

# Meteorología GNSS y Climatología espacial: métodos y aplicaciones.

Amalia Meza y María Paula Natali

Responsables docentes del seminario de posgrado

## 1 Objetivos

El alumno egresado de las carreras de Astronomía, Geofísica Meteorología, así como también carreras a fines; estaría en condiciones de cursar esta materia. El objetivo fundamental es que el graduado adquiera los conocimientos básicos de la meteorología GNSS y aplicaciones en la aeronomía. Para reforzar este objetivo es que la cursada culminará con un trabajo práctico según el perfil del alumno. Este puede estar orientado a la obtención del vapor de agua integrado en un contexto meteorológico determinado (sequía, abundantes lluvias, tipo climático diferentes (basados en la definición de Koppen-Geiger) entre otros aspectos) u orientado a la medición de contenido electrónico en un contexto de evento anómalo de gran magnitud (tormenta geomagnética, anomalía ionosférica estacional, etc) y de perturbación moderada o tranquila. Este tipo de trabajos tomará como referencia publicaciones actualizadas entre las que se encuentran numerosas de las nuestras (cito en CV de ambos docentes responsables).

## 2 Carga Horaria

La materia es anual con una carga horaria de 3 horas por semana en clases teóricas y 4 clases en la segunda mitad del año en explicación práctica de dos horas cada una. Esto hace un total de 116 horas de clases en las cuales estaremos presentes.

## 3 Evaluación

El alumno deberá asistir a un mínimo de 70 % de las clases. La nota del final será el promedio obtenido entre el trabajo práctico final, las dos exposiciones orales de temas específicos y el examen final de la materia. El examen final será por sorteo de tema, el cual consistirá en el desarrollo de un tópico de la materia seleccionado 48 horas antes (de un total de cinco temas seleccionados por los docentes a cargo y presentados por nota en sobre cerrado a la secretaria de Posgrado).



#### 4 Fundamentación y Plan de la materia

Los sistemas satelitales globales de navegación (GNSS, Global Navigation Satellite System) se han convertido en una herramienta indispensable para las aplicaciones en el posicionamiento y la navegación; siendo de enorme utilidad en la realización de los sistemas de referencia terrestres y estudios geodinámicos.

Los sistemas GNSS, están actualmente constituidos por el sistema de posicionamiento global (GPS) de los EE. UU., GLONASS de Rusia, Galileo de la Unión Europea y Beidou de China (también llamado COMPASS), así como varios sistemas regionales de navegación por satélite. Estos sistemas trabajan en forma continua y muy precisa, operando en las microondas (banda L) sin importar el tipo de clima y casi en tiempo real con señales que atraviesan la atmósfera terrestre. Estas características que definen el comportamiento GNSS traen como consecuencia una serie de aplicaciones y potenciales de uso que son cada vez más amplios ([1], [2]).

Cada satélite GNSS transmite continuamente señales en longitud de onda de radio en dos o más frecuencias en la banda L (1–2 GHz, en una longitud de onda cercana a los 20 cm). Las señales directas se utilizan para navegación, posicionamiento y diseminación del tiempo. Un aspecto importante a tener en cuenta es que, debido a la refracción atmosférica, las señales GNSS se propagan a través de la atmósfera de la Tierra a lo largo de una trayectoria ligeramente curva y con velocidades ligeramente retardadas. Durante mucho tiempo, este retraso de las señales GNSS en la troposfera y la ionosfera se consideró sólo una fuente de error, y ahora es utilizado para determinar parámetros de atmósfera neutra e ionosféricos. Las observaciones terrestres de GNSS junto con GNSS Radio Occultation (RO) pueden proporcionar información del vapor de agua troposférico, la presión, la temperatura, los parámetros de la tropopausa, el contenido total de electrones ionosféricos (TEC) y los perfiles de densidad de electrones, que son consistentes con las observaciones de instrumentos tradicionales con precisiones comparables (p. Ej. [3], [4]; [5]).

El objetivo de este curso es entender como estos retardos pueden ser utilizados para realizar aportes a la Meteorología Geodésica y la Climatología Espacial. A lo largo de las últimas dos décadas, una gran cantidad de estaciones GNSS permanentes fueron instaladas en todo el mundo con objetivos primariamente geodésicos. Sin embargo, existen redes GNSS operativas en varios lugares del planeta con objetivos meteorológicos entre las primeras se encuentran la red Suominet, EE.UU., <http://www.suominet.ucar.edu/>, ([6]) y la red GASP en Alemania ([7]). Hoy en día existe una gran cantidad de redes distribuidas en todo el mundo con objetivos bien definidos orientados principalmente al mutuo beneficio de la información meteorológica GNSS y modelos de ingestión ([8]). Estas redes asimilan datos y ayudan a la investigación y el modelado en media y gran escala de la baja atmósfera, estudios de fenómenos meteorológicos severos, regímenes de precipitación, clima regional, e hidrología. Numerosos trabajos han mostrado que la meteorología GNSS ofrece mejor distribución espacial, series de observación continua y la puesta en sitio de instrumental más económica que cualquier otra técnica de sensoreamiento remoto utilizada para medir el



contenido de vapor de agua. Por otra parte, esta técnica no está afectada por la lluvia o fuerte nubosidad ([9]; [10]; [11]; [12]). Al mismo tiempo, el contenido de vapor de agua deducido a partir de GNSS está siendo aplicado por varios países como un apoyo en los modelos numéricos de clima desde hace ya algunos años ([13]). Un aspecto que debemos destacar de la medición del vapor de agua es su rol crucial en la predicción y monitoreo climático. Este gas es fundamental en el efecto invernadero y por lo tanto cuantificar su cantidad en la atmósfera es sumamente importante como parámetro del calentamiento global. Hall y Manabe ([14]) encontraron que si se excluía el efecto de vapor de agua en los modelos climáticos teóricos el efecto de calentamiento global se reduciría de 3.38 K a 1.05 K, lo que significaba que el vapor de agua aporta un crecimiento de un factor 3.32. El Geoespacio está constituido por la atmósfera terrestre, la magnetosfera y el espacio donde transitan las emisiones solares que las afectan, como el viento solar (la corona solar en expansión) y las fulguraciones, entre otras. Además, existe un creciente reconocimiento de que las condiciones del medio ambiente (meteorología espacial) impactan directamente sobre la vida de las personas y la infraestructura tecnológica en la que se apoyan gran parte de sus economías. Con esto viene la necesidad de mejorar el conocimiento que la sociedad tiene sobre la Climatología Espacial (Space Weather, SW). Mientras que por un lado el SW es responsable de fenómenos como las auroras boreales por otro lado afecta el desempeño de las aplicaciones de los Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS), cuyo relevancia crece rápidamente para las industrias de la aviación, agricultura de precisión, el desarrollo de vehículos de autoconducción hasta mediciones de tiempo sumamente precisas utilizadas por los teléfonos celulares y las transacciones financieras globales. La creciente dependencia de la humanidad de estos sistemas implica que el clima espacial puede tener enormes y gravosas consecuencias para la sociedad. Y por lo tanto existe una conciencia global de la necesidad de un mejor entendimiento. Schrijve et al. ([15]) delinea las áreas de interés científicas necesarias para avanzar significativamente en nuestra comprensión del clima espacial y de sus consecuencias para la sociedad. Este documento fue encargado por el Committee on Space Research (COSPAR) y International Living with a Star Steering Committee (ILWS). Algunas de las recomendaciones son el modelado basado en observaciones del sistema Sol-Tierra; pronóstico de la estructura magnética de las eyecciones de masa coronal con 12 hs de anticipación; comprensión de la respuesta del geoespacio al viento solar las cuales inducen corrientes geomagnéticas intensas y tormentas ionosféricas, entre otras. Este documento también resalta la mayor cobertura de observaciones y el aumento de la resolución regional del medio ionosfera-termosfera-mesosfera (ITM) lo cual permite generar mapas de contenido total de electrónico (TEC) y mapas de la frecuencia crítica a tiempo real.

## 5 Programa

- Introducción a los Sistemas GNSS



Los sistemas GNSS y su capacidad para estudios atmosféricos. Refractividad atmosférica. Retardos GNSS troposférico. Retardo GNSS ionosférico.

- **Atmósfera neutra** Refractividad de los constituyentes en la atmósfera. Gases de efecto invernadero. Mecanismos del cambio del clima. Higrometría: Definición y Nociones básicas. Diferentes métodos para medir la humedad.
- **Troposfera con GNSS. Teoría y métodos**  
Estimación del retardo troposférico cenital (del inglés ZTD, zenital tropospheric delay) y sus variaciones. Vapor de agua precipitable (IWV) a partir de GNSS. Uso y aplicaciones del IWV.
- **Ionósfera**  
Reseña histórica y técnicas de medición. Fuentes de ionización. Mecanismo de la atmósfera ionizada. Variabilidad ionosférica. Tormentas y subtormentas ionosféricas.
- **Sondeo Ionosférico con GNSS**  
Estimación de los DCB y contenido electrónico total. Modelos ionosféricos 2-D. Modelos ionosféricos 3-D. Tomografía ionosférica.
- **Técnicas de Radio Ocultación (RO) con GNSS**  
Generalidades de la radiocultación. Técnicas de "recuperación o inversión" de parámetros atmosféricos. Estudio de procesos dinámicos usando RO GNSS. Aplicación a la predicción del tiempo. Aplicaciones climáticas. RO aplicado a la ionosfera. Inversión ionosférica. Análisis de los errores. Productos ionosféricos. Aplicaciones ionosféricas de GNSS-RO.
- **Implementación de software a tiempo real**  
Bases para el procesamiento científico con BERNESE para la determinación del retardo troposférico y de modelos ionosféricos. Configuración de una red. Diferentes funciones de mapeo zenital. Gradientes Troposféricos. Diferentes ajustes para la estimación de los DCB.
- **Aplicaciones**  
Evaluación de la calidad de los productos GNSS. Soluciones y productos en tiempo real. Utilización de modelos de predicción numérica. Integración de productos GNSS en modelos y pronósticos meteorológicos.

## 5.1 Libros de Referencia

La práctica desarrollada tendrá como libro de referencia el manual del software BERNESE cuya cita es:





- Dach, R., S. Lutz, P. Walser, P. Fridez (Eds); 2015: Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual, Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing. DOI: 10.7892/boris.72297; ISBN: 978-3-906813-05-9.

Entre la bibliografía que utilizaremos se encuentran también:

- Shuanggen Jin, Estel Cardellach, and Feiqin Xie. 2016. GNSS Remote Sensing: Theory, Methods and Applications (1st ed.). Springer Publishing Company, Incorporated.
- Alfred Leick Ph.D, Lev Rapoport Ph.D, Dmitry Tatarnikov Ph.D. 2015. GPS Satellite Surveying, Fourth Edition. John Wiley and Sons, Inc.

Todo este material sumado a manuscritos científicos de referencia apropiada a la temática que cada alumno desarrolle en los temas a exponer.

## References

- [1] S. Jin, W. Zhu, E. Afraimovich, Co-seismic ionospheric and deformation signals on the 2008 magnitude 8.0 wenchuan earthquake from gps observations, *International Journal of Remote Sensing* 31 (13) (2010) 3535–3543. arXiv:<https://doi.org/10.1080/01431161003727739>, doi:10.1080/01431161003727739.
- [2] S. Jin, O. Luo, C. Ren, Effects of physical correlations on long-distance gps positioning and zenith tropospheric delay estimates, *Advances in Space Research* 46 (2) (2010) 190 – 195, gNSS Remote Sensing-1. doi:<https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.01.017>.
- [3] S. Jin, J. Park, J. Wang, B. Choi, P. Park, Electron density profiles derived from ground-based gps observations, *Journal of Navigation* 59 (3) (2006) 395–401. doi:10.1017/S0373463306003821.
- [4] S. Jin, J.-U. Park, J.-H. Cho, P.-H. Park, Seasonal variability of gps-derived zenith tropospheric delay (1994–2006) and climate implications, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 112 (D9). arXiv:<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2006JD007772>, doi:10.1029/2006JD007772.
- [5] T. Schmidt, J. Wickert, A. Haser, Variability of the upper troposphere and lower stratosphere observed with gps radio occultation bending angles and temperatures, *Advances in Space Research* 46 (2) (2010) 150 – 161, gNSS Remote Sensing-1. doi:<https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.01.021>.
- [6] R. H. Ware, D. W. Fulker, S. A. Stein, D. N. Anderson, S. K. Avery, R. D. Clark, K. K. Droegemeier, J. P. Kuettner, J. B. Minster, S. Sorooshian, Suominet: A real-time national gps network for atmospheric research and



- education, *Bulletin of the American Meteorological Society* 81 (4) (2000) 677–694.
- [7] G. Gendt, G. Dick, C. Reigber, M. Tomassini, Y. Liu, M. Ramatschi, Near real time gps water vapor monitoring for numerical weather prediction in germany, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II* 82 (1B) (2004) 361–370. doi:10.2151/jmsj.2004.361.
- [8] G. Guerova, J. Jones, J. Douša, G. Dick, S. de Haan, E. Pottiaux, O. Bock, R. Pacione, G. Elgered, H. Vedel, M. Bender, Review of the state of the art and future prospects of the ground-based gnss meteorology in europe, *Atmospheric Measurement Techniques* 9 (11) (2016) 5385–5406. doi:10.5194/amt-9-5385-2016.
- [9] G. Elgered, J. L. Davis, T. A. Herring, I. I. Shapiro, Geodesy by radio interferometry - water vapor radiometry for estimation of the wet delay, 96 (1991) 6541–6555. doi:10.1029/90JB00834.
- [10] M. Bevis, S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, R. H. Ware, Gps meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system, 97 (D14) (1992) 15,787–15,801. doi:10.1029/92JD01517.
- [11] J. Duan, M. Bevis, P. Fang, Y. Bock, S. Chiswell, S. Businger, C. Rocken, F. Solheim, T. van Hove, R. Ware, S. McClusky, T. A. Herring, R. W. King, GPS Meteorology: Direct Estimation of the Absolute Value of Precipitable Water., *Journal of Applied Meteorology* 35 (6) (1996) 830–838.
- [12] G. Guerova, E. Brockmann, J. Quiby, F. Schubiger, C. Matzler, Validation of NWP Mesoscale Models with Swiss GPS Network AGNES., *Journal of Applied Meteorology* 42 (1) (2003) 141–150.
- [13] R. Eresmaa, H. Järvinen, Estimation of Spatial Global Positioning System Zenith Delay observation error covariance, *Tellus Series A* 57 (2) (2005) 194. doi:10.3402.
- [14] A. Hall, S. Manabe, The role of water vapor feedback in unperturbed climate variability and global warming., *Journal of Climate* 12 (1999) 2327–2346.
- [15] C. J. Schrijver, K. Kauristie, A. D. Aylward, C. M. Denardini, S. E. Gibson, A. Glover, N. Gopalswamy, M. Grande, M. Hapgood, D. Heynderickx, N. Jakowski, V. V. Kalegaev, G. Lapenta, J. A. Linker, S. Liu, C. H. Mandrini, I. R. Mann, T. Nagatsuma, D. Nandy, T. Obara, T. P. O'Brien, T. Onsager, H. J. Opgenoorth, M. Terkildsen, C. E. Valladares, N. Vilmer, Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015–2025 commissioned by cospar and ilws, *Advances in Space Research* 55 (12) (2015) 2745 – 2807.