



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Ingeniería Geomática

**ESTIMACIÓN DE LA PRECISIÓN OBTENIDA EN POSICIONAMIENTO GNSS ESTÁTICO
COMO FUNCIÓN DEL TIEMPO DE OBSERVACIÓN Y DISTANCIA A LA BASE**

Ing. Luis Alberto Morales Soza

Asesorado por el Msc. Ing. Jorge Eduardo Morales Maldonado

Guatemala, septiembre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTIMACIÓN DE LA PRECISIÓN OBTENIDA EN POSICIONAMIENTO GNSS ESTÁTICO
COMO FUNCIÓN DEL TIEMPO DE OBSERVACIÓN Y DISTANCIA A LA BASE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. LUIS ALBERTO MORALES SOZA

ASESORADO POR EL MSC. ING. JORGE EDUARDO MORALES
MALDONADO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA EN GEOMÁTICA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Marlon Antonio Pérez Türk
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edson Toniño Hernández Mazariegos
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ESTIMACIÓN DE LA PRECISIÓN OBTENIDA EN POSICIONAMIENTO GNSS ESTÁTICO COMO FUNCIÓN DEL TIEMPO DE OBSERVACIÓN Y DISTANCIA A LA BASE

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 23 de mayo de 2020.

Ing. Luis Alberto Morales Soza

DTG. 400.2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **ESTIMACIÓN DE LA PRECISIÓN OBTENIDA EN POSICIONAMIENTO GNSS ESTÁTICO COMO FUNCIÓN DEL TIEMPO DE OBSERVACIÓN Y DISTANCIA A LA BASE**, presentado por el **Ingeniero Luis Alberto Morales Soza**, estudiante del programa de **Maestría en Ingeniería Geomática**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



ing. Ariabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, septiembre de 2021

AACE/cc



Guatemala, Agosto 2021

EEPI-1293-2021

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **“ESTIMACIÓN DE LA PRECISIÓN OBTENIDA EN POSICIONAMIENTO GNSS ESTÁTICO COMO FUNCIÓN DEL TIEMPO DE OBSERVACIÓN Y LA DISTANCIA A LA BASE”** presentado por el Ingeniero **Luis Alberto Morales Soza** quien se identifica con carné **201342173** correspondiente al programa de **Maestría en Geomática**; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“*Id y Enseñad a Todos*”



Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Guatemala, Septiembre 2021

EEPFI-1292-2021

Como coordinador de la **Maestría en Geomática** doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“ESTIMACIÓN DE LA PRECISIÓN OBTENIDA EN POSICIONAMIENTO GNSS ESTÁTICO COMO FUNCIÓN DEL TIEMPO DE OBSERVACIÓN Y LA DISTANCIA A LA BASE”** presentado por el Ingeniero **Luis Alberto Morales Soza** quien se identifica con carné **201342173**.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Mtro. Ing. Marlon Antonio Pérez Turk
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Guatemala, Agosto de 2021

EEPM-1294-2021

En mi calidad como asesor del profesional **Luis Alberto Morales Soza** quien se identifica con carné **201342173** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **"ESTIMACIÓN DE LA PRECISIÓN OBTENIDA EN POSICIONAMIENTO GNSS ESTÁTICO COMO FUNCIÓN DEL TIEMPO DE OBSERVACIÓN Y DISTANCIA A LA BASE"** quien se encuentra en el programa de **Maestría en Geomática** en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Jorge Eduardo Morales Maldonado
Ingeniero en Administración de Tierras
Colegiado 5308

Mtro. Jorge Eduardo Morales Maldonado
Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por guiarme en el camino del conocimiento y sabiduría de la ciencia.
- Mis padres** Erwin Rolando Morales y Bertha Soza que le han dedicado sus vidas a la educación y por sus consejos motivacionales ya que sin ellos mi vida no sería igual de bella.
- Mis abuelos** Fernando Soza, Aurora Aguallo, Rosalio Morales y Teresa Morales que me han demostrado que la pobreza es un estado mental.
- Mis hermanos** María Teresa, Erwin Rolando y Jorge Vinicio Morales que me han dado apoyo incondicional a lo largo de mi vida.
- Mis sobrinos** Pablo Santhiago y Sarah María Muñoz, Cynthia Vanessa y Adriana Sofía Morales, por demostrarme que el tiempo pasa rápido y que son mi motivo para ser mejor cada día.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Que me permitió ser parte de prestigiosa casa de estudios.
Centro Universitario de Petén	Por haberme brindado los conocimientos necesarios para desenvolverme en el ámbito profesional.
MSc. Ing. Eduardo Morales	Por su tiempo y conocimiento para la realización de esta investigación.
MSc. Louisa Enoé Jahn González	Por su apoyo incondicional, paciencia, comprensión y contribución inmensa a lo largo de la maestría y desarrollo del estudio.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
HIPÓTESIS.....	XVI
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XVII
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. MARCO REFERENCIAL.....	1
1.1. Estudios previos	1
1.2. Alcances	7
1.2.1. Perspectiva investigativa	7
1.2.2. Alcance (descriptivo/explicativo/correlacional).....	7
1.3. Perspectiva técnica	8
1.4. Perspectiva de resultados	9
1.5. Justificación	10
2. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1. Fundamentos del tema relacionados con el problema	11
2.2. Geomática	11
2.3. Catastro	12
2.4. Geodesia espacial	13
2.5. Posicionamiento GNSS	14

2.6.	Cartografía	16
2.7.	Receptores GNSS.....	17
2.8.	Topografía.....	18
2.9.	Geoestadística	19
2.10.	Sistemas de Información Geográfica	21
2.11.	Fundamentos estadísticos	22
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	23
3.1.	Clasificación de la precisión obtenida	23
3.1.1.	Clasificación de la precisión según hora del día.....	24
3.2.	Normalidad de variables cuantitativas según hora de geoposicionamiento	25
3.3.	Diferencias entre las variables cuantitativas según hora de geoposicionamiento	26
3.4.	Análisis de varianza según hora de geoposicionamiento.....	27
3.5.	Rangos de distancia a la base y tiempos de observación.....	31
3.6.	Tiempo mínimo de observación simultánea	32
3.7.	Correlación entre las variables tiempo y distancia en función de la precisión obtenida.....	33
3.8.	Regresión lineal múltiple de variables	34
3.9.	Variables correlacionadas con la precisión horizontal.....	37
3.10.	Fuentes de error en el geoposicionamiento GNSS estático.....	39
3.11.	Errores que afectan las precisiones del geoposicionamiento...	40
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	41
4.1.	Clasificación de los grados de precisión alcanzados mediante el posicionamiento GNSS estático	42
4.2.	Clasificación de la precisión según hora de geoposicionamiento	44

4.3.	Establecimiento de un rango de distancia idóneo entre dos georreceptores que produzca resultados de precisión satisfactorios y en el menor tiempo posible	45
4.4.	Determinación de tiempo óptimo de observación simultánea entre dos georreceptores que genere suficiente redundancia de observación.....	47
4.5.	Correlación de las variables tiempo y distancia en función de la precisión obtenida.....	49
CONCLUSIONES		53
RECOMENDACIONES		55
REFERENCIAS		57
APÉNDICES		69
ANEXOS		73

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama de precisión horizontal según la hora de medición	25
2.	Perfil para las precisiones según hora de geoposicionamiento	30
3.	Perfil para la precisión vertical según hora de geoposicionamiento	31
4.	Curva de precisión horizontal en relación con la distancia a la base	34
5.	Supuestos gráficos de los residuales: histograma	36
6.	Supuestos gráficos de los residuales: gráfico de dispersión	37

TABLAS

I.	Grado de precisión obtenido	23
II.	Resumen de precisión horizontal	24
III.	Prueba Shapiro Wilk en datos cuantitativos según hora de medición. .	26
IV.	Prueba de homogeneidad de varianzas, precisiones horizontales.	27
V.	Prueba ANOVA variables de precisión según horas de medición.....	28
VI.	Prueba de Tukey en la Precisión horizontal al 95% según hora	28
VII.	Prueba de Tukey en la Precisión Vertical 95% según hora.....	29
VIII.	Rangos de distancia a la base y tiempos de observación.....	32
IX.	Tiempos ideales de observación	33
X.	Medidas resumen del modelo final por pasos sucesivos	35
XI.	Coeficientes y significación de las variables que quedan en el modelo	35
XII.	Correlaciones de Spearman en variables cuantitativas.....	38
XIII.	Errores en geoposicionamiento.....	39
XIV.	Resumen del impacto de errores en las Precisiones GPS	40

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
h	Horas
Km	Kilómetros
mm	Milímetros
min	Minutos
Sig.	Significación

GLOSARIO

ANOVA	Análisis de variancia.
AUSPOS	Servicio de procesamiento de GPS en línea de Australia
CORS	Estación de referencia de funcionamiento continuo
Dummy	Variable utilizada para explicar valores cualitativos en un modelo de regresión
GNSS	Sistema global de navegación satelital
GPS	Sistema global de navegación
GTM	Guatemala Transversa de Mercator
GUAT	Guatemala
IBM SPSS	Programa Estadístico informático
IGN	Instituto Geográfico Nacional
Magnet Tools	Programa informático para realizar procesamiento de datos GNSS

OPUS	Servicio de usuario de posicionamiento en línea
RAC	Red de Apoyo Catastral
RINEX	Formato de intercambio independiente del receptor
Rover	Georreceptor en constante movimiento amarrado a una estación de referencia
Señales L1 y L2	Señales de radio de los satélites GNSS
SIRGAS-CON	Sistema de Referencia Geocéntrico para Las Américas – Continuas.

RESUMEN

La deficiente distribución de la Red Geodésica Nacional afecta la obtención de datos GNSS estático debido a que muchas estaciones están obsoletas a causa de modificaciones a su monumentación y a consecuencia, los usuarios realizan geoposicionamientos utilizando estaciones a distancias alejadas. Generalmente los usuarios no le proporcionan el tiempo de geoposicionamiento necesario para obtener resultados considerables y eso incrementa la posibilidad de que los datos no sean aceptables.

El propósito de este estudio fue investigar de qué manera se relacionan las variables tiempo de observación y distancia a la base con la precisión horizontal. Las técnicas estadísticas empleadas para analizar la información obtenida a partir de geoposicionamiento estático ayudaron a comprender cómo la variable distancia a la base modifica el tiempo de observación y a consecuencia incide directamente en la precisión final, es decir que se deben de considerar dichas variables para estimar la precisión horizontal, no dejando a un lado los errores que inciden en el geoposicionamiento los cuales pueden ser compensados mediante una planificación previa.

A partir del análisis se encontró que la distancia a la base es la variable que tiene mayor incidencia sobre la precisión horizontal. Asimismo, se determinó que el tiempo de geoposicionamiento depende de la distancia a la base, y según lo que éste sea así será el resultado de la precisión obtenida. Para eficientizar recursos económicos y de tiempo en proyectos que requieran geoposicionamiento, es debido implementar la planificación previa y las buenas prácticas de colecta de datos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente no existe una investigación que pronostique la precisión de los resultados obtenidos en posicionamiento GNSS estático en el contexto geográfico guatemalteco. La falta de información en cuanto a función del tiempo y distancia a la base para hacer correcciones de posición tiene consecuencias en la optimización de recursos económicos y de tiempo, que requiere de técnicas de geoposicionamiento que garanticen resultados efectivos en el menor tiempo posible.

A partir de la situación actual, se analizaron un conjunto de datos obtenidos en diferentes ubicaciones, los cuales fueron adquiridos con receptores de doble frecuencia y corregidos con una estación base. Dicho análisis ayudará a determinar si existe relación entre los factores “tiempo de observación” y “distancia a la base”; con el fin de comprender si la relación entre esos dos factores, incluyendo las fuentes de error, influyen en la precisión del geoposicionamiento.

Como parte de la investigación, la pregunta principal es: ¿Existe una relación entre los datos de tiempo de observación y distancia entre los receptores de posicionamiento GNSS estático, obtenidos mediante el análisis de la precisión? Las preguntas secundarias que ayudarán a responder la temática son: ¿Cuál es la relación entre la distancia, el tiempo de posicionamiento y la precisión obtenida?, ¿Qué factores propios de la disponibilidad de bases geodésicas afectan la precisión en el geoposicionamiento estático? y ¿Qué factores propios de la hora del día en que los datos son obtenidos afectan la precisión en el geoposicionamiento estático?

Cada geoposicionamiento dispone de factores inconstantes que complican la generalización de las estimaciones de precisión. Las fuentes de error existentes aportan a la comprensión de los factores que afectan la precisión de los resultados; esto se complementa mediante la correlación de las variables “tiempo de observación” y “distancia a la base” para considerar una distancia idónea a la base y un tiempo significativo de observación. Además, se clasifican los grados de precisión obtenidos para evidenciarlas precisiones que pueden ser alcanzados mediante el geoposicionamiento estático.

OBJETIVOS

General

Determinar la relación entre el tiempo de observación simultánea de dos georreceptores, así como la distancia entre ellos y el grado de precisión obtenido.

Específicos

- Clasificar los grados de precisión alcanzables mediante el posicionamiento GNSS estático.
- Establecer el rango de distancia idóneo entre dos georreceptores que produzca resultados de precisión satisfactorios y en el menor tiempo posible.
- Determinar el tiempo óptimo de observación simultánea entre dos georreceptores que genere suficiente redundancia de observación
- Correlacionar las variables tiempo y distancia en función de la precisión obtenida.
- Identificar las fuentes de error en el geoposicionamiento GNSS que disminuyan la precisión en condiciones ideales de distancia y tiempo

HIPÓTESIS

Se espera que la variable distancia a la base sea la que más influya significativamente en la estimación de la precisión de puntos colectados mediante receptores GNSS de doble frecuencia debido a que a mayor distancia, mayor es el tiempo de geoposicionamiento con el propósito de obtener un grado de precisión aceptable.

Se considera la presente hipótesis debido a que estudios han demostrado que las precisiones obtenidas con receptores GNSS pueden ser submétricas. Existen metodologías para la obtención de precisiones deseadas en las cuales se detallan los procedimientos idóneos para la colecta de datos; sin embargo, no explican cómo se dan las estimaciones y cómo se comporta la señal en rangos extensos. Por lo tanto, saber cómo influye la distancia a la base en la precisión final ayudará a considerar el uso de estaciones de apoyo para distancias muy largas y poder reducir el tiempo de geoposicionamiento.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

El propósito de la investigación se enfocó en poder comprender las variables a partir de los datos colectados por los georreceptores en distintas posiciones; posteriormente se analizó la variable precisión y su relación existente con las variables tiempo de captura y distancia a la base más cercana.

Plan de muestreo

Para la investigación, se analizaron puntos de geoposicionamiento con el propósito de realizar observaciones a diferentes distancias. Como complemento a los puntos, se obtuvieron datos de geoposicionamiento estáticos hechos por profesionales que trabajan en el campo de la geodesia. Las estaciones base a utilizar fueron pertenecientes a cualquiera de las siguientes redes: Activas de funcionamiento continuo del Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS CON), Pasiva del IGN, RAC y otras redes locales de orden inferior, siempre y cuando éstas hayan tenido coordenadas fijas derivadas de un posicionamiento previo.

Criterios para la selección de puntos a muestrear

La selección de puntos tuvo los siguientes criterios generales con el propósito de tener características distintas:

- Los puntos debieron de ser localizables, plenamente identificables y encontrarse en una ubicación segura.
- Que existiera una visión del cielo con el propósito de obtener las señales de un mayor número de satélites.

- Se tomó en cuenta los tiempos de los georreceptores para que exista relación al momento de inicio y al final del geoposicionamiento.
- La distancia entre los georreceptores era conocida con la finalidad de comprender la influencia de los errores que se pudieran presentar durante la toma de puntos.

Se propuso la identificación codificada de cada punto, lo que ayudó a reconocer y realizar consultas de manera más eficiente. En la codificación se consideraron detalles como número de punto, fecha, persona que realiza el geoposicionamiento y el código del área.

Criterios para el geoposicionamiento de los puntos

La selección de puntos tuvo los siguientes criterios generales con el propósito de tener características distintas:

- Evitar obstáculos que puedan reflejar la señal, tales como: techos de lámina o cuerpos de agua cercanos.
- En medida de lo posible, evitar cables de energía eléctrica y cualquier equipo de comunicación que pueda crear estática.
- El suelo en donde se hiciera el geoposicionamiento debía ser lo suficientemente firme para garantizar la estabilidad del punto durante y después de la medición.
- La ubicación del punto a muestrear debía estar ubicado en un lugar seguro y público, de preferencia que fuera alejado del tráfico debido a la vibración del suelo.

Geoposicionamiento de los puntos

Se identificaron los puntos a muestrear en campo mediante mapas web y hojas cartográficas. Se utilizaron los procedimientos básicos para realizar el geoposicionamiento y poder coleccionar información necesaria que pudiera complementar el análisis. Para realizar el geoposicionamiento se utilizaron georreceptores de alta calidad topográfica, con capacidad de percibir señales L1, L2 y multiconstelación.

Posproceso de datos

Para el geoposicionamiento se utilizaron equipos georreceptores de distintas marcas y modelos, todos con capacidad de medición GNSS y de doble frecuencia. Los datos se convirtieron a RINEX para obtener interoperabilidad.

Previo al postproceso de datos, en el software se estableció la precisión horizontal de posicionamiento en 2.5 cm y la vertical en 5 cm, dejando así los valores por defecto del software Magnet Tools. Para que los datos fueran confiables, se dejaron al menos cuatro satélites por cada punto muestreado.

Cabe mencionar que para realizar el postproceso se utilizó el software Magnet Tools (apéndice 1) de igual manera se pudo haber realizado con cualquier otro software de postproceso y según el tipo de procesamiento que se requiera realizar (ver anexo 1). Todo software de postproceso hace una estimación de la precisión obtenida en cada observación estática simultánea, en donde lo que se analiza es el resultado de ambigüedades para los vectores de posicionamiento. Se le denomina línea base a la línea tridimensional que une dos puntos con observaciones simultáneas. Al ejecutarse el postproceso, la estimación del error para cada vector de posicionamiento fue comparada con el

valor de precisión mínimo definido por el usuario. El software clasificó las precisiones obtenidas bajo los siguientes criterios:

Por su valor obtenido respecto al definido por el usuario

- Buenas (Magnet Tools color verde): errores menores al valor definido por el usuario
- Malas: (Magnet Tools color rojo): errores mayores al valor definido por el usuario
- Por el tipo de solución determinada para los vectores (para más detalle ver anexo 2):
- Fijo (*Fixed*): cuando toda ambigüedad ha sido reducida a números enteros
- Flotante (*Float*): cuando todas las ambigüedades estimadas están dadas en números flotantes (no enteros)

Para el establecimiento de las líneas base, Magnet Tools hace distinción que de 0 a 10 km se considera línea base corta u óptima, de 10 a 30 km es línea base larga y de más de 30 km hasta 1,500 km se conoce como línea base muy larga. Por otra parte, Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger y Collins (2001) establecen que menor a 20 km se considera línea base corta, mayor a 20 km pero menor a 100 km es línea base larga y mayor a 100 km se conoce como línea base muy larga. Para realizar la investigación se seleccionaron los criterios del software Magnet Tools.

Técnicas de análisis de información

Las técnicas fundamentales para el análisis estadístico consisten en métodos univariados, cuantitativos y cualitativos; considerando de igual manera

las técnicas tradicionales de topografía y geodesia para la colecta de datos. Debido a que se tuvieron diferentes resultados de precisión, estos fueron estudiados mediante el análisis cuantitativo con la finalidad poder complementar la investigación con un análisis cualitativo, comparando el tiempo-distancia y su relación con la precisión.

Para estudiar cada una de las variables, se realizaron técnicas de correlación, estudios de diferencia de distribuciones y promedios para determinar las relaciones entre las variables. Esto se llevó a cabo en un análisis exploratorio de datos utilizando el programa IBM SPSS. El análisis univariado permitió describir las características y el comportamiento de las variables de manera individual, y poder apreciar si existe relación entre las mismas. Mediante la realización de un análisis cualitativo, se comprobó la precisión obtenida por los georreceptores GNSS.

Dentro del análisis exploratorio de datos, se consideró fundamental presentar los estadísticos resumen de la variable dependiente que en este estudio es la precisión horizontal. Se estudiaron las demás variables para encontrar valores perdidos y atípicos que fueron eliminados debido a que afectaban el análisis de regresión.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación trata sobre el uso de las Redes de Apoyo Catastral y las precisiones alcanzadas como producto del geoposicionamiento GNSS estático orientado a crear información eficaz para asuntos de Topografía, Catastro, Ordenamiento Territorial, Geodesia y Teledetección. No considerar la información espacial como soporte y fundamento en proyectos de desarrollo tiene consecuencias cruciales en la planificación geográfica-ambiental, por lo cual aplaza el desarrollo socioeconómico. Por otra parte, los avances epistemológicos de la Agrimensura y sus dispositivos recolectores de datos GNSS han evolucionado de tal manera que emerge la necesidad constante de actualización técnica profesional por los usuarios.

La investigación tiene su origen en el interés de conocer cómo influyen las variables tiempo de observación y distancia a la base sobre la precisión horizontal final, asimismo el estudio se complementó con conceptos básicos de errores que afectan en geoposicionamiento GNSS estático. Se realizaron series de observaciones (ver apéndice 2) utilizando receptores GNSS de doble frecuencia mediante técnicas convencionales de geoposicionamiento y se ejecutaron correlaciones, lo cual permitió comprender la relación entre dichas variables desde la perspectiva estadística. Este trabajo instruye a realizar planificación previa a la colecta de datos espaciales mediante el geoposicionamiento y que los usuarios puedan estimar las precisiones que pueden obtener en condiciones conocidas.

En los capítulos uno y dos se abordan los alcances investigativos al igual que conceptos de Geodesia Espacial, Posicionamiento GNSS; Topografía y

Catastro así mismo se enuncian las preguntas orientadoras de la investigación. En los tres y cuatro se presentan y discuten los resultados que permiten crear conclusiones y emitir recomendaciones con relación a lo analizado y obtenido.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. Estudios previos

Los primeros trabajos de topografía comenzaron en 1877 cuando Ignacio L. Vallarta representante de México, y Ramón Uriarte por parte de Guatemala, realizaron un convenio con el propósito de nombrar una Comisión Mixta de Ingenieros, y poder efectuar reconocimientos científicos en el terreno y así poder establecer los límites entre México y Guatemala, asimismo fue el Tratado de Límites entre Guatemala y México que se firmó en 1882 y especifica la delimitación del terreno (ver anexo 3) por la comisión científica, como resultado se obtuvo una carta de la línea divisoria entre México y Guatemala (Tamayo Pérez, 2015).

Las actividades geodésicas nacionales específicamente el uso de control terrestre iniciaron en el año 1932 con el propósito de definir el límite entre Guatemala y Honduras; para dicha actividad se formó una Comisión Técnica que tuvo como resultado la elaboración de mapas cartográficos a partir de triangulaciones de primer orden y aerofotografía; estos fueron los mapas modernos de Centroamérica en aquella época. En el año 1940 se continuó la segunda fase de la de monumentación geodésica iniciada entre Guatemala y Honduras al seguimiento de la triangulación de primer orden entre la frontera de Guatemala y El Salvador; el proyecto partió desde el trifinio de Montecristo hasta el Océano Pacífico y como efecto los mapas elaborados a partir de ese trabajo fueron empleados mediante los controles geodésicos e imágenes aéreas (Dirección General de Cartografía, 1957).

En el año 1964 se establece el Instituto Geográfico Nacional con el propósito de suplir a la Dirección General de Cartografía, empleando como su primer director al Ing. Alfredo Obiols Gómez (Morales, 2011). A inicios del año 2000, la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica – Levantamientos Geodésicos Nacionales (NOAA-NGS) de los Estados Unidos de América, instaura la primera estación geodésica permanente en el territorio de Guatemala como una Estación de Referencia de Operación Continua (CORS) (Quiñónez, 2018).

Establecido por el Congreso de la República de Guatemala, en el año 2005 se da la creación del Registro de Información Catastral (RIC) Decreto Numero 41-2005 como autoridad competente en materia catastral con el objetivo de establecer, mantener y actualizar el catastro nacional. Actualmente la entidad encargada referente a geodesia nacional es el Instituto Geográfico Nacional, así como el Registro de Información Catastral y la municipalidad, ambos llevan control sobre materia catastral (Morales Cansino, 2015). Guatemala cuenta con tres estaciones CORS de las cuales solo una está disponible, se trata de una SIRGAS-CON llamada GUAT 40907S001 o GUAT 00GTM, que es la misma que la CORS, y la red pasiva nacional formada por 160 estaciones geodésicas de las cuales la mayoría no funcionan debido a las alteraciones en sus monumentos.

En las especificaciones técnicas para estudios de Topografía en Guatemala, Nájera (2014) proporciona los requerimientos y parámetros para realizar levantamientos topográficos, en donde recomienda utilizar los sistemas locales como es el Guatemala Transversa de Mercator (GTM). El uso de receptores GNSS brinda mayor precisión debido a la georreferenciación y es importante considerar que cada tipo de receptor es diseñado para cumplir con requerimientos técnicos específicos. Dicho eso, los usuarios deben conocer el

tipo de receptor, los métodos para realizar mediciones y el propósito del trabajo a ejecutar. Nájera (2014) señala que los receptores GNSS de doble frecuencia que utilizan el método de postproceso para corregir sus datos, son los recomendados para realizar trabajos catastrales; el propósito de su investigación fue definir una manera estandarizada de realizar los proyectos topográficos en Guatemala.

Como plantea Vicente (2014), las técnicas topográficas empezaron a tener mayor incidencia cuando el establecimiento de límites requería más precisión. Esa necesidad tuvo como consecuencia el incremento del valor de la tierra debido a la utilización de los equipos topográficos que daban resultados más precisos. Así Vicente (2014) desarrolló una propuesta de presupuesto capital para apoyar la toma de decisiones de inversión en equipos topográficos y analizó las consecuencias de utilizar equipos obsoletos. Los valores estudiados en Guatemala permiten tener una idea clara de cómo se establece el capital de inversión debido a los precios cambiantes en los equipos topográficos.

El Registro de Información Catastral es la entidad nacional encargada de asegurar y reforzar la certeza jurídica de la propiedad (Saquimux, 2008). Para realizar levantamientos catastrales en Guatemala, es necesario que estén referenciadas en una Red de Apoyo Catastral, tal y como lo establece el Manual de Normas Técnicas y Procedimientos Catastrales del Registro de Información (Chocoj, 2017). Citando a Divas (2012), quien desarrolló una metodología para evaluar las Redes de Apoyo Catastral mediante tecnologías de medición satelital y analizó las precisiones internas de las observaciones satelitales así como la precisión del marco de referencia del trabajo; haciendo uso de software para realizar postprocesos, realizó ajustes de redes con la finalidad de obtener las precisiones deseadas.

Como lo hace notar Mactzul (2018), en su análisis comparativo utilizando instrumentos topográficos, la precisión depende de las condiciones en donde se lleve a cabo el trabajo así como el equipo a utilizar; en su investigación se enfoca en la precisión, la exactitud y el rendimiento de medición. Para la colecta de datos utilizó un receptor GNSS, una Estación Total y un Nivel. La serie de puntos levantados fueron los mismos utilizando los tres equipos; a pesar de ese factor, los resultados fueron los siguientes; con la Estación Total, su levantamiento duró 14 horas, 10 horas con el Nivel y 9 horas con los receptores GNSS utilizando el método estático relativo.

Las precisiones fueron las siguientes: la Estación Total tuvo resultados entre 1.50 y 2.50 metros con error relativo de +0.0005 % y error absoluto de +0.007 m, el Nivel tuvo -0.02 m de error absoluto y -0.001 % de error relativo; y el receptor GNSS cubrió un rango entre 1.60 m y 2.00 m con error absoluto de +0.599 m y +0.004 % de error relativo. El método más exacto fue obtenido con la Estación Total, los segundos más acertados los tuvo el Nivel y el de los receptores GNSS tuvo diferencias significativas. Los resultados varían dependiendo del tipo de proyecto que se ejecuta y de los resultados requeridos; por eso cabe tomar en cuenta las técnicas empleadas para hacer uso eficiente de los instrumentos a utilizar.

Relacionado al catastro rural y con base en la metodología presentada por Posadas, Kester, Canales, García y Ochaeta (2012), la utilización de métodos directos e indirectos para levantamientos catastrales en área rural varían entre los métodos en aspectos de precisión y costos. En su metodología presentan un caso de estudio en donde utilizan receptores GNSS y Estación Total para el método directo; para el método indirecto utilizaron la ortofoto del año 2006. Como resultado de su investigación, obtuvieron mejor precisión en el método directo, pero éste requería más tiempo y a consecuencia generaba más costos.

Los métodos convencionales de levantamientos catastrales directos, apoyados de receptores GNSS tendrán mejores resultados en la obtención de información precisa en campo. Es importante considerar el enfoque del proyecto topográfico y los resultados que se quieren obtener; tomando en cuenta el propósito y con base en eso, se puede seleccionar qué método utilizar.

El trabajo de Camargo (2011), establece una metodología para la actualización cartográfica catastral mediante el uso de vehículo aéreo no tripulado apoyado del receptor GPS que se encuentra en la aeronave; el autor concluye que las precisiones obtenidas superan los 5 metros, razón que se atribuye a la altura de vuelo y tipo de aeronave. Queda claro que la fotogrametría necesita soporte directo de receptores GNSS de doble frecuencia para la obtención de resultados precisos y para la actualización cartográfica.

La investigación de Quiñónez (2018), realiza un análisis para la determinación de la precisión en el posicionamiento autónomo haciendo uso de receptores del sistema de posicionamiento global (GPS, por sus siglas en inglés) de frecuencia dual realizando el postproceso de los datos en los servicios gratuitos en línea para prescindir del uso de la Red de Apoyo Catastral. Hizo uso de las estaciones de referencia de funcionamiento continuo (CORS, por sus siglas en inglés) ubicadas en Guatemala, El Salvador y México. El postproceso de los datos los hizo utilizando 3 servicios internacionales que fueron: el Natural Resources Canada Precise Point Positioning, AUSPOS Online GPS Processing Service de Australia y OPUS de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica del Departamento de Comercio de los Estados Unidos. Con los datos de las CORS, procedió a calcular el error medio cuadrático mediante un análisis de varianza.

Como resultado de la investigación de Quiñónez (2018), la precisión obtenida en los tres servicios internacionales en donde se realizó el postproceso; no tuvieron diferencias mayores; concluye que la captura de datos con receptores GNSS de doble frecuencia y la utilización de servicios internacionales para el post procesamiento de los datos es recomendable y aceptable para prescindir el uso de las redes de apoyo catastral (RAC) en Guatemala.

Estudios similares tratan temas como levantamientos catastrales (Chocoj, 2017); la evaluación de geoposicionamiento de las RAC (Divas, 2012); el análisis de precisión con estaciones base internacionales (Quiñónez, 2018); el catastro y legalización de tierras (Ayala Méndez, 2015); el análisis de resultados obtenidos mediante georreceptores, estación total y nivel (Mactzul, 2018); así como la comparación de levantamiento catastral rural utilizando método directo e indirecto (Vicente, 2014). Por otra parte, existe también una propuesta metodológica por Chihuan (2002) que examina el funcionamiento de los receptores GNSS con finalidades catastrales en condiciones remotas, específicamente en la selva y demuestra que las precisiones posibles pueden variar dependiendo del uso de los aparatos y los métodos de procesamiento de los mismos.

La presente investigación abordará el problema de la distribución deficiente de la red geodésica nacional, tomando en cuenta que dicha deficiencia afecta los levantamientos catastrales en áreas remotas, y actualmente hay municipios declarados como “zonas en proceso catastral” (realización de procesos de catastro en proceso) y otras sin catastro. Con los resultados de esta investigación se podrán economizar recursos en campo y obtener un mejor grado de precisión para establecer un catastro de calidad.

Además, este estudio será realizado mediante el uso de redes de apoyo catastral (RAC), a diferencia de investigaciones anteriores.

1.2. Alcances

El presente estudio explorará los principios de las técnicas de geoposicionamiento en Guatemala, para los profesionales en el área de la Topografía, Catastro, Geodesia y otras ciencias a fines. Primeramente, se considera fundamental que los usuarios de las tecnologías geoespaciales conozcan el funcionamiento de estos, de tal manera que, puedan interpretar los productos obtenidos. Es por ello que, la investigación se enfoca al análisis de los datos obtenidos mediante dispositivos receptores GNSS multibanda y la relación de sus productos.

1.2.1. Perspectiva investigativa

La perspectiva de la presente investigación es de carácter objetivo porque se basa en la experimentación muestral sobre un amplio territorio definido. Basado en lo anterior, lo que se busca es establecer una generalización que pueda aplicarse al mismo fenómeno en distintos contextos.

1.2.2. Alcance (descriptivo/explicativo/correlacional)

Este tipo de investigaciones tiene como finalidad conocer el grado de asociación entre variables como lo es en este caso el tiempo de observación, distancia a la base y precisión obtenida. En los estudios correlacionales, al evaluar cada variable, se analizan cada una de las mismas, presuntamente relacionadas, para luego cuantificarlas y analizar los vínculos entre ellas. La utilidad principal de la presente investigación es saber cómo se comporta una

variable al conocer el comportamiento de otras vinculadas, es decir, intentar predecir la aceptabilidad que tendrá un resultado a partir del valor que poseen las variables relacionadas.

La investigación se limita a usar todas las Redes de Apoyo Catastral existentes debido a que son un gran número y algunas no están en función; de igual manera que se seleccionarán puntos dispersos por el país para tener datos de regiones geográficas con características diferentes. La mayoría de los programas a utilizar son comerciales; de tal manera que se usarán versiones de prueba para realizar la investigación; esto implica no contar con todas las herramientas del software, pero si las necesarias para realizar la investigación.

1.3. Perspectiva técnica

La República de Guatemala cuenta en la actualidad con una red geodésica de primer orden muy limitada, considerando que está compuesta de 188 estaciones pasivas y solamente una estación activa, para cubrir los 108,898 km² de territorio nacional. En cuanto a redes de segundo y tercer orden, la densidad es mayor, aunque en el caso de las redes de apoyo catastral (RAC), estas solamente se ubican en los 64 municipios actualmente declarados como zonas en proceso catastral, dejando 276 municipios sin cobertura (ver anexo 4).

Lo anterior supone que, para la realización de trabajos de levantamiento catastral, la dificultad radica no solo en la ubicación de estas estaciones sino también en su disponibilidad, en muchas ocasiones obligando a los usuarios a alejarse considerablemente del área de trabajo en busca de la estación más cercana. En la búsqueda por una estación de primer orden cercana, el usuario

puede alejarse entre 10 y 50 km, lo que significa un aumento considerable en el tiempo de posicionamiento para cada punto medido.

Uno de los principios comúnmente aplicados Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger y Collins (2001) para calcular el tiempo de posicionamiento basado en la longitud de la línea base con georreceptores de doble frecuencia es que si la longitud de la línea base está entre 0 y 20 kilómetros, el tiempo de geoposicionamiento estático debe de ser de 20 minutos. Si la línea base es mayor a 20 km el tiempo de geoposicionamiento debe de ser de 20 min + 2 min/km. Con lo anteriormente dicho, el autor no especifica la precisión esperada para cada caso, ni tampoco establece el límite superior de añadir 2 minutos por cada kilómetro, lo que representa un problema ya que es sabido que la resolución de ambigüedades en líneas base “muy largas” se torna más difícil a medida que éstas se incrementan por encima de los 30 km.

1.4. Perspectiva de resultados

Para estimar la precisión, es necesario analizar los datos colectados por receptores GNSS de doble frecuencia, con distintos tipos de factores y grados de precisión. Actualmente se tiene disponible información catastral en la cual esta información es generada y puede ser analizada, por lo cual se presenta la necesidad de un estudio que determine la relación existente entre el tiempo de observación simultánea de dos receptores GNSS y la distancia entre ellos; con el propósito de obtener resultados más precisos, economizando el recurso tiempo y considerando la distancia de la base más cercana.

La importancia de tener un marco de referencia que estime la precisión de un geoposicionamiento es mayor para las personas que requieren de datos precisos para la toma de decisiones, o ya sean fines catastrales. Conocer

cuánto tiempo es recomendable para obtener precisiones necesarias y poder ser más eficiente en el tiempo de observación, ayudará a los técnicos a formular criterios más viables en áreas remotas en donde no existen Redes de Apoyo Catastral y con condiciones complicadas.

1.5. Justificación

El presente estudio pertenece a la línea de investigación Redes Geodésicas de Apoyo Catastral, que en este caso se enfoca en la situación particular de Guatemala y se justifica debido a que brinda elementos de criterio para optimizar el geoposicionamiento cuando las líneas base de medición GNSS son particularmente largas. La presente investigación es necesaria para mejorar la comprensión de los usuarios acerca de la relación entre la distancia, el tiempo y la precisión de un geoposicionamiento con fines catastrales, de modo que los resultados encontrados sirvan como base para la planificación previa a la medición.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Fundamentos del tema relacionados con el problema

Es importante exponer las temáticas relacionadas al uso de las tecnologías geospaciales ya que es significativo conocer la asociación y aportación a las mismas. A continuación, se describen temas relacionados a las técnicas y procesos de la tecnología espacial:

2.2. Geomática

La geomática integra técnicas y disciplinas de Geodesia, Cartografía, Fotogrametría, posicionamiento GNSS y topografía (Molina, 2010). En la geomática, las ciencias la geoinformación anteriormente mencionadas son integradas a las tecnologías de la información y comunicación; esto hace que la captura, manejo, procesamiento, análisis, almacenamiento y difusión de la información geográfica se ajuste a las necesidades de la ingeniería moderna y ayude a resolver problemas territoriales y sociales. “La geomática apoya a distintas ciencias ambientales y tecnológicas para el procesamiento de la información que generalmente está relacionada a un aspecto geográfico” (Tapia-Silva, 2014, p. 131-148). El catastro multifinalitario como pilar de desarrollo de un territorio, necesita técnicas encontradas en la geomática para crear y dar mantenimiento al catastro y poder analizar el comportamiento físico-legal de un territorio (Reyes, 2017).

2.3. Catastro

La recaudación de impuestos es un eje importante para los entes gubernamentales nacionales y regionales. Es posible hacer defensa de la inversión debido al cobro de los impuestos de las fincas y predios catastrales con el propósito de crear un inventario catastral multifinalitario. El proceso implica recolectar información en campo, como puede ser el área del predio, nombre del propietario, uso del suelo, y las coordenadas de los esquineros (Femenia, Mora, Coll y Martínez, 2010). Ampliando el contexto de catastro, es un inventario o censo de la riqueza inmobiliaria de un país, región entidad federal o municipio (Dávila, 2017). Algunas entidades consideran el catastro como un padrón estadístico de las fincas urbanas y rurales, debido a la contribución de los tenientes sobre las rentas fijas relacionadas al uso del suelo (Real Academia Española, 2013).

Según la investigación de Pinzon (2008), el catastro es un poderoso instrumento para el análisis y planificación del territorio a nivel nacional y específica que trasciende lo tributario y lo local; el investigador desarrolla una metodología analítica para el cálculo de las externalidades mediante el uso de información catastral municipal y la aplicación de métodos cuantitativos. Por otra parte Villa (2006), define el catastro como un censo analítico que tiene el propósito de ubicar, descubrir y registrar las características físicas de cada bien inmueble con el fin de detectar sus particularidades intrínsecas que lo definen tanto material como espacialmente; el estudio también hace énfasis en el tema tratado por Pinzon (2008) en relación al catastro municipal, estableciendo que para la captación de recursos mediante los cobros de impuestos hacia la propiedad inmobiliaria, es necesario un catastro tanto municipal como nacional.

La relación existente entre el posicionamiento GNSS y el catastro trata sobre la aplicabilidad de los GNSS. Existen métodos de posicionamiento que se ajustan a las necesidades catastrales. Algunas aplicaciones en Catastro y Propiedad Inmobiliaria son los parcelamientos sin límites monumentados y con límites monumentados. En los parcelamientos sin límites monumentados se pueden usar las técnicas de medición diferencial. Por otro lado, para los parcelamientos con límites monumentados, que especifica que los límites ya están definidos y requieren rectificación, aplica el método de navegación cinética satelital (RTK) o el método estático (Comisión de Cartografía de Andalucía, 2011).

2.4. Geodesia espacial

Los fenómenos espaciales que son estudiados en la superficie terrestre requieren de sistemas de coordenadas para tener referencia del globo terráqueo. La ciencia que se encarga de esos estudios espaciales se conoce como la geodesia, El objetivo principal de esta ciencia es conocer y determinar las dimensiones de la Tierra; esto también abarca el campo de gravedad, los sistemas de referencia y las variaciones que ocurran sobre la Tierra (Moreno, 2015). Derivada de la geodesia, aparece recientemente la Geodesia Espacial que se basa en la observación de satélites en el campo gravitacional de la Tierra.

Estos estudios ayudan a crear modelos geopotenciales a partir del análisis de las perturbaciones en las orbitas de los satélites. Esas observaciones ayudan a realizar triangulaciones espaciales globales utilizando distintas técnicas que buscan obtener mayor precisión en los resultados (Berrocoso *et al.*, 2004). Al pasar de los años, la geodesia ha variado en muchos aspectos tecnológicos enfocados al desarrollo espacial que promueven la observación de

la Tierra a escalas globales y mejorando la precisión (Plag, Rothacher, Pearlman, Neilan y Ma, 2009).

La Geodesia Espacial es conformada por estaciones terrestres vinculadas a los satélites y se comunican mediante la recepción de señales, estas estaciones terrestres son categorizadas como pasivas y activas: Pasivas se denominan cuando reciben señales, pero no la emiten; y activas cuando se envían información a los satélites (Bianchi, 2016). Como ciencia, la geodesia es fundamentada por teorías fisicomatemáticas que sirven de apoyo para ramas como la fotogrametría, topografía y cartografía; es conocida también por su relación con la astronomía y la física debido a su relación atmosférica y terrestre, los sistemas de referencia ayudan a la determinación de las posiciones geodésicas, y de tal manera ayuda a determinar la forma y dimensión de la Tierra (Sevilla, 2012).

2.5. Posicionamiento GNSS

Actualmente existe una variedad de técnicas de posicionamiento, entre las cuales se destacan los sistemas GNSS que tienen diversidad de aplicaciones. Al presente existen constelaciones empleadas y en etapa de desarrollo tales como el GPS de los Estados Unidos, GLONASS (Global Navigation Satellite System) desarrollado en sus orígenes de la Unión Soviética, Galileo que se encuentra en fase de implementación y desarrollado por la Agencia Espacial Europea, COMPASS que anteriormente era Beidou, desarrollado por el gobierno chino y el IRNSS (Indian Regional Navigational Satellite System) desarrollado por el Indian Space Research Organisation. Las tareas de los GNSS comprenden técnicas para obtener coordenadas mediante procesos observacionales relacionados a espacio-tiempo tomando en cuenta la calidad

de los datos que se quieren conseguir (Comisión de Cartografía de Andalucía, 2011).

Dos métodos de observación comunes son, el posicionamiento absoluto cinemático en tiempo real, y el posicionamiento absoluto estático con postprocesado. Es importante mencionar que ambos métodos utilizan líneas base (ver apéndice 3) las cuales se definen como línea o vector entre un par de estaciones para las cuales se recolectan datos GNSS simultáneos (NovAtel Inc., 2015). Estos métodos utilizan la observación del Código, la Fase de la Portadora o ambos. El método que utiliza la fase de la portadora necesita un periodo estático de inicialización para resolver la ambigüedad inicial (Manuel, 2012).

El posicionamiento estático determina una coordenada a partir de una serie de observaciones realizadas en un tiempo definido por dos receptores, uno que recibe datos en una posición conocida y el otro en puntos en donde la posición se necesita conocer; que al final contienen desplazamiento que es corregido en el post proceso. En este método se obtienen soluciones redundantes que dependen del tiempo de observación (Vicente, 2014). En el método cinemático, el receptor de referencia funciona como estático. Si se conocen dos coordenadas en el comienzo de la observación, se pueden calcular los valores teóricos de las ambigüedades y poder prolongarlo durante todo el levantamiento.

La diferencia con el posicionamiento estático es que los receptores deben de cumplir con dos factores importantes que son, que pueda seguir la señal de la frecuencia con gran capacidad y que pueda bloquear la del “rover” cuando esté en movimiento, y la segunda es la ocurrencia de fallas en el ciclo causadas por las obstrucciones durante el movimiento del receptor. Es por eso que el

rover al moverse del punto inicial conocido debe mantener bloqueada las lecturas de la fase para que se consideren las condiciones iniciales durante el movimiento (Salazar, 2009).

Desde la creación de los sistemas globales de navegación por satélite, han sido investigadas las técnicas para mejorar la precisión de los datos con las medidas absolutas. Muchos de los errores que perturban al posicionamiento son debido al retardo atmosférico y los errores en la estimación de la órbita satelital. Estos errores pueden ser debido a los relojes del receptor, de los satélites o multipath (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger y Wasle, 2007). Existen técnicas para estimar los errores que afectan la exactitud en el posicionamiento, especialmente técnicas de GPS diferenciales que se basan en el cálculo de correcciones de coordenadas conocidas de una estación fija (Seeber, 2008).

Es por lo que la planificación previa es importante para especificar el proceso de colecta y procesamiento de datos. Según la Comisión de Cartografía de Andalucía (2011), para mejorar de calidad de la posición obtenida, los trabajos se distinguen en 1) Trabajos con correcciones y 2) Trabajos si correcciones; el primero hace uso de información complementaria para mejorar la calidad del posicionamiento y el segundo trabajo hace referencia a la obtención sin corrección al instante. La investigación de Seeber (2008) agrupa las fuentes de error en las categorías siguientes: 1) Errores con correlación de la distancia, 2) Errores con correlación al tiempo y 3) Errores sin correlación; el error 1 puede ser corregido con estaciones fijas de referencia próximas, el segundo puede ser corregido sincronizando las observaciones y el tercero necesita calibración.

2.6. Cartografía

La información geográfica colectada mediante el uso de los GNSS tiene propósito de ser dibujada o mapeada para representar aspectos geográficos en un ámbito digital. Los avances tecnológicos en la geografía hacen que las técnicas cartográficas puedan ser más ilustrativas y de tal manera se facilita la comprensión de los productos por parte de los usuarios. Antiguamente la cartografía era empleada utilizando distintas técnicas de representación y precisión. Relacionando la cartografía con el catastro, es importante que se puedan identificar las manzanas y calles en un plano catastral; es por eso esencial el uso correcto de escalas y técnicas pues no todos los documentos cartográficos son aceptables (Solanas-Jiménez, 2018).

Actualmente se han criticado metodologías cartográficas en los sistemas de información, como es el caso de del estudio por Mackaness (2006), quien sugiere técnicas de cartografía automatizada, lo que significa que la base de datos de fenómenos es convertida a un modelo de datos, para tener una visión más clara de una imagen a múltiples escalas.

Para los sistemas de información, es importante tener modelos cartográficos que permitan representar los datos geográficos a diferentes escalas (Martín, 2007). En materia catastral, la cartografía varía en la escala de representación, pero la precisión debe de mantenerse en un grado aceptable. Esto requiere que las técnicas de colecta de información geográfica sean precisas y que los receptores GNSS sean adecuados para los trabajos.

2.7. Receptores GNSS

Actualmente existe una gran variedad de receptores GNSS con diversas aplicaciones y características. Principalmente se clasifican mediante su función y si trabajan con el código o si utiliza ambos, código y fase. El término “receptor

GPS” es comúnmente utilizado para describir a los receptores, pero su funcionamiento solo alcanza a utilizar el sistema norteamericano GPS. Si los receptores alcanzan a utilizar más de un sistema, se le denomina receptor GNSS. Debido a los desarrollos tecnológicos, es posible obtener resultados milimétricos mediante el uso de receptores GNSS para la colecta de datos en campo.

De acuerdo con Berné, Garrido y Capilla (2019), para garantizar las precisiones centimétricas en trabajos topográficos, se requiere conocimientos de cálculos y los sistemas de referencia. Los receptores convencionales tienen etapas de procesamiento descritas por Puga (2015) y representan una arquitectura que muestra desde las señales de entrada hasta la solución de navegación de posición, velocidad y tiempo (PVT, por sus siglas en inglés).

Los receptores geodésicos de doble frecuencia que se utilizarán para desarrollar el presente trabajo fueron seleccionados según los niveles de precisión que se quieren analizar y poder reducir los errores sistemáticos específicamente los relacionados a la ionosfera. Investigaciones como la de Ayala Ramírez y Hasbun (2012) que hacen uso de la tecnología GPS diferencial de doble frecuencia para alcanzar precisiones centimétricas, demuestran la importancia de seleccionar el tipo de receptor indicado para trabajos topográficos. Para analizar el funcionamiento eficiente los receptores GNSS, se hace uso de metodologías que evalúan las redes de apoyo catastral para conocer su comportamiento de las señales y su grado de precisión según la distancia de los puntos de georreferenciados (Divas, 2012).

2.8. Topografía

El uso de la topografía como técnica para la colecta de datos ha sido de apoyo para muchas ciencias mediante su versatilidad y los métodos de procesamiento (Branthomme, Altrell, Kamelarczyk y Sacket, 2009). La importancia de la topografía en proyectos catastrales y geodésicos se debe a su atribución a la colecta de datos mediante métodos directos (Mendoza, 2010; Valdés, 2006). Las técnicas empleadas por la topografía permiten llevar datos terrestres a espacios digitales para analizarlos mediante el uso de herramientas de análisis espacial. Hace algunos años se utilizaban aparatos mecánicos para realizar levantamientos topográficos, tales como el tránsito que posteriormente paso a ser teodolito y con los avances tecnológicos se convirtió en la estación total (Gasga, 2008). Las necesidades de obtención de mayor grado de precisión se vieron solucionadas por la integración de aparatos geodésicos con equipos topográficos de precisión milimétrica.

Para los levantamientos catastrales en donde se requiere precisiones centimétricas, se utilizan receptores GNSS como fuente de origen de toma de datos o estaciones totales amarradas a puntos conocidos previamente georreferenciados. En la actualidad, la topografía tiene una gama de opciones según el objetivo de los estudios y es importante saber qué tipo de aparatos utilizar para hacer uso eficiente de los recursos. Para estimar el los costos de adquisición de aparatos y planificación de proyectos, existen estudios como el de Vicente (2014) que estima un presupuesto según las necesidades del inversionista. La topografía siempre apoyará en solucionar problemas relacionados a aspectos geográficos y ambientales en donde se requieran coleccionar y analizar datos espaciales.

2.9. Geoestadística

Todo dato tiene relación con un espacio geográfico y su tratamiento crea información espacial; por eso es importante utilizar las técnicas adecuadas para el uso y representación de la información. El uso de la estadística para el manejo y representación de los datos se conoce como geoestadística. Según Goovaerts, (1997), la geoestadística es un grupo de técnicas estadísticas para analizar e interpretar datos geográficos con la ventaja de realizar varias observaciones y no solamente una estimación. La geoestadística permite analizar los fenómenos naturales de un espacio determinado.

La investigación de Caro (2012) utiliza la geoestadística para estimar valores no medidos mediante el uso de métodos de interpolación para estimar los valores, apoyado de valores previamente medidos en localizaciones cercanas con el propósito de crear mapas geoestadísticos de variables medioambientales. El estudio del autor previamente mencionado es similar a la presente investigación que a diferencia utiliza valores medidos y estaciones conocidas para analizar la precisión.

Las variables numéricas obtenidas por las observaciones de los receptores GNSS generan un grado de precisión dependiendo del tiempo de observación y la distancia que se encuentra de la base. Como establece Castillejo (2008), cada valor observado pertenece a una distribución y se encuentra referenciado a un espacio específico; por eso los valores son cambiantes porque la ubicación es distinta. La Geoestadística relacionada al análisis espacial apoya ciencias desde lo arqueológico como el caso de estudio de Zubrow y Harbaugh (1978), que hace uso del método de interpolación espacial “Kriging” sobre la variabilidad espacial arqueológica; así como en lo geológico por ejemplo Samper y Carrera (1990) que se enfoca en la Hidrología Subterránea y en su variabilidad espacial de sus propiedades hidrodinámicas; y en lo ecológico como Robertson (1987), quien muestra una teoría de la variable

generalizada. La geoestadística es útil para analizar estimaciones en observaciones de datos geográficos buscando refinar una variable numérica y poder analizarlo estadísticamente.

2.10. Sistemas de Información Geográfica

Actualmente, las Tecnologías de Información y Comunicación son pilares importantes para el desarrollo de un territorio. Dentro de las tecnologías de la información y comunicación (TIC), los Sistemas de Información Geográfica son herramientas que abarcan el análisis de la información social, económica y ambiental desde un punto geográfico. El enfoque principal de utilizar los SIG es poder apoyar a las tomas de decisiones y gestionar eficientemente de desarrollo de un territorio (Granados, 2010).

La ordenanza del territorio es importante para que los pobladores puedan tener una buena calidad de vida, es por ello que herramientas como el Plan de Ordenamiento Territorial que es creado y ajustado mediante apoyo de los sistemas de información geográfica (SIG) exista en los municipios en desarrollo (Lamprea, 2017). Es fundamental tener un buen catastro para tener un plan de ordenamiento territorial eficiente y poder analizar los aspectos catastrales con buen grado de precisión en un SIG. La administración del territorio, apoyado de un SIG, abarca materias ambientales como el manejo de los recursos naturales renovables apoyado de un SIG Calderón, Álvarez y Axpucac (2011) aplicaciones para el catastro predial (Peña, 2012).

Estudios tales como el de Beltrán (2017), proponen una metodología para analizar datos de GNSS aplicando los Sistemas de Información Geográfica. Poder ajustar la información obtenida por los receptores GNSS y entender su comportamiento es fundamental para tener una idea de las precisiones que se

pueden obtener mediante el tratamiento adecuado de los datos. Las tecnologías de Sistemas de Información Geográfica aportan a los análisis socio-espaciales y con ello abarca análisis territorial mediante el uso de datos geográficos (Baide, 2015, p. 211-224). Por eso es importante entender el funcionamiento de los datos espaciales y como alcanzar grados de precisión aceptables.

2.11. Fundamentos estadísticos

Para el análisis de la información colectada y la interpretación en un estudio, se recurre a la estadística, que facilita y fundamenta las teorías matemáticas lógicas (Capmartin, 2009). En la interpretación de las precisiones finales obtenidas por receptores GNSS se utilizaron varias pruebas estadísticas para examinar y emitir opinión sobre los datos. Para revisar la normalidad se utilizó la prueba de Shapiro Wilk, para estimar las medidas y sus efectos se realizaron Modelos de Análisis de Varianza, se calcularon los coeficientes de correlación utilizando el método de Spearman, la comparación múltiple se hizo con la prueba de Tukey, para contrarrestar las hipótesis se usó la prueba de Levene y para los ensayos no paramétricos se utilizó la prueba de Kruskal Wallis.

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En la presente sección se muestran los resultados obtenidos mediante el análisis y la interpretación de los datos colectados por los receptores GNSS de doble frecuencia. Los resultados se detallan en tablas y gráficas que contienen información que conduce al cumplimiento de los objetivos para expresar opinión y entendimiento de la relación entre las variables según los factores que influyen en ellas como lo son las fuentes de error y su incidencia en los resultados finales.

3.1. Clasificación de la precisión obtenida

En la precisión horizontal obtenida a partir de los 70 geoposicionamientos realizados todas las mediciones estuvieron debajo de 30 cm el cual fue considerado como valor máximo para la investigación. Se obtuvo una precisión horizontal mínima de 0.003 mm y máxima de 0.026mm. Con los valores obtenidos se generó la tabla I que muestra los grados de precisión obtenidos en relación con la distancia a la base y el tiempo de geoposicionamiento promedio.

Tabla I. **Grado de precisión obtenido**

Precisión horizontal (m)	Distancia a la base (km)	Posicionamiento promedio (min)	Grado de precisión
0.003 – 0.010	0 – 21	33	Subcentimétrico
0.010 – 0.100	21 – 100	57	Subcentimétrico
0.100 – 1.000	> 100	> 57	Submétrico

Fuente: elaboración propia.

3.1.1. Clasificación de la precisión según hora del día

Basados en los registros obtenidos, se formaron tres horarios del día para apreciar cómo se comportan los datos según la hora en que se realizó el geoposicionamiento, conforme el criterio de profesionales agrimensores se estableció la agrupación de horarios apreciables en la tabla II.

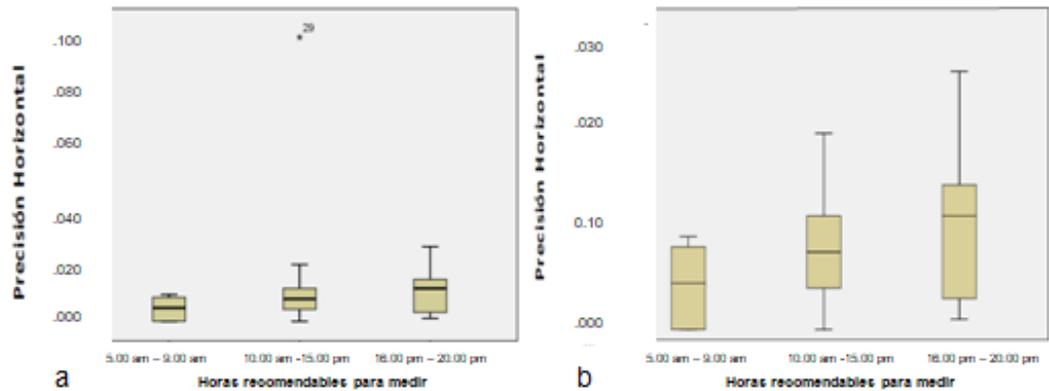
Tabla II. **Resumen de precisión horizontal**

Horas recomendadas para medir	Precisión Horizontal							Recuento
	Media	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Percentil 25	Mediana	Percentil 75	
5:00 -9:00 h	.005	.004	.001	.010	.001	.006	.009	8
10:00 - 15:00 h	.011	.014	.001	.096	.005	.009	.012	44
16:00 - 20:00 h	.011	.008	.002	0.26	.004	.012	.015	17

Fuente: elaboración propia.

Con lo anterior establecido se realizó un gráfico de caja y sesgo para determinar la posibilidad del valor extremo en la variable precisión horizontal. En la figura 1 se observa que existe un valor extremo en la base de datos y se procedió a eliminarlo ya que dicho registró influye directamente en la regresión lineal múltiple y poder proceder sin complicación a la validación de supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas en las diferentes variables cuantitativas (figura 1).

Figura 1. Diagrama de precisión horizontal según la hora de medición



Fuente: elaboración propia.

3.2. Normalidad de variables cuantitativas según hora de geoposicionamiento

Considerando el número de observaciones, se procedió a dividir las en categorías horarias y se utilizó la prueba de Shapiro Wilk mostrada en la Tabla III, dado que el número de observaciones dentro de cada categoría horaria fue menor a 50.

En cuanto a las variables de geoposicionamiento y distancia en kilómetros (km), solo en el rango de 5 a 10 horas se comportaron las mediciones normales, en las otras categorías no fue así, por ello, para examinar posibles diferencias entre ellas, se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis como complemento al análisis y no se entró en especificación de la técnica estadística debido al alcance de este estudio.

Tabla III. **Prueba de Shapiro Wilk en datos cuantitativos según hora de medición**

	Horas recomendadas para medir	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	GI	Sig.
	5:00 h - 9:00 h	.853	8	.102
Precisión Horizontal	10:00 h - 15:00 h	.947	43	.046
	16:00 h - 20:00 h	.921	17	.152
	5:00 h - 9:00 h	.777	8	.016
Geoposicionamiento	10:00 h - 15:00 h	.687	43	.000
	16:00 h - 20:00 h	.679	17	.000
	5:00 h - 9:00 h	.912	8	.371
Distancia en Kilómetros	10:00 h - 15:00 h	.834	43	.000
	16:00 h - 20:00 h	.868	17	.020
	5:00 h - 9:00 h	.837	8	.070
Precisión Vertical	10:00 h - 15:00 h	.960	43	.134
	16:00 h - 20:00 h	.923	17	.166

Fuente: elaboración propia.

3.3. Diferencias entre las variables cuantitativas según hora de geoposicionamiento

Con los resultados originados previamente, sobre la normalidad de los datos, se detectó que las precisiones se comportan próximos a normales según las horas de medición, por lo tanto, se utilizó la prueba de ANOVA paramétrica bilateral (tabla IV) en cual se estableció que si resultados dieran Sig. mayores a 0.05 cumplirán con supuesto de varianzas homogéneas. Las hipótesis por probar como supuesto fue:

H0: Las varianzas son similares dentro de cada tratamiento.

H1: Las varianzas No son similares dentro de cada tratamiento.

Tabla IV. **Prueba de homogeneidad de varianzas, precisiones horizontales según hora de medición**

	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Precisión Horizontal	2.739	2	65	.072
Precisión Vertical	2.263	2	65	.112

Fuente: elaboración propia.

3.4. Análisis de varianza según hora de geoposicionamiento

En el caso de la precisión horizontal, se utilizó la prueba de Tukey presentada en la tabla V para detectar diferencias entre grupos.

Tabla V. **Prueba ANOVA variables de precisión según horas de medición**

	Suma de cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	Sig.
--	-------------------	----	------------------	---	------

Fuente:	Entre grupos	.000	2	.000		
elaboración propia.	Precisión Horizontal	Dentro de grupos	.002	65	.000	3.266 .045
		Total	.002	67	.000	
		Entre grupos	.001	2	.000	
Las tablas VI y VII,	Precisión Vertical	Dentro de grupos	.009	65	.000	2.680 .065
		Total	.009	67		

identifican dos grupos homogéneos, donde se muestra que los promedios diferentes son el del grupo de 5 a 9 h con el de 16 a 20 h.

Tabla VI. **Prueba de Tukey en la Precisión horizontal al 95 % según hora**

Horas recomendadas para medir	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
		1	2
5:00 h - 9:00 h	8	.00525	
10:00 h - 15:00 h	43	.00874	.00874
16:00 h - 20:00 h	17		.01147
Sig.		.243	.419

Fuente: elaboración propia.

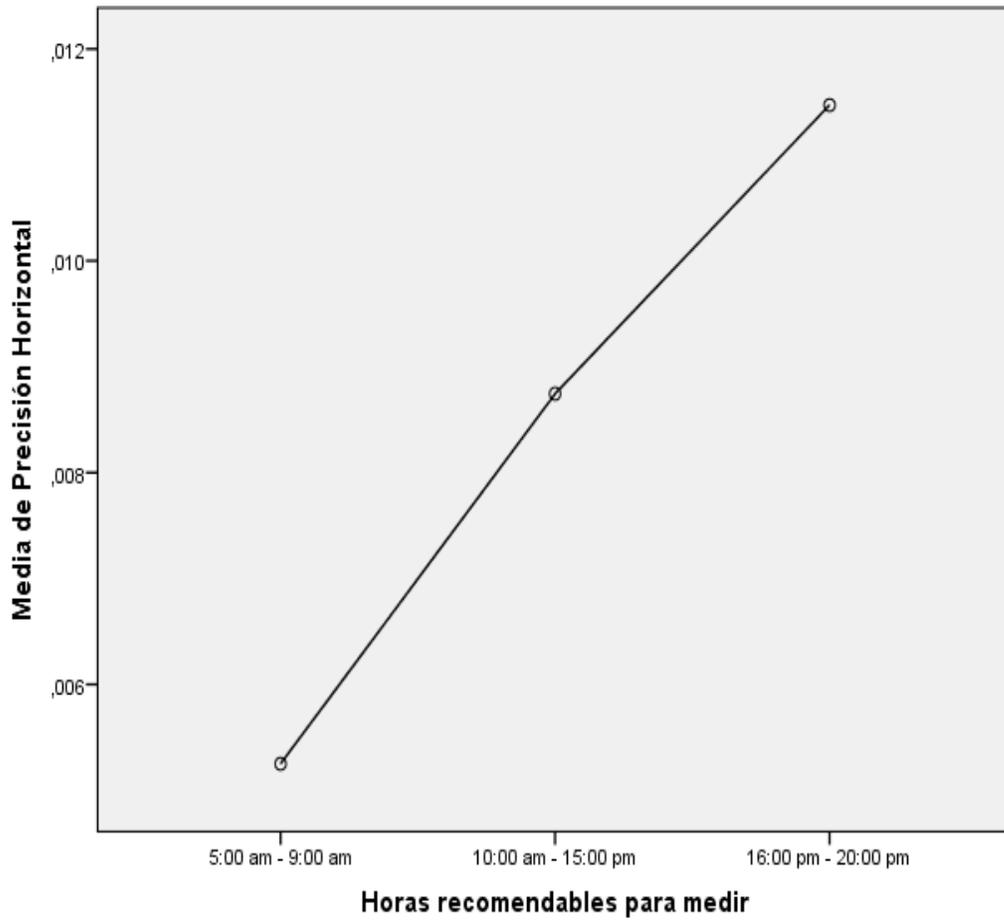
Tabla VII. **Prueba de Tukey en la Precisión Vertical 95 % según hora**

Horas recomendadas para medir	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
		1	2
5:00 - 9:00 h	8	.01038	
10:00 - 15:00 h	43	.01879	.01879
16:00- 20:00 h	17		.02224
Sig.		.132	.704

Fuente: elaboración propia.

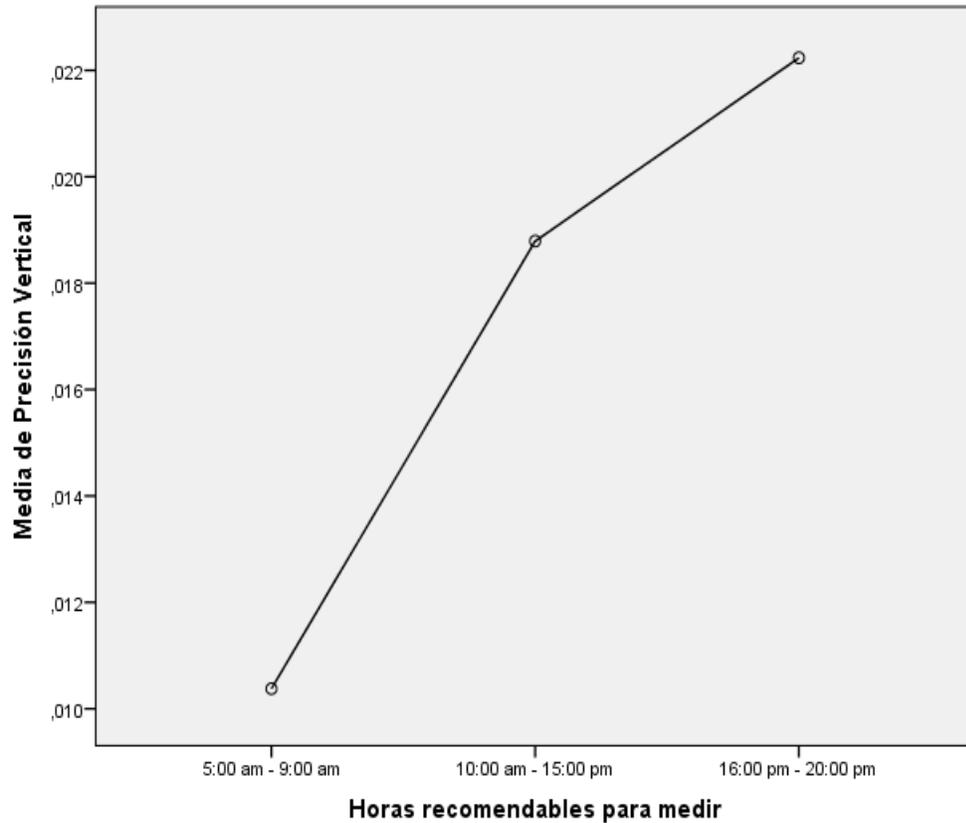
En las figuras 2 y 3, las precisiones se pueden apreciar de manera gráfica y se demuestra que son menores a medida que avanza el día, por eso, se ve que en el horario de 5:00 h a 9:00 h, el promedio es menor al promedio encontrado entre las 10:00 h y las 15:00 h y este a su vez menor que el de 16:00 h a 20:00h.

Figura 2. Perfil para las precisiones según hora de geoposicionamiento



Fuente: elaboración propia utilizando SPSS Statistics.

Figura 3. Perfil para la precisión vertical según hora de geoposicionamiento



Fuente: elaboración propia utilizando SPSS Statistics.

3.5. Rangos de distancia a la base y tiempos de observación

Los números que se observan sobre el tiempo de geoposicionamiento en la tabla VIII, tienen la finalidad de categorizar los periodos en números enteros y poder representarlos con mejor comprensión más adelante en las gráficas.

Tabla VIII. Rangos de distancia a la base y tiempos de observación

Geoposicionamiento						
	1	2	3	4	5	6
	10-20	20-40	40-1h	1h-2h	2h-4h	4h-8h
Distancia en Kilómetros	1-4	± 0.003				
	4-20	± 0.003 - 0.006				
	20-30	± 0.009 - 0.010				
	30-40	± 0.012 - 0.013				
	40-50	± 0.013 - 0.015				
	50-90	± 0.016 ± 0.022 - 0.022				
	100-120	± 0.027 ± 0.026				

Fuente: elaboración propia.

3.6. Tiempo mínimo de observación simultánea

La tabla IX demuestra que entre más larga sea la longitud de la línea base, más tiempo de geoposicionamiento debe darse a los georreceptores, es decir, entre mayor tiempo, mayor posibilidad habrá que la precisión obtenida sea aceptable.

Tabla IX. **Tiempos ideales de observación**

Longitud de línea base (km)	RANGOS IDEALIZADOS		GRADO DE PRECISIÓN
	Tiempo mínimo (min)	Tiempo ideal (min)	
0-1	10	20	Subcentimétrico
1-5	10	20	Subcentimétrico
6-13	15	22	Subcentimétrico
14-24	20	30	Subcentimétrico
25-50	20	40	Subdecimétrico
50-90	40	60	Subdecimétrico
100-120	120	180+	Subdecimétrico

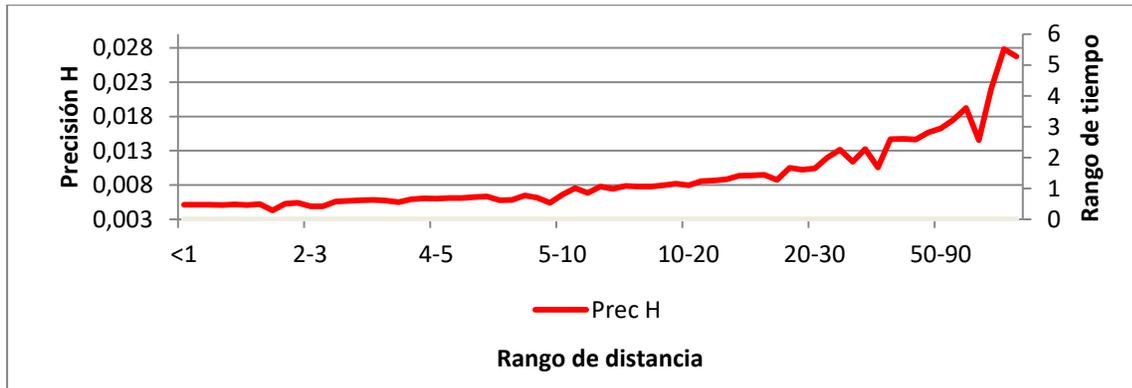
Fuente: elaboración propia

3.7. **Correlación entre las variables tiempo y distancia en función de la precisión obtenida**

Se crearon rangos de tiempo y distancia con el fin de agrupar los datos de tal manera que se mostraran como promedios de más o menos una cantidad cercana a la realidad.

En la curva de la figura 4 se pueden apreciar alteraciones a distancias mayores a 30 kilómetros.

Figura 4. **Curva de precisión horizontal en relación con la distancia a la base**



Fuente: elaboración propia.

3.8. Regresión lineal múltiple de variables

Con el fin de identificar qué factores están relacionados a la precisión horizontal, se utilizó la técnica de regresión lineal múltiple, donde las variables independientes fueron: precisión vertical, geoposicionamiento y distancia en kilómetros. Como la variable cuantitativa se consideró, además, la hora de medición, esta última es una variable cualitativa y, por lo tanto, se recodificó como una variable Dummy donde la categoría base fue las horas (el intervalo) entre 5:00 y 10:00. Es necesario mencionar que, al ejecutar un primer modelo, se detectó un valor residual negativo alejado del umbral-3 que se considera no adecuado (-4,74), se decidió eliminar el registro 27 al cual correspondía dicho valor, con esos mínimos cambios se ejecutó el modelo final.

Luego de usar el método y de considerar todas las variables, se pasó al método de pasos sucesivos garantizando la no colinealidad de las variables independientes mostradas en la tabla X.

Tabla X. Medidas resumen del modelo final por pasos sucesivos

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	.930a	.965	.963	.002213
2	.954b	.910	.908	.001819
3	.958c	.917	.913	.001763

Fuente: elaboración propia.

La tabla XI determina las variables que aportan más a la precisión horizontal, en la cual se observa el coeficiente estandarizado Beta, indica cual variable independiente aporta de mayor manera a explicar la precisión horizontal.

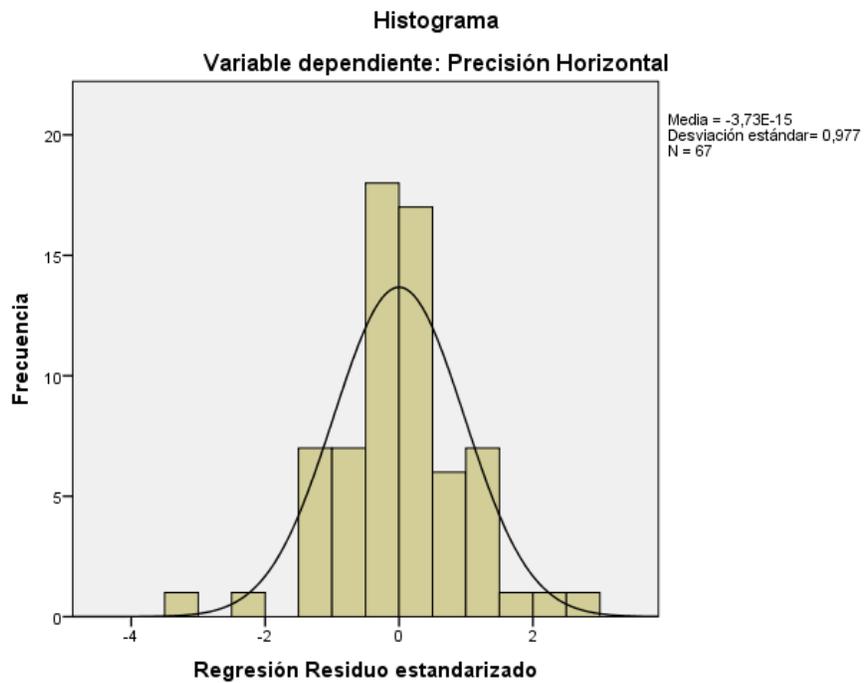
Tabla XI. **Coeficientes y significación de las variables que quedan en el modelo a partir del modelo de colinealidad**

Modelo		Coeficientes estandarizados	Coeficientes estandarizados	T	Sig.	Estadísticas de colinealidad	VIF	
		B	Error Estándar			Beta		Tolerancia
3	(Constante)	.001	.000	2.929	.005			
	Precisión vertical	.346	.028	.681	12.549	.000	.447	2.239
	Distancia en kilómetros	9.341E-5	.000	.393	6.145	.000	.321	3.114
	Geoposicionamiento	-1.225E-7	.000	-.106	-2.260	.027	.599	1.670

Fuente: elaboración propia.

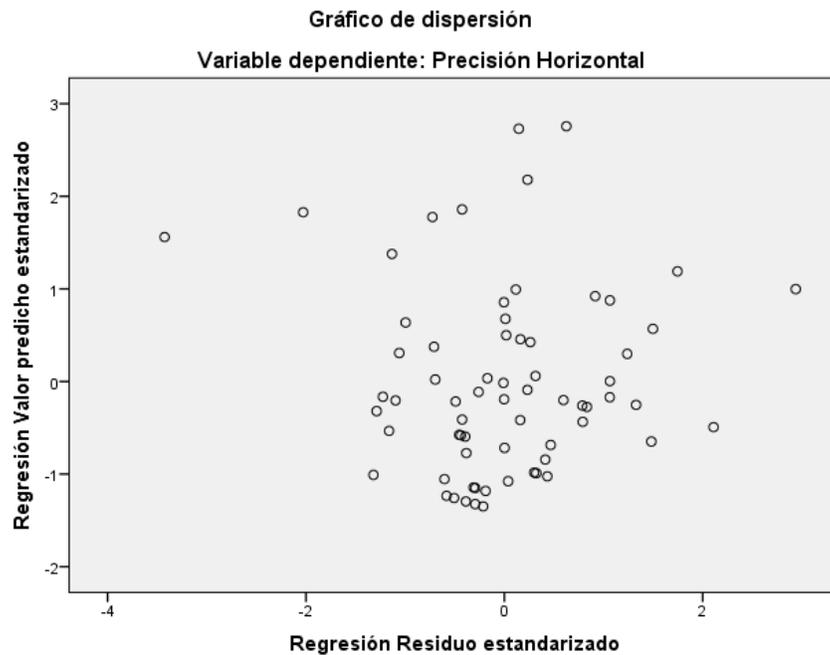
La figura 5 muestra el histograma de los residuales y se asemeja de manera asertiva a una distribución normal así también se muestra el gráfico (figura 6) de dispersión que complementa lo establecido previamente.

Figura 5. **Supuestos gráficos de los residuales: histograma**



Fuente: elaboración propia utilizando SPSS Statistics.

Figura 6. **Supuestos gráficos de los residuales: gráfico de dispersión**



Fuente: elaboración propia utilizando SPSS Statistics.

3.9. Variables correlacionadas con la precisión horizontal

Con el fin de determinar la correlación entre la precisión horizontal, precisión vertical, la distancia y el geoposicionamiento, se calcularon los coeficientes, los resultados se muestran en la tabla XII en donde se calcularon los coeficientes de correlación de Spearman dado el carácter de no normalidad de algunas de ellas. La primera fila de cada variable muestra los valores de los coeficientes de correlación y la parte inferior, los valores de Sig, donde si son menores a 0.05 existe la correlación, en caso contrario, no.

Tabla XII. **Correlaciones de Spearman en variables cuantitativas**

Rho de Spearman		Precisión Horizontal	Precisión Vertical	Distancia en Kilómetros	Geoposicionamiento
Precisión Horizontal	Coeficiente de correlación	1.000	.903**	.702**	.333*
	Sig. (bilateral)		.000	.000	.005
	N	68	68	68	68
Precisión Vertical	Coeficiente de correlación	.903**	1.000	.722**	.289*
	Sig. (bilateral)	.000		.000	.017
	N	68	68	68	68
Distancia en Kilómetros	Coeficiente de correlación	.702**	.722**	1.000	.542**
	Sig. (bilateral)	.000		.000	.000
	N	68	68	68	68
Geoposicionamiento	Coeficiente de correlación	.333**	.289*	.542**	1.000
	Sig. (bilateral)	.005	.017	.000	
	N	68	68	68	68

Fuente: elaboración propia.

Los valores de 0.000 en el Sig. de las variables presentadas en la tabla XII, demuestran que el modelo es estadísticamente significativo lo que indica que las variables definidas en el modelo aportan a explicar los cambios en la precisión horizontal.

3.10. Fuentes de error en el geoposicionamiento GNSS estático

Existen factores que tienen impacto en la adquisición de datos GNSS obtenidos con receptores de doble frecuencia, por lo tanto, la variable que sale afectada es la precisión final. Estos errores influyen en la propagación de la señal de los sistemas GNSS en los cuales principalmente son errores sistemáticos que son producidos por los usuarios o simplemente por causas naturales. En la Tabla XIII se pueden apreciar los errores que influyen en el geoposicionamiento:

Tabla XIII. Errores en geoposicionamiento

Sistema	Nombre de error
Receptor	Multipath, retardos instrumentales, offset del reloj, variación del centro fase antena
Asociados al satélite	Orbital, intencionados por el administrador del sistema, efectos relativistas, offset del reloj
Medio de propagación	Atmosféricos, ionosfera, troposfera, pérdidas del ciclo

Fuente: elaboración propia.

Los errores atmosféricos se encuentran entre los sesgos de efecto ionosférico y efecto troposférico. Los efectos de la troposfera son relacionados con equipos de medición laser como lo son las estaciones totales, por otra parte, los errores orbitales, multipath y ruido del receptor son relacionados a métodos de medición satelital. Los dos rangos de sesgos suceden en métodos distintos pero juntos dificultan saber el verdadero rango geométrico (Sickle, 2015).

3.11. Errores que afectan las precisiones del geoposicionamiento

Se consideró importante contemplar los errores que afectan el geoposicionamiento de tal manera que se dividieron en dos categorías; Errores Sistemáticos, que son los errores que se dan en todas las mediciones y Errores accidentales que se dan debido a causas técnicas adventicias. No se entró en detalle a estudiar los errores debido a al alcance de la investigación, pero sí es importante tomar en cuenta la incidencia en la precisión tal y como se muestra en la tabla XIV.

Tabla XIV. **Resumen del impacto de errores en las Precisiones GPS**

Error típico	GPS estándar(metros)	GPS diferencial(metros)
Reloj de satélite	1.5	0
Orbita	2.5	0
Ionósfera	5.0	0.4
Troposfera	0.5	0.2
Ruido	0.3	0.3
Multipath	0.6	0.6

Fuente: Trimble Navigation Limited. *Step 5: Correcting errors*. Consultado el 15 de junio de 2020. Recuperado de www.trimble.com/gps_tutorial/howgps-error2.aspx.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El análisis de datos colectados con receptores GNSS para estimar el grado de precisión alcanzable y así establecer rangos de tiempo y distancia óptimos que dieran resultados satisfactorios, requirió de análisis estadísticos y técnicas de correlación que pudieran facilitar y fundamentar la significación de la información. Los resultados obtenidos tienen el propósito de hacer más eficiente la colecta de datos con receptores GNSS y hacer buen uso del recurso tiempo que varía según la distancia a la base.

La información analizada fue brindada por Agrimensores profesionales que se dedican al Catastro y Geodesia, por lo tanto, los datos tienen mucha semejanza a la realidad, específicamente con los métodos de colecta de datos. Los geoposicionamientos realizados fueron agrupados según su tiempo de observación y distancia a la base para comprender las precisiones que pueden ser alcanzadas, sin embargo, se especifica los errores presentados en la Tabla XIV que pueden afectar el geoposicionamiento y a consecuencia afectan las precisiones finales, por ende, se hace énfasis a la planificación necesaria que tiene propósito mejorar la calidad de los datos.

Es complicado poder dar criterio de manera generalizada sobre las precisiones exactas para cada geoposicionamiento debido a los factores y circunstancias de cada medición. Los resultados obtenidos con esta investigación hacen énfasis en las generalidades de distancia, ya que en el territorio hay una red geodésica deficiente y muchos Agrimensores utilizan bases a distancias alejadas sin otorgar el tiempo necesario para alcanzar precisiones aceptables.

Los resultados de la investigación pretenden crear lineamientos y futuras investigaciones relacionadas a la eficiencia en los geoposicionamientos con relación a buenas prácticas y la obtención de productos de calidad puesto a que es importante hacer buen uso de los recursos en campos para alcanzar mayor productividad sin perder el enfoque de calidad. El análisis permitirá que las personas usuarias de datos GNSS puedan realizar su geoposicionamiento de tal manera que sepan que pueden esperar según las circunstancias en las que se encuentran. A continuación, se discuten los resultados obtenidos:

4.1. Clasificación de los grados de precisión alcanzados mediante el posicionamiento GNSS estático

La técnica de geoposicionamiento estático consiste en dos observaciones simultáneas con series de tiempo similares, como resultado se crea suficiente redundancia para eliminar los errores sistemáticos que producen durante la observación. Esta técnica de geoposicionamiento genera precisiones submétricas de muy buena calidad debido a la redundancia de tiempo de observación que permite dar solución estática y poder obtener resultados deseados.

Con lo establecido anteriormente y con los análisis estadísticos realizados, se comprende que se pueden obtener buenas precisiones siempre y cuando el tiempo de observación sea idóneo para crear buenos promedios del resultado. Por ello se acudió a clasificar el tiempo de observación y distancia a la base en categorías, con el fin de establecer rangos de estimación debido a que no se puede emitir un valor exacto como producto de cada geoposicionamiento. Por el método que se utilizó para coleccionar los datos, se hizo fácil poder definir los rangos y a consecuencia se establecieron las precisiones finales que nos

demuestran que los resultados pueden ser muy finos si se utilizan buenas prácticas y la metodología adecuada.

Por lo que se refiere a las categorías y como se definieron, cabe mencionar que fueron establecidas mediante criterios de profesionales Agrimensores que comúnmente fijan esos tiempos y distancias en campo. A eso se debe que para mediciones menores a un kilómetro de distancia a la base no se debe de dar un tiempo de geoposicionamiento menor a 10 minutos debido a los factores que influyen en el geoposicionamiento, de tal manera que, para tener precisiones aceptables en geoposicionamiento estático, el tiempo de observación mínimo no debe ser menor a 10 minutos.

Como se observa en los resultados, las precisiones obtenidas se consideran adecuados debido a que no exceden el milímetro en el eje horizontal, asimismo, es importante hacer mención de que los tiempos de observación fueron contemplados como tiempos adecuados para alcanzar los resultados deseados, es decir que las precisiones de las categorías sí tienen impacto para determinar estimaciones en relación con las variables distancia a la base y tiempo de observación. La clasificación y los resultados obtenidos para este objetivo demuestran lo eficiente que puede ser el geoposicionamiento estático bajo condiciones controladas y buenas prácticas en la colecta de datos GNSS, igualmente es importante agregar que los resultados de esta sección fueron un pilar importante que sirvió de fundamento para la justificación del resto de objetivos.

Se obtuvo una precisión horizontal mínima de 0.001 milímetros (mm) y máxima de 0.096 mm que demuestra la alta calidad de los datos colectados por los receptores GNSS de doble frecuencia. Es evidente que los datos finales

dieron resultados excelentes y de utilidad para casos que requieran de precisiones fiables y exigentes.

4.2. Clasificación de la precisión según hora de geoposicionamiento

La clasificación de los grados de precisión no cuenta con diferencias relevantes debido a que los resultados no exceden un centímetro. Los datos tienen una precisión que se considera excelente especialmente en el ámbito catastral en donde la calidad es fundamental. No se obtuvo precisiones malas que salieran del margen establecido, se clasificaron los grados de precisión según la hora del día en que fueron tomados puesto que se observaron comportamientos que contribuyen a la eficiencia de un geoposicionamiento. Se formaron 3 horarios del día para observar cómo se comportan los datos según el horario en que sea realizó el geoposicionamiento y conforme al criterio y experiencia de profesionales agrimensores.

Se aprecia en la tabla II que en el horario de 5:00 h a 9:00 h, los valores muestran diferencias mínimas donde el 75 % de las mediciones son de 0.009 o menor y el mayor valor es de 0.10; el promedio obtenido fue menor que en las otras dos categorías de horarios definidas previamente. En el rango 10:00 am a 15:00 pm, la desviación estándar es mucho mayor (0.014) con respecto a las otras dos categorías, además, la distancia entre el percentil 75 (0.012) es muy grande con respecto al valor máximo de 0.096.

El 75 % de las mediciones en el rango de 16:00 h a 20:00 h, se encuentra de 0.015 o menos y su mayor valor fue de 0.026. Las mejores precisiones se obtuvieron en el horario de 5:00 h a 9:00 h comparadas con los otros dos horarios. Se puede apreciar un valor extremo en el horario de 10:00 h a 15:00 h que procedió a ser eliminado, de igual manera es importante hacer mención

sobre las precisiones excelentes que se observan en el horario de 5:00 h a 9:00 h con respecto a los otros dos horarios que también tuvieron buenos resultados.

En la tabla II se observa que los valores de Sig. son mayores a 0.05; a excepción del rango de 10:00 h a 15:00 h, cuyo valor está muy próximo al umbral definido de 0.05 (0.046). Por lo tanto, se definió que la precisión horizontal se comporta aproximadamente normal en todas sus categorías y por ello, se utilizó la prueba de ANOVA paramétrico para definir si existen diferencias entre los promedios de la precisión horizontal. Para la precisión vertical, la situación es similar en el sentido que dicha variable, se comporta normal en las diferentes categorías con valores de Sig, por encima de 0.05.

La normalidad de las precisiones se valida ya que fueron aceptables en todos los horarios, pero es evidente que se obtuvieron mejores resultados en el horario matutino. Según la Tabla IV que contiene la prueba de homogeneidad según Levene, se evidencia que se cumple este supuesto, dado que los Sig. son mayores de 0.05 (0.072 y 0.112). Por otra parte, la precisión horizontal mostrada en el análisis de varianza según hora de geoposicionamiento dio similitud en los promedios, dado que el Sig. fue de 0.065. No obstante, se diferencian dos grupos a una confianza del 90 %, dado que el Sig, es menor de 0.10.

4.3. Establecimiento de un rango de distancia idóneo entre dos georreceptores que produzca resultados de precisión satisfactorios y en el menor tiempo posible

Se agrupó la distancia a cada kilómetro hasta cinco kilómetros, luego a cada 10 kilómetros hasta llegar a los 120 kilómetros; a mayor distancia, la agrupación se hizo más grande debido a la extensión de los datos que no es

tan voluminosa. En la figura 3 se observa claramente que desde los 30 kilómetros la curva empieza a comportarse de manera anormal y las distancias seguidas son más extensas como muestra la curva con cambios muy imparciales; las alteraciones dejan deducir que, a mayor distancia, más vulnerable se convierte el geoposicionamiento a las fuentes de error y por consiguiente para tratar esa causa, se debe dar más tiempo de observación.

La deficiente red geodésica nacional tiene un impacto grandemente negativo debido a que muchos de los monumentos ya no existen y a la mayoría no se les ha dado mantenimiento, específicamente calibración y ajuste, de manera que los usuarios utilizan bases a distancias muy extensas lo cual no es recomendable. Como resultado de lo anteriormente mencionado, en la mayoría de los casos, el producto no es el deseado debido a que no le dan el tiempo necesario de geoposicionamiento, además agregar más tiempo de geoposicionamiento también tiene efecto en el recurso tiempo eficiente de trabajo debido a que en la mayoría de los casos se colectan más de dos puntos en un día y estar más tiempo en campo, de cierta manera significa un gasto económico.

Los resultados muestran que las distancias tienen impacto en las precisiones y a menor distancia a la base, mejor será la precisión a obtener; por otro lado a mayor distancia, menor sería la precisión, por lo cual se establece que para obtener resultados satisfactorios, los receptores no deben estar a una distancia mayor a 30 km debido a las variaciones posteriores que se puede apreciar en la figura 3 y el tiempo de geoposicionamiento relativamente razonable de 20 a 40 min por observación y con referencia al rango de distancia mencionado y presentado en la tabla VIII.

Por lo contemplado anteriormente, para reducir errores de geoposicionamiento en distancias mayores a 30 km, es importante utilizar una estación auxiliar entre medio de los puntos debido a la extensión y asimismo con el propósito de reducir el tiempo de geoposicionamiento y aun así conseguir precisiones satisfactorias. Si se utilizan bases mayores a lo establecido anteriormente, se tendrá que proporcionar tiempos de geoposicionamiento mayores a 40 min, lo cual se considera una cantidad tiempo muy grande si el propósito de la medición es catastral o si hubiese muchos puntos que geoposicionar.

4.4. Determinación de tiempo óptimo de observación simultánea entre dos georreceptores que genere suficiente redundancia de observación

Para el tiempo de observación se hicieron rangos de 10, 20 y 40 minutos hasta 1,2 y 4 horas como se muestra en la tabla VIII; el concepto fue crear lapsos en los cuales fuera probable que los usuarios realicen su geoposicionamiento. Tal como en la distancia, para el tiempo también se hizo una agrupación amplia cuando existiera mayor tiempo de geoposicionamiento debido a los datos obtenidos y en relación con la probabilidad que los usuarios les den tanto tiempo a sus receptores, sin embargo, es importante considerar el propositito de la obtención de datos GNSS es variable para cada usuario.

El tiempo de observación depende de la distancia a la base que se encuentre el georreceptor, por tanto, se debe de considerar el tiempo necesario para corregir errores que pueden ocurrir durante el geoposicionamiento y producir un resultado aceptable. Si un georreceptor se encuentra a una distancia de 60 km y se le quiere dar un tiempo de geoposicionamiento de 15 min, es muy probable que la precisión pueda salir del margen deseado, de igual

manera de esto depende muchos factores del ambiente y ubicación. Para el caso mencionado, es mejor prevenir el riesgo y utilizar una base auxiliar entre medio y poder dar 10 min de geoposicionamiento con seguridad y tener certeza de la base auxiliar que ayudará al ajuste de los datos. Algunas personas consideran que es un mayor gasto de recurso poner una estación base auxiliar, pero más gasto de recurso sería tener que regresar y volver a tomar los puntos nuevamente, especialmente en casos en donde requiere geoposicionar una gran cantidad de puntos, por ende, se debe de considerar las buenas prácticas y poder ser eficiente en la colecta de datos.

Como se estableció anteriormente, para distancias mayores a 30 km, se debe de considerar utilizar una estación base auxiliar y poder mejorar precisiones y ahorrar tiempo de geoposicionamiento. Para las distancias menores a 30 km se deben de dar tiempo entre 10 y 40 min, este rango idóneo es variable debido a las circunstancias al momento de realizar el geoposicionamiento y de la calidad de la precisión que se requiere, por tanto, no necesariamente debe de ser 40 min si la persona encargada del geoposicionamiento considera que las condiciones son óptimas. Los rangos establecidos en la tabla IX se consideran idóneos para obtener buenos resultados de geoposicionamiento, siempre tomando en cuenta el propósito de la medición.

El tiempo de geoposicionamiento compensa la distancia a la base y es crucial dar el tiempo necesario para contrarrestar las fuentes de error que se muestran en la tabla XIV y que ocurren durante el geoposicionamiento. Conviene subrayar que la variable que influye más en la precisión horizontal es la distancia a la base, con respecto a la precisión vertical que estadísticamente demuestra que es la que más incide en la precisión horizontal, no se toma en cuenta su efecto para emitir discusión debido la precisión vertical no puede

explicar la precisión horizontal pues ambos son resultados de la misma condición, sin embargo, sí se menciona a lo largo del documento debido a que fue importante para la significación de los modelos estadísticos. Esto quiere decir, que la que altera la precisión horizontal es la distancia a la base y esta última incide en el tiempo de geoposicionamiento, por ende, la dependencia de las variables es una secuencia en cadena que se debe de considerar para comprender como funciona el geoposicionamiento y estimar la precisión. Es importante considerar que el tiempo también depende mucho de los factores ambientales y físicos del lugar en donde se realiza el geoposicionamiento debido a que incide y pueda que el tiempo de observación pueda variar, eso se deja a criterio y conocimiento del usuario.

4.5. Correlación de las variables tiempo y distancia en función de la precisión obtenida

Como se observa en la Tabla XII, la precisión horizontal, presenta correlación con todas las variables, es decir distancia y geoposicionamiento, siendo la mayor correlación estadística con la precisión vertical (0.903), la cual se excluye para por ser resultado de la misma condición, seguido por distancia en kilómetros (0.702) y la menor con geoposicionamiento (0.333), esto induce a considerar dichas variables distancia en kilómetros como primordial para calcular el tiempo de geoposicionamiento y así estimar la precisión horizontal. Como información de complemento, se aprecia que la precisión vertical muestra correlación con todas las demás variables, siendo la menor con geoposicionamiento (0.289) asimismo la distancia en kilómetros y el geoposicionamiento presentaron correlaciones entre sí, en todos los casos, los valores de Sig. fueron menores a 0.05.

En la tabla X, se aprecia que el procedimiento originó tres modelos, donde, apenas lógico, el tercer modelo (c) es el de mejores indicadores, el coeficiente de correlación fue de 0.958 considerado muy bueno, el coeficiente de determinación ajustado mejoró de manera importante hasta llegar a un valor de 0.913, lo que indica que el 91.3 % de los cambios que se presentan en la precisión horizontal son explicados por los cambios en las otras variables que quedan en el modelo, es decir: Precisión Vertical (por ser un resultado de geoposicionamiento), Distancia en kilómetros y Geoposicionamiento, la variable Dummy (hora de referencia) no quedó en el modelo. En los análisis siguientes no se consideró sino el resultado del tercer modelo que es el que tiene los mejores indicadores.

La tabla XI muestra el cumplimiento de la no colinealidad medida con los indicadores de tolerancia que debe ser menor a 0.10 y el factor de inflación de la varianza (VIF) que debe ser inferior a 10, requisitos que se cumplen y que son garantizados por el procedimiento utilizado de pasos sucesivos. En valor absoluto, el mayor coeficiente es precisión vertical (0.681) esa variable es la de mayor impacto, seguida de distancia en kilómetros (0.393) la de menos impacto fue geoposicionamiento (-0.106).

Como se apreció las variables presentadas en el modelo tienen valores de Sig, menores de 0.05 por lo tanto, son significativas. El modelo ha presentado indicadores buenos en términos de la correlación, el coeficiente de determinación, la no colinealidad, es importante, ahora, verificar los supuestos con respecto a los residuos (valor real-valor pronosticado).

En el gráfico de dispersión encontrado en la Figura 2 no se aprecia ninguna tendencia marcada hacia arriba o hacia abajo, tampoco se aprecian valores anormales, esto implica que se comprueba la homogeneidad en el

modelo y la no correlación entre los residuos. Por último, se realizó la prueba de normalidad para los residuos estandarizados concluyendo que el valor de Sig. fue de 0.20 indicando que los residuos se comportan normales y verificando lo ya descrito en el histograma.

Lo anterior, permite concluir que el modelo cumple con los supuestos, y por ende es confiable para dar credibilidad a los resultados ya analizados.

CONCLUSIONES

1. Las precisiones finales obtenidas a partir del geoposicionamiento GNSS estático alcanzaron rangos submétricos de precisión horizontal siendo la menor de obtenida de 0.003 mm y máxima de 0.026 mm. Los rangos de distancia a la base fueron de cuatro kilómetros hasta 120 kilómetros con tiempos mínimos de 10 minutos hasta 120 minutos. Dichos tiempos fueron basados según la distancia a la base y su impacto en la precisión final. Así mismo, dichos resultados dependen de la distancia a la base y la influencia de los factores físicos-ambientales del lugar en donde se realiza el geoposicionamiento.
2. La distancia entre los receptores establece que, a mayor distancia, menor es la capacidad de resolver los errores en la posición calculada. Se concluye que el rango idóneo para que dos receptores puedan producir resultados satisfactorios es de uno a 30 kilómetros sin utilizar una base auxiliar. Si la base se encuentra a más de 30 kilómetros se debe de utilizar una estación base auxiliar intermedia con la finalidad de reducir las probabilidades de error en geoposicionamiento y el tiempo de observación en los puntos a menores periodos, lo cual agiliza el proceso de geoposicionamiento. Es importante hacer mención que el tiempo de geoposicionamiento juega un papel importante debido a que el tiempo de geoposicionamiento depende de la distancia a la base.
3. Se establece que para generar redundancia de los datos colectados y poder crear un promedio confiable, los receptores deben de tener un tiempo mínimo de observación no menor a 10 minutos utilizando el

método de geoposicionamiento GNSS estático. El tiempo óptimo debe ser calculado según la distancia a la base que se encuentra el receptor por lo que se determina que para líneas base entre uno a 20 kilómetros el tiempo de observación debe ser de 10 a 20 minutos, para líneas base entre 30 a 40 kilómetros el tiempo de observación debe ser de 20 a 40 minutos y para líneas base entre 40 y 90 minutos el tiempo de observación debe ser de 40 y 90 minutos.

4. La correlación de Spearman mostró la dependencia entre las variables analizadas de tal manera que se concluye que la variable que estadísticamente incide en la precisión horizontal es la distancia en kilómetros con un coeficiente de correlación de 0.702 al 99 % y seguido del tiempo de geoposicionamiento con un coeficiente de correlación de 0.333 al 95 %, esto demostró que el modelo estadístico e hipótesis es significativo. Dicho lo anterior, la variable que mayormente incide en la precisión horizontal es la distancia a la base, seguido por el tiempo de geoposicionamiento.

5. Las fuentes de error que disminuyen la precisión en un levantamiento estático son: la reflectancia atmosférica, órbita, temperatura, contenido de las partículas de agua en la tropósfera y la densidad de electrones en la ionósfera, que depende de la cantidad de radiación ultravioleta provocada por el sol. Se concluye que el error que mayor influencia tiene sobre la precisión horizontal es el error de ionósfera con una incidencia de 5 metros en GPS estándar y 0.4 metros en GPS diferencial.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda que los técnicos usuarios y colectores de datos GNSS, tengan presente la precisión que desean obtener mediante el posicionamiento estático debido a que facilitará la toma de decisiones en relación con el uso de estaciones base y tiempos de geoposicionamiento. Asimismo, es importante tomar en cuenta los tipos de receptores que se utilicen para realizar la colecta de datos y tener presente el alcance de los dispositivos.
2. En distancias mayores a los 30 kilómetros se recomienda considerar la utilización de estaciones intermedias debido a la extensión que produce menos posibilidades para que el programa de postproceso sea capaz de modelar el error obtenido de todas las variables. Es importante que se tome en cuenta la Red de Apoyo Catastral activa u otros servicios que transmitan datos de corrección diferencial para que la planificación del levantamiento tenga más posibilidades de alcanzar la calidad deseada.
3. Tomar en cuenta los tiempos ideales de observación simultanea para que el programa de postproceso pueda realizar mejores correcciones a los datos colectados y mayor sea la fiabilidad de estos. Las características de los dispositivos dan a conocer el alcance y los requerimientos para obtener suficiente redundancia de observaciones y poder efectuar un control y ajuste de datos confiable.

4. La distancia a la base es la variable que más influye en el tiempo de geoposicionamiento y a consecuencia en la precisión final, de tal manera que la distancia a la base se debe de tomar como principio para calcular el tiempo de geoposicionamiento y estimar el grado de precisión alcanzable. Para realizar cualquier tipo de geoposicionamiento GNSS se debe tomar en cuenta la distancia entre la base que será utilizada para realizar la corrección y el rover que estará en movimiento constante, eso dará a conocer los tiempos mínimos y necesarios para que los dispositivos puedan tener una solución estable al momento de tomar un punto.

5. Para prevenir las fuentes de error se recomienda utilizar herramientas de planificación GNSS para realizar planificación previa y conocer los aspectos físicos-temporales que aporten a realizar procedimientos técnicos eficientes en relación con el tiempo de ejecución que incide en el aspecto económico. Como consecuencia de la buena planificación, se disminuye el riesgo de coleccionar resultados erróneos y como resultado, se hace buen uso del recurso tiempo que de igual manera tendrá beneficios económicos.

REFERENCIAS

1. Ayala Méndez, A. B. (2015). *Efectos colaterales de la ejecución del Catastro y la legalización de Tierras del Proyecto Mopán, Petén* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos Guatemala, Guatemala. Recuperado de: <http://postgrado.fausac.gt/wp-content/uploads/2016/09/Alan-BorisAyala-M%C3%A9ndez.pdf>
2. Ayala Ramírez, A. y Hasbun, M. M. (2012). *Aplicaciones y uso de la Tecnología de GPS Diferencial de Doble Frecuencia con precisión centimétrica en el área de levantamiento y replanteo topográfico georeferenciado* (Tesis doctoral). Universidad de El Salvador, El Salvador. Recuperado de: http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/1762/1/TESIS_DE_GPS_DIFERENCIAL_EN_PDF.pdf
3. Baide, M. R. (2015). Aplicación de tecnologías de información geográfica en el análisis socio espacial. *Ciencias Espaciales*, 8(2), p. 211-224. Recuperado de: <https://www.camjol.info/index.php/CE/article/view/2078>
4. Beltrán, A. F. (2017). *Propuesta metodológica para el mejoramiento de datos con sistemas navegacion por satelite (GNSS); aplicando Sistemas de Información Geográfica (SIG). Caso de estudio Departamento de Caldas. Bogotá, Colombia* (Tesis de grado). Universidad Distrital Francisco José de Caldas Bogotá. Recuperado de:

https://ciaf.igac.gov.co/sites/ciaf.igac.gov.co/files/files_ciaf/Beltran-Zamudio-Andr%C3%A9s-Felipe.pdf

5. Berné, J. L., Garrido, N. y Capilla, R. (2019). *GNSS: GPS, GALILEO, GLONASS, BEIDOU. Fundamentos y metodos de posicionamiento*. Valencia, España: Colección Académica. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/handle/10251/118522>
6. Berrocoso, M., Ramírez, M., Pérez-Peña, A., Enriquez-Salanca, J., Fernández-Ros, A., y Torrecillas C. (2004). *El Sistema de Posicionamiento Global*. Cádiz, España: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/326265544_El_Sistema_de_Posicionamiento_Global
7. Bianchi, C. (2016). *Determinación del Vapor de Agua con Información Geodésica e implemntación en el Análisis Climatológico. Aplicaciones en Geodesia y Meteorología* (Tesis doctoral). Universidad de la Plata, Argentina. Recuperado de: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/56464>
8. Branthomme, A., Altrell, D., Kamelarczyk, K., y Saket, M., (FAO) (2009). *Monitoreo y Evaluacion de los Recursos Forestales Nacionales: manual para la recoleccion integrada de datos de campo', Monitoreo y Evaluacion de los Recursos Forestales Nacionales*. Documento de Trabajo. Roma: FAO, (FAO esp).
9. Calderón, E. E., Álvarez, E. A. y Apxuac, J. R. (2011). *Utilización de los Sistemas de Información Geográfico (SIG) para la propuesta de*

manejo de los recursos naturales renovables de la parcialidad Chipuac del Municipio de Totonicapán (Trabajo de graduación). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0213_MT.pdf

10. Camargo, S. (2011). *Estudio y Diseño de Metodología con Técnicas GPS para la actualización de la Cartografía Catastral del Municipio Palavecino (Venezuela)* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, España. Recuperado de: <https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFicheroTesis.do?idFichero=IMum5Ym5QK8%3D>
11. Capmartin, M. (2009). *Análisis y desarrollo de un modelo de negocio con aplicación de Ingeniería Industrial para hacer rentable y operativa la empresa Uclasificados Ltda* (Tesis de grado). Universidad Javeriana, Colombia. Recuperado de: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7236/Tesis225.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
12. Caro, Á. (2012). *Modelización Geoestadística para la predicción de actividad de Cs en suelo* (Tesis doctoral). Universidad Autónoma de Madrid, España. recuperado de: <https://repositorio.uam.es/handle/10486/12304>
13. Castillejo, A. M. (2008). *Teoría geoestadística aplicada al análisis de la variabilidad espacial arqueológica intra-site* (Tesis doctoral). Universidad Autónoma de Barcelona, España. Recuperado de:

<https://www.tdx.cat/handle/10803/5526;jsessionid=7E65F31F96A21B9D5D8E851A297A861C#page=1>

14. Chihuan, R. A. (2002). *Propuesta de una metodología para el levantamiento catastral de predios rurales mediante el uso del GPS en la selva*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Ingeniería Perú, Perú. Recuperado de: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_5a03bcbc36f6560da27ef870306d6c45
15. Chocoj, C. M. (2017). *Proceso de levantamiento catastral en el municipio de San Juan Chamelco, Alta Verapaz, Consecuencia jurídica de su implementación* (Tesis de grado). Universidad Rafael Landívar, Guatemala. Recuperado de: <http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesisjrkd/2017/07/01/Chocoj-Claudia.pdf>
16. Comisión de Cartografía de Andalucía (2011). *Observación y procesamiento GNSS*. Andalucía: Autor.
17. Dávila, A. K. (2017). *Levantamiento y actualización de predios rurales e integración en un sistema de información geográfica en el Cantón Patate, provincia de Tugurahua en la República del Ecuador* (Tesis). Universidad Nacional de Cajamarca, Ecuador. Recuperado de: <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/1717>
18. Dirección General de Cartografía (1957). *Memoria de la Dirección General de Cartografía*. Ciudad de Guatemala: Autor.

19. Divas, J. M. (2012). *Desarrollo de una metodología de evaluación de las redes de apoyo catastral georeferenciadas por medio de la tecnología de medición satelital* (Tesis de grado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3422_C.pdf
20. Femenia-Ribera, C., Mora-Navarro, G., Coll, E., y Martínez-Llario J. (Junio, 2010). *Trabajos de investigación aplicados a catastro y registro de la propiedad, in Catastro, formación, investigación y empresa. I Congreso Internacional sobre catastro unificado y multipropósito*. Jaén, España.
21. Gasga, J. E. (2008) *Cálculo y ajustes aplicados a la solución de problemas topográficos* (Tesis de grado). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de: http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/7796/Tesis_Completa.pdf?sequence=1
22. Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford, Reino Unido: Oxford University Press on Demand.
23. Granados, J. M. (2010). *Estudio sobre uso y aplicación de sistemas de información geográfica en la universidad de San Carlos de Guatemala, Sede central*. (Tesis de grado) Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
24. Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. y Collins, J. (2001). *GPS Theory y Practice*. Viena: Springer-Verlag Wien GmbH. doi: 10.1007/978-3-7091-6199-9.

25. Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. y Wasle, E. (2007). *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Viena: Springer Science & Business Media. Recuperado de: <https://www.springer.com/gp/book/9783211730126>
26. Lamprea, F. A. (2017). *Zonificación de las coberturas de la tierra mediante la aplicación de herramientas SIG para revisión y ajuste de P.O.T en el marco del crecimiento urbano y la corbunación norte: Caso Municipio de Zipaquirá* (Tesis de grado). Universidad Distal Francisco José de Caldas, Colombia. Recuperado de: https://ciaf.igac.gov.co/sites/ciaf.igac.gov.co/files/files_ciaf/Lamprea-Avellanea-Ferdy.pdf
27. Mackaness, W. A. (Marzo, 2006). *Automated Cartography in a Bush of Ghosts*. *Cartography and Geographic Information Science*, 33(4), p.245-256. Recuperado de: doi: 10.1559/152304006779500678.
28. Mactzul, A. E. V. (2018). *Análisis comparativo de levantamiento altimétricos por GPS, estación total y método de nivelación diferencial* (Tesis doctoral). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/10029/>
29. Manuel, A. E. (2012). *GNSS: descripción, análisis y comparación con los sistemas de navegación por satélites* (Tesis de grado). Universidad Nacional de Córdoba, España.

30. Martín, C. (2007). *Propuesta de un modelo conceptual para la representación de la multigranularidad espacio-temporal en bases de datos multidimensionales* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica Madrid, España. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/49911834_Propuesta_de_un_modelo_conceptual_para_la_representacion_de_la_multigranularidad_espacio_temporal_en_bases_de_datos_multidimensionales
31. Mendoza, V. F. (2010). *Levantamientos Geodesicos en el G.D.F* (Tesis de grado). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/1333/1/Tesis.pdf>.
32. Molina, M. A. (Junio, 2010). *Catastro: formación, investigación y empresa : selección de ponencias*. I Congreso Internacional sobre Catastro Unificado Multipropósito. Congreso llevado a cabo en Jaén, España.
33. Morales Cansino, R. F. (2015). *Análisis de la normativa legal en materia de Agrimensura desde el punto de vista técnico y jurídico* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de: <http://postgrado.fausac.gt/wp-content/uploads/2016/09/Ram%C3%B3n-Francisco-Morales-Cansino.pdf>
34. Morales, E. (2011). *Análisis Histórico de las Transformaciones Experimentadas por las Representaciones Cartográficas en*

Guatemala Periodo 1529-2009 (Tesis de grado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01_2927.pdf

35. Moreno, B. I. (2015). *Introducción a la determinación de la tasa de subsidencia y deformación horizontal en la zona oriente del Distrito Federal haciendo uso del Sistema de Posicionamiento Global* (Tesis de grado). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de: https://repositorio.unam.mx/contenidos/introduccion-a-la-determinacion-de-la-tasa-de-subsidencia-y-deformacion-horizontal-en-la-zona-oriente-del-distrito-fed-236067?c=EkxWmx&d=false&q=*.*&i=19&v=1&t=search_0&as=0
36. Nájera, L. E. (2014). *Especificaciones Técnicas para estudios Topográficos en Guatemala* (Tesis de grado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3807_C.pdf
37. NovAtel Inc. (2015). *An Introduction to GNSS (2)*. Alberta: Autor. Recuperado de: <https://es.calameo.com/read/00191579602f9b13b088e?authid=9leJ1niQkK75>.
38. Peña, X. A. (2012). *Sistema de Información Geográfica aplicado al Catastro Predial del Cantón Paute, Ecuador* (Tesis de maestría). Universidad San Francisco de Quito, Ecuador. Recuperado de: <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/2011>

39. Pinzon, J. A. (2008). *El catastro como instrumento para el análisis y la planificación del territorio*. (Tesis doctoral). Universitat de Barcelona, España. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=178418>
40. Plag, H., Rothacher, M., Pearlman, M, Neilan, R., y Ma, C. (2009). *The global geodetic observing system*. *Advances in Geosciences*, 13, p. 105–127. Recuperado de <file:///C:/Users/DELL/AppData/Local/Temp/MicrosoftEdgeDownloads/47362ffe-3c20-42d6-af87-8b528e276a12/PLANTILLA%20ESCUELA%20DE%20POSTGRADO,%20definitiva.pdf>
41. Posadas, Á., Kester, J., Canales, M., García, E., y Ochaeta H. (2012) *Análisis comparativo entre un levantamiento catastral en el área rural por el método directo e indirecto* (Trabajo de graduación). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0225_MT.pdf
42. Puga, G. L. (2015) *Adquisición y seguimiento en tiempo real para receptores GNSS multiantena* (Tesis de doctorado). Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
43. Quiñónez, A. R. G. (Noviembre, 2018). *Determinación de la precisión de las medidas obtenidas por medio de GPS de doble frecuencia y post-procesadas por servicios en línea como una opción a la red de apoyo catastral*. *Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado* (1) p. 52-55.

44. Real Academia Española (2013) *catastro* | Diccionario de la lengua española (23^a edición). Madrid: ASALE. Recuperado en: <https://dle.rae.es/?w=catastro>
45. Reyes, J. L. (2017) *Adecuación y publicación de insumos para mantenimiento catastral de levantamientos a demanda realizados entre los años 2011 y 2016 por la sub-dirección de Geomática del Instituto de la Propiedad de Honduras* (Tesis de licenciatura). Universidad Distal Francisco José de Caldas, Colombia.
46. Robertson, G. P. (Agosto, 1987) *Geostatistics in Ecology: Interpolating With Known Variance*, *Ecology*, 68(3), p. 744-748. doi: 10.2307/1938482.
47. Salazar, S. E. (2009) *Guía Práctica para el uso del Receptor GPS de Monofrecuencia L1* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala.
48. Samper, F. J. y Carrera, J. (1990) *Geoestadística. Aplicaciones a la Hidrología Subterránea*. Barcelona, España: CIMNE.
49. Saquimux, J. P. (2008) *La importancia del Registro de Información Catastral Decreto Numero 41-2005 y su coordinación con el Registro General de la Propiedad como garantes de los derechos de propiedad* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala.

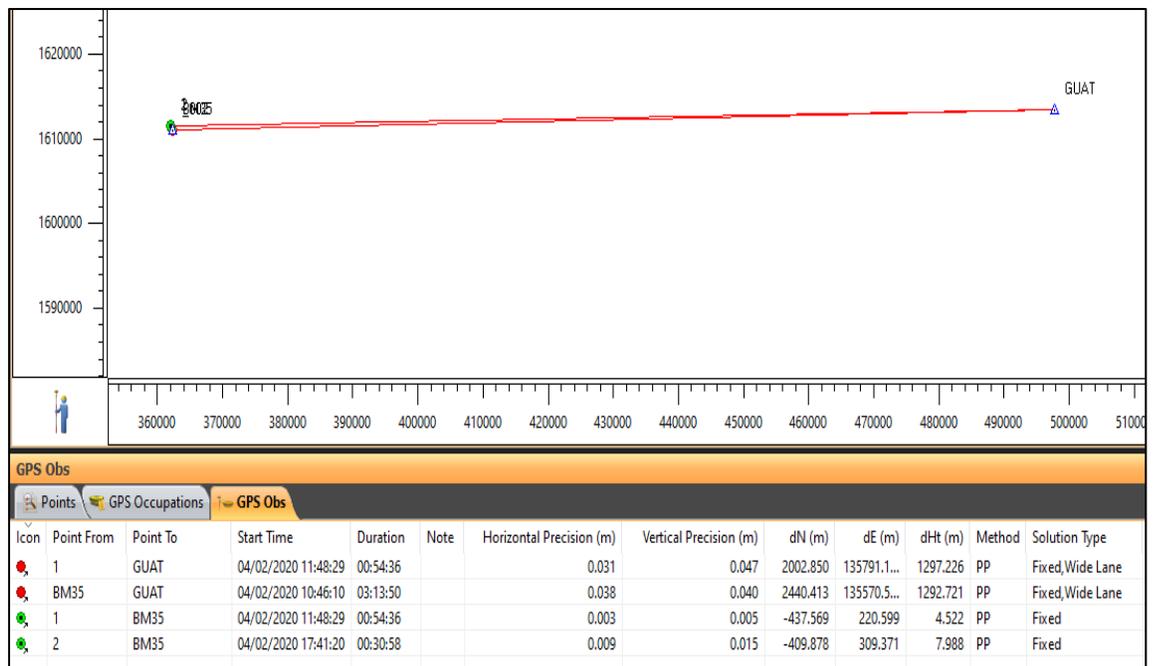
50. Seeber, G. (Mayo, 2008) *Satellite geodesy: foundations, methods, y applications 2nd edn*. New York, Estados Unidos: Walter de gruyter. Recuperado de: <https://www.degruyter.com/view/title/12128>
51. Sevilla, M. J. (Abril, 2012). *Introducción histórica a la Geodesia*. *G.I.E Pensamieto Matemático*, 2, p.4-63. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/253045493_Introduccion_Historica_a_la_Geodesia
52. Sickle, J. Van (2015). *GPS for Land Surveyors*. 4th Edition. Londres, Reino Unido: CRC Press. Recuperado de: doi: <https://doi.org/10.1201/b18480>.
53. Solanas-Jiménez, J. (Enero, 2018). *Tratamiento de cartografía histórica para el análisis de la forma urbana en sistemas de información geográfica*. *Revista de bibliografía de geografía y ciencias sociales*, XXIII(1.225), p.1-15. Recuperado de: <http://www.ub.edu/geocrit/b3w-1225.pdf>
54. Tamayo Pérez, L. M. O. (Mayo, 2015). *La Comisión Mexicana de Limites y definición de la frontera sur del país*. *Revista de Goografía Norte Grande* 60, p.115–134. Recuperado de: doi: 10.4067/S0718-34022015000100007.
55. Tapia-Silva, F. O. (Junio, 2014). *Avances en geomática para la resolución de la problemática del agua en México*. *Tecnología y ciencias del agua* 5(2), p.131-148. Recuperado de

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222014000200009

56. Valdés, E. (2006). *Administración de una oficina de catastro para municipalidades* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1683_IN.pdf
57. Vicente, H. C. (2014). *El presupuesto de capital como herramienta de evaluación de la inversión en equipo topográfico para una empresa de topografía y planificación de proyectos* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/1148/>
58. Villa, A. (2006). *Método para actualizar los valores catastrales habitacionales de la zona urbana en la ciudad de Oaxaca* (Tesis de maestría). Instituto Tecnológico de la Constitución, Oaxaca. Recuperado de https://infonavit.janium.net/janium/TESIS/Maestria/Villa_Martinez_Arturo_45487.pdf
59. Zubrow, E. B. y Harbaugh, J. W. (1978). *Archaeological prospecting: kriging and simulation: Simulation studies in archaeology*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press

APÉNDICES

Apéndice 1. Captura de pantalla del software Magnet Tools mostrando un resultado característico de postproceso GNSS



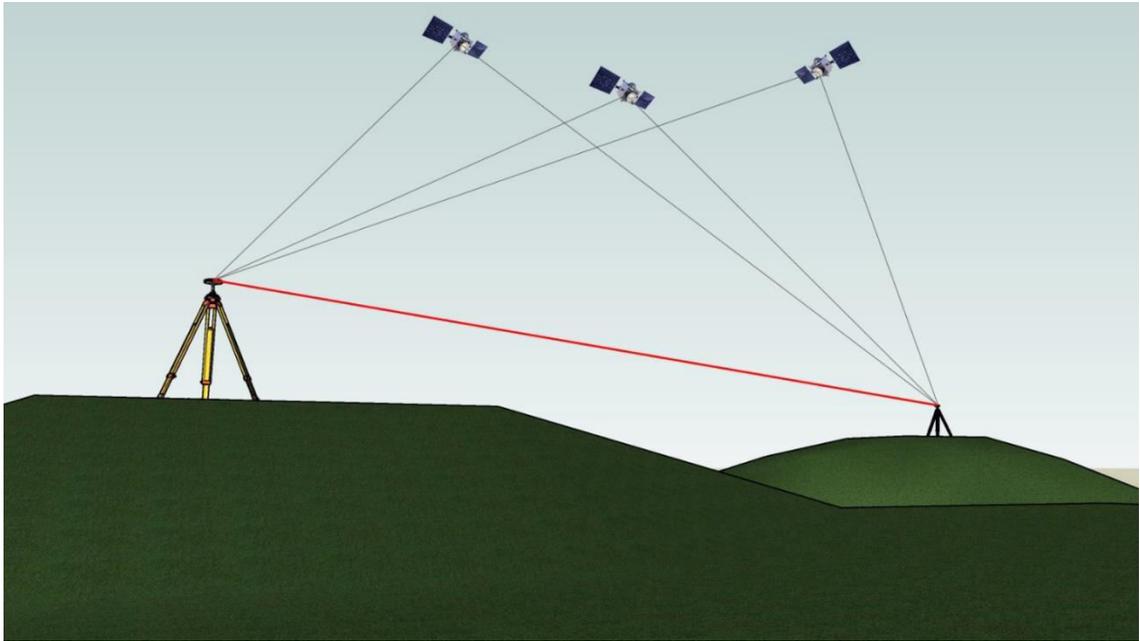
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Ubicación de puntos muestreados



Fuente: elaboración propia, utilizando QGIS con datos de: NASA (2020). *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)* y batimetría de Natural Earth (2020).

Apéndice 3. Línea base entre dos georreceptores (línea roja) que observan los mismos satélites durante una sesión de geoposicionamiento estático



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Casos especiales de procesamiento

Procesamiento	Solución
IonoFree	Tras la resolución de la ambigüedad de un número entero para una observación GPS con mediciones de doble frecuencia, se crearán combinaciones libres de iones y se eliminará el error ionosférico.
Wide Lane	La solución se calcula utilizando mediciones de doble frecuencia (código GPS/GLONASS L1/L2 y mediciones de la fase portadora) para una longitud de observación GPS que caiga en el intervalo de 30 km a 1500 km. En las primeras etapas del procesamiento de las mediciones de doble frecuencia, la resolución de la ambigüedad de los enteros para los observables L1 y L2 se realiza con la ayuda de la combinación L1-L2
VLBL	La solución se calcula utilizando mediciones de doble frecuencia (código GPS/GLONASS L1/L2 y mediciones de la fase portadora) para líneas de base muy largas utilizando diferencias triples (sin resolución de ambigüedad).

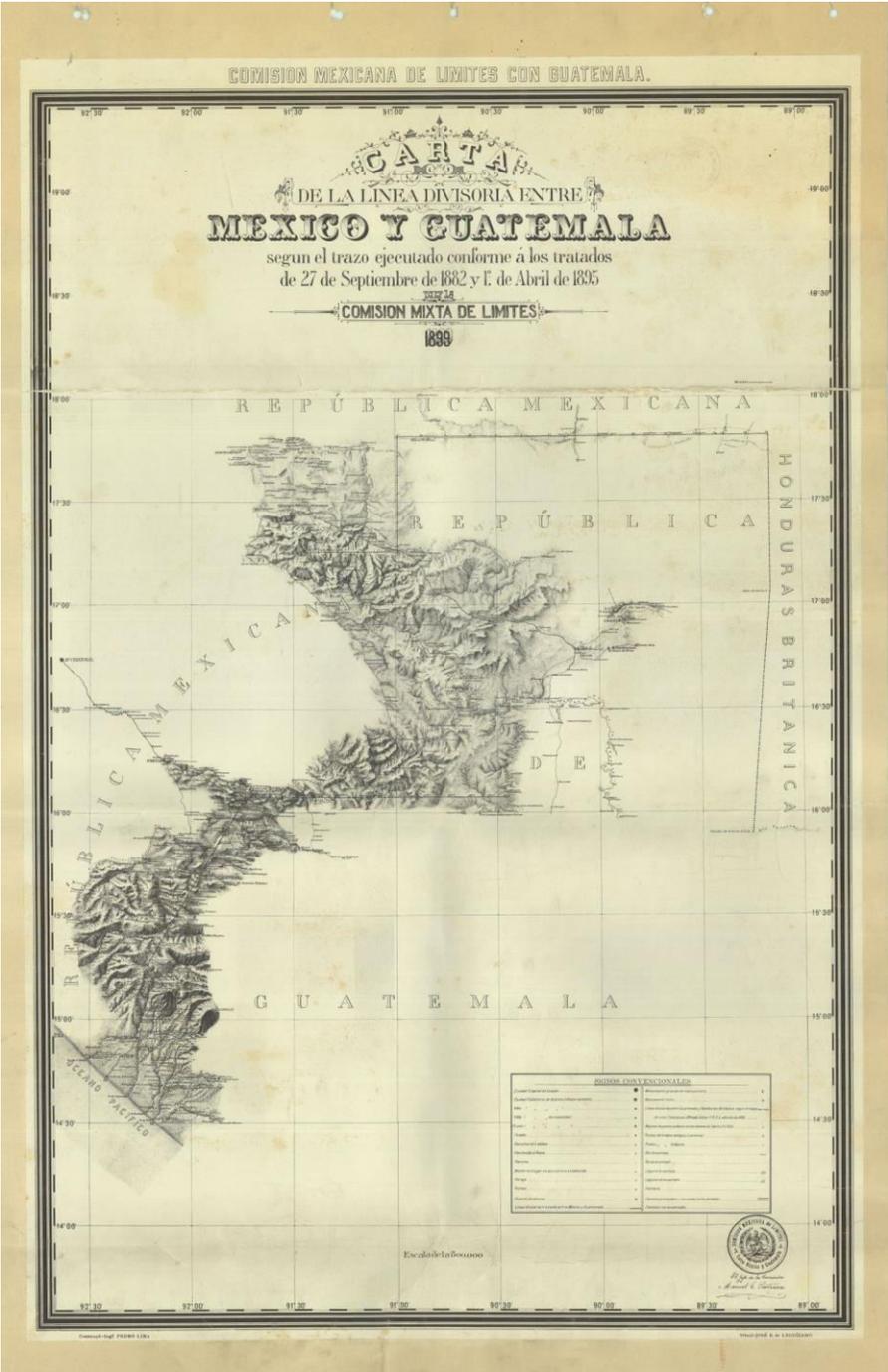
Fuente: Topcon Positioning Systems, Inc, 2015. *Magnet tools help manual*. Consultado el 22 de julio de 2020. Recuperado de www.protsurv.com/na/wp-content/uploads/2018/11/magnet-tools-v300-help-manual-en.pdf.

Anexo 2. Tipos de solución para observaciones GNSS

Campo	Descripción
Fijo	La solución se calcula utilizando mediciones de doble frecuencia (código GPS/GLONASS L1/L2 y mediciones de la fase portadora) para que la longitud de observación del GPS sea inferior a 10 km. Los observables L1 y L2 serán tratados por el motor como conjuntos de datos independientes. Todas las ambigüedades se han fijado en números enteros.
Flotante	La solución se calcula utilizando mediciones de doble frecuencia (código GPS/GLONASS L1/L2 y mediciones de la fase portadora) para una longitud de observación GPS inferior a 10 km. Los observables L1 y L2 serán tratados por el motor como conjuntos de datos independientes. Todas las ambigüedades son números de flotador.
Código Diferencial	La solución se calcula usando sólo las mediciones del código GPS/GLONASS de L1/L2.
Fallido, no hay efemérides	a observación GPS no se procesa; el archivo de navegación correspondiente está ausente,
Fallido, no hay satélite	La observación GPS no se procesa; los datos de los satélites están ausentes.

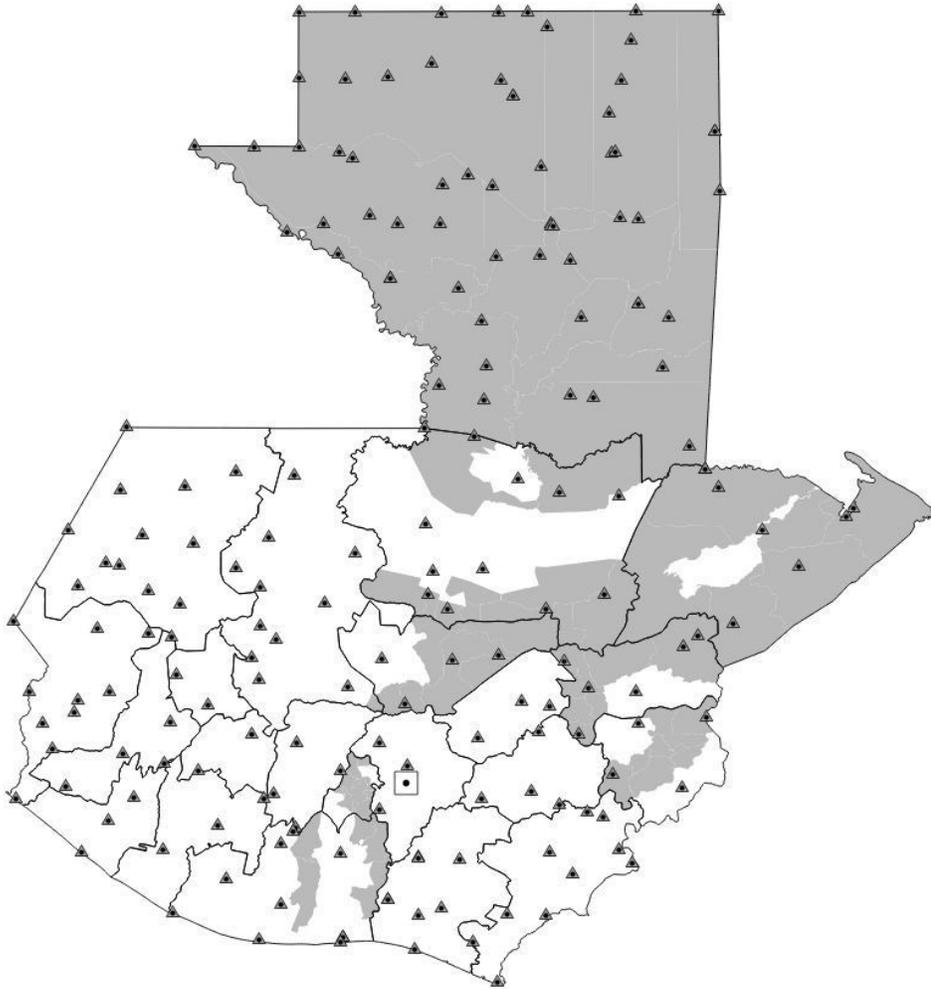
Fuente: Topcon Positioning Systems, Inc, 2015. *Magnet tools help manual*. Consultado el 22 de julio de 2020. Recuperado de www.protsurv.com/na/wp-content/uploads/2018/11/magnet-tools-v300-help-manual-en.pdf.

Anexo 3. Carta de línea divisoria entre México y Guatemala



Fuente: Comisión mixta de límites (1899). *Carta de línea divisoria entre México y Guatemala*

Anexo 4. Distribución de la red geodésica de primer orden en Guatemala y municipios catastrados



Fuente: Instituto Geográfico Nacional (s.f.). *Distribución de la red geodésica de primer orden en Guatemala y municipios catastrados.*