM en el informe de cierres geométricos se disparan es que son un indicador de precisión relativa, donde 1 PPM significa un error de un milímetro en una distancia de un kilómetro, en bucles GNSS se forman triángulos entre vértices de la red o puntos base, la red al ser en un área tan pequeña y reduce los vectores no superan en muchas ocasiones el kilómetro de longitud entre ellos, y en GNSS depende mucho el método y el equipo para obtener precisiones submilimétricas, adicional las observaciones GNSS están condicionadas por una serie de factores determinantes, como la geometría de los satélites y la ubicación terrestre desde donde se observa, por lo que se puede llegar a tener 30.821 PPM en un vector

de 820 m., hasta 0.106 PPM en un vector de 14.166 Km en otro como se resume en la figura

30. Se acepto el ajuste dado que la varianza a posteriori tras el ajuste fue de 1.

### Figura 30

*Informe de cierres geométricos GNSS tras el ajuste.*

Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE"

Av: General Rumiñahui

Ambato

Sangolqui, Pichincha EC171103

Ecuador

Phone:(02) 398-9400

espe.edu.ec

| Project File Data |                                                                                                                         | Coordinate System       |                                |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| Name:             | C:\Users\Usuario\OneDrive - UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE\Documents\Trimble Business Center\RED_MIC_IGS20.vce | Name:                   | Ecudor\SIRGAS-Ecuador (2016.4) |
| Size:             | 408 KB                                                                                                                  | Zone:                   | UTM Zone 17 Sur                |
| Modified:         | 2024-07-07 11:59:03 (UTC:-5)                                                                                            | Datum:                  | SIRGAS                         |
| Time zone:        | SA Pacific Standard Time                                                                                                | Global reference datum: | ITRF2020                       |
| Reference number: |                                                                                                                         | Global reference epoch: | 2015                           |
| Description:      |                                                                                                                         | Geoid:                  | EGM 2008 Ecuador               |
| Comment 1:        |                                                                                                                         | Vertical datum:         |                                |
| Comment 2:        |                                                                                                                         | Calibrated site:        |                                |
| Comment 3:        |                                                                                                                         |                         |                                |

El elenco de coordenadas transformadas es:

**Tabla 12**

*Coordenadas ECEF transformadas a SIRGAS ECUADOR*

| <b>COORDENADAS ECEF SIRGAS-ECUADOR</b> |               |                |              |
|----------------------------------------|---------------|----------------|--------------|
| <b>Vértice</b>                         | <b>X [m]</b>  | <b>Y [m]</b>   | <b>Z [m]</b> |
| <b>MIC_01</b>                          | 1277940.01928 | -6251272.81832 | -34772.36990 |
| <b>MIC_02</b>                          | 1278040.66835 | -6251249.91356 | -34960.21030 |
| <b>MIC_03</b>                          | 1277884.90420 | -6251281.71661 | -35136.00510 |
| <b>MIC_04</b>                          | 1278098.59300 | -6251243.00512 | -35143.79690 |
| <b>MIC_05</b>                          | 1278272.01720 | -6251212.55959 | -34883.06620 |
| <b>MIC_06</b>                          | 1278239.50986 | -6251216.98786 | -34658.96970 |
| <b>MIC_07</b>                          | 1278141.10686 | -6251243.55634 | -34569.03920 |
| <b>MIC_08</b>                          | 1278055.39433 | -6251260.26996 | -34493.27590 |
| <b>MIC_09</b>                          | 1277946.43212 | -6251272.62746 | -34526.59580 |
| <b>MIC_10</b>                          | 1277756.96789 | -6251304.83599 | -35324.86290 |

|               |               |                |              |
|---------------|---------------|----------------|--------------|
| <b>MIC_11</b> | 1277706.52127 | -6251316.02532 | -35518.27580 |
| <b>MIC_12</b> | 1278339.69927 | -6251206.94687 | -35269.30090 |
| <b>MIC_13</b> | 1278261.45534 | -6251222.08289 | -35408.43660 |

**Tabla 13**

*Coordenadas geodésicas transformadas a SIRGAS ECUADOR*

| <b>COORDENADAS GEODÉSICAS SIRGAS-ECUADOR</b> |                  |                   |                              |
|----------------------------------------------|------------------|-------------------|------------------------------|
| <b>Vértice</b>                               | <b>Latitud</b>   | <b>Longitud</b>   | <b>Altura Elipsoidal [m]</b> |
| <b>MIC_01</b>                                | S00°18'51.65029" | W078°26'46.63086" | 2518.1235                    |
| <b>MIC_02</b>                                | S00°18'57.76375" | W078°26'43.29479" | 2516.8757                    |
| <b>MIC_03</b>                                | S00°19'03.48480" | W078°26'48.43408" | 2517.8084                    |
| <b>MIC_04</b>                                | S00°19'03.73750" | W078°26'41.41548" | 2522.7253                    |
| <b>MIC_05</b>                                | S00°18'55.25144" | W078°26'35.72566" | 2526.1976                    |
| <b>MIC_06</b>                                | S00°18'47.95887" | W078°26'36.78390" | 2522.7943                    |
| <b>MIC_07</b>                                | S00°18'45.03106" | W078°26'40.07255" | 2528.6204                    |
| <b>MIC_08</b>                                | S00°18'42.56558" | W078°26'42.89545" | 2527.4133                    |
| <b>MIC_09</b>                                | S00°18'43.65166" | W078°26'46.42651" | 2517.8773                    |
| <b>MIC_10</b>                                | S00°19'09.63150" | W078°26'52.63578" | 2515.8878                    |
| <b>MIC_11</b>                                | S00°19'15.92575" | W078°26'54.30597" | 2517.8292                    |
| <b>MIC_12</b>                                | S00°19'07.81953" | W078°26'33.54571" | 2536.3957                    |
| <b>MIC_13</b>                                | S00°19'12.34768" | W078°26'36.12185" | 2536.3251                    |

Fuente: Autor (2024)

Finalmente, para la mayoría de los trabajos de topografía se necesitan coordenadas proyectadas o planas, en este caso UTM, para ello se siguió la metodología establecida por Milán en 2006 con las fórmulas de correspondencia directa de la proyección UTM.

**Tabla 14**

*Coordenadas planas transformadas a SIRGAS ECUADOR.*

| COORDENADAS UTM SIRGAS-ECUADOR |             |              |                     |
|--------------------------------|-------------|--------------|---------------------|
| Vértice                        | Este [m]    | Norte [m]    | Elevación EGM08 [m] |
| MIC_01                         | 784254.9029 | 9965220.4024 | 2491.6287           |
| MIC_02                         | 784358.0752 | 9965032.4888 | 2490.3809           |
| MIC_03                         | 784199.0214 | 9964856.7000 | 2491.3160           |
| MIC_04                         | 784416.1764 | 9964848.8800 | 2496.2304           |
| MIC_05                         | 784592.2848 | 9965109.6436 | 2499.7000           |
| MIC_06                         | 784559.5975 | 9965333.7785 | 2496.2960           |
| MIC_07                         | 784457.8678 | 9965423.7853 | 2502.1226           |
| MIC_08                         | 784370.5451 | 9965499.5797 | 2500.9160           |
| MIC_09                         | 784261.2852 | 9965466.2272 | 2491.3811           |
| MIC_10                         | 784068.9735 | 9964667.8226 | 2489.3973           |
| MIC_11                         | 784017.2492 | 9964474.3914 | 2491.3401           |
| MIC_12                         | 784659.6376 | 9964723.3642 | 2509.8985           |
| MIC_13                         | 784579.8966 | 9964584.2176 | 2509.8290           |

**Tabla 15**

*Comparación entre coordenadas IGS20 procesadas y coordenadas transformadas a SIRGAS-ECUADOR.*

| IGS20   |             | SIRGAS ECUADOR |             | $dif_{este}$ | $dif_{norte}$ | $dif_{xy}$ [m] |
|---------|-------------|----------------|-------------|--------------|---------------|----------------|
| Vértice | Este [m]    | Norte [m]      | Este [m]    | Norte [m]    | [m]           | [m]            |
| MIC_01  | 784254.8802 | 9965220.4776   | 784254.9011 | 9965220.4001 | -0.021        | 0.078          |
| MIC_02  | 784358.0509 | 9965032.5675   | 784358.0735 | 9965032.4866 | -0.023        | 0.081          |
| MIC_03  | 784198.9954 | 9964856.7786   | 784199.0198 | 9964856.6980 | -0.024        | 0.081          |
| MIC_04  | 784416.15   | 9964848.9575   | 784416.1747 | 9964848.8780 | -0.021        | 0.080          |
| MIC_05  | 784592.2622 | 9965109.7182   | 784592.2831 | 9965109.6414 | -0.021        | 0.077          |
| MIC_06  | 784559.5748 | 9965333.8566   | 784559.5955 | 9965333.7760 | -0.021        | 0.081          |
| MIC_07  | 784457.8453 | 9965423.8639   | 784457.8656 | 9965423.7826 | -0.020        | 0.081          |
| MIC_08  | 784370.5214 | 9965499.6552   | 784370.5429 | 9965499.5769 | -0.021        | 0.078          |
| MIC_09  | 784261.2618 | 9965466.3027   | 784261.2830 | 9965466.2244 | -0.021        | 0.078          |
| MIC_10  | 784068.9489 | 9964667.9011   | 784068.9720 | 9964667.8207 | -0.023        | 0.080          |
| MIC_11  | 784017.2254 | 9964474.4695   | 784017.2481 | 9964474.3902 | -0.023        | 0.079          |

|        |             |              |             |              |        |       |       |
|--------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------|-------|-------|
| MIC_12 | 784659.6128 | 9964723.4433 | 784659.6360 | 9964723.3623 | -0.023 | 0.081 | 0.084 |
| MIC_13 | 784579.8734 | 9964584.2951 | 784579.8951 | 9964584.2161 | -0.022 | 0.079 | 0.082 |

Donde tras realizar un análisis de estadística descriptiva se obtiene que la media del error con su desviación estándar es de  $0.0825m \pm 0.0016 m$ .

Realizando un mapa de vectores (figura 31) se observa la magnitud del error y la dirección del error, dentro del área de estudio todos los puntos tienen una magnitud de error y un vector de dirección similar, el desplazamiento es hacia el noroeste con un acimut medio de  $344^{\circ}37'27''$ .

**Figura 31**

*Mapa de vectores de desplazamiento entre marcos de referencia de la Red Geodésica Local ESPE 2024*



De forma similar se realizó una comparativa en la componente vertical con las alturas elipsoidales, donde se aprecia que las diferencias en la componente vertical son mínimas.

**Tabla 16**

*Diferencias de alturas elipsoidales entre ambos marcos.*

| Vértice | Altura Elipsoidal |                |         |
|---------|-------------------|----------------|---------|
|         | IGS20             | SIRGAS-ECUADOR | $dif_h$ |
| MIC_01  | 2518.1542         | 2518.1429      | 0.011   |
| MIC_02  | 2516.8984         | 2516.8949      | 0.003   |
| MIC_03  | 2517.8348         | 2517.8275      | 0.007   |
| MIC_04  | 2522.7459         | 2522.7442      | 0.002   |
| MIC_05  | 2526.2234         | 2526.2167      | 0.007   |
| MIC_06  | 2522.8234         | 2522.8139      | 0.010   |
| MIC_07  | 2528.6501         | 2528.6403      | 0.010   |
| MIC_08  | 2527.4410         | 2527.4333      | 0.008   |
| MIC_09  | 2517.9069         | 2517.8973      | 0.010   |
| MIC_10  | 2515.9148         | 2515.9067      | 0.008   |
| MIC_11  | 2517.8479         | 2517.8459      | 0.002   |
| MIC_12  | 2536.4172         | 2536.4144      | 0.003   |
| MIC_13  | 2536.3474         | 2536.3426      | 0.005   |

Donde tras realizar un análisis de estadística descriptiva se obtiene que la media del error con su desviación estándar es de  $0.0065\text{m} \pm 0.0032\text{ m}$ .

Con un análisis de exactitud posicional al 90% de confianza definida en la ecuación 10 y 11 se obtiene la tabla 17:

**Tabla 17**

*RMSE y Exactitud posicional entre marcos de referencia*

| RMSE  | RMSE <sub>x</sub> [m] | RMSE <sub>y</sub> [m] | RMSE <sub>z</sub> [m] | RMSE <sub>r</sub> [m] |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Valor | 0.002                 | 0.023                 | 0.007                 | 0.023                 |

Nota: Los valores de RMSE están en coordenadas planas Este (x), Norte (y) y Altura elipsoidal (z). El RMSE<sub>r</sub> es el módulo entre las componentes x y y.

| <b>Exactitud Posicional</b> |                        |
|-----------------------------|------------------------|
| <b>Exactitud r [m]</b>      | <b>Exactitud z [m]</b> |
| 0.026                       | 0.014                  |

Nota: La exactitud posicional está definida al 90% de confianza

Considerando la resolución No. IGM-2016-005-e-1 en su artículo 4 dice: Nota aclaratoria: El Marco Geodésico de Referencia Nacional se basará únicamente en las estaciones de la Red Activa REGME. El tiempo aproximado de adopción del Nuevo Marco de Referencia dependerá de la estabilidad de las series de tiempo en la corteza terrestre; y también estará en función de la disponibilidad económica asignada para el proyecto (2 años aproximadamente).

Mediante resolución-2019-037-IGM-JUR en su artículo 6 dice “Conceder un plazo de Cinco años contados a partir de la publicación de la presente Resolución, para que las instituciones públicas, privadas, academia y comunidad de usuarios adopten, de manera oficial, el Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas SIRGAS en todo el país.”

#### **Establecimiento de una red de control básico vertical**

Tras realizar el procedimiento de campo se obtuvo los siguientes resultados, los desniveles observados en campo, la ondulación geoidal, y la comparativa entre nivelación GNSS.

**Tabla 18**

*Desniveles observados*

| <b>PUNTO</b>   | <b>DESNIVEL</b> | <b>DISTANCIA</b> | <b>DISTANCIA</b> |
|----------------|-----------------|------------------|------------------|
| <b>SR-P-1A</b> | 2497.217        | m                | Km               |
| <b>MIC-05</b>  | 1.766           | 169.5            | 0.170            |
| <b>MIC-04</b>  | -3.489          | 333.4            | 0.333            |
| <b>MIC-13</b>  | 13.607          | 718.4            | 0.718            |
| <b>NIV-6</b>   | -1.121          | 162.2            | 0.162            |
| <b>NIV-5</b>   | -20.418         | 1003.1           | 1.003            |
| <b>NIV-1</b>   | -0.050          | 151.0            | 0.151            |
| <b>MIC-03</b>  | 3.109           | 214.9            | 0.215            |
| <b>MIC-02</b>  | -1.008          | 273.4            | 0.273            |
| <b>MIC-01</b>  | 1.264           | 268.9            | 0.269            |

|                        |        |        |         |
|------------------------|--------|--------|---------|
| <b>MIC-09</b>          | -0.204 | 269.6  | 0.270   |
| <b>MIC-08</b>          | 9.546  | 125.9  | 0.126   |
| <b>MIC-07</b>          | 1.180  | 118.1  | 0.118   |
| <b>MIC-06</b>          | -5.808 | 136.4  | 0.136   |
| <b>SR-P-1A</b>         | 1.623  | 244.8  | 0.245   |
| <b>CIERRE</b>          | -0.003 | 8.19   | Orden I |
| <b>DISTANCIA TOTAL</b> |        | 4189.6 | 4.190   |

Al determinar el control vertical se puede elaborar una tabla de ondulación geoidal como se define en la ecuación 8.

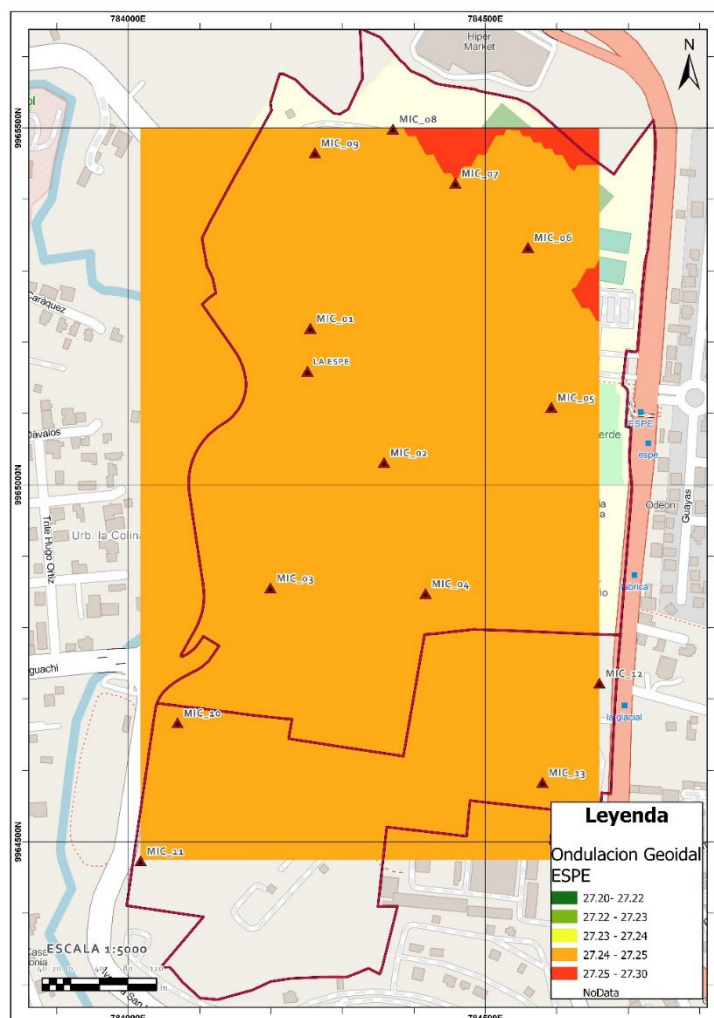
**Tabla 19**

*Ondulación geoidal determinada*

|              | <b>Altura Elipsoidal</b> | <b>Altura Nivelada</b> | <b>Ondulación Geoidal</b> |
|--------------|--------------------------|------------------------|---------------------------|
| <b>MIC1</b>  | 2518.1542                | 2490.8792              | 27.275                    |
| <b>MIC2</b>  | 2516.8984                | 2489.6150              | 27.283                    |
| <b>MIC3</b>  | 2517.8348                | 2490.6228              | 27.212                    |
| <b>MIC4</b>  | 2522.7459                | 2495.4942              | 27.252                    |
| <b>MIC5</b>  | 2526.2234                | 2498.9829              | 27.241                    |
| <b>MIC6</b>  | 2522.8234                | 2495.5936              | 27.230                    |
| <b>MIC7</b>  | 2528.6501                | 2501.4015              | 27.249                    |
| <b>MIC8</b>  | 2527.4410                | 2500.2214              | 27.220                    |
| <b>MIC9</b>  | 2517.9069                | 2490.6754              | 27.232                    |
| <b>MIC10</b> | 2515.9148                | 2488.6886              | 27.226                    |
| <b>MIC11</b> | 2517.8479                | 2490.6262              | 27.222                    |
| <b>MIC12</b> | 2536.4172                | 2509.1808              | 27.236                    |
| <b>MIC13</b> | 2536.3474                | 2509.1017              | 27.246                    |

La varianza a posteriori del ajuste del circuito de nivelación es de  $1.07 \times 10^{-07}$  con lo que se acepta el circuito.

**Figura 32**  
*Mapa del modelo de ondulaciones geoidales local*



La ondulación geoidal local es de  $27.240 \text{ m} \pm 0.021 \text{ m.}$ , sin embargo, el modelo está condicionado por la precisión de las alturas elipsoidales y las cotas niveladas, utilizando el modelo de ondulación geoidal se puede obtener con GNSS alturas similares a la de la estación total.

Tras medir los desniveles obtenidos con GNSS y con nivel de ingeniero se obtiene:

**Tabla 20**  
*Diferencia entre desniveles*

| <b>Desnivel</b>    | <b>Alturas<br/>Elipsoidales [m]</b> | <b>Alturas Ortométricas<br/>EGM08 [m]</b> | <b>Alturas Niveladas [m]</b> |
|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------|
| <b>MIC01-MIC02</b> | 1.2558                              | 1.2558                                    | 1.2642                       |
| <b>MIC02-MIC03</b> | -0.9365                             | -0.9388                                   | -1.0078                      |
| <b>MIC03-MIC04</b> | -4.9110                             | -4.9087                                   | -4.8714                      |
| <b>MIC04-MIC05</b> | -3.4776                             | -3.4748                                   | -3.4888                      |
| <b>MIC05-MIC06</b> | 3.4000                              | 3.4007                                    | 3.3893                       |
| <b>MIC06-MIC07</b> | -5.8267                             | -5.8272                                   | -5.8079                      |
| <b>MIC07-MIC08</b> | 1.2091                              | 1.2087                                    | 1.1801                       |
| <b>MIC08-MIC09</b> | 9.5340                              | 9.5329                                    | 9.5461                       |
| <b>MIC09-MIC10</b> | 1.9921                              | 1.9864                                    | 1.9867                       |
| <b>MIC10-MIC11</b> | -1.9331                             | -1.9344                                   | -1.9376                      |
| <b>MIC11-MIC12</b> | -18.5693                            | -18.5611                                  | -18.5546                     |
| <b>MIC12-MIC13</b> | 0.0698                              | 0.0686                                    | 0.0791                       |

Tras realizar el resultado de la nivelación GNSS se obtiene

**Tabla 21**

*Resultados de nivelación GNSS con diferentes modelos geoidales*

| <b>Vértice</b> | <b>Nivelación sin<br/>modelo geoidal</b> | <b>Nivelación con<br/>modelo EGM08</b> | <b>Nivelación con modelo<br/>geoidal local.</b> |
|----------------|------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------|
| <b>MIC1</b>    | 2490.8757                                | 2490.8793                              | 2490.8305                                       |
| <b>MIC2</b>    | 2489.6200                                | 2489.6234                              | 2489.5663                                       |
| <b>MIC3</b>    | 2490.5564                                | 2490.5623                              | 2490.5741                                       |
| <b>MIC4</b>    | 2495.4674                                | 2495.4709                              | 2495.4455                                       |
| <b>MIC5</b>    | 2498.9450                                | 2498.9457                              | 2498.9343                                       |
| <b>MIC6</b>    | 2495.5450                                | 2495.5450                              | 2495.5450                                       |
| <b>MIC7</b>    | 2501.3717                                | 2501.3722                              | 2501.3529                                       |
| <b>MIC8</b>    | 2500.1626                                | 2500.1635                              | 2500.1728                                       |
| <b>MIC9</b>    | 2490.6285                                | 2490.6307                              | 2490.6267                                       |
| <b>MIC10</b>   | 2488.6364                                | 2488.6443                              | 2488.6400                                       |
| <b>MIC11</b>   | 2490.5695                                | 2490.5787                              | 2490.5775                                       |
| <b>MIC12</b>   | 2509.1388                                | 2509.1398                              | 2509.1322                                       |
| <b>MIC13</b>   | 2509.0690                                | 2509.0712                              | 2509.0530                                       |

Si se considera el modelo de ondulaciones geoidales global EGM08, cuya desviación estándar es de 3 mm, y si se maneja la hipótesis de la superficie geoidal equivalente los resultados varían en un error medio de 0.003 m., con un RMSE de 0.004 m y una exactitud posicional de 0.008 m.

Al comparar resultados de la superficie equivalente y las cotas de la nivelación con las ondulaciones del modelo geoidal local se obtiene un error medio de 0.016 m., con un RMS de 0.023 m con una exactitud posicional de 0.044 m.

Al considerar la misma hipótesis de la superficie geoidal equivalente y corroborar los resultados contra las alturas niveladas se obtiene un error medio de  $0.039 \text{ m} \pm 0.019 \text{ m}$ ., con un RMS de 0.043 m. y exactitud posicional de 0.085 m.

Al comparar las cotas de la nivelación GNSS considerando el modelo de ondulaciones geoidales global EGM08 y las cotas determinadas con nivelación GNSS considerando el modelo de ondulación geoidal local se obtiene un error medio de 0.017 m., con un RMS de 0.024 m., con una exactitud posicional de 0.047 m.

Mientras que al comparar las cotas obtenidas con el modelo EGM08 con las cotas niveladas se obtiene un error medio de  $0.036 \text{ m} \pm 0.017 \text{ m}$ , con un RMS de 0.040 m y una exactitud posicional de 0.079 m.

Finalmente, al corroborar las cotas obtenidas con nivelación geométricas y las cotas obtenidas con nivelación GNSS considerando el modelo de ondulación geoidal local se obtiene un RMS de 0.049 m. y una exactitud posicional de 0.095 m. Esto ocurre ya que las cotas niveladas geométricamente parten de una placa IGM de orden I, y las cotas niveladas por GNSS nacen de una placa con un control IGM de orden II.

### **Levantamiento topográfico**

Durante el proceso de levantamiento topográfico se descargaron cuatro archivos de datos crudos de las estaciones totales, los cuales suman un total de 12 247 líneas, las cuales indican que se han introducido 495 puntos de coordenadas conocidas en total, y existieron 962

cambios en la altura del prisma, en total tras depurar toda la base de datos se obtuvieron un total de 8 828 puntos en toda el área de trabajo.

La información fue capturada en 21 días de trabajo, con la participación de 20 personas en campo y una en gabinete.

Se obtuvieron tres poligonales cuyos errores de cierre fueron:

Error poligonal 1:

- Error Total: 0.211 m.
- Precisión Relativa 1:7368.569

Error polígono 2:

- Error Total: 0.125 m.
- Precisión Relativa 1:9922.655

Error polígono 3:

- Error Total: 0.108 m.
- Precisión Relativa 1:2845.147

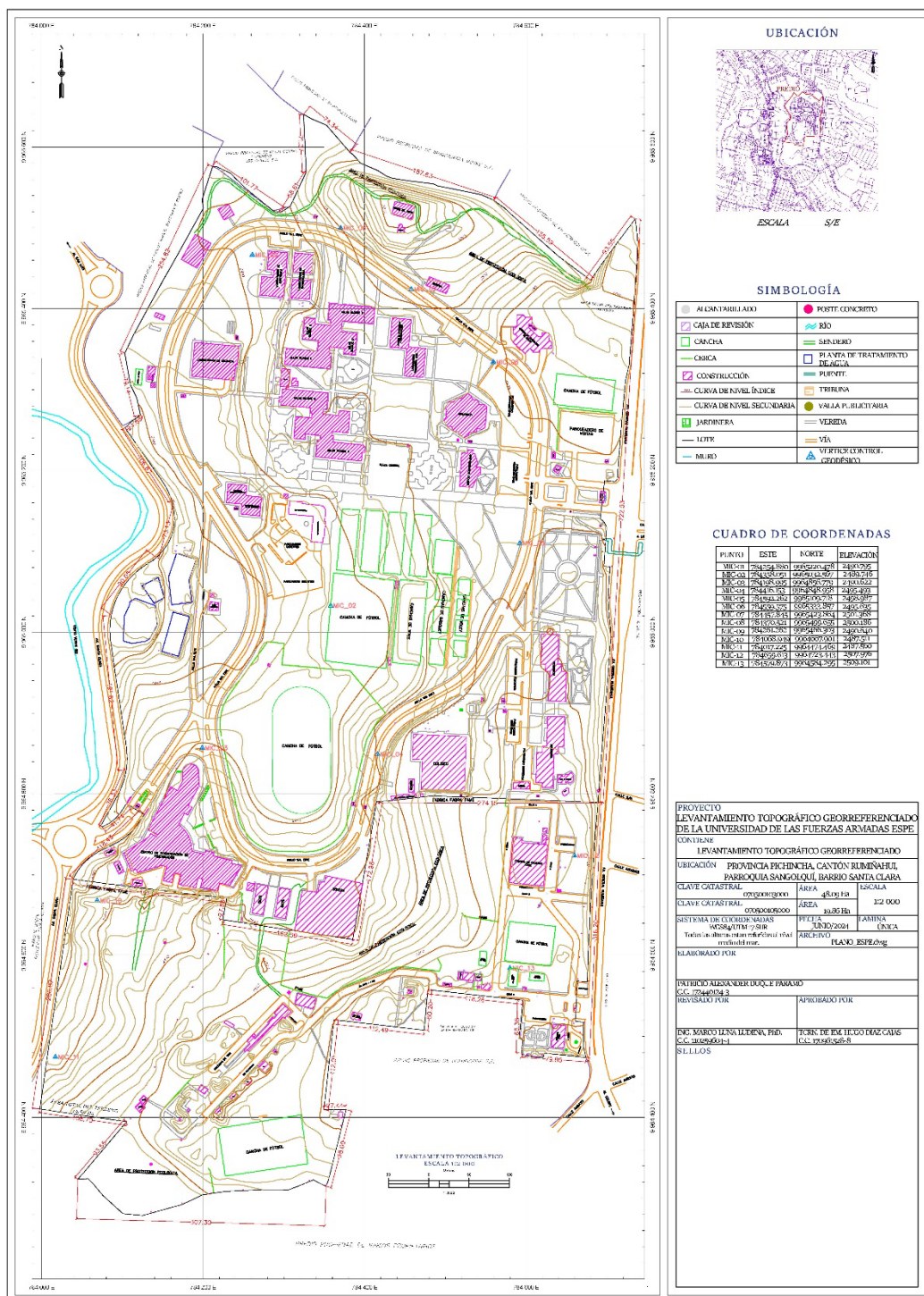
Con estación total se obtuvo una carga en campo más exigente que con los otros métodos requiriendo al menos tres semanas para completar toda el área de estudio, las limitantes de la estación total es que es susceptible a errores sistemáticos y acumulativos desde el inicio del proyecto y requiere mayor cantidad de personal, solo se puede tomar puntos que se encuentren en línea de vista directa y se debe densificar de forma obligatoria la red de control establecida al inicio. Sin embargo, con estación total se puede ingresar en áreas donde las otras tecnologías geoespaciales no garantizan resultados, como es en espacios confinados, con alta carga de obstáculos, y en zonas de frondosa vegetación.

### **Generación del producto topográfico**

El producto entregable es el plano topográfico de la universidad elaborado en CAD, el cual la parte con mayor dificultad fue el suavizado de las curvas de nivel.

### Figura 33

## Plano topográfico ESPE 2024



### **Levantamiento fotogramétrico**

El resultado del ajuste esta explicado en Abad et. al (2024) y el producto utilizado es la ortoimagen.

#### **Figura 34**

*Ortoimagen obtenida*



Fuente: Abad et. al. (2024).

### **Digitalización del producto fotogramétrico**

El proceso de digitalización 2D, ver figura 35, es más rápido dado que se realiza en gabinete, y es una interpretación de la imagen obtenida, sin embargo, para completar el proceso se requiere un conocimiento del terreno y los objetos espaciales presentes.

**Figura 35**

*Vectorización sobre la ortofoto*



Existieron limitantes al momento de realizar un trazo lógico de los elementos sobre la superficie que obstrucciones por vegetación, ver figura 36.

Otro inconveniente se da debido a que los linderos de con GNSS o Estación total se capturan junto al muro, mientras que por fotointerpretación se levantan en la mitad del cerramiento.

**Figura 36**

*Elementos que dificultan el dibujo*



Deformación debido al relieve en edificaciones y dificultad para reconocer su borde como se muestra en la figura 37.

**Figura 37**

*Desplazamiento debido al relieve*



Dificultad para categorizar elementos al desconocer su naturaleza, en este caso práctico al estar 100% familiarizado con el área de trabajo se podía discernir de forma eficiente los elementos espaciales.

En el caso de la figura 38 se trata de un pequeño pozo de alcantarillado que se puede confundir con el elemento acera, eso conlleva a un error de consistencia lógica.

### **Figura 38**

*Error de exactitud temática*



En total se emplearon tres días para realizar la vectorización de las 70 hectáreas del área de trabajo y alrededores como es el caso del Río Santa Clara, la Av. General Rumiñahui, la Av. Boulevard y transversales aledañas a la ESPE.

### **Control de calidad con técnicas GNSS**

Para el control de calidad resulto ser un proceso en relativa facilidad, ya que en GNSS se requiere de dos elementos, uno es la cobertura de señal satelital y que sus ambigüedades sean enteras, la capacidad de mantener un enlace en tiempo real con la estación base, dicho enlace en los métodos cinemáticos puede ser por IP o por radio, y la tercera es que las coordenadas de la estación base sean de precisión.

Para la sección de RTK por radio las coordenadas de la estación base fueron determinadas por el autor en la sección de control horizontal, dichas coordenadas se encuentran en el marco y época actual, y para la parte altimétrica se utilizaron las cotas del apartado de control vertical, el cual se combinó con el modelo EGM08 para aplicar el principio de nivelación GNSS. Los equipos GNSS Trimble R8s carecen de una unidad inercial de medida – IMU lo cual dificulta la toma de datos en entornos rodeados de obstrucciones al no poder inclinar el equipo para poder determinar la posición de la base del bastón como se aprecia en la figura 39.

### Figura 39

*Incompatibilidad con sensor IMU*



Antes de validar el método RTK vía IP ya que este está anclado a la REGME y al cáster IGM se decidió evaluar el estado de la posición de la EPEC respecto al geo centro como se aprecia en la tabla 22.

### Tabla 22

*Diferencias entre marco y época de la estación EPEC*

| Estación<br>REGME  | Semana<br>GPS | Este [m]   | Norte [m]   | Alt.<br>Elipsoidal<br>[m] | Ond.<br>Geoidal<br>[m] | Elevación<br>[m] |
|--------------------|---------------|------------|-------------|---------------------------|------------------------|------------------|
| <b>EPEC</b>        | 1900          | 784250.812 | 9965160.359 | 2522.975                  | 26.511                 | 2496.464         |
|                    | 2318          | 784250.787 | 9965160.437 | 2522.957                  | 27.241                 | 2495.716         |
| <b>Diferencias</b> | 418           | -0.025     | 0.078       | 0.018                     | -0.730                 | -0.748           |

Nota: La variable de ondulación geoidal para la semana 1900 corresponde al valor determinado por el modelo EGM2008, mientras que para la semana 2318 corresponden a las ondulaciones determinadas por el modelo local.

Fuente: SIRGAS (2024).

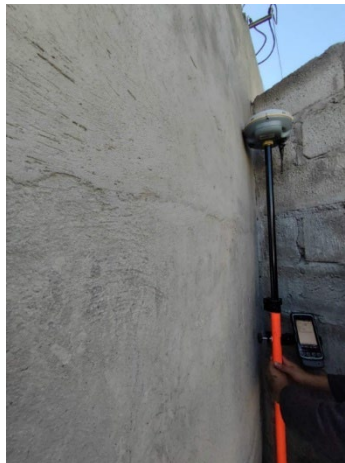
Elaboración: Autor (2024).

La idea de ambos métodos GNSS es probar su comportamiento en entornos difíciles los cuales son comunes al momento de realizar un levantamiento topográfico como pueden ser cercas, muros, cableado, vegetación entre otros.

Los tres entornos o estratos muestrales corresponden a Estrato 01, entorno ideal libre de obstrucciones, campo abierto, mínima afectación del multipath; estrato 02, entorno rural, rodeado de vegetación; estrato 03, entorno urbano, rodeado de infraestructura del tipo urbano como muros de concreto, edificios o similares.

## Figura 40

### *Entornos muestrales*



Dado que se probó la tecnología GNSS bajo diferentes entornos se encontraron errores de posicionamiento grandes, ya que en ciertos casos el tipo de solución de la trayectoria no era fija, si no flotante, ocasionada por lo que posicionaba puntos cercanos a edificaciones o cerca de vegetación lo cual empezaba a disparar la precisión en ciertos casos, la colectora restringe grabar datos cuando la solución no es fija o la precisión de los puntos no es la adecuada, en modo NTRIP a casi un km de la base y en condiciones GNSS de recepción ideal la precisión empezó a disminuir.

### Comparativa entre métodos de captura

**Tabla 23**

*Comparativa entre estación total y RTK*

| Estación Total vs. RTK.       |            |            |            |
|-------------------------------|------------|------------|------------|
|                               | Estrato 01 | Estrato 02 | Estrato 03 |
| <b>Tamaño muestra</b>         | 51         | 38         | 22         |
| <b>Error Medio</b>            | 0.099 m.   | 0.128 m.   | 0.115 m.   |
| <b>Desviación estándar</b>    | 0.073 m.   | 0.088 m.   | 0.115 m.   |
| <b>RMSE<sub>x</sub></b>       | 0.065 m.   | 0.082 m.   | 0.057 m.   |
| <b>RMSE<sub>y</sub></b>       | 0.032 m.   | 0.066 m.   | 0.074 m.   |
| <b>RMSE<sub>z</sub></b>       | 0.764 m.   | 0.914 m.   | 0.843 m.   |
| <b>RMSE<sub>r</sub></b>       | 0.073 m.   | 0.105 m.   | 0.093 m.   |
| <b>Exactitud posicional r</b> | 0.105 m.   | 0.158 m.   | 0.140 m.   |
| <b>Exactitud posicional z</b> | 1.984 m.   | 1.792 m.   | 1.652 m.   |

**Tabla 24**

*Resultados comparativos entre RTK y NTRIP*

| RTK vs NTRIP               |            |            |            |
|----------------------------|------------|------------|------------|
|                            | Estrato 01 | Estrato 02 | Estrato 03 |
| <b>Tamaño muestra</b>      | 19         | 3          | 5          |
| <b>Error Medio</b>         | 0.108 m.   | 0.187 m.   | 0.129 m.   |
| <b>Desviación estándar</b> | 0.045 m.   | 0.063 m.   | 0.077 m.   |
| <b>RMSE<sub>x</sub></b>    | 0.078 m.   | 0.073 m.   | 0.087 m.   |
| <b>RMSE<sub>y</sub></b>    | 0.086 m.   | 0.180 m.   | 0.118 m.   |
| <b>RMSE<sub>z</sub></b>    | 0.760 m.   | 0.716 m.   | 0.754 m.   |

|                               |          |          |          |
|-------------------------------|----------|----------|----------|
| <b>RMSEr</b>                  | 0.116 m. | 0.194 m. | 0.146 m. |
| <b>Exactitud posicional r</b> | 0.176 m. | 0.271 m. | 0.220 m. |
| <b>Exactitud posicional z</b> | 1.489 m. | 1.402 m. | 1.477 m. |

**Tabla 25***Resultados comparativos entre NTRIP y estación total*

| <b>NTRIP vs. Estación Total</b> |                   |                   |                   |
|---------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                                 | <b>Estrato 01</b> | <b>Estrato 02</b> | <b>Estrato 03</b> |
| <b>Tamaño muestra</b>           | 20                | 5                 | 5                 |
| <b>Error Medio</b>              | 0.174 m.          | 0.149 m.          | 0.148 m.          |
| <b>Desviación estándar</b>      | 0.086 m.          | 0.084 m.          | 0.065 m.          |
| <b>RMSEx</b>                    | 0.139 m.          | 0.047 m.          | 0.104 m.          |
| <b>RMSEy</b>                    | 0.134 m.          | 0.160 m.          | 0.120 m.          |
| <b>RMSEz</b>                    | 0.302 m.          | 1.044 m.          | 0.676 m.          |
| <b>RMSEr</b>                    | 0.193 m.          | 0.167 m.          | 0.159 m.          |
| <b>Exactitud posicional r</b>   | 0.293 m.          | 0.222 m.          | 0.240 m.          |
| <b>Exactitud posicional z</b>   | 0.591 m.          | 2.046 m.          | 1.324 m.          |

Para la comparación del Dron al no tener un modelo de elevaciones no se puede determinar su componente altimétrica.

**Tabla 26***Resultados comparativos entre NTRIP y dron*

| <b>NTRIP vs. Dron</b>         |                   |                   |                   |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                               | <b>Estrato 01</b> | <b>Estrato 02</b> | <b>Estrato 03</b> |
| <b>Tamaño muestra</b>         | 15                | 5                 | 5                 |
| <b>Error Medio</b>            | 0.089 m.          | 0.146 m.          | 0.112 m.          |
| <b>Desviación estándar</b>    | 0.043 m.          | 0.081 m.          | 0.065 m.          |
| <b>RMSEx</b>                  | 0.076 m.          | 0.093 m.          | 0.094 m.          |
| <b>RMSEy</b>                  | 0.062 m.          | 0.134 m.          | 0.106 m.          |
| <b>RMSEr</b>                  | 0.098 m.          | 0.163 m.          | 0.112 m.          |
| <b>Exactitud posicional r</b> | 0.143 m.          | 0.244 m.          | 0.214 m.          |

**Tabla 27***Resultados comparativos entre dron y estación total*

| <b>Dron vs. Estación Total</b> |          |
|--------------------------------|----------|
| <b>Tamaño muestra</b>          | 102      |
| <b>Error Medio</b>             | 0.238 m. |
| <b>Desviación estándar</b>     | 0.184 m. |
| <b>RMSE<sub>x</sub></b>        | 0.057 m. |
| <b>RMSE<sub>y</sub></b>        | 0.124 m. |
| <b>RMSE<sub>r</sub></b>        | 0.136 m. |
| <b>Exactitud posicional r</b>  | 0.193 m. |

Para realizar la última parte de la comparativa se solicitó una cotización de trabajo a la empresa Leiva&Leiva ingeniería con las especificaciones técnicas de los productos requeridos en lo que se obtuvo la tabla 28 que corresponde a los valores de mercado del costo de generar cada uno de los productos realizados en el presente trabajo con lo que se puede comparar cuál de las tres tecnologías geoespaciales es la más económica.

**Tabla 28***Costos unitarios*

| <b>Ítem</b>                                      | <b>Cantidad</b> | <b>Valor</b> | <b>Total</b> |
|--------------------------------------------------|-----------------|--------------|--------------|
| <b>Materialización Red de control horizontal</b> | 1               | USD 400      | USD 400      |
| <b>Medición Red control horizontal</b>           | 12              | USD 300      | USD 3 600    |
| <b>Red de control vertical</b>                   | 4 km            | USD 250      | USD 1 000    |
| <b>Levantamiento topográfico Estación Total</b>  | 66 ha           | USD 80       | USD 5 280    |
| <b>Levantamiento topográfico GNSS</b>            | 66 ha           | USD 80       | USD 5 280    |
| <b>Elaboración fotografía área</b>               | 145 ha          | USD 20       | USD 2 900    |
| <b>Vectorización</b>                             | 70 ha           | USD 20       | USD 1 400    |

Fuente: Leiva&Leiva Ingeniería (2024).

Con GNSS en modo RTK por radio resulta tener resultados más cercanos a lo medido con estación total, sin embargo, depende de su cobertura que en para los casos estudiados logro un alcance de 300 metros desde el vértice MIC-11 hasta el punto 90 de muestra.

En la sección de costos, trabajar con dron significa un ahorro del 10% de costo en campo, y una disminución del 79% del trabajo de ejecución total del proyecto.

A manera de discusión con otros autores citados, en el presente trabajo que se concuerda con la teoría establecida por Yamasqui (2022), con la diferencia de que en este caso de estudio la precisión vertical es mayor, se coincide con la teoría de Bejarano y Palomino (2022) donde afirma que la estación total es el método más óptimo. Contrastando a Jiménez (2019) el tiempo empleado en gabinete del dron de este proyecto fue menor al empleado con estación total, de forma similar contrastando a Urtega (2021) en el presente análisis de costos se demuestra que el dron es 10% más económico que las técnicas convencionales y la tecnología satelital, haciendo hincapié en que los tres métodos requieren una red de control básico geodésico.

## **Capítulo V**

### **Conclusiones y recomendaciones**

#### **Conclusiones**

Se concluye que el método de posicionamiento GNSS para establecimiento de una Red Básica de Control Horizontal es el método más eficiente, sin embargo, requiere un conocimiento de geodesia para el correcto establecimiento y ajuste de esta, adicional de las ventajas que facilita SIRGAS y el monitoreo continuo.

El control vertical mediante nivelación geométrica es un método costoso y largo, pero el más fiable para determinar desniveles, sin embargo, con las nuevas tecnologías en áreas pequeñas se puede validar el uso de nivelación GNSS con el modelo EGM08 siempre y cuando se parta de un vértice de control vertical enlazado a la RCBV del IGM. El control vertical demostró ser fiable y cumple con la hipótesis definida por Moritz respecto a la superficie del geoide que es una superficie equivalente en áreas cortas, sin embargo, el modelo está condicionado por la precisión de las alturas elipsoidales y las cotas niveladas, utilizando el modelo de ondulación geoidal se puede obtener con GNSS alturas similares a la de la estación total.

Con estación total se obtuvo una carga en campo más exigente que con los otros métodos requiriendo al menos tres semanas para completar toda el área de estudio, las limitantes de la estación total es que es susceptible a errores sistemáticos y acumulativos desde el inicio del proyecto y requiere mayor cantidad de personal, solo se puede tomar puntos que se encuentren en línea de vista directa y se debe densificar de forma obligatoria la red de control establecida al inicio. Sin embargo, con estación total se puede ingresar en áreas donde las otras tecnologías geoespaciales no garantizan resultados.

Los métodos GNSS resultaron ser más dinámicos al momento de realizar el trabajo en campo, se conoce que pueden garantizar la exactitud posicional de cualquier punto sobre la superficie terrestre siempre y cuando el punto de partida sea correcto y la solución a tiempo real sea fija, si se opta por métodos post proceso de posicionamiento el rendimiento de campo será inferior convirtiéndolo en un método inviable en la práctica, sin embargo GNSS demostró muchas debilidades en el entorno urbano como cobertura de radio, capacidad de mantener una solución fija cerca de construcciones, o la incapacidad de posicionar puntos en espacios boscosos.

Se concluye que el método RTK es el más similar al levantamiento convencional con estación total, dado que es el que más se ajusta en las dos componentes; dicha concordancia se debe al trabajar en marcos de referencia compatibles y actuales. Depende de su cobertura que en para los casos estudiados logró un alcance de 300 metros desde el vértice MIC-11 hasta el punto 90 de muestra.

El método RTK por IP (NTRIP) resulto ser la forma más eficiente para validar los resultados de estación total, ya que el método de transmisión es IP no existen limitantes de interferencias desde la base, no requiere cambios de estación y se puede utilizar menor logística, personal y equipos. Sin embargo, se depende netamente del Instituto Geográfico Militar, de su cáster, de la capacidad de enviar correcciones RTCM a tiempo real desde la estación CORS, de la cobertura de señal base y de la longitud de la línea base que puede alcanzar hasta 25 Km.

Para la prueba con NTRIP demuestra un desfase significativo en posición horizontal y vertical respecto a la muestra tomada con RTK, el desfase en la componente vertical se debe a que las alturas determinadas no están enlazadas a la RCBV del Ecuador, más bien nacen de alturas ortométricas definidas por el modelo EGM08.

El dron demostró ser una herramienta útil, fiable, fácil de manipular y reduce el tiempo en campo cerca del 85%, ya que sus procesos de captura y ajuste son cortos, se requirió un día de captura y un día de ajuste para poder generar el producto que se lo realiza en gabinete, sin embargo, requiere una red de control básico geodésico para el correcto ajuste fotogramétrico, requiere un determinado grado de capacidad de reconocimiento y foto identificación de los objetos espaciales y sus relaciones lógicas. Adicional resulta ser un 23% más económico que los métodos GNSS y Estación Total y requiere únicamente un piloto, copiloto y asistente de campo. En dron la calidad del producto está condicionado por el GSD de la imagen.

Para la práctica con dron demostró ser el método más rápido y económico de capturar información en campo, sin embargo, depende de las especificaciones del equipo y el modo de ajuste la calidad de los resultados, adicional se pueden llegar a cometer errores de exactitud posicional, de comisión, y de consistencia lógica ya que es un método indirecto de captura, en zonas boscosas, en donde existen sombras o infraestructura prominente dificulta la captura de detalles.

Las tres tecnologías geoespaciales demostraron estar en capacidad de generar cartografía 1:1000 dentro de las precisiones requeridas por el IGM en la componente horizontal.

Como último punto, las tres formas de captura geoespacial utilizadas demuestran tener ventajas y desventajas, se debe entender las limitantes de cada uno y las necesidades técnicas y económicas del proyecto a ejecutar, el nivel de especialización técnica y tecnológica de cada usuario para definir con cual se debe trabajar, se debe combinar las tecnologías geoespaciales para la correcta captura de los datos espaciales y su posterior análisis.

## Recomendaciones

Se requiere realizar una valoración actual al sistema SIRGAS-ECUADOR para determinar su estado actual a nivel nacional, el movimiento de la corteza y el modelo de velocidades.

Se debe realizar una revisión al modelo de velocidades SIRGAS2022 para verificar su efectividad en las estaciones REGME dado que el Ecuador es un sistema complejo y los movimientos geofísicos varían entre estaciones por lo que no se puede concluir que el modelo de una estación pueda ser utilizado en otra cercana.

Se recomienda realizar más estudios sobre cobertura y efectividad de los resultados de GNSS RTK en función de las condiciones del entorno, medio de transmisión y longitud de la línea base.

## Referencias bibliográficas

- Abad, C., Acosta, D., Barriga, K., Lopez, D., & Vargas, Y. (2024). Evaluación de la exactitud posicional de productos fotogramétricos derivados de aviones no tripulados (RPAS) a través de la rectificación con diferentes programas de ajuste en la ESPE-FAME-Sangolquí. *Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE"*. Obtenido de <https://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/38233>
- Ahlgren, M., & Moudrost, J. (2016). Geodetic reference frames and systems. *Springer*.
- Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., & Collilieux, X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*.
- Ariza, F., Garcia, B., Ureña, C., Rodriguez, A., Alba, F., Pinilla, R., & Mesas, C. (2013). *Fundamentos de Evaluación de la Calidad de la Información Geográfica*. Jaen: Universidad de Jaén.

- Cruz, M. (2008). Caracterización de puntos de control en teledetección: Aplicación de la corrección geométrica automática de imágenes NOAA-AVHRR GAC-5km. *Universidad de Almería, Departamento de Lenguaje y Computación*.
- Francisco Rivadeneira, M. S. (2007). *Breves fundamentos sobre los Terremotos en Ecuador*. Quito: CORPORACIÓN EDITORA NACIONAL.
- Hussein, S. K., & Yaseen, K. (2021). Surveying with GNSS and Total Station: A Comparative Study. *Eurasian Journal of Science and Engineering*, 59-73. doi:10.23918/eajse.v7i1p59
- INEN - Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2009). Procedimientos de Muestreo para Inspección por Atributos. Parte 1. Programas de Muestreo Clasificados por el Nivel Aceptable de Calidad (AQL) para Inspección Lote a Lote. *NTE INEN-ISO 2859- 1:2009*. Quito, Ecuador.
- Instituto Geográfico Militar. (2022). Protocolo De Fiscalización Para Proyectos De Generación De Cartografía Base Con Fines Catastrales A Escala: 1: 1000, Obtenida A Través De Métodos: Aerofotogramétrico, Digitalización 2D Sobre Ortofoto, Levantamiento Lidar O Nube De Puntos Mediante Fotogram. Quito, Ecuador: IGM.
- International Association of Geodesy and Geophysics (IAG). (2012). The International Union of Geodesy and Geophysics 2012 Guide to Geodesy. *Journal of Geodesy*, 631-803.
- International Organization for Standardization. (2013). Geographic information — Data quality. *ISO Standard No. 19157:2013*. Ginebra, Suiza.
- IPGH. (1978). *Manual de Especificaciones Topográficas*. Instituto Panamericano de Geografía e Historia.
- IPGH. (2019). *GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL DE DATOS ESPACIALES*. INSTITUTO PANAMERICANO DE GEOGRAFÍA E HISTORIA.
- ITRF. (2024). *Transformation Parameters between ITRF Solutions*. Obtenido de International Terrestrial Reference Frame - ITRF: <https://itrf.ign.fr/en/solutions/transformations>
- Jimenez, G., Grazón, J., & Londoño, D. (2017). Introducción a la altimetría. *ResearchGate*.

- Jimenez, N., Magaña, A., & Soriano, E. (2019). Análisis comparativo entre levantamientos topográficos con estación total como método directo y el uso de Drones y GPS como métodos indirectos. *Universidad de El Salvador*.
- Jimenez, W., & Prado, J. (2018). Análisis técnico comparativo entre los métodos topográficos tradicionales y el método de aerofotogrametría con vehículo aéreo no tripulado. *Escuela Politecnica Nacional*.
- Johannessen, J. (2003). THE EUROPEAN GRAVITY FIELD AND STEADY-STATE OCEAN CIRCULATION EXPLORER SATELLITE MISSION: ITS IMPACT ON GEOPHYSICS. *Surveys in Geophysics*, 339–386.
- Kaplan, E. (2005). *Understanding GPS: Principles and applications* (2 ed.). Artech House.
- Kenyeris, A. (2016). GPS/Leveling. En *Encyclopedia of Geodesy*. Switzerland.
- Kraus, H. (1997). Wolfram MAP. Berlín, Alemania: Springer-Verlag.
- Leick, A., Tiberius, C., & Kouba, J. (2015). GPS: Satellite surveying, navigation, and remote sensing. *Springer*.
- Lemenkova, P. (2022). Cartographic scripts for seismic and geophysical mapping of Ecuador. *Geografie*, 195–218. doi:<https://doi.org/10.37040/geografie.2022.006>
- López, C. (2014). Mejora de Exactitud Posicional: ejemplo para el caso del CONEAT. // *Jornadas de Cartografía*, 30-31.
- Martínez, J., & Bermeo, V. (2023). Análisis comparativo de precisión y eficiencia de tecnologías topográficas para levantamientos: fotogrametría y LIDAR aerotransportado con Dron y receptor GNSS (modo RTK), aplicado al parque El Paraíso de la ciudad de Cuenca. *Universidad Politecnica Salesiana*.
- Moritz, H. (2000). Geodetic reference system 1980. *Journal of geodesy*, 128-133.
- Paredes, N. (1986). DETERMINACION DEL DATUM VERTICAL EN LA LIBERTAD, ECUADOR. (I. O. Armada, Ed.) *Acta Oceanográfica del Pacífico*, 3(1), 205-208.

- Parkinson, B., Gilbert, S., & Franson, J. (1996). GPS for Land Navigation. *John Wiley & Sons*, 120.
- Parracho, D. (2021). Procesos Digitais para a Realização de Levantamentos Fotogramétricos e Termográficos com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT).
- Pavlis, N., Holmes, S., Kenyon, S., & Factor, J. (2012). The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *Journal Of Geophysical Research*.
- Peña, J., & Méndez, T. (1998). Fundamentos de fotogrametría.
- Portilla, O., Leiva, C., Luna, M., & González, I. (2023). EVALUATION OF DIGITAL LAND AND GEOPOTENTIAL MODELS IN ECUADOR. *La Granja, de Ciencias de la Vida*, 38(2).
- Rizos, C., & Han, S. (2003). NRTK and Its Impact on Surveying Practice. *Journal of Global Positioning Systems*, 2(2), 144-153.
- Sánchez, L., Drewes, H., Kehm, A., & Seitz, M. (2022). SIRGAS reference frame analysis at DGFI-TUM. *Journal of Geodetic Science*, 12(1), 92-119. doi:10.1515/jogs-2022-0138
- SIRGAS. (2010). *SIRGAS 2010: Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas*.  
Obtenido de SIRGAS: <https://www.sirgas.org/es/sirgas-definition/>
- SIRGAS. (2024). *Estaciones SIRGAS de operación continua. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut – Technische Universität München*. Obtenido de SIRGAS: <https://www.sirgas.org/es/stations/station-list/>
- Smith, A., & Rignot, E. (2015). Introduction to geospatial sciences. *John Wiley & Sons*.
- Tacuri, E., Lupercio, L., Lupercio, G., & López, M. (2017). Uso de imágenes de RPAS para generación de topografía a detalle. *Revista Geoespacial*, 12(1), 32-42.
- Tamimi, R., & Toth, C. (2024). Accuracy Assessment of UAV LiDAR Compared to Traditional Total Station for Geospatial Data Collection in Land Surveying Contexts. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 421-426.
- Torge, W. (2001). Geodesy: Theory and methods. *Walter de Gruyter*.

- Tremel H., U. R. (2000). *Processing of the Ecuadorian National GPS Network within the SIRGAS Reference Frame*. Munich: Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut der Technischen Universität München.
- Urteaga, J. (2021). *Evaluación técnica económica del levantamiento topográfico con estación total, GPS diferencial y dron, para el análisis geométrico de la carretera Baños del Inca–Otuzco, Cajamarca*. Trujillo: Universidad Privada del Norte.

## **Apéndices**