

# GEOMÁTICA AVANZADA

Elkin D. **Cañón Buitrago**  
Mario A. **Rincón Villalba**  
Wilson E. **Vargas Vargas**

# **GEOMÁTICA AVANZADA**

**Mario Arturo Rincón Villalba  
Wilson Ernesto Vargas Vargas  
Elkin Darío Cañón Buitrago**

Rincón Villalba, Mario Arturo, *et al.*

Geomática avanzada / Mario Arturo Rincón Villalba, Wilson Ernesto Vargas Vargas, Elkin Darío Cañón Buitrago. Bogotá: Ediciones de la U, 2026

250 p. ; 24 cm.

ISBN 978-628-7912-22-9 eBook 978-628-7912-23-6 ePub 978-628-7912-24-3

1. Ingeniería 2. Topografía 3. Sistemas de información geográfica 4. Posicionamiento global I. Tít.

526.9 cd. THEMA: TNH

Área: Ingeniería

Primera edición: Bogotá, Colombia, julio de 2026

ISBN. 978-628-7912-22-9

- © Mario Arturo Rincón Villalba, Wilson Ernesto Vargas Vargas  
Elkin Darío Cañón Buitrago
- © Ediciones de la U - Carrera 27 # 27-43 - Tel. (+57) 601 6455049  
www.edicionesdelau.com - E-mail: editor@edicionesdelau.com  
Bogotá, Colombia

**Ediciones de la U** es una empresa editorial que, con una visión moderna y estratégica de las tecnologías, desarrolla, promueve, distribuye y comercializa contenidos, herramientas de formación, libros técnicos y profesionales, e-books, e-learning o aprendizaje en línea, realizados por autores con amplia experiencia en las diferentes áreas profesionales e investigativas, para brindar a nuestros usuarios soluciones útiles y prácticas que contribuyan al dominio de sus campos de trabajo y a su mejor desempeño en un mundo global, cambiante y cada vez más competitivo.

Coordinación editorial: Daniela Parra G.

Diagramación: Oscar Javier Avendaño

Carátula: Ediciones de la U

Impresión: DGP Editores SAS

Calle 63 No. 70 D - 34, Pbx. (571) 7217756

*Impreso y hecho en Colombia*

*Printed and made in Colombia*

*No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, por fotocopia, por registro y otros medios, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.*

## Acerca de los autores



### **Ing. Elkin Darío Cañón Buitrago M.Sc.**

Tecnólogo en topografía egresado de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, ingeniero topográfico egresado de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Realizó estudios de posgrado en la Universidad Distrital donde obtuvo el título de Especialista en Diseño de Vías Urbanas, Tránsito y Transporte, Especialista BIM en Infraestructura de Autodesk, Certificado Profesional Internacional en Metodología BIM por la Building SMART, en la Universidad Santo Tomás obtuvo el título de Magíster en Infraestructura Vial y en la Universidad Católica San Antonio de Murcia recibió el título de Máster BIM en Diseño y Construcción de Vías, Carreteras y Autopistas.

Se desempeña como profesor de cátedra desde el 2015 y de planta desde el 2026 en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, en los proyectos curriculares de Ingeniería Topográfica, Especialización en Diseño de Vías Urbanas, Tránsito y Transporte y Maestría en Infraestructura Vial. Profesor catedrático de las asignaturas relacionadas con las áreas de vías, herramientas de modelación, tránsito y BIM en infraestructura, en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Profesor catedrático de la Universidad Nacional de Colombia en el área de Geomática Básica y Aplicada. Participa

como especialista en el área vial y en proyectos de georreferenciación en diferentes contratos con empresas privadas.

Se desempeña como ingeniero de proyectos en el grupo de Interventoría de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia. Asesor externo en diseño geométrico, interpretación y restitución de vuelos no tripulados y proyectos BIM en las empresas Geoingtro SAS y TFM Soluciones SAS.



### **Ing. Mario Arturo Rincón Villalba. M.Sc.**

Tecnólogo en topografía egresado de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (1998), ingeniero topográfico egresado de la universidad Distrital Francisco José de Caldas (2001), realizó estudios de posgrado en la Universidad Distrital obteniendo el título de Especialista en Ambiente y Desarrollo Local y en la Universidad Santo Tomás obteniendo el título de Magíster en Construcción de Obras Viales.

Se desempeña como profesor de tiempo completo desde el 2006 en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, adscrito al proyecto curricular de Ingeniería Topográfica. Docente de Cátedra 0.3 de la Universidad Nacional de Colombia desde el 2018. Participa como especialista en el área vial y en proyectos de georreferenciación en diferentes contratos con empresas privadas.

Fue profesor catedrático (2002-2005) de las asignaturas relacionadas con las aéreas de vías y de topografía en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Se desempeña como ingeniero especialista en diferentes proyectos de infraestructura en los sectores público y privado.



## **Ing. Wilson Ernesto Vargas Vargas. M.Sc.**

Tecnólogo en topografía egresado de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (1997), ingeniero topográfico egresado de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (2000), realizó estudios de posgrado en la Universidad Distrital obteniendo el título de Especialista en Gerencia de Recursos Naturales (2003) y en la Universidad Nacional de Colombia, donde obtuvo el título de Magíster en Ingeniería con Énfasis en Transporte.

Se desempeña como profesor de tiempo completo desde el 2001 en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, adscrito al proyecto curricular de Especialización en Diseño de Vías Urbanas, Tránsito y Transporte. Docente de Cátedra 0.3 de la Universidad Nacional de Colombia desde el 2014. Participa como especialista en el área vial y en proyectos de georreferenciación en diferentes contratos con empresas privadas.

Fue profesor catedrático (2000-2001) de las asignaturas relacionadas con las áreas de vías y topografía en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, docente en el área de Vías de Transporte en la Universidad Católica de Colombia (2006-2009), docente de la Unidad de Transporte de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia (2004-2009) y docente de Topografía del programa de Ingeniería Civil de la Universidad Piloto (2009).

Se desempeñó como profesional en la División de Geodesia del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (1998-1999), ingeniero y especialista en diferentes proyectos de ingeniería en el tema de georreferenciación, viales y en estudios de tránsito y transporte.

# Tabla de contenido

## Capítulo 1. Sistema de Posicionamiento Global (GPS) .....21

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1. Generalidades del Sistema de Posicionamiento Global (GPS).....          | 21 |
| 1.1.1. Código C/A ( <i>Coarse/Acquisition</i> o de Adquisición Gruesa) ..... | 23 |
| 1.1.2. Código P.....                                                         | 24 |
| 1.1.3. Mensaje de navegación.....                                            | 24 |
| 1.1.4. Formato RINEX.....                                                    | 24 |
| 1.1.5. Almanaque.....                                                        | 25 |
| 1.2. Segmentos del sistema GPS .....                                         | 25 |
| 1.2.1. Segmento espacial.....                                                | 26 |
| 1.2.2. Segmento de control tierra .....                                      | 26 |
| 1.2.3. Segmento de usuarios .....                                            | 27 |
| 1.3. Constelaciones satelitales .....                                        | 29 |
| 1.3.1. Constelación GPS (antigua Navstar).....                               | 30 |
| 1.3.2. Constelación GLONASS.....                                             | 32 |
| 1.3.3. Constelación GALILEO .....                                            | 33 |
| 1.3.4. Constelación BEIDOU .....                                             | 35 |
| 1.4. Sistemas de coordenadas.....                                            | 37 |
| 1.4.1. Coordenadas elipsoidales.....                                         | 39 |
| 1.4.2. Coordenadas geocéntricas (cartesianas tridimensionales).....          | 40 |
| 1.4.3. Coordenadas planas .....                                              | 41 |
| 1.4.3.1. Coordenadas planas de Gauss.....                                    | 42 |
| 1.4.3.2. Coordenadas cartesianas .....                                       | 43 |
| 1.4.4. <i>Datum</i> geodésico.....                                           | 44 |
| 1.4.5. Altitudes o elevaciones.....                                          | 45 |
| 1.4.6. Sistemas de referencia .....                                          | 46 |
| 1.4.6.1. MAGNA (Marco Geocéntrico Nacional de Referencia) .....              | 47 |
| 1.4.6.2. Datum Bogotá .....                                                  | 48 |
| 1.4.7. Orígenes coordenadas Gauss en Colombia .....                          | 51 |
| 1.4.8. Origen único CTM-12 .....                                             | 54 |
| 1.4.8.1. Factor de escala.....                                               | 54 |
| 1.4.8.2. Definición longitud origen .....                                    | 55 |
| 1.4.8.3. Deformaciones CTM vs. Gauss-Krüger.....                             | 48 |
| 1.5. Métodos de posicionamiento GPS.....                                     | 59 |
| 1.5.1. Posicionamiento estático relativo.....                                | 60 |

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| 1.5.2. Posicionamiento estático relativo rápido.....                | 61 |
| 1.5.3. Posicionamiento cinemático relativo .....                    | 62 |
| 1.5.4. Posicionamiento cinemático STOP & GO .....                   | 62 |
| 1.5.5. Posicionamiento en tiempo real (RTK) .....                   | 63 |
| 1.6. Procesamiento de datos GPS .....                               | 65 |
| 1.6.1. Planeación .....                                             | 65 |
| 1.6.2. Toma de datos.....                                           | 68 |
| 1.6.3. Postproceso .....                                            | 68 |
| 1.6.3.1. Crear trabajo y configuraciones .....                      | 68 |
| 1.7. Fuente de errores en posicionamientos GPS .....                | 80 |
| 1.7.1. Retrasos ionosféricos.....                                   | 81 |
| 1.7.2. Errores en la tropósfera.....                                | 81 |
| 1.7.3. Errores en los relojes.....                                  | 82 |
| 1.7.4. Efecto multitrayectoria .....                                | 82 |
| 1.7.5. Geometría de los satélites (errores según los ángulos) ..... | 83 |
| 1.7.6. Disponibilidad selectiva (S/A) .....                         | 84 |
| 1.7.7. Anti-spoofing (A-S).....                                     | 84 |

## **Capítulo 2. Sensores remotos ..... 87**

|                                                 |     |
|-------------------------------------------------|-----|
| 2.1. Generalidades.....                         | 88  |
| 2.2. Principios de la REM .....                 | 91  |
| 2.3. Espectro electromagnético .....            | 94  |
| 2.3.1. Ondas de radio.....                      | 96  |
| 2.3.2. Microondas .....                         | 97  |
| 2.3.3. Infrarrojas.....                         | 100 |
| 2.3.4. La luz visible.....                      | 101 |
| 2.3.5. Ondas ultravioleta .....                 | 102 |
| 2.3.6. Los rayos X.....                         | 103 |
| 2.3.7. Rayos gamma.....                         | 104 |
| 2.4. Tipos de sensores .....                    | 105 |
| 2.4.1. Sensores activos .....                   | 105 |
| 2.4.2. Sensores pasivos .....                   | 108 |
| 2.5. Plataformas de teledetección espacial..... | 110 |
| 2.5.1. Órbita geoestacionaria .....             | 114 |
| 2.5.2. Órbita polar.....                        | 114 |
| 2.5.3. Landsat 7.....                           | 119 |
| 2.5.4. SPOT 5 (Pinilla Ruiz, 2013).....         | 123 |
| 2.5.6. QuickBird (Pinilla Ruiz, 2013) .....     | 127 |
| 2.5.7. RockSAT (Pinilla Ruiz, 2013).....        | 129 |
| 2.6. Composición de bandas .....                | 130 |
| 2.7. Principales aplicaciones.....              | 134 |

|                                                                        |            |
|------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.7.1. Estudios geológicos e hidrológicos.....                         | 134        |
| 2.7.2. Estudios de biodiversidad .....                                 | 134        |
| 2.7.3. Desarrollo sostenible.....                                      | 136        |
| 2.7.4. Estudios de vegetación.....                                     | 138        |
| 2.7.5. Oceanografía .....                                              | 139        |
| 2.7.6. Catástrofes naturales .....                                     | 140        |
| <b>Capítulo 3. Fotogrametría.....</b>                                  | <b>143</b> |
| 3.1. Generalidades.....                                                | 143        |
| 3.1.1. Fotogrametría analógica.....                                    | 144        |
| 3.1.2. Fotogrametría analítica.....                                    | 145        |
| 3.1.3. Fotogrametría digital.....                                      | 146        |
| 3.2. Historia .....                                                    | 147        |
| 3.3. Aplicaciones .....                                                | 150        |
| 3.4. Fotografía aérea .....                                            | 156        |
| 3.4.1. Características de las fotografías .....                        | 157        |
| 3.4.2. La proyección central .....                                     | 158        |
| 3.4.3. La fotografía métrica.....                                      | 159        |
| 3.4.4. Clasificación de las fotografías aéreas .....                   | 160        |
| 3.4.5. Elementos geométricos de una fotografía aérea .....             | 161        |
| 3.4.6. Coordenadas de la fotografía .....                              | 168        |
| 3.5. Escala de la fotografía.....                                      | 168        |
| 3.6. Desplazamiento por relieve.....                                   | 171        |
| 3.7. Visión estereoscópica.....                                        | 173        |
| 3.7.1. Definición .....                                                | 173        |
| 3.7.2. Procedimiento para la obtención del modelo estereoscópico ..... | 175        |
| 3.7.3. Factores que influyen en el modelo.....                         | 176        |
| 3.7.4. Tipos de estereoscopios .....                                   | 178        |
| 3.8. Paralaje.....                                                     | 179        |
| 3.8.1. Definición y medida.....                                        | 179        |
| 3.8.2. Fórmula de alturas por diferencia de paralaje.....              | 181        |
| 3.9. Plan de vuelo .....                                               | 184        |
| 3.9.1. Introducción .....                                              | 184        |
| 3.9.2. Información básica.....                                         | 185        |
| 3.9.3. Diseño del plan de vuelo .....                                  | 187        |
| 3.9.4. Plan de trabajo.....                                            | 194        |
| 3.9.5. Planeación del vuelo .....                                      | 195        |
| 3.10. Ortofotos.....                                                   | 196        |

## **Capítulo 4. Cartografía..... 199**

|                                                   |     |
|---------------------------------------------------|-----|
| 4.1. Generalidades.....                           | 200 |
| 4.2. Función y clasificación de los mapas .....   | 201 |
| 4.2.1. Clasificación según el fin.....            | 202 |
| 4.2.2. Clasificación según la escala .....        | 202 |
| 4.3. Proyecciones cartográficas .....             | 205 |
| 4.3.1. Proyección cónica.....                     | 207 |
| 4.3.2. Proyección cilíndrica.....                 | 208 |
| 4.3.2.1. Características del sistema UTM.....     | 209 |
| 4.3.3. Proyección azimutal, cenital o polar ..... | 209 |
| 4.3.4. Proyección sinusoidal.....                 | 210 |
| 4.3.5. Proyección cilíndrica directa.....         | 211 |
| 4.3.6. Proyección Robinson.....                   | 212 |
| 4.3.7. Proyección cónica conforme .....           | 213 |
| 4.4. Escala .....                                 | 214 |
| 4.5. Elementos de un mapa .....                   | 215 |
| 4.6. Mapas temáticos.....                         | 217 |
| 4.6.1. Clasificación de los mapas temáticos ..... | 218 |
| 4.7. Mapas de imagen.....                         | 218 |

## **Capítulo 5. Sistemas de Información Geográfica (SIG).....221**

|                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1. Generalidades.....                                                           | 222 |
| 5.2. Componentes de un SIG.....                                                   | 223 |
| 5.3. Estructura de almacenamiento de datos.....                                   | 226 |
| 5.3.1. Estructura vector.....                                                     | 227 |
| 5.3.2. Estructura ráster .....                                                    | 227 |
| 5.4. Topología.....                                                               | 229 |
| 5.4.1. Relaciones topológicas.....                                                | 233 |
| 5.5. Bases de datos.....                                                          | 236 |
| 5.5.1. Características fundamentales.....                                         | 236 |
| 5.5.2. Bases de datos relacionales.....                                           | 238 |
| 5.5.3. SQL. El lenguaje de consultas para las bases de datos<br>relacionales..... | 239 |
| 5.5.4. SIG y modelos relacionales.....                                            | 241 |
| 5.5.5. Bases de datos orientadas a objetos.....                                   | 244 |
| 5.5.6. Bases de datos objeto-relacionales.....                                    | 245 |
| 5.5.6.1. Concepto de geodatabase.....                                             | 246 |

# Índice de figuras

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Segmentos del sistema GPS .....                                                | 25 |
| Figura 2. GPS de alta precisión .....                                                    | 28 |
| Figura 3. Navegador de mano .....                                                        | 29 |
| Figura 4. Constelación GPS .....                                                         | 31 |
| Figura 5. Constelación GLONASS.....                                                      | 33 |
| Figura 6. Constelación GALILEO.....                                                      | 34 |
| Figura 7. Lanzamiento satélite No. 30 .....                                              | 35 |
| Figura 8. Comparación de órbitas geoestacionarias GPS,<br>GLONASS, GALILEO, BEIDOU ..... | 36 |
| Figura 9. Marco internacional de referencia celeste .....                                | 37 |
| Figura 10. Obtención de la elipse .....                                                  | 37 |
| Figura 11. Ejes de la elipse.....                                                        | 38 |
| Figura 12. Generación del elipsoide .....                                                | 39 |
| Figura 13. Coordenadas elipsoidales.....                                                 | 40 |
| Figura 14. Coordenadas geocéntricas .....                                                | 40 |
| Figura 15. Sistemas de proyección para coordenadas planas .....                          | 41 |
| Figura 16. Sistema de proyección UTM .....                                               | 42 |
| Figura 17. Sistema de proyección cartográfica.....                                       | 43 |
| Figura 18. Distancias en diferentes sistemas de proyección .....                         | 44 |
| Figura 19. Alturas GPS.....                                                              | 46 |
| Figura 20. <i>Datum</i> MAGNA-SIRGAS .....                                               | 48 |
| Figura 21. <i>Datum</i> Bogotá.....                                                      | 49 |
| Figura 22. Sistema MAGNA-SIRGAS (red básica) .....                                       | 50 |
| Figura 23. Orígenes coordenadas planas de Gauss ( <i>Datum</i> Bogotá) .....             | 52 |
| Figura 24. Orígenes coordenadas planas de Gauss ( <i>Datum</i> MAGNA).....               | 53 |
| Figura 25. Distorsiones en las distancias proyectadas .....                              | 54 |
| Figura 26. Pesos por densidad poblacional .....                                          | 56 |
| Figura 27. Pesos por densidad poblacional .....                                          | 57 |
| Figura 28. Diferencias de área en porcentaje (%) .....                                   | 58 |
| Figura 29. Tiempos de rastreo.....                                                       | 66 |
| Figura 30. Geoportal con tiempos de rastreo .....                                        | 67 |
| Figura 31. Creación de trabajo y definición de especificaciones .....                    | 69 |

|                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 32. Definición del <i>datum</i> .....                                                     | 69  |
| Figura 33. Definición de parámetros de cálculo.....                                              | 70  |
| Figura 34. Cargar datos crudos.....                                                              | 70  |
| Figura 35. Acceso ftp RINEX IGAC.....                                                            | 71  |
| Figura 36. Cargar RINEX de las bases.....                                                        | 72  |
| Figura 37. Visualización de las bases y los puntos.....                                          | 72  |
| Figura 38. Visualización tiempos de ocupación .....                                              | 73  |
| Figura 39. Análisis de ruidos en satélites .....                                                 | 73  |
| Figura 40. Datos de soluciones semanales.....                                                    | 74  |
| Figura 41. Efemérides precisas .....                                                             | 75  |
| Figura 42. Proceso de cálculo.....                                                               | 75  |
| Figura 43. Coordenadas calculadas .....                                                          | 76  |
| Figura 44. Coordenadas elipsoidales.....                                                         | 77  |
| Figura 45. Cálculo de velocidades .....                                                          | 77  |
| Figura 46. Cálculo de ondulación geoidal.....                                                    | 79  |
| Figura 47. Cálculo de altura elipsoidal .....                                                    | 79  |
| Figura 48. Cálculo de cambio de época .....                                                      | 80  |
| Figura 49. Ionósfera y tropósfera .....                                                          | 81  |
| Figura 50. Efecto multitrayectoria .....                                                         | 82  |
| Figura 51. Geometría de los satélites .....                                                      | 84  |
| Figura 52. <i>Spoofing</i> .....                                                                 | 85  |
| Figura 53. Fotografía original del primer vuelo con motor de la historia ..                      | 88  |
| Figura 54. Cámaras Pigeon, una técnica de fotografía aérea<br>inventada en 1907 .....            | 89  |
| Figura 55. El satélite SMOS en órbita / ESA .....                                                | 89  |
| Figura 56. Componentes de un sistema de teledetección .....                                      | 90  |
| Figura 57. Componentes de una onda .....                                                         | 92  |
| Figura 58. El espectro electromagnético .....                                                    | 95  |
| Figura 59. Espectro electromagnético con tipos de radiación .....                                | 96  |
| Figura 60. Telescopio esférico de apertura de 500 metros (FAST) .....                            | 97  |
| Figura 61. Componentes de un horno microondas.....                                               | 98  |
| Figura 62. Torre de telecomunicaciones mediante microondas<br>en Wellington, Nueva Zelanda ..... | 99  |
| Figura 63. Datos infrarrojos térmicos en las colinas Connley<br>del centro de Oregón.....        | 100 |
| Figura 64. Modelo aditivo de colores .....                                                       | 102 |
| Figura 65. Principales rayos ultravioleta en el medio .....                                      | 103 |
| Figura 66. Radiografía panorámica dental .....                                                   | 104 |
| Figura 67. Ráfagas de rayos gamma presenciados en el espacio .....                               | 104 |

|                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 68. Antena de radar de detección a larga distancia .....                                            | 106 |
| Figura 69. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) .....                                                   | 107 |
| Figura 70. Estación LiDAR Leica utilizada para el escaneo de edificios ....                                | 107 |
| Figura 71. LiDAR terrestre .....                                                                           | 108 |
| Figura 72. Gravímetro .....                                                                                | 109 |
| Figura 73. Cámara multiespectral MSK-4.....                                                                | 110 |
| Figura 74. Satélite Sputnik 1 .....                                                                        | 111 |
| Figura 75. Satélite de telecomunicaciones Telstar 1 .....                                                  | 112 |
| Figura 76. Satélite LANDSAT 9 .....                                                                        | 113 |
| Figura 77. Órbita geoestacionaria de los satélites.....                                                    | 114 |
| Figura 78. Órbita polar de los satélites .....                                                             | 114 |
| Figura 79. Imagen del satélite GOES12.....                                                                 | 115 |
| Figura 80. Tamaño de píxel de imágenes de los satélites<br>SPOT y LANDSAT                                  |     |
| Figura 81. Número de canales y ancho de banda de un sensor .....                                           | 117 |
| Figura 82. Rango de niveles digitales registrados .....                                                    | 118 |
| Figura 83. Satélite Landsat 9.....                                                                         | 122 |
| Figura 84. Bandas en MSS a bordo de Landsats 1-5 (TM),<br>a bordo de Landsats 4 y 5, ETM+, OLI y TIRS..... | 122 |
| Figura 85. Satélite SPOT 5 .....                                                                           | 123 |
| Figura 86. Satélite IKONOS 2.....                                                                          | 126 |
| Figura 87. Satélite QuickBird .....                                                                        | 129 |
| Figura 88. Ensamble satélite RockSat.....                                                                  | 130 |
| Figura 89. Isla Tonga (Oceanía) .....                                                                      | 134 |
| Figura 90. Estudio biodiversidad .....                                                                     | 135 |
| Figura 91. Agricultura de precisión .....                                                                  | 135 |
| Figura 92. Cobertura de la tierra .....                                                                    | 136 |
| Figura 93. Memphis on April 21, 2010 .....                                                                 | 137 |
| Figura 94. Minería ilegal Perú.....                                                                        | 137 |
| Figura 95. Incendio Alberta, Canadá .....                                                                  | 138 |
| Figura 96. Campos de cultivos en la ribera del Ebro.....                                                   | 138 |
| Figura 97. Tifón Bopha.....                                                                                | 139 |
| Figura 98. Volcán Galeras.....                                                                             | 140 |
| Figura 99. Inundaciones península arábiga.....                                                             | 140 |
| Figura 100. Japón antes del terremoto.....                                                                 | 141 |
| Figura 101. Fotografía aérea .....                                                                         | 144 |
| Figura 102. Restituidor analógico.....                                                                     | 145 |
| Figura 103. Restituidor analítico .....                                                                    | 146 |
| Figura 104. Restituidor digital.....                                                                       | 147 |
| Figura 105. Cartografía digital .....                                                                      | 150 |

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 106. Trazado de carretera.....                              | 151 |
| Figura 107. Ubicación de obras de drenaje .....                    | 151 |
| Figura 108. Línea de transmisión eléctrica.....                    | 152 |
| Figura 109. Cantera de explotación .....                           | 152 |
| Figura 110. Hidroeléctrica Futaleufú .....                         | 153 |
| Figura 111. Río Cauca.....                                         | 154 |
| Figura 112. Parcelas y sistemas de cultivo.....                    | 155 |
| Figura 113. Explotación minera.....                                | 156 |
| Figura 114. Toma de fotografías .....                              | 157 |
| Figura 115. Fotografía pancromática .....                          | 158 |
| Figura 116. Esquema de la proyección central .....                 | 159 |
| Figura 117. Fotografías por inclinación de la cámara.....          | 160 |
| Figura 118. Fotografías por tipo de cámara .....                   | 161 |
| Figura 119. Elementos de la fotografía .....                       | 163 |
| Figura 120. Esquema de la fotografía aérea.....                    | 164 |
| Figura 121. Ejes vertical y óptico.....                            | 165 |
| Figura 122. Elementos de una fotografía.....                       | 166 |
| Figura 123. Relaciones de la distancia principal.....              | 167 |
| Figura 124. Relaciones de la distancia principal.....              | 167 |
| Figura 125. Coordenadas en la fotografía .....                     | 168 |
| Figura 126. Relación de la fotografía .....                        | 169 |
| Figura 127. Altura de vuelo constante.....                         | 170 |
| Figura 128. Altura de vuelo variable.....                          | 171 |
| Figura 129. Cálculo de diferencia de altura.....                   | 172 |
| Figura 130. Visión estereoscópica .....                            | 174 |
| Figura 131. Visión en tres dimensiones .....                       | 174 |
| Figura 132. Modelo estereoscópico.....                             | 175 |
| Figura 133. Relación visión estereoscópica .....                   | 177 |
| Figura 134. Estereoscopio de bolsillo.....                         | 178 |
| Figura 135. Estereoscopio de espejos.....                          | 179 |
| Figura 136. Geometría general de dos fotografías consecutivas..... | 180 |
| Figura 137. Superposición de fotografías consecutivas.....         | 180 |
| Figura 138. Distancias entre puntos homólogos.....                 | 181 |
| Figura 139. Relación paralaje-altura .....                         | 181 |
| Figura 140. Relación paralaje-altura, punto R.....                 | 182 |
| Figura 141. Relación paralaje-altura, punto A.....                 | 182 |
| Figura 142. Definición de planos de referencia.....                | 186 |
| Figura 143. Recubrimiento longitudinal (u).....                    | 190 |
| Figura 144. Recubrimiento lateral (v) .....                        | 191 |

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 145. Plan de vuelo .....                                    | 194 |
| Figura 146. Dirección de recorridos.....                           | 194 |
| Figura 147. Ortofoto.....                                          | 197 |
| Figura 148. Mapa división política de Colombia.....                | 203 |
| Figura 149. Carta de navegación Bahía de Buenaventura.....         | 204 |
| Figura 150. Mapa temático incendios forestales Honduras.....       | 205 |
| Figura 151. Proyecciones según modelo matemático.....              | 206 |
| Figura 152. Proyecciones y grillas.....                            | 206 |
| Figura 153. Proyección cónica .....                                | 207 |
| Figura 154. Proyección UTM.....                                    | 209 |
| Figura 155. Proyección cenital.....                                | 210 |
| Figura 156. Proyección sinusoidal .....                            | 210 |
| Figura 157. Proyección cilíndrica directa .....                    | 211 |
| Figura 158. Proyección Robinson .....                              | 212 |
| Figura 159. Proyección cónica conforme.....                        | 213 |
| Figura 160. Escala gráfica 1:100.000 .....                         | 215 |
| Figura 161. Convenciones .....                                     | 216 |
| Figura 162. Sistema de coordenadas .....                           | 217 |
| Figura 163. Espaciomapa.....                                       | 219 |
| Figura 164. Elementos que forman el sistema SIG .....              | 224 |
| Figura 165. Una división distinta del sistema SIG.....             | 225 |
| Figura 166. Estructura vector .....                                | 227 |
| Figura 167. Estructura ráster.....                                 | 228 |
| Figura 168. Topología de igual relación espacial .....             | 230 |
| Figura 169. Cadena abierta .....                                   | 231 |
| Figura 170. Cadena cerrada .....                                   | 231 |
| Figura 171. Topología.....                                         | 232 |
| Figura 172. Relación de adyacencia y contigüidad.....              | 233 |
| Figura 173. Relación de conectividad .....                         | 234 |
| Figura 174. Esquema cliente-servidor en una base de datos.....     | 237 |
| Figura 175. Esquema base de datos relacional.....                  | 238 |
| Figura 176. Esquema relacional .....                               | 241 |
| Figura 177. Crecimiento de población entre 1900 y 1960.....        | 242 |
| Figura 178. Crecimiento poblacional por colores.....               | 243 |
| Figura 179. Operadores que retornan verdadero o falso.....         | 247 |
| Figura 180. Funciones que retornan una geometría .....             | 248 |
| Figura 181. Conjunto formado a partir de una serie de puntos ..... | 248 |



# Índice de Tablas

|                                                            |     |
|------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 1. Parámetros sistema de proyección CTM-12 .....     | 54  |
| Tabla 2. Características métodos de posicionamiento .....  | 65  |
| Tabla 3. Instrumentos Landsat y sus resoluciones.....      | 119 |
| Tabla 4. Características proyecto Landsat.....             | 120 |
| Tabla 5. Características instrumentos SPOT 5 .....         | 124 |
| Tabla 6. Resoluciones SPOT .....                           | 125 |
| Tabla 7. Características satélite IKONOS .....             | 127 |
| Tabla 8. Productos IKONOS .....                            | 127 |
| Tabla 9. Especificaciones QuickBird .....                  | 128 |
| Tabla 10. Productos QuickBird .....                        | 128 |
| Tabla 11. Escala de la fotografía vs. escala de mapa ..... | 187 |
| Tabla 12. Distancia focal.....                             | 188 |
| Tabla 13. Topología .....                                  | 233 |
| Tabla 14. Relación de adyacencia y contigüidad .....       | 234 |
| Tabla 15. Relación de conectividad .....                   | 235 |



## Capítulo 1

# Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es un sistema de radionavegación que se inició en los Estados Unidos de América, basado en satélites ubicados en el espacio y que tiene como principal objetivo brindar servicios de posicionamiento, navegación y cronometría con una gran precisión, gratuita e ininterrumpidamente a usuarios civiles en todas las partes del planeta Tierra. El sistema GPS le proporcionará la localización y la hora exacta bajo cualquier condición atmosférica, de día o de noche, en cualquier lugar del mundo y sin límite al número de usuarios simultáneos a cualquier equipo que contenga un receptor GPS.

El Departamento de Defensa Nacional de los Estados Unidos de América, como consecuencia de la Segunda Guerra Mundial, visualizó la necesidad de poder determinar la posición exacta y absoluta, para lo cual, en los años 70, plantearon el proyecto o sistema GPS. Es importante resaltar que, aunque el sistema inicialmente fue creado con objetivos militares, rápidamente empezó a utilizarse en el desarrollo de proyectos civiles (navegación, topografía, construcción de infraestructura, navegación, entre otros) (Carlos Javier González Vergara, 2023).

### 1.1. Generalidades del Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

La sigla GPS corresponde a la abreviatura de NAVSTAR GPS por su nombre en el idioma inglés (*Navigation System with Time and Ranging Global Position System*), que traducido al español significa: Sistema de Posicionamiento Global con Sistema de Navegación por Tiempo y Distancia.

**Posición relativa:** se refiere a la ubicación de cualquier objeto o elemento relacionado con otro elemento, por ejemplo: al lado del parque, al costado oriental del polideportivo, etc. Esta posición presenta el inconveniente de que no se puede determinar la posición exacta de los objetos dentro del globo terráqueo, además de que, si no existen elementos cercanos, es imposible la ubicación del elemento en mención.

**Posición absoluta:** es la ubicación referida a un sistema universal de referencia, el cual es conocido y contiene modelos físicos de desarrollo y cálculo; por medio de las posiciones absolutas, se pueden georreferenciar todos los elementos u objetos encontrados en, sobre y debajo de la superficie terrestre. Para el desarrollo de proyectos de ingeniería, se hace necesario conocer la posición absoluta según los diseños y elementos a construir, ya que se deben conectar o correlacionar con elementos ya construidos (redes de servicios, vías, etc.).

Antes de la existencia del sistema GPS, la ubicación de los elementos se realizaba observando las posiciones de las estrellas, pero cuando el cielo estaba nublado, no se podía realizar ninguna observación; también se realizaban técnicas geodésicas, como la triangulación y la poligonación, desde las cimas de las montañas para poder tener la visibilidad necesaria.

Con los métodos anteriores, se definieron varias zonas de diferentes países, por lo cual los sistemas de referencia internacionales eran diferentes áreas en cada país y las cartografías y delimitaciones no coincidían; por estas razones, además de fines militares, el Proyecto GPS fue lanzado a mediados de los 70 por el Departamento de Defensa Nacional de los EE. UU.

El GPS básicamente fue creado con el fin de dar respuesta o solución de forma muy precisa y económica a las interrogantes de a qué hora, en qué posición y a qué velocidad se encuentra un elemento u objeto en cualquier parte del globo terráqueo y en cualquier instante.

Los satélites que componen el sistema GPS básicamente transmiten: ondas portadoras (encargadas de transportar la información o de proveer el medio físico para esta transmisión), códigos de distancia (los cuales permiten establecer la distancia entre cada satélite) y el receptor GPS y mensajes de navegación (que contienen las efemérides de los satélites y las correcciones de los relojes).

Los mensajes de navegación, el código C/A, el código P, la portadora L1 y la portadora L2 se transmiten en frecuencias diferentes. Sobre las portadoras L1 y L2 se transmite por modulación el código P (código principal que permite un posicionamiento muy preciso y que se usa para fines militares); sobre la portadora L1 se modula el código C/A, que es para posicionamientos libres para todo tipo de usuarios (Carlos Javier González Vergara, 2023).

**Determinación de distancias por tiempo:** la distancia entre un satélite y el receptor GPS se determina por medio de la determinación del tiempo de propagación del código C/A, L2C o el código P; el receptor recibe el impulso (código) enviado por el satélite; la diferencia de tiempo de envío y de recepción se multiplica por la velocidad de propagación de la señal.

Es necesario precisar que la distancia determinada no es exactamente la existente debido a que, en ese momento, no se conoce el estado del reloj del equipo receptor, por lo cual se trata de la pseudodistancia.

**Mediciones de tiempo:** los satélites portan relojes atómicos de rubidio, cesio o hidrógeno que funcionan por medio de energía eléctrica; por otro lado, los receptores GPS tienen relojes de cuarzo y, por medio de sus ordenadores, teniendo en cuenta que las mediciones a cada satélite no pueden interceptarse en un solo punto, suponen que su reloj tuvo alguna desviación en la medida del tiempo y, mediante un proceso interno de cálculo, asume que el error tendrá el mismo valor para todas las distancia y corrige la posición.

**Determinación de distancias por medidas de fase:** consiste en comparar la frecuencia de referencia del receptor con la frecuencia de la onda recibida por el satélite, la cual, después de que se desmodule, debe ser igual a la generada por el receptor; finalmente, después de conocer la longitud de onda y el número total de ciclos, se puede determinar la distancia respectiva.

### 1.1.1. Código C/A (*Coarse/Acquisition* o de Adquisición Gruesa)

Estos códigos básicamente los utilizan todos los receptores para determinar en la pantalla del usuario las coordenadas de forma directa; este código es de libre uso para cualquier tipo de usuario. Se compone de un lenguaje binario de 1.023 bits, generados con una frecuencia de 1.023 millones de bits por segundo (es decir, una frecuencia de 1.023 MHz), es decir, que el código se repite con un periodo de un milisegundo.

### 1.1.2. Código P

Este código está limitado únicamente para uso militar; es una secuencia binaria más compleja y su frecuencia es de 10.23 MHz. El Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América esconde la transmisión del código P mediante la causa de error intencional denominada *anti-spoofing* (tema que se tratará en el numeral 1.6).

### 1.1.3. Mensaje de navegación

El mensaje de navegación contiene las efemérides de los satélites (regularmente, se conocen como efemérides precisas), los parámetros de corrección de cada reloj y la información del estado adecuado de funcionamiento de cada satélite.

La portadora L1 contiene toda la información que transmite el satélite, es decir, el código C/A, el código P y los mensajes de navegación; la portadora L2 posee solamente el mensaje de navegación y el código P.

Las señales que genera el satélite están estructuradas sobre la frecuencia de los relojes atómicos y que, al usar las ondas portadoras L1 y L2, sobre la L1 se modula el código C/A y el código P y sobre la L2 se modula el código P, para de esta forma determinar las respectivas longitudes de onda. Las portadoras se denominan debido a los valores de su frecuencia, que oscilan entre 1 y 2 GHz.

### 1.1.4. Formato RINEX

El formato RINEX es un formato unificado para que todas las marcas de receptores GPS puedan transferir los datos; básicamente, contiene tres tipos de archivos ASCII ASI:

- Archivo con datos de las pseudodistancias
- Archivo con los datos meteorológicos
- Archivo con los mensajes de navegación

El formato de los archivos RINEX es “ssssdddf.yyt”

ssss =    identificador del sitio  
ddd =    día del año  
f    =    número de sesión

yy = año

t = tipo de archivo (el cual puede ser O, que corresponde a observación, M, que corresponde a información del sitio y datos meteorológicos, y N, que corresponde a efemérides o archivo llamado de navegación)

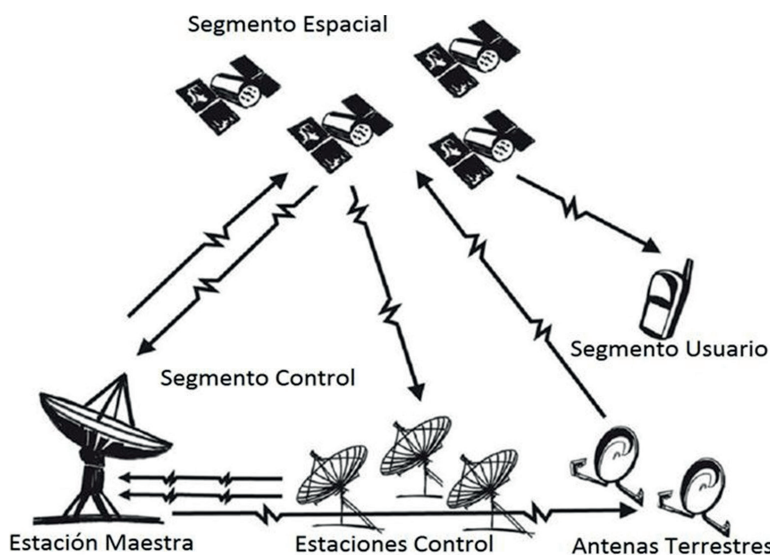
### 1.1.5. Almanaque

Se refiere a la información sobre las órbitas de los satélites, con la cual se puede establecer con gran precisión cuándo y dónde se encuentra cada satélite. El almanaque es transmitido aproximadamente cada 15 minutos; es de vital importancia tener la información de los almanaques actualizada y así poder tener información real del estado de cada satélite.

## 1.2. Segmentos del sistema GPS<sup>1</sup>

El sistema GPS está conformado por tres segmentos: el segmento espacial, el segmento de control y el segmento del usuario. La Fuerza Aérea de los Estados Unidos desarrolla, mantiene y opera los segmentos espacial y de control.

**Figura 1. Segmentos del sistema GPS**



<sup>1</sup> Villalba, M.A.R. (2023).