



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

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

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO
AMBIENTE**

**TEMA: DESARROLLO DE UN SISTEMA DE PROYECCIÓN
CARTOGRÁFICA LOCAL, EN EL ECUADOR CONTINENTAL,
ORIENTADO A LA GENERACIÓN DE CARTOGRAFÍA A
ESCALAS GRANDES**

AUTOR: PORTILLA BRAVO, OSCAR ANDRÉS

DIRECTOR: MSC. LEIVA GONZÁLEZ, CÉSAR ALBERTO

SANGOLQUÍ

2018



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “*DESARROLLO DE UN SISTEMA DE PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA LOCAL, EN EL ECUADOR CONTINENTAL, ORIENTADO A LA GENERACIÓN DE CARTOGRAFÍA A ESCALAS GRANDES*” fue realizado por el señor *Portilla Bravo, Oscar Andrés* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 31 de enero de 2018

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'César Alberto Leiva González', is written over a horizontal dotted line.

Ing. Leiva González, César Alberto. MSc

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Portilla Bravo, Oscar Andrés*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: ***“DESARROLLO DE UN SISTEMA DE PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA LOCAL, EN EL ECUADOR CONTINENTAL, ORIENTADO A LA GENERACIÓN DE CARTOGRAFÍA A ESCALAS GRANDES”*** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

A handwritten signature in blue ink, which appears to be 'OSCAR PORTILLA', is written over a light blue rectangular background. The signature is stylized and somewhat abstract.

Sangolquí, 31 de enero de 2018

.....
Portilla Bravo, Oscar Andrés



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORIZACIÓN

*Yo, Portilla Bravo, Oscar Andrés autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA LOCAL, EN EL ECUADOR CONTINENTAL, ORIENTADO A LA GENERACIÓN DE CARTOGRAFÍA A ESCALAS GRANDES**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.*

Sangolquí, 31 de enero de 2018

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'OSCAR PORTILLA', is written over a light blue circular stamp. The signature is somewhat stylized and overlaps the stamp.

.....
Portilla Bravo, Oscar Andrés

DEDICATORIA

A mis padres, quienes me han dado su apoyo incondicional en los momentos difíciles, donde la angustia era más que las ganas de salir adelante, ellos con mucho amor y paciencia han sabido orientarme por el camino de la vida, para cumplir con las metas que me he trazado. A ustedes les debo todo lo que soy, a pesar de todas las diferencias que hemos tenido, hoy les puedo dar la razón en cada una de las lecciones que me han dado y espero me puedan seguir dando.

A mis abuelitos, personas que con una sonrisa me incentivan a seguir adelante, gracias a sus sabios consejos hoy estoy donde estoy, ustedes han sido mi fortaleza para desarrollarme como ser humano, estudiante y próximamente como profesional. El poder contar con su presencia en todas las etapas que he vivido hasta ahora y poder compartir con ustedes mis triunfos y fracasos, es un gran privilegio que me ha otorgado Dios.

A mi hermano le dedico este paso, porque me ha ayudado en momentos de suma dificultad emocional, a pesar de su forma de ser, siempre ha estado para mí y ha sabido llegar a mí con su forma peculiar de ser.

A todos y cada uno de mis familiares, que han demostrado su apoyo y preocupación, con un abrazo, una frase de motivación, un momento de conversa o tan solo con su presencia.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por cada una de las bendiciones que ha derramado sobre mí, por la salud, por la dicha de encontrarme con seres humanos muy valiosos, por la familia que me ha visto crecer y por la oportunidad de estudiar en esta gran universidad.

Gracias a mis padres, abuelos, hermano y familiares, quienes nunca me negaron una frase de aliento o un abrazo, quienes han compartido triunfos y derrotas, quienes me han brindado y espero me sigan brindando por muchos años más su apoyo y cariño incondicional.

Gracias a mi director, el MSC. Cesar Leiva quien depositó su confianza en mí para desarrollar una de sus ideas de investigación. Al Ing. Izar Sinde, quien siempre se mostró dispuesto a brindarme su ayuda. Gracias a ustedes he dado un paso más en mi vida, los estimo mucho ya que no solo me han brindado la oportunidad de compartir conocimientos, sino momentos en la cancha y son ejemplo a seguir como profesionales y docentes.

Agradezco al Instituto Geográfico Militar por facilitarme la información para desarrollar el presente proyecto de investigación y abrirme sus puertas cada vez que se presentara una duda para desarrollar la investigación.

Finalmente agradezco a mis amigos, personas que me han acompañado en los mejores y peores momentos, les agradezco por su paciencia y consejos, por cada uno de los minutos que me han permitido formar parte de sus vidas y por ser parte importante de la mía: Andrés, Alex, Omar, Raque. A Dani quien supo darme la fuerza en los momentos difíciles y confió en mí a pesar de todo. Y a Vivi, quien con mucha paciencia ha sabido guiarme en el trajín de la vida.

ÍNDICE

| | |
|---|----------|
| CERTIFICACIÓN | ii |
| AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD | iii |
| AUTORIZACIÓN | iv |
| DEDICATORIA | v |
| AGRADECIMIENTOS | vi |
| ÍNDICE..... | vii |
| ÍNDICE DE TABLAS | x |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | xi |
| ACRÓNIMOS Y SIGLAS..... | xiii |
| RESUMEN..... | xiv |
| ABSTRACT..... | xv |
| | |
| CAPÍTULO I: PROBLEMA..... | 1 |
| 1.1 Antecedentes | 1 |
| 1.2 Formulación del Problema | 2 |
| 1.3 Justificación..... | 3 |
| 1.4 Importancia..... | 4 |
| 1.5 Objetivos | 5 |
| 1.5.1 Objetivo General | 5 |
| 1.5.2 Objetivos Específicos..... | 5 |
| 1.6 Metas | 6 |
| | |
| CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO..... | 8 |
| 2.1 Fundamentación Teórica | 8 |
| 2.1.1 Cartografía..... | 8 |
| 2.1.2 Geodesia..... | 19 |
| 2.1.2.2 Tipos de Alturas | 21 |
| 2.1.3 Sistemas de Información Geográfica | 29 |
| 2.1.4 Topografía..... | 29 |
| 2.1.5 Teledetección | 31 |
| 2.1.6 Tipos de distancias | 33 |

| | | |
|--|---|-----------|
| 2.1.7 | Reducción de observables | 34 |
| 2.2 | Fundamentación Legal | 39 |
| 2.3 | Hipótesis | 40 |
| CAPÍTULO III: METODOLOGÍA | | 41 |
| 3.1 | Validez y confiabilidad de los datos..... | 42 |
| 3.1.1 | <i>Shapefile</i> de las zonas del Sistema de Proyección UTM | 42 |
| 3.1.2 | <i>Shapefile</i> de las zonas urbanas del Ecuador continental | 42 |
| 3.1.3 | <i>Shapefile</i> de límite político-administrativo a nivel cantonal..... | 43 |
| 3.1.4 | Modelo Digital de Elevación | 44 |
| 3.2 | Análisis del comportamiento de los factores..... | 48 |
| 3.2.1 | Afectación de cifras decimales de los factores | 48 |
| 3.2.2 | Afectación del radio de medio terrestre | 49 |
| 3.2.3 | Afectación del tipo de coordenada en el cálculo del factor de escala.. | 51 |
| 3.2.4 | Afectación de la precisión de las alturas y la coordenada ESTE..... | 52 |
| 3.3 | Análisis de las deformaciones que presenta la proyección UTM..... | 53 |
| 3.3.2 | Cálculo de las coordenadas UTM | 54 |
| 3.3.3 | Cálculo de los factores y la deformación | 54 |
| 3.3.4 | Modelo de deformaciones | 54 |
| 3.3.5 | Modelo de cumplimiento de la precisión planimétrica | 55 |
| 3.4 | Zonificación del Sistema de Proyección Cartográfica Local | 58 |
| 3.4.1 | Clasificación por alturas..... | 59 |
| 3.4.2 | Campo de proyección de las zonas | 60 |
| 3.4.2.1 | Campo de proyección a nivel provincial..... | 60 |
| 3.4.2.2 | Campo de proyección a nivel cantonal | 62 |
| 3.5 | Propuestas de la zonificación en función de las distintas alturas medias.... | 64 |
| 3.5.1 | Propuesta a nivel provincial tomando en cuenta la altura media de toda la provincia..... | 64 |
| 3.5.2 | Propuesta a nivel provincial tomando en cuenta la altura media de la zona urbana de la provincia..... | 65 |
| 3.5.3 | Propuesta a nivel provincial tomando en cuenta la altura media de todo el cantón | 65 |
| 3.5.4 | Propuesta a nivel provincial tomando en cuenta la altura media de la zona urbana del cantón..... | 66 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 3.6 | Determinación de los parámetros geodésicos y cartográficos..... | 67 |
| 3.6.1 | Parámetros geodésicos | 67 |
| 3.6.2 | Parámetros cartográficos | 68 |
| 3.7 | Análisis de las deformaciones que presentan las diferentes propuestas..... | 70 |
| 3.7.1 | Mallado de puntos | 70 |
| 3.7.2 | Cálculo de las coordenadas | 71 |
| 3.7.3 | Cálculo de los factores y la deformación | 71 |
| 3.7.4 | Modelos de deformación de las propuestas | 72 |
| 3.7.5 | Modelos de cumplimiento de la precisión planimétrica | 75 |
| 3.8 | Comparación de las propuestas mediante un análisis estadístico..... | 78 |
| 3.9 | Definición del Sistema de Proyección Cartográfica Local | 78 |
| CAPÍTULO IV: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN..... | | 79 |
| 4.1 | Análisis de Resultados..... | 79 |
| 4.2 | Discusión de Resultados..... | 84 |
| 4.3 | Comprobación de hipótesis | 85 |
| CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | | 88 |
| 5.1 | Conclusiones | 88 |
| 5.2 | Recomendaciones | 89 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | | 91 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Parámetros del elipsoide GRS80..... | 21 |
| Tabla 2. Características técnicas del modelo SRTM | 45 |
| Tabla 3. Estadístico de la evaluación del modelo SRTM | 46 |
| Tabla 4. Influencia de las cifras decimales sobre las distancias | 49 |
| Tabla 5. Influencia de cifras decimales sobre la deformación | 49 |
| Tabla 6. Afectación de los distintos radios medio sobre los factores | 50 |
| Tabla 7. Afectación de la precisión del raio medio sobre los factores..... | 50 |
| Tabla 8. Diferencia al usar distintos tipos de coordenadas para calcular el factor de escala | 51 |
| Tabla 9. Afectación de la precisión de las alturas | 52 |
| Tabla 10. Afectación de la precisión de la coordenada Este | 52 |
| Tabla 11. Cálculo de factores y deformación para la proyección UTM | 54 |
| Tabla 12. Parámetros cartográficos de la propuesta a nivel provincial tomando en cuenta la altura media de toda la provincia | 69 |
| Tabla 13. Parámetros cartográficos a nivel provincial tomando en cuenta la altura media de la zona urbana | 69 |
| Tabla 14. Parámetros cartográficos a nivel cantonal tomando en cuenta la altura media de todo el cantón | 69 |
| Tabla 15. Parámetros cartográficos a nivel cantonal tomando en cuenta la altura media de la zona urbana | 70 |
| Tabla 16. Muestra de los cálculos de los factores y la deformación de las propuestas a nivel cantonal considerando la altura media de la zona urbana..... | 71 |
| Tabla 17. Estadísticos obtenidos del análisis del modelo de deformación de la proyección UTM | 81 |
| Tabla 18. Estadísticos obtenidos del análisis del modelo de deformación de cada propuesta para el territorio continental..... | 82 |
| Tabla 19. Estadísticos obtenidos del análisis del modelo de deformación de cada propuesta para la zona urbana | 82 |
| Tabla 20. Porcentaje de cumplimiento e incumplimiento de las propuestas para el territorio continental | 83 |
| Tabla 21. Porcentaje de cumplimiento e incumplimiento de las propuestas para la zona urbana..... | 83 |
| Tabla 22. Parámetros del Sistema de Proyección Cartográfica Local | 84 |
| Tabla 23. Estadísticos de las deformaciones obtenidas con los sistemas de proyecciones a nivel del territorio continental | 86 |
| Tabla 24. Estadísticos de las deformaciones obtenidas con los sistemas de proyecciones a nivel de la zona urbana | 87 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Proyección Plana | 12 |
| Figura 2. Clasificación según la superficie de proyección..... | 13 |
| Figura 3. Cilindro Directo | 14 |
| Figura 4. Anamorfosis Lineal | 16 |
| Figura 5. Desarrollo de la UTM..... | 17 |
| Figura 6. Superficies Terrestres | 20 |
| Figura 7. Altura Elipsoidal..... | 22 |
| Figura 8. Altura Ortométrica..... | 23 |
| Figura 9. Sistema de Referencia Global..... | 24 |
| Figura 10. Sistema Local Topocéntrico | 25 |
| Figura 11. Coordenadas Cartesianas | 26 |
| Figura 12. Coordenadas Geodésicas | 27 |
| Figura 13. Coordenadas Planas | 28 |
| Figura 14. Plano Topográfico Local | 31 |
| Figura 15. Tipos de distancias..... | 34 |
| Figura 16. Reducción al nivel del elipsoide..... | 36 |
| Figura 17. Flujo de trabajo de la metodología | 41 |
| Figura 18. Límite cantonal | 44 |
| Figura 19. Modelo digital de alturas elipsoidales | 45 |
| Figura 20. Distribución de los puntos GPS de precisión | 47 |
| Figura 21. Deformación de la proyección UTM empleando el factor combinado | 55 |
| Figura 22. Cumplimiento de la precisión, escala 1:500 | 57 |
| Figura 23. Cumplimiento de la precisión, escala 1:1000..... | 58 |
| Figura 24. Campo de proyección de las zonas en función de la altura media de toda la provincia..... | 61 |
| Figura 25. Campo de proyección de las zonas respecto a la altura media de la zona urbana..... | 62 |
| Figura 26. Campo de proyección de las zonas en función de la altura media de todo el cantón..... | 63 |
| Figura 27. Campo de proyección de las zonas en función de la altura media de la zona urbana..... | 63 |
| Figura 28. Propuesta a nivel provincial en función de la altura media de toda la provincia..... | 64 |
| Figura 29. Propuesta a nivel provincial en función de la altura media de la zona urbana..... | 65 |
| Figura 30. Propuesta a nivel cantonal en función de la altura media de todo el cantón..... | 66 |
| Figura 31. Propuesta de zonas a nivel cantonal respecto a la altura media de la zona urbana..... | 67 |
| Figura 32. Deformaciones que produce la propuesta a nivel provincial (total) | 73 |
| Figura 33. Deformaciones que produce la propuesta a nivel provincial (zona urbana)..... | 73 |

| | |
|--|----|
| Figura 34. Deformaciones que produce la propuesta a nivel cantonal (total)..... | 74 |
| Figura 35. Deformaciones que produce la propuesta a nivel cantonal (zona urbana)..... | 74 |
| Figura 36. Cumplimiento de la precisión para la propuesta a nivel provincial (total) | 76 |
| Figura 37. Cumplimiento de la precisión para la propuesta a nivel provincial (zona urbana) | 76 |
| Figura 38. Cumplimiento de la precisión para la propuesta a nivel cantonal (total) . | 77 |
| Figura 39. Cumplimiento de la precisión para la propuesta a nivel cantonal (zona urbana)..... | 77 |

ACRÓNIMOS Y SIGLAS

GNSS: *Global Navigation Satellite System*

GRS 80: *Geodetic Reference System 1980*

IGM: Instituto Geográfico Militar

LTM: Local Transversa de Mercator

PTC: Plano Topográfico Cantonal

PTL: Plano Topográfico Local

PTP: Plano Topográfico Provincial

RTK: *Real Time Kinematic*

SIG: Sistema de Información Geográfica

SIRGAS: Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas

SPCL: Sistema de Proyección Cartográfica Local

SRTM: *Shuttle Radar Topography Mission*

UTM: Universal Transversa de Mercator

RESUMEN

Al utilizar la proyección UTM en la generación de cartografía a escalas grandes (mayores a 1:10.000), las deformaciones lineales son iguales a uno en los meridianos automecoicos y aumentan a medida que se alejan de los mismos, impidiendo cumplir con la precisión que la cartografía a detalle requiere. En la actualidad es común utilizar la topografía clásica junto al posicionamiento satelital para realizar levantamientos topográficos o replanteos de proyectos, creando la necesidad de generar procedimientos que los compatibilicen. Por esta razón se propone desarrollar un Sistema de Proyección Cartográfica Local para el Ecuador Continental, con el fin de solventar dicha problemática. Primero fue necesario demostrar que las deformaciones producidas por la proyección UTM, empleada a nivel nacional para generar cartografía a detalle, no cumple con las precisiones para escalas 1:500 y 1:1.000. Una vez demostrada esta falencia, se creó el sistema de proyección mediante una zonificación del Ecuador continental tomando en cuenta el límite cantonal y la altura media de la zona urbana, de esta manera el sistema creado aumentó la zona de cumplimiento de la precisión, verificándolo mediante el uso de factores cartográficos, topográficos, geodésicos y el cálculo de la deformación. Finalmente se obtuvo un sistema de proyección compuesto por 7 zonas, que permite que el 69,55% de la superficie continental y el 92,93% del área urbana cumplan con las precisiones para escala 1:500, mientras que el 73,06% de la superficie continental y el 93,11% del área urbana cumplan la precisión para escala 1:1.000.

PALABRAS CLAVES:

- **DEFORMACIÓN**
- **PTL**
- **SISTEMA DE PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA LOCAL.**

ABSTRACT

When using the UTM projection in the generation of cartography at large scales (greater than 1: 10,000), the linear deformations are equal to one in the autoomechoic meridians and increase as they move away from them, preventing compliance with the precision that the cartography to detail requires. Nowadays, it is common to use classical topography along with satellite positioning to carry out topographic surveys or project rethinking, creating the need to generate procedures that make them compatible. For this reason, it is proposed to develop a Local Cartographic Projection System for Continental Ecuador, in order to solve this problem. First it was necessary to demonstrate that the deformations produced by the UTM projection, used at the national level to generate detailed cartography, do not comply with the precisions for scales 1: 500 and 1: 1,000. Once this failure was demonstrated, the projection system was created by means of a zoning of continental Ecuador taking into account the cantonal limit and the average height of the urban area, in this way the created system increased the area of compliance of the accuracy, verifying it by means of the use of cartographic, topographic, geodetic factors and the calculation of deformation. Finally, a projection system composed of 7 zones was obtained, which allows 69.55% of the continental area and 92.93% of the urban area to meet the requirements for a scale of 1: 500, while 73.06% of the continental surface and 93.11% of the urban area meet the precision for 1: 1,000 scale.

KEY WORDS:

- **DEFORMATION**
- **LTM**
- **LOCAL CARTOGRAPHIC PROJECTION SYSTEM**

CAPÍTULO I

PROBLEMA

1.1 Antecedentes

El sistema de proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) pertenece al grupo de proyecciones geodésicas, donde la esfericidad terrestre influye sobre la representación geográfica de: distancias, ángulos y superficies. El sistema de proyección UTM, al ser del tipo conforme, permite conservar los ángulos, pero distorsiona distancias y superficies (Fernández, 2001), debido a que ninguna proyección puede conservar más de una magnitud. Para evitar excesivos errores de escala (deformaciones) en los bordes de cada zona, que pueden llegar al orden de 1/1.000 (1m/km), la proyección UTM no equidista del meridiano central, debido a la aplicación del artificio de *Tissot*, el cual define un factor de escala (K_0) de 0.9996, ubicando al cilindro en posición secante con respecto al Ecuador, cortando al elipsoide en dos líneas casi paralelas al meridiano central (Millar, 2003).

La proyección cartográfica junto al relieve terrestre, influyen en la representación de las distancias sobre un plano, ya que la magnitud medida en el plano resulta ser menor a la magnitud medida en el terreno. Este hecho se hace más evidente conforme incrementa la altura (cota media con respecto al plano de referencia) y la distancia entre los puntos considerados. Cuando se emplean cartas topográficas de pequeña escala (1:25.000 y menores) para representar un territorio, el efecto de estas discrepancias no es significativo, ya que la resolución no permite apreciarlas de forma gráfica. Ocurriendo lo contrario en los proyectos de ingeniería, que se elaborarán generalmente en escalas 1:5.000 y mayores (1:1.000; 1:500), donde las discrepancias se hacen evidentes y resultan incompatibles con las precisiones que los proyectos requieren, tanto gráfica como numéricamente (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, 2013).

Para enfrentar dicha problemática, varios autores han conseguido cumplir con la precisión planimétrica de la cartografía a escalas grandes, mediante la aplicación de Planos Topográficos Locales. Por ejemplo, Idoeta (2005) en el artículo titulado “Uso del Plano Topográfico Local (PTL) en obras lineales de ingeniería: caso autopista presidente Dutra”, presenta las características principales del Plano Topográfico Local, demostrando la relación biunívoca que existe entre el uso de coordenadas planas y el sistema geodésico, debido a la creciente demanda del uso de sistemas globales de navegación por satélite. El autor espera que su trabajo sea útil para los profesionales, de tal manera que los servicios de: posicionamiento, locación, generación de cartografía, georreferenciación, entre otros, no precisen de varios cálculos para la corrección de las deformaciones (Idoeta, 2002).

Castillo (2015), generó un sistema de proyección Local Transversa de Mercator asociado a Planos Topográficos Locales (LTM-PTL) para el territorio chileno, mediante la individualización de zonas, las cuales poseen características proyectivas únicas, con ello minimizó las deformaciones y aseguró una precisión relativa superior a 1:40.000 (Castillo, 2015).

1.2 Formulación del Problema

Hoy en día es común emplear el sistema de proyección UTM para generar cartografía a escalas mayores a 1:10.000 (1:5.000, 1:1.000, etc...), convirtiéndose en una práctica que no es recomendable, debido a que existen zonas del territorio continental que incumplen con las precisiones que requieren dichas escalas. El incumplimiento de las precisiones se produce debido a las diferencias de alturas y la longitud de las distancias medidas, las cuales producen inconsistencias en cuanto al replanteo de proyectos de infraestructura y la fiscalización de levantamientos, ya que no existe concordancia en la relación biunívoca terreno – plano. Es por ello que se definirán parámetros cartográficos y geodésicos para la generación de un Sistema de Proyección Cartográfica Local en el Ecuador Continental, que aumente el área de cumplimiento de la precisión planimétrica de la cartografía a detalle, para el territorio

continental y las zonas urbanas, además de compatibilizar la información geométrica que se obtenga utilizando distintas técnicas en conjunto.

1.3 Justificación

La proyección UTM es empleada a nivel mundial debido a que presenta varias ventajas como: la conservación de ángulos, la distorsión que sufren las superficies no es en grandes magnitudes y facilita la localización de puntos (Fernández, 2001). Pero presenta el inconveniente de impedir la generación de cartografía a escalas mayores a 1:25.000 (Idoeta, 2002), puesto que las deformaciones que se producen, imposibilitan el cumplimiento de las necesidades técnicas de los proyectos. Además las nuevas técnicas de obtención de datos geográficos, como es la tecnología GNSS, al ser combinados con la topografía clásica, difieren en las magnitudes, debido a que se obvia la reducción de distancias que necesita la cartografía a escalas grandes para cumplir con la precisión, ocasionando que las distancias medidas en el terreno no sean directamente compatibles con las distancias proyectadas sobre un plano de referencia (Blanco & Rojas, 2015).

Como ya se mencionó, en la actualidad, los trabajos topográficos han optado por combinar mediciones clásicas con mediciones GNSS, ya sea en modo estático con post-proceso, o tiempo real (RTK), para luego utilizarlos en un sistema de información geográfica (SIG) o incluirlos en la cartografía existente, efectuando los cálculos para expresarlo en las coordenadas planas del sistema de proyección UTM. La metodología de trabajo antes mencionada ha producido la necesidad de recuperar conocimientos geodésicos para el tratamiento local de las mediciones. Para explicar mejor el problema, se conoce que las mediciones GNSS son vectores en el sistema de Referencia Geodésico, mientras que las mediciones obtenidas de las estaciones totales son vectores en sistemas locales de coordenadas. La relación entre ambos tipos de vectores es un caso ampliamente estudiado por la geodesia y la cartografía (Sánchez, 2008), que al ser incorporada en la metodología de procesamiento de los datos obtenidos en campo, evitará complicaciones cuando los proyectos sean fiscalizadas.

Los problemas topográficos que suponen los cálculos de distancias, transporte de coordenadas, rumbos, etc., que sobre la superficie del elipsoide son complejos y demandan gran cantidad de cálculo, en el plano de proyección, usando la simple geometría euclidiana (plana) pueden resolverse fácilmente, sin olvidar la consideración de los factores de deformación que introduce la proyección. Es de aquí que nace la gran ventaja de emplear proyecciones cartográficas. (Sánchez, 2008).

Al definir un sistema de proyección Local Transversa de Mercator asociado a un Plano Topográfico Local, se está asegurando mantener una relación biunívoca entre las distancias medidas en el plano y el terreno (Juan & Edwin, 2015). Permitiendo dar soporte al objetivo 9 del Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021, el cual se encarga de garantizar la soberanía y la paz, y posicionar estratégicamente el país en la región y el mundo, ya que permitirá generar cartografía para el control de los distintos territorios como son: zonas fronterizas, marítimas, amazónicas, entre otras (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2017). Finalmente este proyecto es novedoso debido a que toma como unidad de análisis el límite político administrativo de cantones y provincias para la zonificación del sistema proyectivo.

1.4 Importancia

Definir un sistema de proyección para generar cartografía a detalle es una necesidad para el ordenamiento territorial de una ciudad, debido a su tendencia a crecer en área, por lo general de forma impredecible, ocasionando la adición arbitraria de extensión que no había sido tomada en cuenta para la generación de la proyección primitiva. Esto genera varios inconvenientes como: obviar la curvatura terrestre, acumular discrepancias internas que a la larga producirán incumplimiento de las tolerancias establecidas para la cartografía a detalle. El emplear un sistema de representación plana conforme permite prever y ajustarse al futuro crecimiento de las ciudades (Blachut, Chrzanowski, & Saastamoinen, 1980).

Pero, ¿Por qué usar un sistema de coordenadas planas conforme? En la práctica se utiliza este tipo de coordenadas por la universalidad de sus valores y la fácil

transformación en otros sistemas similares que puedan cubrir la misma área, constituyendo una ventaja, ya que las coordenadas de puntos de control locales son requeridas frecuentemente en algún sistema regional para objetivos de cartografía general, planeamiento de vías de comunicación, etc. (Blachut, Chrzanowski, & Saastamoinen, 1980). Es de aquí que nace la importancia de generar un sistema de proyección, basado en las características del sistema Transversal de Mercator (TM), el cual implica un sistema cilíndrico transverso conforme, al cual se le han impuesto parámetros específicos, con el propósito de crear cartografía de precisión donde se minimice las diferencias en las distancias medidas en campo respecto a las distancias proyectadas (Comisión Nacional de Riego, 2014).

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Desarrollar un Sistema de Proyección Cartográfica Local, en el Ecuador Continental, mediante el análisis matemático de los parámetros cartográficos y geodésicos para definir proyecciones locales que permitan cumplir con la precisión planimétrica de la cartografía a escalas grandes.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Analizar las deformaciones que presenta la Proyección Universal Transversa de Mercator en el Ecuador Continental, empleando coeficientes de deformación con la finalidad de demostrar la existencia de zonas, en donde la cartografía escala 1:500 y 1:1.000 no cumple con la precisión planimétrica requerida.
- Definir un Sistema de Proyección Cartográfica Local en el Ecuador mediante el análisis matemático de parámetros cartográficos y geodésicos, con el fin de garantizar su uso para la generación de cartografía escalas 1:500 y 1:1.000.

- Validar las zonas que conforman el Sistema de Proyección Cartográfica Local mediante el cálculo de los coeficientes de deformación en un mallado de 500 metros por 500 metros, para demostrar que el sistema desarrollado cumple con la precisión planimétrica para cartografía escalas 1:500 y 1:1.000.
- Realizar el análisis estadístico de las deformaciones, con el fin de determinar si se obtuvo una mejora al utilizar el Sistema de Proyección Cartográfica Local vs el sistema de proyección Universal Transversa de Mercator.

1.6 Metas

- Un mapa del Ecuador Continental con las deformaciones producidas por el sistema de Proyección Universal Transversa de Mercator.
- Dos mapas del Ecuador Continental, uno con el cumplimiento de la precisión planimétrica para escala 1:500 y otro para escala 1:1.000, ambos basados en las deformaciones producidas por el uso del sistema de Proyección Universal Transversa de Mercator.
- Un *shapefile* tipo punto con las deformaciones producidas por el sistema de proyección Universal Transversa de Mercator.
- Un mapa del Ecuador continental zonificado por el Sistema de Proyección Cartográfica Local.
- Un *shapefile* de tipo polígono con los parámetros cartográficos de cada zona que conforman el Sistema de Proyección Cartográfica Local.
- Un *shapefile* tipo punto con las deformaciones producidas por el Sistema de Proyección Cartográfica Local.
- Un mapa del Ecuador Continental con las deformaciones producidas por el Sistema de Proyección Cartográfica Local.
- Dos mapas del Ecuador Continental, uno con el cumplimiento de la precisión planimétrica para escala 1:500 y otro para escala 1:1.000, ambos basados en las deformaciones producidas por el Sistema de Proyección Cartográfica Local.

- Un reporte estadístico de la comparación de las deformaciones que se tienen al usar el sistema de proyección Universal Transversa de Mercator vs el Sistema de Proyección Cartográfica Local.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Fundamentación Teórica

2.1.1 Cartografía

La cartografía aporta con la base teórica para el desarrollo del Sistema de Proyección Cartográfica Local, ya que es un “conjunto de estudios y operaciones científicas, técnicas y artísticas que, teniendo por base los resultados de las observaciones directas o el análisis de documentación, se vuelcan para la elaboración de mapas, cartas y otras formas de expresión o representación de objetos, elementos o fenómenos y ambientes físicos y socioeconómicos, así como su utilización” (Asociación Cartográfica Internacional, 1966).

Para representar la realidad terrestre es evidente que sería imposible hacerlo en tamaño real, para ello el hombre se vale de dos artificios, el primero es la escala, la cual plantea relaciones entre las distancias sobre el mapa y su correspondiente sobre el terreno (Instituto Geográfico Nacional , 2017), mientras que el segundo artificio para representar con la mayor exactitud posible: distancias, direcciones y la forma de los territorios son las proyecciones cartográficas (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2007). La topografía, la fotogrametría, la geodesia y otras ciencias de obtención de información geométrica de la superficie terrestre, brindan los insumos para representar la realidad terrestre sobre un plano o mapa (Peña, 2011).

La representación de la superficie terrestre se la puede hacer en pequeñas extensiones de terreno, llegando a un punto donde se la considera plana o tangente al elipsoide terrestre en un punto central, donde se proyectan los puntos determinados mediante instrumentos que miden coordenadas polares horizontales, ángulos y distancias. Mientras que al representar grandes extensiones de la superficie, no se la puede considerar plana, sino como una superficie elipsoidal, a la cual deben referirse

las coordenadas medidas utilizando distintos métodos de la Geodesia y la Topografía (Peña, 2011).

En la práctica se emplea como superficie de referencia al elipsoide, sobre el cual los puntos obtenidos en campo, pueden ser representados en varios sistemas de coordenadas, por ejemplo: horizontales (acimut y distancia), elipsoidales o geodésicas, también llamadas “geográficas” (longitud y latitud). Es aquí donde empieza el proceso de representar la superficie terrestre en el papel y la cartografía se vale de los “sistemas de representación cartográfica” para transformar las curvilíneas (longitud y latitud), en otras coordenadas planas, rectangulares o polares (Peña, 2011).

2.1.1.1 Campo de una proyección

Existen varios conceptos claves para la investigación y el campo de proyección es uno de ellos, debido a que éste permite definir la extensión de las zonas que constituirán el Sistema de Proyección Cartográfica Local. El campo de proyección establece el límite hasta donde puede aplicarse un desarrollo, tomando en cuenta que las deformaciones irán en aumento conforme las medidas realizadas se alejen del origen de la proyección. Existen proyectos donde se requiere determinar la extensión de la proyección, para que los factores de reducción, no superen una determinada precisión relativa, asegurando que al medir una longitud sobre el mapa, el error cometido en la medición no supere la precisión relativa definida (Sánchez, 2008).

2.1.1.2 Módulos de deformación

Otros conceptos claves para la investigación son los módulo de deformación, debido a que el elipsoide de revolución no es una superficie desarrollable, la cual resulta imposible representarla sobre un plano sin que sufra deformaciones (Peña, 2011). La relación existente entre los elementos calculados sobre el elipsoide y su correspondiente en la proyección, se conocen como módulos de deformación, los cuales permiten determinar las condiciones que debe cumplir una proyección para

conservar una sola magnitud, siendo estas: ángulos, distancias y superficies (Sánchez, 2008), además de ser indicadores que se utilizan para determinar las distorsiones que se producen en las magnitudes antes mencionadas.

Existen tres módulos de deformación. El primero y más importante para la presente investigación es el módulo de deformación lineal, debido a que permite determinar las distorsiones que producen los distintos sistemas de proyección en la generación de cartografía. El módulo de deformación lineal se calcula mediante la relación entre la longitud de cualquier línea sobre el elipsoide (Δs) y su correspondiente en la proyección ($\Delta s'$), si L es igual a 1, la proyección es automecoica o equidistante, señalando que no existe diferencia entre la distancia medida sobre el elipsoide respecto a su correspondiente en la proyección; la relación se la expresa como:

$$L = \frac{\Delta s'}{\Delta s} \cong \frac{\text{proyección}}{\text{terreno}} \quad (1)$$

El segundo es el módulo de deformación superficial, el cual se expresa como la relación entre el área de un polígono diferencial sobre el elipsoide ($\Delta S'$) y su correspondiente en la proyección (ΔS), si S es igual a 1, la proyección es equidistante; la relación se expresa de la siguiente manera (Sánchez, 2008):

$$S = \frac{\Delta S'}{\Delta S} \quad (2)$$

El último es el módulo de deformación angular, para obtenerlo se calcula la diferencia entre el ángulo formado por dos elementos diferenciales en el elipsoide (α'), respecto al mismo ángulo en la proyección (α), si A es igual a 0, la proyección es conforme; la diferencia se la expresa de la siguiente manera:

$$A = \alpha' - \alpha \quad (3)$$

Los módulos de deformación al ser adimensionales, no pueden ser fácilmente interpretados, es por esos que se recurre a unidades de deformación como son los m/Km, que indican la cantidad de metros de error por cada Km de levantamiento realizado, para su cálculo se utiliza la Ecuación 4. O los PPM, que indican la cantidad de milímetros de error por cada Km de levantamiento, para su cálculo se emplea la (5).

$$m/Km = (1 - K) \cdot 1.000 \quad (4)$$

$$PPM = (1 - K) \cdot 1'000.000 \quad (5)$$

Donde:

K puede ser cualquier factor (factor de escala, factor de reducción al elipsoide o el factor combinado)

2.1.1.3 Clasificación de las Proyecciones

Existe una gran cantidad de proyecciones que cuentan con ciertas particularidades que les permiten ajustarse a las características del territorio que se desea representar, a continuación se exponen los criterios que ayudarán a entender de mejor manera el comportamiento matemático del sistema de proyección generado para resolver la problemática de investigación.

2.1.1.3.1 Por la propiedad que conservan

Existen tres magnitudes que pueden conservarse en una proyección: distancias, ángulos y superficies, dando lugar a cuatro tipo de proyecciones: conformes, equivalentes, afilácticas y equidistantes. Por fines prácticos se explicará solamente las características de la proyección conforme, debido a su importancia para solucionar el problema de investigación.

Las proyecciones conformes son aquellas que conservan los ángulos, con una relación de semejanza de “1” en el centro de la proyección, hasta un valor igual a “ $1+\zeta$ ” en los límites del campo de proyección. La alteración “ ζ ” es proporcional al cuadrado de la distancia que une el centro de la proyección con el punto proyectado (Fernández, 2001).

2.1.1.3.2 Por la extensión de la superficie a proyectar

Las proyecciones son representaciones gráficas de una parte de la superficie terrestre, cuando la esfericidad de la Tierra tiene repercusiones sobre la representación de posiciones geográficas, superficies, ángulos y distancias se estará trabajando con proyecciones geodésicas (Fernández, 2001). En cambio, si la superficie a representar es pequeña y por lo tanto la esfericidad terrestre no influye en la representación cartográfica, donde las distancias, ángulos y superficies están vistos desde su perpendicular, como se puede apreciar en la Figura 1 (Fernández, 2001), se estará hablando de proyecciones planas.

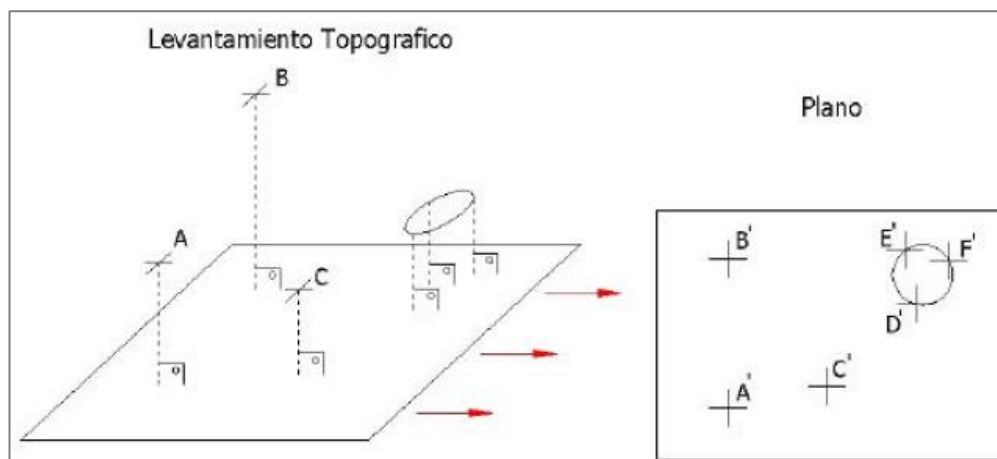


Figura 1. Proyección Plana

Fuente: (Fernández, 2001)

2.1.1.3.3 Por la superficie de Proyección

Dependiendo de la superficie que se utilice para proyectar, como se observa en la Figura 2, se estará trabajando con dos tipos. Las proyecciones planas o acimutales, donde el plano de proyección se encuentra tangente o secante al datum de referencia; reciben el nombre de acimutales debido a que conserva el acimut para los puntos coincidentes con el lugar de tangencia (Sánchez, 2008). Y los desarrollos, los cuales utilizan una superficie desarrollable que “envuelve” a la figura de referencia; las superficies utilizadas pueden ser: un cilindro, un cono, varios conos sucesivos (polidriédrica) o un poliedro para luego extenderlo y formar el plano de proyección (Sánchez, 2008). En el caso de utilizar un cono o cilindro, cuyo eje esté ubicado en el plano ecuatorial recibirá el nombre de desarrollo transverso, mientras que si coincide con el eje de la Tierra, se llama desarrollo directo, en el caso de ocupar cualquier otra posición, dará lugar a los desarrollos oblicuos o también conocidos como horizontales. (Peña, 2011).

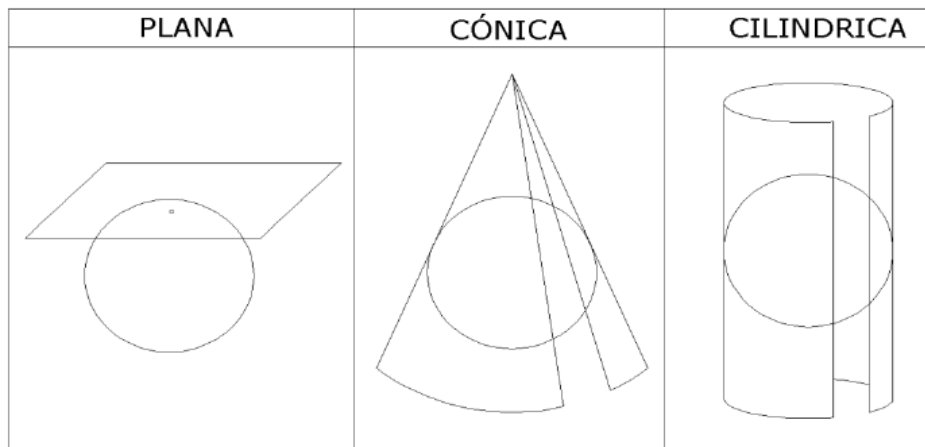


Figura 2. Clasificación según la superficie de proyección

Fuente: (Sánchez, 2008)

2.1.1.3.4 Tipos de Desarrollos

Según la relación que se guarde entre los puntos de la esfera y sus correspondientes en el cilindro, se obtendrán distintos tipos de desarrollo (Peña, 2011). Existen tres

desarrollos que son relevantes para la investigación, el primero es el desarrollo cilíndrico directo, que se observa en la Figura 3, el cual considera un cilindro tangente a una esfera a lo largo de su ecuador, estableciendo una relación biunívoca entre los puntos de ambas superficies. Al desarrollar el cilindro, se obtiene una representación donde los meridianos son rectas paralelas entre sí, cuya distancia es proporcional a la correspondiente diferencia de longitud; mientras que los paralelos son rectas normales a los meridianos y paralelas entre sí. (Peña, 2011)

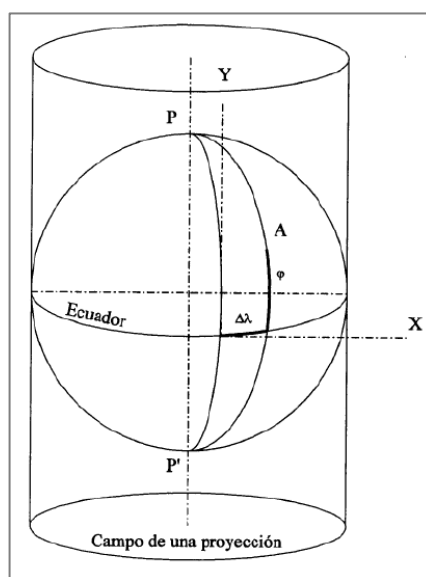


Figura 3. Cilindro Directo

Fuente: (Peña, 2011)

El segundo desarrollo de interés para la investigación es el desarrollo cilíndrico directo conforme de mercator, en este tipo de desarrollo los meridianos y paralelos son rectas paralelas entre sí, que cumplen con la condición conformidad, es decir no existe deformación en los ángulos, pero sí en las superficies y las distancias; debido a la característica de conformidad es empleada en la navegación por las ventajas que posee. Este desarrollo se fundamenta en la alteración de la distancia entre los paralelos, ocasionando que las deformaciones en el sentido de la latitud sean iguales a las deformaciones que se presentan en el sentido de la longitud. Es necesario acotar que a partir de la latitud 70° , no se recomienda emplear este desarrollo debido a las deformaciones que se presentan (Peña, 2011).

Por último se tiene el desarrollo cilíndrico transverso, el cual presenta las mismas características del desarrollo antes expuesto, con la diferencia que el eje del cilindro, está cambiado de posición, en lugar de coincidir con el eje de la Tierra, está ubicado en el Ecuador, de esta manera la tangencia se produce con respecto a un meridiano de la esfera terrestre (Peña, 2011).

2.1.1.4 Proyección TM

Para la investigación, es de suma importancia analizar la proyección Transversal de Mercator (TM), cuya principal característica es la conformidad y los mínimos errores de escala que presente en el meridiano central y sus cercanías (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, 2013). Se recomienda emplear este tipo de proyecciones, cuando se represente superficies terrestres de gran extensión en dirección norte-sur.

El factor de escala en el meridiano central es una constante que caracteriza a los Sistemas Transversal de Mercator (TM), dando lugar a TM locales, regionales o universal. Cuando se desea generar una proyección TM plenamente cartográfica, se recurre al artificio de Tissot para el cálculo de K_0 , mientras que si se desea generar una proyección Local Transversa de Mercator (LTM) asociado a un Plano Topográfico Local (PTL) se aplicará la (8). El factor de escala en el meridiano central se emplea como artificio matemático para reducir el valor del factor de escala de las proyecciones TM, en especial cuando alcanza los máximos valores en los extremos de la zona de proyección (Blachut, Chrzanowski, & Saastamoinen, 1980), como se observa en la Figura 4. Modificar el factor en el meridiano central, junto al campo de proyección, permiten generar proyecciones TM que minimicen las deformaciones y permitan asegurar cumplir con las precisiones que necesite un proyecto.

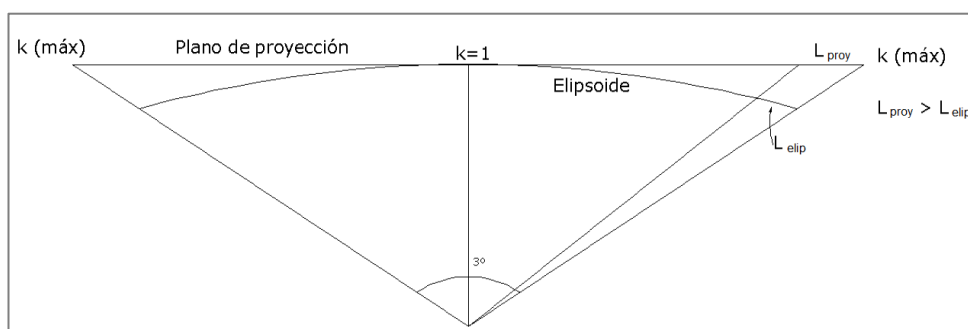


Figura 4. Anamorfosis Lineal

Fuente: (Sánchez, 2008)

El módulo de deformación lineal, también conocido como factor de escala o anamorfosis lineal, permite proyectar la longitud medida entre dos puntos en el elipsoide, sobre el plano cartográfico (Herrera, 2017), permitiendo determinar la deformación que sufren las distancias. En el caso particular de las proyecciones TM, se emplea la (6) para calcular el módulo de deformación lineal, cuando se tiene como dato coordenadas geodésicas, mientras que la (7), es una aproximación de la (6) (Castillo, 2015) y se utiliza cuando las coordenadas que se tiene como dato son coordenadas planas:

$$K_{esc} = K_0 \left[1 + \frac{\Delta\lambda^2}{2} \cdot \cos^2 \varphi \cdot (1 + e' \cos \varphi^2) \right] \quad (6)$$

Donde:

K_0 es el factor de escala en el meridiano central

$\Delta\lambda$ es la variación de la longitud

φ es la latitud del punto

e' es la segunda excentricidad del elipsoide de referencia

$$K_{esc} = K_0 * \left(1 + \left(\frac{x^2}{2} \cdot R^2 \right) \right) \quad (7)$$

Donde:

K_0 es el factor de escala en el meridiano central

x es la distancias desde el meridiano central al punto (coordenada ESTE – falso ESTE)

R es el radio medio.

2.1.1.4.1 Sistema de Proyección Universal Transversa de Mercator

La proyección Universal Transversa de Mercator, es ampliamente utilizada para representar la información cartográfica del país. Se caracteriza por conservar los ángulos, pero distorsionar superficies y distancias, su desarrollo matemático se basa en la proyección Gauss – Krüger, donde la posición del cilindro es transversal, con respecto al eje de la tierra. Es un sistema compuesto por zonas de 6° de Longitud, donde el meridiano central equidista 3° de longitud de los extremos y se generan a partir del meridiano de Greenwich (Fernández, 2001). El cilindro de proyección interseca en dos puntos al elipsoide de referencia, para ello emplea un K_0 igual a 0,9996 que genera dos líneas automecoicas, casi paralelas al meridiano central, cuyo módulo de deformación lineal es igual a 1 y su valor aumenta conforme se alejan del meridiano central, como se observa en la Figura 5 (Millar, 2003).

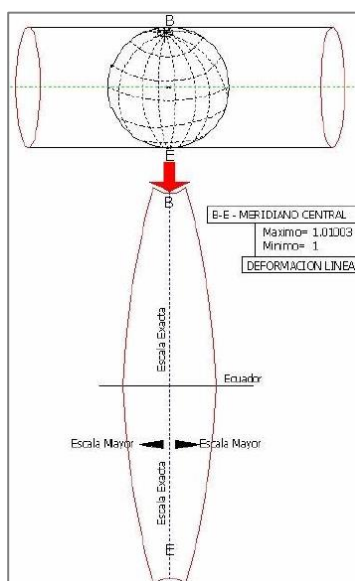


Figura 5. Desarrollo UTM

Fuente: (Fernández, 2001)

2.1.1.4.2 Proyección Local Transversa de Mercator

La Proyección Local Transversa de Mercator se utilizará para resolver el problema de investigación, debido a que presenta un sistema cilíndrico transverso conforme, al cual se le imponen ciertas condiciones para crear cartografía de precisión, con el fin de representar superficies terrestres de corta extensión, minimizando las diferencias medidas en las distancias y ángulos (Comisión Nacional de Riego, 2014).

Cuando se asocia un Plano Topográfico Local (PTL) a la proyección LTM, no se requiere transformar las coordenadas UTM en Topográficas; esta ventaja es decisiva cuando se desea combinar varias técnicas de medición que pueden ser sistemas tradicionales y modernos como son los sistemas GNSS (Comisión Nacional de Riego, 2014).

A continuación se expresan los parámetros que según la Norma Ecuatoriana Vial, se deben emplear para generar un Sistema de Proyección LTM y LTM-PTL.

Parámetros de la Proyección LTM

Falso Norte: 10'000.000 (m)

Falso Este: 200.000 (m)

Factor de Escala: 0,999995

Ancho del Huso: 1° (un grado sexagesimal)

Meridiano Central: Se define según la zona del estudio.

Para definir un PTL asociado a una proyección LTM, basta definir la cota media de la zona de estudio (HPTL), para calcular el factor de escala en el meridiano central (Comisión Nacional de Riego, 2014), mediante el empleo de la Ecuación 8. La precisión de la proyección LTM, estará en función de la variación de la altura y la extensión del campo de proyección que se definan para el proyecto.

$$K_{oh} = \frac{R + h}{R}$$

(8)

Donde:

R es el radio medio.

h es la altura elipsoidal media del terreno.

Parámetros de la Proyección LTM-PTL

Falso Norte: 10'000.000 (m)

Falso Este: 500.000 (m)

Factor de Escala: K_{oh}

Ancho del Huso: 1° (un grado sexagesimal)

Meridiano Central: Se define según la zona del estudio.

2.1.2 Geodesia

La geodesia aporta el fundamento teórico y matemático para la resolución del problema de investigación, ya que persigue dos finalidades: una teórica, que estudia la forma de la Tierra en su conjunto; y otra práctica que, parte de datos obtenidos de un modelo teórico, para realizar los cálculos que permitan representar cartográficamente la superficie terrestre. La geodesia emplea mediciones de alta precisión para situar y relacionar puntos sobre la superficie, estos datos deben estar referidos a un plano. La Tierra al no ser una superficie desarrollable, debe sufrir alguna transformación lo más pequeña posible, para que esto sea posible es necesario recurrir a diferentes sistemas de proyección propios de la cartografía (Valdés, 1981).

2.1.2.1 Superficies de Referencia

Conocer las superficies de referencia, permite determinar las correcciones que se deben hacer en las mediciones para que al ser comparadas o usadas en conjunto, exista congruencia en las magnitudes. Hay tres superficies de referencia que son relevantes

para la investigación, las cuales se observan en la Figura 6. La primera es la superficie terrestre también conocida como topografía, en la cual se ubican los objetos geográficos, tanto naturales como artificiales, y se realizan las observaciones y mediciones. La segunda superficie de referencia es el geoide, definido, como la superficie equipotencial del campo de gravedad terrestre que mejor se ajusta a la superficie de agua en reposo en los océanos extendida bajo los continentes (Zakatov, 1997).

Finalmente la tercera superficie de referencia es el elipsoide de revolución, también conocido como “Tierra Normal”, la cual es empleada para realizar cálculos matemáticos dentro de la Geodesia (Barahona, 2016). Para que los cálculos sean lo más cercanos a la realidad, el elipsoide de revolución cumple dos condiciones, tanto su centro como su plano ecuatorial coinciden con el centro de masas de la Tierra y el plano del ecuador terrestre respectivamente (Zakatov, 1997). En la actualidad, las observaciones satélites para posicionamiento han permitido la consolidación de esta superficie, convirtiéndose en la figura geométrica que mejor se aproxima al geoide (Barahona, 2016). En la presente investigación se empleará el elipsoide de referencia GRS80, el cual se alinea con el Sistema de Referencia SIRGAS-ECUADOR y está normado por el Instituto Geográfico Militar, en la Tabla 1 se observa sus parámetros.

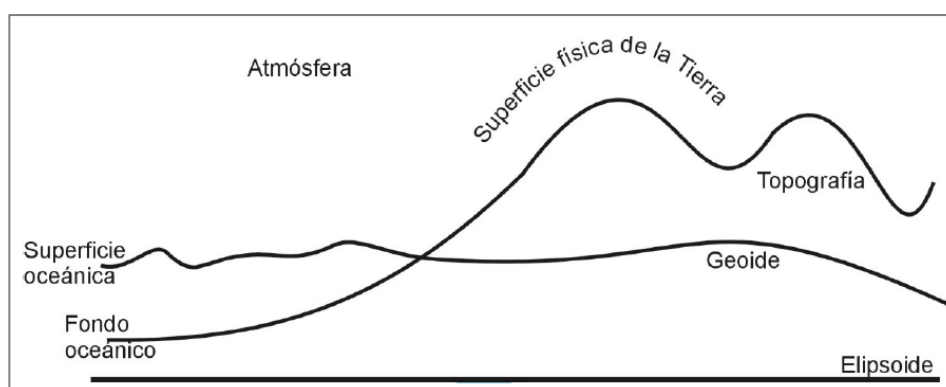


Figura 6. Superficies de Referencia

Fuente: (Drewes & Sánchez, Sistemas de Referencia en Geodesia, 2002)

Tabla 1.
Parámetros del elipsoide GRS80

| Constante | Relación Matemática | Valor |
|----------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Semieje mayor (a) | Constante definida | 6'378.137,000 (m) |
| Primera excentricidad (e^2) | Cálculo iterativo | $6,6943800229 \cdot 10^{-3}$ |
| Segunda excentricidad (e'^2) | $e'^2 = \frac{e^2}{1 - e^2}$ | $6,73949677548 \cdot 10^{-3}$ |
| Semieje menor (b) | $b = a \cdot \sqrt{1 - e^2}$ | 6'356.752,314 (m) |
| Aplanamiento Recíproco ($1/f$) | $f = \frac{a - b}{a}$ | 298,257222101 |

Fuente: (Instituto Geográfico Militar, 2011)

Si bien la ondulación geoidal no es una superficie de referencia, este concepto permite relacionar al geoide con el elipsoide, ya que es la separación vertical, que existe entre las superficies de referencia antes mencionadas. Dicha separación depende del elipsoide que se utilice, pero aproximadamente su variabilidad está dentro de +/- 100 m (Seeber, 2003). Para el calcular la ondulación geoidal, se emplea la Ecuación 9:

$$N = h - H \tag{9}$$

Donde:

N es la ondulación geoidal

h es la altura elipsoidal

H es la altura ortométrica

2.1.2.2 Tipos de Alturas

Cada superficie de referencia tiene su propio tipo de altura. La altura es la distancia medida sobre la línea vertical, desde un punto sobre la superficie terrestre hasta una superficie de referencia. Para determinar su magnitud se emplea la nivelación que puede ser: barométrico, trigonométrico, geométrico o espacial; debido a la influencia

del campo de gravedad terrestre en dichos procesos de medición, es necesario realizar correcciones gravimétricas (Sánchez, 2008).

Las alturas que utiliza la geodesia se clasifican en función de tres aspectos: la metodología empleada para su determinación, la aplicación y el modelo matemático o físico considerado para definir la altura. De esta manera se distinguen dos grupos: alturas de tipo geométrico (elipsoidales y niveladas) y alturas de tipo físico (ortométricas, dinámicas y normales) (Sánchez, 2008). Por fines prácticos, se darán a conocer el tipo de alturas que fueron empleadas para el desarrollo de la investigación.

Se empleó alturas elipsoidales, debido a que al estar referidas a una superficie matemática regular, los cálculos que se hagan sobre esta superficie, serán relativamente fácil de realizar, en comparación a los cálculos que se realicen sobre el geoide. La altura elipsoidal es del tipo geométrico, la cual se mide sobre la línea normal, desde un punto en la superficie topográfica hacia su correspondiente en la superficie del elipsoide, como se observa en la Figura 7 (Drewes, Sánchez, Blitzkow, & Freitas, 2002).

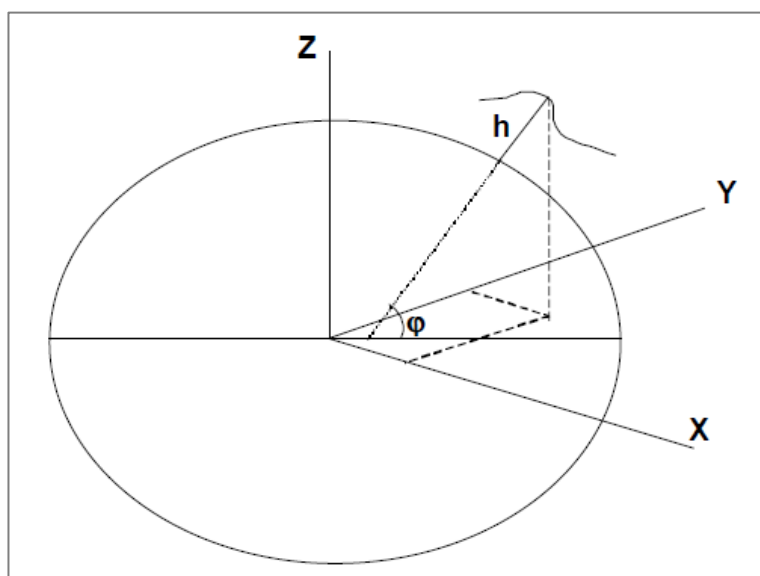


Figura 7. Altura Elipsoidal

Fuente: (Drewes, Sánchez, Blitzkow, & Freitas, 2002)

Otro tipo de alturas empleadas en la investigación fueron las alturas ortométricas, debido a que el modelo digital de elevación SRTM (“*Shuttle Radar Topography Mission*”), refiere las alturas al geoide EGM96. Siendo necesario tener claro que la altura ortométrica es del tipo físico y utiliza para su estimación los números geopotenciales (C) divididos para el valor medio de la gravedad real entre el geoide y la estación evaluada (\bar{g}), como se aprecia en la Figura 8. Para calcular esta altura se emplea la Ecuación 10.

$$H_{ortom} = \frac{C}{\bar{g}} \quad (10)$$

Este tipo de alturas presentan un inconveniente, ya que no es posible conocer el valor medio de la gravedad real. Para medir la gravedad real se parte desde la superficie topográfica y continua a lo largo de la línea de la plomada, requiriendo de la formulación de modelos sobre la distribución de densidad de las masas terrestres (Drewes, Sánchez, Blitzkow, & Freitas, 2002)

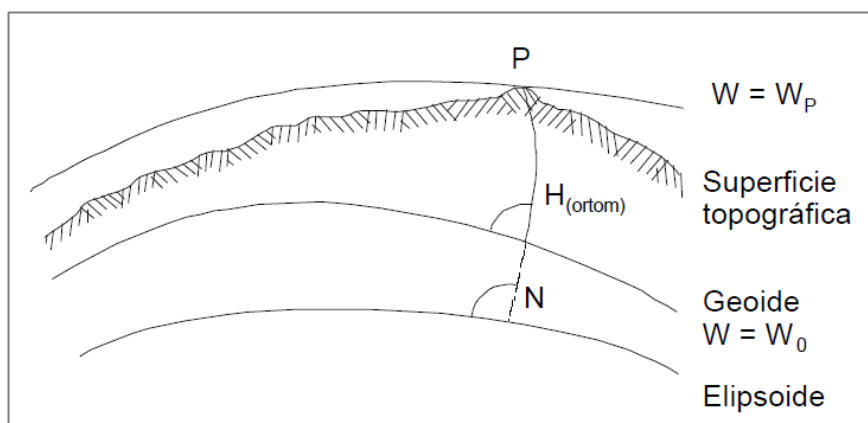


Figura 8. Altura Ortométrica

Fuente: (Drewes, Sánchez, Blitzkow, & Freitas, 2002)

2.1.2.3 Sistema de Referencia

Los sistemas de referencia permiten guardar concordancia en la información geométrica levantada por varios proyectos de un mismo territorio. Estos sistemas definen conceptualmente: teorías, hipótesis y constantes que sitúan una tripleta de ejes coordenados en el espacio, definiendo su origen y orientación. (Furones, 2011).

En la actualidad se ha optado por utilizar sistemas de referencia global, para que la información geográfica de un territorio determinado, pueda enlazarse sin problema, con la información de los territorios vecinos y del mundo en general. Ha sido posible plantear este tipo de sistemas a nivel global, debido a que hoy en día, se cuenta con mediciones de alta precisión, obtenidas mediante el uso de satélites artificiales (Figura 9), asociadas a un elipsoide de referencia, el cual está centrado, coincide con el centro de masas de la tierra, ajustando el elipsoide y geoide a nivel global, de manera que el elipsoide compense las ondulaciones del geoide. (Sánchez, 2008).

Los sistemas de referencia modernos se definen por un datum global, el cual se caracteriza por tener un origen que coincide con el centro de masa de la tierra (geocentro), su orientación concuerda con el eje de rotación de la tierra y la escala está en función de la velocidad de la luz o la constante geocéntrica GM (Sánchez, 2008).

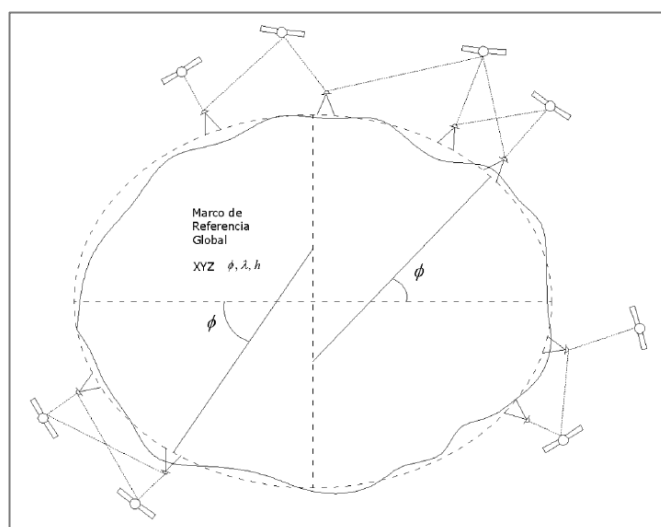


Figura 9. Sistema de Referencia Global

Fuente: (Sánchez, 2008)

Si bien los sistemas de referencia global presentan ventajas respecto a los sistemas de coordenadas topocéntricas, en la actualidad los levantamientos topográficos clásicos los siguen empleando. Para definir un sistema de coordenadas topocéntricas, se utiliza una terna ordenada de ejes cartesianos que cumplen las siguientes condiciones (Figura 10): el eje X orientado hacia un norte arbitrario, el eje Y normal y dextrógiro (giro a hacia la derecha) al eje X y el eje Z coincidente en cada estación con la normal a la superficie de nivel que pasa por el punto (vertical del lugar). Además el plano horizontal de referencia es tangente a la superficie de nivel que pasa por la línea de los índices (90° - 270°) del instrumento. Para determinar la posición de un punto en el espacio se utilizan dos coordenadas planas y un valor de altura sobre el plano horizontal de referencia, empleando generalmente dos orígenes independientes y arbitrarios; un datum planimétrico y uno altimétrico (Sánchez, 2008).

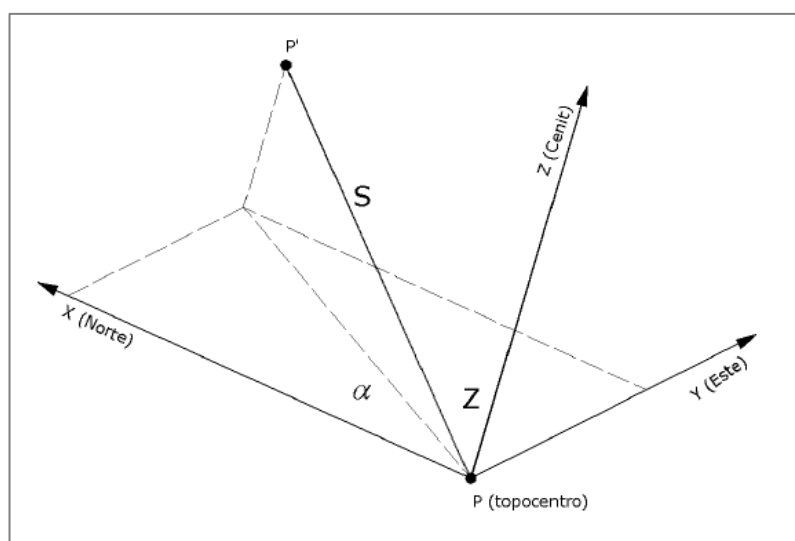


Figura 10. Sistema Local Topocéntrico

Fuente: (Sánchez, 2008)

2.1.2.4 Sistema de coordenadas

Los sistemas de coordenadas buscan parametrizar las coordenadas de los puntos que forman el marco de referencia, existiendo infinitos sistemas de coordenadas, por

ejemplo las coordenadas (x,y,z) , (φ,λ,H) , (E,N,h) , etc (Furones, 2011). A continuación se explicará las coordenadas relevantes para la investigación.

El primer sistema de coordenadas de interés para la investigación es el sistema de coordenadas cartesianas en el espacio, las cuales están formadas por una terna ordenada de ejes mutuamente perpendiculares (XYZ) . Un punto ubicado en el espacio, está definido por la distancia que lo separa a cada eje, definiéndose de esta manera tres coordenadas (X,Y,Z) . Al llevar este sistema de coordenadas a la geodesia, se debe cumplir con los siguientes parámetros (Sánchez, 2008): el origen del sistema debe coincidir con el centro de masas de la tierra, el eje Z debe coincidir con el eje de rotación de la tierra y formar un ángulo recto con el eje X, el plano ecuatorial medio debe ser perpendicular al eje Z (plano XY), el Plano XZ debe ser generado por el plano del meridiano origen y el eje Y coincide con el plano ecuatorial y forma un ángulo recto con el eje X. Como se observa en la Figura 11, se ha definido un sistema dextrógiro (giro hacia la derecha) (Sánchez, 2008).

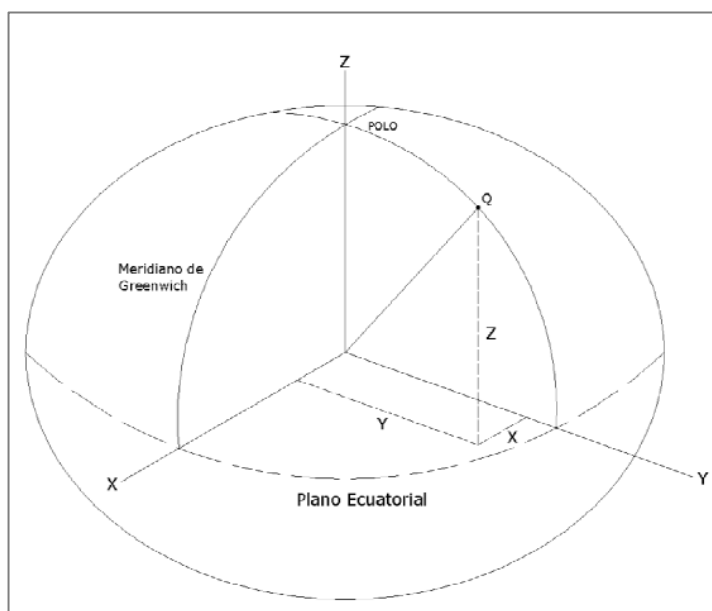


Figura 11. Coordenadas Cartesianas

Fuente: (Sánchez, 2008)

El segundo sistema de coordenadas de interés, son las coordenadas geodésicas, las cuales utilizan el elipsoide de revolución para estudiar analíticamente a la Tierra,

siendo necesario definir algunas líneas de referencia, con el fin de establecer sobre la superficie del elipsoide la posición de un punto. El elipsoide al rotar en torno a su semieje menor (b), el plano normal levantado en el punto medio se denomina plano ecuatorial, la intersección de este plano con el elipsoide generará una línea de círculo máximo llamado Ecuador, dividiendo al elipsoide en dos mitades, hemisferio Norte y Sur (Sánchez, 2008).

Los infinitos planos paralelos al intersecarse con el Ecuador, formarán líneas de círculo menores denominadas paralelos. Los infinitos planos que contengan al eje de rotación, al intersecarse con el elipsoide generarán líneas llamadas meridianos, estableciéndose como origen de los meridianos al que pasa por el observatorio de Greenwich. Ahora un punto sobre el elipsoide estará conformado por dos coordenadas, la latitud que es el ángulo formado entre el plano ecuatorial y la normal al punto considerado, mientras que la longitud es el ángulo diedro formado por un plano meridiano de origen y el plano meridiano del punto considerado, como se observa en la Figura 12 (Sánchez, 2008).

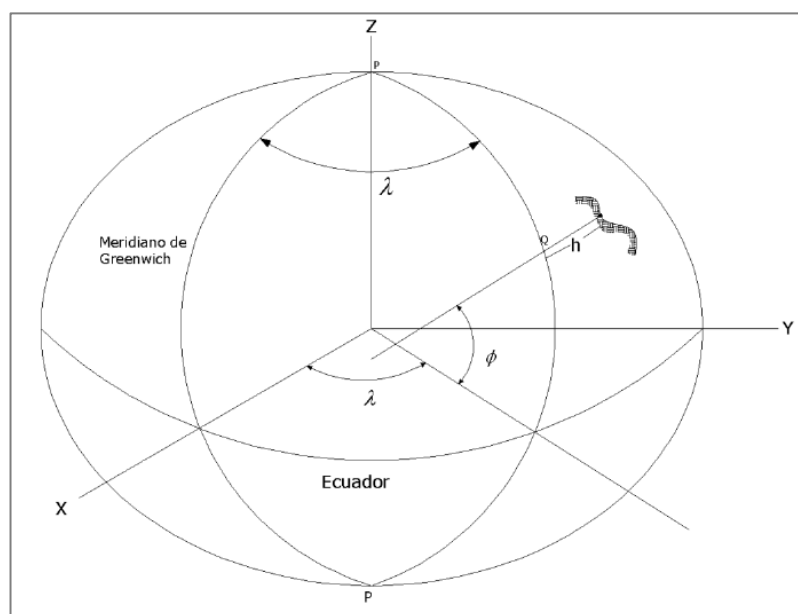


Figura 12. Coordenadas Geodésicas

Fuente: (Sánchez, 2008)

Finalmente el último sistema de coordenadas de interés, son las coordenadas planas que se pueden observar en la Figura 13, tienen su origen cuando las coordenadas geográficas son proyectadas sobre un plano y se miden en unidades de longitud. Estas coordenadas también se las conoce como coordenadas locales, debido a que pueden tener distintos orígenes, pero siempre referidas como Este y Norte (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2007).

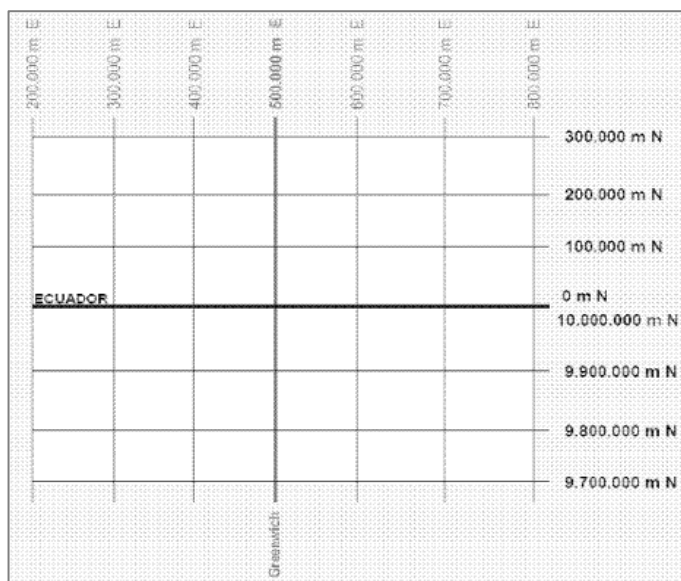


Figura 13. Coordenadas Planas

Fuente: (Mora, 2007)

2.1.2.5 Radio medio terrestre

Es de interés analizar el radio medio terrestre, ya que es una constante que influye en el cálculo de los factores que permiten determinar las deformaciones producidas por las proyecciones. El radio medio terrestre, se obtiene mediante el cálculo de la raíz cuadrada del producto de los valores N y M que son conocidos como radios de curvatura de las secciones principales en cada punto. Una de las secciones es el propio meridiano, y la otra sección es la producida al elipsoide por el plano que contiene a la normal en el punto (Sánchez, 2008). Para su cálculo se emplean las siguientes ecuaciones:

$$N = \frac{a}{\sqrt{[1 - (e^2 \cdot \text{sen}^2 \phi)]}} \quad (11)$$

$$M = \frac{a(1 - e^2)}{\sqrt{[1 - (e^2 \cdot \text{sen}^2 \phi)]^3}} \quad (12)$$

$$R = \sqrt{M \cdot N} \quad (13)$$

Donde:

e^2 es la primera excentricidad

ϕ es la latitud geodésica

N es la normal principal

M es el radio de curvatura de la elipse meridiana

2.1.3 Sistemas de Información Geográfica

Se utilizó el sistema de información geográfica para realizar el análisis espacial, debido a su estructura conformada por: un sistema computarizado, programas, datos con atributos y datos georreferenciados; además de contar con herramientas que se caracterizan por poseer una gran capacidad de procesamiento gráfico y alfanumérico para capturar, almacenar, analizar y visualizar la información geoespacial (Millar, 2003).

2.1.4 Topografía

La topografía resulta beneficiada de la resolución del problema de investigación, debido a que esta ciencia se encarga del estudio de los instrumentos, el conjunto de principios y procedimientos para representar gráficamente y a detalle, una parte de la superficie terrestre lo suficientemente pequeña para que pueda considerarse sin error apreciable. Para realizar las representaciones se utiliza un conjunto de operaciones que

reciben el nombre de levantamiento topográfico, fruto de estas operaciones se obtiene la representación gráfica denominada plano, el cual es el resultado de proyectar los puntos más interesantes y característicos del terreno sobre un plano horizontal. En el caso de tener que representar una zona de gran extensión, donde no se puede prescindir de la curvatura terrestre; los trabajos se fundamentarán en los vértices geodésicos que existan en la zona (Valdés, 1981).

2.1.4.1 Plano Topográfico Local

Una de las herramientas topográficas indispensables para la resolución de la problemática de investigación fue el Plano Topográfico Local (PTL), debido a que es un sistema de representación de las posiciones de los puntos de un levantamiento topográfico, respecto a un origen de coordenadas geodésicas conocidas, que se lo realiza sobre un plano. En este sistema, todos los ángulos y distancias de las operaciones topográficas se encuentran proyectados su verdadera magnitud sobre un plano tangente a la superficie de referencia (elipsoide de referencia), donde no se toma en cuenta la curvatura terrestre. Esta abstracción es válida, cuando los levantamientos topográficos abarcan áreas relativamente pequeñas. La ventaja que implica usar un PTL, es el simple cambio de parámetros de origen, en el caso que ocurra un cambio en el referencial geodésico, esto es posible gracias a que las coordenadas topográficas locales mantiene la misma relación geométrica (Idoeta, 2002). Este sistema se observa en la Figura 14.

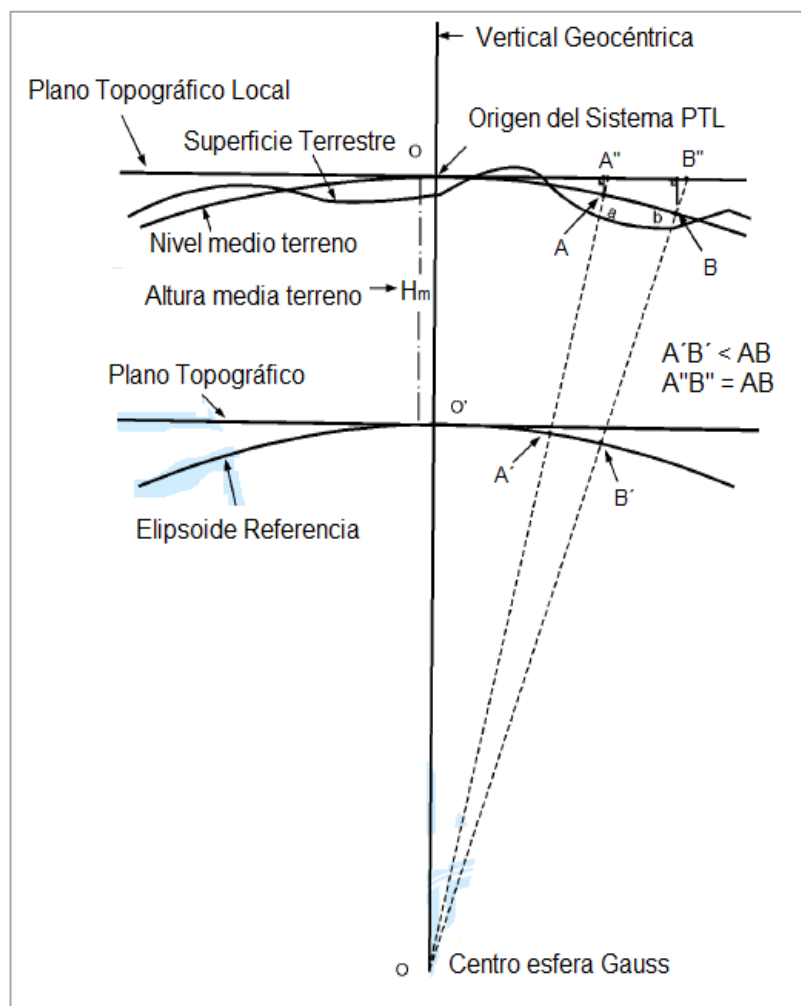


Figura 14. Plano Topográfico Local

Fuente: (ABNT, 1998)

2.1.5 Teledetección

La teledetección se empleó para analizar y utilizar el modelo digital de elevación SRTM (“*Shuttle Radar Topography Mission*”), ya que es una técnica que permite obtener imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales; su fundamento científico se basa en la interacción energética que existe entre la Tierra y el sensor, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial generado por el propio sensor (Chuvieco, 1995).

2.1.5.1 Modelo Digital de Elevación

Se utilizó un modelo digital de elevación (DEM), debido a que es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie terrestre, la cual está referida a un datum. La altura que presenta este tipo de modelos considera la altura de edificios y árboles. Un DEM se diferencia de un modelo digital del terreno (DTM) ya que este último representa la altura del terreno en sí, es decir, que no se consideran los objetos que están sobre la superficie terrestre (Galván, 2014).

2.1.5.2 Shuttle Radar Topography Mission

Se utilizó el modelo digital generado por la misión científica *Shuttle Radar Topography Mission*, más conocida por sus siglas en inglés (SRTM), debido a que fue el primer DEM de alta resolución de la Tierra. El proyecto fue una iniciativa conjunta de la NASA, la NGA4 del Departamento de Defensa de Estados Unidos, el DLR5 y la ASI6. Se utilizaron dos antenas de radar para obtener datos de interferometría de radar y luego fueron procesados a datos topográficos digitales con resolución de un segundo de arco (Galván, 2014).

El objetivo de la misión SRTM fue generar un DEM de toda la Tierra entre los 60° de latitud norte y 56° de latitud sur, abarcando alrededor del 80 %, de la superficie terrestre. El producto cartográfico que se obtuvo, consiste en una cuadrícula de 1 segundo de arco (aproximadamente 30 m), con un error en la altura absoluta menor a 16 m y un error de altura relativa menor a 10 m, el error de posición absoluta circular es menor a 20 m y el error de posición relativa circular es menor a 15 m (Galván, 2014).

2.1.6 Tipos de distancias

Las distancias se clasifican en función de la superficie de referencia a la cual se encuentran referidas, a continuación se detallará cada una de las distancias existentes, las cuales se pueden apreciar en la Figura 15.

La distancia cartográfica, también conocida como distancia de cuadrícula o proyectada, se obtiene a partir de las coordenadas de proyección Gauss-Krüger (planas), que resulta ser un vector recto, proyectado sobre un plano tangente al elipsoide con respecto a un meridiano, cuya magnitud es mayor que la de la distancia real, a medida que se aleje del origen de la proyección (Sánchez, 2008).

La distancia inclinada, también conocida como distancia espacial, está referida al terreno y equivale a la magnitud del vector determinado por posicionamiento diferencial GNSS (Sánchez, 2008). Mientras que la distancia topográfica, se obtiene mediante mediciones realizadas con estación total o cualquier otro equipo de la topografía clásica, este tipo de distancias se encuentra reducida a un plano horizontal local, además utiliza una proyección ortogonal cuyo eje vertical coincide con la dirección de la plomada de la primera estación (Sánchez, 2008).

Por último la distancia geodésica, también conocida como distancia elipsoidal, es la distancia entre dos puntos obtenida a partir de dos coordenadas curvilíneas (φ, λ) , obteniendo como resultado un vector curvo (Sánchez, 2008).

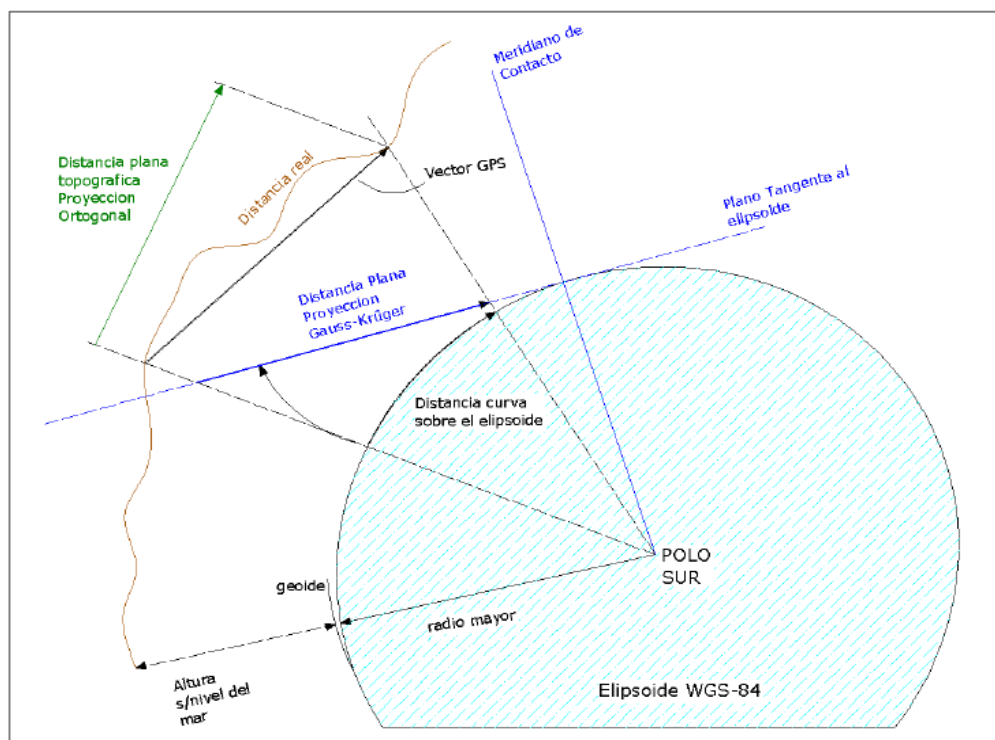


Figura 15. Tipos de distancias

Fuente: (Sánchez, 2008)

2.1.7 Reducción de observables

Se concibe a la reducción de observables, como un conjunto de problemas que ha sido estudiado ampliamente por la geodesia clásica, debido a que las magnitudes de las medidas que se realizan en la superficie terrestre, deben trasladarse sobre el elipsoide. En la práctica es de suma importancia que la superficie de referencia posea la menor diferencia con respecto a la figura real de la tierra, consiguiendo que las magnitudes medidas sobre la superficie terrestre, se asemejen a sus correspondientes en el elipsoide (Sánchez, 2008).

En la actualidad es importante conocer los problemas asociados a las reducciones, debido a que se ha optado por combinar mediciones clásicas de estación total con mediciones GNSS en los levantamientos topográficos, las primeras mediciones corresponden a la superficie de la tierra, mientras que las segundas están referidas al elipsoide. Las necesidades actuales, requieren que las coordenadas finales de un

levantamiento se encuentren expresadas en un sistema de referencia global, demostrando la necesidad de reducir las mediciones clásicas a la superficie del elipsoide (Sánchez, 2008).

2.1.7.1 Reducción al nivel del elipsoide

Para realizar la reducción al nivel del elipsoide, se parte de la premisa que se trabajará con dos tipos de distancias, la primera es la distancia reducida al horizonte (cuando se trabaja con estación total), mientras que la segunda es la distancia geométrica (inclinada), a la cual se la deberá reducir al horizonte. Luego es necesario considerar la magnitud de las distancias, si las mismas no superan los 10 kilómetros se puede suponer la hipótesis de una tierra plana, que presenta líneas verticales paralelas, obteniendo distancias planas reducidas al horizonte del instrumento. En el caso de que las distancias medidas sean extensas (distancias geodésicas de primer y segundo orden), se debe considerar la curvatura terrestre, para realizar la reducción a una altura media entre el punto de estación y el extremo de la línea (distancia reducida al horizonte medio), como se observa en la Figura 16 (Sánchez, 2008).

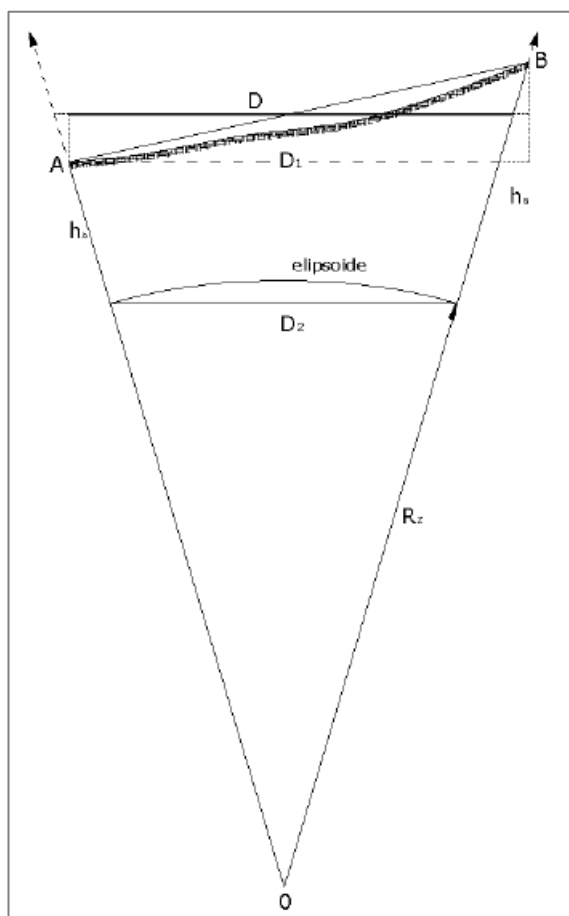


Figura 16. Reducción al nivel del elipsoide

Fuente: (Sánchez, 2008)

La diferencia que existe entre la distancia reducida al horizonte del instrumento (siendo perpendicular a la dirección de la línea vertical) y la distancia reducida que es perpendicular a la dirección normal al elipsoide en el punto, se conoce como desviación de la lineal vertical. Esta diferencia puede ser despreciada en todos los casos (Sánchez, 2008).

Para proyectar la longitud medida entre dos puntos en el terreno (distancia horizontal) sobre el elipsoide de referencia se emplea el factor de reducción al elipsoide (Herrera, 2017), las ecuaciones que se emplean para realizar esta reducción se detallan a continuación:

$$L_{elip} = K_h \cdot L_{top}$$

(14)

$$K_h = 2 - \frac{R+h}{R} \quad (15)$$

Donde:

L_{elip} es la distancia elipsoidal

L_{to-p} es la distancia topográfica

R es el radio medio.

h es la altura elipsoidal media del terreno.

2.1.7.2 Reducción de la distancia topográfica a distancias de cuadrícula

Se reduce la distancia hacia el elipsoide o al plano de proyección, para que las magnitudes de las distancias medidas, sean similares, independiente del tipo de distancia y del método utilizado para medirla. Para transformar la distancia topográfica a distancia de cuadrícula se empleará el factor combinado (Herrera, 2017), para lo cual se emplean las dos siguientes ecuaciones:

$$L_{cuad} = K_{comb} \cdot L_{top} \quad (16)$$

$$K_{comb} = K_h * K_{esc} \quad (17)$$

Donde:

L_{cuad} es la distancia de cuadrícula

L_{top} es la distancia topográfica

K_{comb} es el factor combinado

K_h es el factor de reducción al elipsoide

K_{esc} es el módulo de deformación lineal

Cuando se transforma la distancia topográfica en distancia de cuadrícula se generan cuatro escenarios en función de las condiciones en donde se realice el levantamiento topográfico. El primer escenario, se presenta en una zona de alta anamorfosis lineal (por lo general se produce en el extremo de la zona de proyección) y reducciones al elipsoide despreciables (zona que no presenta una considerable variación de alturas). Las coordenadas que se obtengan al emplear la estación total, no serán coordenadas de proyección TM, si no se ha considerado el factor de anamorfosis lineal. Para que las distancias y por ende las coordenadas correspondan al plano de proyección, se debe multiplicar las distancias medidas por el factor de anamorfosis del lugar (K_{esc}) (Sánchez, 2008).

El segundo escenario se presenta, cuando la zona de trabajo se encuentra próxima al meridiano central, en donde se puede despreciar el módulo de deformación lineal, por la característica matemática de la proyección TM, pero existe una considerable variación en las alturas elipsoidales, que obliga a realizar el cálculo de reducción al elipsoide. En el caso de utilizar directamente las distancias medidas, no se puede hablar de coordenadas de proyección TM, debido a que el plano de proyección considera el nivel del elipsoide y no la altura de la superficie topográfica (Sánchez, 2008). Por consiguiente se deberá corregir las distancias topográficas empleando el factor combinado (K_{comb}) para transformarlas en distancias de cuadrícula o el factor de elevación (K_h) para transformarlas en distancias elipsoidales.

Los últimos dos escenarios se presentan cuando se debe considerar ambos factores, es decir, reducir las distancias al elipsoide y luego aplicar el módulo de anamorfosis lineal o cuando ambas reducciones se “compensan”, lo cual sucede cuando la reducción al elipsoide acorta las distancias y la anamorfosis lineal las deforma haciéndolas mayores. Entonces si ambas correcciones son iguales (en valor absoluto), las distancias medidas con estación total podrán considerarse como distancias en el plano de proyección (Sánchez, 2008).

2.1.7.3 Reducción de distancias elipsoidales al plano de proyección

Se realiza la reducción de distancias elipsoidales al plano de proyección, debido a que la familia de proyecciones TM, al ser proyecciones del tipo conforme, no conserva las distancias. Para conocer la deformación que sufren las distancias, se emplea la anamorfosis lineal que sirve para determinar la variación de la distancia de cuadrícula respecto a su correspondiente en el elipsoide, la anamorfosis es de carácter puntual, pero en ocasiones su variación es tan pequeña, que se opta por tomar un valor medio para toda la zona de trabajo, siempre y cuando se cumplan con las precisiones del proyecto, vale destacar que no es necesario reducir las distancias cuando se emplee el sistema de proyección UTM para generar cartografía menor a escala 1:25.000, debido a que la escala absorberá los errores causados por la deformación. Cuando se realizan trabajos cercanos al meridiano central, donde la anamorfosis lineal es próxima a la unidad, las distancias de cuadrícula en esta zona varían muy poco con respecto a las distancias elipsoidales (Sánchez, 2008).

Para proyectar la distancia de cuadrícula sobre el elipsoide, se debe calcular el módulo de anamorfosis lineal, ya sea para la línea o para la zona de trabajo, en el punto 2.1.1.3 se explicó como calcular este módulo para las proyecciones TM, luego se procede a utilizar la Ecuación 18 para obtener la distancia de cuadrícula o la distancia elipsoidal, en función del dato de partida que se tenga.

$$L_{cuad} = K_{esc} \cdot L_{elip} \quad (18)$$

2.2 Fundamentación Legal

El presente proyecto de investigación se ampara en la decimoséptima disposición transitoria de la Constitución de la República del Ecuador, la cual señala que: “El Estado central, dentro del plazo de dos años desde la entrada en vigencia de esta Constitución (21 de octubre del 2008), financiará y, en coordinación con los gobiernos autónomos descentralizados, elaborará la cartografía geodésica del territorio nacional para el diseño de los catastros urbanos y rurales de la propiedad inmueble y de los

procesos de planificación territorial, en todos los niveles establecidos en esta Constitución” (Asamblea Nacional del Ecuador, 2008). Es de aquí que se destaca la importancia del proyecto de investigación, debido a que si los técnicos encargados de elaborar la cartografía geodésica, no cuentan con las herramientas técnicas y científicas necesarias, cualquier inversión será inútil, ya que los trabajos no alcanzarán las precisiones requeridas.

En el artículo 17, de la Ley de la cartografía Nacional, que pertenece al capítulo II Cartas y Mapas, en el cual se abordan temáticas relacionadas al desarrollo de Cartografía no Oficial, se expone que: “La cartografía no oficial a escalas mayores de 1:10.000 podrá ser elaborada por personas naturales o jurídicas, a excepción de lo determinado en el Art. 9 de este Reglamento” (Instituto Geográfico Militar, 1978). En primera instancia el enunciado de este artículo causa preocupación debido a que no limita a los profesionales o entidades que puedan elaborar la cartografía, ahora si bien no es posible realizar la delimitación antes señalada, con el desarrollo del presente proyecto se espera dar a conocer conceptos y una metodología que permita generar cartografía a detalle, sin incurrir en incumplimientos de las precisión debido a las deformaciones causadas por la proyección o el uso combinado de técnicas de obtención de información geométrica de la superficie terrestre.

2.3 Hipótesis

El Sistema de Proyección Cartográfica Local propuesto asegura una mejor precisión planimétrica, para la cartografía generada a escalas 1:500 y 1:1.000, en comparación con el sistema de proyección Universal Transversa de Mercator.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

En la Figura 17, se detalla el flujo de trabajo que seguirá la metodología para cumplir con los objetivos de la investigación.

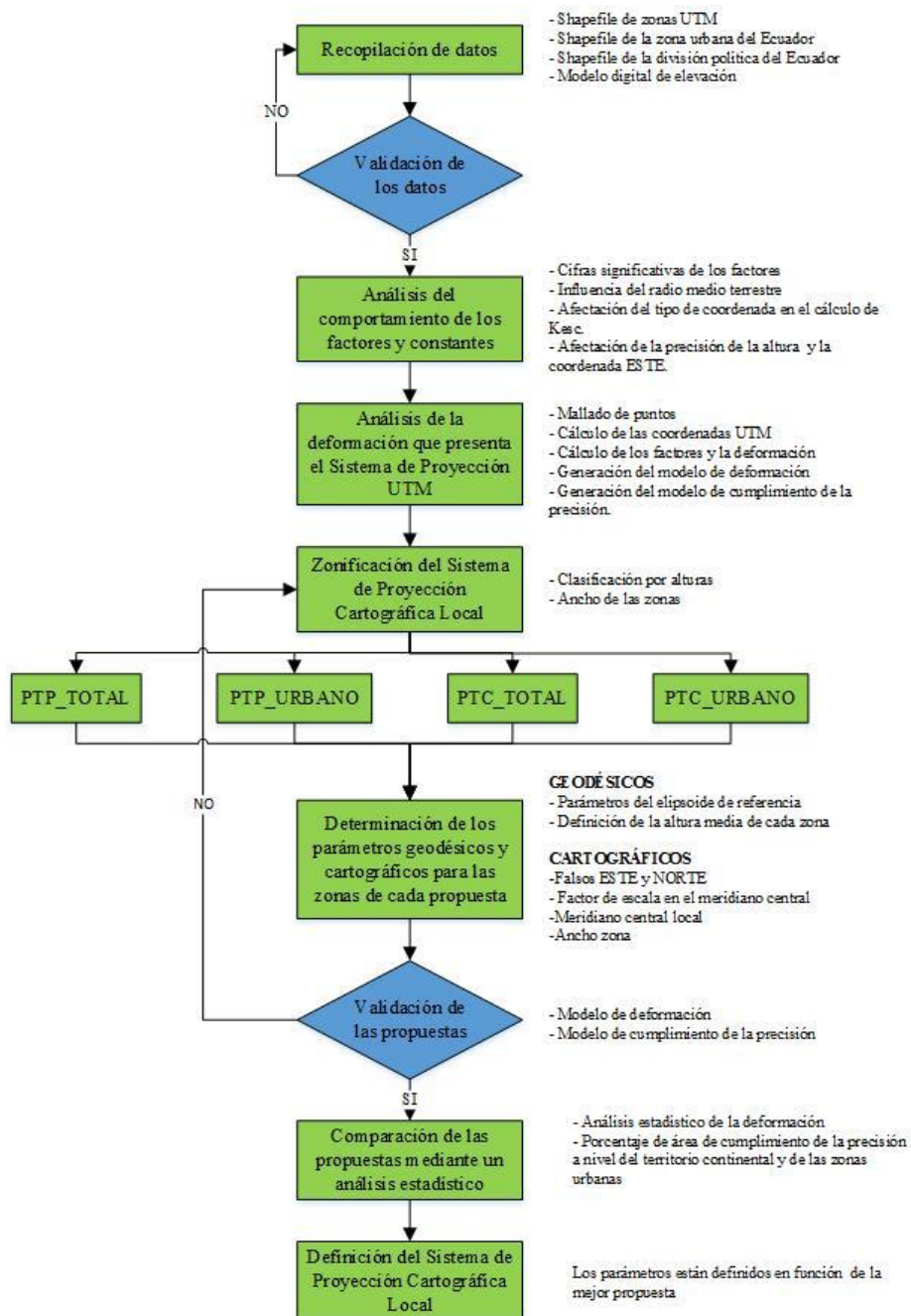


Figura 17. Flujo de trabajo de la metodología

3.1 Validez y confiabilidad de los datos

Los insumos utilizados para el desarrollo de la investigación fueron: un *shapefile* de polígonos que representan las zonas que conforman el Sistema de Proyección UTM, un *shapefile* de polígonos que representa las zonas urbanas que existen en el territorio continental, un *shapefile* de polígonos que representa la división administrativa del Ecuador a nivel cantonal y el modelo digital de elevación SRTM cuyas alturas son del tipo ortométricas. A continuación se detallará el procedimiento realizado para validar cada uno de los datos.

3.1.1 *Shapefile* de las zonas del Sistema de Proyección UTM

Para determinar que el *shapefile* de polígonos que representan las zonas que componen el Sistema de Proyección UTM, sirve para el desarrollo de la investigación, se realizó pruebas de topología para determinar que no existan traslajos entre los polígonos. El siguiente paso fue determinar si las zonas seguían una secuencia en su numeración, finalmente se sobrepuso el *shapefile* del límite del Ecuador Continental para determinar si las zonas 17 y 18 se intersecaban. El *shapefile* pasó todas las pruebas sin ninguna novedad, de esta manera se definió que el *shapefile* de zonas UTM a nivel mundial es apto para usarse.

3.1.2 *Shapefile* de las zonas urbanas del Ecuador continental

El *shapefile* de zonas urbanas del Ecuador continental fue obtenido del geoportal del Instituto Geográfico Militar, para determinar si éste servía para el desarrollo del proyecto, se hicieron pruebas de topología para evitar que existan zonas que se traslapen o polígonos repetidos, dichas pruebas las pasó sin problema alguno. De esta manera se definió que el *shapefile* de polígonos que representan las zonas urbanas del Ecuador continental es apto para usarlo en el desarrollo de la investigación.

3.1.3 *Shapefile* de límite político-administrativo a nivel cantonal

El *shapefile* de polígono que representa el límite político-administrativo a nivel cantonal de cada provincia del Ecuador, fue obtenido del portal del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Una vez que se obtuvo todas las provincias que conforman el territorio continental, se procedió a unir todos los *shapefiles*, para trabajar con un solo, como se observa en la Figura 18. El *shapefile* generado se evaluó mediante pruebas de topología, encontrando dos cantones que se sobreponían (Santiago y Limon Indanza), los cuales se eliminaron sin comprometer la continuidad espacial del *shapefile*. Otra de las correcciones realizadas fue definir una provincia para aquellos cantones que constaban como “zona sin delimitar” (Las Golondrinas, El Piedrero y Manga del Cura), debido a que el año de generación del *shapefile* fue 2007 y el último cantón en ser asignado a una provincia, fue Las Golondrinas, en el año 2016 (Espinosa, 2016).

Una vez corregido los problemas mencionados en el párrafo anterior, se procedió a generar el *shapefile* del Ecuador continental a nivel provincial, esto se consiguió aplicando la herramienta *dissolve* al *shapefile* del Ecuador continental a nivel cantonal. Finalmente se volvió a aplicar la herramienta antes mencionada al *shapefile* del Ecuador continental a nivel provincial, para obtener el límite del Ecuador Continental.

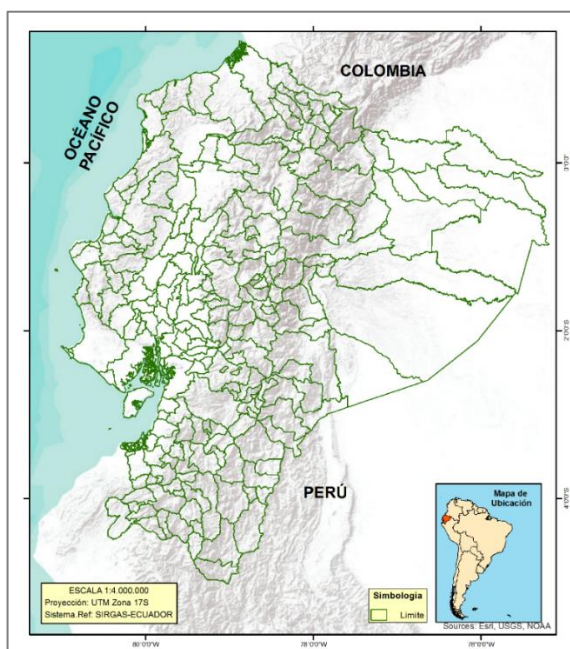


Figura 18. Límite cantonal

3.1.4 Modelo Digital de Elevación

Se generó el modelo digital de elevación de alturas elipsoidales, que se puede apreciar en la Figura 19, a partir del modelo de elevación SRTM. Debido a que se necesita de alturas elipsoidales para determinar la altura media de los Planos Topográficos Locales que conforman el Sistema de Proyección Cartográfica Local. Se utilizó como información de partida el modelo digital de elevación SRTM, debido a las características técnicas que presenta este modelo, las cuales pueden visualizarse en la Tabla 2, donde se menciona que la superficie de referencia del modelo digital es el EGM96 (Lemoine *et al*,1998).

Tabla 2.
Características técnicas del modelo SRTM

| | |
|------------------------------------|--|
| Proyección horizontal | Geográfica |
| Tamaño del pixel | 1 x 1 arco de segundo ~ 30 x 30 metros |
| Unidades de medida vertical | Metro |
| Referencia Horizontal | WGS84 |
| Referencia Vertical | Geoide EGM96 |
| Formato de datos | 16 bits, orden de byte IEEE |
| Valores sin datos | -32768 |

Fuente: (Farr *et al*, 2007)

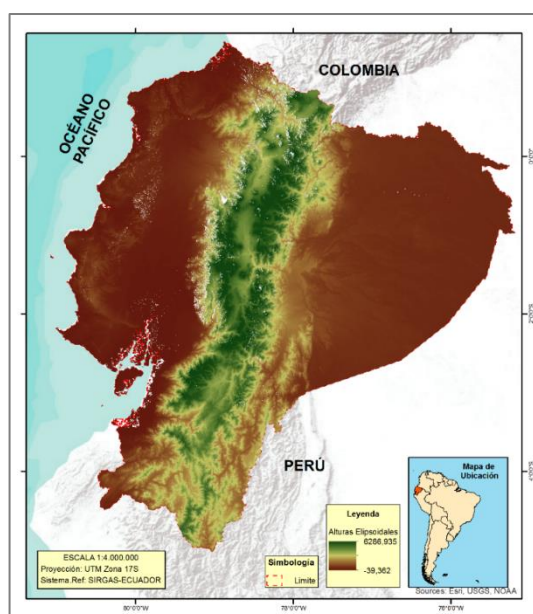


Figura 19. Modelo de alturas elipsoidales

Para transformar las alturas ortométricas del modelo digital de elevación SRTM en alturas elipsoidales, se procedió a dividirlo por cantones, donde a cada modelo digital de elevación cantonal se lo transformó en un *shapefile* de tipo punto, luego se calcularon las coordenadas geodésicas de cada punto y esa base de datos se transformó en un archivo .DAT, el cual se ingresó en el programa de la NASA para calcular la ondulación geoidal. Con ello se consiguió transformar las alturas ortométricas en alturas elipsoidales mediante el uso de la Ecuación 9, posteriormente se realizó el proceso inverso, el archivo .DAT se transformó en un *shapefile* de tipo punto y luego

este en un raster a nivel de cantón. Finalmente se unieron todos los modelos digitales de elevación cantonal para tener un modelo digital de alturas elipsoidales para el Ecuador continental, con las mismas características del modelo digital SRTM.

Para evaluar el modelo digital de alturas elipsoidales generado, se utilizó una base de datos facilitada por el Instituto Geográfico Militar, conformada por 1242 puntos con valores de GPS de precisión y valores de alturas niveladas, que se encuentran distribuidos como muestra la Figura 20. Los 1242 puntos son el resultado de depurar la base de datos en función de la ondulación geoidal, ya que se eliminó los puntos que tenían una ondulación geoidal superior a los 100 metros (Seeber, 2003). Una vez depurada la base de datos, el siguiente paso fue transformarla en un *shapefile* de puntos, con el cual se extrajo los valores del modelo digital. Finalmente se calculó la diferencia que existe en cada punto, entre la altura elipsoidal del modelo y su correspondiente con la base de datos del IGM, obteniéndose el cuadro estadístico que se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3.
Estadístico de la evaluación del modelo SRTM

| | |
|---|--------|
| Media de las diferencias absolutas (m) | 4,031 |
| Diferencia absoluta máxima (m) | 96,931 |
| Diferencia absoluta mínima (m) | 0,003 |
| Rango de las diferencias absolutas (m) | 96,927 |
| Desviación de las diferencias absolutas | 5,781 |
| Error del modelo digital de elevación (alturas elipsoidales) (m) | ± 0,27 |

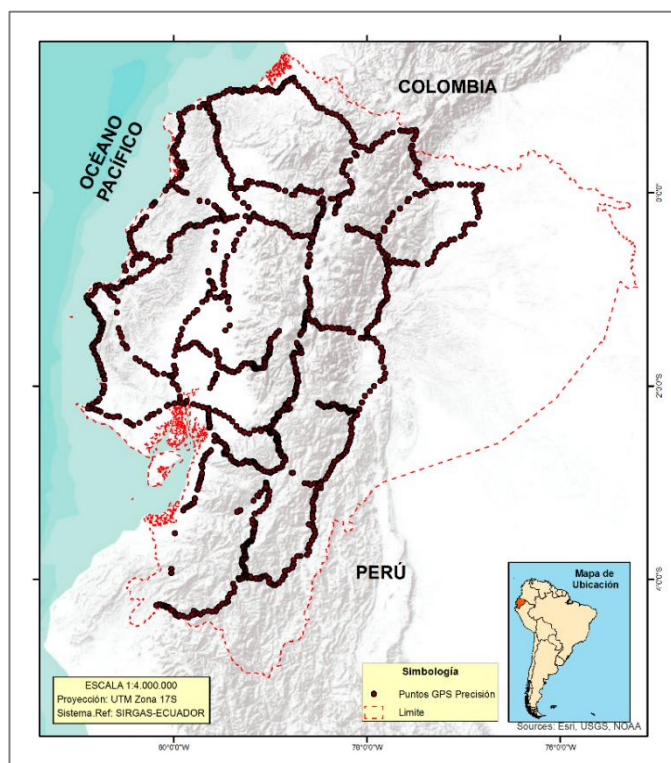


Figura 20. Distribución de los puntos GPS de precisión

Para conocer el porcentaje del territorio continental que quedaría sin cobertura por parte del modelo digital de alturas elipsoidales, se procedió a comparar la cantidad de pixeles que tiene el modelo, respecto a la del modelo digital de elevación generado por el Instituto Geográfico Militar, el cual tiene el mismo tamaño de pixel y cubre completamente al Ecuador continental. Obteniendo como resultado que el modelo digital de alturas elipsoidales, cubre el 92,7% de la superficie del Ecuador continental, siendo Mira el cantón que presenta mayor falta de cobertura con un 27.54%.

Finalmente se llegó a determinar que el modelo digital de elevación de alturas elipsoidales, es apto para usarse en el desarrollo de la presente investigación, ya que tiene un error probable de $4,031 \pm 0,27$ (m), a un nivel de confianza del 95%, el cual suficiente para determinar la altura media de los Planos Topográficos Locales, como se demostrará en el punto 3.2.4.

3.2 Análisis del comportamiento de los factores

Se analizó el comportamiento de los factores para asegurar la calidad y precisión de los resultados de la investigación. Las variables que se tomaron en cuenta para el análisis fueron: la cantidad de cifras decimales que deben manejar los factores, la precisión que deben tener tanto las constantes, como los insumos que se utilicen para calcular los factores.

3.2.1 Afectación de cifras decimales de los factores

Para conocer la influencia que tiene el número de cifras decimales de los factores sobre la determinación de las distancias y la deformación, se procedió a generar dos tablas. La Tabla 4 se utiliza para indicar la influencia que reciben las distancias, donde el encabezado superior indica cual fue la distancia medida, cuya magnitud para todos los casos fueron de 1800 (m), siendo dicha distancia la máxima recomendada para medir cuando se genere cartografía escala 1:1000 (Comisión Nacional de Riego, 2014). Las columnas de pie de tabla indican las distancias a las que se transformó la distancia dato, mediante el empleo de las Ecuaciones: (14), (16) y (18). Se puede observar claramente como la magnitud varió en función de la cantidad de cifras que se manejó en los distintos factores. En cambio, la Tabla 5, muestra la influencia de la cantidad de cifras decimales de cada factor, al ser expresados en unidades de deformación (m/Km), mediante el empleo de la Ecuación 4.

Los datos de partida empleados para generar ambas tablas fueron: un factor de reducción al elipsoide igual a 0,9990144, correspondiente a la mayor altura elipsoidal del Ecuador continental (6287 metros); un factor de escala perteneciente a una TM modificada en función de la altura antes mencionada de 1,0013301 correspondiente a una latitud de 2,75 grados y una variación de longitud de 1,5 grados (que representa al máximo ancho de la zona que se llegó a determinar) y un factor combinado de 1,0003432.

Tabla 4.
Influencia de cifras decimales sobre las distancias

| Ltop | | Lelip | | Lcuad | | Cifras Sign. |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------------|
| 1798,226 | 1800,618 | 1801,776 | 1802,394 | 1799,382 | 1797,609 | 7 |
| 1798,225 | 1800,617 | 1801,777 | 1802,394 | 1799,383 | 1797,609 | 6 |
| 1798,218 | 1800,612 | 1801,784 | 1802,394 | 1799,388 | 1797,609 | 5 |
| 1798,200 | 1800,540 | 1801,802 | 1802,340 | 1799,460 | 1797,663 | 4 |
| Lelip | Lcuad | Ltop | Lcuad | Ltop | Lelip | |

Tabla 5.
Influencia de cifras decimales sobre la deformación

| Cifras Decimales | Kh | m/Km | Kesc | m/Km | Kcomb | m/Km |
|-------------------------|-----------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| 7 | 0,9990144 | 0,986 | 1,0013301 | 1,330 | 1,0003432 | 0,343 |
| 6 | 0,9990140 | 0,986 | 1,0013300 | 1,330 | 1,0003430 | 0,343 |
| 5 | 0,9990100 | 0,990 | 1,0013300 | 1,330 | 1,0003400 | 0,340 |
| 4 | 0,9990000 | 1,000 | 1,0013000 | 1,300 | 1,0003000 | 0,300 |

Al analizar las tablas, se observa que el emplear entre seis y siete cifras en los factores, tiene una repercusión al nivel del milímetro en las distancias y no existe afectación apreciable en las deformaciones, por lo que se optó en utilizar siete cifras para expresar los factores, debido a que se necesitaba que los cálculos realizados sean lo más exactos posibles, para confirmar que el Sistema de Proyección Cartográfica Local cumple con las precisiones de la cartografía a detalle.

3.2.2 Afectación del radio de medio terrestre

Se analizó el radio medio, debido a que es una constante que repercute en el cálculo tanto el factor de escala, como el factor de reducción al elipsoide y por ende influye sobre el factor combinado. Es necesario aclarar que existen una infinidad de radios medios a nivel del Ecuador y de la Tierra en general, es por esto que se determinó el radio más adecuado para calcular los factores. Se utilizó la Ecuación 13, para calcular los distintos radios, primero se calculó el radio medio máximo y mínimo del Ecuador continental; el radio mínimo se lo obtuvo a una latitud de 0 grados, cuyo valor fue igual a 6377994,081 (m). Mientras que el máximo radio se lo obtuvo para una latitud

de 5.5 grados sur, cuyo valor fue de 6380043,186 (m). Finalmente se calculó un tercer radio a partir del promedio de radios obtenidos al variar la latitud un grado dentro del territorio continental, más los dos radios críticos antes mencionados. Obteniendo un radio medio de 6378946,409 (m).

En la Tabla 6, se observa la afectación de los radios medios antes mencionados en la determinación de los factores de escala, reducción al elipsoide y combinado. Al determinar que la diferencia entre los tres radios se producía desde el séptimo decimal, se optó por usar el radio medio promedio. En la Tabla 7 se observa como la precisión del radio medio afecta en el número de cifras decimales de cada factor.

El valor de los factores que aparecen en ambas tablas, son el resultado de las condiciones críticas mencionadas en el literal de las cifras decimales de los factores, la altura elipsoidal más alta del Ecuador continental y una coordenada ubicada en el borde de la zona.

Tabla 6.

Afectación de los distintos radios medio sobre los factores

| Radio Medio | Koh | Kh | Kesc | Kcomb |
|--------------------|------------|-----------|-------------|--------------|
| 6377994,081 | 1,0009857 | 0,9990143 | 1,0013303 | 1,0003432 |
| 6380043,186 | 1,0009854 | 0,9990146 | 1,0013300 | 1,0003432 |
| 6378946,409 | 1,0009856 | 0,9990144 | 1,0013301 | 1,0003432 |

Tabla 7.

Afectación de la precisión del radio medio sobre los factores

| Cifras Dec. | Ko | Kelev | Kesc | Kcomb |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 6378946,409 | 1,00098557577 | 0,99901442423 | 1,00133011972 | 1,00034323302 |
| 6378946,400 | 1,00098557577 | 0,99901442423 | 1,00133011973 | 1,00034323302 |
| 6378946,000 | 1,00098557583 | 0,99901442417 | 1,00133011979 | 1,00034323302 |

Se empleará el radio medio promedio para calcular todos los factores a lo largo de la investigación. La precisión que se manejará para los cálculos será al nivel del metro, debido a que utilizar una precisión milimétrica no mejora la precisión de los resultados y complica la verificación de los cálculos al tener que estar pendiente de digitar correctamente más cifras de las necesarias.

3.2.3 Afectación del tipo de coordenada en el cálculo del factor de escala

En la práctica se puede utilizar tanto las coordenadas geodésicas como las coordenadas planas, para calcular el factor de escala. Para visualizar el comportamiento del factor de escala al emplear los dos tipos de coordenadas, se utilizaron tres puntos expresados en los dos tipos de coordenadas. La ubicación de los puntos fueron las siguientes: el primer punto se ubicó cerca del meridiano central, el segundo se colocó en el medio de la zona y el último se situó en el borde de la zona. El valor de K_0 fue igual a 0.9996, debido a que se utilizó el sistema de proyección UTM para la demostración. En la Tabla 8, se observa que al emplear las Ecuaciones (6) y (7), la diferencia en cifras decimales se hace notoria cuando el punto se aleja del meridiano central, en el caso de la coordenada que se ubica en el borde de la zona, exactamente a 333924.123 (m), la diferencia entre usar el factor de escala con coordenadas geográficas respecto a las coordenadas planas, se produce en la quinta cifra decimal.

Tabla 8.

Diferencia al usar distintos tipos de coordenadas para calcular el factor de escala

| Latitud | Longitud | Este | x | Kesc (planas) | Kesc (geodésicas) |
|-----------|------------|------------|------------|---------------|-------------------|
| -2,194459 | -80,998039 | 500217,995 | 217,995 | 0,9996000 | 0,9996000 |
| -2,708722 | -79,200435 | 700057,199 | 200057,199 | 1,0000916 | 1,0000953 |
| -0,003050 | -78,000488 | 833924,123 | 333924,123 | 1,0009696 | 1,0009790 |

Al comparar el cálculo del factor de escala empleando ambos tipos de coordenadas, se concluye que las deformaciones más afectadas, serán las que se determinen en el borde de las zonas que conforman el Sistema de Proyección Cartográfica Local, utilizando coordenadas planas van resultar menos precisas que calcularlas utilizando coordenadas geodésicas. La variación que se produce en la quinta cifra del factor de escala y al nivel del centímetro en la deformación, no afectará considerablemente los resultados, pero es necesario tenerla en cuenta.

3.2.4 Afectación de la precisión de las alturas y la coordenada ESTE

Es necesario conocer como la precisión de los insumos, influye en el cálculo de los factores. Por ello se evaluó la influencia de la precisión de la altura elipsoidal más alta y baja del Ecuador continental sobre el factor de reducción al elipsoide, como se observa en la Tabla 9. En la Tabla 10, se demuestra como la precisión de la coordenada Este, influye en el factor de escala. Para ello se eligió tres puntos ubicados de la siguiente manera: el primero cerca del meridiano central, el segundo cerca del borde de la zona y el último en el medio de la zona. Todos estos puntos expresados en el sistema de proyección UTM.

En la Tabla 10, solo se hace mención a la precisión milimétrica y métrica, debido a que la variación al nivel del centímetro y decímetro, no produjo diferencia alguna en el número de cifras decimales y se optó por variar al nivel de los cinco metros, donde la variación se produjo en la séptima cifra. Es necesario destacar que no se hizo constar como afecta la precisión de las coordenadas geodésicas, debido a que usar cinco cifras decimales o más, afecta más allá de la séptima cifra significativa.

Tabla 9.

Afectación de la precisión de las alturas

| Altura | Kh | m/Km | Altura | Kh | m/Km |
|---------|------------|-------|----------|------------|-------|
| -39,362 | 1,00000617 | 0,006 | 6286,935 | 0,99901442 | 0,986 |
| -39,36 | 1,00000617 | 0,006 | 6286,93 | 0,99901442 | 0,986 |
| -39,3 | 1,00000616 | 0,006 | 6286,9 | 0,99901443 | 0,986 |
| -40 | 1,00000627 | 0,006 | 6288 | 0,99901426 | 0,986 |
| -49 | 1,00000768 | 0,008 | 6298 | 0,99901269 | 0,987 |
| -29 | 1,00000455 | 0,005 | 6278 | 0,99901582 | 0,984 |

Tabla 10.

Afectación de la precisión de la coordenada Este

| Coordenada | Este | Kesc | m/km | Precisión |
|------------|------------|------------|-------|-------------|
| 1 | 500217,995 | 0,99960000 | 0,400 | Milimétrica |
| 2 | 700057,199 | 1,00009159 | 0,092 | |
| 3 | 833924,123 | 1,00096960 | 0,970 | |
| 1 | 500222,000 | 0,99960000 | 0,400 | Métrica |
| 2 | 700062,000 | 1,00009162 | 0,092 | |
| 3 | 833929,000 | 1,00096964 | 0,970 | |

Cuando se analizan las tablas, se llega a la conclusión que las alturas que se empleen para determinar los Planos Topográficos Locales, no requieren de alta precisión, es por ello que se aceptó utilizar el modelo digital de elevación de alturas elipsoidales que cuenta con una precisión cercana a los cuatro metros, ya que como se observa en la Tabla 9, una precisión de 10 metros tiene una influencia al nivel del milímetro, en la determinación de las deformaciones. Mientras que la precisión de la coordenada ESTE no influye en la determinación de las deformaciones.

3.3 Análisis de las deformaciones que presenta la proyección UTM

Es necesario analizar las deformaciones que produce el Sistema de Proyección UTM, para conocer la realidad de la cartografía a detalle que se está generando en el país, además de servir como línea base para determinar si existe una mejora en la precisión planimétrica, cuando se emplee el Sistema de Proyección Cartográfica Local para generar cartografía a detalle.

3.3.1 Mallado de puntos

Se buscó la forma de modelar especialmente el comportamiento de las deformaciones producidas por el uso del Sistema de Proyección UTM, para lo cual se generó un mallado de puntos, el cual se obtuvo al resamplear el modelo digital de elevación de alturas elipsoidales utilizando el método de interpolación *nearest*, debido a que no se deseaba un cambio en el valor de las celdas. Pasando de un tamaño de pixel $\cong 30$ (m) a uno de $\cong 500$ (m), se escogió un tamaño de 500 (m), debido a que es la mitad de la distancia máxima que puede medirse para escalas 1:500 (Comisión Nacional de Riego, 2014). Posteriormente se transformó el modelo digital resampleado en un modelo vectorial de puntos, donde cada punto recibió el valor de la altura de cada pixel. De esta manera el Ecuador continental quedó conformado por 918884 pixeles, que cubren el 92.56% del área continental.

3.3.2 Cálculo de las coordenadas UTM

Se utilizó el *shapefile* de las zonas UTM a nivel mundial para determinar la zona a la cual pertenece cada punto del mallado, mediante un “*spatial join*” se escogieron a todos los puntos que cayeron sobre la zona 17, luego se definió en el sistema de información geográfica la proyección UTM 17 Sur y por medio del SIG se calcularon las coordenadas de cada punto. El mismo procedimiento fue realizado para los puntos que cayeron sobre la zona 18.

3.3.3 Cálculo de los factores y la deformación

Para calcular los factores y determinar la deformación, se transformó la base de datos alfanumérica del *shapefile* de puntos, en una hoja de cálculo, donde se calcularon los factores: de escala, reducción al elipsoide y combinado, según las Ecuaciones (7), (15) y (17). Finalmente se expresó el factor combinado en PPM y m/Km, como se observa en la Tabla 11, que es una muestra de las 918884 coordenadas empleadas para el cálculo de los factores y la deformación.

Tabla 11.

Muestra de los cálculos de los factores y la deformación para la proyección UTM

| Altura | Este | x | Kh | Kesc | Kcomb | PPM | m/Km |
|--------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|--------|
| 25 | 500218,00 | 218,00 | 0,999996 | 0,999600 | 0,999596 | 403,917 | 0,404 |
| 50 | 744569,89 | 244569,89 | 0,999992 | 1,000335 | 1,000327 | -326,850 | -0,327 |
| 75 | 830272,32 | 330272,32 | 0,999988 | 1,000940 | 1,000928 | -928,040 | -0,928 |
| 3500 | 500218,00 | 218,00 | 0,999451 | 0,999600 | 0,999052 | 948,460 | 0,948 |
| 4000 | 744569,89 | 244569,89 | 0,999373 | 1,000335 | 0,999707 | 292,582 | 0,293 |
| 4500 | 830272,32 | 330272,32 | 0,999295 | 1,000940 | 1,000234 | -233,700 | -0,234 |

3.3.4 Modelo de deformaciones

La base de datos generada en el punto anterior, fue convertida en un *shapefile* de puntos conformado por 918884 datos, a su vez este *shapefile* fue transformado en un raster, el cual tomó como valor del pixel la unidad de deformación (m/Km), obteniendo como resultado el modelo que se observa en la Figura 21, en donde la mayor

deformación alcanza un valor de 0,688 (m/Km), mientras que la mínima deformación es de -0,923 (m/Km). El modelo de cumplimiento permite visualizar claramente los meridianos automecoicos de la zona 17 y 18, que aparecen en color verde y se ubican entre el borde de las zonas (-78 grados) y los meridianos centrales (-81 grados para la zona 17 y -75 grados para la zona 18). En estas zonas se producen las deformaciones más pequeñas, demostrando gráficamente que el cilindro que emplea la proyección UTM es secante.

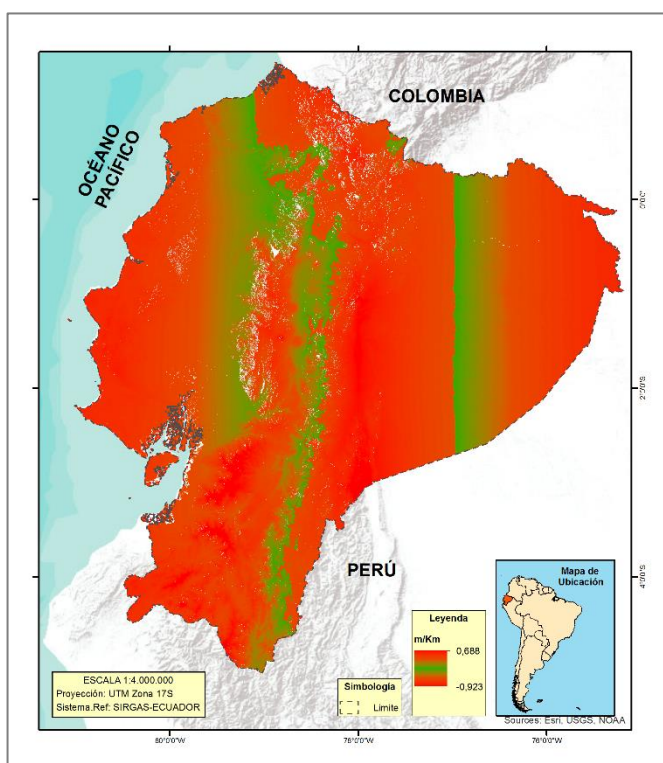


Figura 21. Deformación de la proyección UTM empleando el factor combinado

3.3.5 Modelo de cumplimiento de la precisión planimétrica

Para generar el modelo de cumplimiento escala 1:500, se creó un nuevo campo en la base de datos del *shapefile* de puntos de la deformación producida por el sistema de proyección UTM, donde se calculó el valor absoluto de las deformaciones, dicho campo sirvió para transformar el *shapefile* de puntos en un raster. Para obtener el valor

de la precisión, se utilizó el campo del valor absoluto de las deformaciones, debido a la relación directa que existe entre la precisión planimétrica y la deformación, en el caso particular de esta escala. Puesto que al multiplicar la máxima distancia (1 kilómetro) que se recomienda medir en los levantamientos topográficos para escala 1:500 (Comisión Nacional de Riego, 2014) por la deformación producida por la proyección, se obtiene el mismo valor de la deformación pero esta vez expresada en metros.

Por otro lado, para crear el modelo de cumplimiento para escala 1:1.000, se generó un campo adicional al *shapefile* de puntos de la deformación producida por el sistema de proyección UTM, en él se calculó la precisión, para ello se multiplicó el valor absoluto de la deformación de cada punto por 1,8. Se utilizó el valor de 1,8 debido a que este valor corresponde a la mayor distancia expresada en kilómetros, que se recomienda medir en un levantamiento topográfico para escala 1:1.000 (Comisión Nacional de Riego, 2014). Al realizar la multiplicación, se está transformando la unidad de deformación (m/Km) a una unidad de longitud (m), con la cual se puede interpretar el cumplimiento de la precisión establecida por el IGM. Finalmente se utilizó el campo generado para crear el raster de cumplimiento.

Para clasificar los raster generados para cada escala se utilizó como criterio la norma IGM, en donde se expresa que para obtener la tolerancia de cada escala se debe multiplicar el valor de la misma por 0,3 (mm). La constante de 0,3 representa la mínima distancia apreciada por el ojo humano. De esta manera se determinó que para escala 1:500 la precisión planimétrica es igual a 0,15 (m), mientras que para escala 1:1.000 la precisión es 0,30 (m) (Instituto Geográfico Militar, 2006).

Para el modelo de cumplimiento escala 1:500, se generaron dos grupos. El primer grupo estaba conformado por las precisiones mayores a 0,15 (m), el cual incumple con la precisión planimétrica y fue representado por el color rojo. Mientras que el segundo grupo estaba conformado por las precisiones menores a 0,15 (m), este grupo cumple con la precisión planimétrica por ello fue representado por el color verde. No se consideró el signo de las deformaciones, debido a que solo interesa la magnitud de las

deformaciones para el análisis del cumplimiento. Obteniendo como resultado el modelo de deformación que se observa en la Figura 22.

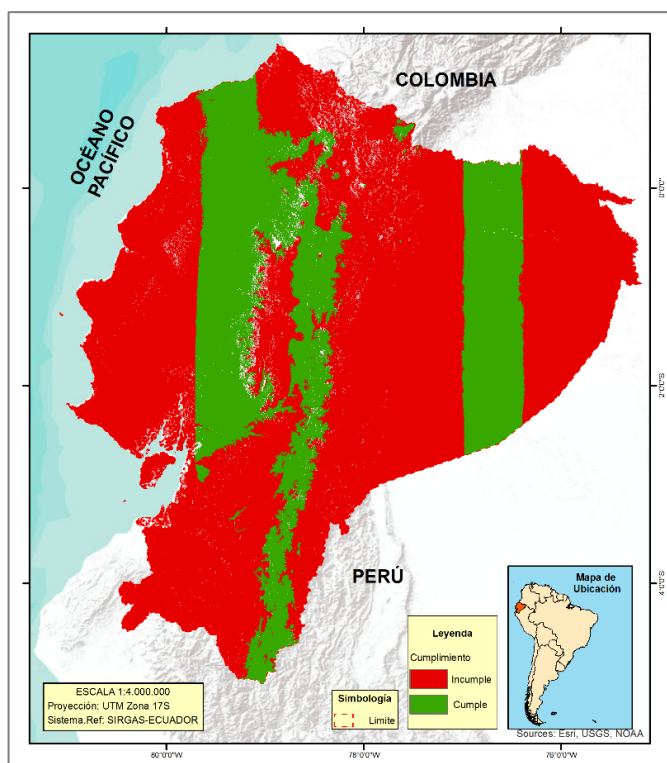


Figura 22. Cumplimiento de la precisión, escala 1:500

Para el modelo de cumplimiento de la escala 1:1000, se utilizó el raster generado a partir de la multiplicación entre el valor absoluto de la deformación de cada punto por 1,8 (distancia máxima recomendada a medirse para escala 1:1.000). Luego se procedió a generar dos grupos. El primer grupo representado por el color rojo, el cual incumple con la precisión planimétrica y está conformado por todos los valores superiores a 0,3 (m). Mientras que el grupo representado por el color verde, el cual cumple con la precisión planimétrica, está conformado por los valores inferiores a 0,3 (m). De esta manera el resultado de la clasificación se observa en la Figura 23.

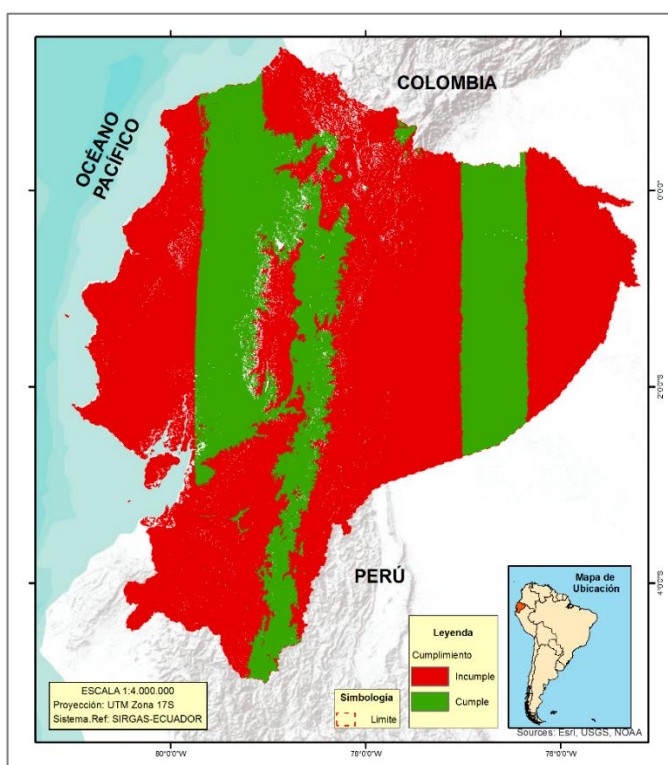


Figura 23. Cumplimiento de la precisión, escala 1:1000

3.4 Zonificación del Sistema de Proyección Cartográfica Local

Para crear el Sistema de Proyección Cartográfica Local es necesario delimitar las zonas que conformarán el sistema, para ello es necesario valerse de dos criterios, la altura media y el ancho de la zona (campo de proyección), estas dos variables permitirán controlar las deformaciones que se produzcan dentro de cada zona, permitiendo generar un sistema que cumpla con las precisiones requeridas para generar cartografía de detalle. Este paso originó la generación de cuatro propuestas, debido a que se consideró la altura media tanto a nivel de los límites políticos como a nivel de la zona urbana y el campo de proyección en función del límite cantonal y provincial.

3.4.1 Clasificación por alturas

Para delimitar las zonas en función de la altura media, se utilizaron dos criterios, el primer criterio consideró la altura media de todo el cantón o la provincia, mientras que el segundo criterio consideró la altura media de las zonas urbanas, a continuación se detalla el proceso realizado para determinar la altura media de cada criterio.

3.4.1.1 Altura media a nivel de cantón y provincia

Para obtener la altura media a nivel cantonal y provincial, se procedió a cortar el modelo digital de elevación empleando el límite cantonal y provincial, luego se agregó a la base de datos del *shapefile* de provincias y cantones un campo denominado “alt_med”, en el cual constaba el promedio de todos los píxeles que conformaban los modelos digitales de elevación a nivel cantonal y provincial.

3.4.1.2 Altura media a nivel de la zona urbana del cantón

Se utilizó el *shapefile* de zonas urbanas a nivel de Ecuador continental para obtener la altura media de la zona urbana de cada cantón. Para ello se escogió los polígonos que representaban a las cabeceras cantonales, cuando el cantón no tenía un polígono que representara a la cabecera cantonal se procedió a utilizar el polígono de la cabecera parroquial de mayor superficie y en el caso de no existir los dos tipos de polígonos antes mencionados, se recurrió al *shapefile* de poblados generado por el IGM, para escoger el punto que representara a la cabecera cantonal de los cantones que no tenía un polígono de la zona urbana, para obtener el dato de la altura media.

Se utilizaron los polígonos que representaban a las cabeceras cantonales y parroquiales, para recortar el modelo digital de elevación de alturas elipsoidales, una vez que se tenía el modelo digital de elevación de la zona urbana de cada cantón, se calculó el promedio de todos los píxeles que conformaban cada modelo. Finalmente se hizo constar el promedio antes mencionado, más altura de los puntos que

representaban las cabeceras cantonales de los cantones que no tenían un polígono de la zona urbana, en un nuevo campo generado en la base de datos del *shapefile* de cantón, el cual fue denominado “alt_urb”.

Para determinar la altura media de la zona urbana a nivel provincial, se utilizó el Sistema de Información Geográfica para escoger los cantones que pertenecen a una misma provincia, luego se empleó una herramienta estadística del SIG para determinar el valor promedio de la altura media de la zona urbana de todos los cantones que conforma la provincia y este valor fue registrado en la base de datos del *shapefile* de provincias.

3.4.2 Campo de proyección de las zonas

Para determinar el campo de proyección de las zonas, se empleó como criterio el límite político-administrativo a nivel cantonal y provincial, ya que es dentro del cantón donde se producen los proyectos de generación de cartografía catastral y son este tipo de proyectos los cuales necesitan contar con una proyección que garantice el cumplimiento de las precisiones establecidas por el IGM. Se consideró además el límite provincial debido a que existen proyectos especiales que no solo se rigen al límite cantonal y necesitan de un sistema de proyección que asegure las precisiones para generar cartografía a detalle.

3.4.2.1 Campo de proyección a nivel provincial

Para determinar el campo de proyección a nivel provincial se emplearon los dos *shapefiles* generados en la clasificación por alturas. El primer *shapefile* considera la altura media a nivel de toda la provincia, mientras que el segundo considera el promedio de la altura media de la zona urbana de todos los cantones que conforman la provincia. Para agrupar las provincias que iban a pertenecer a una misma zona, se eligió a las provincias que presentarán un altura media similar, pero como criterios más restrictivos se tomó en cuenta los tres siguientes: provincias vecinas, que ocupen

el menor ancho posible y en el caso de no ser provincias vecinas ingresen dentro de una misma franja en sentido norte-sur, debido a que las precisión de las zonas que conforman los sistemas de proyección TM, no reciben la influencia de la extensión del territorio a representar en sentido norte-sur. En la Figura 24, se observa la agrupación de las provincias tomando en cuenta la altura media de toda la provincia, mientras que en la Figura 25 se aprecia la agrupación de las provincias tomando en cuenta la altura media de la zona urbana a nivel provincial.

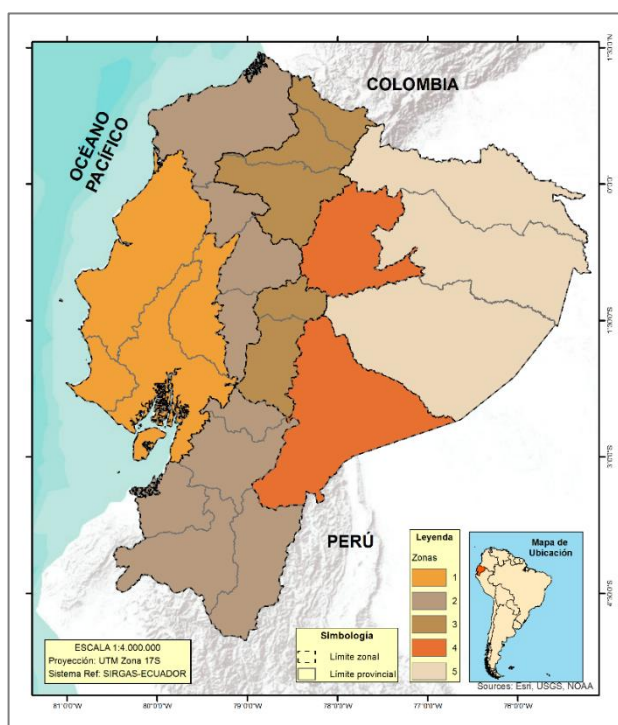


Figura 24. Campo de proyección de las zonas en función de la altura media de toda la provincia

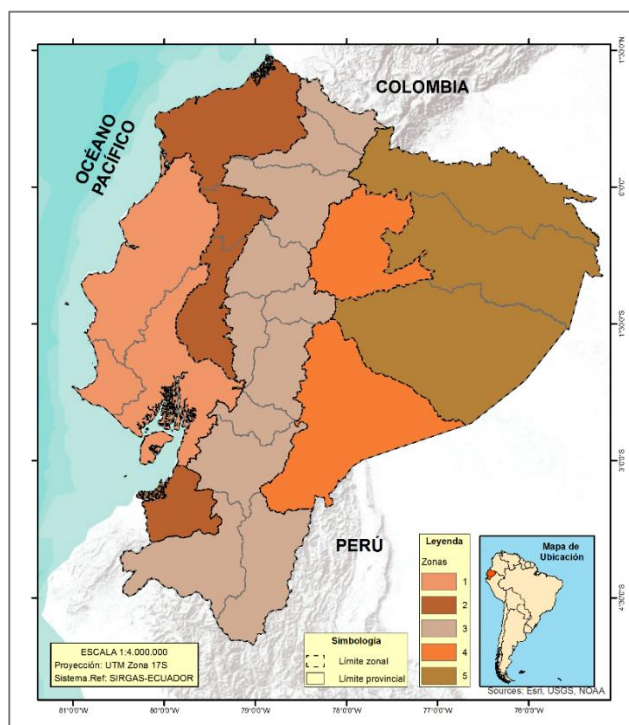


Figura 25. Campo de proyección de las zonas respecto a la altura media de la zona urbana

3.4.2.2 Campo de proyección a nivel cantonal

Para determinar el campo de proyección a nivel cantonal, se utilizaron los dos *shapefiles* a nivel cantonal previamente generados en el literal de la clasificación por alturas. El primer *shapefile* se generó en base a la altura media a nivel de todo el cantón y el segundo fue elaborado en función de la altura media de la zona urbana. Para agrupar los cantones que iban a pertenecer a una misma zona, se tomó en cuenta los cantones que presentaban una altura media similar, pero los criterios decisivos para la zonificación fueron: ser cantones vecinos, que ocupen el menor ancho posible y de no ser cantones vecinos, los cantones se encuentren dentro de una misma franja en sentido norte-sur, ya que este sentido no tiene repercusiones sobre la precisión de las zonas que conforman los sistemas TM. En la Figura 26, se observa la agrupación de los cantones en función de la altura media de todo el cantón, mientras que en la Figura 27, se aprecia la agrupación de los cantones tomando en cuenta la altura media de la zona urbana.

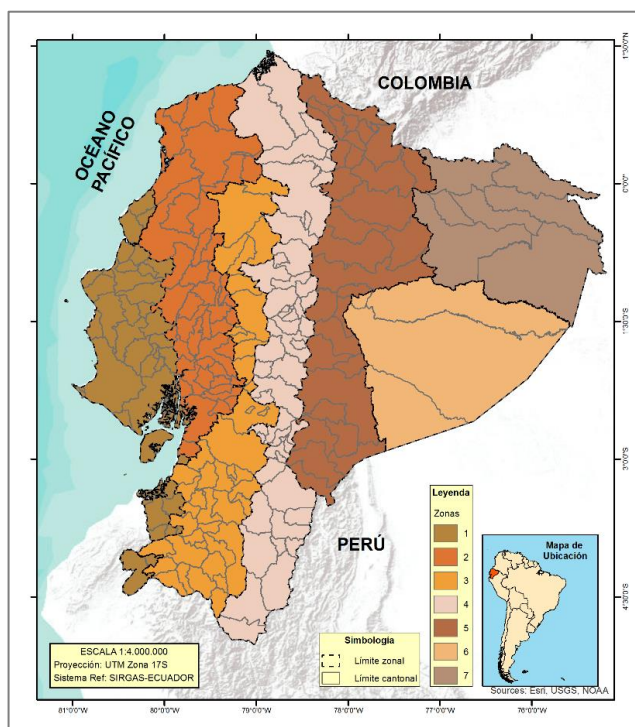


Figura 26. Campo de proyección de las zonas en función de la altura media de todo el cantón

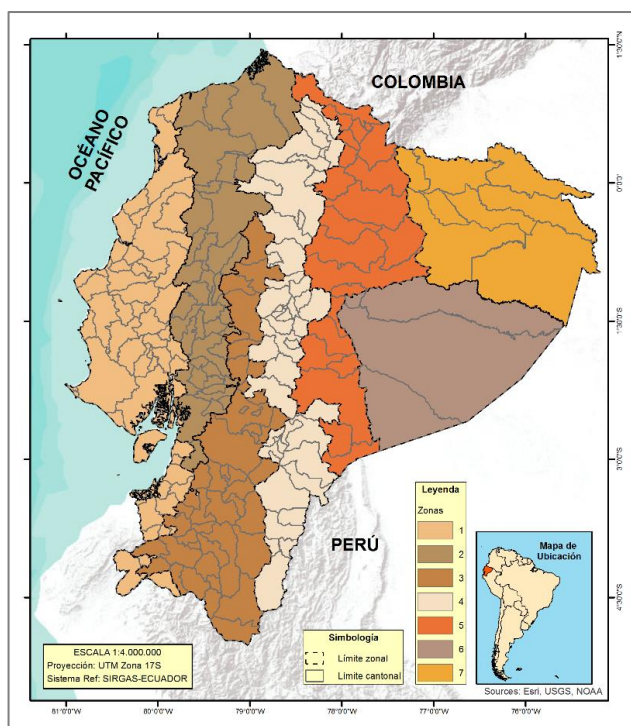


Figura 27. Campo de proyección de las zonas en función de la altura media de la zona urbana

3.5 Propuestas de la zonificación en función de las distintas alturas medias

Se generó cuatro propuestas en función de los dos tipos de alturas consideradas, la altura media a nivel de todo el cantón y la provincia y la altura media de la zona urbana, agregándole el criterio de la división político administrativa (cantón y provincia), para definir el campo de proyección de las zonas. A continuación se dará a conocer los detalles de cada una de las propuestas.

3.5.1 Propuesta a nivel provincial tomando en cuenta la altura media de toda la provincia

La propuesta a nivel provincial en función de la altura media de toda la provincia quedó conformada por cinco zonas, como se observa en la Figura 28. La primera zona está formada por 4 provincias, la segunda por 9, la tercera por 5, la cuarta por 2 y la quinta por 3 provincias.

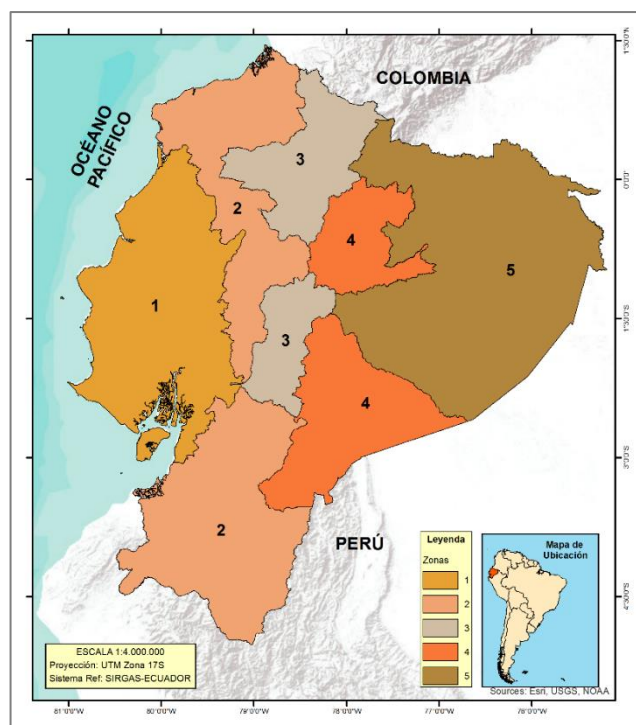


Figura 28. Propuesta a nivel provincial en función de la altura media de toda la provincia

3.5.2 Propuesta a nivel provincial tomando en cuenta la altura media de la zona urbana de la provincia

La propuesta a nivel provincial en función de la altura media de la zona urbana quedó conformado por cinco zonas, como se observa en la Figura 29. La primera zona está formada 3 provincias, la segunda por 4, la tercera por 11, la cuarta por 2 y la quinta por 3 provincias.

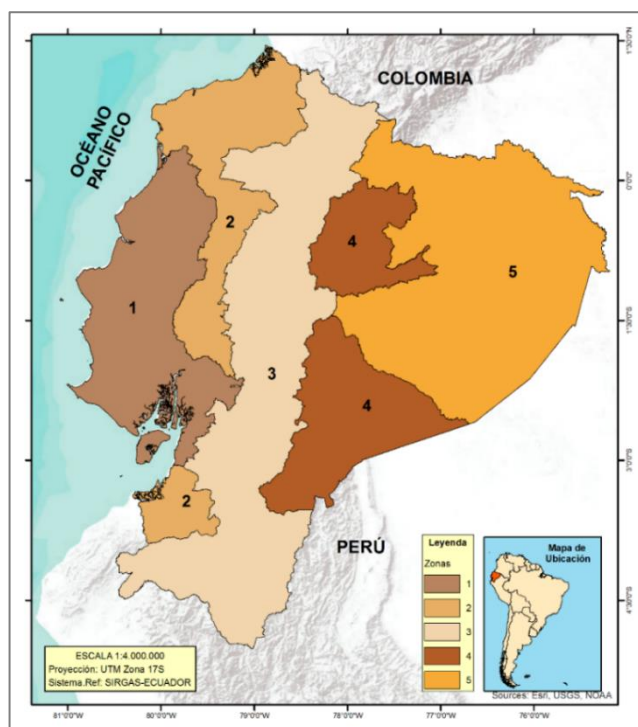


Figura 29. Propuesta a nivel provincial en función de la altura media de la zona urbana

3.5.3 Propuesta a nivel provincial tomando en cuenta la altura media de todo el cantón

La propuesta a nivel cantonal en función de la altura media de todo el cantón, quedó conformado por siete zonas, como se observa en la Figura 30. La primera zona está formada 38 cantones, la segunda por 47, la tercera por 44, la cuarta por 51, la quinta por 30, la sexta por 4 y la séptima por 7 cantones.

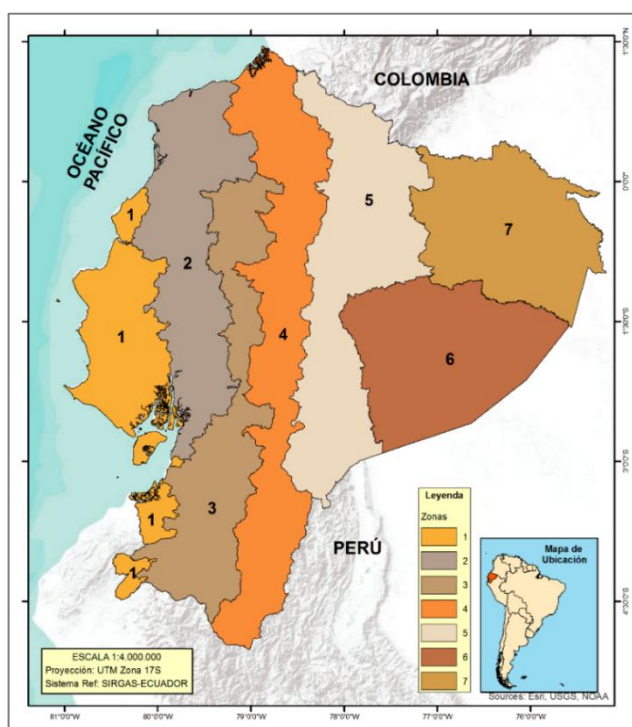


Figura 30. Propuesta a nivel cantonal en función de la altura media de todo el cantón

3.5.4 Propuesta a nivel provincial tomando en cuenta la altura media de la zona urbana del cantón

La propuesta a nivel cantonal en función de la altura media de la zona urbana, quedó conformado por siete zonas, como se observa en la Figura 31. La primera zona está formada 53 cantones, la segunda por 42, la tercera por 46, la cuarta por 46, la quinta por 22, la sexta por 4 y la séptima por 8 cantones.

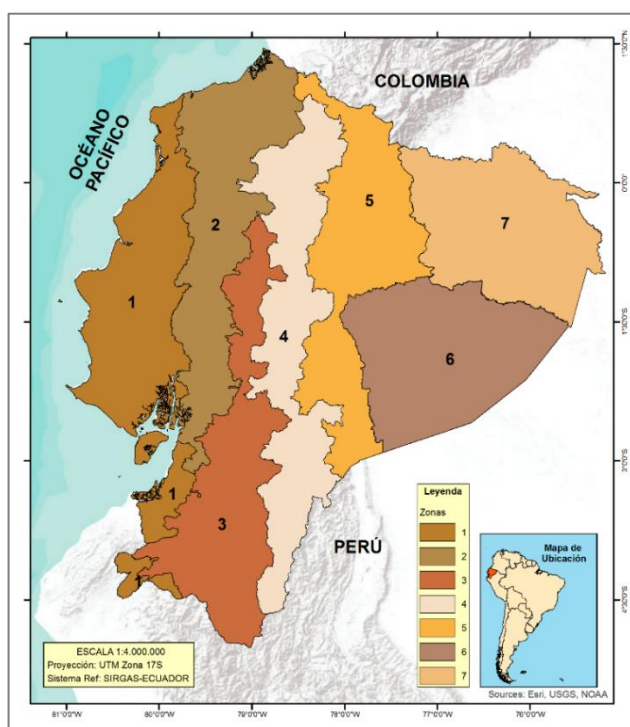


Figura 31. Propuesta de zonas a nivel cantonal respecto a la altura media de la zona urbana

3.6 Determinación de los parámetros geodésicos y cartográficos

Para que las cuatro propuestas sean consideradas Sistemas de Proyección, es necesario asignar a cada una de las zonas que las componen, los parámetros geodésicos y cartográficos que les permitan tener las características geométricas y matemáticas necesarias para cumplir con las precisiones que requiere la cartografía de detalle.

3.6.1 Parámetros geodésicos

Son dos los parámetros geodésicos que deben definirse para generar un sistema de proyección. El primero se refiere a las características del elipsoide de referencia, en este caso se utilizó el elipsoide global GRS 80, que está alineado con el Sistema de Referencia SIRGAS-ECUADOR, sus parámetros están definidos en la Tabla 1.

El segundo parámetro geodésico es la altura media utilizada para definir el Plano Topográfico Local, para las propuestas que consideran la altura de todo el cantón y la provincia, el proceso consistió en recortar el modelo digital de elevación en función del contorno de cada zona (sea esta cantonal o provincial), una vez obtenido el modelo digital de elevación de la zona, se utilizó como valor de la altura media el promedio de todos los píxeles que conformaban el modelo digital de las zonas. Mientras que para definir la altura media del PTL de la zona urbana, se escogió a todos los polígonos de la zona urbana pertenecientes a una misma zona, estos polígonos seleccionados, sirvieron para cortar el modelo digital de elevación. El valor promedio de todos los píxeles del modelo digital antes mencionado sirvió para definir la altura media del PTL a nivel de la zona urbana. En las Tablas 12, 13, 14 y 15 se observan la altura media de cada zona.

3.6.2 Parámetros cartográficos

Los parámetros cartográficos que se utilizaron para definir las zonas son: el campo de proyección de la zona expresada en grados, el meridiano central local (M.C.L) expresado en grados y minutos (se utilizó grados y minutos basado en las unidades de los parámetros que emplea la proyección TM QUITO) y el factor en el meridiano central. Se utilizó para todas las propuestas un Falso Norte igual a 10'000.000 (m) y un Falso Este igual a 500.000 (m), tomando en cuenta la recomendación realizada por la Norma Vial Ecuatoriana para generar Planos Topográficos Locales.

En la Tabla 12 constan los parámetros de cada zona, para la propuesta a nivel provincial donde se considera la altura media de toda la provincia. En la Tabla 13, constan los parámetros de cada zona para la propuesta a nivel provincial considerando la altura media de la zona urbana.

Tabla 12.

Parámetros cartográficos de la propuesta a nivel provincial tomando en cuenta la altura media de toda la provincia

| | Ancho zona | M.C.L | H media (m) | Ko |
|---------------|------------------|---------------------|-------------|-----------|
| Zona 1 | 2,0 ⁰ | 80 ⁰ 05′ | 146 | 1,0000229 |
| Zona 2 | 2,2 ⁰ | 79 ⁰ 25′ | 1504 | 1,0002358 |
| Zona 3 | 2,0 ⁰ | 78 ⁰ 30′ | 2682 | 1,0004204 |
| Zona 4 | 2,4 ⁰ | 77 ⁰ 50′ | 1522 | 1,0002386 |
| Zona 5 | 3,0 ⁰ | 76 ⁰ 40′ | 417 | 1,0000654 |

Tabla 13.

Parámetros cartográficos a nivel provincial tomando en cuenta la altura media de la zona urbana

| | Ancho zona | M.C.L | H media (m) | Ko |
|---------------|------------------|---------------------|-------------|-----------|
| Zona 1 | 2,0 ⁰ | 80 ⁰ 05′ | 58 | 1,0000091 |
| Zona 2 | 2,0 ⁰ | 79 ⁰ 25′ | 142 | 1,0000223 |
| Zona 3 | 3,0 ⁰ | 79 ⁰ 00′ | 2636 | 1,0004132 |
| Zona 4 | 2,4 ⁰ | 77 ⁰ 50′ | 1109 | 1,0001739 |
| Zona 5 | 3,0 ⁰ | 76 ⁰ 40′ | 439 | 1,0000688 |

En la Tabla 14 constan los parámetros de cada zona para la propuesta a nivel cantonal considerando la altura media de todo el cantón. En la Tabla 15 constan los parámetros de cada zona para la propuesta a nivel cantonal considerando la altura media de la zona urbana.

Tabla 14.

Parámetros cartográficos a nivel cantonal tomando en cuenta la altura media de todo el cantón

| | Ancho zona | M.C.L | H media (m) | Ko |
|---------------|------------------|---------------------|-------------|-----------|
| Zona 1 | 1,5 ⁰ | 80 ⁰ 25′ | 184 | 1,0000288 |
| Zona 2 | 1,5 ⁰ | 79 ⁰ 35′ | 163 | 1,0000256 |
| Zona 3 | 1,8 ⁰ | 79 ⁰ 30′ | 1781 | 1,0002792 |
| Zona 4 | 1,4 ⁰ | 78 ⁰ 45′ | 2275 | 1,0003566 |
| Zona 5 | 1,8 ⁰ | 77 ⁰ 50′ | 1793 | 1,0002811 |
| Zona 6 | 2,5 ⁰ | 76 ⁰ 50′ | 370 | 1,0000580 |
| Zona 7 | 2,2 ⁰ | 76 ⁰ 15′ | 274 | 1,0000430 |

Tabla 15.

Parámetros cartográficos a nivel cantonal tomando en cuenta la altura media de la zona urbana

| | Ancho zona | M.C.L | H media (m) | Ko |
|---------------|------------------|---------------------|-------------|-----------|
| Zona 1 | 1,6 ⁰ | 80 ⁰ 20′ | 59 | 1,0000092 |
| Zona 2 | 0,9 ⁰ | 79 ⁰ 10′ | 89 | 1,0000140 |
| Zona 3 | 2,0 ⁰ | 79 ⁰ 25′ | 2323 | 1,0003642 |
| Zona 4 | 1,2 ⁰ | 78 ⁰ 35′ | 2713 | 1,0004253 |
| Zona 5 | 1,8 ⁰ | 77 ⁰ 50′ | 2239 | 1,0003510 |
| Zona 6 | 2,5 ⁰ | 76 ⁰ 50′ | 857 | 1,0001343 |
| Zona 7 | 2,4 ⁰ | 76 ⁰ 20′ | 288 | 1,0000451 |

3.7 Análisis de las deformaciones que presentan las diferentes propuestas

Es necesario analizar las deformaciones producidas por cada una de las propuestas, para determinar si se está reduciendo el valor de las deformaciones y se está aumentando el área de cumplimiento de la precisión planimétrica respecto al sistema de proyección UTM tanto a nivel del territorio continental como en la zona urbana.

3.7.1 Mallado de puntos

Se empleó el mismo mallado de puntos creado para producir los modelos de deformación y cumplimiento para la proyección UTM, con el fin de obtener modelos espaciales en los cuales se visualice el comportamiento de las deformaciones al emplear las diferentes propuestas planteadas. Como ya se mencionó, el mallado fue generado mediante resamplado del modelo digital de elevación de alturas elipsoidales, pasando de un tamaño de pixel $\cong 30$ (m) a uno de $\cong 500$ (m), debido a que los 500 (m) es la mitad de la distancia máxima que se recomienda medir para realizar levantamientos donde se genere cartografía escala 1:500 (Comisión Nacional de Riego, 2014). Posteriormente se transformó el modelo digital resamplado en un modelo vectorial de puntos, el cual servirá de insumo para generar los modelos de deformación y cumplimiento para cada propuesta.

3.7.2 Cálculo de las coordenadas

Se generaron un *shapefile* de tipo polígono para cada propuesta, donde en cada polígono que representaba a una zona del sistema de proyección, constaba los parámetros cartográficos y geodésicos. Mediante un “*spatial join*” se escogieron todos los puntos que cayeron sobre una determinada zona, luego se definió en el sistema de información geográfica la proyección de dicha zona y se procedió a calcular las coordenadas planas de cada punto. Vale destacar que de los 918884 pixeles, 68 pixeles no caían sobre ninguna zona debido a que se encontraban fuera del límite del Ecuador continental. De tal manera que los 918816 pixeles representan el 92,56% del territorio continental.

3.7.3 Cálculo de los factores y la deformación

Para calcular los factores y determinar la deformación, se transformó la base de datos alfanumérica de cada propuesta, en una hoja de cálculo, donde se procedió a calcular los factores: de escala, reducción al elipsoide y combinado, según las ecuaciones (5), (15) y (17). Finalmente se expresó el factor combinado en PPM y m/Km, utilizando las Ecuaciones () y (). Una muestra de las bases de datos se observa en la Tabla 16, siendo necesario destacar que se utilizó el factor de escala en el meridiano central igual a 1,0003510.

Tabla 16.

Muestra de los cálculos de los factores y la deformación de la propuesta a nivel cantonal considerando la altura media de la zona urbana

| Altura | Este | x | Kh | Kesc | Kcomb | PPM | m/Km |
|--------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|--------|
| 25 | 500474,39 | 474,39 | 0,999996 | 1,000351 | 1,000347 | -347,082 | -0,347 |
| 50 | 540200,40 | 40200,40 | 0,999992 | 1,000371 | 1,000363 | -363,024 | -0,363 |
| 75 | 581989,77 | 81989,77 | 0,999988 | 1,000434 | 1,000422 | -421,869 | -0,422 |
| 3500 | 500474,39 | 474,39 | 0,999451 | 1,000351 | 0,999802 | 197,870 | 0,198 |
| 4000 | 744569,89 | 244569,89 | 0,999373 | 1,001086 | 1,000458 | -458,498 | -0,458 |
| 4500 | 830272,32 | 330272,32 | 0,999295 | 1,001692 | 1,000985 | -985,176 | -0,985 |

3.7.4 Modelos de deformación de las propuestas

Para generar el modelo de deformación de cada propuesta, se transformó las hojas de cálculo en *shapefiles* de tipo punto, los cuales se emplearon como base para generar los modelos raster, todos los modelos estaban conformados por 918816 píxeles, con un tamaño $\cong 500$ (m), la unidad que se eligió para producir los modelos de deformación fue m/Km, obteniendo como resultados: el modelo de deformación de la propuesta a nivel provincial tomando en cuenta la altura media de toda la provincia como se observa en la Figura 32. En la Figura 33 se puede ver las deformaciones producidas por la propuesta a nivel provincial considerando la altura media de la zona urbana. Las deformaciones que provoca la propuesta a nivel cantonal considerando la altura media de todo el cantón se muestran en la Figura 34, por último en la Figura 35 se demuestran las deformaciones que produce la propuesta a nivel cantonal considerando la altura media de la zona urbana.

Para analizar las deformaciones producidas en la zona urbana, se cortó el modelo de deformación de cada propuesta con los polígonos de la zona urbana, luego se analizó estadísticamente cada raster con la herramienta estadística del Sistema de Información Geográfica.

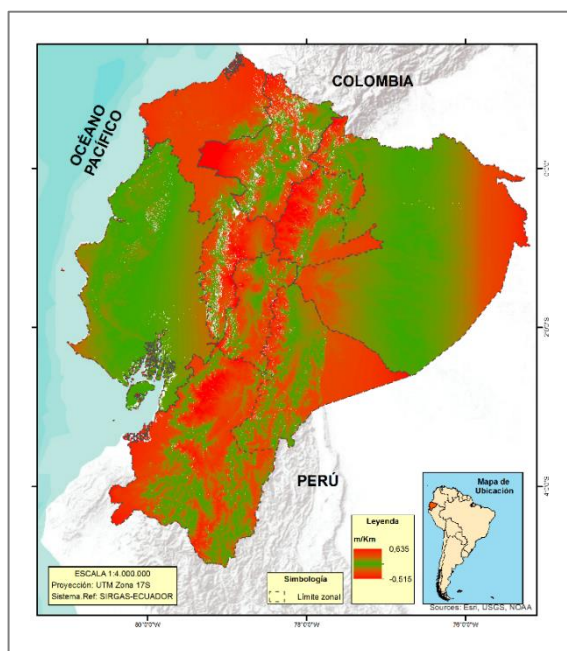


Figura 32. Deformaciones que produce la propuesta a nivel provincial (total)

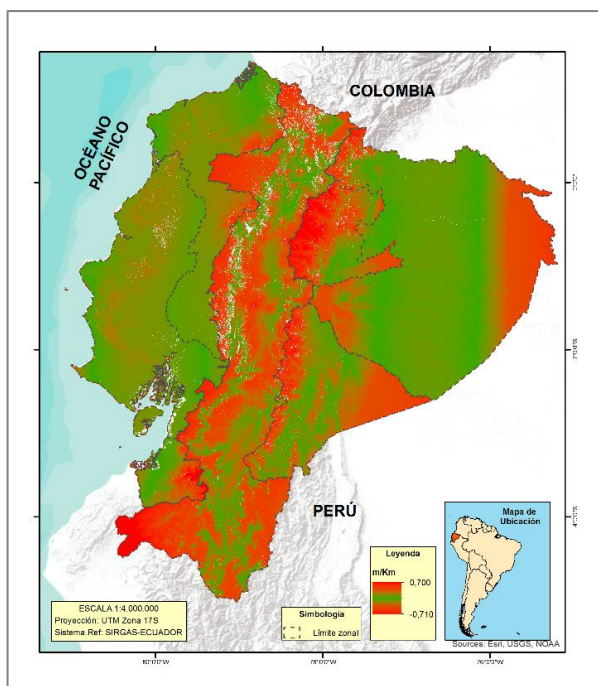


Figura 33. Deformaciones que produce la propuesta a nivel provincial (zona urbana)

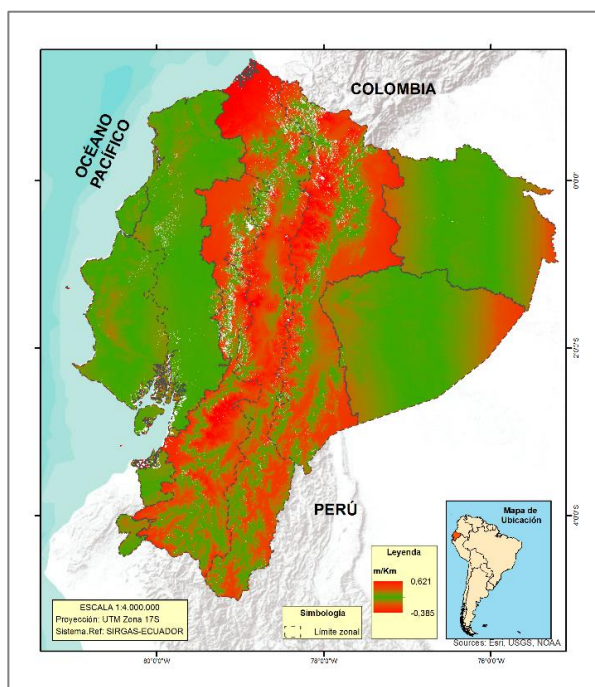


Figura 34. Deformaciones que produce la propuesta a nivel cantonal (total)

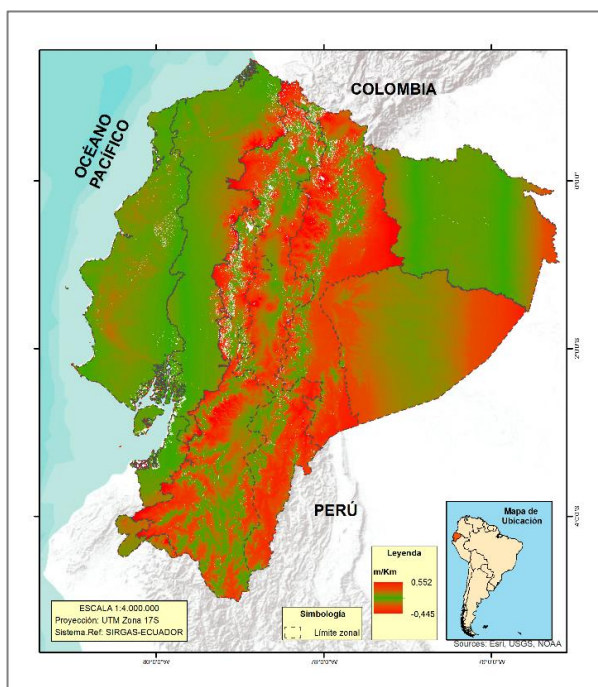


Figura 35. Deformaciones que produce la propuesta a nivel cantonal (zona urbana)

3.7.5 Modelos de cumplimiento de la precisión planimétrica

El procedimiento para crear los modelos de cumplimientos de la precisión para cada propuesta, es el mismo que realizado para generar el modelo de cumplimiento del sistema de proyección UTM (para ambas escalas). En la Figura 36 se observa el cumplimiento de la precisión que tiene la propuesta a nivel provincial considerando la altura media de toda la provincia, en la Figura 37 se aprecia el cumplimiento de la precisión de la propuesta a nivel provincial en función de la altura media de la zona urbana, en la Figura 38 se observa el cumplimiento de la precisión de la propuesta a nivel cantonal considerando la altura media de todo el cantón. Finalmente en la Figura 39 se aprecia el cumplimiento de la precisión que tiene la propuesta cantonal en función de la altura media de la zona urbana, todos los mapas mencionados están en función de la escala 1:500.

Si bien se generaron los modelo de cumplimiento para escala 1:1.000, no se los hizo constar, debido a que como se observan en las Figuras 22 y 23, del cumplimiento de la precisión para el sistema de proyección UTM escala 1:500 y 1:1.000 respectivamente, no es posible determinar visualmente, un aumento o disminución en el área de cumplimiento, debido a que tanto las deformaciones como la tolerancia para escalas 1:500 y 1:1.000 guardan una relación. Para obtener el cumplimiento para escala 1:1.000 se multiplica la deformación por una valor de 1,8 (obteniendo un valor cercano al doble de la deformación) y la tolerancia de la escala 1:1.000 es el doble de la escala 1:500 (0,15 (m) para escala 1:500 y 0,30 (m) para escala 1:1.000). Es por esta razón que las áreas de cumplimiento para escalas 1:500 y 1:1.000 visualmente resultan ser idénticas.

Para analizar el cumplimiento de la precisión planimétrica en la zona urbana, se cortó el modelo de cumplimiento de cada propuesta con los polígonos de la zona urbana, luego se analizó estadísticamente cada *raster* con la herramienta estadística del Sistema de Información Geográfica.

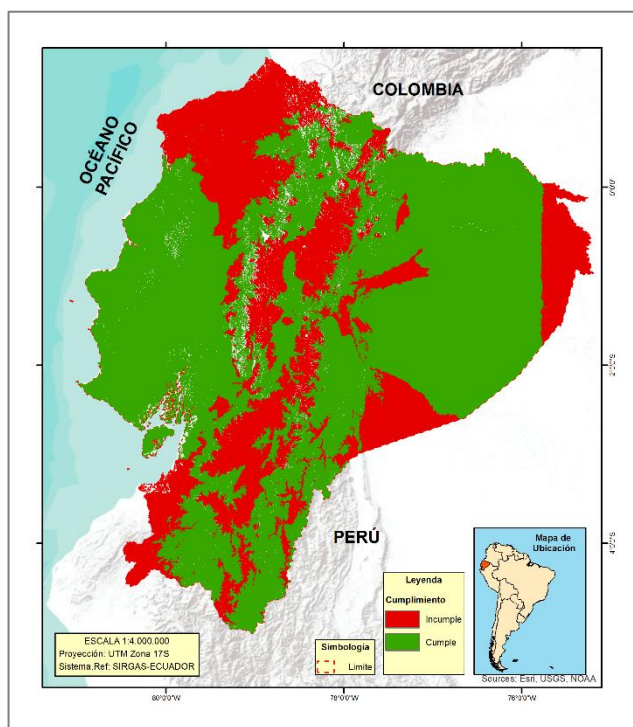


Figura 36. Cumplimiento de la precisión para la propuesta a nivel provincial (total)

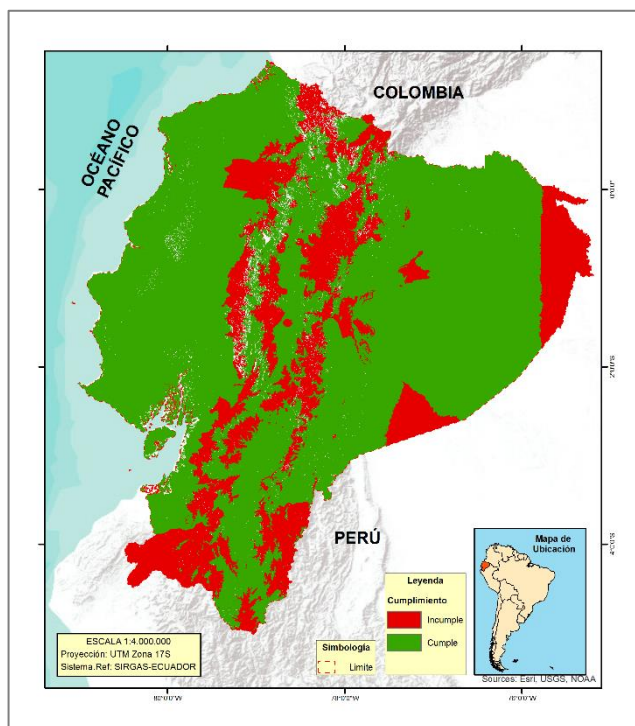


Figura 37. Cumplimiento de la precisión para la propuesta a nivel provincial (zona urbana)

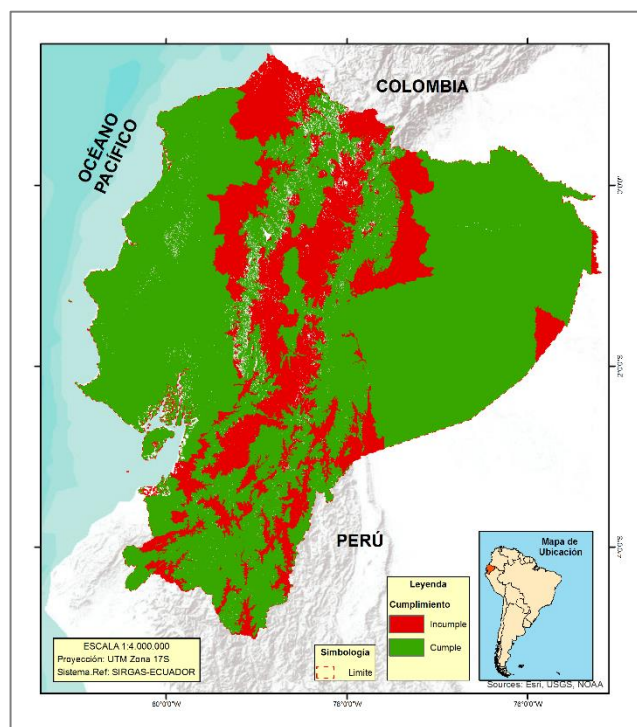


Figura 38. Cumplimiento de la precisión para la propuesta a nivel cantonal (total)

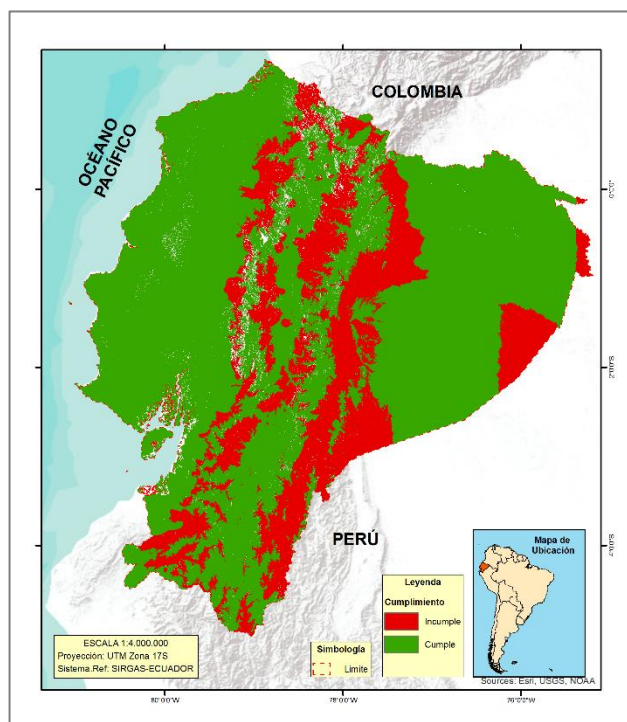


Figura 39. Cumplimiento de la precisión para la propuesta a nivel cantonal (zona urbana)

3.8 Comparación de las propuestas mediante un análisis estadístico

Para analizar estadísticamente las propuestas, se empleó medidas de tendencia central, para comparar el valor de la deformación producido por cada propuesta. El promedio del valor absoluto de las deformaciones, el máximo, el mínimo y el rango de las deformaciones determinaron si se produjo una reducción en las mismas. La desviación estándar del valor absoluto de las deformaciones sirvió como indicador para conocer cuan dispersas se encontraban las deformaciones. Se utilizó el promedio y la desviación estándar del valor absoluto de las deformaciones, debido a la relación que guarda con el criterio de cumplimiento de las precisiones, ya que no interesa el signo de la deformación, sino si la magnitud es mayor o menor al valor crítico tolerado por la escala. En cambio el máximo, el mínimo y el rango de las deformaciones consideraron el signo de la deformación, ya que es de interés conocer las reducciones e incrementos críticos que sufre la medida real cuando se utiliza una proyección. Un criterio adicional para determinar la propuesta que permitiera cumplir con la hipótesis de investigación, fue el área de cumplimiento, tanto a nivel del territorio continental como de la zona urbana.

3.9 Definición del Sistema de Proyección Cartográfica Local

Para definir el sistema de proyección cartográfica local se seleccionó la propuesta que cumplió con los dos siguientes criterios: el primero consiste en que la propuesta seleccionada presente las mejores características estadísticas, es decir la media absoluta más baja, los valores máximos y mínimos más bajos y el rango más pequeño. Mientras que el segundo criterio consiste en elegir la propuesta que abarque la mayor superficie de cumplimiento, tanto a nivel de todo territorio continental como en las zonas urbanas. Una vez seleccionada la mejor opción, se contrastó los dos criterios antes mencionados pero esta vez con respecto al Sistema de proyección UTM, para determinar si se cumplió o no con la hipótesis planteada.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Análisis de Resultados

Se determinó que el usar entre seis y siete cifras decimales para expresar los factores: de escala, de reducción al elipsoide y combinado, se afecta a las distancias al nivel del milímetro, usar cinco cifras afecta al nivel del centímetro y usar cuatro cifras afecta al nivel del decímetro, todo esto se observa en la Tabla 4. En el caso de la deformación, se observa en la Tabla 5, que usar siete o seis cifras decimales, no tiene diferencia alguna, usar cinco cifras afecta a nivel del milímetro y utilizar cuatro cifras afecta a nivel del centímetro. Todos estos resultados se obtuvieron en las peores condiciones, con la altura elipsoidal más alta del Ecuador continental y en el borde de la zona más ancha de una de las propuestas.

El radio medio terrestre es una constante que incide en el cálculo de los factores de escala y reducción al elipsoide, es imprescindible su análisis, para obtener los mejores resultados posibles. En la Tabla 6, se observa que al utilizar el radio máximo, mínimo o promedio, los factores son afectados desde la séptima cifra decimal, optando por utilizar el radio medio para todos los cálculos realizados en la investigación. Luego se determinó la precisión que debía manejar el radio medio, como se observa en la Tabla 7, el utilizar un radio con precisión métrica afectó a los factores al nivel de la décima cifra significativa, como ya se mencionó en el párrafo anterior, los valores de los factores se obtuvieron en el peor escenario.

Para comprobar la diferencia que existe cuando se calcula el factor de escala utilizando coordenadas geodésicas en comparación con el uso de coordenadas planas, se emplearon tres puntos, expresados en ambos tipos de coordenadas. La ubicación de los puntos fue la siguiente: el primer punto cerca del meridiano central, el segundo en el medio de la zona y el último cerca del borde de la zona, además se utilizó un K_0 igual a 0,9996 para el cálculo del factor de escala. Obteniendo como resultado que la diferencia más grande se presentó en la coordenada que se ubica cerca del borde la

zona, existiendo una variación al nivel de la quinta cifra decimal, afectando la determinación de distancias y deformación a nivel del centímetro, mientras que cerca del centro de la zona, la diferencia se producía al nivel de la sexta cifra decimal y cuando la coordenada se encontraba cerca del meridiano central no existía diferencia, todo esto se puede observar en la Tabla 8.

Para determinar la precisión que deberían tener las alturas, se evaluó la altura elipsoidal más alta y más baja del Ecuador continental en el factor de reducción al elipsoide. Obteniendo como resultado que al adicionarle ± 10 (m) a la altura más baja y la más alta, la variación que sufren las deformaciones respecto al tener una altura elipsoidal de precisión milimétrica, se produce a nivel del milímetro, como se observa en la Tabla 9. De esta manera se comprobó que el modelo digital de elevación utilizado, cumple con las necesidades del proyecto.

En cuanto a la precisión que debe tener la coordenada Este, se utilizó tres puntos, expresados en el sistema de proyección UTM, cuya ubicación fue la siguiente: el primer punto cerca del meridiano central, el segundo en medio de la zona y el último punto cerca del borde de la zona. Obteniendo que si la coordenada varía cinco metros, sin importar la ubicación del punto, el factor de escala sufre una variación al nivel de la séptima cifra y afecta en el peor de los casos, al nivel del milímetro en la determinación de la deformación, como se aprecia en la Tabla 10.

Fruto del análisis estadístico del modelo de deformación de la proyección UTM, se elaboró la Tabla 17, en donde se aprecia que las máximas deformaciones fueron: 0,688 (m/Km) para el territorio continental y 0,48 (m/Km) para la zona urbana; las mínimas deformaciones fueron: -0,923 (m/Km) para el territorio continental y -0,82 (m/Km) para la zona urbana. Finalmente se calculó el promedio de las deformaciones de todos los píxeles que conformaban el modelo de deformación, pero considerados en valor absoluto, para poder relacionar el promedio con los criterios de cumplimiento. La deformación promedio para el territorio continental fue de 0,267 (m/Km), mientras que para la zona urbana fue de 0,198 (m/Km), posteriormente estos valores serán contrastado respecto al Sistema de Proyección Cartográfica Local.

Tabla 17.

Estadísticos obtenidos del análisis del modelo de deformación de la proyección UTM

| Deformación (m/Km) | Territorio Continental | Zona urbana |
|------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Media (absoluta) | 0,267 | 0,198 |
| Máxima deformación | 0,688 | 0,480 |
| Mínima deformación | -0,923 | -0,820 |
| Rango deformación | 1,611 | 1,300 |
| Desviación (absoluta) | 0,179 | 0,143 |

Al analizar los modelos de cumplimiento, se determinó que para escala 1:500, apenas el 27,63% del territorio continental y el 39,65% de la zona urbana cumplen con la precisión (menor o igual a 0,15 metros) para generar cartografía. Mientras que para escala 1:1.000, si bien la variación no es mucha, el cumplimiento de la precisión asciende al 30,43% para el territorio continental y al 41,99% para la zona urbana. Es necesario destacar que el área sin cobertura del territorio continental es del 7,44%, mientras que de la zona urbana es del 4,07%.

Cuando el campo de proyección no ha sido definido adecuadamente, se podrá observar una franja casi vertical de incumplimiento de la precisión. En las Figuras 36 y 37, se aprecia en la zona del oriente la franja de incumplimiento antes mencionada. Si bien una posible solución puede ser el reducir el campo de proyección, esto no fue posible para las zonas que se encontraban en el oriente, debido a que el criterio seleccionado fueron los límites políticos administrativos (límite cantonal y provincial) los cuales no pueden ser modificados.

Determinar de forma inadecuada la altura media de un Plano Topográfico Local compromete el valor de las deformaciones y por ende el cumplimiento de la precisión. Se observa en todos los modelos de cumplimiento de las distintas propuestas, que en la zona de la sierra el factor limitante para que existas zonas de incumplimiento, son las grandes variaciones de altura que existen respecto a la altura media definida para cada PTL. Una posible solución es definir zonas para cada superficie de incumplimiento, es necesario acotar, que no se aplicó esta solución debido a que el enfoque de la investigación es el desarrollo de cartografía catastral y las zonas de

incumplimiento se ubican en lugares que por sus condiciones naturales no es posible que pueda desarrollarse una ciudad.

Resultado del análisis estadístico del modelo de cumplimiento de cada propuesta se obtuvo dos tablas en función del territorio analizado. En la Tabla 18 se encuentran los datos estadísticos para el territorio continental, donde la propuesta a nivel cantonal considerando la altura media de la zona urbana es la que presenta las mejores características, ya que tiene el valor más bajo de la deformación máxima y el segundo valor más bajo de la deformación mínima, el rango más corto y el segundo valor medio más bajo respecto a las otras propuestas. En la Tabla 19 constan los datos estadísticos para la zona urbana, donde la propuesta a nivel cantonal en función de la altura media de la zona urbana presentó los valores estadísticos más bajo respecto a las otras propuestas, convirtiéndose en una de las propuestas más apta para establecerse como el Sistema de Proyección Cartográfica Local.

Tabla 18.

Estadísticos obtenidos del análisis del modelo de deformación de cada propuesta para el territorio continental

| Deformación (m/Km) | PTP Total | PTP Urbano | PTC Total | PTC Urbano |
|---------------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| Media (absoluta) | 0,113 | 0,100 | 0,093 | 0,097 |
| Máxima deformación | 0,635 | 0,700 | 0,621 | 0,552 |
| Mínima deformación | -0,515 | -0,710 | -0,385 | -0,445 |
| Rango deformación | 1,151 | 1,41 | 1,007 | 0,997 |
| Desviación (absoluta) | 0,096 | 0,106 | 0,093 | 0,087 |

Tabla 19.

Estadísticos obtenidos del análisis del modelo de deformación de cada propuesta para la zona urbana

| Deformación (m/Km) | PTP Total | PTP Urbano | PTC Total | PTC Urbano |
|---------------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| Media (absoluta) | 0,059 | 0,049 | 0,064 | 0,041 |
| Máxima deformación | 0,244 | 0,359 | 0,216 | 0,147 |
| Mínima deformación | -0,498 | -0,468 | -0,361 | -0,353 |
| Rango deformación | 0,742 | 0,827 | 0,577 | 0,500 |
| Desviación (absoluta) | 0,063 | 0,065 | 0,047 | 0,045 |

En la Tabla 20 se observan los valores estadísticos del análisis del modelo de cumplimiento considerando el territorio continental, mientras que en la Tabla 21 se

aprecia los valores estadísticos del análisis del modelo de cumplimiento considerando la zona urbana. Al analizar estas dos tablas, se determinó que la propuesta que abarcaba una mayor superficie de cumplimiento para el territorio continental fue la propuesta a nivel provincial considerando la altura media de la zona urbana. Para escala 1:500 la propuesta abarcó el 70,79% de la superficie continental, mientras que para escala 1:1.000 fue del 73,78%. Cuando se analizó la superficie de cumplimiento para la zona urbana, la mejor opción fue la propuesta a nivel cantonal considerando la altura media de la zona urbana, ya que abarcó para escala 1:500 una superficie de cumplimiento del 92,93%, mientras que para escala 1:1.000 fue del 93,11%.

Tabla 20.

Porcentaje de cumplimiento e incumplimiento de las propuestas para el territorio continental

| Escala | 1:500 | | 1:1.000 | |
|------------------------|----------|------------|----------|------------|
| | Cumple % | Incumple % | Cumple % | Incumple % |
| PNP Total | 63,05 | 29,52 | 66,33 | 26,23 |
| PNP Zona Urbana | 70,79 | 21,77 | 73,78 | 18,78 |
| PNC Total | 70,02 | 22,54 | 72,65 | 19,91 |
| PNC Zona Urbana | 69,55 | 23,01 | 73,06 | 19,50 |

Tabla 21.

Porcentaje de cumplimiento e incumplimiento de las propuestas para la zona urbana

| Escala | 1:500 | | 1:1.000 | |
|------------------------|----------|------------|----------|------------|
| | Cumple % | Incumple % | Cumple % | Incumple % |
| PNP Total | 87,93 | 8,00 | 88,77 | 8,00 |
| PNP Zona Urbana | 88,62 | 7,31 | 89,49 | 6,44 |
| PNC Total | 91,05 | 4,88 | 92,42 | 3,50 |
| PNC Zona Urbana | 92,93 | 2,99 | 93,11 | 2,82 |

Finalmente el Sistema de Proyección Cartográfica Local quedó definido por las siete zonas de la propuesta a nivel cantonal considerando la altura media de la zona urbana. Se escogió esta propuesta debido a que presentó la mayor superficie de cumplimiento, considerando la zona urbana. Si bien es cierto no fue la mejor opción respecto a la superficie de cumplimiento considerando el territorio continental, la elección se basó también en los valores estadísticos de la deformación, ya que presentó

los valores más bajos en el promedio y la deformación máxima, ocupa el segundo lugar cuando se trata de la mínima deformación, el valor más corto en lo que respecta al rango y la desviación estándar más pequeña. De esta manera los parámetros geodésicos y cartográficos se detallan en la Tabla 22, añadiendo que el valor del Falso Norte es 10'000.000 (m) y el Falso Este es 500.000 (m)

Tabla 22.

Parámetros del Sistema de Proyección Cartográfica Local

| Zona | Ancho zona | M.C.L | H media (m) | Ko |
|-------------|-------------------|---------------------|--------------------|-----------|
| 1 | 1,6 ⁰ | 80 ⁰ 20´ | 59 | 1,0000092 |
| 2 | 0,9 ⁰ | 79 ⁰ 10´ | 89 | 1,0000140 |
| 3 | 2,0 ⁰ | 79 ⁰ 25´ | 2323 | 1,0003642 |
| 4 | 1,2 ⁰ | 78 ⁰ 35´ | 2713 | 1,0004253 |
| 5 | 1,8 ⁰ | 77 ⁰ 50´ | 2239 | 1,0003510 |
| 6 | 2,5 ⁰ | 76 ⁰ 50´ | 857 | 1,0001343 |
| 7 | 2,4 ⁰ | 76 ⁰ 20´ | 288 | 1,0000451 |

4.2 Discusión de Resultados

De acuerdo con Sánchez (2008), cuando se realicen levantamientos topográficos enlazados a posicionamientos geodésicos satelitales, la consideración más importante que se debe tener en cuenta, es la reducción de distancias del terreno al elipsoide. Esta consideración junto a la normativa vial del ecuatoriana (NEVI), fueron las que guiaron la metodología para generar el Sistema de Proyección Cartográfica Local, sobre todo la determinación del factor en el meridiano central en función de la reducción al elipsoide. No se consideró las reducciones angulares y la desviación de la vertical, ya que el autor antes mencionado, demostró que se pueden despreciar en todos los casos topográficos, siendo poco probable que un proyecto requiera exactitudes que justifiquen su cálculo.

De acuerdo con el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (2013), en la normativa vial ecuatoriana (NEVI-12), estima que utilizar un campo de proyección de 1° (aproximadamente 52,5 (Km)) desde el meridiano central, asegura tener precisiones en el borde de la zona del orden de 1:33.000, que equivale aproximadamente a 30 PPM

y en el caso de que la extensión no supere los 35 (Km) a cada lado del meridiano central, las precisiones son del orden de 1:100.000, que equivale a 10 PPM. Esta afirmación resulta ambigua debido a que no da a conocer el factor de escala en el meridiano central que se utilizó para estimar las precisiones relativas expuestas y por ende obvia el factor de reducción al elipsoide. Al contrastar la afirmación antes expuesta con los resultados de la investigación, se encuentra que en la zona que presenta las mejores condiciones del SPCL desarrollado, con el campo de proyección más corto (0,9 grados) y una de las alturas media más baja (89 metros), las deformaciones llegan a alcanzar valores de 400 PPM.

El Ministerio de Transporte y Obras Públicas (2013), en la normativa vial ecuatoriana (NEVI-12), indica que para alcanzar una precisión planimétrica de 1:40.000, que equivale a 25 PPM, se debe establecer una cota media que impida que las variaciones de la altura superen los ± 150 (m). Mientras que si se desea alcanzar una precisión de 1:20.000, que equivale a 50 PPM, la variación de altura no debe superar los ± 300 (m). Con estas recomendaciones se asegura cumplir con la precisión gráfica de los planos escala 1:1.000 y 1:500. No se pudo tomar en cuenta las variaciones altitudinales antes mencionadas, debido a que el enfoque de las mismas es la generación de cartografía para proyectos viales, cuyas precisiones son mucho más estrictas que la precisión requerida para generar cartografía catastral. Además que las variaciones altitudinales encontradas en las zonas atravesadas por la cordillera de los Andes, superan ampliamente las variaciones recomendadas.

4.3 Comprobación de hipótesis

Para comprobar la hipótesis de que el Sistema de Proyección Cartográfica Local desarrollado, mejoró las deformaciones producidas por el uso del sistema de proyección UTM y abarcó una mayor superficie de cumplimiento de la precisión planimétrica tanto del territorio continental como en la zona urbana. Se comparó los valores estadísticos resultantes del análisis del modelo de deformación y los modelos de cumplimiento para escala 1:500 y 1:1.000, del sistema de proyección UTM versus el Sistema de Proyección Cartográfica Local.

Al comparar los valores estadísticos que constan en el reporte estadístico de la Tabla 23, sobre las deformaciones producidas por el uso del sistema de proyección UTM versus el Sistema de Proyección Cartográfica Local a nivel del territorio continental, se determina que el promedio de la deformación absoluta se reduce drásticamente, casi tres veces; la máxima deformación varía de 0,688 (m/Km) a 0,522 (m/Km), mientras que la mínima deformación lo hace de -0,923 (m/Km) a -0,445 (m/Km), las variaciones antes mencionadas se pueden hacer más notorias cuando se compara el rango de las deformaciones producidas por cada sistema de proyección. El rango de las deformaciones producidas por el sistema de proyección UTM es de 1,611 (m/Km), mientras que las deformaciones producidas cuando se emplea el SPCL es de 0,997 (m/Km). Finalmente la dispersión de la deformación mejora, ya que la desviación estándar varía de 0,179 a 0,087. Demostrando que existe una mejora estadística cuando se emplea el SPCL desarrollado para generar cartografía en el territorio continental.

Tabla 23.

Reporte estadístico de las deformaciones obtenidas con los sistemas de proyecciones a nivel del territorio continental

| Deformación (m/Km) | UTM | SPCL |
|---------------------------|------------|-------------|
| Media (absoluta) | 0,267 | 0,097 |
| Máxima deformación | 0,688 | 0,552 |
| Mínima deformación | -0,923 | -0,445 |
| Rango deformación | 1,611 | 0,997 |
| Desviación (absoluta) | 0,179 | 0,087 |

Al comparar los valores que constan en el reporte estadístico de la Tabla 24, sobre las deformaciones producidas por el uso del sistema de proyección UTM versus el Sistema de Proyección Cartográfica Local a nivel de la zona urbana, se determina que el promedio de la deformación absoluta se reduce drásticamente, casi cinco veces; la máxima deformación varía de 0,480 (m/Km) a 0,147 (m/Km), mientras que la mínima deformación lo hace de -0,820 (m/Km) a -0,353 (m/Km). Las variaciones antes mencionadas se pueden hacer más notorias cuando se compara el rango de las deformaciones producidas por cada sistema de proyección, el rango de las deformaciones producidas por el sistema de proyección UTM es de 1,3 (m/Km), mientras que las deformaciones producidas cuando se emplea el SPCL es de 0,5 (m/Km). Finalmente la dispersión de la deformación mejora, ya que la desviación

estándar varía de 0,143 a 0,045. Demostrando que existe una mejora estadística cuando se emplea el SPCL desarrollado para generar cartografía en la zona urbana.

Tabla 24.

Reporte estadístico de las deformaciones obtenidas con los sistemas de proyecciones a nivel de la zona urbana

| Deformación (m/Km) | UTM | SPCL |
|---------------------------|------------|-------------|
| Media (absoluta) | 0,198 | 0,041 |
| Máxima deformación | 0,480 | 0,147 |
| Mínima deformación | -0,820 | -0,353 |
| Rango deformación | 1,300 | 0,500 |
| Desviación (absoluta) | 0,143 | 0,045 |

Al comparar las superficies de cumplimiento del sistema de proyección UTM versus el Sistema de Proyección Cartográfica Local, se determina que para el territorio continental, la zona de cumplimiento para escala 1:500 varía del 27,63% a 69,55%, mientras que para escala 1:1.000 el porcentaje de cumplimiento varía del 30,43% a 73,06%. Para la zona urbana, la superficie de cumplimiento para escala 1:500 varió de 39,65% a 92,93%, mientras que para escala 1:1.000 la variación porcentual pasa de 41,99% a 93,11%. Demostrando que existe una mejora en la superficie de cumplimiento tanto en el territorio continental, como en la zona urbana cuando se emplea el Sistema de Proyección Cartográfica Local desarrollado para generar cartografía.

Con todo lo expuesto se determina que se acepta la hipótesis planteada, la cual afirma que el Sistema de Proyección Cartográfica Local propuesto asegura una mejor precisión planimétrica, para la cartografía generada a escalas 1:500 y 1:1.000, en comparación con el sistema de proyección Universal Transversa de Mercator.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El Sistema de Proyección Cartográfica Local, adoptó las siete zonas, los parámetros cartográficos y geodésicos de la propuesta a nivel cantonal considerando la altura media de la zona urbana, debido a que presentó las mejores características estadísticas cuando se las comparó con las presentadas por las otras propuestas. Cuando se analizó las deformaciones a nivel del territorio continental, se obtuvo los valores más bajo en el promedio y la deformación máxima, el segundo valor más bajo considerando la mínima deformación, el valor más corto en lo que respecta al rango y la desviación estándar más pequeña. Mientras que al considerar la zona urbana, la deformación producida por la propuesta mencionada presentó los mejores valores estadísticos entre todas. Añadiéndole que mostró la segunda mayor área de cumplimiento a nivel del territorio continental, pero fue la primera a nivel de la zona urbana.

El modelo de alturas elipsoidales generado cubre el 92,56% del territorio ecuatoriano continental y es uno de los insumos claves para el desarrollo de la investigación, ya que mediante el análisis estadístico de los modelos digitales de elevación resultantes de los diversos cortes generados ya sea por el límite cantonal, provincial o de las zonas de las distintas propuestas. Se pudo determinar la altura media para el Plano Topográfico Local, que permita abarcar la mayor superficie de cumplimiento, debido a que se seleccionaba el promedio de las alturas que conformaban cada uno de los modelos de elevación antes mencionados.

El emplear un modelo de deformación y cumplimiento, en lugar de realizar una interpolación con las deformaciones que presentan los puntos que representan las cabeceras cantonales, permiten un mejor análisis y entendimiento del comportamiento de la deformación y el cumplimiento de la precisión. Además permite determinar con mayor precisión que para el territorio continental, el sistema de proyección UTM cuando se utiliza para genera cartografía escala 1:500, abarca una zona de

cumplimiento del 27.63%, mientras que para escala 1:1.000, el valor asciende al 30,43%. En cambio la superficie de cumplimiento a nivel continental mejoró cuando se usó el Sistema de Proyección Cartográfica Local. Para escala 1:500 el 69,55% del área continental cumple, mientras que para escala 1:1.000 el 73,06% del área continental cumple. Finalmente en las zonas urbanas los porcentajes de cumplimiento sufrieron un notable cambio, variando del 39,65% al 92,93% para escala 1:500, mientras que para escala 1:1.000 la variación fue de 41,99% a 93,11%.

La cordillera de los Andes es un factor limitante al momento de definir la altura media para definir una proyección LTM-PTL, ya que si se desea generar un Sistema que permita que todo el territorio continental cumpla con las deformaciones, la cantidad de zonas que se deben plantear no son manejables en la práctica, es por ello que se lo enfocó a la zona urbana, debido a que son en estas zonas donde se genera cartografía catastral de alta precisión (mayores a 1:1.000). La afirmación antes mencionada se respalda al visualizar los modelos de cumplimiento de todas las propuestas, ya que la mayoría de zonas de incumplimiento coinciden con las altas elevaciones. Existen zonas de incumplimiento ubicadas en la parte derecha del oriente, como se observa en la Figura 37, donde el campo de proyección es tan extenso, que el borde de la zona no cumple con la precisión requerida para escala 1:500.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda utilizar siete cifras decimales para expresar los factores que se han utilizado en el desarrollo del proyecto, con la finalidad de afectar a nivel del milímetro tanto a las distancias como a las deformaciones. Es indiferente el radio medio terrestre que se utilice para realizar los cálculos, debido a que la afectación a los factores ocurre en la séptima cifra decimal, en cuanto a la precisión que debe manejar esta constante, resulta irrelevante trabajar con un radio que cuente con precisión milimétrica ya que se alcanza los mismo resultados cuando se trabaja con un radio de precisión métrica, afectando a los factores al nivel de la décima cifra significativa.

Se recomienda contar con un modelo digital de elevación de la zona donde se vaya a generar un Plano Topográfico Local, ya que al analizarlo estadísticamente, permite determinar de mejor manera el comportamiento tanto de la deformación como del cumplimiento de la precisión, para satisfacer con los requerimientos técnicos del proyecto. Basta con que el modelo digital de elevación tenga precisión métrica, para determinar la altura media del PTL, ya que la afectación sobre el factor de reducción al elipsoide ocurrirá en el peor de los casos al nivel de la sexta cifra decimal.

Se recomienda poner a prueba los parámetros calculados para las distintas zonas que componen el Sistema de Proyección Cartográfica Local, cuando se realicen levantamientos topográficos o combinados, con el fin de determinar cuan buena es la predicción de los modelos de deformación y cumplimiento, permitiendo no solo reconfirmar la hipótesis demostrada, sino que logrará que la información geométrica que se tenga de la superficie, sea utilizada sin emplear varios sistemas de referencia ni transformaciones de coordenadas. Consiguiendo que exista concordancia y compatibilidad entre los distintas técnicas que se empleen para levantar información geográfica.

Se recomienda al Instituto Geográfico Militar, genere un manual que rijan la metodología usada para la generación tanto de Planos Topográficos Locales como para definir proyecciones Locales Transversas de Mercator asociada a un PTL, con el fin de asegurar que la producción de cartografía, se la realice de forma técnicamente correcta, basada en una metodología comprobada científicamente. O considere el sistema de proyección desarrollado para unificar la cartografía a detalle que se produzca a nivel del Ecuador continental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. (1998). *NBR 14166. Red de Referencia Catastral Municipal*. Rio de Janeiro: Comité Brasileño de Cosntrucción Civil.
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2008). *Constitucion de la Republica del Ecuador*. Montecristi.
- Asociación Cartográfica Internacional. (1966). *EVA Fing*. Obtenido de https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/142750/mod_folder/content/0/21Cartograf%C3%ADaRevisi%C3%B3nConceptosDefiniciones.pdf?forcedownload=1
- Barahona, C. (2016). *Metodología para la determinación del cuasigeoide para el Ecuador continental aplicando la teoría de Moloden*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Blachut, T., Chrzanowski, A., & Saastamoinen, J. (1980). *Cartografía y Levantamientos Urbanos*. New York: Springer-Verlag.
- Blanco, P., & Rojas, E. (2015). *Definición de planos topográficos locales para un caso de estudio, poligonal Chocontá-Suesca, siguiendo la metodología planteada por la Norma Brasileira NBR 14166*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Castillo, H. (2015). *Individualización de Zonas y Rangos de Deformación Horizontal en Chile para Proyectos de Ingeniería de Detalle a partir de la Estandarización de Parámetros Geodésicos y Cartográficos utilizando SIRGAS como Marco de Referencia*. Chile: SIRGAS.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetcción Espacial*. Madrid: RIALP S.A.
- Comisión Nacional de Riego. (2014). *Manual de procedimientos geodésicos y topográficos*. Chile: división de estudios, desarrollo y políticas.
- Drewes, H., & Sánchez, L. (2002). *Sistemas de Referencia en Geodesia*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

- Drewes, H., Sánchez, L., Blitzkow, D., & Freitas, S. (2002). *Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas*. SIRGAS.
- Espinosa, M. (3 de Abril de 2016). Las Golondrinas le pertenece a Imbabura. *El Comercio*.
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., . . . Umland, J. (2007). *The Shuttle Radar Topography Mission*. United States of America.
- Fernández, I. (2001). *Las Coordenadas Geográficas y la Proyección UTM. El datum*. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- Furones, A. (2011). *Sistema y Marco de Referencia Terrestre. Sistema de Coordenadas*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Galván, L. (2014). *Análisis y ajuste de modelos digitales de elevaciones en la región central de la Argentina. integración de modelos geopotenciales e información altimétrica local*. Buenos Aires: Universidad Nacional de La Plata.
- Herrera, R. (07 de Diciembre de 2017). *Academia*. Obtenido de http://www.academia.edu/18717360/Factor_Escala
- Idoeta, I. (2002). *Uso del plan topográfico local en obras lineales de ingeniería: caso autopista presidente Dutra*. Sao Paulo: Universidad de Sao Paulo.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2007). *Mejora de los sistemas de cartografía del territorio colombiano*. Rioacha: Departamento de la Guajira.
- Instituto Geográfico Militar. (1978). *Ley de cartografía nacional*. Quito.
- Instituto Geográfico Militar. (2006). *Especificaciones técnicas generales para la realización de cartografía topográfica a cualquier escala. (primer borrador)*. Quito: IGM.
- Instituto Geográfico Militar. (2011). *Informe tecnico para la adopcion del marco geodesico de referencia nacional SIRGAS – ecuador*. Quito.
- Instituto Geográfico Nacional . (06 de Diciembre de 2017). *IGN*. Obtenido de http://www.ign.es/web/resources/cartografiaEnsenanza/conceptosCarto/descargas/Conceptos_Cartograficos_def.pdf

- Juan, M., & Edwin, C. (2015). *Definición de planos topográficos locales para un caso de estudio, poligonal predio el Triunfo – Sopó - Cundinamarca, aplicando la metodología instituto geografico Agustin Codazzi para el sistema de coordenadas planas cartesianas origen local*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas.
- Lemoine, Kenyon, Factor, Trimmer, Pavlis, Chinn, . . . Luthcke. (1998). *The development of the joint NASA GSFC and National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96*. United States of America: NASA.
- Millar, F. (2003). *Evaluación de la aplicación de un huso tm para Chile continental, aplicable a cartografía del ministerio de bienes nacionales*. Santiago de Chile: Universidad de Santiago de Chile.
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador. (2013). *Norma Ecuatoriana Vial (NEVI) - 12 Volumen 2*. Quito.
- Mora, H. (2007). *Geodesia y Cartografía. Módulo: Geomática y Demografía*. Manizales.
- Peña, J. (2011). *La Cartografía y las Proyecciones Cartográficas*. Rioja: Universidad de la Rioja.
- Sánchez, D. (2008). *Corrección de observables clásicos en levantamientos topográficos combinados*. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba.
- Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. (2017). *Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021*. Quito: SENPLADES.
- Seeber, G. (2003). *Satellite Geodesy*. Berlín: Universidad de Hannover.
- Valdés, F. (1981). *Topografía*. Barcelona: CEAC.
- Zakatov, P. (1997). *Curso de Geodesia Superior*. Madrid: Rubiños 1860.