

Índice

Prólogo	1
Agradecimientos	7
Capítulo 1 Introducción	9
1.1. Definición de Geomática y Geodesia	9
1.2. Geodesia espacial.....	12
1.3. Técnicas de medición de Geodesia espacial	12
1.3.1. GNSS Global Navigation Satellite Systems	13
1.3.2. SLR Satellite Laser Ranging	14
1.3.3. VLBI Very Long Baseline Interferometry	17
1.3.4. DORIS	19
1.4. Sistemas de observación global. GGOS.....	21
1.5. Organizaciones internacionales de Geodesia.....	22
1.5.1. La Unión Internacional De Geodesia Y Geofísica IUGG	22
1.5.2. IAG, Asociación Internacional de Geodesia	23
1.5.3. IERS International Earth Rotation and Reference Systems	24
1.5.4. IGS Servicio Internacional GNSS.....	24
1.5.5. CODE	28
1.5.6. EUREF	29
1.5.7. Algunos organismos vinculados a la Geodesia.....	29
1.6. Bibliografía	30
Capítulo 2. La Tierra. Sistemas de referencia y sistemas de tiempos	31
2.1. Introducción.....	31
2.2. Movimientos de la Tierra.....	32
2.3. Precesión y Nutación	33
2.4. Movimiento del Polo.....	34
2.5. Sistemas de referencia	38

2.6.	Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS). International Terrestrial Reference System	40
2.6.1.	El marco de referencia internacional terrestre ITRF	42
2.6.2.	Marco de referencia GNSS. Materialización del ITRS: IGSyy	49
2.7.	Sistemas locales de referencia. ETRS89 datum europeo	51
2.8.	SIRGAS	54
2.9.	Elipsoides de revolución internacionales GRS-80 y WGS84	54
2.10.	Otros sistemas de referencia GNSS	56
2.10.1.	GLONASS. PZ-90	56
2.10.2.	Marco de referencia terrestre de GALILEO (GTRF)	57
2.10.3.	Sistema geodésico Chino de Coordenadas (CGC2000)	57
2.11.	Sistema de tiempos. Tiempo Solar y universal UT	57
2.12.	Tiempo Atómico. Tiempo universal Coordinado. Tiempo GPS	59
2.13.	Bibliografía	63
Capítulo 3.	Órbitas de los satélites	65
3.1.	Teoría de órbitas. Elementos keplerianos	65
3.2.	Movimiento perturbado	73
3.3.	Efemérides radiodifundidas o transmitidas	76
3.4.	Efemérides precisas	79
3.5.	Ejercicio Órbitas	81
3.6.	Bibliografía	93
Capítulo 4.	GNSS. Sistema Global de Navegación por Satélite	95
4.1.	Introducción	95
4.1.1.	Satélites Geoestacionarios (GEO Geostationary Earth Orbit)	96
4.1.2.	Satélites de Órbita Media (MEO Mean Earth Orbit)	97
4.1.3.	Satélites de Órbita Baja (LEO Low Earth Orbit)	97
4.2.	El desarrollo de los sistemas GNSS	97
4.2.1.	Fase o situación de partida	98
4.2.2.	Fase GNSS-1 (2002-2015)	98
4.2.3.	Fase GNSS-2 (a partir del 2015)	99

4.3.	Mercado de Negocio GNSS	100
4.4.	Principio básico del posicionamiento con GNSS	101
4.4.1.	Medición en código.....	103
4.4.2.	Medición en fase	103
4.4.3.	Medición de velocidad	104
4.4.4.	Errores en el sistema y la corrección diferencial. DGNSS	104
4.4.5.	Descripción de un sistema GNSS	105
4.5.	Constelación NAVSTAR – Sistema GPS. 1978	105
4.5.1.	Segmento espacial	107
4.5.2.	Segmento control de operaciones OCS	114
4.5.3.	Segmento de usuario	117
4.5.4.	Servicios que presta GPS	117
4.6.	GLONASS. GLoBal Orbiting Navigation Satellite System	118
4.6.1.	Sector de Control.....	119
4.7.	GALILEO.....	120
4.7.1.	Segmento espacial	123
4.7.2.	Segmento de control	124
4.8.	BEIDOU. COMPASS	124
4.9.	Sistemas regionales de navegación o aumentación	126
4.9.1.	QZSS (Quasi Zenit Satellite System). Sistema de aumentación	126
4.9.2.	IRNSS	127
4.10.	Sistemas de aumentación	127
4.10.1.	SBAS (Sistema de Aumentación Basado en Satélites).....	128
4.10.2.	GBAS. Sistemas de aumentación basados en tierra.....	133
4.11.	A-GNSS (GNSS Asistido)	134
4.12.	Bibliografía	136
Capítulo 5. La señal		137
5.1.	Reloj u oscilador.....	137
5.2.	Fundamentos físicos de la señal.....	139
5.2.1.	Portadora v moduladora	142

5.3.	Señal GPS	144
5.3.1.	Portadora.....	145
5.3.2.	Códigos	148
5.4.	Mejora de la señal GPS	153
5.5.	Otras señales GNSS	153
5.5.1.	GALILEO	153
5.5.2.	GLONASS	155
5.6.	Anexo tablas	155
5.6.1.	GALILEO	155
5.6.2.	Constelación GPS	156
5.6.3.	Satélites geoestacionarios SBAS	156
5.6.4.	Banda de señal .GPS, GLONASS, GALILEO y BEIDOU.....	157
5.7.	Bibliografía	157
Capítulo 6.	Observables	159
6.1.	Tipos de observables	159
6.2.	Pseudodistancias	160
6.3.	Fase	163
6.3.1.	Precisión de medidas	167
6.4.	Combinaciones de frecuencias L1 Y L2.....	167
6.4.1.	Combinación banda estrecha. Narrow lane Ln.....	168
6.4.2.	Combinación banda ancha. Wide lane Lw	168
6.4.3.	Combinación ionosférica, coeficientes no enteros	169
6.4.4.	Combinación de pseudodistancia de código P y fase L, suavizado de código.....	169
6.4.5.	Melbourne-Wübbena (1985).....	170
6.4.6.	Combinaciones de triple frecuencia	170
6.5.	Detección y reparación de la pérdida de ciclos	171
6.6.	RINEX. Observables	172
6.7.	Estructura de los ficheros RINEX.....	174
6.7.1.	Fichero RINEX de observación	174

6.7.2.	Fichero de navegación	176
6.7.3.	Fichero datos meteorológicos	177
6.8.	El formato RINEX 3.....	177
6.9.	Descarga de datos RINEX	178
6.9.1.	Descarga de datos EUREF	178
6.9.2.	Descarga de datos del IGN	179
6.9.3.	Descarga de datos ICV	179
6.10.	Ejercicio.....	179
6.11.	Bibliografía	184
Capítulo 7.	Fuentes de error GPS	185
7.1.	Tipos de errores	185
7.2.	Errores en satélites y órbitas.....	187
7.2.1.	Errores en los parámetros orbitales del satélite	187
7.2.2.	Errores en los relojes de los satélites	188
7.2.3.	Errores relativistas.....	190
7.2.4.	Disponibilidad Selectiva. SA.....	192
7.2.5.	Anti-Spoofing AS	192
7.3.	Errores atmosféricos	192
7.4.	Errores del receptor	195
7.4.1.	Pérdidas de ciclo. Cycle Slips	195
7.4.2.	Retardo instrumental	195
7.4.3.	Efecto multipath o trayectoria múltiple.....	195
7.4.4.	Estado del reloj del receptor.....	196
7.4.5.	Offset y variación del centro de fase de la antena del receptor.....	196
7.5.	Errores intencionados con aparatos externos al sistema.....	199
7.6.	Indicadores de precisión	200
7.6.1.	UERE (User Equivalent Range Error)	200
7.6.2.	DOP Contribución de la geometría de los satélites a la incertidumbre de un posicionamiento	201

7.6.3. Parámetros estadísticos de precisión e incertidumbre vinculados a navegación	202
7.7. Bibliografía	203
Capítulo 8. La ionosfera	205
8.1. Propagación de emisiones radioeléctricas	205
8.2. Ionosfera	207
8.3. Elementos de propagación de ondas	212
8.3.1. Relación de velocidad e índice de refracción de fase y de grupo	213
8.4. Refracción ionosférica. Relación de velocidades de grupo y fase y la velocidad en el vacío	215
8.4.1. Determinación del Δp_{iono} y del Δg_{iono}	217
8.5. Eliminación del efecto ionosférico	219
8.5.1. Eliminación del efecto ionosférico en receptores de doble frecuencia	219
8.6. Modelos ionosféricos y medición TEC	221
8.6.1. Modelos ionosféricos. El modelo IRI (Bilitza 1990)	223
8.6.2. Modelo NeQuick (2000). Sistema GALILEO	224
8.6.3. Modelo de Klobuchar (1987). Sistema GPS	224
8.6.4. Otros modelos	224
8.7. Acerca de LEICA Geo Office (LGO)	225
8.7.1. Modelo Ionosférico	225
8.8. Bibliografía	226
Capítulo 9. Refracción troposférica	227
9.1. Refracción troposférica	227
9.2. Modelos troposféricos	232
9.2.1. Modelo de Hopfield (1969)	233
9.2.2. Modelo de Saastamoinen (1974)	237
9.2.3. Modelo troposférico para PPP. GIPSY	239
9.2.4. Atmosfera Estándar SA	240
9.2.5. Global Pressure and Temperature	241
9.2.6. U.S. Standard Atmosphere	241

9.2.7.	Modelo Troposférico Leica Geoffice.....	241
9.2.8.	Modelo Troposférico Trimble.....	243
9.2.9.	Comparativa	243
9.3.	Retardos Troposféricos. Funciones de proyección Mapping Functions troposféricas	245
9.3.1.	Marini Mapping Function (1972).....	245
9.3.2.	Niell Mapping Function (1996).....	246
9.3.3.	Viena Mapping function VMF	249
9.3.4.	Global Mapping Function (2006, 2007) GMF/GPT	250
9.4.	Determinación del vapor de agua	251
9.5.	Bibliografía	254
Capítulo 10.	Métodos de observación y posicionamiento GNSS.....	255
10.1.	Métodos de observación	255
10.1.1.	Según los Observables	256
10.1.2.	Según el Movimiento de los Receptores	256
10.1.3.	Según el Momento en que se efectúa el cálculo.....	256
10.1.4.	Según el tiempo de observación	257
10.1.5.	Otra clasificación	258
10.2.	Planificación de una red estática	262
10.2.1.	Selección de puntos	262
10.2.2.	Ventanas de observación	262
10.2.3.	Tiempos de observación	263
10.2.4.	Organización	263
10.3.	Posicionamiento Punto Preciso (PPP).....	264
10.3.1.	Principios	266
10.3.2.	Sesgos y errores	267
10.3.3.	Ventajas e inconvenientes.....	268
10.3.4.	Algunos proveedores de datos y productos de PPP	268
10.4.	Tipos de receptores	270

10.4.1. Receptor GNSS topográficos, minería, construcción. Controladores y Antenas	272
10.5. Bibliografía	279
Capítulo 11. Combinación de fase portadora, estático relativo y determinación de ambigüedades.....	281
11.1. Combinación de fase de portadora	281
11.1.1. Simples diferencias de fase.....	281
11.1.2. Dobles diferencias de fase	284
11.1.3. Triples diferencias de fase.....	285
11.2. Determinación de Ambigüedades	288
11.3. Resolución de ambigüedades con datos de dos frecuencias	289
11.4. Técnicas de búsqueda de ambigüedades.....	293
11.4.1. Resolución ambigüedades en movimiento (OTF)	293
11.4.2. Resolución rápida de ambigüedades	293
11.4.3. Filtro de búsqueda rápida de ambigüedades	294
11.4.4. Método de ajuste de decorrelación de ambigüedades	294
11.5. Bibliografía	294
Capítulo 12. Cálculo y compensación de redes.....	295
12.1. Método general	295
12.2. Red ligada	298
12.2.1. Observaciones indirectas	299
12.2.2. Compensación de una red ligada. Resumen.....	305
12.3. Red libre.....	306
12.3.1. Solución mediante matriz de constreñimientos	307
12.3.2. Solución mediante matriz pseudoinversa	307
12.4. Iteraciones.....	308
12.5. Método Secuencial o solución progresiva. Ajustes coordinados	309
12.5.1. Adición y sustracción de observables	310
12.6. Bibliografía	310

Capítulo 13. Posicionamiento absoluto y relativo	311
13.1. Cálculo de la posición absoluta de un punto por pseudodistancias de código	311
13.2. Posicionamiento absoluto con fase de la portadora.....	316
13.3. Posicionamiento relativo. Cálculo de líneas base	321
13.4. Ajuste de una red de vectores GNSS	324
13.5. Matriz varianza-covarianza. Correlación entre combinaciones de fases.....	325
13.5.1. Correlaciones de las simples diferencias	326
13.5.2. Correlaciones de las dobles diferencias.....	326
13.5.3. Correlaciones de las triples diferencias.....	328
13.6. Esquema: cálculo líneas base software comercial.....	329
13.7. Cálculos de redes de alta precisión	330
13.8. Bibliografía	332
Capítulo 14. Análisis estadístico de hipótesis y resultados. Fiabilidad, precisión	333
14.1. Análisis estadístico de hipótesis y resultados	333
14.2. Pruebas estadísticas: consideraciones generales	335
14.3. Pruebas o test tras el ajuste.....	339
14.3.1. Pruebas o test estadísticos para validar el modelo	339
14.3.2. Test global χ^2	340
14.3.3. Prueba F.....	341
14.4. Estudio de la fiabilidad interna de la red. Detección de errores	343
14.4.1. Fiabilidad interna	343
14.4.2. Estudio de la fiabilidad externa (BNR Bias to Noise Ratio)	349
14.5. Precisión	350
14.5.1. Figuras de error	350
14.6. Particularización a redes GNSS. Esquema.....	354
14.7. Líneas base.....	355
14.7.1. Parámetros estadísticos de calidad.....	355
14.8. Ajuste de la red	359

14.8.1. Ajuste Red Libre	360
14.8.2. Ajuste Red Ligada	360
14.8.3. Test de Tau	360
14.8.4. Ponderación	361
14.8.5. Fiabilidad externa	363
14.9. Bibliografía	363
Capítulo 15. Correcciones diferenciales	365
15.1. GNSS diferencial.....	365
15.2. Cinemático en Tiempo real RTK	367
15.2.1. Solución de estación simple, antena más próxima.....	369
15.2.2. LADGNSS. Solución de Red RTK.....	371
15.2.3. Requisitos básicos para trabajo con RED RTK/NTRIP	372
15.2.4. Solución RTX Trimble xFill	373
15.3. Formatos de transmisión de datos GNSS.....	374
15.3.1. Formato RTCM. Radio Technical Comission for Maritime Service.....	375
15.3.2. Formato CMR y CMR+, CMRx	378
15.3.3. RTCA.....	378
15.4. El protocolo Ntrip.....	379
15.5. Soluciones o sistemas de correcciones diferenciales RTK.....	382
15.5.1. Solución de red RTK	382
15.5.2. Virtual Reference Station (VRS).....	385
15.5.3. FKP. Parámetros de corrección de área o planos.....	387
15.5.4. La solución MAC (Master Auxiliary Concept)	388
15.5.5. MAX Master Auxiliary Corrections	390
15.5.6. I-MAX Individualized Master Auxiliary Corrections	391
15.5.7. Comparativa y soluciones RTK	392
15.5.8. Repetidor amplificador de señal.....	393
15.6. DGNSS de precisión, desde el espacio SBAS.....	393
15.6.1. OmniSTAR	393

15.6.2. Otros proveedores de correcciones diferenciales	394
15.7. GNSS y Agricultura de precisión.....	396
15.8. Bibliografía	401
Capítulo 16. Redes de estaciones permanentes	403
16.1. Red de estaciones permanentes. Redes GNSS activas.....	403
16.1.1. Objetivos y aplicaciones fundamentales de estas redes	405
16.1.2. Características básicas	405
16.2. Estructura o jerarquía de redes.....	406
16.3. Redes internacionales.....	408
16.3.1. IGS Servicio Internacional GNSS.....	408
16.3.2. CORS-National Geodetic Survey (USA)	408
16.3.3. Red permanente europea EPN	409
16.3.4. European Combined Geodetic Network	409
16.4. Redes nacionales.....	409
16.4.1. Red ERGPS del IGN de España	409
16.5. Redes regionales o autonómicas en España.....	412
16.5.1. Red de estaciones de referencia GNSS de Valencia: red ERVA.....	413
16.5.2. Red geodésica activa de Aragón.....	413
16.6. Redes de otros organismos o instituciones oficiales de España	415
16.6.1. La red española DGPS para la navegación marítima	415
16.6.2. Redes instituciones privadas.....	415
16.6.3. Otros proyectos de carácter científico	416
Capítulo 17. Transformación de coordenadas	417
17.1. Transformación de coordenadas geodésicas a cartesianas ECEF	417
17.2. Transformaciones entre sistemas de referencia	421
17.2.1. Transformaciones de semejanza	423
17.3. Transformación de alturas	430
17.4. Bibliografía	430
Bibliografía comentada	433
Acrónimos	437