

Capítulo 1

Sistemas de referencia de la Geodesia actual

1.1 Introducción

La noción de sistema de referencia espacial es en general familiar. Parece natural que a cada punto del espacio se le pueda asociar un conjunto de coordenadas que definan su posición en forma unívoca y universal. Sin embargo, definir y poder usar un sistema de referencia en la realidad física no es trivial. Durante casi toda la historia del hombre, la necesidad de dar coordenadas a puntos se limitaba a un grupo de pocas pero relevantes aplicaciones como ser la navegación y en menor medida la delimitación de propiedades. En el ámbito de la ciencia, el desarrollo de los sistemas de referencia estuvo ligado a la Geodesia, en relación con problemas tales como la determinación de la forma y dimensiones de la Tierra, y a la Astronomía, en que se persigue la validación de teorías físicas o su refinamiento a partir de mediciones de las posiciones de objetos celestes. Fue finalmente el interés por la navegación en el último cuarto del siglo XX el que aportó los recursos que resultaron en el desarrollo actual de los sistemas de referencia terrestres.

Antes de la era espacial, distintos sistemas de referencia, apropiados a las necesidades arriba mencionadas, se desarrollaron independientemente: En la Astronomía se encaró el problema de la forma más general, ya que para esta ciencia se presentaba de la forma más compleja: desarrollar sistemas de referencia que sirvieran para expresar las posiciones de los objetos celestes que eran observadas desde la Tierra. Esto requiere conocer suficientemente bien los movimientos de la Tierra como para expresar las posiciones de

objetos y observadores respecto de un sistema inercial, que permita una descripción sencilla de fenómenos físicos de interés, como por ejemplo el movimiento orbital de los planetas. Estas investigaciones dieron un gran impulso al conocimiento de la rotación terrestre. Debido a que en Astronomía se pueden medir direcciones a los objetos con mucha exactitud pero no las distancias hasta ellos, los sistemas de referencia celestes solamente definen la orientación de los ejes coordenados, pero no definen la escala, siendo asimismo la posición del origen del sistema prácticamente arbitraria. Paralelamente, la geodesia clásica desarrolló para sus fines, sistemas de referencia terrestres que, debido a las limitaciones de las técnicas disponibles, mantenían una exactitud aceptable en regiones de a lo sumo algunos cientos de kilómetros y encontraban un obstáculo insalvable en los océanos. En la mayoría de los países se utilizaron estos sistemas de referencia como base para el ordenamiento de la información catastral y la cartografía.

A fines de la década del '50, el comienzo del uso de los satélites artificiales, y más tarde, la disponibilidad de relojes muy precisos, marcaron un punto de inflexión en la historia de los sistemas de referencia. Las órbitas de los satélites materializan naturalmente el centro de masa de la tierra como uno de los focos de sus órbitas. Los relojes atómicos permitieron la medición del tiempo de propagación de ondas electromagnéticas entre dichos vehículos y la Tierra con precisión mejor que un nanosegundo. Estas herramientas, sumadas a las ya existentes y complementadas por la disponibilidad de computadoras cada vez más veloces, dieron lugar a la construcción de una nueva generación de sistemas de referencia en la Astronomía y la Geodesia. En particular ya no puede hablarse de ellos como entes separados siendo que cada uno necesita del otro para poder ser materializado con la exactitud que las herramientas de medición actuales requieren. Los nuevos sistemas terrestres son por naturaleza globales. Su orientación en el espacio proviene mayormente de los sistemas celestes de la Astronomía, mientras que su escala y origen son aportados por determinaciones de posiciones de satélites artificiales.

Los sistemas de referencia modernos han alcanzado una precisión de pocos centímetros. Esto requiere no solamente modelar el movimiento de la Tierra en el espacio, sino también tener en cuenta movimientos mucho más sutiles pero que afectan en forma notoria a las posiciones de las estaciones de observación terrestres. Así ha sido necesario, por ejemplo, complicar el modelo de corteza terrestre: el uso de un modelo de corteza terrestre rígida ocasionaría la imposibilidad de integrar observaciones realizadas con algunos años de

diferencia en el mismo sitio sin degradar el sistema ya que las placas tectónicas tienen movimientos y deformaciones del orden de algunos centímetros por año. Esto obliga a un replanteo de lo que se considera como corteza terrestre, ya que al estar en movimiento es preciso separar a este de la rotación terrestre propiamente dicha. Los nuevos sistemas de referencia impulsan el conocimiento de la geodinámica global aportando mediciones directas de las velocidades de deriva de las placas tectónicas e incluso detectando deformaciones regionales en los márgenes activos de los continentes, donde estas son más intensas.

En este capítulo, se desarrollarán los conceptos fundamentales en que se basa la definición de los sistemas de referencia terrestres y celestes y la vinculación entre ellos. Luego se describirá el sistema de convenciones del Servicio Internacional de la Rotación de la Tierra (IERS), que define el estado del arte de la realización de los sistemas de referencia celeste y terrestre y su vinculación mutua. Seguidamente se describen brevemente las técnicas de observación que hacen posible la materialización de los sistemas de referencia modernos. A continuación y como ejemplo de la aplicación de las convenciones antes descritas, se resumen las características salientes de los últimos marcos de referencia producidos por el IERS. En la sección siguiente se describe brevemente la situación en Sudamérica y la Argentina respecto del acceso a estos marcos de referencia terrestres globales. Finalmente, por su masiva difusión entre los usuarios de los sistemas satelitales de posicionamiento, se describen algunos sistemas de referencia producidos por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos.

1.2 El marco conceptual

En la presente sección se desarrollan los principales conceptos relativos a la definición y realización de los sistemas de referencia globales en uso durante la última década. Tratamientos extensos de estos temas pueden encontrarse por ejemplo en [Kovalevski et al., 1989] y [Altamimi, 1990].

1.2.1 El sistema de referencia ideal

Un sistema de referencia se define primariamente mediante el *enunciado* de una propiedad general que los objetos referidos a él deberán cumplir. Esto es denominado “sistema de referencia ideal” y puede ser, por ejemplo, pedir que las ecuaciones de movimiento de todos los objetos puedan ser expresadas respecto de él sin necesidad de incluir términos de aceleración debidos al movimiento del sistema de referencia. El enunciado del sistema de referencia ideal requiere seguidamente de la *selección* de una estructura física o conjunto de objetos que cumpla con la o las propiedades requeridas con la mejor aproximación posible. Cumplido este paso, debe tenerse presente que se cuenta tan sólo con una definición, que sin embargo no provee a los usuarios de medio alguno para acceder al sistema de referencia.

1.2.2 El sistema de referencia convencional

Para hacer accesible el sistema de referencia antes definido, se debe dar coordenadas a objetos componentes de la estructura física referida en §1.2.1 a partir de observaciones. Esto requiere previamente la *selección* de un conjunto de modelos y constantes físicas que permitan describir adecuadamente los movimientos y/o posiciones de la estructura física previamente elegida, en relación con las técnicas de observación disponibles. Estas selecciones no son únicas ya que en general hay muchas maneras de modelar los fenómenos físicos, existiendo siempre cierto grado de arbitrariedad en la selección. Dicha arbitrariedad es natural debido a que los modelos científicos se encuentran en constante evolución. En consecuencia, es menester llegar a un *acuerdo* para utilizar algún conjunto particular de ellos en la definición de un sistema de referencia y que dicho acuerdo perdure en el tiempo, aunque los modelos sean perfeccionados rápidamente. Proceder de otro modo resultaría en la imposibilidad de combinar resultados provenientes de distintos grupos de trabajo e incluso de compararlos entre sí. Además de estas convenciones concernientes a los modelos y constantes, que caracterizan la física de la estructura a describir y las observaciones a realizar sobre sus componentes, se pueden utilizar convenciones adicionales a fin de que el sistema de referencia resultante sea lo más compatible posible con otros preexistentes. Un ejemplo en este sentido son las convenciones recomendadas para la orientación, escala y posición del geocentro de las futuras realizaciones del sistema

de referencia del IERS en [Blewitt et al., 1999]. Esto es importante a fin de poder utilizar con menor dificultad datos expresados en sistemas antiguos junto con otros expresados en el nuevo. El resultado de la adopción de todas estas convenciones constituye el “sistema de referencia convencional” llamado también más simplemente “sistema de referencia”. Sin embargo, en este punto no tenemos aún manera de referir los objetos de nuestro interés al él. El sistema de referencia permanece aún inaccesible a los usuarios ya que aún no es posible vincular objetos físicamente al él mediante observaciones.

1.2.3 El marco de referencia

El fin último de un sistema de referencia es dar la posibilidad de expresar cuantitativamente posiciones de objetos respecto de él. Para esto es indispensable contar con las coordenadas de un conjunto inicial de puntos. Estos deben, a su vez, permitir dar coordenadas a otros nuevos mediante observaciones adecuadas. Habiendo *definido* previamente un sistema de referencia, compuesto por un sistema de referencia ideal, una estructura física asociada, y un conjunto de convenciones o sistema de referencia convencional, se *materializa* esta idealización mediante un conjunto de coordenadas y su evolución temporal, lo que constituye un “marco de referencia”. Los puntos cuyas coordenadas se determinan están asociados a los objetos referidos en §1.2.1 como integrantes de la estructura física que cumple con las propiedades que conforman el sistema de referencia ideal. Las coordenadas se determinan mediante observaciones adecuadas y para su cálculo se aplican los modelos y constantes físicas que conforman el sistema de referencia convencional.

1.2.4 Densificación del marco de referencia

El esfuerzo requerido para la materialización de un sistema de referencia y los estrictos requisitos que deben cumplir los puntos que se utilizan hace que los marcos de referencia fundamentales estén constituidos por sólo un puñado de objetos o puntos. Esto hace necesario un trabajo posterior de densificación a fin de hacer el sistema accesible al mayor número posible de usuarios. En esta etapa se recomienda utilizar todos los parámetros establecidos en el sistema de referencia convencional. Sin embargo, según sea el fin de la

densificación, pueden tolerarse condiciones menos restrictivas sobre la exactitud de las coordenadas de los nuevos puntos en favor de lograr un mayor número de ellos.

1.3 Sistemas de referencia celestes y terrestres

Según que la estructura física elegida para cumplir la definición del sistema de referencia ideal sean ciertos cuerpos celestes en el espacio extraterrestre o puntos sobre la corteza terrestre, se estará ante la definición de un sistema de referencia celeste o terrestre respectivamente. Se mencionarán brevemente los dos casos, ya que en la práctica resultan interdependientes dado que ambos deben materializarse a partir de observaciones realizadas desde la Tierra.

1.3.1 Sistemas celestes

Existen dos tipos de definiciones mayormente utilizados: definiciones dinámicas y cinemáticas. Ambos tipos han sido empleados en Astronomía para la definición de sistemas de referencia. Las definiciones cinemáticas sin embargo han cobrado un indiscutible predominio a partir del establecimiento de nuevos métodos de medición, en especial la técnica VLBI. Ambos tipos de definiciones son equivalentes en que pueden establecer sistemas inerciales desde el punto de vista de la mecánica newtoniana.

Definición dinámica

Dada una estructura física, su dinámica es la solución de sus ecuaciones diferenciales de movimiento, expresadas respecto de una terna de ejes fijos en el espacio. Las leyes de la dinámica establecen ciertos puntos y direcciones que son especialmente convenientes para definir un sistema de referencia. Ese es el caso del baricentro del sistema, libre de aceleraciones en ausencia de fuerzas externas, y adecuado para establecer el origen del sistema. Por otra parte, la dirección del vector momento angular total del sistema permanece fija en el espacio si sobre el sistema no actúan torques externos, por lo que en general se la usa para definir uno de los ejes de la terna coordenada. Ejemplos de este tipo de sistema son los FK3 y FK4, basados en las teorías de Newcomb de la precesión y la dinámica del Sistema Solar [Kovalevski et al., 1989].

Definición cinemática

Este enfoque supone que el universo visible no rota como un todo. O sea que los movimientos propios de los cuerpos que lo componen no pueden ser interpretados como una rotación en bloque. En la práctica implica suponer que existe un conjunto de cuerpos que están fijos en el espacio y que cualquier movimiento aparente de los mismos pueda ser interpretado como un movimiento de la plataforma de observación.

Como ningún cuerpo físico puede tener una velocidad superior a la de la luz, un objeto situado suficientemente lejos de la Tierra tendrá un movimiento propio despreciable. En efecto, un cuerpo alejado de la Tierra más de 3.26×10^8 años luz que se moviera a la velocidad de la luz en forma tangencial al radio vector entre él y la Tierra, tendrá un movimiento aparente anual menor que 0.7 milisegundos de arco. De hecho, muchos cuásares se encuentran a distancias mucho mayores que 3.26×10^8 años luz y si consideramos que sus velocidades tangenciales deben ser menores que la de la luz, su movimiento aparente anual será indetectable con las técnicas actuales de observación. En consecuencia, es posible construir un sistema de referencia no rotante, mediante objetos tan lejanos que puedan considerarse fijos en el espacio. Es interesante notar que los objetos están igualmente fijos para un punto situado en el centro de la Tierra o en el baricentro del sistema solar o en cualquier otro punto del entorno espacial local, por lo que esta definición no aporta ningún punto preferente para definir el origen del sistema. Tampoco define ninguna dirección de preferencia respecto de la cual referir los ejes. Estos parámetros deberán elegirse independientemente más adelante.

1.3.2 Sistemas terrestres

Deben permitir expresar las coordenadas de puntos sobre la corteza terrestre teniendo en cuenta sus movimientos relativos a lo largo del tiempo. El problema sería más sencillo si la Tierra fuera rígida, pero no es así, ya que además de deformarse el planeta como cuerpo, también lo hace la corteza. En consecuencia se debe definir el sistema ideal mediante ciertas condiciones adicionales a fin de separar el movimiento de rotación terrestre de los desplazamientos relativos de los puntos sobre la corteza donde se realizan las mediciones. Esto puede lograrse por ejemplo exigiendo que la energía cinética total de la corteza sea mínima, como se expresa en (1.1).

$$\frac{1}{2} \int_C \left[\frac{d\vec{r}}{dt} \cdot \frac{d\vec{r}}{dt} \right] dS = \text{mín} \quad (1.1)$$

Donde \vec{r} es el radio vector que va desde origen del sistema terrestre a un punto sobre la porción dS con masa dm de la superficie terrestre C , que es el dominio de integración. La condición anterior implica que la cantidad de movimiento y el momento cinético netos de la corteza sean nulas, como se expresa en (1.2).

$$\int_C \frac{d\vec{r}}{dt} dS = 0 \quad \int_C \vec{r} \wedge \frac{d\vec{r}}{dt} dS = 0 \quad (1.2)$$

En la práctica, estas integrales son reemplazadas por sumas sobre los puntos de observación elegidos y puede considerarse que ellos se mueven en forma independiente o que forman parte de un número finito de placas rígidas en movimiento. La elección de uno de estos modelos determina el tipo de sistema de referencia ideal a utilizar. En, por ejemplo, [Altamimi, 1990] o [Bock, 1996] pueden hallarse tratamientos más detallados de este tema.

1.3.3 Sistemas intermediarios

Supóngase que se desea representar el movimiento de la Tierra en el espacio. Se tiene en consecuencia una terna de ejes fijos a la Tierra $[o,x,y,z]$ y una terna inercial $[O,X,Y,Z]$. El movimiento de la Tierra quedará descrito si se conocen las expresiones de las coordenadas de o y las direcciones de los ejes respecto del sistema $[O,X,Y,Z]$.

Por razones prácticas ha resultado muchas veces conveniente definir sistemas intermedios entre los dos antes considerados. Esto se hace por ejemplo para separar el movimiento del polo de la precesión y la nutación. La elección de este sistema es arbitraria y no hay un criterio intrínsecamente mejor que otro para hacerlo. Entre las propuestas más usadas están que el eje principal sea coincidente con la dirección del vector momento angular terrestre, con la posición del eje instantáneo de rotación, el eje de la figura, etc.

Estos sistemas intermedios no son sistemas de referencia como se ha definido antes en este capítulo, y conceptualmente se deberían considerar solamente los sistemas celeste y terrestre antes descriptos transformando entre ellos de manera directa sin intermediario alguno.

1.3.4 El enfoque relativista

Se debe mencionar en este punto que de acuerdo a la teoría de la relatividad general, todos los sistemas de referencia deben ser considerados como locales dependiendo de la distribución de masas que haya en su vecindad. Esto implica que llevar un sistema de coordenadas desde un punto a otro del espacio exige el conocimiento de la distribución de masas en cada punto del espacio. Es debido a esto que en rigor los sistemas de referencia ideales referidos más arriba deberían ser llamados cuasi-inerciales. En la práctica se trabaja como si el sistema fuera inercial y se agregan correcciones al concepto newtoniano cuando es necesario. Habiendo sido hecha esta aclaración, se seguirá utilizando el término inercial en el contexto de los sistemas de referencia a fin de no complicar excesivamente el lenguaje.

1.3.5 La referencia temporal

La mecánica de Newton postula la existencia de un único tiempo, válido para todo el universo. Esto equivale a decir que una única escala de tiempo o reloj puede definir la variable independiente de las ecuaciones de movimiento de cualquier cuerpo en el Universo. Si en cambio aceptamos como válida la teoría de la relatividad especial, el tiempo y el espacio quedan ligados, pero como su geometría es euclídea, esto no tiene efectos en los sistemas de referencia. La introducción de la teoría de la relatividad general en cambio, hace que la relación espacio-tiempo quede afectada por la gravedad. Esto complica la definición de las escalas de tiempo haciéndolas locales, y por consiguiente conviene tratar la definición del tiempo como se hizo para los sistemas de referencia espaciales identificando cinco pasos:

Concepto

Se basa en la teoría de la relatividad general. Se deja el nombre “tiempo” para el tiempo absoluto ideal newtoniano y se adopta la definición de “argumento temporal ideal”. Dos definiciones son de utilidad en este contexto: El *tiempo propio ideal*, que se define con relación a una partícula aislada en reposo respecto de la cual se cumplen las leyes de la mecánica cuántica y *tiempo coordinado ideal*, correspondiente a un cierto dominio del espacio-tiempo que es descrito por un tensor métrico tetradimensional de Einstein. De las

cuatro coordenadas, la que corresponde a la componente negativa de la diagonal del tensor es el tiempo coordinado.

Selección de una estructura física

Las definiciones anteriores de tiempo deben ser aplicadas a algún sistema físico. Por ejemplo para el tiempo propio sería un átomo aislado de Cs 133. Para el tiempo coordinado hay que definir dónde es válido ese tiempo, por ejemplo sobre una equipotencial cercana a la superficie de la Tierra resultando un tiempo ideal terrestre geocéntrico, en el baricentro del sistema solar, resultando un tiempo ideal baricéntrico, etc.

Modelado de la estructura

Como en el caso de los sistemas de referencia espaciales, se debe modelar la estructura física usando un conjunto de parámetros elegidos en forma convencional. En el caso del tiempo propio, se puede definir al segundo como el tiempo equivalente a 919631770 transiciones hiperfinas del Cs 133. En el caso del tiempo coordinado baricéntrico, se puede usar el mismo modelo de sistema solar que define el Sistema de Referencia Convencional baricéntrico. Se sugiere referirse a estos tiempos como argumentos temporales convencionales en analogía con los sistemas de referencia convencionales definidos antes.

Realización

La realización de un argumento temporal ideal convencional se hace a través de una escala de tiempo de la misma forma que un marco de referencia materializa a un sistema de referencia. Esto implica la necesidad de mediciones y comparaciones.

Densificación

La densificación de la escala de tiempo se realiza mediante la sincronización de varios relojes a una dada escala de tiempo de modo que esta sea accesible en el lugar en que se necesite. Como ejemplo puede citarse la diseminación del Tiempo Atómico Internacional (TAI) mediante el Tiempo Universal Coordinado (UTC).

Relación entre las escalas de tiempo y los sistemas de referencia

Para la construcción de los marcos de referencia convencionales y las escalas de tiempo se deben utilizar los mismos modelos físicos. Esto implica que ambos conceptos están asociados. Así, para la construcción de un sistema de referencia basado en la dinámica del

sistema solar, se necesita un tiempo referido al centro de masas del sistema: un argumento temporal baricéntrico. Si en cambio se pretende modelar los movimientos de satélites artificiales alrededor de la Tierra, se debería usar un argumento temporal geocéntrico. Un tratamiento más extenso de la referencia temporal y definiciones asociadas puede encontrarse en [Kovalevski et al., 1989].

1.3.6 Constantes fundamentales

La definición de estándares es necesaria a fin de unificar criterios si se desea construir y utilizar un sistema de referencia convencional. Esto implica definir un conjunto de constantes fundamentales y utilizarlas excepto en los casos en que se esté trabajando en el mejoramiento de las mismas. Son adoptadas usualmente por uniones científicas internacionales y se las llama constantes fundamentales. Como ejemplo se pueden mencionar: la constante gravitacional, la velocidad de la luz en el vacío, los valores de las masas del sol y los planetas del sistema solar, etc. Un ejemplo de tabla de constantes fundamentales utilizadas en la materialización de sistemas de referencia puede encontrarse en [McCarthy, 1996].

1.3.7 Cooperación internacional para establecer el sistema de referencia global

La definición de sistemas de referencia convencionales globales y de uso general exige que:

- a) Sean definidos de acuerdo al estado del arte de los modelos físicos y técnicas de medición disponibles.
- b) Aprovechen las observaciones realizadas en todo el mundo mediante las técnicas relevantes a su definición.
- c) Sean materializados de manera que puedan ser utilizados por la mayor cantidad posible de usuarios.
- d) Haya una política de mantenimiento constante.
- e) Exista consenso en la comunidad acerca de la conveniencia de su uso generalizado.

Esto exige un esfuerzo de cooperación científica internacional, tarea en que la Asociación Internacional de Geodesia (IAG) y la Unión Astronómica Internacional (IAU) han adquirido experiencia durante todo el siglo XX como se detalla a continuación.

Desde 1899 a 1982 funcionó el servicio internacional de la Latitud (ILS) con el propósito de determinar el movimiento del polo mediante cinco estaciones dispuestas aproximadamente a la misma latitud y con los mismos instrumentos.

Desde 1912 funcionó el Servicio Internacional de la Hora (BIH) para la definición y diseminación del tiempo. Este servicio generó dos secciones sucesivas: desde 1955 a 1967 el Rapid Latitude Service (RLS) realizó determinaciones y predicciones de la posición del polo para realizar correcciones de tiempo. Desde 1967 a 1988 el servicio de los parámetros de rotación de la Tierra (Service of the ERP) realizó determinaciones simultáneas del movimiento del polo y la velocidad de rotación terrestre (UT1) usando todas las técnicas de observación disponibles.

Entre 1962 y 1988 el Servicio Internacional del Movimiento del Polo (IPMS) realizó determinaciones de la posición del eje de rotación instantáneo a partir de todos los datos disponibles de latitud. A partir del año 1977 también produjo determinaciones de UT1 derivadas de todas las observaciones disponibles de UT0.

A fines de la década del '80 estaban desarrolladas ya las técnicas VLBI y SLR, que permitirían realizar determinaciones de los parámetros de rotación terrestre con una precisión que haría obsoletos los métodos ópticos clásicos usados hasta entonces. A esto se sumaba la disponibilidad de sistemas satelitarios de navegación como TRANSIT y GPS, que permitirían un acceso sencillo y masivo a los sistemas de referencia globales. En estas condiciones, en el año 1988, se discontinuaron las actividades de los servicios del BIH, IPMS e ILS y se concentraron todas las actividades en el International Earth Rotation Service (IERS) que en adelante fue el encargado de la determinación de los parámetros de rotación terrestre: Movimiento del polo, UT1 y correcciones a los modelos de nutación y precesión sobre la base de observaciones VLBI, LLR y SLR, a las que más tarde se agregarían GPS y DORIS. Este servicio fue encargado también de la definición de los sistemas de referencia celeste, terrestre y dinámico convencionales así como también de su materialización. En el presente trabajo interesa especialmente la materialización del

Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS) o Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF).

1.4 Las técnicas de observación

Se describirán brevemente las técnicas de observación utilizadas para la materialización de sistemas de referencia en la actualidad con el sólo propósito de indicar sus características principales. Pueden encontrarse descripciones más detalladas en por ejemplo [Altamimi, 1990] y [Hase, 1999]. La técnica GPS será descrita en forma más extensa en el capítulo 2.

1.4.1 VLBI

La interferometría de muy larga base es la piedra fundamental del sistema de referencia celeste. Consiste en la observación de emisiones de radio provenientes de fuentes extragalácticas, como por ejemplo cuásares. Las observaciones a cada objeto se realizan mediante dos radio telescopios en forma simultánea y en las mismas bandas de frecuencia. En general se eligen estaciones de observación separadas por miles de kilómetros. Los registros de ambos observatorios son a posteriori correlacionados para obtener dos observables posibles: el retardo diferencial de la señal de radio y la diferencia de fase de la señal, para las bandas de recepción elegidas, entre las dos antenas.

En la ecuación (1.3) se ve la relación fundamental entre el retardo observado y el vector que media entre las dos estaciones receptoras.

$$\tau(t) = \frac{\vec{B} \cdot \vec{S}}{c} + \Delta\tau(t) \quad (1.3)$$

Donde $\tau(t)$ es el retardo observado entre las dos antenas para la llegada del mismo frente de onda, \vec{B} es el vector que une ambas antenas, \vec{S} indica la dirección a la radiofuente, c es la velocidad de la luz y el término $\Delta\tau(t)$ agrupa una suma de correcciones que incluye un offset entre los relojes de ambas estaciones, los retardos provocados por la propagación de la señal a través de la ionosfera y troposfera, efectos relativistas, efectos causados por la estructura no puntual de la radiofuente, etc, por mencionar solamente los más importantes.

emplazados en la superficie lunar por las misiones Apollo (USA) y Lunakhod (URSS). La ecuación de observación de esta técnica relaciona el retardo de doble camino observado D , las coordenadas esféricas terrestres geocéntricas de la estación terrestre (r , θ , λ), las coordenadas ecuatoriales α , δ y ángulo horario H del retrorreflector lunar, y finalmente otros términos relativos al movimiento de rotación de la Tierra.

$$\begin{aligned}
 D - D_0 = & 2 \cdot \Delta \cdot r / D \cdot [\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(H) \cdot \partial((UT1 - UTC) - \lambda - \alpha)] \\
 & + \cos(\varphi) \cdot \cos(H) \cdot \partial A + \sin(\varphi) \cdot \partial B \\
 & + (\cos(\varphi) \cdot \cos(H) \cdot \sin(\delta) - \sin(\varphi) \cdot \cos(\delta)) \cdot \partial C + \partial D
 \end{aligned} \tag{1.5}$$

En la ecuación (1.5), r es la coordenada radial lunar del reflector, Δ es el vector que une los centros de masa de la Luna y la Tierra y los símbolos ∂A , ∂B , ∂C y ∂D indican las correcciones a calcular para los valores a priori de los parámetros r , ϕ , Δ y δ respectivamente.

La técnica LLR puede materializar el sistema de referencia con errores de varios centímetros, como lo muestran comparaciones de soluciones respecto al marco ITRF96 para las cinco estaciones en operación [Boucher et al., 1998a]. Teniendo en cuenta además que estas soluciones no incluyen las velocidades de las estaciones de observación resulta evidente que su exactitud se encuentra por debajo de las demás técnicas.

1.4.3 SLR

Esta técnica es uno de los pilares fundamentales para la materialización del ITRS. Desde sus comienzos hasta el presente, la precisión de las observaciones fue mejorando desde varios metros en sus comienzos a menos que un centímetro actualmente [ILRS, 1999].

Para la realización del ITRS, es la técnica geocéntrica por excelencia, permitiendo la definición de la posición del centro de masa la Tierra con una exactitud centimétrica. Además, por provenir de mediciones de distancia, las soluciones de SLR tienen un gran peso en la materialización de la escala del sistema de referencia [Blewitt et al., 1999].

Se observa el retardo de ida y vuelta de un pulso LASER entre la estación de observación terrestre y un retrorreflector colocado a bordo de un satélite artificial.

El modelo del movimiento del satélite se expresa en general respecto de un sistema inercial debido a la simpleza de las expresiones. Sin embargo la determinación de las órbitas se realiza a partir de observaciones desde estaciones terrestres cuyas coordenadas se expresan respecto de un sistema fijo a la Tierra. Esto implica que es necesario conocer los movimientos de la Tierra en el espacio con gran exactitud.

Del ajuste de las observaciones se obtienen los parámetros orbitales del satélite, correcciones a los modelos de rotación terrestre y también algunos coeficientes del modelo de fuerzas cuyos valores no son conocidos con suficiente exactitud a priori. Los modelos de fuerza aplicados definen el sistema inercial, mientras que el sistema terrestre queda definido como sigue: el origen queda definido al considerar nulos los términos de grado uno del desarrollo del potencial terrestre; la escala está definida por el valor adoptado para la velocidad de la luz, la constante geogravitacional GM y las correcciones relativistas que se utilicen; la orientación del sistema queda definida fijando, para cierta época, los



Figura 1.2: Red global de estaciones SLR participantes del ILRS [ILRS, 1999]

parámetros de rotación terrestre, o bien tres coordenadas de estaciones terrestres, al menos una longitud y dos latitudes. Esta forma de proceder es análoga en los casos de las técnicas SLR, GPS y DORIS, por lo que serán referidas muy brevemente en las secciones correspondientes. Las actividades de las estaciones SLR y LLR que contribuyen a la materialización del ITRS se encuentran coordinadas hoy por el Servicio Internacional de LASER Ranging o ILRS. La distribución global de las estaciones que participan en este servicio se muestra en la figura 1.2.

1.4.4 GPS

Es un sistema de satélites cuyo objetivo es brindar posición y velocidad en forma instantánea y precisa las 24 horas del día, en cualquier parte del mundo y bajo cualquier condición climática. El segmento espacial del sistema GPS consta de 24 satélites en órbitas casi circulares a 20.000 km de altura, distribuidos en seis planos orbitales equiespaciados en longitud y con una inclinación de 55 grados respecto del plano ecuatorial. El sistema está controlado por diez estaciones de rastreo que observan los satélites y permiten el cálculo y predicción de sus órbitas y correcciones a los estados de sus relojes. Éstos son luego transmitidos a los satélites para que a su vez las puedan enviar a los usuarios como efemérides transmitidas. Los usuarios reciben las posiciones y correcciones de reloj de los satélites y además pueden medir pseudo distancias a varios de ellos a la vez, lo que les permite calcular su propia localización. La observación es un retardo como en el caso de SLR, pero en este caso es de camino simple, por lo que se involucran la escala de tiempo del reloj del satélite y la del reloj de la estación receptora. El modelado de las fuerzas sobre el satélite es muy parecido al que se utiliza para SLR, adecuándolo a las características de los satélites GPS tales como la gran altitud de su órbita y la complejidad de la geometría de su superficie.

El bajo costo relativo de los receptores respecto de las demás técnicas y el gran número de aplicaciones que se sirven de GPS han contribuido a que en menos de una década se desarrollara una red mundial de estaciones de rastreo integradas en el Servicio Internacional de GPS (IGS). Esta organización, patrocinada por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG), produce órbitas GPS precisas, parámetros de rotación

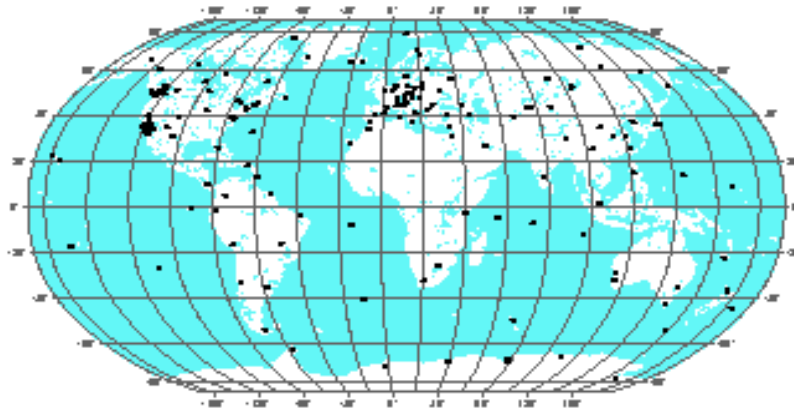


Figura 1.3: Red de rastreo GPS permanente del IGS [IGS, 1999b]

terrestre, coordenadas y velocidades de las estaciones de rastreo con exactitudes del orden de las que se obtienen con las demás técnicas descritas en esta sección. El servicio prestado por el IGS contribuye en forma decisiva a la disponibilidad actual del posicionamiento con GPS de exactitud centimétrica. La figura (1.3) muestra la distribución de las estaciones globales del IGS que contribuyen a la materialización del ITRS.

1.4.5 DORIS

El Sistema de Orbitografía por Radioposicionamiento Doppler Integrado por Satélite (DORIS) consta de un segmento espacial conformado por receptores montados a bordo de varios satélites artificiales. Estos reciben señales de una red que actualmente consta de 51 balizas instaladas sobre la superficie terrestre. Las estaciones de tierra emiten señales en dos frecuencias: $\nu_s = 2036.25$ MHz para la medición precisa del efecto Doppler y $\nu_2 = 401.25$ MHz para la corrección del retardo por efecto de la ionósfera. El receptor en el espacio mide el efecto Doppler sufrido por las señales de las balizas a causa del movimiento relativo emisor-receptor, calcula una solución de navegación para la posición del satélite con una exactitud métrica y envía todos los datos a la estación de control de Toulouse, Francia, donde se calculan órbitas precisas para los satélites, coordenadas para las balizas emisoras, parámetros de rotación terrestre, y otros productos. Por su concepción, el sistema DORIS tiene un funcionamiento muy centralizado. Los receptores y emisores tienen características muy uniformes y la red de rastreo tiene una distribución muy homogénea,

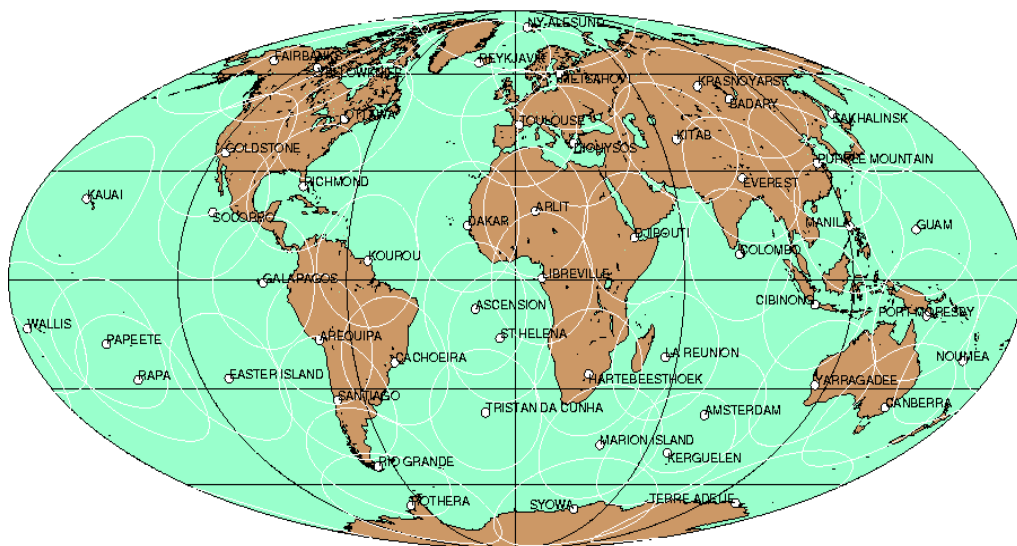


Figura 1.4: Red global de balizas DORIS [DORIS, 1999].

como se muestra en la figura (1.4). Actualmente hay receptores DORIS a bordo de los satélites SPOT2, SPOT3 y TOPEX, y se planea incluirlos también en las futuras misiones SPOT4, SPOT5, ENVISAT y los sucesores de TOPEX. Desde fines de 1995, las soluciones DORIS constituyen un aporte relevante a la materialización del ITRS [Boucher et al., 1996b][Boucher et al., 1998b].

1.5 El Sistema de convenciones del IERS de 1996

Este sistema de estándares, acordado entre la Unión Astronómica Internacional (IAU) y la Unión Geodésica y Geofísica Internacional (IUGG), establece los sistemas de referencia convencionales celeste y terrestre a través de todos los modelos y constantes fundamentales necesarios para su materialización, especificando también su vinculación a través de la rotación terrestre. Para una descripción detallada de estas convenciones ver [McCarthy, 1996].

1.5.1 El Sistema de Referencia Celeste Convencional

Siguiendo las recomendaciones de la IAU de 1991 y 1992 [McCarthy, 1992], el Sistema de Referencia Celeste Internacional (ICRS) se materializó mediante el marco de referencia homónimo (ICRF) determinado por el IERS. Este consiste en las coordenadas ecuatoriales para la época J2000.0 de un conjunto de objetos extragalácticos, determinadas mediante observaciones de VLBI. Las direcciones de sus ejes son consistentes con las del catálogo FK5, el último marco de referencia celeste determinado por observaciones ópticas. La exactitud de esta consistencia es del orden de la del marco FK5. El origen fue ubicado en el baricentro del sistema solar teniendo en cuenta la teoría de la relatividad general para los modelos de las observaciones. La estabilidad rotacional del marco se basa en la suposición de que las radiofuentes no posean movimientos propios. El ICRS fue recomendado por la IAU para su uso bajo el nombre de Sistema de Referencia Celeste Internacional (ICRS).

Ecuador

La IAU recomendó que el plano principal del sistema convencional fuera cercano al del ecuador medio en la época J2000.0 y además, que fuera consistente con el polo celeste establecido en el catálogo FK5.

Estas dos recomendaciones se contraponen en el sentido de que las técnicas de medición actuales (VLBI) permiten determinaciones cada vez más exactas de la posición del polo, por lo que determinaciones futuras podrían indicar errores sistemáticos actuales, y a su vez, las mediciones actuales arrojan diferencias significativas con el plano adoptado para J2000.0 por el marco FK5.

La solución elegida consiste en utilizar un plano ecuatorial convencional para J2000.0 dado por los modelos de nutación de [Wahr 1981], [Seidelmann, 1982] y las expresiones de la precesión dadas por [Lieske, 1977]. Este ecuador en J2000.0 coincide con el que se puede determinar con el estado del arte de la técnica de medición y cálculo VLBI actual sólo al nivel de la exactitud de los modelos antes mencionados. Si se quiere trabajar con orientaciones con una exactitud del orden de 1 msa se deben usar correcciones a los modelos que son calculadas y distribuidas en forma continua por el IERS.

El sistema FK5 se basa en mediciones ópticas, y tiene errores del orden de 50 msa, muy por encima de los errores internos del sistema actual. De todos modos, la diferencia entre los planos principales del sistema convencional elegido y del marco FK5 está dentro de la exactitud de este último. Esto permite combinar observaciones expresadas en ambos sistemas como si pertenecieran al mismo sin afectar la exactitud de las observaciones más antiguas.

Origen de las ascensiones rectas

La IAU recomendó que coincidiera con el equinoccio dinámico para J2000.0. El IERS fijó la dirección del eje x del sistema mediante las ascensiones rectas medias de 23 fuentes provenientes de varios catálogos compilados usando las coordenadas FK5 de un objeto arbitrario [Arias et al., 1988]. La incertidumbre de esta coordenada se estima en 80 msa. Los sistemas dinámicos, realizados por medio de efemérides de planetas en el sistema solar son de exactitud inferior a los realizados por medio de coordenadas de radiofuentes extragalácticas. Nuevamente, las comparaciones entre determinaciones modernas y

clásicas de la ascensión recta del equinoccio en J2000.0 muestran diferencias de 78 \pm 10 msa, lo que permanece dentro del error antes mencionado.

Precisión y exactitud

Las distintas soluciones que son integradas para obtener el ICRF mantienen la dirección de la definición de los ejes dentro de 0.1 msa. El error en la posición de una fuente individual se mantiene alrededor de 0.2 msa.

La integración de las soluciones se realiza utilizando correcciones a los modelos de nutación a fin de evitar errores de varios msa, límite de exactitud para el modelo convencional mencionado más arriba.

Disponibilidad del marco de referencia

Consta de las ascensiones rectas y declinaciones de aproximadamente 600 radiofuentes extragalácticas. Su importancia se incrementa por estar vinculado a otros marcos de referencia de uso generalizado en Astronomía y ciencias de la Tierra:

ITRF o marco de referencia terrestre internacional. Vinculado por medio de los modelos convencionales de precesión y nutación a los que se agregan los parámetros de rotación terrestre, estimados diariamente con una precisión de 0.5 milisegundos de arco, que equivale a una incerteza de 1,5 cm para las posiciones sobre la superficie terrestre.

HIPPARCOS o Marco de referencia galáctico. Vinculado a través de observaciones a radiofuentes que además emiten radiación en frecuencias ópticas.

Efemérides del JPL del sistema solar.

1.5.2 El Sistema de Referencia Terrestre Convencional

Definición

Es *geocéntrico*, definiendo al geocentro teniendo en cuenta las contribuciones oceánicas y atmosféricas. La *escala* queda definida por el uso del Tiempo Coordinado Geocéntrico (TCG) para un marco de referencia local en el contexto de la teoría de la relatividad general. La *orientación* coincide por la definida por el BIH para 1984.0. La *evolución*

temporal de las coordenadas de los puntos sobre la corteza terrestre se define de modo que no se generen rotaciones globales que se agreguen a la propia del planeta.

Realización

El CTRS se realiza mediante coordenadas de estaciones sobre la superficie terrestre. Para expresar las posiciones en coordenadas geodésicas se utiliza el elipsoide GRS80, geocéntrico, con un semieje mayor $a=6378137.0$ m y una excentricidad e tal que $e^2=0.00669438003$. Este CTRS, monitoreado por el IERS, es comúnmente llamado ITRS y fue especificado por resolución de la IUGG en su 20^{ma} asamblea general, en Viena, en 1991. La materialización del sistema se realiza mediante la combinación de resultados de varias técnicas de observación: VLBI, SLR, LLR, GPS y DORIS. La técnica VLBI posee el mayor peso en la definición de la *orientación*. El *origen* y la *escala* del sistema se determinan mediante el aporte de SLR, GPS y DORIS, todas técnicas que implican modelos dinámicos. Actualmente, las soluciones de LLR no toman parte en la combinación que materializa el ITRS [Boucher et al, 1996b][Boucher et al, 1998a].

Varios centros de cálculo contribuyen a la realización del ITRS. Las soluciones correspondientes son primero referidas a una realización particular del ITRS y luego combinadas para obtener una nueva realización. En estos marcos de referencia, la posición de un punto y su *evolución* sobre la superficie terrestre se expresa como en (1.6)

$$\vec{X}(t) = \vec{X}_0 + \vec{V}_0 \cdot (t - t_0) + \sum_i \vec{X}_i(t) \quad (1.6)$$

donde el cero indica la época de definición del marco de referencia, V indica la velocidad del punto debida a los movimientos tectónicos y la suma al final de la expresión agrupa varios efectos variables en el tiempo que modifican la posición del punto como ser las mareas terrestres (marea permanente más componentes periódicas), efecto de la carga oceánica, levantamientos post-glaciales, carga atmosférica y en general cualquier fenómeno modelable que implique movimientos de las estaciones mayores que unos pocos milímetros.

Las materializaciones del ITRS producidas por el IERS consisten en una lista de coordenadas y velocidades para un conjunto de estaciones distribuidas sobre toda la Tierra y válidas para una época de referencia t_0 . Se llaman ITRFYY donde YY indica el año de los datos más recientemente incorporados al cálculo. La época de referencia del marco, que

es indicada en la expresión (1.6) con el subíndice 0, se agrega aparte; siendo ITRFY Y solamente el ‘nombre’ del marco de referencia. Las características de cada marco de referencia terrestre producido por el IERS se indican en la serie IERS Technical Notes, por ejemplo, [Boucher et al., 1999]. Los estándares o convenciones que definen los sistemas de referencia del IERS se publican como IERS Conventions y sufren actualizaciones cada varios años. Las últimas dos actualizaciones son de 1992 y 1996 [McCarthy, 1992][McCarthy, 1996].

Dadas las características señaladas para los marcos de referencia producidos por el IERS en los últimos años (ITRFYY), se plantean dos tipos de conversiones de coordenadas: conversiones de marco a marco y conversiones de época sin mediar un cambio de marco. Como ejemplo, si se quiere comparar coordenadas de estaciones expresadas en ITRF93 (época de referencia 1998.0) con otras expresadas en ITRF97 (1997.0), primero se deben transformar las coordenadas ITRF93 a ITRF97 y luego transformar la época de las coordenadas resultantes a 1997.0 usando las velocidades ITRF97. Las transformaciones entre marcos de referencia se hace en general como sigue:

$$\begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D & -R_z & R_y \\ R_z & D & -R_x \\ -R_y & R_x & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

Donde T indica traslación en cada componente del marco viejo al nuevo, D es el factor de escala diferencial entre ambos marcos de referencia y R son las rotaciones alrededor de los ejes indicados del marco nuevo expresadas en radianes. Esta es una expresión aproximada de la transformación, válida para rotaciones pequeñas entre los marcos de referencia, condición que siempre se cumple entre los marcos de referencia globales provenientes de las técnicas geodésicas espaciales que aquí se han mencionado. La transformación de época implica el conocimiento del comportamiento cinemático del área de la estación cuyas coordenadas se desea transformar. Esta información está contenida en primera aproximación en el modelo NNR-NUVEL1A [De Mets et al., 1994], adoptado en 1996 por el IERS como estándar, que divide a la superficie terrestre en 16 placas rígidas de rotación uniforme alrededor de sus polos de Euler. Este modelo representa un promedio de los movimientos de la corteza durante los últimos millones de años y es aproximadamente coincidente con los resultados de las observaciones actuales. En particular, no predice bien los movimientos de los puntos cercanos a los bordes activos de las placas, donde se han

observado deformaciones del orden de varios cm por año [Kendrick et al., 1999]. Por lo anterior, en general la velocidad de un punto debe ser considerada como se indica en (1.8), donde el primer término del segundo miembro es la velocidad horizontal de la placa según el modelo NNR-NUVEL1A

$$\vec{V}_0 = \vec{V}_{\text{placa}} + \vec{V}_r \quad (1.8)$$

y el segundo es una velocidad residual que puede ser estimada junto con la posición si se cuenta con observaciones durante al menos unos pocos años en el sitio. Existen en la actualidad modelos de placas que tienen en cuenta la información geodésica y consideran zonas de la corteza en que las placas son rígidas y otras en que hay deformación como se muestra por ejemplo en [Drewes, 1998].

1.5.3 Transformaciones entre sistemas celestes y terrestres

Se ha afirmado en §1.3.1 que el eje de rotación terrestre materializa una dirección en el espacio que es muy adecuada para definir un sistema de referencia. Sin embargo, su posición en el espacio varía con el tiempo, y lo mismo sucede con su posición respecto de la superficie terrestre. Estas variaciones son complejas y su conocimiento es fundamental para lograr una materialización precisa de los sistemas de referencia Celeste y Terrestre.

La Tierra se mueve en el espacio de manera que la orientación de su eje de rotación se puede describir como la superposición de varios movimientos. Convencionalmente se define un eje de rotación o polo medio, fijo a la corteza terrestre. Los movimientos de este eje respecto del sistema inercial se agrupan bajo los términos de Precesión y Nutación. Por otra parte, los cambios del eje de rotación instantáneo respecto del convencional se denominan Movimiento del Polo. A estos movimientos se agrega la rotación terrestre propiamente dicha, compuesta por una velocidad de rotación media e irregularidades denominadas variaciones de la longitud del día (LOD).

Precesión lunisolar es el cambio secular en la posición del eje de los nodos de la órbita terrestre sobre la eclíptica. Se debe a la atracción del Sol y la Luna sobre los abultamientos ecuatoriales y otras desviaciones menores de la forma de la Tierra respecto de la esfera. Este efecto implica el movimiento de los equinoccios hacia el oeste a lo largo de la eclíptica a una velocidad de 50.3" por año, por lo que describen una circunferencia en

25.800 años, manteniendo una inclinación del plano ecuatorial de aproximadamente 23.5°. Hay otra componente de la precesión llamada planetaria, debida a la atracción de los cuerpos del Sistema Solar excepto el Sol y la Luna. Esta resulta en un movimiento de los nodos hacia el este de 12.5" por siglo y una disminución en la oblicuidad de la eclíptica de 47" por siglo. Los dos efectos descriptos se agrupan bajo la denominación genérica de precesión. El modelo convencional recomendado por el IERS [McCarthy, 1996] es el de [Lieske et al., 1977].

La nutación es un movimiento periódico en la posición del polo verdadero de la época (CEP) respecto del polo medio de la época definido por la precesión. Posee una componente principal de período 18,6 años y otras componentes de amplitudes y períodos menores. La amplitud máxima aproximada del efecto es de 9.2". Parte del movimiento puede ser predicho con mucha precisión por el modelo de Wahr (1981) y Seidelman (1982) que constituyen la Teoría de Nutación de la IAU de 1980 [McCarthy, 1996]. La parte restante del movimiento de nutación debe ser estimada a partir de observaciones de las técnicas descritas en §1.4.

Independientemente de la presencia de torques externos, el CEP se mueve respecto de un polo convencional fijo al marco de referencia terrestre, como por ejemplo el Conventional International Origin (CIO), ya en desuso, o el polo convencional actualmente usado por el IERS, que coincide con el que fuera definido por el BIH en 1984. Este fenómeno es denominado Movimiento del Polo y responde al intercambio de momento angular entre la tierra sólida, el mar y la atmósfera. Su componente puramente libre o efecto de Chandler, es un movimiento circular antihorario con un período dominante de aproximadamente 430 días y una amplitud que alcanza los 3.6 metros (0.1" de arco). La componente forzada, debida al efecto de mareas, es un orden de magnitud menor, llegando a 36 cm o 0.01" de arco, con períodos aproximadamente diurnos. Finalmente, la componente debida a la interacción con la atmósfera, tiene una magnitud del orden del efecto de Chandler (0.1" de arco). Los modelos actuales no pueden predecir el movimiento del polo con la exactitud requerida por la calidad de las observaciones, por esto se deben estimar correcciones a los modelos convencionales a partir de observaciones realizadas por las técnicas descritas anteriormente en §1.4.

La transformación completa para pasar del sistema inercial (Celeste) al rotante (Terrestre) puede escribirse como $\overset{7}{r}_{TRF} = T_{3 \times 3} \cdot U_{3 \times 3} \cdot \overset{7}{r}_{CRF}$ donde T y U contienen nueve rotaciones que se pueden separar en:

$$T = R_2(-x_p) \cdot R_1(-y_p) \cdot R_3(GAST) \quad (1.9)$$

$$[N] \cdot [P] = [R_1(-\epsilon - \Delta\epsilon) \cdot R_3(-\Delta\psi) \cdot R_1(\epsilon)] \cdot [R_3(-z_A) \cdot R_2(\theta_A) \cdot R_3(-\zeta_A)] = U \quad (1.10)$$

Donde $\Delta\epsilon$ describe la nutación en oblicuidad de la eclíptica y $\Delta\psi$ en longitud predichas por la teoría de Wahr y donde en general, la matriz $R_i(\alpha)$ representa una rotación de un ángulo α en una terna derecha alrededor del eje “i” considerada positiva si resulta antihoraria al ser observada hacia el origen desde el semieje “i” positivo. La matriz S contiene las componentes del movimiento del polo x_p e y_p y la rotación terrestre propiamente dicha, donde *GAST* es el Tiempo Sidéreo Aparente en Greenwich. Esto conforma prácticamente la totalidad de los movimientos que no son producto de torques externos T. La matriz U es aproximadamente el producto N*P que contiene la precesión y nutación. Un desarrollo más completo puede encontrarse en [Bock, 1996].

Finalmente, a fin de transformar coordenadas del sistema de referencia Celeste al Terrestre con una exactitud compatible con la de las observaciones de las técnicas descritas en §1.4 se deben incluir correcciones a la nutación (en longitud y oblicuidad) y las variaciones de la longitud del día (LOD). Estas cantidades, sumadas a las dos componentes del movimiento del polo, conforman un conjunto de cinco parámetros denominados EOP o parámetros de rotación terrestre, que son estimados diariamente por los servicios que contribuyen a la materialización del sistema de referencia terrestre.

1.5.4 Modelo de geopotencial

Se utiliza el JGM-3 [Tapley et al., 1996]. Este modelo expresa el potencial de gravedad terrestre como una suma de componentes armónicas esféricas con coeficientes hasta orden y grado 70. Esto permite modelar con suficiente exactitud las observaciones que se utilizan para la materialización del sistema de referencia. Para el satélite LAGEOS por ejemplo, utilizado para SLR, se necesitan solamente los coeficientes hasta grado y orden 20. El

valor de GM_{Tierra} a utilizar, que escala a todo el desarrollo, dependerá de que el sistema de tiempo que se use sea TCG o los clásicos TDT y TDB.

El modelo JGM-3 incluye los coeficientes C_{21} y S_{21} . Estos describen el efecto de la falta de coincidencia entre la posición del eje de simetría medio de la figura terrestre que define el modelo (considerándolo idéntico al polo de rotación medio en el período en que el modelo fue calculado) respecto del eje Z del sistema de referencia o polo medio convencional definido por el IERS para el ITRF. Estos coeficientes dependen de la separación entre los ejes referidos cuyas componentes llamaremos \bar{x} e \bar{y} , y pueden expresarse como sigue:

$$\bar{C}_{21} = \sqrt{3}\bar{x}C_{20} \quad (1.11)$$

$$\bar{S}_{21} = \sqrt{3}\bar{y}C_{20} \quad (1.12)$$

Al modelo de geopotencial JGM-3 deben agregársele efectos perturbadores debidos a variaciones temporales en la distribución de masas del planeta por las mareas terrestres, la marea causada por las deformaciones debidas al movimiento del polo, y el efecto de las mareas oceánicas. Tener en cuenta estos efectos es importante en el cálculo de las órbitas de algunos satélites geodésicos para SLR en que es preciso modelar el movimiento orbital con una exactitud centimétrica.

En todos los casos mencionados, las modificaciones al modelo JGM-3 se introducen mediante correcciones a los coeficientes del desarrollo del potencial. Para el caso de las mareas terrestres, las correcciones no despreciables (mayores que 3×10^{-12}) se concentran en los coeficientes de grado 2 y 3 y en menor proporción en los de grado 4. Los términos del desarrollo de mareas que los causan son los de grado 2 y 3. Los órdenes más afectados son el semidiurno, diurno y de largo período. Estas correcciones se calculan teniendo en cuenta un modelo de Tierra no puramente elástico por lo que para algunas componentes existe un retardo entre la fase de las fuerzas de marea y la deformación resultante [Eanes et al., 1983]. Parte del término de grado 2 y orden 0 es el efecto de una deformación por mareas llamada marea permanente. No debe ser incluida en las correcciones pues ya está presente en el modelo JGM-3.

El efecto gravitacional de la marea oceánica se introduce mediante correcciones a los términos del geopotencial. Estas son obtenidas calculando el efecto del desarrollo en

armónicos esféricos de la altura de océano sobre toda la superficie terrestre. Para los períodos semidiurnos y diurnos, se recomienda el modelo CSR-3.0 [Eanes et. al, 1996] obtenido a partir de mediciones de TOPEX-POSEIDON. Las componentes de largo período se obtienen del modelo de [Ray et al., 1994].

La marea del polo introduce correcciones variables con el tiempo en los coeficientes \bar{C}_{21} y \bar{S}_{21} en función de las componentes del movimiento del eje de rotación instantáneo respecto del polo convencional del IERS. Las correcciones para una Tierra viscoelástica se muestran en (1.13) y (1.14), donde las componentes del movimiento del polo están expresadas en segundos de arco.

$$\Delta\bar{C}_{21} = -1.348 \cdot 10^{-9} (\bar{x}_p + 0.0112 \cdot y_p) \quad (1.13)$$

$$\Delta\bar{S}_{21} = 1.348 \cdot 10^{-9} (\bar{y}_p - 0.0112 \cdot x_p) \quad (1.14)$$

Las correcciones a aplicar finalmente dependerán del satélite cuya órbita se desea modelar. Por ejemplo, en el caso de GPS, las perturbaciones significativas son el potencial de mareas y el debido a las deformaciones de la Tierra por mareas [Kleusberg et al., 1996, pp. 80]. Expresiones explícitas de estos modelos pueden encontrarse en [McCarthy, 1996].

1.5.5 Efectos que producen desplazamientos en los sitios de observación

Además del modelo de velocidades de las placas, mencionado en §1.5.2, el sistema de referencia terrestre convencional debe incluir también la manera de modelar otros efectos que modifican la posición de las estaciones de observación. Estos fenómenos afectan especialmente la coordenada vertical y son:

Mareas terrestres

La respuesta de la Tierra al potencial de mareas lunisolar puede expresarse en función de este último mediante los coeficientes de Love y de Shida. Estos dependen de la latitud de la estación y la frecuencia debido a la elipticidad de la Tierra y a su movimiento de rotación. Además, para períodos largos existe una dependencia adicional respecto de la frecuencia debido a la inelasticidad del manto terrestre. Esto hace que haya un desfase entre el potencial y la deformación para estas bandas. La búsqueda de exactitudes

milimétricas en la posición de las estaciones exige tener en cuenta estos efectos [McCarthy, 1996, pp. 56].

Deformación centrífuga por el movimiento del polo

El movimiento del polo provoca una perturbación en el potencial de rotación centrífugo. Sus efectos sólo se notan en las coordenadas absolutas de la estación o para vectores de miles de km de longitud, pero como el movimiento del polo no tiene una periodicidad sencilla, el efecto no se anula promediando los resultados de varios días de observación. La corrección que se recomienda es obtenida a partir de la perturbación causada por el movimiento del polo en el potencial de rotación centrífugo terrestre. La respuesta de la Tierra al mismo se calcula utilizando constantes de Love y Shida apropiadas, resultando finalmente las expresiones siguientes [McCarthy, 1996]:

$$S_r = -32 \cdot \sin 2\theta \cdot [x_p \cdot \cos(\lambda) - y_p \cdot \sin(\lambda)] \quad (1.15)$$

$$S_\theta = -9 \cdot \cos 2\theta \cdot [x_p \cdot \cos(\lambda) - y_p \cdot \sin(\lambda)] \quad (1.16)$$

$$S_\lambda = 9 \cdot \cos 2\theta \cdot [x_p \cdot \cos(\lambda) - y_p \cdot \sin(\lambda)] \quad (1.17)$$

Donde los desplazamientos resultan expresados en mm y las ecuaciones se evalúan en función de la latitud y longitud de la estación y las componentes del movimiento del polo en segundos de arco. Considerando que el movimiento del polo no presenta variaciones pico a pico mayores que 0.8 segundos de arco, estas deformaciones afectan la posición de las estaciones en hasta máximos de 25 mm en la dirección radial y 7 mm en la horizontal.

Efecto de las mareas oceánicas

Las mareas oceánicas constituyen una carga que deforma la corteza terrestre de acuerdo a su respuesta viscoelástica local. En consecuencia, su modelado a escala global implica conocer el comportamiento detallado de las mareas y además de cómo responde la corteza a esa carga en cada punto. Esto es especialmente problemático en la franja del continente distante menos que aproximadamente 50 km de la costa [Melchior et al., 1996]. El efecto es predominantemente en la dirección radial y puede alcanzar varios centímetros con frecuencias predominantemente semidiurnas y diurnas. Existen componentes de largo período pero su efecto es mucho menor. Entre los modelos de carga oceánica, se recomienda el debido a [Schwiderski, 1980] para las bandas de largo período y el de [Le

Provost et al., 1994] para las diurnas y semidiurnas. Estos modelos consideran una Tierra elástica, aproximación suficientemente exacta para los requerimientos del posicionamiento [Scherneck, 1991]. En cambio, el límite de la exactitud de esta corrección está puesto por el conocimiento que se tenga del comportamiento de las mareas oceánicas en la región de interés [Dodson et al., 1999].

Deformación por carga atmosférica

Es la deformación que se produce por la diferencia de presión atmosférica entre la zona circundante a la estación y el valor medio correspondiente a un entorno circular de 2000 km de radio. Este es un efecto que responde a campos de presión sinópticos, esto es en escalas espaciales de 2000 km y temporales de dos semanas.

El efecto se modela localmente ya que no hay modelos suficientemente buenos de la carga a escala global. El tamaño de este efecto es teóricamente de hasta 25 mm en dirección radial y menos que 1 cm en la horizontal [Rabbel et al., 1986]. Los mismos autores recomiendan calcular el desplazamiento radial mediante la expresión:

$$\Delta_r = -0.35p - 0.55\bar{p} \quad (1.18)$$

Donde las presiones son diferencias respecto de un valor de referencia de 1013 hPa. La presión media regional presente en el segundo término de (1.18) debe ser obtenida por algún método a partir de datos meteorológicos regionales. La metodología para el modelado de este efecto no está establecida aún y en muchos casos se han determinado expresiones de corrección locales aplicando una regresión lineal entre las series temporales de presión atmosférica y coordenadas de la estación [McCarthy, 1996].

Levantamiento postglacial

Este es un efecto causado por la redistribución de carga en la superficie terrestre causada por la deglaciación que ocurre desde el último máximo glaciario. Existen modelos globales de este fenómeno, calculados a partir de la convolución de modelos de carga, obtenidos a partir de registros geológicos, con funciones de Green globales [Peltier, 1994][Peltier, 1995].

1.6 Materializaciones del ITRS

El ITRS es hoy el sistema de referencia terrestre global materializado con mayor precisión y exactitud. Define al geocentro con un error estimado en 10 cm mientras que la precisión de las coordenadas que conforman el marco de referencia es del orden de un centímetro [Boucher et al., 1999]. Está conformado por un conjunto de estaciones distribuidas en todo el mundo en las que se realizan observaciones mediante al menos una de las técnicas VLBI, LLR, SLR, GPS o DORIS. Las materializaciones del ITRS, llamadas genéricamente ITRF o marco de referencia terrestre internacional constan de un catálogo de estaciones con coordenadas y velocidades a las que se asocia una época de referencia. Desde 1988 el IERS ha producido varios marcos de referencia, cuyas diferencias respecto de ITRF97 se muestran en la tabla 1.1 [Blewitt et al., 1997].

<i>Marco</i>	<i>TX</i> (cm)	<i>TY</i> (cm)	<i>TZ</i> (cm)	<i>E</i> (10 ⁻⁸)	<i>RX</i> (0.001 ^{''})	<i>RY</i> (0.001 ^{''})	<i>RZ</i> (0.001 ^{''})	<i>Época</i>
ITRF97	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	1997.0
ITRF96	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	1997.0
ITRF94	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	1993.0
ITRF93	0.6	-0.5	-1.5	0.04	-0.39	0.80	-0.96	1988.0
ITRF92	0.8	0.2	-0.8	-0.08	0.00	0.00	0.00	1988.0
ITRF91	2.0	1.6	-1.4	0.06	0.00	0.00	0.00	1988.0
ITRF90	1.8	1.2	-3.0	0.09	0.00	0.00	0.00	1988.0
ITRF89	2.3	3.6	-6.8	0.43	0.00	0.00	0.00	1988.0
ITRF88	1.8	0.0	-9.2	0.74	0.10	0.00	0.00	1988.0

Tabla 1.1 Diferencias entre distintas materializaciones del ITRS respecto de ITRF97

Donde TX indica traslación en la dirección del eje X, RX indica una rotación alrededor del eje X y E indica el factor de escala diferencial entre el marco de referencia listado e ITRF97. Puede verse que las diferencias con los sucesivos marcos de referencia son pequeñas y se van haciendo cada vez menores. Una excepción es ITRF93 ya que en este caso el IERS empleó un criterio distinto para fijar la orientación del sistema, permitiendo una rotación en bloque respecto del modelo tectónico NNR-NUVEL1A [Boucher, et al., 1996a]. Los últimos dos marcos de referencia del IERS, ITRF96 e ITRF97, fueron definidos de modo que sus ejes coincidan con los de ITRF94 [Boucher et al., 1998a] [Sillard et al., 1998][Boucher et al. 1999].

1.7 Densificación del marco ITRF en América del Sur

A pesar de que las materializaciones del ITRS tienen una buena distribución de puntos en el globo, sólo unos pocos se encuentran en Sudamérica. Por las características geográficas y económicas del continente, a principios de la década del noventa, solamente algunas zonas estaban cubiertas por un control geodésico clásico de buena calidad. La disponibilidad del Sistema de Posicionamiento Global GPS posibilitó la medición de nuevas redes geodésicas en los países de la región. Sin embargo fue necesaria una densificación del marco ITRF en el continente para que todos los países pudieran referir sus marcos de referencia nacionales al Sistema de Referencia Terrestre Internacional.

El proyecto Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur (SIRGAS) fue establecido en octubre de 1993 durante la Conferencia Internacional para la Definición del Datum Geocéntrico Sudamericano, en Asunción, Paraguay y es auspiciado por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG), el Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH) y la Agencia Nacional de Imágenes y Cartografía (NIMA) de los Estados Unidos.

El gerenciamiento del proyecto se realiza a través de Comité Ejecutivo integrado por representantes de todos los países. De él dependen tres grupos de trabajo. Los dos primeros fueron creados en 1993 al comenzar el proyecto. El tercero fue creado en 1997 luego del éxito alcanzado en la ejecución de las primeras etapas.

El Grupo de Trabajo I tiene por objetivo definir el sistema de referencia geocéntrico para Sudamérica, materializarlo mediante una red de estaciones distribuidas en todos los países y mantenerlo en el tiempo mediante la medición de dicha red a intervalos de pocos años.

El Grupo de Trabajo II tiene por objetivo la densificación del marco de referencia de SIRGAS en cada uno de los países con un criterio unificado y consensuado de forma que los sistemas de referencia de todos los países de la región vayan convergiendo a SIRGAS con discrepancias de pocos centímetros.

El Grupo de Trabajo III tiene por misión la integración de los sistemas de alturas físicas de toda la región. Esto implica definir y materializar un sistema de alturas común y lograr que todos los países lo acepten y vinculen a él sus redes altimétricas.

Las mediciones que permitieron materializar el ITRS fueron realizadas entre mayo y junio de 1995 en 10 sesiones consecutivas de 24 horas de duración en alrededor de 60 estaciones. Durante el IV Congreso de Ciencias de la Tierra realizado en Santiago de Chile, en agosto de 1996, sesionaron los dos grupos del proyecto. El sistema de referencia elegido para la solución definitiva es el ITRS del IERS en su materialización ITRF94 y la época de las coordenadas se hizo coincidir con la época media de las observaciones, es decir 1995.4. La materialización se realizó mediante las coordenadas geocéntricas de estaciones permanentes de rastreo del IGS: Kouru (Guyana Francesa), Bogotá (Colombia), Fortaleza (Brasil), Arequipa (Perú), Brasilia (Brasil), Isla de Pascua (Chile), La Plata (Argentina), Santiago (Chile) y O'Higgins (Antártida). Una descripción detallada del marco de referencia SIRGAS95 puede encontrarse en [SIRGAS Project Committee, 1997].

En las sesiones del Grupo II se establecieron los procedimientos que los países deberían seguir para obtener redes geodésicas GPS con la más alta precisión y compatibilidad entre sí [SIRGAS WG II, 1997]. La aplicación de estas recomendaciones resultaría en marcos de referencia nacionales para los países del continente compatibles entre sí en el orden de pocos centímetros.

En la actualidad, Argentina, Brasil, Colombia, Ecuador, Guayana Francesa, Paraguay, Perú, Uruguay y Venezuela ya poseen redes geodésicas nacionales referidas a SIRGAS. Sólo Venezuela ha adoptado la nueva red como marco de referencia nacional oficial, encontrándose los demás países en diferentes situaciones intermedias del proceso de transición.

En el capítulo IV de este trabajo se describe la evolución del marco de referencia de Argentina, desde su versión clásica, Inchauspe'69 a POSGAR'94, basado en observaciones GPS, y se presenta un nuevo marco de referencia, consistente con el ITRS y SIRGAS en el orden de pocos centímetros, que ha sido denominado POSGAR'98.

1.8 Otros marcos de referencia globales

Es preciso mencionar por la amplia difusión que han alcanzado, los marcos de referencia terrestres en que se calcularon y se calculan las efemérides de los satélites TRANSIT

[Danchik, 1998] y GPS producidas por el Departamento de Defensa de los EE.UU. (DoD), que controla dichos sistemas de posicionamiento.

Los sistemas de referencia producidos por el DoD más usados son: WGS72, WGS84 y sus actualizaciones WGS84(G730) y WGS84(G873). Las efemérides de los satélites TRANSIT fueron referidas al marco de referencia correspondiente el primero de ellos. Los tres últimos fueron utilizados sucesivamente para referir las órbitas GPS [Malys et al., 1994] [Slater et al., 1998].

El SRC del sistema WGS84 implicaba orientar los ejes de coordenadas, fijar la escala y el geocentro a partir de los mejores sistemas de referencia disponibles en la época: el BTS del BIH y el NSWC-9Z2 del DoD. Fue realizado mediante observaciones a los satélites TRANSIT, por lo que la exactitud del sistema se encuentra entre 1 y 2 m. Esto no implica que las mediciones relativas entre puntos en este sistema tengan dicho error, pero sí que las diferencias de coordenadas en la superficie terrestre, respecto de un sistema que defina al geocentro con más exactitud, pueden ser de ese orden, según el lugar del planeta de que se trate. El marco de referencia POSGAR '94 fue referido a la materialización de WGS '84 disponible en Argentina para 1994, por lo que se encuentran diferencias sistemáticas de varios decímetros con respecto a ITRF. Estas diferencias pueden apreciarse al comparar POSGAR '94 y POSGAR '98 como se muestra en el capítulo 4.

El marco WGS84(G730) tiene un nuevo valor de GM que coincide con el utilizado por el IERS para la definición del ITRF y con el Sistema Geodésico de la IAG, GSR80. Su realización se llevó a cabo fijando las posiciones de varias estaciones que forman parte del marco de referencia ITRF91. Como consecuencia, el origen de esta nueva versión de WGS84 coincide con el de ITRF91 con una precisión decimétrica. La diferencia de orientación provocaría diferencias de menos de 20 cm en la superficie de la Tierra y el factor de escala entre ambos sistemas implica una diferencia de 3 mm en la superficie de la Tierra. Por último, en 1996 se agregaron dos estaciones de control al sistema y se recalcularon las coordenadas. Se refirió el ajuste a coordenadas ITRS de varias estaciones teniendo en cuenta los movimientos de las mismas por la deriva continental. Los cambios fueron adoptados en enero de 1997 con el nombre de WGS84 (G873). La consistencia entre WGS84 (G873) e ITRF es del orden de 5 cm.