Facultad de Ciencias
Astronómicas
y Geofísicas

Universidad Nacional de La Plata

Tesis de grado para obtener la Licenciatura en Astronomía:

Contribución al establecimiento de una Red Nacional de Tiempo y Frecuencia

Carla Ligia de la Pina

Director: Dr. Diego A. Luna

Codirector: Dr. Claudio Brunini

Firma y aclaración del Director:
Firma y aclaración de uno de los jurados:

La Plata
2020

A mi todo,
Juan Carlos Alvarez

Prefacio

Esta Tesis es presentada como parte de los requisitos para obtener el grado académico de Licenciada en Astronomía de la Universidad Nacional de La Plata. La misma contiene los estudios desarrollados bajo la dirección del Dr. Diego A. Luna, Instituto Nacional De Tecnología Industrial (INTI). Depto de Física y Metrología. Y bajo la co-dirección del Dr. Claudio Brunini, Director Científico AGGO - CONICET Fac. Cs. Astronómicas y Geofísicas Universidad Nacional de La Plata.

Carla Ligia de la Pina
carladelapina@gmail.com
La Plata, Febrero de 2020

Agradecimientos

Deseo expresar un profundo agradecimiento a mi director, Dr Diego Luna, por su paciencia, su buena predisposición para mis consultas y por hacerme sentir tan cómoda.
Agradecerle a mi co-director, Dr. Claudio Brunini, por haberme motivado, escuchado y aconsejado a lo largo de la carrera.
A mi pareja, Juan Carlos Alvarez, por no dudar nunca de mí, motivarme cada día, y brindarme su apoyo incondicional.
A mis compañeras y amigas, Cris López, Ceci Scalia y Mati Ianussi, que han hecho de mi estadía en el observatorio siempre un momento de compartir agradable entre pilas de apuntes y litros de mate. Ellas que han estado siempre para despejarme cualquier duda o temor frente a exámenes.
A Edu Tello, por ser un pilar importantísimo en la carrera y un gran amigo.
A mis amistades de Bernal, quienes me llaman astrónoma desde el curso de ingreso.
A mis papás, mis hermanas y a mi Abuela Tota que me han brindado apoyo y motivación siempre.
A mi padrino, mi tío Carlos, por apoyarme desde el primer día y estar siempre al tanto y orgulloso de cada progreso.
A los docentes del observatorio, que han sabido motivarme cuando lo necesitaba y revivir la pasión por la ciencia. Gracias en particular a la Dra. Erika Gularte Scarone y al Dr. Jorge Panei por las largas charlas y la orientación en momentos decisivos.
Gracias a todos mis afectos y a aquellos que han contribuído de alguna manera a lo largo de estos años.
Gracias a mi país, por educarme gratuitamente.

Carla Ligia de La Pina
La Plata, Febrero de 2020.

Resumen

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo optimizar la comparación de las diferencias de tiempo entre los relojes de los distintos laboratorios: el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), el Observatorio Argentino-Alemán de Geodesia (AGGO) y el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Se proponen diferentes tipos de ponderaciones de las medidas y criterios, para así poder inferir cuál de las mismas conduce a mejores resultados. Se cuenta con la ventaja de que los laboratorios en cuestión se hallan separados una distancia geográfica menor a 50 km, lo cual redunda en una gran cantidad de satélites en Vista Común. Debido a esto, es posible mejorar las comparaciones con pequeños ajustes y poco costo computacional.

Obteniendo de esta manera una estrategia para procesar los datos de tiempo contando con una comparación que conduce al mejor de los escenarios.

Esto articula como puntapié en la contribución al establecimiento de una Red Nacional de Tiempo y Frecuencia puesto que se consolidan los métodos de trabajo en el procesamiento de los datos, se reconocen las peculiaridades de cada laboratorio, y se generan los mecanismos adecuados para la optimización del método.

Índice general

Prefacio III

Agradecimientos IV

Resumen V

1. Introducción **1**
1.1. Escalas de tiempo . . . 2
1.1.1. Ejemplo de una implementación de escala de tiempo en nuestra región 6
1.2. Características de los osciladores y de los Relojes . . . 6
1.2.1. Relojes Atómicos . . . 6
1.2.2. Comparación remota de relojes . . . 8
1.2.3. Reloj de Cesio . . . 10
1.2.4. Estructura y funcionamiento . . . 10
1.2.5. Importancia Física . . . 13
1.3. Otros átomos . . . 14

2. Marco Teórico **16**
2.1. Descripción General de Algoritmo . . . 19
2.1.1. El Método de Vista Común . . . 19

3. Resultados Generales **23**
3.1. Implementación del algoritmo de Vista Común . . . 24
3.2. Validación con UTCr . . . 25
3.3. Análisis de ruidos de medición según elevaciones . . . 27
3.4. Técnica de CV ponderada por varianza . . . 29
3.5. Técnica de CV con umbral de desvío estándar ponderada por varianza . . . 33
3.6. Técnica de CV ponderada por Elevación del Satélite . . . 36
3.7. Comparación de las distintas ponderaciones . . . 40

4. Conclusiones **45**

Índice de figuras

1.1. Laboratorios contribuyentes a UTC 4
1.2. Esquema de las escalas de Tiempo 5
1.3. Laboratorios de la red SIM 7
1.4. Esquema de comparación por vista común 9
1.5. Esquema de comparación por fibras ópticas 9
1.6. Átomo de Cesio 11
1.7. Esquema del Reloj de Cesio 12

2.1. Archivo con el formato CGGTTS para un receptor GPS 18
2.2. Coordenadas del satélite 19

3.1. Mapa de ubicación de los laboratorios 24
3.2. Implementación Técnica de CV 26
3.3. Validación UTCr 27
3.4. Desvío Estándar vs Elevación del satélite 27
3.5. Desvío Estándar vs Elevación del satélite 28
3.6. Desvío Estándar vs Elevación del satélite 28
3.7. Técnica CV ponderada por σ^2 30
3.8. Varianza de Allan y TDEV para la ponderacón por Varianza. 31
3.9. Varianza de Allan y TDEV para la ponderacón por Varianza. 31
3.10. Varianza de Allan y TDEV para la ponderacón por Varianza. 32
3.11. Desvío Estándar vs Elevación del satélite con $\sigma \leq 2$ ns. 33
3.12. Desvío Estándar vs Elevación del satélite con $\sigma \leq 2$ ns. 33
3.13. Desvío Estándar vs Elevación del satélite con $\sigma \leq 2ns$. 34
3.14. Análisis AVAR y TDEV caso especial INTI vs IGN. 35
3.15. Técnica CV ponderada por la Elevación del satélite 37
3.16. Varianza de Allan y TDEV para la ponderacón por Elevación del Satélite. 38
3.17. Varianza de Allan y TDEV para la ponderacón por elevación del satélite . . 38
3.18. Varianza de Allan y TDEV para la ponderacón por elevación del satélite. . 39
3.19. (a) Comparación de las distintas ponderaciones realizadas para AGGO-INTI, (b) Desvío de Allan $\sigma(\tau)$ como función del tiempo promediado τ para AGGO vs INTI, (c) Estabilidad Temporal de los distintas ponderaciones para AGGO vs INTI 41

3.20. (a) Comparación de las distintas ponderaciones realizadas para INTI-IGN, (b) Desvío de Allan $\sigma(\tau)$ como función del tiempo promediado τ para INTI-IGN, (c) Estabilidad Temporal de los distintas ponderaciones para INTI-IGN 42
3.21. (a) Comparación de las distintas ponderaciones realizadas para AGGO vs IGN, (b) Desvío de Allan $\sigma(\tau)$ como función del tiempo promediado τ para AGGO vs IGN, (c) Estabilidad Temporal de los distintas ponderaciones para AGGO vs IGN 43

Índice de tablas

1.1. Precisión de Relojes a través de la historia. 12

3.1. Comparación de Relojes Atómicos 23

Capítulo 1

Introducción

En la actualidad, el tiempo se puede medir con una precisión relativa de 10^{-15} o mejor, lo que lo convierte, con mucho, en la cantidad mensurable más precisa que existe y en la base para medir, con elevadísima precisión, otras cantidades que se derivan de ella. La tecnología que lo hace posible es la de los relojes atómicos, cuyos primeros predecesores experimentales datan de los años cincuenta del siglo pasado. Poco después comenzaron a fabricarse relojes atómicos comerciales, primero para satisfacer requerimientos militares y poco tiempo después para aplicaciones civiles.

La medición del tiempo resulta clave en la astronomía. Si bien se ha ido redefiniendo a lo largo de la historia, también se ha ido complejizando a medida que los avances tecnológicos necesitan acotar más el error en otras medidas. Por lo tanto sigue siendo un tema en la agenda de los científicos el mejorar el error al medirlo y el sincronismo en todos los laboratorios del mundo.

El tiempo determina una de las dos coordenadas que definen la orientación de la Tierra en el espacio. Sin la capacidad actual de medir diferencias de tiempo con exactitudes en el orden de los nanosegundos, no sería posible estudiar las irregularidades de la rotación terrestre. Tampoco se podrían vincular objetos naturales (la Luna, el Sol, los planetas, las estrellas de la galaxia, etc.) o artificiales (satélites) con puntos de la Tierra. Ello impediría la navegación precisa sobre o cerca de la Tierra o en el espacio profundo. No podrían relacionarse las predicciones de las ecuaciones dinámicas de la Mecánica Celeste con las mediciones experimentales en determinados niveles de precisión. Tampoco serían posibles las mediciones precisas de las distancias, que hoy se hacen, casi sin excepción, usando las señales electromagnéticas. Tampoco sería viable la técnica de VLBI (VLBI: Very Long Baseline Interferometry), la única que vincula los sistemas terrestre y celeste, que se basa en interferometría de señales provenientes de quásares observadas con dos o más radiotelescopios distantes uno del otro.

1.1. Escalas de tiempo

La periodicidad del movimiento aparente de los cuerpos celestes y las variaciones asociadas a la luz del día, las estaciones o las mareas en la orilla del mar han gobernado toda la vida en la Tierra desde el principio. Parecería por lo tanto, obvio para la humanidad agrupar los eventos y fechas relevantes en orden cronológico utilizando los intervalos de tiempo encontrados en estas periodicidades como medidas naturales del tiempo. Por lo tanto, los calendarios tempranos correspondientes se basaron en días, meses y años, relacionados con las frecuencias estándares de la rotación de la Tierra alrededor de su eje polar (una vez al día), la traslación de la Tierra alrededor del Sol (una vez al año) y la revolución mensual de la luna alrededor de la Tierra. Debido a esto se fueron definiendo distintas escalas de tiempo.

Para las escalas de Tiempo Rotacional, se tienen el Tiempo Solar y el Tiempo Sidéreo. En éstos el punto de referencia para el tiempo solar es el centro del Sol, y para el tiempo sidéreo es el equinoccio Vernal. Como la Tierra es un sólido deformable, la rotación terrestre presenta irregularidades que hacen fluctuar la duración del día (tanto la del día solar como la del día sidéreo), entonces no pueden ser tomados para definir una unidad de tiempo constante. No obstante, el tiempo rotacional es importante en la vida civil. Así en 1928, con el propósito de independizarse de las variaciones de la rotación terrestre, la Unión Astronómica Internacional (IAU: International Astronomical Union) introdujo la escala de Tiempo Universal (UT: Universal Time), basada en el día solar medio y en el meridiano de Greenwich.

Hacia 1952, en un intento de definir una escala de tiempo libre de irregularidades de la rotación terrestre, la IAU introduce el Tiempo de Efemérides (ET: Ephemeris Time), materializado por la traslación de la Tierra alrededor del sol. Esa escala, cuya adopción fue recomendada por la Conferencia General de Pesos y Medidas de 1956, dio lugar, en 1960, a la definición del Segundo Internacional en el nuevo Sistema Internacional de Unidades (SI: International System of Units). La escala ET fue rápidamente desplazada por las escalas de Tiempo Atómico Internacional (TAI: International Atomic Time) y el Tiempo Universal Coordinado (UTC: Coordinated Universal Time) .

El movimiento de los astros tiene el inconveniente de no indicar directamente el tiempo. Entonces a través de los relojes atómicos obtenemos la más exacta y consistente medida del tiempo. Por lo tanto vamos a detenernos y ahondar un poco más en la definición del TAI. Cada reloj “i” produce su propia escala de TA(i). Entonces, se comparan los diversos relojes atómicos y se calcula un tiempo medio patrón. Las diversas escalas individuales de TA(i) se comparan entre sí y la Oficina Internacional de Pesos y Medidas (BIPM: International Bureau of Weights and Measures) en París coordina las diferentes escalas, calculando el

TAI como:

$$TAI = \frac{\sum_i p(i).TA(i)}{\sum_i p(i)}$$

donde $p(i)$: peso atribuido a cada escala individual TA(i)

La unidad fundamental del TAI es el segundo atómico adoptado como unidad de tiempo físico del Sistema Internacional de Unidades, SI. Éste queda definido como la duración de 9192631770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de Cesio 133.

Una de las aplicaciones de los relojes atómicos es la generación de escalas de tiempo. Una escala de tiempo se define como un sistema que permite asignar sin ambigüedad una coordenada temporal a cualquier evento [1]. Esta coordenada se conoce como *fecha*. Por lo tanto, una escala de tiempo es una de las coordenadas del sistema de referencia espacio-temporal. El ejemplo más simple de escala corresponde al uso de un sólo reloj como referencia de tiempo. Sin embargo, esta configuración resulta débil, ya que un mal funcionamiento del reloj provoca una discontinuidad en la realización de la unidad. Para mejorar este aspecto, se desarrollan las escalas de tiempo compuestas por múltiples relojes. Éstas presentan diversas ventajas. Por ejemplo, el mal funcionamiento de un reloj no implica la salida de funcionamiento de todo el sistema. Además, la estabilidad del conjunto es superior a la de cada uno de los relojes por separado [2]. Otra ventaja de las escalas de tiempo es la combinación de grupos heterogéneos de osciladores, para lograr una referencia que herede las mejores propiedades de cada uno de sus componentes. Por ejemplo, una escala se puede utilizar para complementar la muy buena estabilidad a corto plazo de un máser de hidrógeno, con el desempeño a largo plazo de un reloj de cesio.

En el caso de las escalas remotas (donde se entiende por remota que no todos los relojes están en el mismo laboratorio), los relojes se encuentran separados por grandes distancias, por lo que las comparaciones se realizan mediante técnicas diferentes, como pueden ser la de vista común GPS (GPS: Global Positioning System), o comparaciones por fibras ópticas. Dentro de esta clasificación podemos encontrar la escala UTC [3], o la SIM Time Scale [4].

Otro ejemplo de implementaciones de escalas de tiempo es la escala de tiempo del LNE (LNE: Laboratorie National de Métrologie et D'Essais) del Instituto de Metrología francés [5].

Una de las aplicaciones más conocidas de las escalas de tiempo corresponde a los sistemas de navegación satelital. Para el caso del sistema GPS, cada satélite lleva a bordo un reloj de rubidio y/o cesio. Con los resultados de cada uno de estos relojes, se elabora la escala conocida como GPS Time. Esta escala es monitoreada en forma continua por el Observatorio Naval de Estados Unidos (USNO: United States Naval Observatory), el cual utiliza como referencia otra escala compuesta por 69 relojes de cesio y 19 máseres de hidrógeno [6].
Uno de los componentes críticos para la implementación de una escala de tiempo es el

Figura 1.1. Distribución geográfica de los laboratorios contribuyentes a UTC, en abril de 2013.

algoritmo para la obtención del valor de referencia. Una de las principales cuestiones a tener en cuenta es la estadística que se efectúa sobre las mediciones, ya que las distribuciones estadísticas de los mensurandos pueden no corresponder a una distribución normal. Más aún, el ruido presente en las mediciones puede evitar que el promedio de una serie de mediciones sea convergente a un valor.

En resumen, las escalas de tiempo constituyen un puente entre la realización de la unidad de tiempo y las necesidades de medición de la ciencia, industria y sociedad. De aquí que el mantenimiento de una escala de tiempo estable, exacta, y accesible a un espectro amplio de usuarios es una responsabilidad de instituciones nacionales.

Tiempo Universal Coordinado (UTC)

El BIPM, en coordinación con organizaciones internacionales e institutos nacionales, mantiene y disemina el Tiempo Universal Coordinado (UTC) [3]. Los laboratorios que contribuyen a UTC se muestran en la Fig. 1.1.

Los resultados de la escala UTC se diseminan mensualmente a través de la Circular T del BIPM. Una versión rápida de UTC (UTCr) se publica semanalmente, y permite a los institutos participantes evaluar sus referencias a intervalos más cortos que la Circular T. Los resultados de UTCr corresponden a un valor de diferencia de tiempo diaria.

Las escalas de tiempo atómico son establecidas por el BIPM utilizando el procedimiento esquematizado en la Fig. 1.2

Para hacer posible la comparación de los datos de los distintos laboratorios, cada laboratorio provee las diferencias de tiempo entre UTC(lab) y el tiempo GPS. Aproximadamente

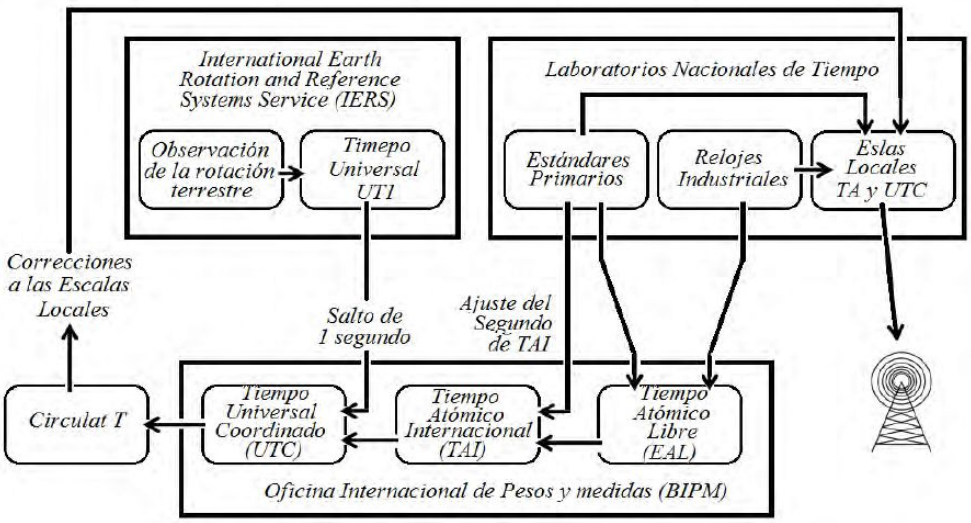


Figura 1.2. Visión esquemática del proceso de materialización de las escalas de TAI y UTC.

50 laboratorios transmiten datos al BIPM de un total de 250 relojes usando este método. Por medio del algoritmo llamado ALGOS, el BIPM calcula el promedio ponderado de estos datos de diferencias de tiempo para producir una escala de tiempo intermedia llamada Escala Atómica Libre (EAL: Echelle Atomique Libre) [7]. El segundo derivado de esta escala se ajusta para que coincida con el que se deriva de un subconjunto de estándares primarios de ciertos laboratorios principales y con ese segundo ajustado se construye la escala del TAI, cuyo origen convencional es el 1 de enero de 1958, momento en el cual el TAI y el UT1 fueron coincidentes. Existen tres tipos de escalas de UT: UT0, que es la escala asociada a la rotación terrestre con todas sus irregularidades. UT1 que es la escala anterior corregida por el movimiento del polo. Esta escala es la que se emplea para realizar observaciones astronómicas y para el cálculo de las efemérides tanto de satélites artificiales como astros naturales. Finalmente la escala UT2 es un intento de hacer la escala más uniforme y de eliminar las fluctuaciones estacionales de la escala UT1. Apenas se utiliza [8]. La necesidad de una escala práctica de tiempo universal dotada de mayor uniformidad para aplicaciones civiles, llevo a crear UTC, basado en el tiempo atómico de la escala TAI coordinado con el UT1 de forma que se aparte lo menos posible de este último. El cual rige desde el 1 de enero de 1972, insertando un número entero de segundos, designados segundos intercalados, de manera que el tiempo atómico siga al UT1. La tasa de UTC se establece para ser exactamente la misma que la tasa de TAI, y se elimina la divergencia entre UTC y el tiempo astronómico insertando segundos intercalados en UTC según sea necesario. El salto de segundos debe ser tal de mantener el módulo de la diferencia entre UTC y UT1 menor que 0,9 segundos. Este salto de segundos es agregado los últimos días de junio o diciembre. El más reciente fue realizado el 31 de diciembre de 2016, tras la introducción de un nuevo segundo intercalar, con lo cual el TAI esta exactamente 37 segundos por delante

de UTC [1]. Los segundos intercalados resultaron siempre positivos, de modo que UTC está detrás del tiempo atómico [7]. El salto es decidido por el Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencias (IERS: International Earth Rotationand Reference Systems Service). El intervalo que media entre dos saltos depende de las irregularidades de la velocidad angular de la rotación terrestre. Mensualmente el BIPM distribuye la "Circular T" con las diferencias entre los valores de UTC determinados por ese organismo y los determinados independientemente por cada laboratorio. Debido a esto los valores de UTC son conocidos a posteriori y en tiempo real solo se dispone de las aproximaciones a UTC construídas por cada laboratorio. Se exige que las realizaciones individuales de UTC no difieran de la realización global en más de 1 microsegundo, aunque muchos laboratorios logran reducir esa tolerancia a 0,1 microsegundos. Cada laboratorio de tiempo elige como primario al reloj que ha exhibido el comportamiento más estable a lo largo de los últimos meses y ajusta su frecuencia para que este realice UTC de la manera más exacta posible. Si bien los sistemas de navegación global apoyada en satélites (GNSS: Global Navigation Satellite Sytem) mantienen sus propias escalas de tiempo, las mismas son, en la práctica, realizaciones de UTC.

1.1.1. Ejemplo de una implementación de escala de tiempo en nuestra región

Escala de Tiempo SIM

La escala de tiempo SIM (Sistema Interamericano de Metrología) fue desarrollada como un complemento a las escala UTC, proveyendo a los laboratorios del continente americano una herramienta para la evaluación de sus relojes en tiempo real [4]. En la Fig. 1.3 se muestran los relojes contribuyentes a esta escala.

En particular, SIMT (SIMT: SIM Time Scale) fue diseñada como referencia accesible al instante para ser utilizada en la evaluación del desempeño de los relojes en el corto, mediano y largo plazo. La principal característica de esta escala, comparada con UTC, es la capacidad de detectar fallas de corto plazo: los reportes de UTC incluyen un valor semanal, publicado con hasta un mes diferencia. Por el lado de SIMT, los valores se reportan en tiempo real, con un retardo de 10 minutos.

1.2. Características de los osciladores y de los Relojes

1.2.1. Relojes Atómicos

La medición más exacta conocida por la humanidad es la medición de la duración del segundo. Dado que el tiempo y la frecuencia pueden medirse en forma tan exacta, estas

[1] http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/index.php

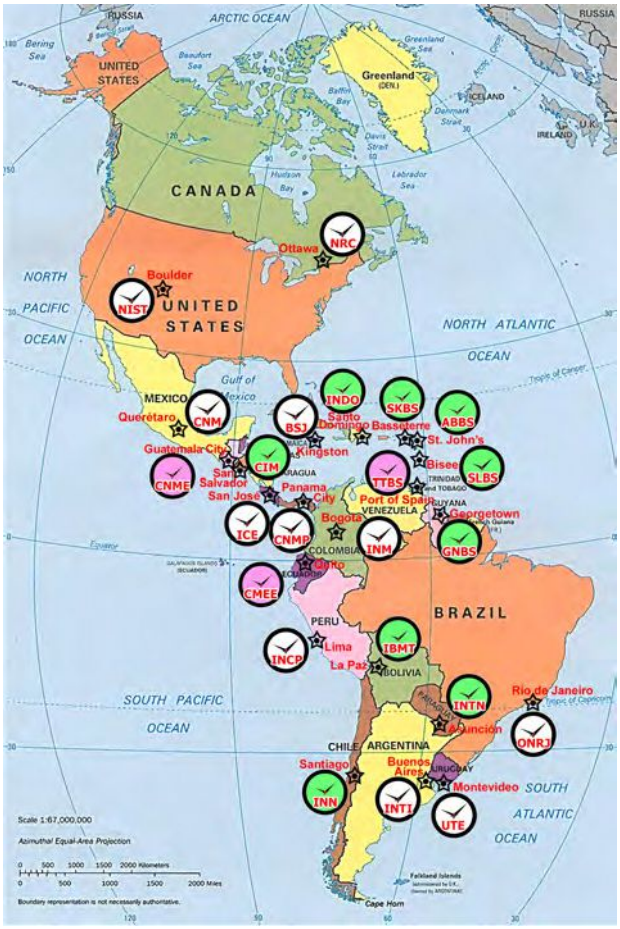


Figura 1.3. Laboratorios de la red SIM, en 2015. Blanco: laboratorios que operan relojes de cesio y/o máseres de hidrógeno. Verde: relojes de rubidio disciplinados a la red SIM. Violeta: relojes GPS o rubidios sin disciplinar.

magnitudes suelen usarse para las mediciones de otras unidades de base, como el volt, o el metro[3]. Desde su invención, la exactitud de los relojes atómicos ha mejorado, en promedio, un factor dos cada dos años. Cada una de estas mejoras ha permitido avances tecnológicos con impacto directo en la vida de las personas: El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es un ejemplo clásico del empleo de mediciones de tiempo aplicadas al posicionamiento: los dispositivos GPS calculan el tiempo de vuelo de las señales recibidas, y dado que las señales se propagan a la velocidad de la luz, el dispositivo puede calcular la distancia a la que se halla cada satélite en vista (luego de varias correcciones). Otros sectores basados en la precisión y exactitud de los relojes atómicos son las telecomunicaciones, las transacciones comerciales o las redes de potencia eléctrica. Todos estos usuarios se basan en la capacidad de sincronización del orden de los nanosegundos que ofrecen los relojes atómicos actuales.

En el ámbito de la astronomía, la interferometria de muy larga base (VLBI) consiste en la observación de objetos celestes con la ayuda de radio telescopios ubicados en distintas partes de la Tierra. Los datos recibidos en cada una de las antenas deben tener una estampa de tiempo muy exacta, para poder ser correlacionados con eventos en otras antenas [9]. Las características más importantes del desempeño de un reloj son su estabilidad y su exactitud. Para evaluar estas particularidades, se organizan alrededor del mundo distintas comparaciones internacionales.
Por ahora solo mencionáremos las técnicas utilizadas, más adelante abordaremos aquella que ha sido elegida para la comparación de relojes de los distintos laboratorios ya mencionados.

1.2.2. Comparación remota de relojes

La evaluación de relojes localizados en distintos laboratorios requiere de técnicas de comparación remota. Las mas usuales se basan en el uso de satélites GPS o fibras ópticas.

1. *Sistema global de navegación por satélite*:

   El uso de la constelación GPS en las comparaciones de tiempo introdujo una mejora notable en la construcción y diseminación de referencias de tiempo. Para estos usos existen receptores GPS diseñados y comercializados especialmente para la transferencia de tiempo. Hay dos técnicas disponibles para el uso de señales GPS: *vista común* (CV: Common View) y *all-in-view* (AV). El primero fue propuesto por Allan y Weiss [10] en los 80, y se basa en la recepción de una única señal, por varios receptores ubicados en tierra (ver Fig. 1.4). Todavía se lo utiliza para comparaciones de relojes cuando es necesario eliminar fuentes de error comunes a ambos receptores. Hasta el año 2006 se utilizó esta técnica para el cálculo de UTC. A partir de avances en la obtención de la información precisa de las órbitas de los satélites y de los parámetros de los relojes a bordo, se comenzó a utilizar la técnica AV [11]. En este caso se computan las contribuciones de todas las señales recibidas en cada receptor. El beneficio de

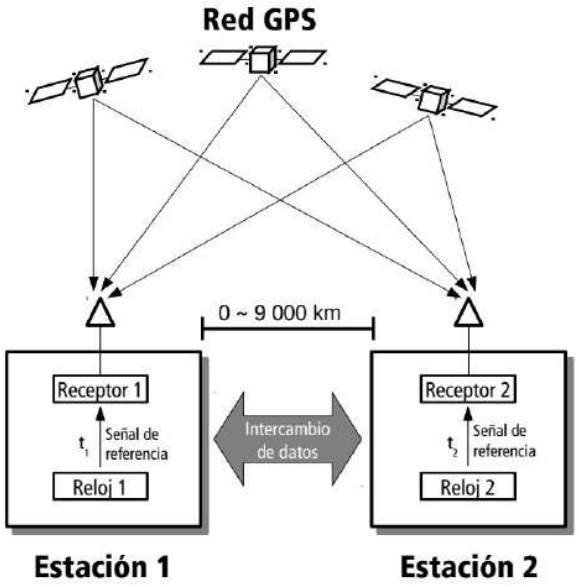


Figura 1.4. Esquema de comparación mediante la técnica de Vista Común.

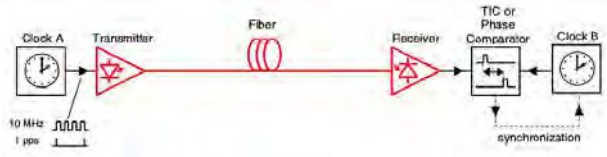


Figura 1.5. Esquema de comparación de radiofrecuencias por fibras ópticas.

esta técnica redunda en el uso de datos provenientes de satélites con mayor ángulo de elevación, mejorando la incertidumbre estadística en las comparaciones de tiempo.

2. *Fibras ópticas*:

   La comparación más exacta de relojes se realiza por fibras ópticas. El esquema más sencillo es el caso de los relojes que generan una señal de radio frecuencias. Aquí las señales de 10 MHz generadas por los relojes son utilizadas para modular la "luz" transmitida a través de las fibras [12, 13]. En el otro extremo de la línea de transmisión se demodula la señal que arriba, y se reobtiene la referencia de 10 MHz (ver Fig. 1.5). En el caso de frecuencias patrones ópticas (del orden de cientos de THz), la técnica de comparación es más compleja. En los últimos años se han llevado a cabo numerosos esfuerzos en la mejora e implementación de esta técnica. La razón para esto está relacionada con el advenimiento de relojes ópticos: dada su alta estabilidad, la técnicas satelitales de comparación no ofrecen un enlace lo suficientemente libre de ruido como para comparar relojes ópticos [14, 15].

En la actualidad no existe un enlace de fibra entre los laboratorios involucrados en este trabajo. Dada esta limitación, la técnica de comparación debe ser satelital. Dado que en

todos los laboratorios se cuenta con receptores GPS, existe la posibilidad de utilizar las técnicas AV y CV. Ambas técnicas introducen el mismo ruido en líneas de base de hasta 2500 km, lo que llevó a elegir la técnica CV por su facilidad de implementación.[11]

1.2.3. Reloj de Cesio

El cesio fue elegido para definir el segundo por varias razones. En principio porque las perturbaciones sobre los niveles de energía atómica son bastante pequeños en el ambiente de baja densidad del haz y los haces atómicos de Cesio son particularmente fáciles de producir y de detectar. La frecuencia de la transición hiperfina que define el segundo es relativamente alta y el ancho de línea puede hacerse bastante estrecho con un diseño cuidado. Al mismo tiempo la frecuencia de transición es lo suficientemente baja como para manipularla utilizando circuitos y las técnicas de microondas estándar. A pesar de todas estas ventajas, construir un reloj de Cesio que genere el segundo conforme a la definición del SI es muy costoso a nivel monetario. Construir un dispositivo cuya exactitud sea comparable a su estabilidad es un gran reto, por ello solo existen algunos estándares primarios de frecuencia. Aparte usualmente es imposible reducir los offsets sistemáticos para lograr hacer los valores lo suficientemente chicos, y el valor residual de offset debe ser medido y removido por medio de un proceso complicado que generalmente puede llevar varios días hasta completarse. El funcionamiento del oscilador debe ser interrumpido durante la evaluación, por lo cual muchos patrones primarios de frecuencia no pueden funcionar contínuamente como relojes. Además, los offsets sistemáticos pueden cambiar lentamente con en el tiempo hasta en el mejor estándar primario, lo cual requiere de un gran esfuerzo el evaluar continuamente sus magnitudes.

Más en detalle, habíamos mencionado que: 1 segundo = 9192631770 ciclos de radiación correspondiente a los niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de Cesio 133 (ver Fig. 1.6).

El único isotopo estable que existe para el Cesio, es precisamente el Cs133. Éste tiene espín nuclear I=7/2, por lo que cuando se encuentra en su estado base (J=1/2), éste tendrá un momento angular dado por $F = 3$ y $F = 4$. Es posible observar transiciones entre las componentes hiperfinas $F = 4$ con $m_F = 0$ y $F = 3$ con $m_F = 0$ como se puede ver en la Fig. 1.6 de la derecha.

1.2.4. Estructura y funcionamiento

Las componentes fundamentales del reloj atómico de cesio son bastantes similares a las del dispositivo de resonancia de haz atómico realizado por Rabi, el cual consiste en:

- Un horno que genera un haz atómico de Cesio.

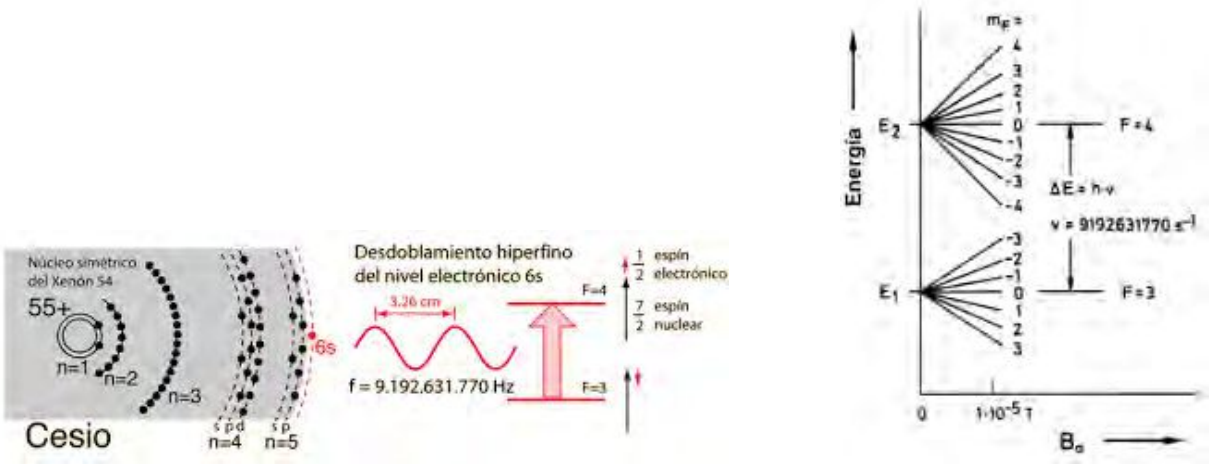


Figura 1.6. *Izquierda*: Esquema del átomo de Cesio. *Derecha*: Diagrama de energía del átomo de cesio como función del campo magnético aplicado (donde es importante mencionar que la frecuencia de transición es prácticamente independiente del campo B_0).

- Un imán de polarización que permite separar los átomos que se encuentran en el estado $F = 3$ de los del estado $F = 4$.

- Un resonador donde a través de emisión inducida debida a la irradiación a la frecuencia de resonancia de 9,1926317704 GHz, los átomos sufren transiciones del estado $F = 4$ con $m_F = 0$ al estado $F = 3$ con $m_F = 0$.

- Un segundo imán que sirve como analizador y permite únicamente a átomos en el estado $F = 4$ con $m_F = 0$.

- Un detector el cual, cuando el sistema entra en resonancia, el detector muestra un mínimo.

El principio de funcionamiento básico, consiste en considerar un haz de átomos en un estado hiperfino, el cual atravesará un campo electromagnético oscilante. Ahora bien, mientras más parecidas sean la frecuencia con la que oscila el campo y la frecuencia de la transición hiperfina del átomo, una mayor cantidad de átomos serán capaces de absorber la energía dando lugar a la transición de un estado hiperfino al otro (ver Fig. 1.6 izquierda).

En el caso del reloj atómico de cesio, tenemos transiciones entre los estados hiperfinos $F = 4$ con $m_F = 0$ y $F = 3$ con $m_F = 0$. (Ver Fig. 1.6 derecha). Así, al ajustar la frecuencia de campo oscilante, se consigue que todos los átomos realicen dicha transición. Y entonces es posible usar la frecuencia del campo oscilante como un estándar de medida para generar impulsos de tiempo [7].

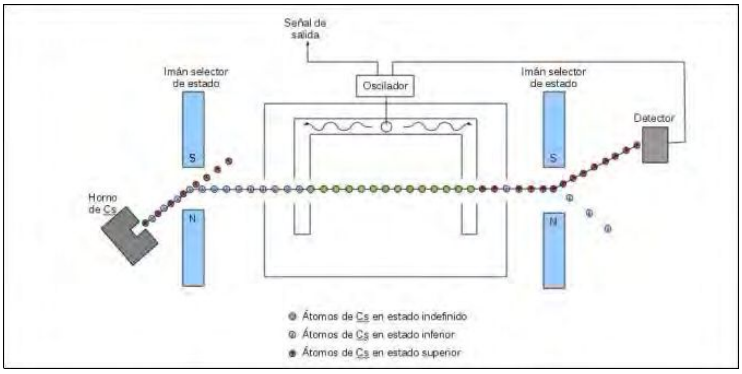


Figura 1.7. Esquema reloj de Cesio. Un horno produce átomos de Cesio en los dos estados descritos en el texto. Un imán selecciona los átomos dejando pasar hacia la cavidad resonante sólo aquellos que están en el estado inferior. La radiación estimula el paso del estado inferior al superior. Este proceso es tanto más eficiente cuanto más próxima es la frecuencia de la radiación a la transición hiperfina. A la salida se vuelven a separar los átomos entre aquellos que están en el estado inferior, y que no han cambiado a su paso por la cavidad, y los que están en el estado superior. Estos últimos llegan a un detector que controla la frecuencia del oscilador que genera la radiación electromagnética en la cavidad. El sistema es realimentado de modo que la frecuencia del oscilador se modifica para maximizar el recuento de átomos en el estado superior. La frecuencia del oscilador es la que se emplea para generar una señal exterior [8].

Tabla 1.1. Cuadro resumen con las fechas y la mejor precisión de algunos relojes a lo largo de la historia.

Reloj	Fecha	Precisión
Paleta y Balancín	1200-1650	1000 s/día
Péndulo	1650-1927	2 ms/día
Cronómetro	1761-	0,2 s/día
Cuarzo	1927-	0,1 ms/día
Reloj atómico de Cesio	1955-	10 ns/día
Máser de Hidrógeno	1960- 400	ps/día
Fuente de Cesio	1999- 100	ps/día

1.2.5. Importancia Física

En la actualidad, el reloj de cesio es capaz de medir frecuencias con una exactitud del orden de $2\text{x}10^{-14}Hz$, o lo que corresponde a un corrimiento de un segundo en 1400000 años.

La definición del segundo que rige desde el 2018 es la siguiente[16][17]:

The second, symbol s, is the SI unit of time. It is defined by taking the fixed numerical value of the caesium frequency $\Delta\nu_{Cs}$, the unperturbed ground-state hyperfine transition frequency of the caesium-133 atom, to be 9 192 631 770 when expressed in the unit Hz, which is equal to s^{-1}.

Que puede traducirse de la siguiente manera:

El segundo, símbolo s, es la unidad de tiempo del SI. Se define asignando el valor numérico fijo de 9192631770 cuando se expresa en Hertz ($Hz = s^{-1}$) a la frecuencia del cesio $\Delta\nu_{Cs}$, correspondiente a la frecuencia de transición hiperfina en el estado fundamental no perturbado del átomo de Cesio 133.

El efecto de esta definición es que el segundo es igual a la duración de 9192631770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental no perturbado del átomo de 133Cs.

- La referencia a un átomo no perturbado pretende aclarar que la definición del segundo del SI se basa en un átomo de cesio no perturbado por ningún campo externo, como la radiación ambiente de un cuerpo negro.
- El segundo así definido es la unidad del tiempo propio en el sentido de la teoría general de la relatividad. Para la provisión de una escala de tiempo coordinada, se combinan las señales de diferentes ubicaciones, que deben corregirse por los corrimientos relativistas de frecuencia del cesio.
- El CIPM (CIPM: Comité Internacional de Pesos y Medias) ha adoptado varias representaciones secundarias del segundo, basadas en un número seleccionado de líneas espectrales de átomos, iones o moléculas. Las frecuencias no perturbadas de estas líneas pueden determinarse con una incertidumbre relativa no inferior a la de la definición del segundo basado en la transición hiperfina del 133Cs, pero algunos pueden producirse con una estabilidad superior.

El reloj atómico de cesio es nuestro patrón de medida y entre los más conocidos tenemos el $NIST-7$, el cual se encuentra en el Instituto Nacional de Estándares y Tecnologia

(NIST, por sus siglas en inglés) en Boulder, Estados Unidos. También en los laboratorios Physikalisch-Technische Bundesanstalt, en Braunschweig, Alemania y finalmente, en el consejo Nacional de Investigación en Canadá.

Por lo tanto, actualmente el reloj atómico de cesio es sumamente relevante, y no sólo para la física, sino para la sociedad en general, pues sin un buen patrón de referencia temporal, la sociedad, las finanzas y cualquier tipo de organización se encontrarían con limitaciones en las aplicaciones más modernas.

1.3. Otros átomos

El cesio no es el único átomo que puede usarse como referencia para un estándar de frecuencia; las transiciones en Rubidio e Hidrógeno también se usan comúnmente. Para poder relacionar sus frecuencias a la definición del SI, dispositivos basados en rubidio o hidrógeno deben ser calibrados con respecto al dispositivo primario basado en cesio.

Sin ahondar demasiado en el funcionamiento de un reloj de rubidio, podemos mencionar que en su diseño la transición de microondas modula la intensidad óptica, y los cambios en el flujo de fotones visibles es mucho más fácil de detectar que el mismo flujo de fotones de microondas. Por lo tanto en el diseño de este dispositivo, es más sencillo y mucho más económico. En contra del diseño, se tiene una estabilidad más pobre y mayores offsets en frecuencia que las encontradas en un buen dispositivo basado en cesio. Lo cual conduce en el diseño del dispositivo de rubidio a una elección comprometida entre la precisión y la estabilidad al definir los parámetros del mismo. Sin embargo, son sustancialmente más baratos, más livianos y más pequeños que los estándares de cesio.

Al igual que con el cesio y el rubidio, la transición del reloj en un Máser de hidrógeno es una transición hiperfina en el estado fundamental del átomo. Los máseres de hidrógeno generalmente tienen offsets en frecuencia que son grandes en comparación con la estabilidad del dispositivo. (El offset de frecuencia fraccional de un máser de hidrógeno es a menudo del orden de $5\text{x}10^{-11}$), mientras que las fluctuaciones de frecuencia fraccional en un día pueden ser tan pequeñas como $2\text{x}10^{-16}$. Además de ser importantes, estos offsets cambian lentamente con el tiempo de maneras difíciles de predecir. Sin embargo, la estabilidad de la frecuencia en períodos cortos de tiempo (por lo general, hasta al menos algunos días) puede ser mucho mejor que el del mejor dispositivo de cesio. Con lo cual los Máseres de hidrógeno son los elegidos cuando se quiere la mayor estabilidad en frecuencia posible y los costos no son un problema, ya que es un dispositivo muy costoso.

Por otro lado, cada uno de los dispositivos mencionados es implementado utilizando un oscilador de cristal de cuarzo cuya frecuencia es estabilizada en la transición atómica utilizando alguna forma de bucle de realimentación. Los detalles del diseño del bucle varían de un dispositivo a otro, pero el bucle siempre tiene un ancho de banda fino y por consiguiente un tiempo de ataque finito. La estabilidad en tiempos más largos dependerá de

qué tan bien pueda aislarse la referencia de frecuencia del cristal de cuarzo de las perturbaciones del entorno, o de qué tan bien puedan estimarse y eliminarse los efectos de esas perturbaciones. Incluso los relojes económicos de pulsera tienen osciladores que pueden tener una precisión de frecuencia de aproximadamente $1ppm$ (ppm: parte por millón) y una estabilidad de 10 o 50 veces mejor que esto. Las fluctuaciones de frecuencia se deben en gran medida a las variaciones de temperatura ambiente, por lo tanto estabilizarla puede mejorar el rendimiento [7].

Capítulo 2

Marco Teórico

En esta sección detallaremos las técnicas que hemos mencionado previamente, así como también la metodología utilizada para el procesamiento de los datos.
La herramienta que nos ofrece el posicionamiento por GPS incluye al menos 24 satélites que orbitan la Tierra a una altura de 20200 km en 6 planos fijos inclinados a 55° del Ecuador. El período orbital es de 11 h 58 min, lo cual significa que un satélite orbitará la Tierra dos veces por día. A bordo de cada satélite hay dos relojes de Cesio y dos de Rubidio [18].

En algunos de los laboratorios hay receptores GPS de tiempo y receptores geodésicos. Usualmente el receptor de tiempo GPS (TR) recibe una señal de entrada de un reloj de cesio como referencia de tiempo y frecuencia para el propio receptor, (1PPS y 10 MHZ).

El receptor recibe como medida la pseudodistancia de la señal del GPS y otros datos contenidos en el "mensaje de navegación", como por ejemplo las efemérides satélitales, los datos de sincronización del reloj a bordo y otra información general sobre el sistema en sí mismo [18]. Con este conjunto de datos, el receptor calcula para cada satélite rastreado, el intervalo de tiempo entre el reloj de referencia local y cada reloj de satélite, así como también el intervalo de tiempo entre el reloj de referencia local y la hora del GPS.

Las coordenadas geográficas de la antena local, deben ser conocidas con incertidumbres en el orden de los centímetros e insertadas en el software del receptor de tiempo del laboratorio. Los receptores de tiempo GPS más antiguos están equipados con un receptor de un solo canal, es decir pueden recibir un solo satélite a la vez; los últimos dispositivos suelen ser multicanal (8 a 12), lo que quiere decir que pueden operar simultáneamente en diferentes satélites (este es nuestro caso en los 3 laboratorios). La portadora del GPS recibida por un receptor de tiempo GPS es usualmente L1 (L1= Link 1, cuyo valor de frecuencia es 1575.42 MHz [19]), y el rango de mediciones, basados en el retardo de la propagación de las señales de GPS se realiza usando el código C/A (C/A: coarse/acquisition).

Para comparaciones de escala de tiempo entre diferentes laboratorios, la comunidad de tiempo y frecuencia acordó utilizar el procedimiento llamado "Vista Común" (CV). Esta actividad programada, es implementada automáticamente en los TRs.

Las diferentes sesiones de mediciones se distribuyen a lo largo de todo el día, para cada duración típica de 13 minutos (780 s) de acuerdo con el programa de CV, las cuales suministran un valor medio de la diferencia entre la escala de tiempo local UTC(k) y la del GPS. Un ejemplo de archivo de salida de datos de medición de CV, es el CGGTTS (dato observacional[1]), cuya sigla esta en inglés (Common GPS GLONASS Time Transfers Standard) y significa estándar de transferencia de tiempo común GPS y Glonass. Es claro que su formato también es producto de un acuerdo internacional y es el usado por los distintos laboratorios en el mundo. En la Fig. 2.1. vemos un ejemplo del mismo [18].

Como se ha mencionado antes, las mediciones realizadas por lo TR de GPS, se utilizan actualmente para sincronizar las escalas de tiempo de los laboratorios que participan en la realización de la escala de tiempo UTC calculada por el BIPM. Periódicamente, el BIPM organiza "viajes de calibración" por medio de un TR de viaje, para calibrar los retardos de los laboratorios receptores utilizando los distintos enlaces.

La mejor precisión obtenida de esta técnica de transferencia de tiempo, cuando los receptores están bien calibrados, esta alrededor de $3 - 5$ ns (1σ).

Coordenadas del satélite

Las coordenadas del satélite están en el sistema de coordenadas horizontales, las cuales son:

- Acimut (A): Se mide sobre el plano del horizonte desde el punto cardinal sur (S) hacia el oeste (W) hasta el círculo vertical que pasa por el astro[2] S ($0° \leq A < 360°$).

- Altura (h): Se mide sobre el círculo vertical que pasa por el astro, desde el horizonte hasta el astro, siendo positiva si el astro se encuentra por encima del horizonte y negativa si se halla por debajo ($-90° \leq h \leq +90°$) [20].

[1]Disponibles en la página web http://wwww.aggo-conicet.gob.ar/rnt/
[2]En este caso en lugar del astro sería el satélite.

```
GGTTS GPS DATA FORMAT VERSION = 01
REV DATE = 2017-11-09
RCVR = GTR50 1203120 1.7.1
CH = 20
IMS = GTR50 1203120 1.7.1
LAB = INTI
X = +2745680.09 m
Y = -4483303.83 m
Z = -3599315.83 m
FRAME = WGS84
COMMENTS = Lab Code - 10015, UTC Code - 0010015
INT DLY =  -30.8 ns
CAB DLY =  129.3 ns
REF DLY =    8.0 ns
REF = Cs-INTI1
CKSUM = B9

PRN CL  MJD  STTIME TRKL ELV AZTH   REFSV      SRSV     REFGPS    SRGPS  DSG IOE MDTR SMDT MDIO SMDI MSIO SMSI ISG CK
            hhmmss  s  .1dg .1dg    .1ns     .1ps/s     .1ns    .1ps/s .1ns     .1ns.1ps/s.1ns.1ps/s.1ns.1ps/s.1ns
 10 FF 58400 000600  780 322 3483    -1761817    +26       +336     -5    9 075  153  -33   85  -13  106  -35  26 47
 15 FF 58400 000600  780 153  858    +3436750     -6       +380     +5   11 018  305  -55  120   -8  116   -5  45 1B
 16 FF 58400 000600  780 390 2293      -51412     +1       +359    -18    6 098  130  -16   75   -9  121  +48  17 11
 20 FF 58400 000600  780 606   48    -5169733    -18       +342    -12    6 076   94   -8   56   -4  110  -25  26 04
 21 FF 58400 000600  780 688 1859    +3244108    -59       +340     +2    5 092   88   +2   53   +1  103   +5  15 F8
 26 FF 58400 000600  780 591 2676      -36136   -119       +325     -6    4 095   95   -1   57   +0  101  +47  11 FD
 29 FF 58400 000600  780 367  866    -3607815    +64       +342    -11    7 093  137  +15   78   +7   93   -9  28 30
 10 FF 58400 002200  780 399 3476    -1761803     +8       +320    -22    9 075  127  -22   73  -10  106  -54  18 43
 15 FF 58400 002200  780 178  924    +3436730    -35       +371    -24   16 018  264  -32  114   -6  103   -6  35 3E
 16 FF 58400 002200  780 443 2357      -51396    +23       +356     +4    6 098  117  -11   68   -5  117   +3  16 FD
 20 FF 58400 002200  780 685  103    -5169741     -6       +339     +0    6 076   88   -5   53   -2   94   +2  17 CD
 21 FF 58400 002200  780 649 1682    +3244047    -68       +339     -6    5 092   90   +3   54   +2   94   -1  13 EE
 26 FF 58400 002200  780 587 2832      -36250   -125       +321    -12    4 095   96   +2   57   +1  113   -2  10 E9
 29 FF 58400 002200  780 320  792    -3607743    +71       +341     -4   10 093  154  +21   85   +8   94  -11  26 1D
```

Figura 2.1. Ejemplo de un archivo con el formato CGGTTS para un receptor GPS. En el encabezado vemos los datos recibidos por el receptor, el nombre del laboratorio, la fecha e información general del receptor y del laboratorio. En la columna 1 (izq a derecha) con el código del satélite visto por el receptor (PRN), en la columna 3 la Fecha Juliana Modificada (MJD), en la columna 4 (STTIME) el tiempo de inicio de la medición en el formato "hhmmss" y la columna 10 llamada "REFGPS" indica la diferencia de tiempo entre $UTC(k) - GPS$, en décimas de nanosegundo. Donde se indica con k el laboratorio en cuestión. Otras columnas de interés son las columnas 6 y 7 que reportan la elevación y acimut del satélite en décimas de grado respectivamente. Por último la columna 12, que tiene el desvío estándar (σ) de la medida (llamada DSG en los CGGTTS) en decimas de nanosegundos.

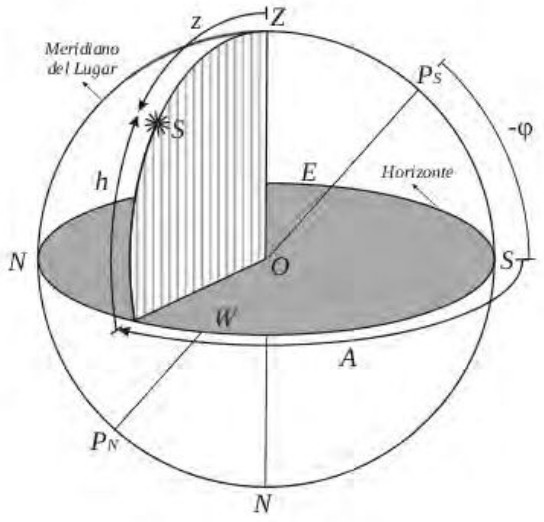


Figura 2.2. Coordenadas del satélite: acimut y altura (o elevación).

2.1. Descripción General de Algoritmo

2.1.1. El Método de Vista Común

La observación de los satélites de GPS usando el método de Vista Común, es uno de los métodos más precisos y rigurosos para la comparación de tiempo entre relojes distantes en la Tierra o en sus inmediaciones. Ya se ha demostrado [11] que este método es capaz de proporcionar precisión al nivel de unos pocos nanosegundos cuando se usan coordenadas precisas GPS de la antena, efemérides satelitales precisas (procesadas posteriormente), las correcciones por los retardos ionosféricos y los resultados derivados de las calibraciones diferenciales de los receptores.

Este método esta basado en observaciones GPS con el código C/A de los receptores de tiempo GPS instalados en los laboratorios involucrados. Los datos recogidos mediante esta técnica (GPS CV) son usados también por el BIPM regularmente para comparar los relojes distantes y calcular el TAI.[21]

Este tipo de receptores de tiempo GPS utilizan como entrada una señal de 1 pulso por segundo (1PPS: 1 pulse per second) generada por la realización local de UTC(k). El receptor utiliza un software y sigue un procedimiento dado, recomendado por el Comite Consultivo de Tiempo y Frecuencia (CCTF: Consultative Committee for Time and Frecuency), para calcular la diferencia de tiempo UTC(k) y la hora de GPS para cada satélite recibido. Cada diferencia se realiza procesando un conjunto de 780 observaciones sucesivas a corto plazo, a intervalos de 1 segundo, tomadas por el receptor durante un lapso de

tiempo de 13 minutos (780 s). Dado que el receptor necesita 2 minutos para asegurar la señal del satélite y 1 minuto adicional para el procesamiento de los datos, el inicio de dos sets de datos consecutivos están separados por un intervalo de tiempo de 16 minutos [18].

Los horarios de inicio de las diferentes sesiones diarias de 16 minutos se eligen de acuerdo a un programa internacional de seguimiento el cual organiza el BIPM para garantizar la mejor cobertura geométrica de los satélites para el área geográfica ocupada por los laboratorios. Con lo cual se puede llegar a tener por día hasta 90 sets de medición, cada uno de una duración de 16 minutos.

GPS CV: procesamiento de datos

Una vez que están disponibles los archivos CGGTTS de los laboratorios, se procede a realizar la comparación. La misma consiste en comparar los datos de los CGGTTS de a dos laboratorios. Se reconocen en ambos archivos los datos de medición identificados por el mismo código del satélite (PRN), fecha (MJD) y hora de inicio (STTIME).

El uso de los datos recolectados para el mismo satélite al mismo tiempo, asegura el mejor balance de incertidumbres en la comparación, puesto que las "comunes" se cancelan y las "casi comunes" son parcialmente canceladas por la técnica en sí misma [18]. Por lo tanto una vez identificada la fila con el mismo código de satélite para la misma fecha (MJD) y hora (STTIME) se realiza la resta entre los valores de REFGPS(lab1) y REFGPS(lab2). Podemos pensarlo esquemáticamente, retomando la Fig. 1.4 las estaciones 1 y 2 reciben simultáneamente la señal de sincronización de algunos satélites j,k,l, etc. Luego se mide la diferencia de tiempo entre la señal recibida y la generada por un reloj local. A partir de las diferencias de tiempos medidas, por ejemplo, con el satélite k: $\delta_1^k = t_1 - t_k$ y $\delta_2^k = t_2 - t_k$ es posible obtener la diferencia de fases entre los relojes 1 y 2 con la siguiente Ecuación 2.1:

$$\delta_{t_{12}} = (t_1 - t_k) - (t_2 - t_k) = t_1 - t_2 \tag{2.1}$$

Las fluctuaciones por los retrasos entre el emisor y los dos receptores debidas a la propagación de las señales en la atmósfera, se cancelan bajo la condición de que estén completamente correlacionadas. Esta es la situación ideal, anteriormente mencionada, que en la realidad no sucede completamente, pero el método funciona correctamente incluso si las distancias de las estaciones a los satélites no son exactamente iguales [22].

Varianza de Allan (AVAR) $\sigma_y^2(\tau)$

La habilidad para predecir el desempeño futuro de un reloj basado en las mediciones pasadas puede ser cuantificado usando la varianza de Allan. La varianza de Allan estima la dispersión de la frecuencia en función del tiempo de promediación, determinando así

la estabilidad del oscilador bajo calibración. Sea $x(t)$ la diferencia de tiempo entre dos relojes para una época. Supongamos que medimos la diferencia de tiempo entre dos relojes en los tiempos t_1, y $t_2 = t_1 + \tau$. Si queremos predecir la diferencia de tiempo para el tiempo $t_3 = t_2 + \tau$, entonces podemos usar las dos mediciones para estimar la diferencia de frecuencia entre los dos relojes durante el primer intervalo:

$$y_{12} = \frac{x(t_2) - x(t_1)}{\tau} \tag{2.2}$$

y si combinamos este estimador con la medida de t_2 para estimar el valor al tiempo t_3 :

$$\hat{x}(t_3) = x(t_2) + y_{12}\ \tau = 2\,x(t_2) - x(t_1) \tag{2.3}$$

y donde hemos asumido (por falta de una mejor opción) que la frecuencia en el intervalo entre t_2 y t_3 es la misma que en el intervalo anterior. Si este no es el caso, la predicción en el error será proporcional a la diferencia entre la frecuencia actual en el intervalo entre t_2 y t_3, el cual es y_{23}, y nuestro estimador de este, es la misma frecuencia promedio sobre el intervalo anterior:

$$\epsilon = x(t_3) - \hat{x}(t_3) \approx y_{23} - y_{12} \tag{2.4}$$

Expresado en términos de las diferencias de tiempo de las medidas, la predicción del error será proporcional a:

$$\frac{x(t_3) - 2x(t_2) + x(t_1)}{\tau} \tag{2.5}$$

y el promedio cuadrático de esta cantidad es usualmente designada como $\sigma_y^2(\tau)$, que es llamada la varianza de "dos-muestras" (o de Allan) para un tiempo de promediado τ. La varianza está realmente definida como la mitad de este valor para que sea coherente con otros estimadores cuando los datos de entrada se caractericen por ruido de fase blanco [7].

Entonces para realizar una estimación acertada del proceso estadístico en presencia de correlaciones utilizamos la varianza de Allan [22]:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} (y_{i+1} - y_i)^2 \tag{2.6}$$

donde $y(t)$ es el i-ésimo desvío fraccional en frecuencia de los N totales, promediado en el intervalo de tiempo τ.

Como puede notarse, la varianza de Allan mide el grado de variación de la diferencia fraccional de frecuencia. Alternativamente se puede expresar la varianza de Allan en términos de la diferencia de fase x entre los osciladores.

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(M-2)\tau^2} \sum_{i=1}^{M-2} (x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i)^2 \tag{2.7}$$

Siendo $x(t)$ la i-ésima de las M=N+1 fases medidas entre los intervalos de tiempo τ. Usualmente se trabaja con el desvío de Allan: $\sigma_y(\tau) = \sqrt{\sigma_y^2(\tau)}$.

Se usa la varianza de Allan debido a que no está recomendado para el estudio de estabilidad en frecuencia la varianza estándar como estimador. Esto se debe, entre otros motivos, a que no es convergente para ciertos tipos de ruidos, comúnmente presentes en los patrones de frecuencia.

Varianza de Allan modificada: $mod\ \sigma_y^2(\tau)$

La varianza de Allan modificada (MVAR), también conocida por $mod\ \sigma_y^2(\tau)$, es una variante de la varianza de allan que se le modifica el ancho de banda, siendo así una medida de la estabilidad de frecuencia en relojes, osciladores y amplificadores. Su principal ventaja con respecto a la varianza de Allan es su capacidad para separar el ruido de fase blanco del ruido de fase flicker.

La desviación de allan modificada (MDEV), también conocida como $mod\ \sigma_y(\tau)$, es la variante de la desviación de la varianza de Allan modificada. Se define la varianza de allan modificada por:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2\tau^2} < [\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n-1}(x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i)]^2 > \tag{2.8}$$

o si usamos el promedio fraccional en frecuencia (y) entonces:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} < [\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n-1}(\hat{y}_{i+1} - \hat{y}_i)]^2 > \tag{2.9}$$

con n entero que es el número de muestra tomadas [23].

Estimadores de estabilidad de tiempo (TDEV: Time Deviation)

Una medida estadística de estabilidad de tiempo (σ_x), que a menudo se denomina desviación de tiempo (TDEV), se puede calcular a partir de la desviación de Allan modificada (MDEV). El TDEV se basa en el MDEV en lugar de la desviación original de Allan (AVAR), porque el MDEV puede discriminar entre la modulación de fase blanco y flicker. La siguiente es la estimación de la variación de tiempo basada en la varianza de Allan modificada [24]:

$$\sigma_x^2(\tau) = (\frac{\tau^2}{3})\, mod\, \sigma_y^2(\tau) \tag{2.10}$$

y similarmente que para la desviación modificada de Allan, se tiene la desviación de tiempo:

$$\sigma_x(\tau) = (\frac{\tau}{\sqrt{3}})\, mod\, \sigma_y(\tau) \tag{2.11}$$

Capítulo 3

Resultados Generales

Se analizaron datos de mediciones de CV durante 22 días, (desde el día 58400 hasta el día 58421, fecha juliana modificada), que se corresponden a los datos disponibles para el mes de octubre de 2018 (i.e. desde el 10/10/18 al 31/10/18) .

Los receptores involucrados fueron los pertenecientes a los tres laboratorios descriptos en la tabla 3.1, INTI, AGGO e IGN. Como los laboratorios se encuentran separados por una distancia geográfica menor a los 55 km (ver Fig. 3.1), se espera que las correcciones por retardos atmosféricos sean más acertadas que las de líneas de base larga, ya que en la región abarcada aproximadamente comparten, (en especial INTI e IGN) la misma tropósfera/ionósfera.

Por cada época (Δt = 16 minutos), se tienen en CV un promedio de 7 u 8 satélites; sobre un máximo de 12 satélites que puede recibir cada receptor multicanal. Este elevado número de satélites en CV se debe a la cercanía geográfica entre los laboratorios. Las correcciones que realiza el modelo para tropósfera/ionósfera son confiables debido a la proximidad de los laboratorios, donde los errores remanentes del modelo se cancelan.

Si consideramos el caso ideal, en el que el receptor empiece a divisar satélites a las 00 h, se tiene un máximo de 90 medidas por día, considerando cada medida como algún

Tabla 3.1. Comparación de relojes atómicos.

Receptor	INTI	AGGO	IGN
Modelo	GTR50	Sep. Polarx 4TR PRO	NovAtel “L12LV”
Frecuencia L1 y L2	Doble frecuencia	Doble frecuencia	Doble frecuencia
Datos que recibe	GPS	GPS-GLONAS	GPS
Cantidad de canales	12 Canales	12 Canales	12 Canales

Figura 3.1. Mapa de Buenos Aires con la ubicación y las distancias aproximadas entre los laboratorios.

promedio de cada época (intervalo Δt de 16 min). Inicialmente se implementó el algoritmo CV y luego se propusieron y analizaron modificaciones tendientes a reducir los niveles de ruido involucrados en la comparación remota.

3.1. Implementación del algoritmo de Vista Común

Consiste en sumar las diferencias de tiempo entre los laboratorios para cada satélite en CV e igual época y luego dividir por el número total de satélites en CV para esa época. De ésta manera se tiene un dato por época.

$$\bar{X}_t = \Delta REFGPS_t = \sum_{i=1}^{n} (REFGPS(Lab1)_{SV_{i,t}} - REFGPS(Lab2)_{SV_{i,t}})/n \tag{3.1}$$

donde t es cada época, con t entre $1 \leq t \leq 90$, $SV_{i,t}$, es el número que identifica a cada satélite en CV para la época t, i esta entre 1 y n, y n la cantidad total de satélites en CV para cada época t.

En la figura 3.2 vemos los resultados de la comparaciones realizadas luego de aplicar el algoritmo de Vista Común a los datos de los tres laboratorios para el mes de octubre del año 2018.

Para cuantificar el ruido presente en las figura 3.2 se utilizó la varianza de Allan (ver ecuación 2.6).

Vemos en la figura 3.2 que la diferencia entre el comportamiento entre INTI-IGN y las otras dos figuras se debe a una diferencia de frecuencia del reloj de AGGO.

3.2. Validación con UTCr

Para validar el método implementado se comparan los resultados obtenidos por el método de CV y a través de UTCr.

A partir de los reportes del BIPM disponibles en la página web[1], se toman los datos de UTCr sólo de los laboratorios INTI e IGN, puesto que para la fecha que se consideró en el trabajo (58400-58421 FMJ) AGGO no reportaba datos.

Si consideramos $d_1(i) = UTCr - UTCr(INTI)(i) \pm \delta_1$ como los datos brindados para UTCr INTI por el reporte citado previamente y $d_2(i) = UTCr - UTCr(IGN)(i) \pm \delta_2$ respectivamente para IGN, podemos calcular las diferencias de tiempo entre laboratorios con sus incertezas de acuerdo a la ecuación 3.2

$$d(i) = d_1(i) - d_2(i) \pm \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2} \tag{3.2}$$

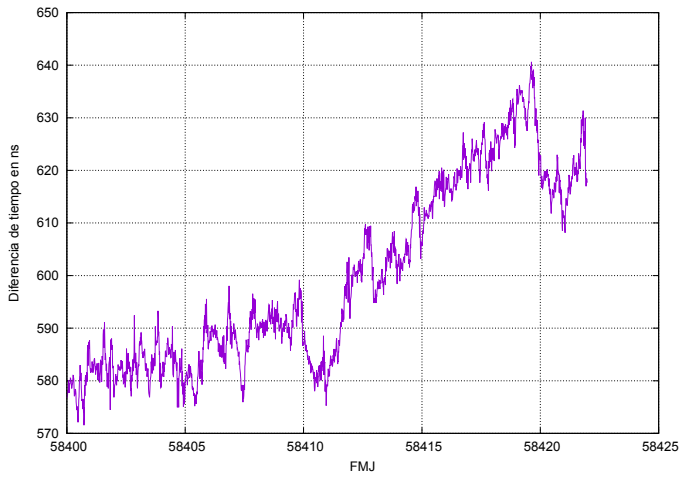
Donde $\delta_1 = 20\ ns$ y $\delta_2 = 20\ ns$.

Las incertidumbres son las reportadas por el BIPM en la Circular T, y tienen su origen en la calibración de los receptores.

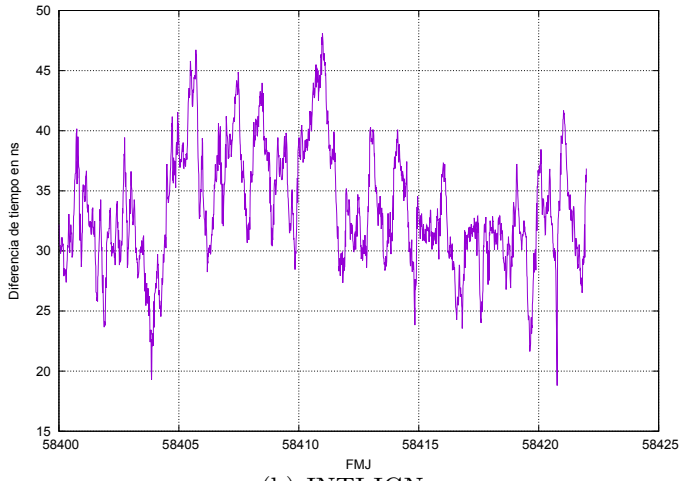
Vemos en la Fig. 3.3 que la curva llamada Algoritmo CV, curva celeste, es la implementación del método de CV realizado para INTI-IGN y por otro lado la curva llamada UTCr con sus barras de incertidumbre, es la diferencia de INTI e IGN a través de los datos de UTCr junto con la propagación de incertidumbres descripta en la ecuación 3.2.

Vemos que las curvas no están superpuestas, a priori sería lo deseado, lo cual indica cierto offset en las medidas, pero sin embargo la curva se encuentra contenida dentro de las barras de incertidumbre, lo cual implica una validación del método empleado. Las incertidumbres se deben a las calibraciones de los retrasos en el sistema de medición (delay de los cables, antenas, receptor, etc).

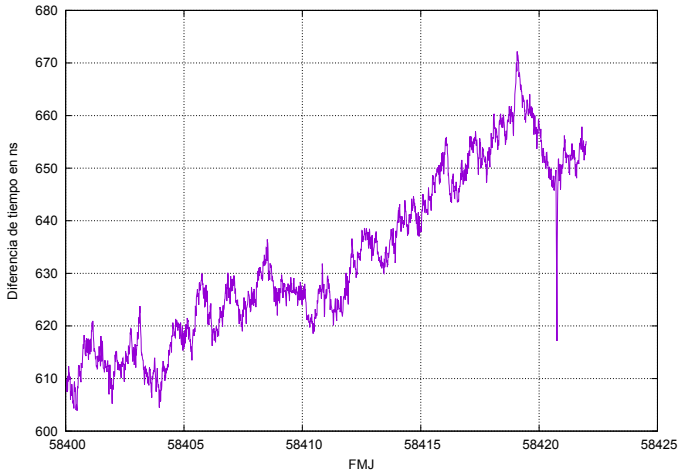
[1] https://www.bipm.org/en/bipm-services/timescales/time-ftp/Rapid-UTC.htmlnohref



(a) AGGO-INTI



(b) INTI-IGN



(c) AGGO-IGN

Figura 3.2. Implementación Técnica de CV

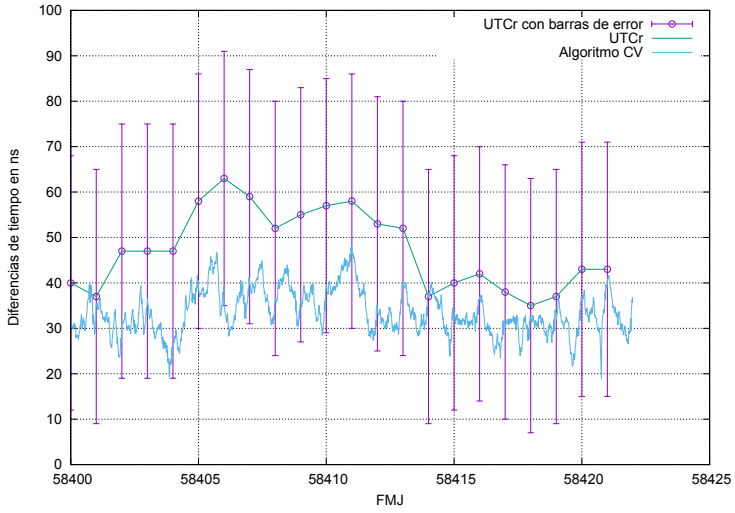


Figura 3.3. Validación de la técnica de CV implementada

3.3. Análisis de ruidos de medición según elevaciones

En esta sección se analizaron las dispersiones en cada medición (DGS en los archivos CGGTTS) en función a la elevación.

Desvío estándar vs elevación de los satélites en CV

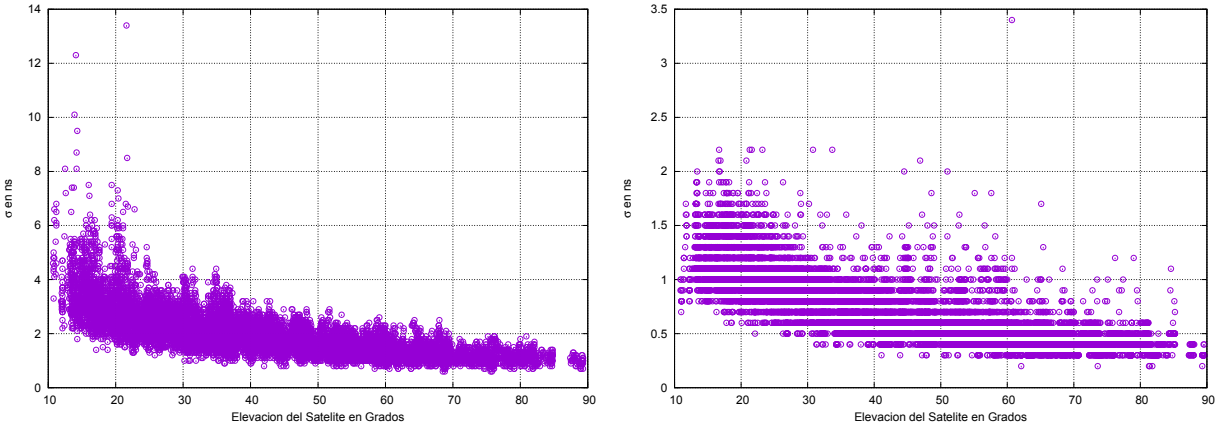


Figura 3.4. *Izquierda*: Desvío estándar vs Elevación AGGO. *Derecha*: Desvío estándar vs Elevación INTI .

De las figuras 3.4, 3.5 y 3.6 vemos que el eje de las ordenadas tiene escalas distintas para cada laboratorio. Esto es debido a que las medidas presentan distintas dispersiones (σ). Podemos ver que INTI presenta las medidas con menor dispersión, mientras que IGN las de mayor dispersión. Si se graficaran en las mismas escalas, por ejemplo para el caso

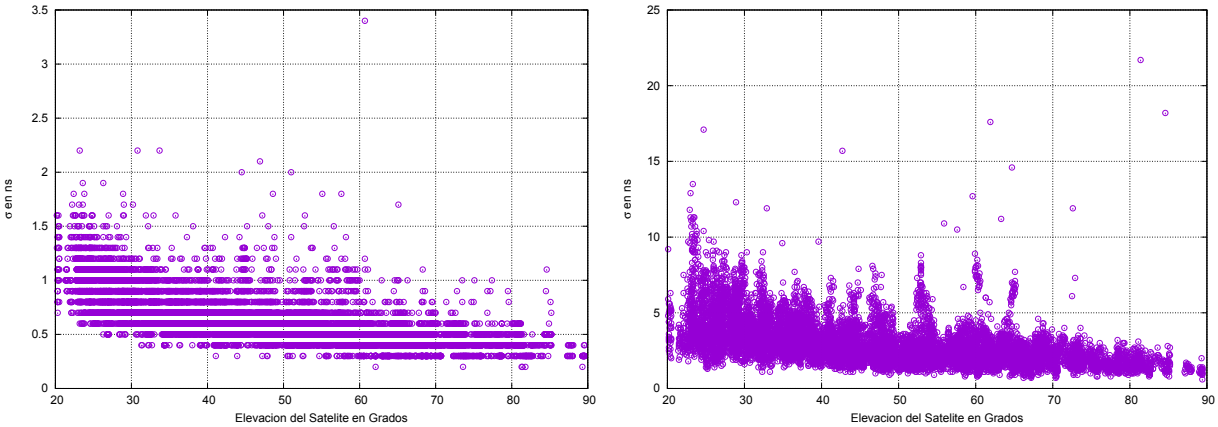


Figura 3.5. *Izquierda*: Desvío estándar vs Elevación INTI. *Derecha*: Desvío estándar vs Elevación IGN .

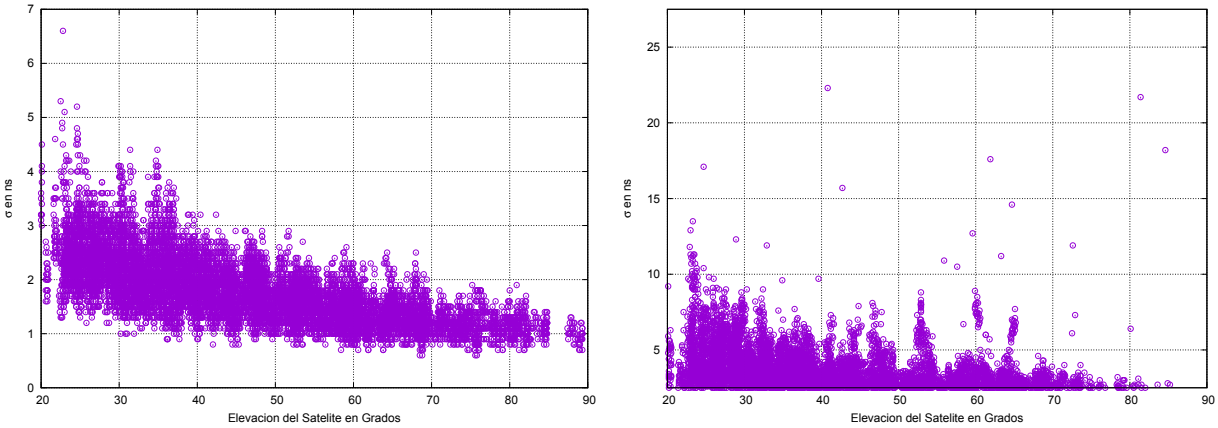


Figura 3.6. *Izquierda*: Desvío estándar vs Elevación AGGO. *Derecha*: Desvío estándar vs Elevación IGN .

INTI-IGN (ver fig. 3.6) se perdería la tendencia de los datos de INTI. La densidad de puntos graficados es debida a la proximidad de los laboratorios, que permite tener para una misma época, varios satélites en CV.
A partir de los resultados de esta sección se proponen tres criterios para mejorar las mediciones de CV. La idea que atraviesa las tres propuestas es realizar una selección de los satélites usados en la comparación, de modo de disminuir el ruido en el link. Las tres propuestas son:

- Técnica de CV ponderada por varianza.
- Técnica de CV con umbral de desvío estándar ($\sigma \leq 2ns$) ponderada por varianza.
- Técnica de CV ponderada por Elevación del Satélite.

En las secciones 3.4, 3.5 y 3.6 se describen y analizan cada una de estas propuestas.

3.4. Técnica de CV ponderada por varianza

A partir del valor hallado a través de la técnica de CV se ponderó otorgándole más peso a las medidas con menor ruido, i.e., aquellas con menor desvío estándar.

Definimos previamente:

$$s(i) = máx(\sigma_x(i)) = máx(DGS(Lab_i)) \tag{3.3}$$

Donde se toma como $s(i)$, al mayor desvío estándar entre el laboratorio 1 y 2 en CV para una dada época.

Luego definimos el inverso de la varianza:

$$y(i) = \frac{1}{s(i)^2} \tag{3.4}$$

Y definimos los pesos por varianza:

$$P_{\sigma^2}(i) = \frac{y(i)}{\sum_{i=1}^{n} y(i)} \tag{3.5}$$

Con lo cual nos queda que nuestro promedio en este caso será:

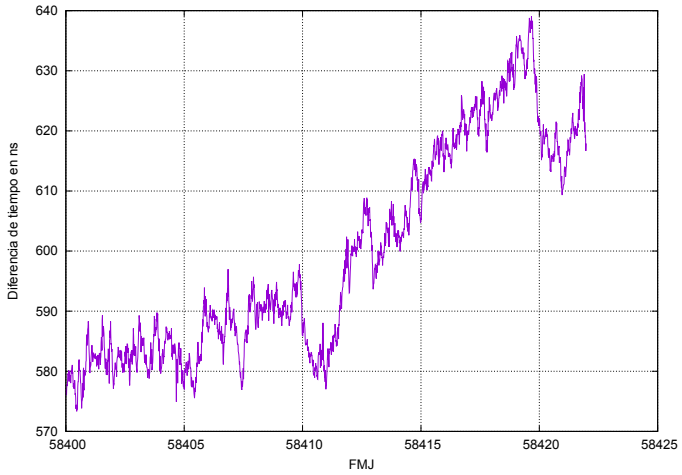
$$\bar{X}_{\sigma^2,t} = \sum_{i=1}^{n} [REFGPS(Lab1)_{SV_{i,t}} - REFGPS(Lab2)_{SV_{i,t}}] \cdot P_{\sigma^2}(i) \tag{3.6}$$

Siendo $\bar{X}_{\sigma^2,t}$ el promedio ponderado por varianza.

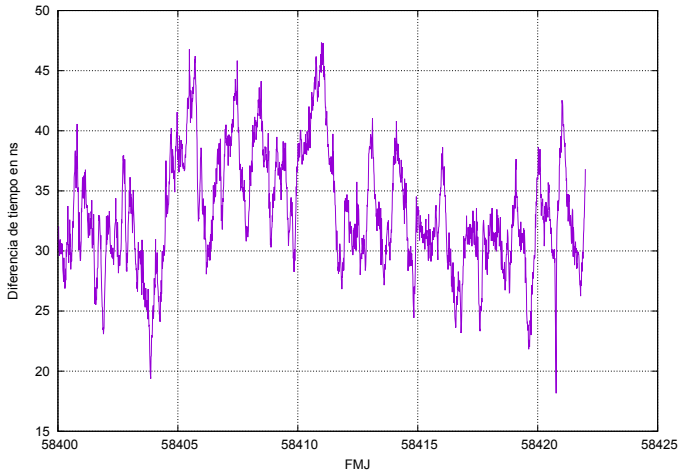
Análisis usando la Varianza de Allan y la Estabilidad Temporal (TDEV)

Para cuantificar el ruido se utiliza la Varianza de Allan y para obtener información acerca del ruido entre los enlaces usamos el TDEV.

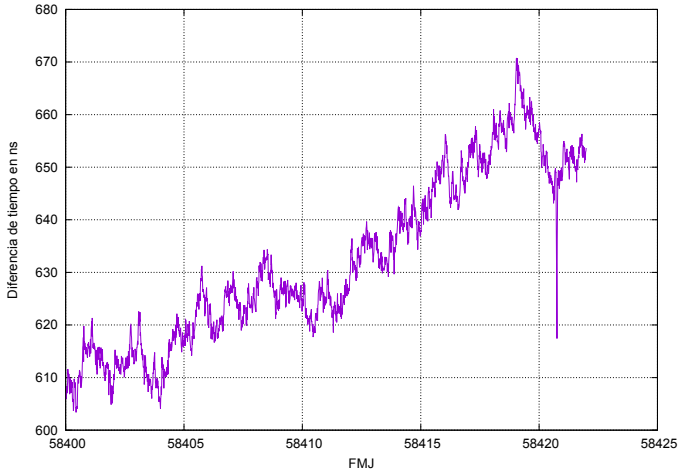
Vemos que para el caso de AGGO-INTI (ver fig.3.8) se consigue mejorar el nivel de ruido en particular para $\tau < 1$ hora.
Para INTI-IGN y AGGO-IGN (ver figuras 3.9 y 3.10 respectivamente), no se consiguen grandes mejoras al ponderar por el desvío estándar en relación al algoritmo CV sin ponderar.



(a) AGGO-INTI



(b) INTI-IGN



(c) AGGO-IGN

Figura 3.7. Técnica CV ponderada por σ^2

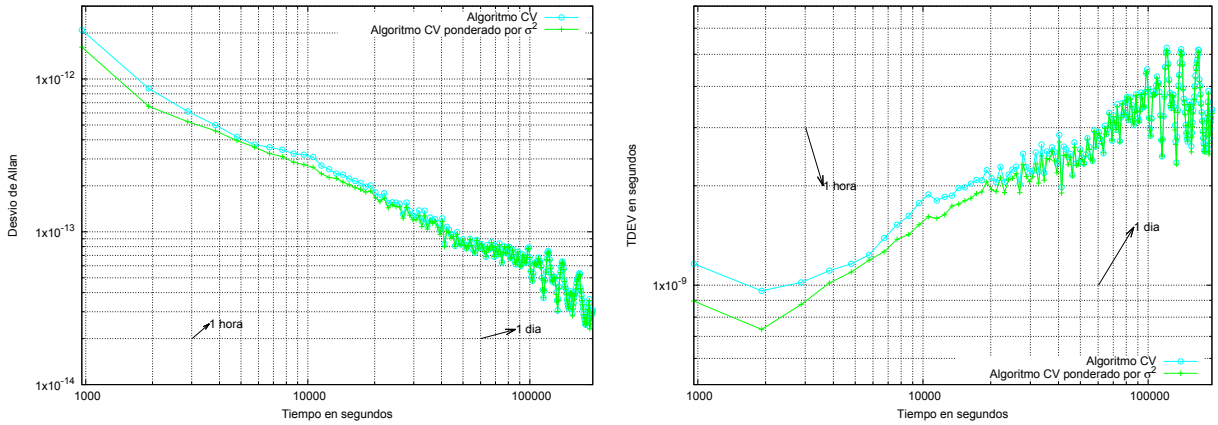


Figura 3.8. *Izquierda*: Comparación mediante AVAR para Algoritmo CV simple y ponderado por σ^2 para AGGO vs INTI. *Derecha*: Comparación mediante TDEV para Algoritmo CV simple y Ponderado por σ^2 para AGGO vs INTI.

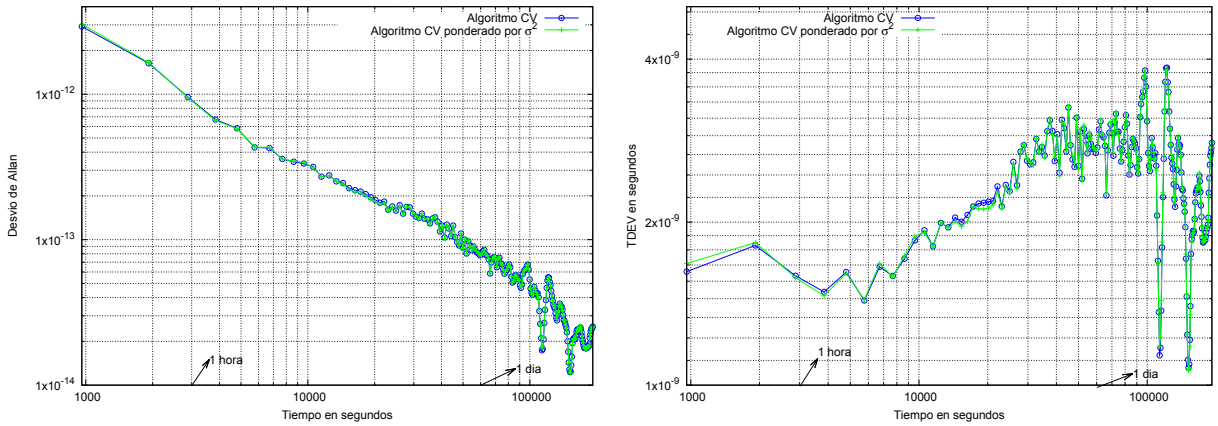


Figura 3.9. *Izquierda*: Comparación mediante AVAR para Algoritmo CV simple y ponderado por σ^2 para INTI vs IGN. *Derecha*: Comparación mediante TDEV para Algoritmo CV simple y Ponderado por σ^2 para INTI vs IGN.

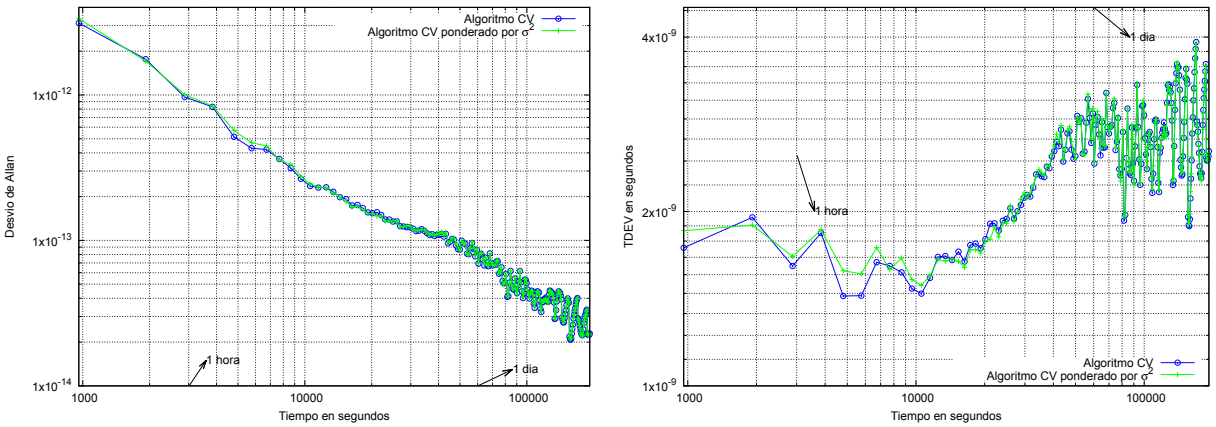


Figura 3.10. *Izquierda*: Comparación mediante AVAR para Algoritmo CV simple y ponderado por σ^2 para AGGO vs IGN . *Derecha*: Comparación mediante TDEV para Algoritmo CV simple y Ponderado por σ^2 para AGGO vs IGN.

3.5. Técnica de CV con umbral de desvío estándar ponderada por varianza

La siguiente propuesta analizada consistió en colocar un umbral para el desvío estándar de $\sigma \leq 2$ ns. Como criterio de corte sólo se consideraron las medidas que están por debajo de este umbral y que se hallan en CV.

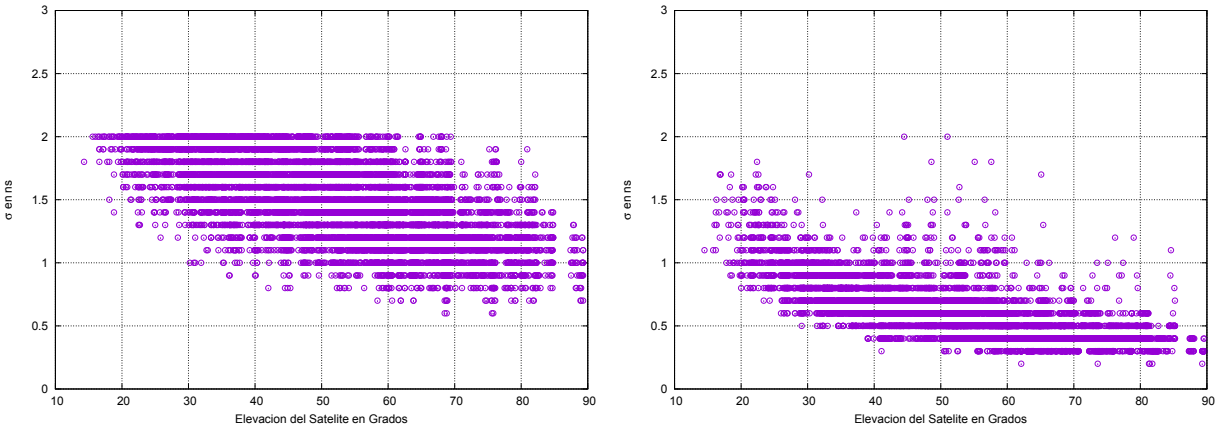


Figura 3.11. *Izquierda*: Desvío estándar vs Elevación AGGO con $\sigma \leq 2$ ns. *Derecha*: Desvío estándar vs Elevación INTI con $\sigma \leq 2$ ns.

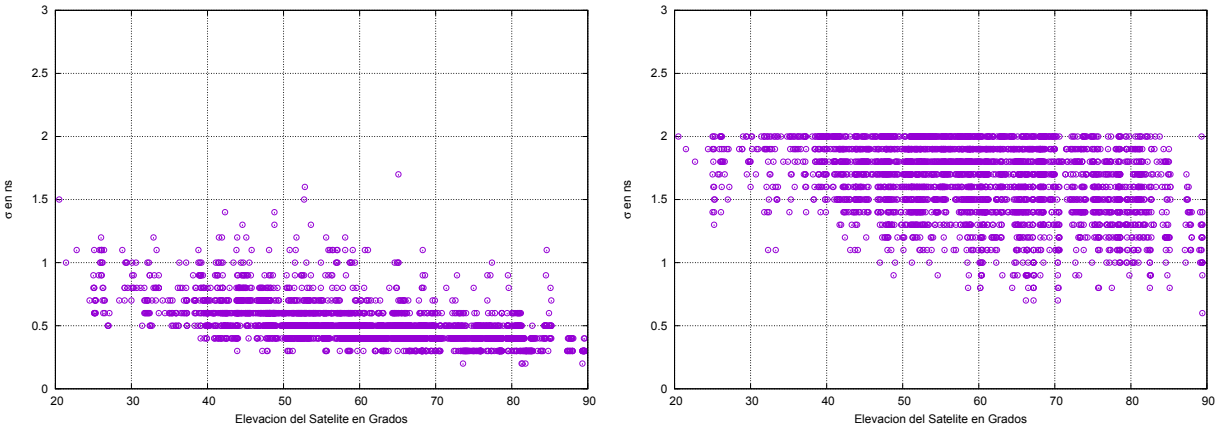


Figura 3.12. *Izquierda*: Desvío estándar vs Elevación INTI con $\sigma \leq 2$ ns. *Derecha*: Desvío estándar vs Elevación IGN con $\sigma \leq 2$ ns.

Rápidamente vemos que debido a que INTI tiene la mayor parte de sus medidas con $\sigma \leq 2$ ns, la forma de su gráfica casi no se ve modifica por el umbral tomado (ver Fig.3.4 y Fig.3.5), en cambio, para IGN se nota abruptamente el truncamiento de los datos. Como las medidas están en CV, que uno de los dos laboratorios tenga desvíos más grandes respecto del otro, afecta directamente la muestra, la cual resulta fuertemente reducida.

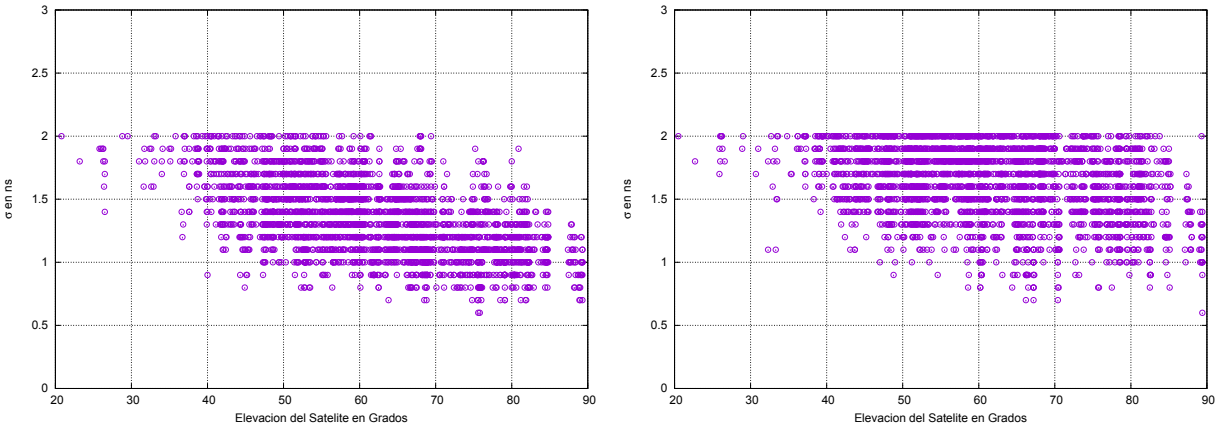


Figura 3.13. *Izquierda*: Desvío estándar vs Elevación AGGO con $\sigma \leq 2$ ns. *Derecha*: Desvío estándar vs Elevación IGN con $\sigma \leq 2$ ns.

Los receptores de AGGO e INTI están configurados con una máscara de 10° de elevación del satélite mientras que para el receptor de IGN la máscara está en los 20° de elevación del satélite.

Vemos que se corrobora que a mayor elevación del satélite, es decir más cerca del cenit, el error en la medida es menor.

Análisis para INTI-IGN

Cómo vimos de las medidas de los tres laboratorios, INTI tiene las medidas con menor dispersión (σ) e IGN las de mayor dispersión. Por lo tanto se hizo el análisis particular de estos dos laboratorios por medio de la varianza de Allan y usando el TDEV para ver más detenidamente estos datos y analizar si este criterio conduce a una mejora en relación al ruido. Luego de separar la muestra con las medidas en CV con $\sigma \leq 2$ ns, se las procesó usando la técnica de CV ponderada por varianza descripta en la sección 3.4, de esta manera logramos comparar ambas muestras y ver cuál de ellas conduce a mejores resultados.

De la fig. 3.14 izquierda de los desvíos ponderados, el de $\sigma \leq 2$ ns no presenta grandes mejoras en la varianza de Allan, pero para la fig. 3.14 derecha, el de TDEV no es concluyente, puesto que a tiempos cortos presenta mejoras y luego empeora. Vemos que para $\tau > 1$ día parece mejorar, pero son pocos datos para analizar la estabilidad a largo plazo y poco certero para tomar una postura concreta. Por lo tanto podemos concluir que el truncar los datos con el umbral $\sigma \leq 2$ ns no se consiguen grandes mejoras. Puede tenerse como motivación para próximos trabajos que contemplen mayor cantidad de datos (más de un mes de medidas). Podemos concluir que al truncar no se consiguen grandes mejoras, por lo tanto no es un buen criterio para muestras menores a 20 días.

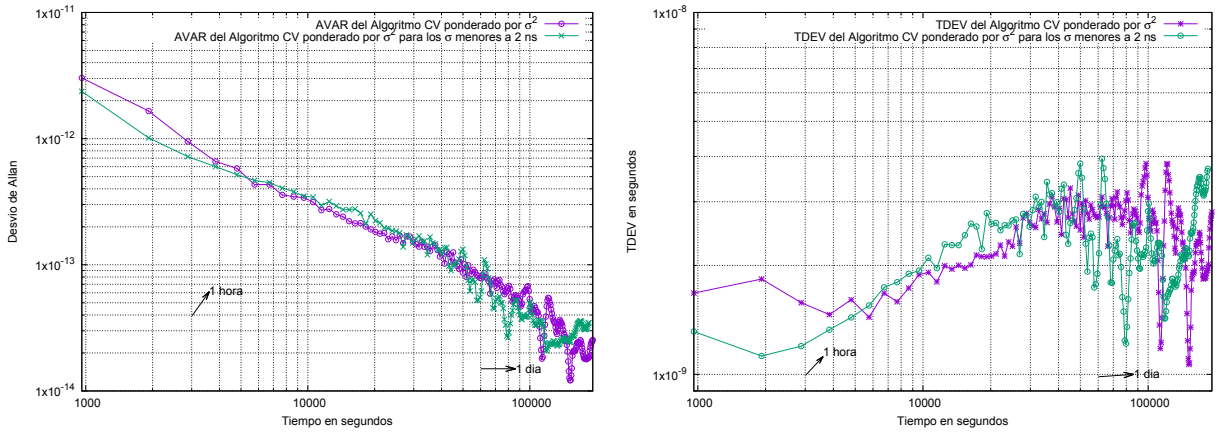


Figura 3.14. *Izquierda*: Desvío de Allan $\sigma(\tau)$ como función del tiempo de promediado τ para INTI vs IGN. *Derecha*: Estabilidad Temporal ponderada por σ^2 INTI vs IGN.

3.6. Técnica de CV ponderada por Elevación del Satélite

A partir de lo hallado mediante la técnica de CV, procedemos otorgándole más peso a aquellas medidas que tienen mayor elevación, i.e. para aquellos satélites que al momento de estar en CV se hallen más cerca del cénit.

Entonces para hallar una medida para cada época previamente definimos:

$$y(i) = (EL(Lab1)_i + EL(Lab2)_i)/2 \tag{3.7}$$

Donde, $y(i)$ es el promedio simple de las elevaciones vistas para un satélite en CV en la misma época.

Los pesos por elevación (P_{el}) estarán dados por:

$$P_{el}(i) = \frac{y(i)}{\sum_{i=1}^{n} y(i)} \tag{3.8}$$

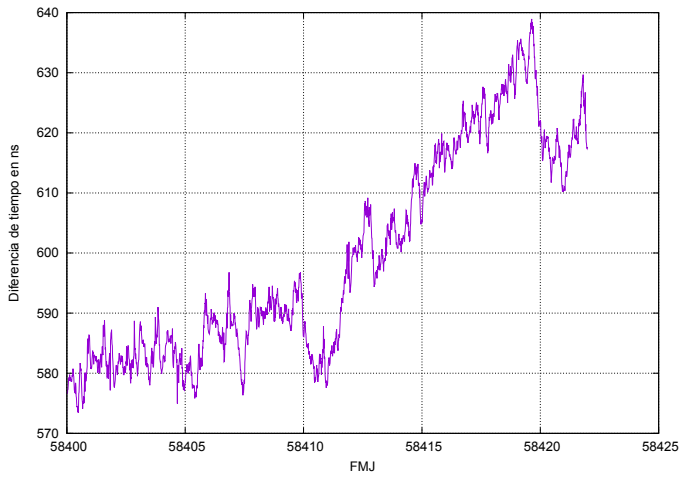
El promedio ponderado por elevación para cada época ($\bar{X}_{el,t}$), será:

$$\bar{X}_{el,t} = \sum_{i=1}^{n} [REFGPS(Lab1)_{SV_{i,t}} - REFGPS(Lab2)_{SV_{i,t}}] \cdot P_{el}(i) \tag{3.9}$$

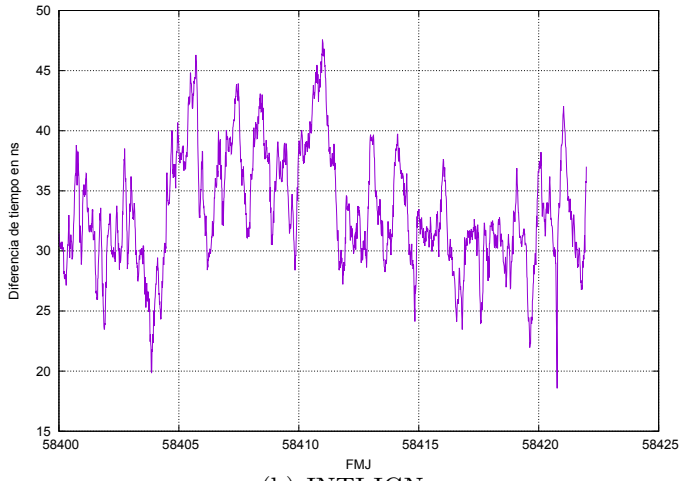
Análisis usando la Varianza de Allan y la Estabilidad Temporal (TDEV)

Para cuantificar el ruido se utiliza la Varianza de Allan y para obtener información acerca del ruido entre los enlaces usamos el TDEV.

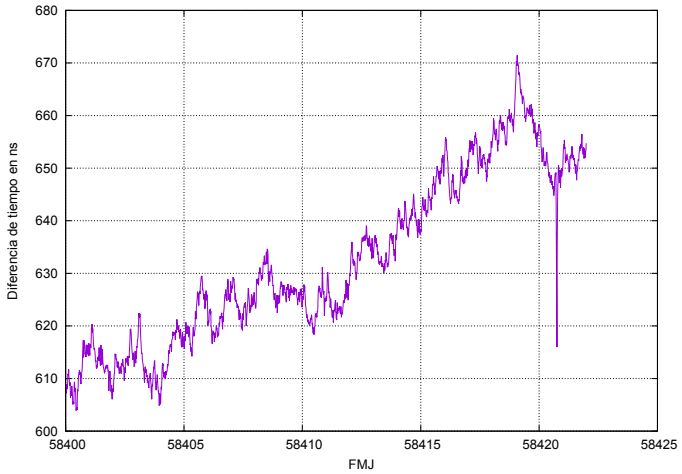
Para el caso AGGO-INTI (ver fig. 3.16 derecha), se presenta una mejora a tiempos cortos, $\tau < 1$ día de casi un factor dos (vemos que el algoritmo CV ponderado por elevación vale un poco menos de 7×10^{-8} cuando con el algoritmo CV sin ponderar estaba en un aproximadamente en $9{,}5 \times 10^{-8}$).
Para el caso INTI-IGN (ver fig. 3.17) mejora la relación ruido para $\tau < 1$ hora y para tiempos mayores se encuentra o por debajo o dentro de los parámetros de ruido del algoritmo CV sin ponderar.
Para el caso AGGO-INTI (ver fig. 3.18) se consigue una mejora en los niveles de ruido para $\tau < 1$ hora y se consigue que los niveles de ruido estén en el orden de los niveles de ruidos hallados para el algoritmo CV sin ponderar.



(a) AGGO-INTI



(b) INTI-IGN



(c) AGGO-IGN

Figura 3.15. Técnica CV ponderada por la Elevación del satélite

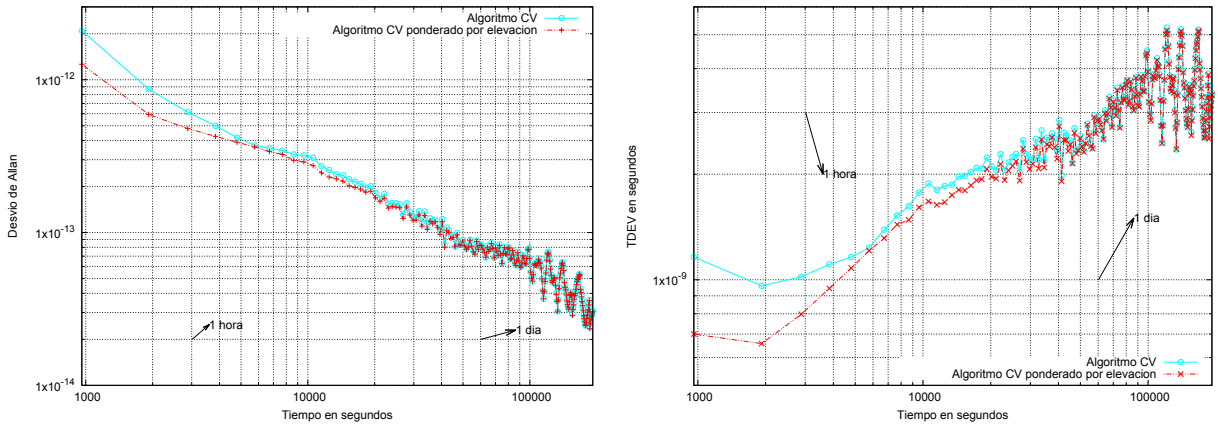


Figura 3.16. *Izquierda*: Comparación mediante AVAR para Algoritmo CV simple y ponderado por elevación del satélite para AGGO vs INTI. *Derecha*: Comparación mediante TDEV para Algoritmo CV simple y Ponderado por elevación del satélite para AGGO vs INTI.

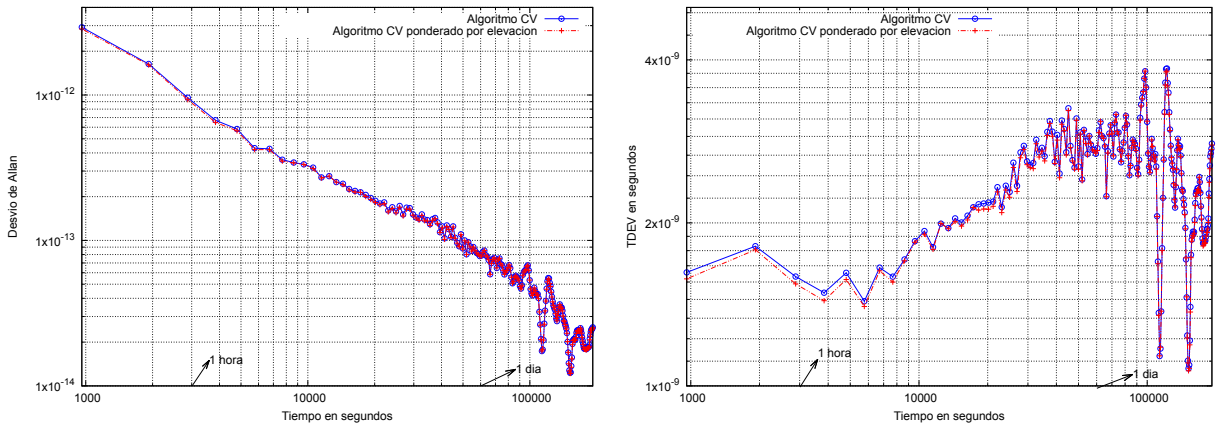


Figura 3.17. *Izquierda*: Comparación mediante AVAR para Algoritmo CV simple y ponderado por elevación del satélite para INTI vs IGN. *Derecha*: Comparación mediante TDEV para Algoritmo CV simple y Ponderado por elevación del satélite para INTI vs IGN.

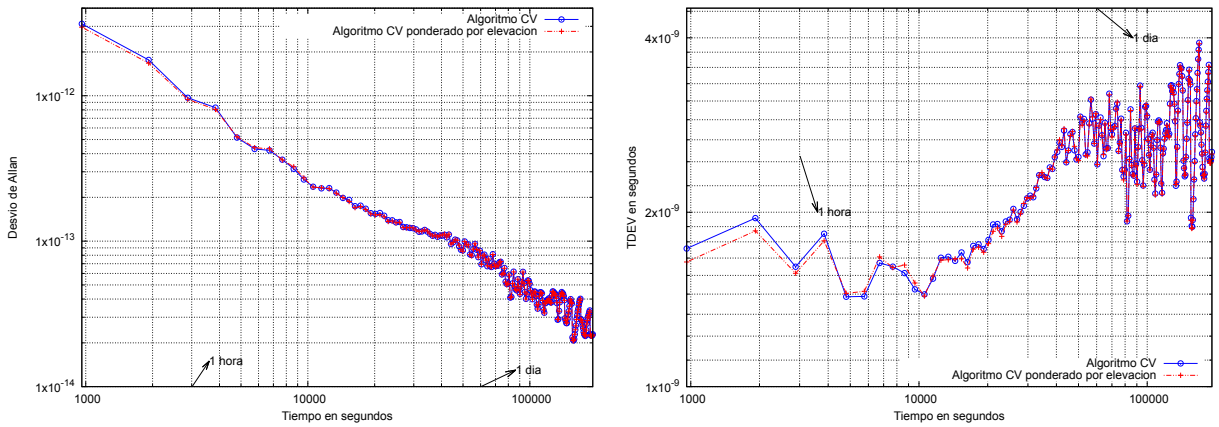


Figura 3.18. *Izquierda*: Comparación mediante AVAR para Algoritmo CV simple y ponderado por elevación del satélite para AGGO vs IGN . *Derecha*: Comparación mediante TDEV para Algoritmo CV simple y Ponderado por elevación del satélite para AGGO vs IGN.

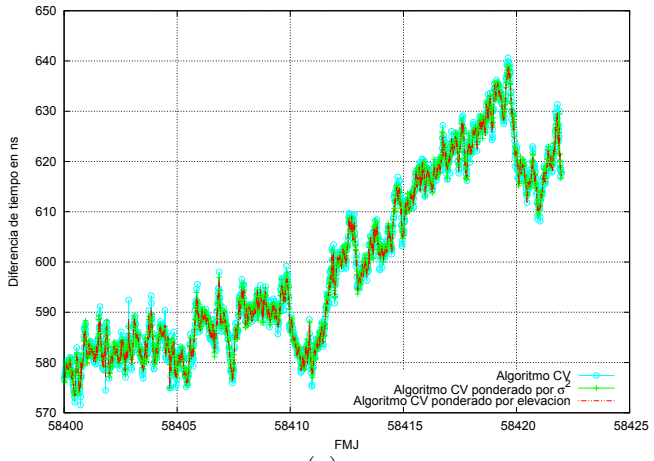
3.7. Comparación de las distintas ponderaciones

En los siguientes gráficos vemos los distintos criterios usados en un mismo gráfico para cada par de laboratorios.

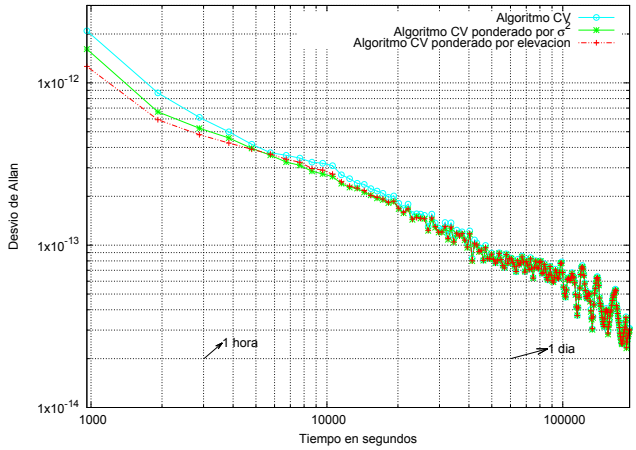
Se procedió a cuantificar los niveles de ruido de la misma forma, por medio del desvío de Allan.

Calculamos la estabilidad temporal de los distintos promedios, mediante la ecuación 2.11 definida previamente. El TDEV nos da información acerca del ruido del enlace entre los relojes.

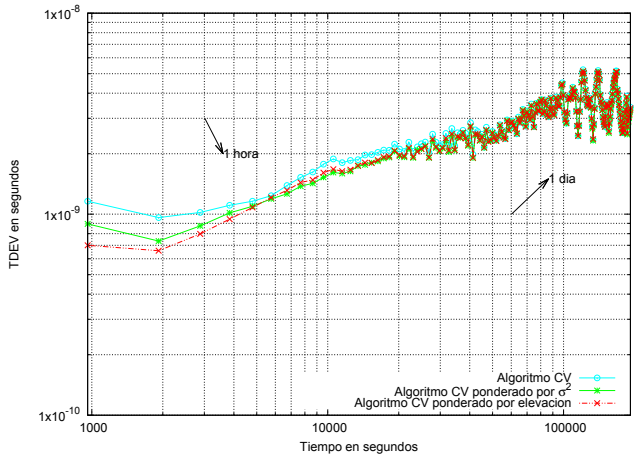
Podemos ver que el promedio ponderado por elevación del satélite es el que más reduce los niveles de ruido a tiempos cortos ($\tau < 1$ día).



(a)

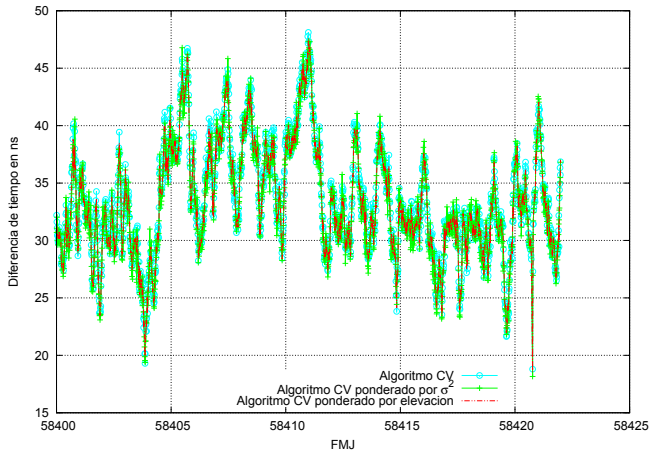


(b)

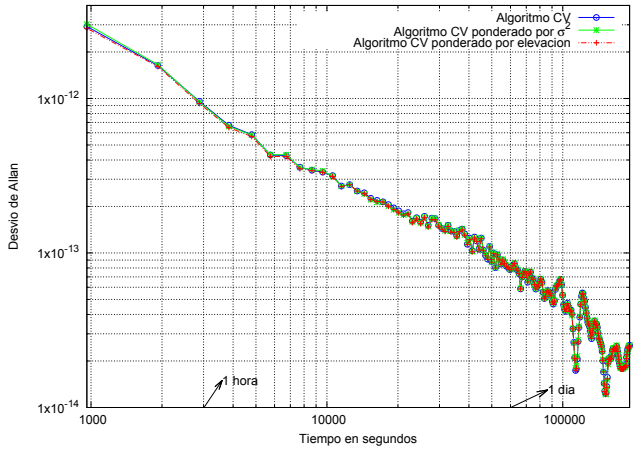


(c)

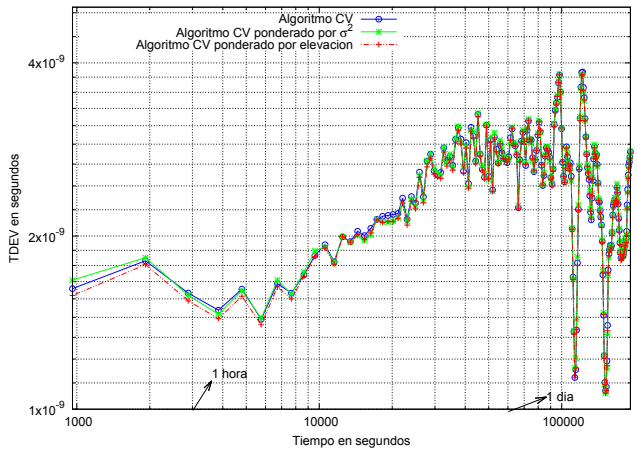
Figura 3.19. (a) Comparación de las distintas ponderaciones realizadas para AGGO-INTI, (b) Desvío de Allan $\sigma(\tau)$ como función del tiempo promediado τ para AGGO vs INTI, (c) Estabilidad Temporal de los distintas ponderaciones para AGGO vs INTI



(a)

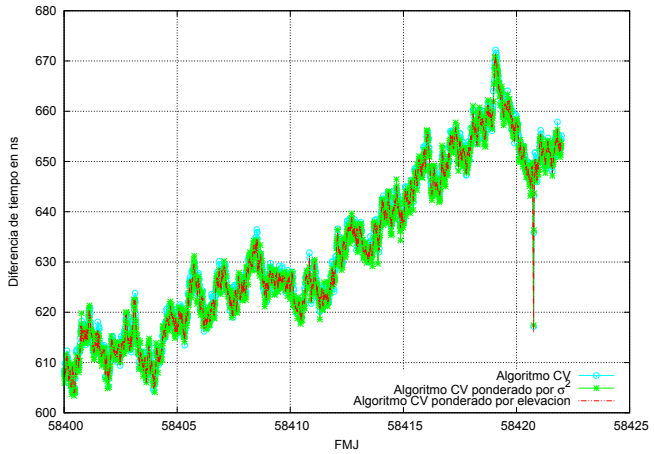


(b)

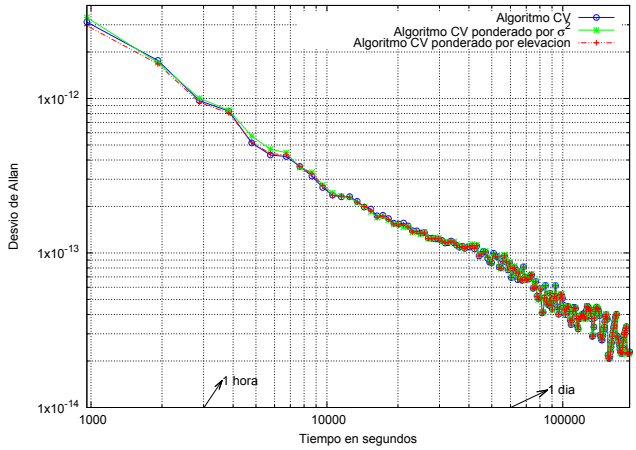


(c)

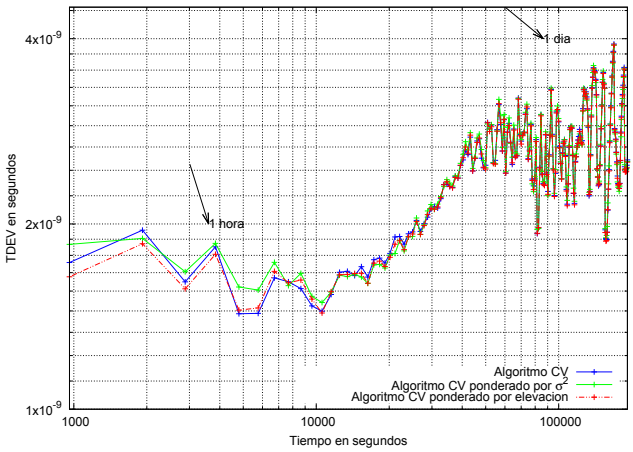
Figura 3.20. (a) Comparación de las distintas ponderaciones realizadas para INTI-IGN, (b) Desvío de Allan $\sigma(\tau)$ como función del tiempo promediado τ para INTI-IGN, (c) Estabilidad Temporal de los distintas ponderaciones para INTI-IGN



(a)



(b)



(c)

Figura 3.21. (a) Comparación de las distintas ponderaciones realizadas para AGGO vs IGN, (b) Desvío de Allan $\sigma(\tau)$ como función del tiempo promediado τ para AGGO vs IGN, (c) Estabilidad Temporal de los distintas ponderaciones para AGGO vs IGN

Capítulo 4

Conclusiones

Se tomaron los datos de los tres laboratorios, AGGO, INTI e IGN y se compararon sus medidas mediante la Técnica de CV. En principio se aplicó el algoritmo a las diferencias de tiempo entre pares de laboratorios como se vio en la sección anterior. Se procedió a realizar una validación del método usando los datos proporcionados a través de UTCr.

Luego se plantearon distintas técnicas de optimización del método, en las cuales se implementó el algoritmo CV con una ponderación. Con esto se pretende hallar un mecanismo eficaz que logré reducir el ruido. Se usó la Varianza de Allan, para cuantificar la estabilidad de los relojes y el TDEV para estimar el ruido en el enlace. A partir de estas consideraciones, se encontró que la ponderación por elevación es aquella que conduce a los mejores resultados, puesto que permite reducir los niveles de ruido en la comparación de los relojes o mantenerse dentro del orden de ruido. Se vio a través del TDEV que se logra mejorar el nivel de ruido en el link por medio de esta ponderación.

La mejora apunta a reducir el ruido a corto plazo (algunos minutos, quizás horas), por eso no es necesario extender los tiempos de promediación mucho más allá de la cantidad muestreada.

Por otro lado el ruido correspondiente de los enlaces a los relojes (análisis vía TDEV) es del orden de los nanosegundos. Considerando esto último podemos pensar que el criterio planteado con la ponderación por varianza con umbral de $\sigma \leq 2$ ns no tuvo grandes mejoras debido a que se estaba trabajando casi en el mismo orden.

Se logra validar un método de comparación remota entre los distintos laboratorios que contribuye al establecimiento de una Red Nacional de Tiempo y Frecuencia.

Podemos concluir que la comparación usando el algoritmo CV ponderado por varianza

no arroja grandes mejoras para los casos que incluyen a IGN, puesto que los desvíos propios de las medidas de IGN tienen mucha amplitud. Este criterio podría emplearse cuando las medidas de los laboratorios en comparación tengan medidas en el mismo rango de desvíos estándares.

Al comparar las coordenadas de todas las estaciones se verificó que estén en el marco del ITRF dónde se proporcionan las coordenadas de los satélites.

El hecho de que los laboratorios se encuentren cerca geográficamente nos proveé la facilidad de tener varias medidas en CV por época, lo cual nos permite mejorar el algoritmo CV agregando un criterio.

Por otro lado, a través del presente trabajo se contribuye a ver el comportamiento del reloj de AGGO, hecho importante considerando que las muestras consideradas son del 2018, luego de que dicho laboratorio tuviese aproximadamente tres años de funcionamiento. Poder conocer el comportamiento del reloj en AGGO es importante, debido a la relevancia del laboratorio en la región, puesto que en la escala global, contribuye al Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF), que es la materialización práctica del GGRF (Marco de Referencia Geodésico Global). Y en las escalas regional y nacional, hace lo propio con el Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS) y con las Posiciones Geodésicas Argentinas (POSGAR).

A futuro

El próximo paso consiste en implementar este algoritmo de forma tal que los cálculos se realicen periódicamente en forma automática.

Una vez que el proceso de comparación remota se encuentre automatizado, se computará una escala de tiempo con los relojes participantes.

Bibliografía

[1] Bernard Guinot. Scales of time. *Metrologia*, 31(6):431, 1995.

[2] Judah Levine. Invited review article: The statistical modeling of atomic clocks and the design of time scales. *Review of Scientific Instruments*, 83(2):020901, 2012.

[3] EF Arias. Atomic time scales for the 21st century. *RevMexAA (Serie de Conferencias)*, 43:29–34, 2013.

[4] José Mauricio López-Romero, Michael A Lombardi, Nélida Diaz-Muñoz, and Eduardo de Carlos-Lopez. Sim time scale. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 62(12):3343–3350, 2013.

[5] Pierre Uhrich, David Valat, and Michel Abgrall. Steering of the french time scale ta (f) towards the lne-syrte primary frequency standards. *Metrologia*, 45(6):S42, 2008.

[6] Demetrios Matsakis. Time and frequency activities at the us naval observatory. *International Journal of Navigation and Observation*, 2008, 2008.

[7] Judah Levine. Introduction to time and frequency metrology. *Review of scientific instruments*, 70(6):2567–2596, 1999.

[8] Pablo de Vicente Abad. La medida del tiempo. *Anuario del Observatorio Astronómico de Madrid*, 1:374–401, 2011.

[9] Fritz Riehle. *Frequency standards: basics and applications*. John Wiley & Sons, 2006.

[10] David W Allan and Marc Abbott Weiss. Accurate time and frequency transfer during common-view of a gps satellite. In *34th Annual Symposium on Frequency Control*, pages 334–346. IEEE, 1980.

[11] Marc A Weiss, Gerard Petit, and Zhiheng Jiang. A comparison of gps common-view time transfer to all-in-view. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, 2005.*, pages 5–pp. IEEE, 2005.

[12] Łukasz Śliwczyński, Przemysław Krehlik, Albin Czubla, Łukasz Buczek, and Marcin Lipiński. Dissemination of time and rf frequency via a stabilized fibre optic link over a distance of 420 km. *Metrologia*, 50(2):133, 2013.

[13] Per Olof Hedekvist, Sven-Christian Ebenhag, Mohammed Yasin, Sulaiman Wadi Harun, Hamzah Arof, Statens Provningsanstalt, and SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut. *Time and frequency transfer in optical fibers*. Citeseer, 2012.

[14] Stefan Droste, F Ozimek, Th Udem, Katharina Predehl, TW Hänsch, H Schnatz, G Grosche, and Ronald Holzwarth. Optical-frequency transfer over a single-span 1840 km fiber link. *Physical review letters*, 111(11):110801, 2013.

[15] Katharina Predehl, G Grosche, SMF Raupach, Stefan Droste, O Terra, Janis Alnis, Th Legero, TW Hänsch, Th Udem, Ronald Holzwarth, et al. A 920-kilometer optical fiber link for frequency metrology at the 19th decimal place. *Science*, 336(6080):441–444, 2012.

[16] Gary Price. A skeptic's review of the new si. *Accreditation and quality assurance*, 16(3):121–132, 2011.

[17] Tara Cubel Liebisch, Jörn Stenger, and Joachim Ullrich. Understanding the revised si: Background, consequences, and perspectives. *Annalen der Physik*, 531(5):1800339, 2019.

[18] R Costa, D Orgiazzi, V Pettiti, I Sesia, and P Tavella. Gps common view data processing algorithm. *IEN Technical Repport*, 2004.

[19] Alfred Kleusberg and Peter JG Teunissen. Gps for geodesy. 1996.

[20] Gustavo Baume. La esfera celeste. *Series: Libros de Cátedra*, 2014.

[21] DW Allan. Receiver software. *metrologia*, 31:69–19, 1994.

[22] DA Luna, DN Pérez, F Palacios, and A Cifuentes. Análisis de estabilidad en relojes atómicos por medio de la técnica vista común gps. In *ANALES AFA*, volume 27, 2016.

[23] David W Allan and James A Barnes. A modified allan variance with increased oscillator characterization ability. In *Proceedings of the 35th Annual Frequency Control Symposium*, volume 5, pages 470–475, 1981.

[24] William J Riley. Handbook of frequency stability analysis. 2008.