

# Impacto de una mejor distribución de estaciones en las sesiones de VLBI geodésico

M.E. Gomez<sup>1,3</sup> & L.I. Fernández<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina*

<sup>2</sup> *Laboratorio MAGLIA, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina*

<sup>3</sup> *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina*

Contacto / megomez@fcaglp.unlp.edu.ar

**Resumen** / El *Global Geodetic Observing System* (GGOS) tiene por objetivo el monitoreo de los cambios globales del sistema terrestre. Dentro de éste, VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*) juega un rol indiscutible, siendo la única técnica capaz no sólo de materializar el ICRS (*International Celestial Reference System*) sino la única que por sí sola permite estimar los parámetros de orientación terrestre (EOP, del inglés *Earth Orientation Parameters*). Sin embargo, la calidad de los productos obtenidos con VLBI está condicionada por la carencia de antenas en el hemisferio sur. En este trabajo se presenta un análisis sobre la distribución de estaciones en dos tipos de sesiones del IVS (*International VLBI Service for Geodesy and Astrometry*): R1 (dedicadas a la obtención de los EOP) y las más recientes VGOS (*VLBI Global Observing System*), destinadas a probar el funcionamiento de esta nueva tecnología. Para esta aplicación, se utilizó VieSched++ con el fin de obtener múltiples configuraciones ("schedules"), de más de 1000 simulaciones por cada uno. Cada *schedule* representa una configuración específica de antenas con distintos pesos relacionados con la cobertura del cielo, el tiempo de ocio de los telescopios, la duración de la observación, entre otros. A partir del análisis de los errores medios y la repetitividad, puede verse que la incorporación de antenas VGOS en el hemisferio sur y una mejor distribución de las estaciones en ambos hemisferios, mejora la estimación de los EOP.

**Abstract** / The Global Geodetic Observing System (GGOS) aims to monitor global changes of the Earth system. Within this, VLBI (Very Long Baseline Interferometry) plays an undeniable role, being the only technique capable not only of materializing the ICRS (International Celestial Reference System) but also the only one that allows estimating the Earth Orientation Parameters (EOP) by itself. However, the quality of the products obtained with VLBI is conditioned by the lack of antennas in the southern hemisphere. In this work we present an analysis on the distribution of stations in two types of IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry) sessions: R1 (dedicated to obtaining EOPs) and the most recent VGOS (VLBI Global Observing System), designed to test the operation of this new technology. For this application, VieSched++ was used in order to obtain multiple configurations ("schedules") with more than 1000 simulations for each one. Each schedule represents a specific configuration of antennas and different weights related to sky coverage, telescope iddle time, observation duration, among others. From the analysis of the mean errors and the repeatability, it can be seen that the addition of VGOS antennas in the southern hemisphere and a better distribution of the stations in both hemispheres, improves the estimation of the EOP.

*Keywords* / astrometry — reference systems — techniques: interferometric

## 1. Introducción

El programa de observación del IVS (*International VLBI Service for Geodesy and Astrometry*) está conformado por sesiones cuyo diseño depende del objetivo e involucra redes de antenas VLBI de manera tal que 2 antenas o más, observen 2 o más radiofuentes en simultáneo. Esto se conoce como *subnetting*. Por cuestiones principalmente económicas, debido al alto costo de los equipos, la mayor parte de estas antenas se concentran en el hemisferio norte. Eso ocasiona que, a fin de compensar y sumar mayor redundancia en las observaciones, todas las sesiones presenten cierto desbalance en la geometría. Además, las pocas antenas del hemisferio sur que participan de estas sesiones no siempre trabajan juntas.

Tradicionalmente las sesiones VLBI involucraban ra-

dio antenas trabajando en las bandas de frecuencia S/X. Sin embargo desde hace casi 10 años, el IVS ha avanzado en la implementación del VGOS (*VLBI Global Observing System*). Como un resumen de las mejoras introducidas podemos mencionar la inclusión de antenas mucho más rápidas y pequeñas (12-13 metros de diámetro máximo) con electrónica digital, diseñadas para observación continua y control autónomo, trabajando en ancho de banda incrementado (2-14 GHz) (Petrachenko et al. (2012), Nothnaguel et al. (2016)). Sin embargo, en la actualidad, las sesiones VGOS solo incluyen 9 antenas ubicadas en el hemisferio norte evidenciando aun la falta de geometría. Este problema tuvo abordajes previos como el de Hase & Pedreros (2014), quienes plantearon mediante triangulación de Delauney, cuál era la configuración de estaciones más homogénea. En el trabajo de Schartner et al. (2020) se plantearon distintas redes

de estaciones VGOS (formadas por 6, 12 y 18 estaciones respectivamente) a las que se les adicionaba una estación mas según los parámetros resultantes de una simulación optimizada aplicando el software VieSched++ (Schartner & Böhm, 2019).

En este trabajo se presenta un análisis sobre la distribución de estaciones para 2 tipos de sesiones del IVS: R1 (dedicadas a la obtención de los EOP) y las mas recientes VGOS, destinadas a probar el funcionamiento de esta nueva tecnología. El objetivo es probar que el diseño de las sesiones de observación VLBI puede optimizarse incorporando antenas del hemisferio sur y manteniendo (incluso disminuyendo) el número de estaciones a fin de lograr un mejor balance en la geometría de la red. Para ello, utilizamos el software VieSched++ y presentamos un estudio sobre posibles sesiones alternativas a las R1 y VGOS actuales haciendo uso de estaciones VLBI australes disponibles, o proponiendo nuevas estaciones VLBI en sitios con la infraestructura existente para permitir la instalación de una antena con las características requeridas. Esta estrategia está motivada en el avance de la implementación de VGOS, razón por la cual es razonable que convivan las estaciones VGOS junto con las de tecnología S/X.

Tomando en cuenta lo anterior, nuestro trabajo analiza los resultados de una simulación que incluye una mayor cantidad de estaciones en el hemisferio sur e incorpora posibles estaciones VGOS en Argentina y otros puntos en Sudamérica, tal como lo sugiere el trabajo de Schartner et al. (2020).

A diferencia de la estrategia de Schartner et al. (2020) usando el mismo software, nuestro objetivo consiste en analizar la distribución de estaciones VLBI más homogénea y equilibrada entre ambos hemisferios para garantizar la mejor calidad en la determinación de los EOP. Adicionalmente, exigimos un compromiso entre el número de estaciones y su distribución. Sabiendo que en el futuro se planea que las R1 no superen las 12 estaciones (Behrend & Armstrong, 2021) y condicionados por la carencia de antenas VLBI en el hemisferio sur, nos limitaremos a escenarios que nunca superen las 14 estaciones.

## 2. Metodología

La primera etapa de una observación VLBI en modo geodésico, consiste en el diseño de la sesión o “*scheduling*”. De éste depende el éxito de la observación ya que tiene en cuenta el equipamiento, la frecuencia, el tamaño de las antenas, la distribución, el número de radiofuentes por sesión, su cobertura en el cielo, la duración de cada scan (varias antenas observando una radiofuente), los parámetros buscados y muchos factores más. El resultado del *scheduling* son dos archivos: uno que contiene la lista de radiofuentes y las antenas que intervendrán en cada scan, cada uno con una marca temporal, y otro que consiste en notas para el operador.

En el sitio web del IVS se pueden encontrar todas las sesiones anuales junto a las antenas que participan en cada una. En lo que sigue no sólo utilizaremos estaciones reales sino también estaciones simuladas en América del Sur.

Entre todos los software dedicados, usamos VieSched++ desarrollado por la Universidad Tecnológica de Viena dado que nos permite elegir la mejor solución entre varias (*multi-scheduling*).

Siguiendo el procedimiento y los valores de referencia usados por Schartner et al. (2020), y con el fin de hallar la mejor solución en términos estadísticos, utilizamos la herramienta de *multi-scheduling* imponiendo *subnetting* y un mínimo de 3 scans por radiofuente; variando los pesos asignados a la cobertura del cielo, el número de observaciones, la duración y el tiempo de ocio de las antenas. Esto dió lugar a un máximo de 54 *schedules* y 1000 simulaciones de Monte Carlo por cada uno.

A la hora de realizar el *scheduling*, ambos tipos de sesiones se trataron de manera diferente pero en ambos casos se definieron sesiones de referencia. Para las R1 se analizaron 2 sesiones y para VGOS se tomó como referencia la VGOS-O1063, tal como se explicará a continuación.

### 2.1. Sesiones R1

Con el fin de tener un resultado de referencia para comparar nuestras simulaciones, se eligieron dos sesiones IVS del año 2020: R1929 (13 estaciones) y R1932 (14 estaciones)\*. La elección tiene en cuenta la mejor distribución de estaciones en los últimos años. De las dos sesiones, se analizó cual de ellas presentaba la mejor solución en términos de EOP. Para esto, se corrieron todos los *scheduling* posibles a partir de variar los parámetros tal como se indicó más arriba.

El análisis de ambas soluciones arrojó que los menores errores en la determinación de EOP se obtienen con la sesión R1932 (Tabla 1). Ésta será entonces la sesión de referencia para estudiar los siguientes 4 casos simulados (D1 a D4) en los que hemos variado el listado de antenas que participan. Nótese que la Tabla 1 muestra las estaciones participantes de cada sesión usando el código de 2 letras del IVS \*\*.

La sesión D1 consta de estaciones reales mientras que en las D2, D3 y D4 se incorporaron 3 estaciones ficticias a las que les hemos asignado nuestro propio código de 2 letras: CART (Ct, en San Juan) en la que le hemos simulado un equipamiento en banda S/X (similar al de BADARY) y una antena de 40 m de diámetro, DESPVG (Dv, ubicada en Tierra del Fuego) y GALAVG (Gv, ubicada en Galápagos), las dos últimas con un equipamiento con tecnología VGOS igual al de la estación VLBI en ISHIOKA (Japón). Esto se ha pensado así ya que de existir en un futuro, lo más probable es que acompañen a los desarrollos tecnológicos del momento. Esta información fue incorporada a los datos de entrada del software.

### 2.2. Sesiones VGOS

Para el caso de las sesiones VGOS, un estudio de similares características al mencionado para las R1, nos

\*<https://ivscc.gsfc.nasa.gov/sessions/2020/>

\*\*<https://www.atnf.csiro.au/vlbi/dokuwiki/doku.php/difx/difx2mark4/stationcodes>

Tabla 1: Resultado estadístico (repetitividad) obtenido para las sesiones R1 y VGOS. Unidades:  $\mu s$  (microsegundos de arco) y  $\mu s$  (microsegundos), según corresponda. El score va de 0 a 1. A valor más alto, mejor solución.

Sesión	Nro. estaciones	score	Nro. observaciones	$X_p$ $\mu s$	$Y_p$ $\mu s$	UT1 $\mu s$	$Nut_x$ $\mu s$	$Nut_y$ $\mu s$
R1929	13	0.93	10265	50.4	52.3	3.5	27.0	31.6
R1932	14	1	10659	40.0	47.9	3.1	26.6	28.9
VO-01063	9	1	26350	56.4	60.8	1.2	29.9	32.1

Tabla 2: Análisis estadístico de las sesiones D1 a D4 y V1 a V3 con respecto a la sesión de referencia correspondiente. El nombre de las estaciones se indica con el código de 2 letras.

Sched.	Nro. estaciones	Ratios con respecto a la mejor solución					Estaciones participantes
		$R_{xp}$	$R_{yp}$	$R_{UT1}$	$R_{Nut_x}$	$R_{Nut_y}$	
D1	12	1.22	1.27	1.22	1.08	1.20	Ag, Ft, Ht, Kk, Ny, Ww, Wf, Yg, Yb, Hb, Is, Sv
D2	13	1.45	1.47	1.21	1.14	1.20	Ag, Ft, Ht, Kk, Ny, Ww, Wf, Yg, Yb, Hb, Is, Sv, Ct
D3	14	1.63	1.69	1.44	1.22	1.52	Ag, Ft, Ht, Kk, Ny, Ww, Wf, Yg, Yb, Hb, Is, Sv, Ct, Dv
D4	13	1.32	1.37	1.45	1.13	1.30	Ag, Ft, Ht, Kk, Ny, Ww, Wf, Yg, Yb, Hb, Is, Sv, Gv
V1	13	3.49	3.54	1.39	2.20	2.34	Av, Ht, Kk, Wf, Yg, Hb, Is, Gs, Mg, Oe, Ow, Yj, Ws
V2	10	3.95	4.00	1.39	2.13	2.29	Av, Ht, Kk, Wf, Hb, Is, Mg, Oe, Yj, Yg
V3	11	3.91	3.69	1.17	2.13	2.19	Av, Kk, Ht, Hb, Gv, Yj, Is, Mg, Oe, Wf, Yg

permitió obtener los estadísticos también publicados en la Tabla 1. En este caso, la sesión de referencia es la VGOS-O1063, con 9 estaciones, al igual que todas las sesiones VGOS que tienen lugar actualmente\*\*\*. A posteriori diseñamos las sesiones V1 a V3. En estas hemos incluido sólo las estaciones con tecnología VGOS, algunas de ellas mencionadas en las sesiones R1. En esta instancia hemos sumado a AGGO, asumiendo que cuenta con un equipamiento de la misma tecnología y le hemos asignado el código Av. Al igual que antes, para las antenas simuladas hemos asumido un equipamiento igual al de la estación ISHIOKA en Japón. En cuanto al *scheduling* de sesiones VGOS, a excepción de la sesión de referencia, se han agregado 23 radiofuentes de definición del ICRF3 (*International Celestial Reference Frame 3rd realization*) distribuidas en el hemisferio sur, ya que estas sesiones no utilizan el mismo catálogo que las R1 o R4 y las radiofuentes que se incluyen normalmente no cubren todo el hemisferio sur. En este caso, al disponer de antenas más rápidas, se cambió el tiempo de observación de 60 s a 30 s.

### 3. Resultados

La posibilidad de contar con múltiples *schedules* por sesión, permite analizar la repetitividad, el cual es un parámetro más robusto que el error medio. Los resultados de este análisis indican que es posible hallar soluciones R1 que superen a la de referencia sin necesidad de sumar más estaciones. Esto se puede apreciar en la Tabla 2, en la que se presenta un resumen de las soluciones y el ratio en relación a la solución de referencia, es decir,  $rms_{ref}/rms_{sol}$  de manera que a mejor solución,

\*\*\*<https://ivsc.gsfc.nasa.gov/sessions/2021/vo1063/>

mayor ratio.

En el caso de las sesiones VGOS, la mejora en la determinación de los EOP supera el factor 3 (Tabla 2) aun después de agregar solo 1 estación en el hemisferio sur. La diferencia radica en la distribución de las mismas.

### 4. Conclusiones

Los resultados preliminares de este estudio nos muestran que una mayor cantidad de estaciones no necesariamente mejora la estadística de los resultados, sino que debe hallarse un compromiso entre el número de estaciones y la distribución. Como es de esperar, en ambos tipos de sesiones (S/X y VGOS) se observa una mejora en la determinación de los EOP a medida que mejora la geometría de la red. En el caso de las R1 esto va desde un factor 1.2 a 1.6. En el caso de las estaciones VGOS, esta mejora es mucho mayor, superando el factor 3. Debe notarse que exceptuando la situación de la estación GALAVG y DESPVG, el resto de las estaciones propuestas en el hemisferio sur, ya existen o su construcción, o instalación de nueva tecnología es, al menos, viable. Tal es el caso de la posibilidad de contar con una antena VGOS en AGGO.

### Referencias

- Behrend D., Armstrong A., 2021, IVS Newsletter, 60  
Hase H., Pedreros F., 2014, J. Geod., 88, 989  
Nothnagel A., et al., 2016, J. Geod., 91, 711  
Petrachenko W., et al., 2012, *Geodesy for Planet Earth*, 999–1005, Springer  
Schartner M., Böhm J., 2019, PASP, 131, 084501  
Schartner M., Böhm J., Nothnagel A., 2020, Earth, Planets and Space, 72, 1