

# GEOACTA

Publicación de la Asociación Argentina  
de Geofísicos y Geodestas



## VOLUMEN ESPECIAL 43(2)- 2022 - AAGG2021

### Editorial

3

### Nota técnica

ESTUDIO DE LA PROFUNDIDAD DEL LAGO VIEDMA, PARQUE NACIONAL LOS GLACIARES, ARGENTINA  
*Andrés Rivera, María Gabriela Lenzano, Esteban Lannutti, Silvana Moragues, Luis Eduardo Lenzano, Jorge Lenz; Alberto Ismael Vich*

4

### Trabajos científicos - Plenarias

MACHINE LEARNING FOR SEISMIC DATA ANALYSIS AND PROCESSING

*Danilo R. Velis, Julián L. Gómez, Gabriel R. Gelpi, Germán I. Brunini, Daniel O. Pérez, Juan I. Sabbione*

7

MISTERIOS Y RAREZAS DEL FINAL DEL PRECÁMBRICO: UN ENFOQUE PALEOMAGNÉTICO

*Augusto E. Rapalini*

30

EFFECTOS DE LA PRECIPITACIÓN DE PARTÍCULAS ENERGÉTICAS DE ORIGEN SOLAR EN LA  
ATMOSFERA DE LA TIERRA

*Marta M. Zossi, Gustavo A. Mansilla y Elda M. Zotto*

46

### Reportes -Mesas redondas AAGG2021

CONTRIBUCIÓN A LA HISTORIA, PRESENTE Y FUTURO DE LA GEODESIA EN ARGENTINA

*Coordinadora: María Alejandra Arecco (IGGA – UBA)*

*Organizada por el Instituto de Geodesia y Geofísica, Facultad de Ingeniería, UBA.*

*(María Alejandra Arecco y Dr. Ezequiel Palleja);*

*Laboratorio GEO-AGO, CCT-CONICET La Plata. (Claudio Brunini);*

*Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP (Mauricio Gende);*

*Instituto Geográfico Nacional (Sergio Cimbaro)*

PRESENTACIÓN

*María Alejandra Arecco*

66

## VOLUMEN ESPECIAL 43(2)- 2022 - AAGG2021

GEODESIA ARGENTINA (SÍNTESIS HISTÓRICA) <i>Rubén C. Rodríguez</i>	<b>68</b>
LA GEODESIA Y LA GEOFÍSICA EN LA FIUBA <i>Ezequiel Pallejá</i>	<b>76</b>
LAS ESTACIONES PERMANENTES GNSS, UN GRAN PARADIGMA EN LA GEODESIA. Una mirada desde Argentina y América Latina, en los últimos 30 años. <i>María Virginia Mackern</i>	<b>80</b>
TÉCNICAS GEODÉSICAS ESPACIALES EN ARGENTINA: ACTUALIDAD Y PERSPECTIVA A FUTURO <i>María Eugenia Gómez</i>	<b>91</b>
UNA SENDA DE CRECIMIENTO PARA LA GEODESIA ARGENTINA <i>Claudio Brunini, Raúl Perdomo, Daniel Del Cogliano</i>	<b>96</b>
HACIA LA IMPLEMENTACIÓN DEL MARCO DE REFERENCIA GEODÉSICO GLOBAL <i>Claudia Tocho</i>	<b>103</b>
LOS AVANCES EN EL MARCO DE REFERENCIA GEODÉSICO EN ARGENTINA Y LAS PERSPECTIVAS FUTURAS, BASADO EN LOS LINEAMIENTOS INTERNACIONALES <i>Sergio Cimbaro</i>	<b>110</b>
RESEÑA DE LA MESA REDONDA CRIOSFÉRICA “LOS GRANDES RETOS DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA EN LOS GLACIARES SUDAMERICANOS”. <i>Coordinador: Andrés Rivera (Universidad de Chile)</i> <i>Organizada por la Universidad de Chile (Andrés Rivera)</i> <i>Laboratorio de Geomática Andina – IANIGLA (María Gabriela Lenzano)</i>	<b>111</b>

## Editorial

La Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas fue fundada el 19 de septiembre de 1959 para contribuir al fomento de la investigación y la enseñanza de la geofísica y la geodesia en el país. Luego en las décadas posteriores la AAGG abarca todo el arco de las Disciplinas y Ciencias que involucran los estudios de las Ciencias de la Tierra, Atmosféricas e Hidrosféricas., que hoy las denominamos Ciencias de la Criósfera. En el año 1945 se celebró en Buenos Aires la 4ª Reunión de Consulta sobre Cartografía del Instituto Panamericano de Geografía e Historia y allí, los especialistas nacionales que asistieron, comenzaron a tomar conciencia de la capacidad de actuar en forma coordinada, la misma se fortaleció con la participación del país durante el AÑO GEOFÍSICO INTERNACIONAL (julio 1957 – diciembre 1958) y finalmente, en el año 1959, fue fundada la Asociación.

En su historia de vinculación con la sociedad, a partir de las disciplinas que la AAGG aborda, desde el año 1960 al 2021 ha convocado a Científicos, Tecnócratas, Profesionales, Estudiantes de grado y posgrado a relacionarse y presentar trabajos en las Reuniones Científicas organizadas; desde el inicio hasta la fecha actual se organizaron veintinueve eventos.

La Reunión se desarrolló durante unas circunstancias desfavorables sin precedentes a nivel nacional e internacional, que es la Pandemia COVID 19, con lo cual fue un desafío y un esfuerzo extremo poner en valor la AAGG2021, a partir de una organización de excelencia que permitió integrar, a partir de la virtualidad, a todos los actores que participaron.

**En este contexto de Pandemia, la AAGG2021 resolvió dedicar la Reunión Científica al Geólogo HECTOR CISNEROS, desaparecido por efecto del COVID19, como un homenaje póstumo al profesional, docente e investigador de la UNCuyo que dejó una impronta de valores, ética, dedicación, creatividad, como parámetro inclusivo en la Política Universitaria. En lo personal, fueron innumerables las horas y espacios que compartí con Héctor, discusiones de alto contenido y valor académico, de investigación, donde se cruzaron coincidencias y desacuerdos, valorando sus tertulias, que, sin lugar a dudas, dejó un vacío difícil de llenar.**

La reunión convocada por la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas (AAGG) en modalidad virtual, denominada: XXIX REUNIÓN CIENTÍFICA VIRTUAL – AAGG2021 - "62 años aportando a la ciencia y tecnología argentina", se expusieron 17 (diecisiete) CONFERENCIAS PLENARIAS, 5 (cinco) MESAS REDONDAS Y TALLERES, 151 (ciento cincuenta y un) TRABAJOS CIENTÍFICOS, y se realizó un CONCURSO FOTOGRAFICO premiando a 10 (diez) fotografías.

El órgano Oficial de la divulgación de trabajos científicos, tecnológicos y comunicaciones es la Revista Internacional "GEOACTA", que desde el año 1962 a la fecha se han publicado más de 60 volúmenes, que incluyen más de 700 trabajos producidos por investigadores, docentes, profesionales y técnicos.

En este contexto y dada la trascendencia de la Reunión AAGG2021, el Comité Editorial de GEOACTA, decidió publicar una EDICION ESPECIAL DE GEOACTA – VOLUMEN 43-2 con contenidos específicos de las presentaciones que se hicieron en la reunión.

La Comisión de la AAGG, Comité Organizador AAGG2021 y el Comité Editorial de GEOACTA agradecen sinceramente a todos y todas por la participación, dedicación y puesta en valor de la reunión científica, donde participaron más de 500 científicos, docentes, profesionales, alumnos y técnicos.

**Mendoza, junio de 2022**  
**LUIS EDUARDO LENZANO ANDIA**  
**Presidente AAGG**

## COMUNICACION TECNICA

### ESTUDIO DE LA PROFUNDIDAD DEL LAGO VIEDMA, PARQUE NACIONAL LOS GLACIARES, ARGENTINA

Sergio Andrés Rivera Ibañez<sup>1</sup>; Esteban Lannutti<sup>2</sup>; María Gabriela Lenzano<sup>2</sup>, Silvana Moragues<sup>2</sup>; Luis Eduardo Lenzano<sup>3</sup>, Jorge Lenz<sup>4</sup>; Alberto Ismael Vich<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Chile. Chile

<sup>2</sup> Laboratorio de Geomática Andina. IANIGLA – CONICET. Argentina

<sup>3</sup> Centro Internacional de Ciencias de la Tierra. ICES regional Cuyo. Universidad Nacional de Cuyo. Argentina.

<sup>4</sup> Administración de Parques Nacionales. Argentina

<sup>5</sup> Grupo Ecología y Manejo de Cuenca. IANIGLA – CONICET. Argentina.

La expedición realizada al Parque Nacional Los Glaciares (PNLG-ARG) de la Patagonia Austral Argentina (Fig. 1) en mayo del 2022 por investigadores del Laboratorio de Geomática Andina-IANIGLA, CONICET-Argentina (María Gabriela Lenzano, Esteban Lannutti y Silvana Moragues), del Centro Internacional de Ciencias de la Tierra (ICES-Regional Cuyo)-Universidad Nacional de Cuyo- Argentina (Luis Lenzano), la Universidad de Chile (Andrés Rivera) y el apoyo logístico del Parque Nacional Los Glaciares (Jorge Lenz), financiada por el ICES-Regional Cuyo, se midió la profundidad del lago Viedma cerca del frente del glaciar homónimo. Las mediciones se realizaron en una zona no estudiada debido a que estuvo ocupada hasta hace pocos años por el glaciar.

El estudio se realizó dentro del marco de los proyectos de investigación financiados por Argentina: PICTO N° 050-2019 **“Evaluación de la respuesta hidrológica y glaciológica en el sector Argentino del Campo de Hielo Patagónico Sur. Integración de técnicas Geomáticas e Hidrológicas”** (IR: Alberto Ismael Vich) y el PICT N° 06-G773 **“Análisis de procesos hidrológicos y glaciológicos en la Patagonia Austral argentina”** (IR: Luis Eduardo Lenzano)

El glaciar Viedma ha experimentado desde el año 2014 a la fecha una pérdida de 5,5 km<sup>2</sup> de superficie de hielo debido a un retroceso frontal de 2 km, lo que ha dejado al descubierto una zona inexplorada, que, de acuerdo con los investigadores, el abrupto retroceso frontal registrado en los últimos años y el desprendimiento de grandes témpanos estaría indicando una gran profundidad del lago.

Los investigadores navegaron el lago Viedma en una embarcación de la Administración de Parques Nacionales de Argentina con la que se realizó un levantamiento detallado del fondo del lago, para sorpresa de los investigadores el fondo presenta una fosa que alcanza una profundidad máxima de 900 m  $\pm 3\%$  de error. Es un récord absoluto en Patagonia y Sudamérica. Esto significa que el fondo del lago cerca del frente actual está cerca de 650 m “bajo el nivel del mar”. Con los resultados obtenidos, el Viedma se transforma en el lago más profundo del continente americano y el quinto del planeta (ver Tabla 1).

En conjunto con las mediciones de profundidad, se midió la temperatura y conductividad del agua hasta el fondo del lago en 13 puntos. Estos datos también fueron sorprendentes para los investigadores, porque además de confirmar las grandes profundidades medidas con los sonares, mostraron que el lago posee una estructura vertical compleja, con temperaturas en superficie de unos 7°C que descienden hasta 0°C en el fondo del lago.



**Figura 1.** Mapa de ubicación relativa de la Patagonia austral con detalle en el glaciar Viedma (PNLG- ARG) y sus cambios frontales recientes.

Este lago tan profundo se formó por la fuerza erosiva que poseen los glaciares, los que

durante al menos el último millón de años se han expandido varias veces llegando a ocupar gran parte de la región patagónica austral. Al retroceder desde la última Glaciación hace unos 18.000 años, dejaron a su paso los grandes lagos Patagónicos. Los científicos, que vienen realizando estudios en el PNLG desde hace una década, destacan que las investigaciones en estos lagos son importantes para reconstruir las variaciones glaciares de largo plazo, entender las fluctuaciones recientes de los frentes y así explicar las diferencias de comportamiento que actualmente exhiben este tipo de glaciares.

Ranking	Nombre de lago	Continente	País	Profundidad máxima (m)	Area (km <sup>2</sup> )	Fuente
1	Baikal	Asia	Rusia	1637	31.500	www.worldlakes.org www.ilec.or.jp
2	Tanganika	África	Burundi, Congo, Tanzania, Zambia	1470	32.000	www.worldlakes.org www.ilec.or.jp
3	Vostok	Antártica	-	1200	15.500	Masolov, et al., (2010)
4	Mar Caspio	Asia	Azerbaiyán, Irán, Kazakstán, Rusia, Turkmenistán	1025	374.000	www.worldlakes.org www.ilec.or.jp
<b>5</b>	<b>Viedma</b>	<b>Sudamérica</b>	<b>Argentina</b>	<b>900</b>	<b>1.199</b>	<b>Este trabajo</b>
6	O'Higgins	Sudamérica	Chile	836	1.058	Casassa et al., (2007)
7	Argentino	Sudamérica	Argentina	719	1.466	Skvarca & De Angelis (2001)
8	Malawi	África	Malawi, Mozambique, Tanzania	706	29.600	www.worldlakes.org www.ilec.or.jp
9	Issyk-Kul	Asia	Kirguistán	668	6.236	www.worldlakes.org www.ilec.or.jp
10	Great Slave	Norteamérica	Canadá	614	28.568	www.worldlakes.org www.ilec.or.jp

**Tabla 1.** Se muestran los diez lagos más profundos del Planeta.

**Agradecimientos.** Estos estudios fueron posibles gracias al financiamiento de la Universidad Nacional de Cuyo. Se agradece al Dr. Jorge Barón por su apoyo. A la Administración de Parques Nacionales de Argentina por permitirnos trabajar dentro del Parque Nacional Los Glaciares y por su apoyo logístico y de infraestructura, en especial destacamos a la Lic. Laura Malmierca y La Lic. Silvina Sturzenbaum.

## MACHINE LEARNING FOR SEISMIC DATA ANALYSIS AND PROCESSING

Danilo R. Velis <sup>1</sup>, Julián L. Gómez <sup>1,2</sup>, Gabriel R. Gelpi <sup>3</sup>, Germán I. Brunini <sup>1</sup>, Daniel O. Pérez<sup>1</sup>,  
Juan I. Sabbione<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, y CONICET,  
La Plata, Argentina*

<sup>2</sup>*YPF Tecnología S.A., Berisso, Argentina*

<sup>3</sup>*Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, La Plata,  
Argentina*

Contact: [velis@fcaglp.unlp.edu.ar](mailto:velis@fcaglp.unlp.edu.ar)

### RESUMEN

El aprendizaje automático está marcando el ritmo del avance del análisis de datos en muchos campos de la ciencia, la tecnología y la industria. En este contexto, el procesamiento y la inversión de datos sísmicos se abordan mediante estrategias que extraen la información relevante de los datos de forma casi automática. El “**dictionary learning**” y las Redes Neuronales son dos ejemplos comunes de algoritmos capaces de capturar las estructuras y patrones complejos incrustados en los datos e inferir o predecir cierta información de interés a partir de ellos. Utilizamos la técnica de “**residual dictionary denoising**” para atenuar la huella de adquisición en los datos sísmicos 3D. Además, demostramos algunos avances en el uso de una red neuronal profunda para invertir el tensor de momento sísmico en escenarios de monitorización de pozos. El aprendizaje automático también incluye técnicas de optimización global, como el recocido simulado y la evolución diferencial. Exploramos cómo estos dos algoritmos pueden automatizar procesos en la exploración sísmica, como el análisis de la velocidad y el “well-tying” que convencionalmente se hacen a mano y, por lo tanto, son susceptibles de la subjetividad y la experiencia del usuario.

**PALABRAS CLAVES: EXPLORACION SISMICA; VELOCIDADES; REDES NEURONALES**

### ABSTRACT

Machine learning is setting the pace in the advancement of data analysis in many fields of science, technology, and industry. In this context, seismic data processing and inversion are approached by strategies that extract the relevant information from the data almost automatically. Dictionary learning and neural networks are two common examples of algorithms capable of capturing the complex structures and patterns embedded in data and inferring or predicting certain information of interest from them. We use a residual dictionary denoising technique to attenuate the acquisition footprint in 3D seismic data. Besides, we demonstrate some progress in using a deep neural network to invert the seismic moment tensor in well-monitoring scenarios. Machine learning also includes global optimization techniques, such as simulated annealing and differential evolution. We explore how these two algorithms can automate processes in seismic exploration such as velocity analysis and well-tying, which are conventionally done by hand and are thus susceptible to user subjectivity and experience.

**KEY WORDS: SEISMIC EXPLORATION; VELOCITIES; NEURAL NETWORKS**

## INTRODUCTION

Machine learning (ML) are algorithms and strategies devised for making predictions from data without the use of explicit deterministic coding/modeling. It is difficult to pinpoint when ML first appeared, but one of the key works that put on the table the idea of a computer learning to "think" like a human was in the late 1950s (Samuel 1959). Since then, the number of developments and applications has increased dramatically. ML algorithms, such as artificial neural networks (ANN), are useful for extracting information from large datasets associated with complex systems when a deterministic approach/model is unavailable (e.g., predicting which movie a given streaming service subscriber would like to watch (Bennett, Lanning, and others 2007)).

Deep neural networks (DNN), convolutional neural networks (CNN), and supervised or unsupervised NN are ANN examples. DNN is an acronym for NN with multiple layers. In the simplest of settings, each layer of a DNN contains affine transforms that are linked together by nonlinear "activation functions". CNN, on the other hand, use convolutional filters instead of affine transforms. In supervised systems, the concept of "learn-by-examples" is crucial, which requires the examples to be labeled; while in unsupervised systems, the NN learns to cluster the input data into groups with distinct features.

Dictionary learning (DL), evolutionary algorithms such as genetic algorithms (GA) and differential evolution (DE), simulated annealing (SA), particle swarm optimization (PSO), and others are also examples of ML methods (Qadrouh et al. 2019 e.g.). DL (Tošić and Frossard 2011 e.g.), for example, draws a limited number of patches from the input data to create a dictionary, which is then used to fit the original data by learning through sparse representations. On the other hand, GA (Goldberg 1989 e.g.) mimics the process of natural selection, whereas SA (Davis 1987 e.g.) mimics the process of annealing. Contrarily, DE (Storn and Price 1997 e.g.) does not mimic any natural or biological process, but borrows concepts from GA such as crossover and mutation.

In geophysics, ML has found many successful applications (Bougher 2016; Qadrouh et al. 2019), including predicting petrophysical properties (e.g. porosity, permeability) from well-log and/or seismic data, seismic data interpolation, denoising, and reconstruction, seismic inversion for reservoir/mining applications, subsurface facies classification and structure delineation/identification (e.g. faults, salt bodies), signal detection, and horizon/velocity picking. The list of applications is constantly growing.

We describe four novel applications developed recently by the METIS group ("Métodos especializados para el procesamiento de la información sísmica", Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP) that use a variety of ML techniques adopted for processing seismic data. The first two are methods for uncovering hidden patterns and information in input data: (1) footprint removal using DL (Gómez and Velis 2020) and (2) moment tensor inversion using NN (Brunini, Velis, and Sabbione 2021). The other two are methods to automate processes that are normally carried out by hand: (1) automated well tying and phase estimation using DE (Gelpi, Pérez, and Velis 2020), and (2) automated velocity analysis using SA (Velis 2021).

The report is divided into two parts, each with two sections, one for each of the four applications mentioned above. Each section begins by presenting the problem, objectives, and methods, as well as a brief description of the machine learning (ML) used. The techniques are then demonstrated using synthetic and/or field data examples, which leads to draw the conclusions summarized at the end of each section. For a complete description of the methods, the reader is directed to the corresponding publications.

## METHODS TO UNCOVER HIDDEN PATTERNS AND INFORMATION BY LEARNING FROM DATA

In this section we describe two ML applications to seismic data analysis: (1) footprint removal using DL (Gómez and Velis 2020) and (2) moment tensor inversion using NN (Brunini, Velis, and Sabbione 2021). Essentially, both dictionary learning (DL) and neural networks (NN) learn from the input data by uncovering hidden patterns and information, either to make predictions or to capture its most relevant components. DL assumes that the observed data is a linear combination of a few atoms. These atoms are learned from patches extracted from the input data and contain the most important blocks of information, while ignoring irrelevant details such as random noise. On the other hand, NN employ an artificial net to predict the underlying model that reproduces a set of given observations. For training the network, a large amount of simulated data can be used. The training process updates the network parameters so the resulting algorithm can model the observed data with great accuracy and, ultimately, give reasonable predictions for unseen datasets.

### Footprint removal using DL

Seismic data can contain random and coherent noise. A typical example of coherent noise is the acquisition footprint, which can lead to an incorrect assessment of the geological structure of the reservoirs. Therefore, the removal of footprint noise from seismic data is of great interest for seismic interpretation and data analysis (Sahai and Soofi 2006; Alali, Machado, and Marfurt 2018). The acquisition footprint is caused by constraints in acquisition design, acquisition equipment, and the processing workflow applied to the recorded seismic data (Marfurt et al. 1998). There are various standard techniques for footprint attenuation, most of them based on wavenumber filtering (Gülünay, Martin, and Martínez 1994; Gülünay 1999; Chopra and Larsen 2000; Drummond, Budd, and Ryan 2000; Soubaras 2002; Falconer and Marfurt 2008).

In the case of random noise, dictionary learning (DL) methods borrowed from the field of sparse and redundant representation of signals (Mallat 1999; Elad 2010; Tošić and Frossard 2011), provide several interesting applications in seismic processing (Beckouche and Ma 2014; Turquais, Asgedom, and Söllner 2017a; Li, Zhang, and Mosher 2019; Zu et al. 2019). A dictionary is a collection of redundant vectors known as atoms. The DL process is an alternate optimization scheme. Given an initial dictionary, a sparse representation of the data is calculated. The sparse representation is then applied to update the initial dictionary. The updated dictionary improves the sparseness of the data representation. This two-step process iterates until convergence. For coherent noise, DL often requires complex atom classification strategies to differentiate atoms that contain structured noise from those that contain seismic signal (Turquais, Asgedom, and Söllner 2017b). Residual dictionary denoising (RDD) (Gómez and Velis 2020) overcomes this issue. It uses an augmented dictionary of filtered atoms and their residuals after edge-preserving smoothing. The atoms in the residual dictionary provide a good representation of the footprint pattern. This fact is used to enable automated source separation.

#### *Dictionary learning*

DL is a machine learning technique for finding a sparse representation of a given dataset using a relatively small set of atoms. These atoms are learned from patches of the input data:

$$\{\hat{D}, \hat{X}\} = \arg \min_{D, X} \|X\|_0 \text{ s.t. } \min_D \|Y - DX\|_F^2, \quad (1)$$

where  $Y$  represents a collection of 2D patches from the input data in column vector form,  $D$  the dictionary, and  $X$  the sparse representation of the data patches collected in  $Y$  (Tošić and Frossard 2011 e.g.). The operator  $\|X\|_0$  counts the number of nonzero entries in  $X$ , and  $\|\cdot\|_F^2$  is the square of the Frobenius matrix norm. In practice, we solve this problem using coherent DL (CDL) (Turquais, Asgedom, and Söllner 2017a).

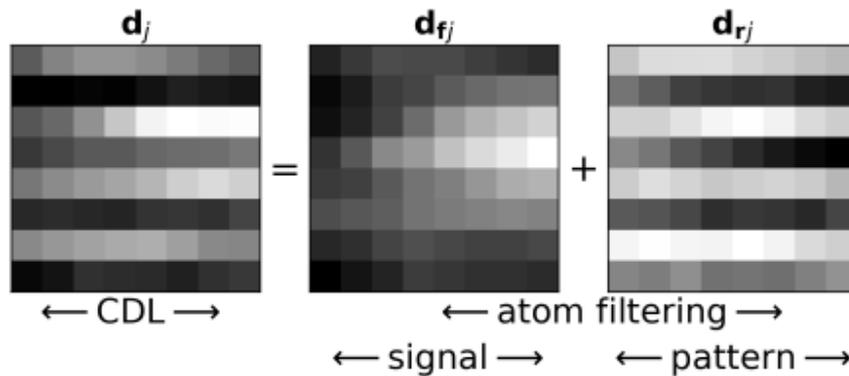
The method of residual dictionary denoising (RDD) allows to separate signal from coherent noise by building an augmented dictionary ( $D_a$ ) that comprises filtered atoms ( $D_f$ ) and residual atoms ( $D_r$ ) (Gómez and Velis 2020):

$$D_a = D_f \cup D_r, D_r = D - D_f. \quad (2)$$

Figure 1 shows an atom drawn from the learned dictionary  $\hat{D}$  that contains both signal and acquisition footprint. After filtering, the atom will be mostly signal, while the residual atom will be mostly acquisition footprint. We can denoise each patch of the original data  $y$  by removing the footprint component given by the residual dictionary:  $y_r = D_r x_r$ . That is

$$\hat{y} = y - D_r x_r, \quad (3)$$

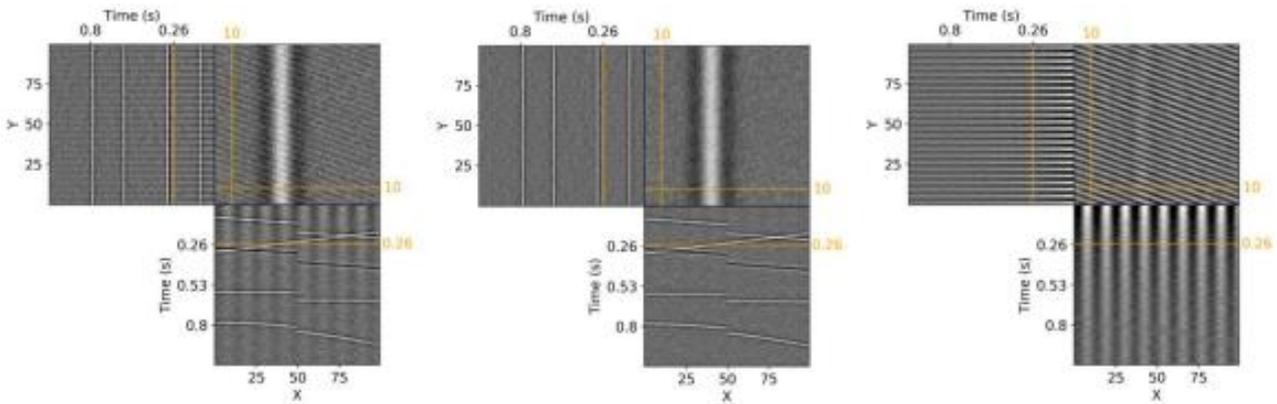
where  $\hat{y}$  is the denoised patch. Assembling and averaging the denoised patches yields the filtered seismic data.



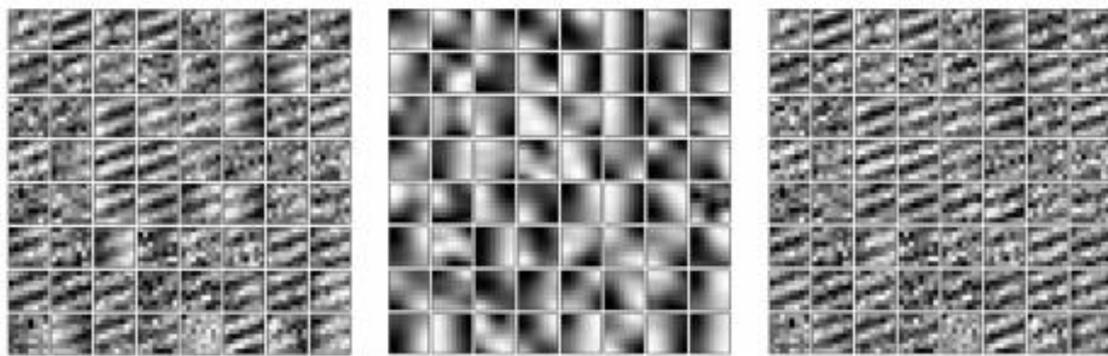
**Figure 1.** By filtering, a dictionary atom  $d_j$  is separated into a signal atom  $d_{f_j}$  and a residual atom  $d_{r_j}$ . The energy from the coherent noise should be mostly represented by  $d_{r_j}$ . Modified after (Gómez and Velis 2020).

### Examples

Figure 2 shows a synthetic example that illustrates the filtering of a 3D seismic volume. In this case, the data (left panel) contains both random and coherent noise. Figure 3 depicts the corresponding learned, filtered, and residual dictionaries. The learned dictionary is a mixture of the seismic signal and the footprint noise. The augmented dictionary  $D_a$  consists of the filtered dictionary  $D_f$  and the residual dictionary  $D_r$ . As shown in Figure 2 (middle and right panels), RDD captures the coherence noise, which is then removed from the original data.



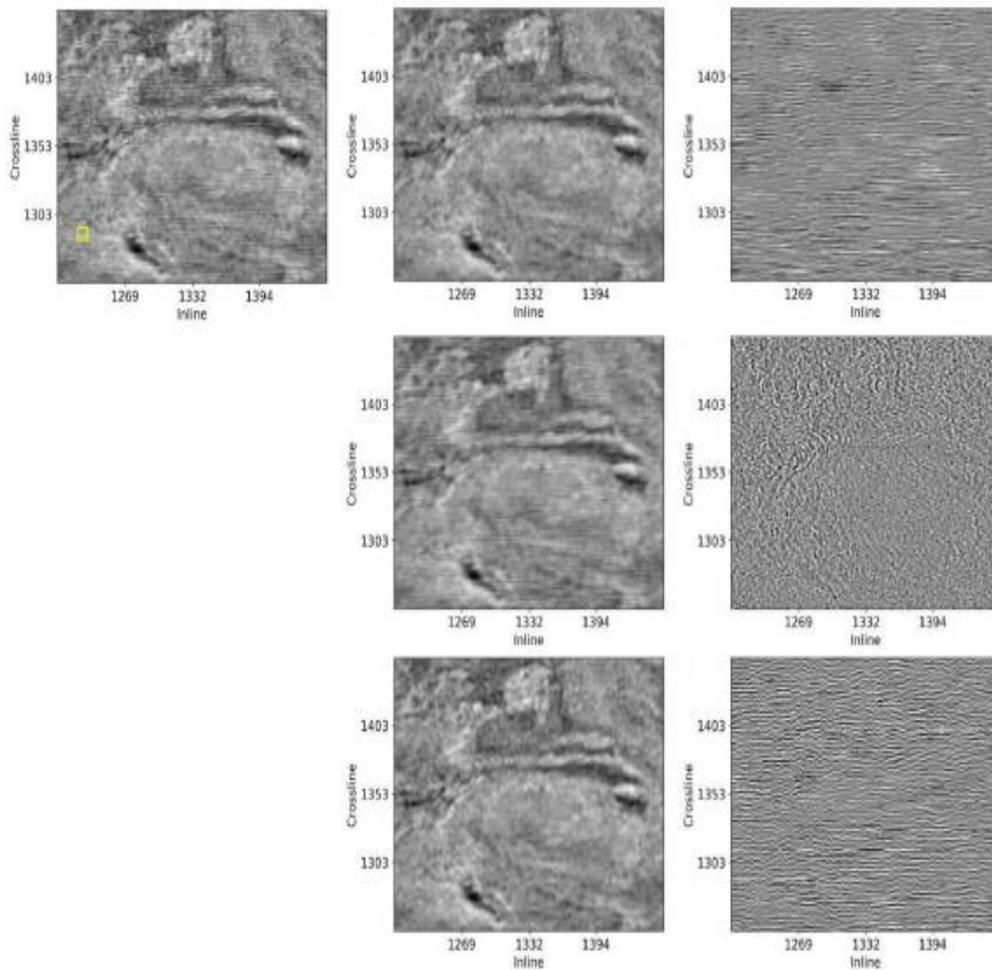
**Figure 2.** Synthetic example. Left: 3D cube with random and coherent noise. Middle: result after RDD. Right: residual (scaled by a factor of 5 for better visualization). Modified after (Gómez and Velis 2020).



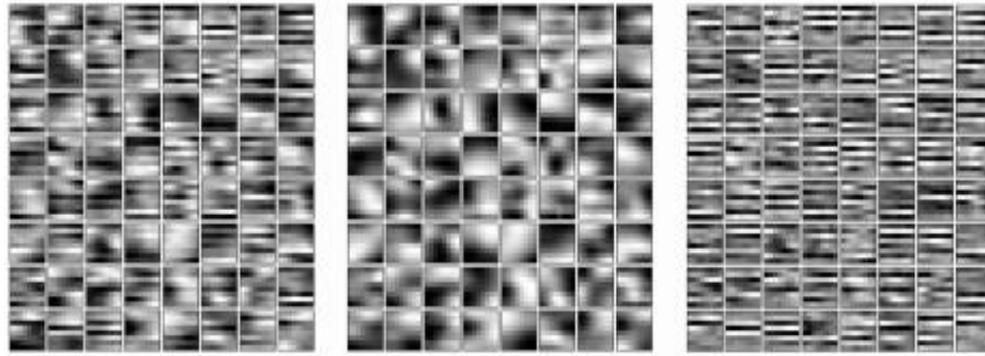
**Figure 3.** Synthetic example. Learned, filtered, and residual dictionaries corresponding to data shown in Figure 2 (left panel). Modified after (Gómez and Velis 2020).

We apply RDD to offshore seismic data from Nova Scotia, Canada. We compare the results of RDD, conventional DL, and wavenumber filtering using a single time slice in Figure 4. The resulting RDD image is footprint-free, sharp, and with negligible signal leakage. Figure 5 shows the corresponding dictionaries.

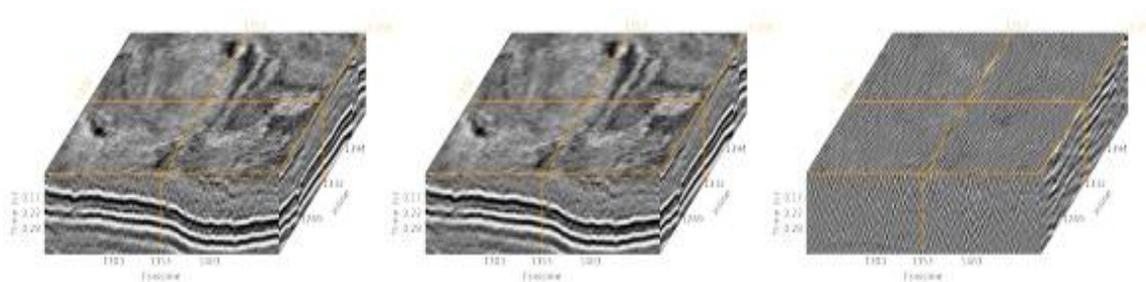
We note that to achieve a similar result with wavenumber filtering, a seismic processor should choose a filter and tune its parameters (e.g., the cutoff frequencies) by inspecting the given data and the filtered result in an iterative fashion. Figure 6 shows that RDD does an acceptable work in the whole seismic data: the filtered volume is free of footprint, while the residual volume clearly contains the undesired coherent noise. RDD is applied time slice by time slice in this example.



**Figure 4.** Field data example. Top: Time slice at  $t = 0.116$  s (left), filtered by RDD (middle) and residual (right). Second row: Filtered by conventional DL and residual. Bottom: filtered by wavenumber filtering and residual. The yellow sector shows the size of a patch used for learning the dictionary. The residuals are scaled 5 times for visualization. Modified after (Gómez and Velis 2020).

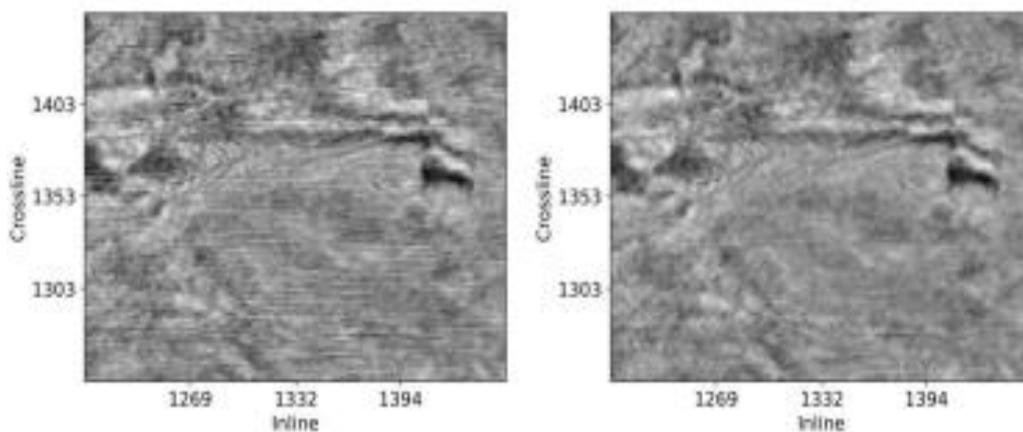


**Figure 5.** Field data example: learned, filtered, and residual dictionaries corresponding to data shown in Figure 4 (top left panel). Modified after (Gómez and Velis 2020).

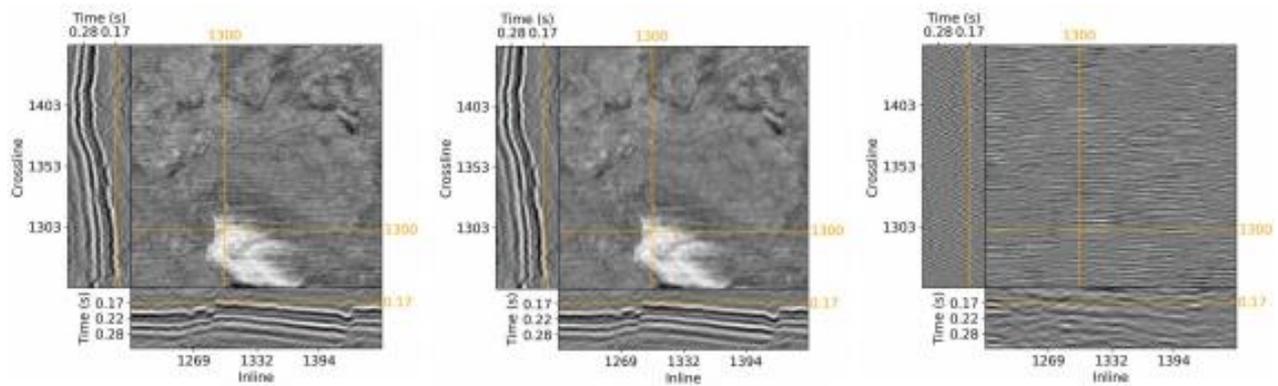


**Figure 6.** Field data example. Original subvolume, filtered by RDD, and residual. The residual is scaled 5 times for visualization.

One key feature of RDD is its application in transfer learning mode, where the dictionary learned from one time slice can be used to filter different time slices. This saves computational effort, since the most expensive step in RDD is learning the dictionary  $\hat{D}$  from the alternate optimization scheme. Figure 7 shows an example of filtering a different time slice of the offshore dataset using the dictionary shown in Figure 5. Finally, Figure 8 shows the complete seismic data filtered using RDD with transfer learning.



**Figure 7.** Field data example. Left: Time slice at  $t = 0.136$  s. Right: Filtered time slice with transfer learning, where the augmented dictionary was derived from the time slice at  $t = 0.116$  s (Figure 5). Modified after (Gómez and Velis 2020).



**Figure 8.** Field data example. Left: Whole subset. Middle: Subset filtered by RDD with transfer learning. Right: Residual (scaled by 5). The dictionary learned at  $t = 0.116$  s was filtered and enhanced to be applied to the whole subset. The inlines and crosslines show that signal is preserved in the whole dataset. Modified after (Gómez and Velis 2020).

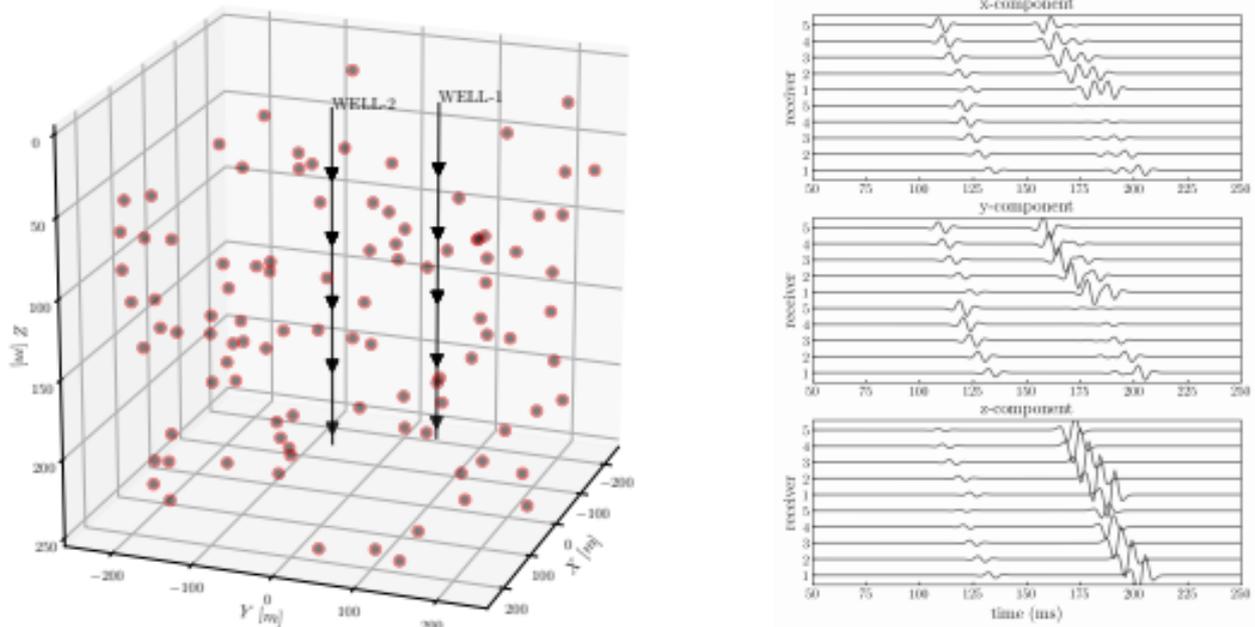
### Conclusions

The proposed RDD method is a dictionary learning variant that can remove coherent noise from time slices of 3D seismic data without analyzing the data's morphology to classify the atoms by hand. The augmented dictionary joins the filtered and residual dictionaries, allowing the exclusion of the footprint patterns from the data's final sparse representation automatically. The denoising process is further automated and simplified by RDD's transfer learning capabilities.

### Moment tensor inversion using NN

Solving the MTI problem is important for monitoring microseismic hydraulic fracturing processes (Baig and Urbancic 2010). The focal mechanism is typically the most valuable information extracted from a microseismic monitor survey, as it provides insights into fracture orientation and slip directions, ultimately aiding in the understanding of a reservoir's geomechanical behavior (Grechka and Heigl 2017). Figure 9 (left) depicts a typical hydraulic fracturing scenario where two vertical wells containing an array with 3C geophones record seismic data generated by several events in the nearby. Figure 9 (right) shows a sample 3C microseismic dataset as acquired by one of the well arrays. The data contains the P-wave arrival and two S-wave phases because we consider a subsurface with vertical transverse isotropy. In MTI, the fracture mechanism should be obtained from the amplitude information contained in these observed data. Several limiting factors, such as the poor angle apertures that characterize most acquisition geometries and the data's low signal-to-noise ratio, may prevent this task from being accomplished successfully and without ambiguity.

MTI methods are typically deterministic (Vavryčuk and Kühn 2012; V. I. Grechka 2015). However, only a few works have been dedicated to solving the MTI problem using ML/AI (Ovcharenko, Akram, and Peter 2018; Binder 2018; Wamriew et al. 2020). Deterministic methods necessitate a significant computational effort and do not allow for the easy solution of new MTI as new data is acquired, because the MTI solver is dependent on each specific data. NNs, on the other hand, allow for the generation of solutions for any new dataset on the fly, as long as they are well-trained beforehand. Because of the well-known theoretical limitations imposed by the single-well MTI scenario (V. Grechka 2015 e.g.), the deep neural network that we propose (Brunini, Velis, and Sabbione 2021) solves the MTI problem in a dual-vertical-borehole case.



**Figure 9.** Left: subsurface (VTI: vertical transverse isotropy) and acquisition geometry. A large number of fractures with random focal mechanism and coordinates. Right: sample 3C microseismic signal showing P- and both slow and fast S-wave phases. Modified after (Brunini, Velis, and Sabbione 2021).

### Deep neural network

A typical deep neural network (DNN) consists of several neuron layers interconnected by nonlinear activation functions. The base computation of a DNN involves the following relation for one neuron of one layer:

$$y = g(w \cdot x + b), \quad (4)$$

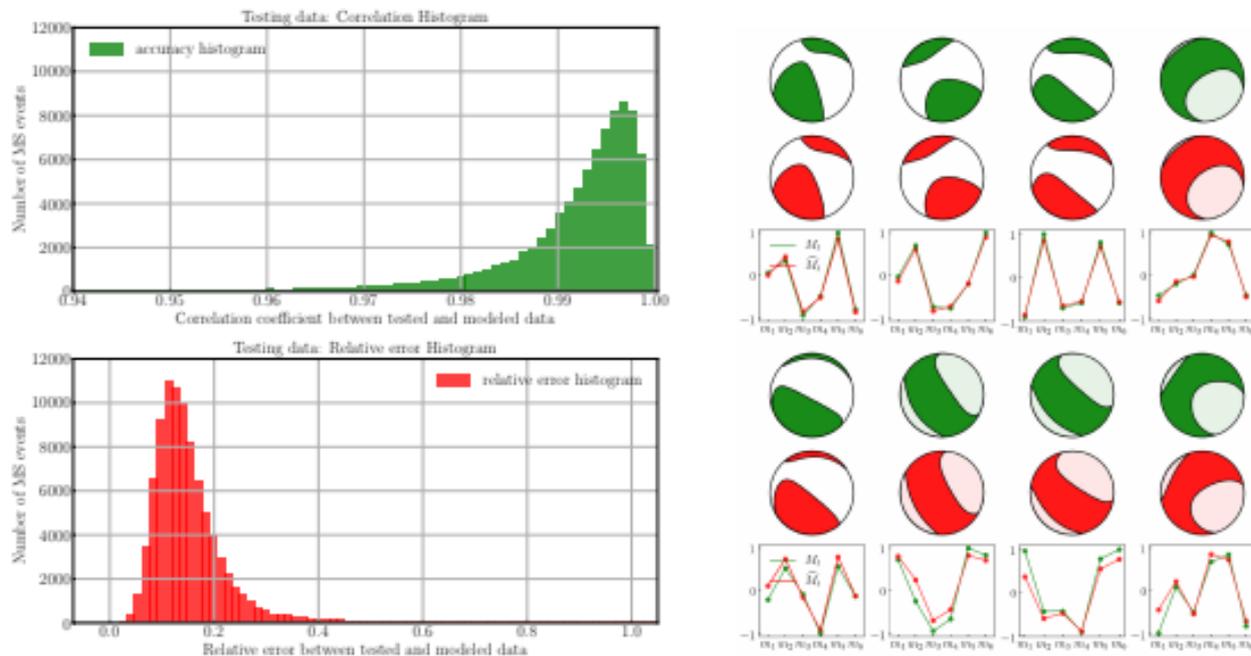
where  $x$  is the input as a column vector,  $w$  the weights and  $b$  the bias of the neuron, respectively,  $g$  a nonlinear activation function,  $y$  the output node, and the operator  $\cdot$  the inner product (Goodfellow, Bengio, and Courville 2016). Collecting all the outputs for different neurons we get the column vector  $y$ , which is the output of one layer. The output of one layer is connected to the next layer of neurons until reaching the output layer with its desired output size or number of nodes. The weights and biases of all the layers are the model parameters (unknowns) estimated by training. The input layer is fed by the input data  $x$  (which are known as features). The output layer produces the prediction of the model.

The DNN used to solve the MTI problem contains 6 layers, where the input layer has 93 nodes, each one associated with a *feature* (10 receivers x 3 components x 3 phases + 3 coordinates), and the output layer has 6 nodes, each one associated with a *prediction* (6-independent MT elements). For the prediction, we rely on the mean squared error (MSE) loss function. For training we use  $9 \times 10^5$  simulated events with known source mechanisms and coordinates, while for testing we used  $9 \times 10^4$  simulated events.

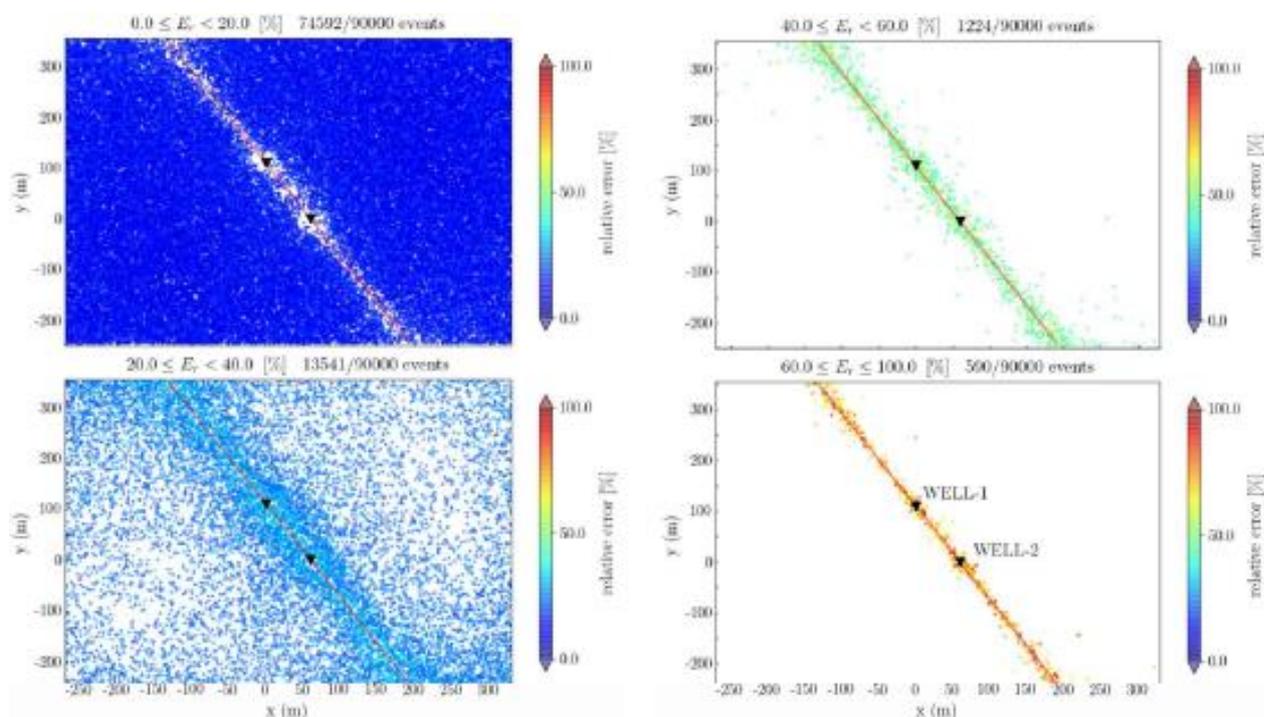
### Examples

Figure 10 shows the results of the MTI inversion using the proposed DNN. As shown, most predicted MT parameters are very similar to the actual values, both in the training and in the testing stages. Figure 11 shows the relative errors for the  $9 \times 10^5$  predicted events during the training stage. We observe a very high accuracy in most cases, except for those events that are placed

along the vertical plane that contains both wells. In these cases, as expected, the information contained in the observed data is not enough to resolve the inverse problem unambiguously.



**Figure 10.** Left: Correlation coefficient between actual and predicted MT elements for the testing dataset. Right: Relative error between actual (green) and predicted (red) MT elements. Top:  $0.99 \leq \rho \leq 1.0$  (>70%) bottom:  $0.94 \leq \rho < 0.95$  (<1%). Modified after (Brunini, Velis, and Sabbione 2021).



**Figure 11.** Relative errors of the predicted MT elements (different ranges). Largest errors are aligned along the vertical plane that contains the wells. Modified after (Brunini, Velis, and Sabbione 2021).

## Conclusions

The proposed DNN architecture is capable of accurately predicting most testing data. The inversion is poor for events near the plane containing both wells, but becomes very accurate as they move away from this plane. The results show that a well-trained DNN is a good alternative to

traditional MTI methods because it can be used on the fly whenever new seismic data for the same monitoring scenario is acquired.

## **METHODS TO AUTOMATE PROCESSES THAT ARE NORMALLY CARRIED OUT BY HAND**

We describe in this section two ML applications to automate seismic data processes that are usually carried out by hand: (1) automated well tying and phase estimation using DE (Gelpi, Pérez, and Velis 2020), and (2) automated velocity analysis using SA (Velis 2021). Both differential evolution (DE) and simulated annealing (SA) are stochastic optimization algorithms whose goal can be stated as: given a cost or objective function (any “function” or process that produces an output from a given input), find the global minimum regardless of the initial guess. Of the two methods considered, simulated annealing (SA) (Laarhoven and Aarts 1988 e.g.) mimics the process of annealing (i.e. slow cooling of metals until they reach the lowest energy state). Differential evolution (DE) (Storn and Price 1997), on the other hand, does not mimic any natural process, but borrows some concepts from genetic algorithms (GA), that do mimic a natural process (Darwin’s evolution).

Both DE and SA rely on some randomization to carry out the search, which is done in a clever way so that the model space (space of feasible solutions) can be explored without evaluating all feasible solutions. Unlike most non-stochastic optimization algorithms (e.g., steepest descent), they do not require derivatives, avoid local minima, perform well for ill-behaved functions, and allow for the incorporation of constraints easily. These key characteristics enable these algorithms to solve difficult optimization problems, such as those that arise in complex scenarios. For instance, for finding a set of parameters that control a number of processes applied to input data to achieve a desired goal, regardless of the complexity of the underlying processes. It is important to note, however, that the convergence of most stochastic optimization algorithms is not guaranteed and may be too slow, especially when the number of unknowns (parameters) is relatively large (“curse of dimensionality”). In the applications that follow, we show how relatively complex manual seismic processes can be emulated using DE and SA to improve efficiency and reduce user subjectivity.

### **Automated well tying and phase estimation using DE**

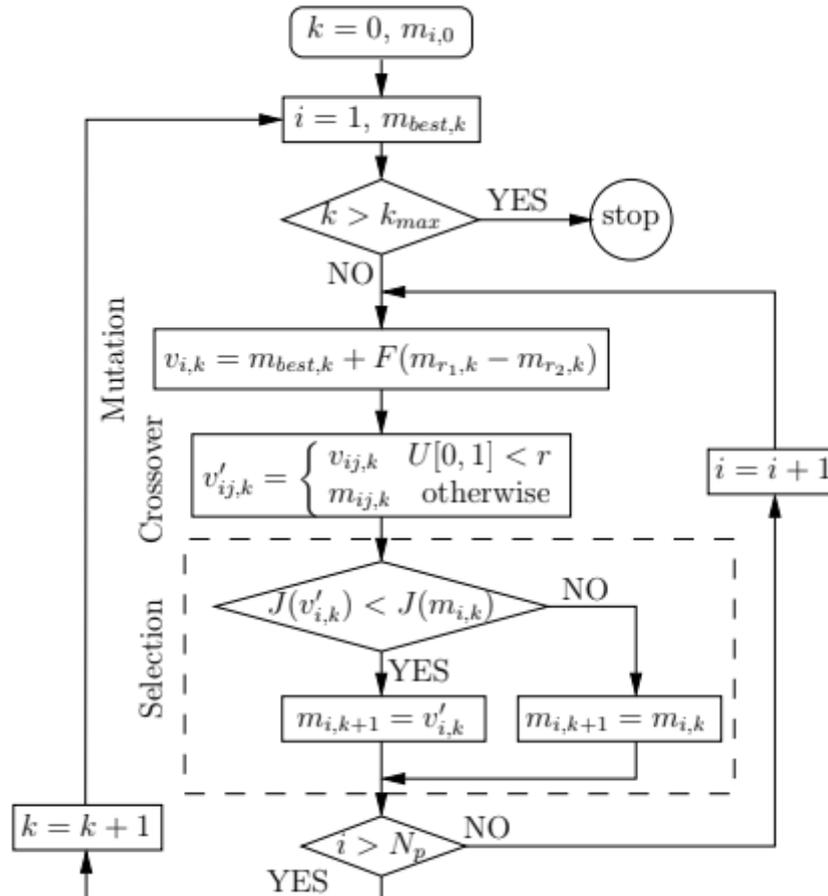
The goal of well-tying is to match the observed seismic data to the seismic trace obtained from well-log data (synthetic trace). This enables the linking of well-log information, such as geological units and formations, to seismic data, an important aspect of seismic data interpretation (Ziolkowski, Underhill, and Johnston 1998; Herron 2011; Simm and Bacon 2014 e.g.). This process is traditionally done by hand (trial-and-error) by adding bulk time shifts and phase rotations. Furthermore, some trace stretching and/or squeezing may be required at some points along the time scale to improve the match. This process, as expected, is inefficient and prone to inconsistencies because it is subject to the user’s subjectivity and the arbitrary selection of the parameters (Walden and White 1984; White and Simm 2003; Newrick 2012).

These issues highlight the need for automated or semi-automated methods to mimic the human process. One of these methods is dynamic time warping (DTW), which allows to attain high correlation values between the observed and synthetic traces (Herrera, Fomel, and Baan 2014; Muñoz and Hale 2015), but frequently comes at the expense of introducing some waveform distortions. In contrast, the proposed method iteratively modifies the log data (and the wavelet phase) to significantly increase the match without any waveform distortions (Gelpi, Pérez, and Velis 2020). The velocity log is perturbed (modified) by applying a function created by a monotonic cubic splines interpolator,  $p(z)$ , with a fixed number of knots  $M$ :

$$v_{mod}(z_i) = v_{obs}(z_i)[1 + p(z_i)], \quad (5)$$

with  $i = 1, M$ . The knots coordinates are regarded as the unknowns in a global optimization problem aimed at maximizing the aforementioned correlation. We solve this problem using DE. Further, the wavelet phase is included as an additional unknown to account for wavelet uncertainties.

*Differential evolution*



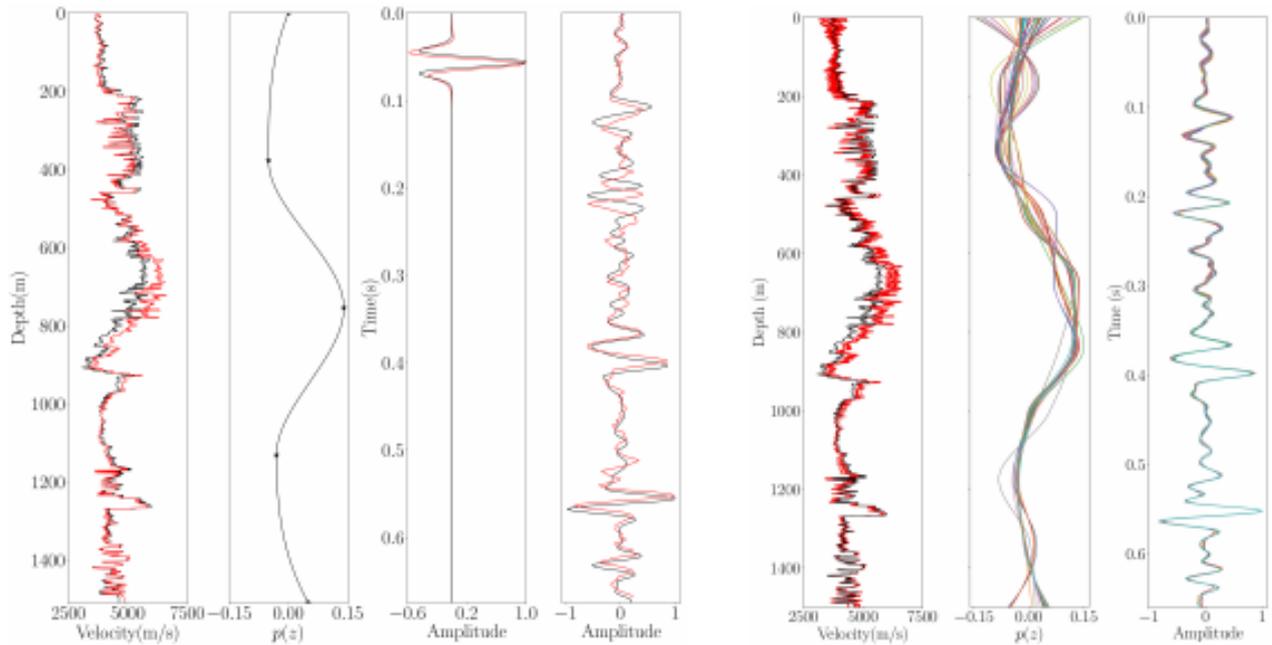
**Figure 12.** Flowchart of DE (used to automate the well-tying problem).  $m$  stands for model parameters (unknowns),  $J$  for cost function, and  $k$  for generation.

Figure 12 depicts a typical DE algorithm. The first step is to generate an initial population of  $N_p$  vectors  $m_{i,0}$ , where  $i = 1, \dots, N_p$ . Then, DE involves the following steps: mutation-recombination, crossover, and selection. Mutation refers to the process of expanding the search space, whereas recombination refers to the process of reusing previously successful individuals. Here,  $F$  is a preselected factor used to scale the difference between two randomly selected vector of the same generation  $k$ . Crossover is a type of discrete recombination in which trial vectors  $v'_{i,k}$  are created by randomly combining the components  $j$  of mutant and ordinary vectors ( $r$  is the crossover probability, set beforehand). Finally, selection mimics the survival of the fittest observed in the majority of natural phenomena. The number  $N_p$  is normally kept constant throughout the process, but there are no theoretical constraints on this. There are numerous DE variants, with the main difference being how the mutation stage is implemented.

*Examples*

First, we demonstrate the method with pseudo-synthetic data, in which we simulated the observed seismic trace using actual field well-log data and an *ad hoc* seismic wavelet. Figure 13, from left to right, shows the observed (black) and modified (red) velocity logs, the monotonic cubic splines with  $M$  knots  $p(z)$  function used to modify the observed velocity log, the zero-phase (black)

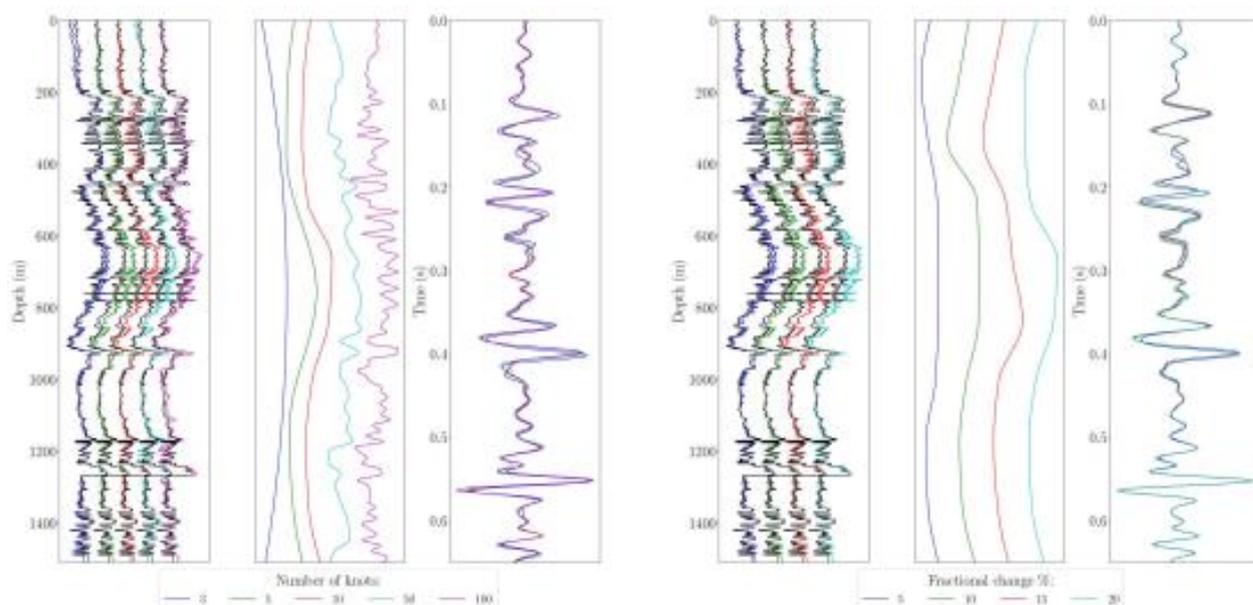
and  $-30^\circ$  (red) Ricker wavelets used to create the simulated data set, and the "observed" (red) and initial (black) traces. We constrain the knots to lie within a small range  $P$  around the actual values to avoid excessive well-log distortions.



**Figure 13.** Left: observed (black) and modified (red) velocity logs,  $p(z)$ , the zero-phase (black) and  $-30$  degrees (red) Ricker wavelets, and "observed" (red) and initial (black) traces. Right: Observed and modified velocity logs,  $p(z)$  curves, and traces after 100 realizations. In all cases,  $M = 10$ ,  $P = 15\%$ . Modified after (Gelpi, Pérez, and Velis 2020).

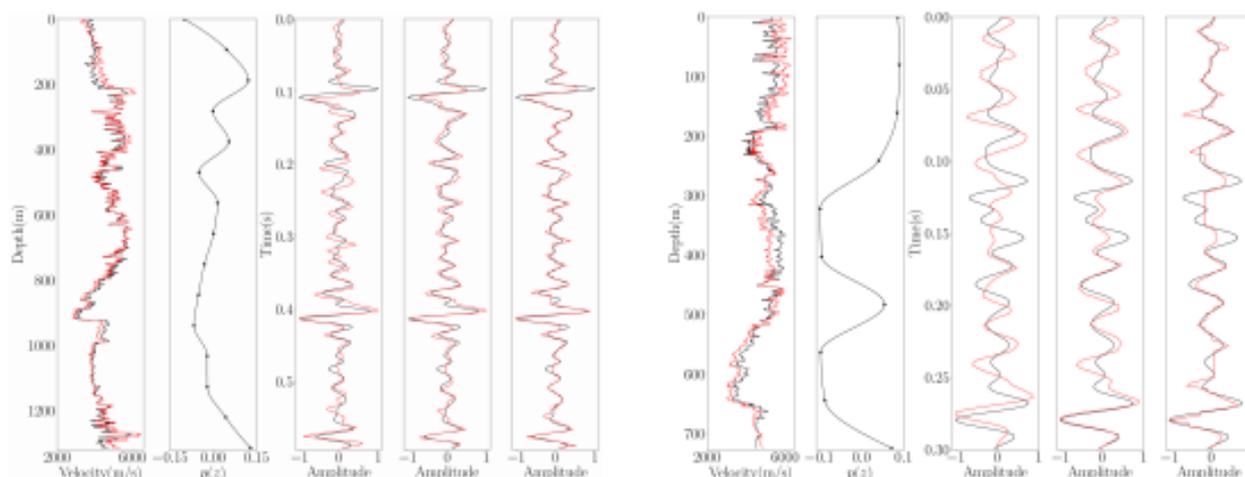
Since DE is a stochastic optimization algorithm, different solutions might be obtained for different runs. Figure 13 (right) shows the results for  $M = 10$  and  $P = 15\%$  after 100 realizations. Despite the fact that the individual solutions (splines) are not all that similar, the high consistency between the derived traces indicates that the DE convergence is high.

Figure 14 (left) shows the results for varying  $M$ , while keeping the well-log perturbations within  $\pm 15\%$ . Figure 14 (right) shows the results for varying perturbation range, while keeping the number of knots to  $M = 10$ . We observe a very high match in all cases. The most conservative solution would be the recommended. That is, the one that allows minimum well-log perturbations using a small number of knots, provided that the correlation is sufficiently high.



**Figure 14.** Left: fixed fractional change ( $P = 15\%$ ). Right: fixed number of knots ( $M = 10$ ). Modified after (Gelpi, Pérez, and Velis 2020).

Finally, we show two examples of field data using both field well-log and seismic data. Figure 15 (left) depicts the well-tying results for a field dataset with a moderate initial match between the observed and synthetic traces using manual tying, DE ( $M = 15$ ,  $P = 15\%$ ), and DTW. When we compare DE and DTW to manual tying, we see that these methods lead to a better match. In DE, there are no waveform distortions.



**Figure 15.** Field data examples. Observed (black) and modified (red) velocity logs,  $p(z)$ , observed (black) and synthetic (red) traces after manual tying, DE, and DTW. Left: field data example 1 ( $M = 15$ ,  $P = 15\%$ ). Right: field data example 1 ( $M = 10$ ,  $P = 10\%$ ). Modified after (Gelpi, Pérez, and Velis 2020).

A similar pattern can be seen in the second field data example (Figure 15). The original match between the observed and synthetic traces was very low in this case. Furthermore, because the time window is so short, we use a more conservative parameter selection in DE:  $M = 10$ ,  $P = 10\%$ . The distortions caused by DTW are more visible. As in the previous example, DE and DTW achieve a higher correlation than manual well-tying.

For the sake of completeness, Figure 16 depicts the initial and final wavelets for both field data examples. The zero-phase initial wavelet was estimated from the input traces using a conventional statistical approach.

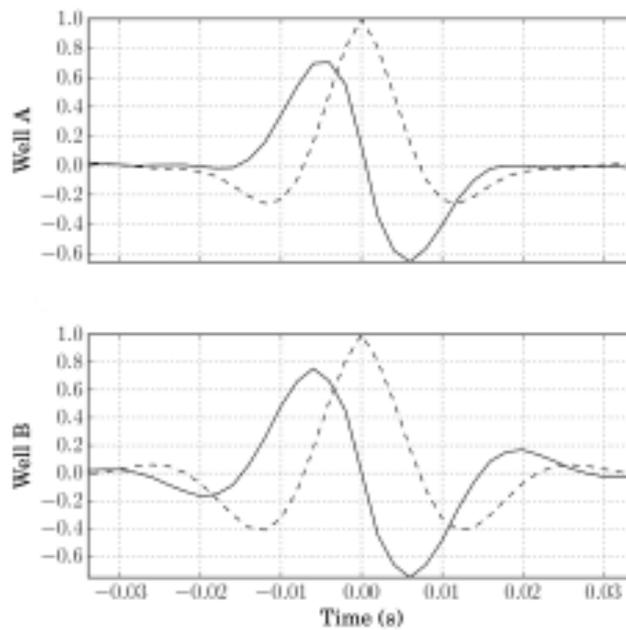


Figure 16. Zero-phase wavelet (dashed) and estimated phase rotated (solid) wavelet for the field data example 1 (top) and 2 (bottom). Modified after (Gelpi, Pérez, and Velis 2020).

### Conclusions

When monotonic cubic splines are used to perturb the observed velocity log, controlled velocity changes occur, ensuring that the measured borehole observations are respected within the desired tolerance. The method is stable and consistent, especially when the parameters (number of knots and maximum allowable velocity change) are chosen conservatively. Unlike the manual or DTW approaches, the trace is not stretched or squeezed at any point during the tying process, allowing the wavelet shape to be preserved.

### Automated velocity analysis using SA

In seismic processing, velocity analysis entails calculating the velocities required to flatten the reflections of a CDP-gather prior to stacking (Yilmaz 2001 e.g.). The most common method is to create a velocity spectrum (e.g., semblance) and then manually select the maxima associated with primary reflections. To do so, the analyst visually inspects all potential local maxima (along with their associated hyperbolic patterns) relevant to the velocity analysis at hand. The brain performs this process almost effortlessly and instantly, assessing the evidence of a certain relationship between the local maxima and the actual primary reflections using all a priori information (rules) previously built based on past experiences and learning. Prior knowledge includes the facts that normal-moveout velocity  $V_{nmo}(t)$  must be within a certain range and increases with increasing two-way time  $t$ . Furthermore, only a few events (reflections) will be chosen, they will not be too close together, and maxima associated with multiples or that are negligible should be ignored.

Subjectivity can have a negative impact on the velocity analysis results, in the same way that it is important in the well-tying process. Furthermore, the picking process can be very time-consuming, taking days to process an entire dataset. There are a number of approaches to automating the velocity analysis problem and mitigating these problems (Abbad, Ursin, and Rappin 2009; Fortini et al. 2013; Garabito 2018; Abassi and Gholami 2018; Chen 2018; Sripanich et al. 2020; Park and Sacchi 2020). Most of these methods still necessitate a significant amount of user intervention, the tuning of many parameters, or are only applicable in certain scenarios (for example they assume that the primary main events are previously identified, or that the time trajectories are hyperbolic).

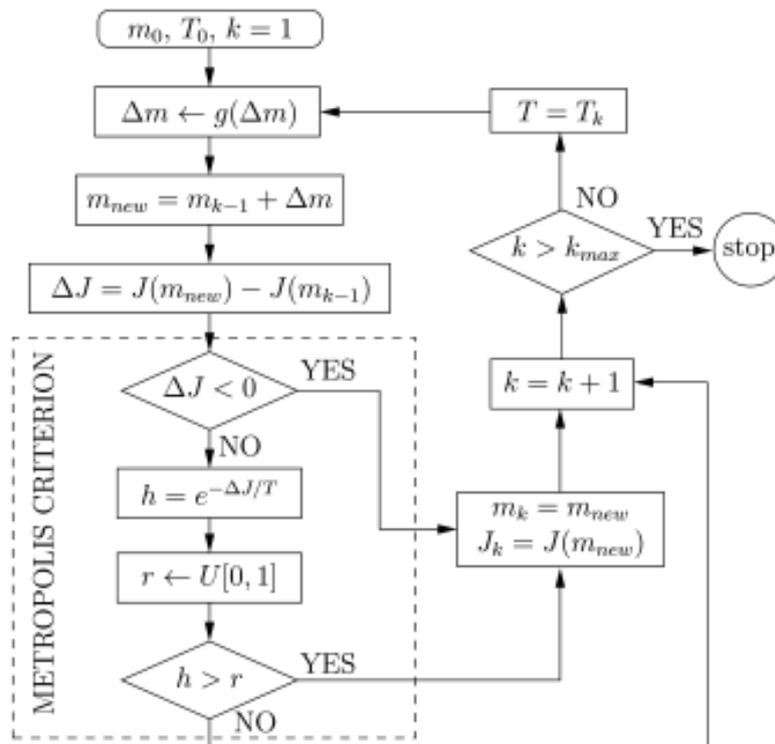
We devised a strategy to overcome these constraints (Velis 2021). In an attempt to mimic the analyst picking process, we propose an automatic technique that incorporates the aforementioned rules via constraints into a nonlinear optimization problem. The method is applicable to both hyperbolic and non-hyperbolic trajectories. In the first case, we minimize the following cost function using very fast simulated annealing (Ingber 1989):

$$J = 1 - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sigma_i(t_0^i, V_{nmo}^i), \quad (6)$$

where  $\sigma_i$  is the semblance (or any other normalized coherence measure) computed along the  $i$ -th hyperbolic event (we consider  $M$  events) defined by the corresponding  $(t_0^i, V_{nmo}^i)$  pair. Because all of the aforementioned rules must be met, appropriate dynamic and static constraints are incorporated into the optimization problem, as described by (Velis 2021). Note that the method boils down to finding a piecewise linear curve with  $M$  nodes ( $2 \times M$  unknowns), such that  $J$  is minimum and all the constraints are satisfied.

Assuming hyperbolic events leads to incomplete flattening in the nonhyperbolic case. As a result, we must consider a third parameter,  $\eta_i$ , which is usually associated with anisotropy or large offsets. As a result, now the optimization problem entails locating a piecewise line in a 3D space, and the number of unknowns increases to  $3 \times M$ . For convenience, we first assume hyperbolic events and find the picks using only near offsets. These picks are then used as an initial guess for the second step, which involves all three parameters as well as the entire CDP at the same time.

*Very fast simulated annealing*



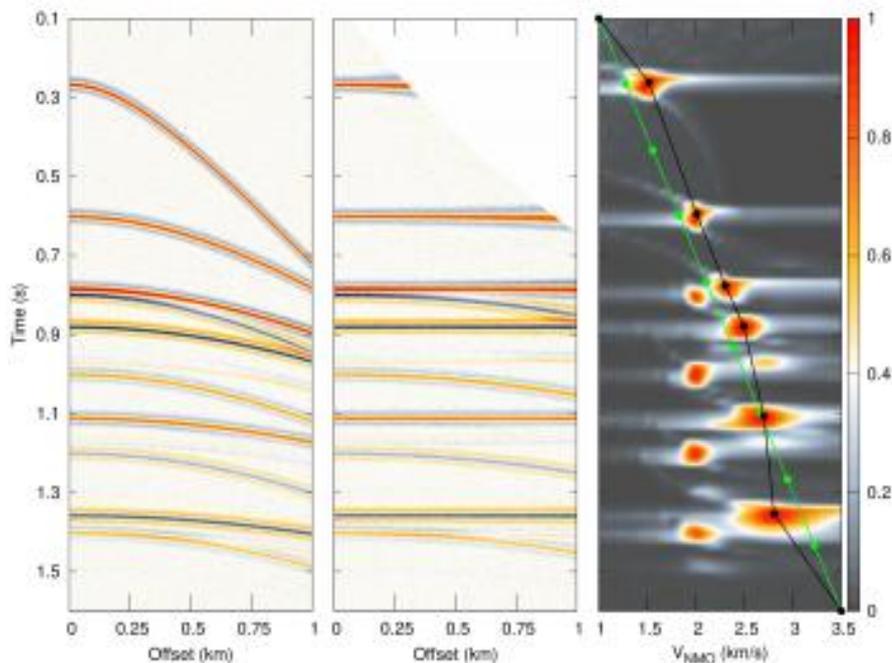
**Figure 17.** Flowchart of VFSA (used to automate the velocity analysis problem).  $m$  stands for model parameters (unknowns),  $J$  for cost function, and  $k$  for iteration. Modified after (Velis 2021).

Figure 17 depicts the utilized VFSA algorithm (Ingber 1989), which is a variation of the SA optimization algorithm proposed by (Kirkpatrick, Gellat, and Vecchi 1983). To generate model perturbations  $\Delta m$  at each iteration  $k$ , VFSA uses a long-tailed Cauchy-like distribution  $g(\Delta m)$ . This enables for the use of a fast cooling schedule  $T_k$  to accelerate convergence while still allowing

for a broad search of the model space at low temperatures, avoiding local minima.  $T = T_0 \exp(ck^{Q/N_p})$  is used in practice, where  $T_0$  is the initial temperature,  $N_p$  is the number of unknowns,  $Q$  is a quenching factor ranging from 1 to  $N_p$ , and  $c$  is a user-defined parameter. VFSA's statistical convergence is guaranteed if  $Q = 1$ , regardless of  $T_0$  and  $c$ . The so-called Metropolis criterion involves assigning a probability  $h > 0$  to uphill moves, which is essential for avoiding local minima.

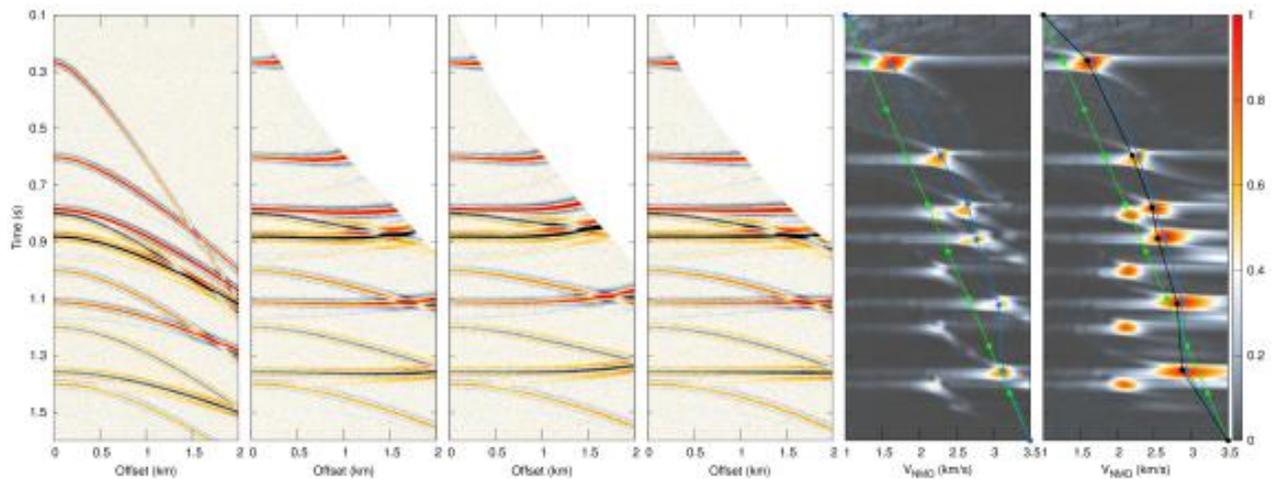
### Examples

The velocity analysis problem is depicted in Figure 18. A few hyperbolic events, as well as some multiples, are included in the synthetic CDP-gather. We choose six inner nodes by hand, resulting in a velocity law that flattens the primary reflections (center panel). After solving the described constrained nonlinear optimization problem, SA yields the same result.



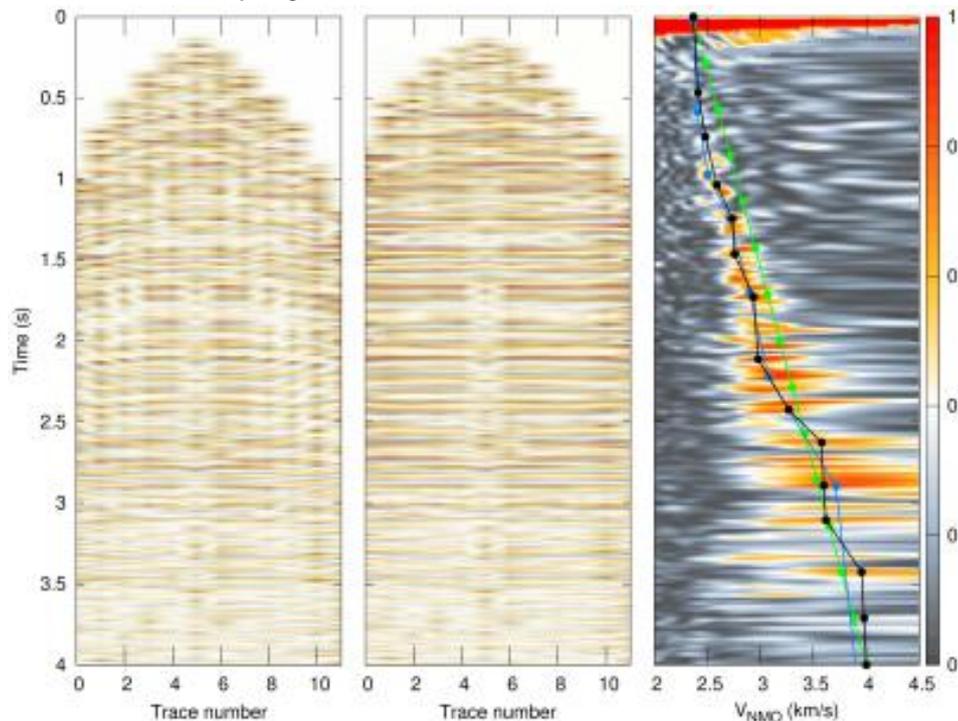
**Figure 18.** Synthetic gather with hyperbolic events and multiples, NMO-corrected gather, and velocity spectrum (initial picks in green manual/SA in black). Modified after (Velis 2021).

Figure 19 shows an example where the hyperbolic assumption is violated (second panel). In this case, the proposal involves two steps. First, we find the picks  $(t_0^i, V_{nmo}^i)$  by assuming hyperbolic trajectories and employing only near offsets (third and fifth panels). Then, using the previous picks as an initial guess and all offsets, we obtain the final picks  $(t_0^i, V_{nmo}^i, \eta_i)$  to flatten the nonhyperbolic events (fourth and sixth panels).

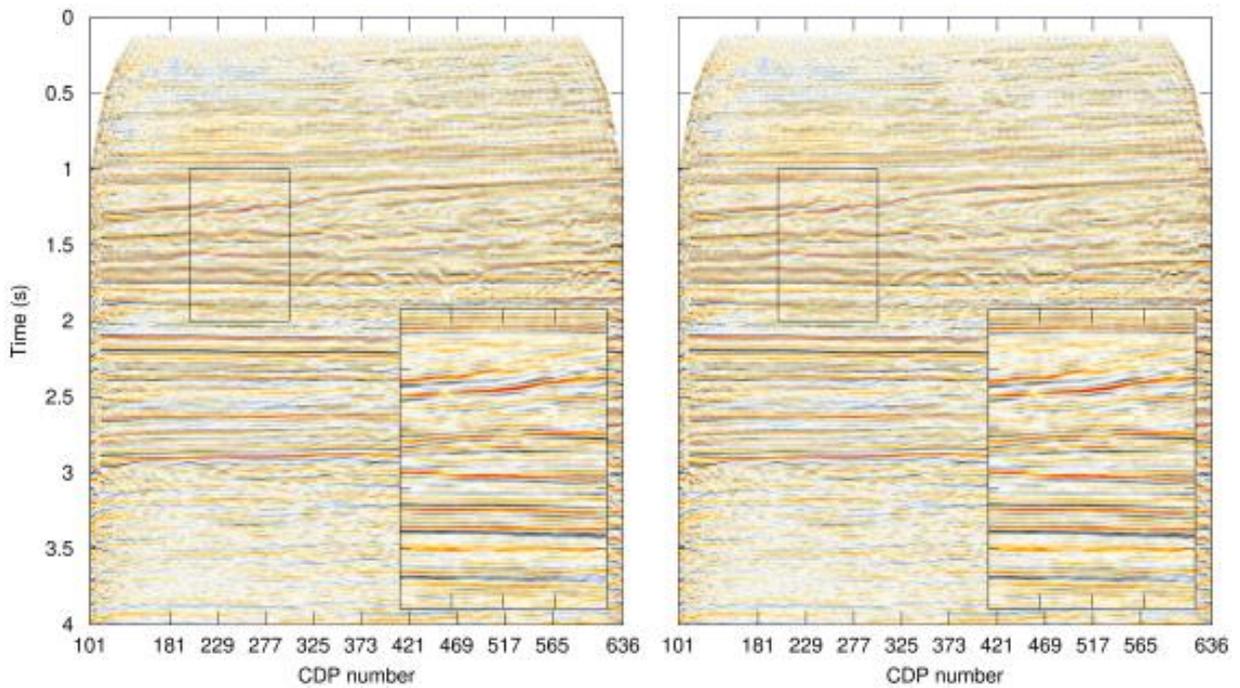


**Figure 19.** Synthetic gather with nonhyperbolic events and multiples, hyperbolic NMO-corrected gather using all offsets, hyperbolic NMO-corrected gather using near offsets, nonhyperbolic NMO-corrected gather, velocity spectrum (all offsets), velocity spectrum (near offsets): initial (green), SA hyperbolic (blue), SA nonhyperbolic (black). Modified after (Velis 2021).

The next example considers the well-known Alaska dataset (line 31-81). The line contains 535 CDPs (5280 traces) with folds in the range 9 to 12, a maximum offset distance of 1600 m, and a sampling interval of 2 ms. One of such CDPs is shown in the Figure 20, together with the NMO-corrected gather after the SA velocity analysis. Figure 21 shows the corresponding stack after manual picking and SA. In this case, we considered 9 out of 535 CDPs, only. The remaining velocity laws were obtained, as usual, through interpolation in the offset dimension. The match between the two sections is very high.

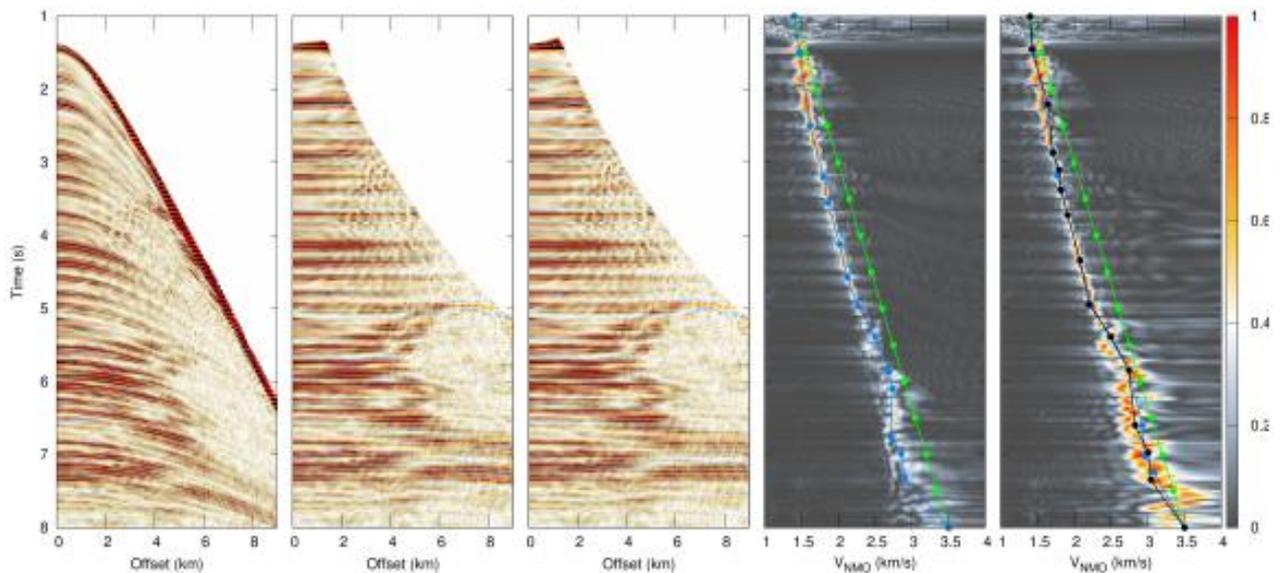


**Figure 20.** Alaska example. CDP #229 (line 31-81), NMO-corrected gather using SA picks, velocity spectrum: manual (blue), initial (green), SA (black). Modified after (Velis 2021).

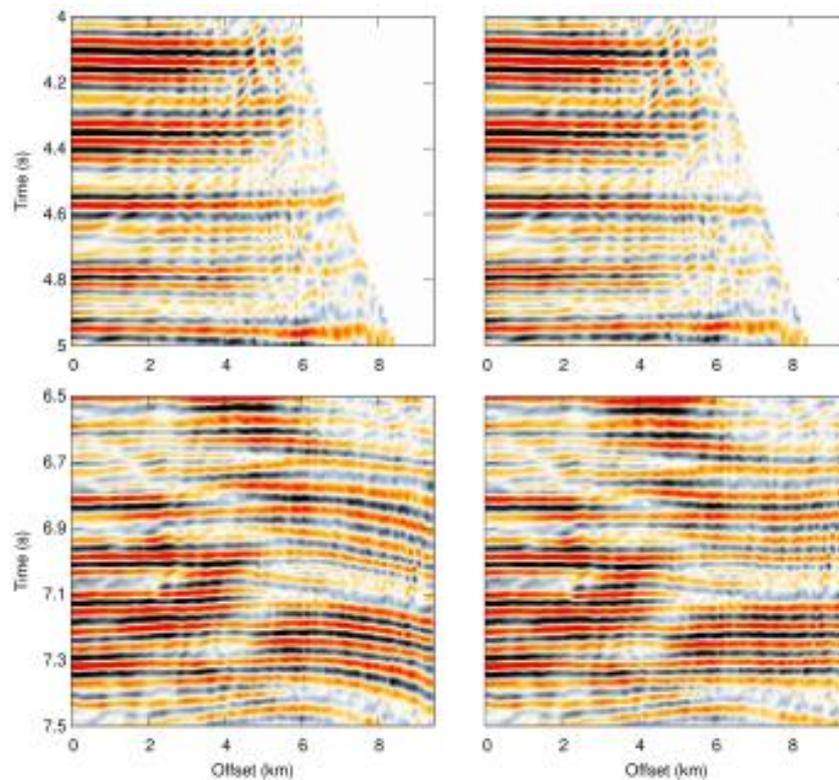


**Figure 21.** Alaska example. Stack using manual (left) and SA (right) picks. Modified after (Velis 2021).

The next example considers a CDP (SEG’s 2007 anisotropic benchmark dataset) that contains nonhyperbolic events and large offsets. The results are shown in Figure 22. The procedure follows the same strategy as in the synthetic example in Figure 19: we start by selecting events based on the hyperbolic assumption and only using near offsets. These preliminary picks are then used as an initial guess for the second stage, which takes into account nonhyperbolic trajectories and all offsets to achieve a better flattening of primary events. Figure 23 depicts zoomed-in areas to help visualize the results.



**Figure 22.** Anisotropic benchmark example. CDP #8010, hyperbolic NMO-corrected gather, nonhyperbolic NMO-corrected gather, velocity spectrum (all offsets), velocity spectrum (near offsets): initial (green), SA hyperbolic (blue), SA nonhyperbolic (black). Modified after (Velis 2021).



**Figure 23.** Anisotropic benchmark example. Details of the NMO-corrected gather: hyperbolic (top), nonhyperbolic (bottom). Modified after (Velis 2021).

### Conclusions

The SA velocity analysis is carried out by searching for semblance maxima along piecewise linear curves with an unknown number of nodes representing the picks. With VFSA and appropriate constraints, the search can be completed quickly, allowing for the incorporation of a priori information to avoid meaningless picks and multiple reflections, and to guide the search towards a solution that resembles manual picking to some extent.

### FINAL REMARKS

Seismic data analysis involves several complex processes and problems that can be solved using different techniques. The ever-increasing size of seismic data sets, combined with the industry's demands for shorter turnarounds, makes machine learning techniques very appealing. As a result, many traditional methods are being superseded by machine learning approaches that frequently yield results with fewer model assumptions and are less reliant on user supervision. Our ultimate goal is to make seismic data interpretation easier, faster, and more accurate. The algorithms we reviewed follow these guidelines.

### REFERENCES

- Abassi, Mostafa, and Ali Gholami. 2018. "Automatic Nonhyperbolic Velocity Analysis by Polynomial Chaos Expansion." *Geophysics* 86 (6): no. 6, U79–U88.
- Abbad, Brahim, Bjørn Ursin, and Didier Rappin. 2009. "Automatic Nonhyperbolic Velocity Analysis." *Geophysics* 74 (2): no. 2, U1–U12.
- Alali, Abdulmohsen, Gabriel Machado, and Kurt J. Marfurt. 2018. "Attribute-Assisted Footprint Suppression Using a 2D Continuous Wavelet Transform." *Interpretation* 6 (2): T457–T470. <https://doi.org/10.1190/INT-2017-0175.1>.

- Baig, Adam, and Ted Urbancic. 2010. "Microseismic moment tensors: A path to understanding frac growth." *The Leading Edge* 29 (3): 320–24.
- Beckouche, Simon, and Jianwei Ma. 2014. "Simultaneous Dictionary Learning and Denoising for Seismic Data." *Geophysics* 79 (3): no. 3, A27–A31. <https://doi.org/10.1190/geo2013-0382.1>.
- Bennett, James, Stan Lanning, and others. 2007. "The Netflix Prize." In *Proceedings of Kdd Cup and Workshop, 2007*:35. New York, NY, USA.
- Binder, Gary. 2018. "Neural Networks for Moment-Tensor Inversion of Surface Microseismic Data." In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2018*, 2917–21. Society of Exploration Geophysicists.
- Bougher, Benjamin Bryan. 2016. "Machine Learning Applications to Geophysical Data Analysis." PhD thesis, University of British Columbia.
- Brunini, Germán I., Danilo R. Velis, and Juan I. Sabbione. 2021. "Seismic Moment Tensor Inversion in Anisotropy Media Using Deep Neural Networks." In *Anales*, 5 pages. San Juan, Argentina.
- Chen, Yangkang. 2018. "Automatic Velocity Analysis Using High-Resolution Hyperbolic Radon Transform." *Geophysics* 83 (4): no. 4, A53–A57.
- Chopra, Satinder, and Glen Larsen. 2000. "Acquisition Footprint—Its Detection and Removal." *CSEG Recorder* 25 (8): 16–20.
- Davis, L., ed. 1987. *Genetic Algorithms and Simulated Annealing*. Los Altos, CA: Morgan Kaufmann Publishers.
- Drummond, J. M., Arthur J. L. Budd, and James W. Ryan. 2000. "Adapting to Noisy 3D Data - Attenuating the Acquisition Footprint." *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 9–12. <https://doi.org/10.1190/1.1816247>.
- Elad, Michael. 2010. *Sparse and Redundant Representations: From Theory to Applications in Signal and Image Processing*. Springer Science & Business Media.
- Falconer, Scott, and Kurt J. Marfurt. 2008. "Attribute-Driven Footprint Suppression." *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2667–71. <https://doi.org/10.1190/1.3063897>.
- Fortini, Carlo, Davide Maggi, Vincenzo Lipari, and Maurizio Ferla. 2013. "Particle Swarm Optimization for Seismic Velocity Analysis." In *Expanded Abstracts*, 4864–8. SEG.
- Garabito, German. 2018. "Global Optimization Strategies for Implementing 3D Common-Reflection-Surface Stack Using the Very Fast Simulated Annealing Algorithm: Application to Real Land Data." *Geophysics* 83 (4): no. 4, V253–V261.
- Gelpi, Gabriel, Daniel O. Pérez, and Danilo R. Velis. 2020. "Automatic Well Tying and Wavelet Phases Estimation with No Waveform Stretching or Squeezing." *Geophysics* 85 (3): D83–D91.
- Goldberg, D. E., ed. 1989. *Genetics Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Gómez, Julián L., and Danilo R. Velis. 2020. "Footprint Removal from Seismic Data with Residual Dictionary Learning." *Geophysics* 85 (4): V355–V365. <https://doi.org/10.1190/geo2019-0482.1>.
- Goodfellow, Ian, Yoshua Bengio, and Aaron Courville. 2016. *Deep Learning*. MIT press.
- Grechka, Vladimir. 2015. "On the Feasibility of Inversion of Single-Well Microseismic Data for Full Moment Tensor." *Geophysics* 80 (4): KS41–KS49.
- Grechka, Vladimir, and Werner M. Heigl. 2017. *Microseismic Monitoring*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK. <https://doi.org/10.1190/1.9781560803485>.
- Grechka, Vladimir I. 2015. "Moment Tensor Inversion of Single-Well Microseismic Data: Is It Feasible?" In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2015*, 2506–11. Society of Exploration Geophysicists.
- Gülünay, Necati. 1999. "Acquisition Geometry Footprints Removal." *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 637–40. <https://doi.org/10.1190/1.1821103>.

- Gülünay, Necati, F. Martin, and R. Martinez. 1994. "3D Data Acquisition Artifacts Removal by Spot Editing in the Spatial-Temporal Frequency Domain." *56th Annual International Conference and Exhibition, EAGE, Extended Abstracts, H049*.
- Herrera, H., S. Fomel, and M. van der Baan. 2014. "Automatic Approaches for Seismic to Well Tying." *Interpretation 2* (2): SD101–SD109.
- Herron, D. 2011. *First Steps in Seismic Interpretation*. Society of Exploration Geophysicists. <https://doi.org/10.1190/1.9781560802938>.
- Ingber, L. 1989. "Very Fast Simulated Re-Annealing." *Journal of Mathematical Computation and Modelling* 12: 967–73.
- Kirkpatrick, S., C. D. Jr. Gellat, and M. P. Vecchi. 1983. "Optimization by Simulated Annealing." *Science* 220: 671–80.
- Laarhoven, P. I. M. van, and E. H. L. Aarts. 1988. *Simulated Annealing: Theory and Applications*. Dordrecht: D. Riedel.
- Li, Chengbo, Yu Zhang, and Charles C. Mosher. 2019. "A Hybrid Learning-Based Framework for Seismic Denoising." *The Leading Edge* 38 (7): 542–49. <https://doi.org/10.1190/tle38070542.1>.
- Mallat, Stephane. 1999. *A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way*. 3rd ed. Academic Press.
- Marfurt, Kurt J., Ronald M. Scheet, John A. Sharp, and Mark G. Harper. 1998. "Suppression of the Acquisition Footprint for Seismic Sequence Attribute Mapping." *Geophysics* 63 (3): 1024–35. <https://doi.org/10.1190/1.1444380>.
- Muñoz, A., and D. Hale. 2015. "Automatic Simultaneous Multiple Well Ties." *Geophysics* 80 (8): IM45–IM51.
- Newrick, R. 2012. *Well Tie Perfection - 52 Things You Should Know About Geophysics*. Agile Libre.
- Ovcharenko, Oleg, Jubran Akram, and Daniel Peter. 2018. "Feasibility of Moment Tensor Inversion from a Single Borehole Data Using Artificial Neural Networks." *Search and Discovery*.
- Park, Min Jun, and Mauricio D. Sacchi. 2020. "Automatic Velocity Analysis Using Convolutional Neural Network and Transfer Learning." *Geophysics* 85 (1): no. 1, V33–V43. <https://doi.org/10.1190/geo2018-0870.1>.
- Qadrouh, AN, JM Carcione, M Alajmi, and MM Alyousif. 2019. "A Tutorial on Machine Learning with Geophysical Applications." *Bollettino Di Geofisica Teorica Ed Applicata* 60 (3).
- Sahai, Surinder K, and Khalid A Soofi. 2006. "Use of Simple 2-D Filters to Reduce Footprint Noise in Seismic Data." *Geohorizons* 7: 14–17.
- Samuel, Arthur L. 1959. "Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers." *IBM Journal of Research and Development* 3 (3): 210–29.
- Simm, R., and M. Bacon. 2014. "Seismic Amplitude: An Interpreter's Handbook." In. Cambridge University Press.
- Soubaras, Robert. 2002. "Attenuation of Acquisition Footprint for Non-Orthogonal 3D Geometries." *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2142–5. <https://doi.org/10.1190/1.1817129>.
- Sripanich, Yanadet, Sergey Fomel, Jeannot Trampert, William Burnett, and Thomas Hess. 2020. "Probabilistic Moveout Analysis by Time Warping." *Geophysics* 85 (1): no. 1, U1–U20.
- Storn, R., and K. Price. 1997. "Differential Evolution – a Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces." *Journal of Global Optimization* 11: 341–59.
- Tošić, Ivana, and Pascal Frossard. 2011. "Dictionary Learning: What Is the Right Representation for My Signal?" *IEEE Signal Processing Magazine* 28 (2): 27–38.
- Turquais, Pierre, Endrias G. Asgedom, and Walter Söllner. 2017a. "A Method of Combining Coherence-Constrained Sparse Coding and Dictionary Learning for Denoising." *Geophysics* 82 (3): V137–V148. <https://doi.org/10.1190/geo2016-0164.1>.
- . 2017b. "Coherent Noise Suppression by Learning and Analyzing the Morphology of the Data." *Geophysics* 82 (6): V397–V411. <https://doi.org/10.1190/geo2017-0092.1>.

- Vavryčuk, Václav, and Daniela Kühn. 2012. "Moment Tensor Inversion of Waveforms: A Two-Step Time-Frequency Approach." *Geophysical Journal International* 190 (3): 1761–76.
- Velis, Danilo R. 2021. "Simulated Annealing Velocity Analysis: Automating the Picking Process." *Geophysics* 86 (6).
- Walden, A. T., and R. E. White. 1984. "On Errors of Fit and Accuracy in Matching Synthetic Seismograms and Seismic Traces." *Geophysical Prospecting* 32: 871–91.
- Wamriew, Daniel Stephen, Marwan Charara, Evgenii Maltsev, and others. 2020. "Deep Neural Network for Real-Time Location and Moment Tensor Inversion of Borehole Microseismic Events Induced by Hydraulic Fracturing." In *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Society of Petroleum Engineers.
- White, R., and R. Simm. 2003. "Tutorial: Good Practice in Well Ties." *EAGE First Break* 21: 75–83.
- Yilmaz, Özdoğan. 2001. *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*. Investigations in Geophysics. SEG.
- Ziolkowski, A., J. R. Underhill, and R. G. K. Johnston. 1998. "Wavelets, Well Ties, and the Search for Subtle Stratigraphic Traps." *Geophysics* 63 (1): P297–P313.
- Zu, Shaohuan, Hui Zhou, Rushan Wu, Maocai Jiang, and Yangkang Chen. 2019. "Dictionary Learning Based on Dip Patch Selection Training for Random Noise Attenuation." *Geophysics* 84 (3): V1–V15. <https://doi.org/10.1190/geo2018-0596.1>.

## MISTERIOS Y RAREZAS DEL FINAL DEL PRECÁMBRICO: UN ENFOQUE PALEOMAGNÉTICO

**Augusto E. Rapalini**

*Laboratorio de Paleomagnetismo Daniel A. Valencio, Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires (IGEBA), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires – CONICET  
rapalini@gl.fcen.uba.ar*

### RESUMEN

El Ediacarano (o Ediacárico) es el período terminal del Precámbrico, extendiéndose desde los 635 hasta los 541 millones de años (Ma). Durante ese lapso el planeta parece haber experimentado una serie de eventos y procesos extraordinariamente singulares, cuya real existencia y características detalladas son motivo de numerosos debates y controversias. Algunos de los acontecimientos que con mayor o menor certeza se investigan, discuten y analizan en la actualidad son: 1) la aparición de la primera biota compleja de organismos multicelulares de la historia de la Tierra pero que no dejaría sucesores en el Fanerozoico; 2) la mayor excursión isotópica de  $\delta^{13}\text{C}$  de la historia del planeta (excursión Shuram) y su relación con la evolución de los océanos; 3) la existencia de una glaciación que alcanzó bajas latitudes (glaciación Gaskiers) y sus impactos paleoambientales globales; 4) La cronología y cinemática de la ruptura final del supercontinente Rodinia y de la subsecuente formación del Gondwana; 5) la existencia de desplazamientos polares verdaderos muy veloces y de cerca de  $90^\circ$  por intercambio de los ejes de inercia del planeta; 6) la posibilidad de que los polos magnéticos estuvieran ubicados durante largos lapsos en el ecuador; 7) un campo magnético ultradébil, con la menor paleointensidad registrada; 8) un campo magnético hiperactivo, con la máxima frecuencia de reversiones de polaridad conocida; 9) el posible inicio de la formación del núcleo interno y el subsecuente cambio en la modalidad de la geodínamo terrestre; entre varios más. A través de estudios paleomagnéticos sistemáticos es posible aportar información muy valiosa para resolver muchos de estos interrogantes. Desde hace dos décadas, en el Laboratorio de Paleomagnetismo Daniel A. Valencio del IGEBA venimos desarrollando estudios multidisciplinarios sistemáticos en rocas sedimentarias y volcánicas ediacaranas del cratón del Río de la Plata. Estas investigaciones se nutren de una colaboración estrecha y continua con colegas de otros grupos de investigación de Argentina, Brasil y Uruguay. Los estudios incluyen principalmente investigaciones paleomagnéticas con el fin de reconstruir la evolución paleogeográfica del cratón en el Ediacarano y aportar a conocer la cinemática de la formación del Gondwana. Recientemente estamos también avanzando en el conocimiento de las reversiones de polaridad del paleocampo magnético en el Ediacarano tardío. Dataciones geocronológicas precisas, estudios isotópicos sistemáticos y recientes hallazgos fósiles espectaculares, sumados a la información paleomagnética, están aumentando significativamente nuestro conocimiento de un período hasta hace dos décadas casi desconocido. Estos avances incluyen una reconstrucción esquemática de la evolución paleogeográfica del cratón del Río de la Plata entre aproximadamente 600 y 550 Ma, durante el cual el mismo habría migrado desde bajas a altas latitudes. Con esta información y la de otros cratones de Gondwana Occidental están surgiendo restricciones a las edades de anexión con Congo-São Francisco y África Occidental. También permiten especular con mayor sustento observacional sobre la posible existencia (o no) de un gran océano llamado Clymene en etapas

finales de formación del Gondwana. El probable registro de la excursión Shuram en sedimentos calcáreos del cratón es una posibilidad concreta a medida que avanzan los estudios quimioestratigráficos. Si bien aún de modo incipiente, los primeros resultados magnetoestratigráficos que estamos obteniendo sugieren la aparente presencia de rápidas reversiones de polaridad. Esta sucesión de nuevos resultados marca límites a ciertos modelos o propuestas no actualistas mientras que es compatible con otros, abriendo un importante número de nuevos interrogantes. En este trabajo se presenta un breve resumen del conocimiento actual a nivel global de muchas de estas controversias, así como del avance de las investigaciones en nuestro país.

**PALABRAS CLAVES: HISTORIA DE LA TIERRA; PALEOMAGNETISMO; PERIODO PRECAMBRICO**

### **ABSTRAC**

The Ediacaran (or Ediacaran) is the terminal period of the Precambrian, extending from 635 to 541 million years ago (Ma). During this period the planet appears to have experienced a series of extraordinarily singular events and processes, whose actual existence and detailed characteristics are the subject of much debate and controversy. Some of the events that are more or less certainly investigated, discussed and analyzed at present are: 1) the appearance of the first complex biota of multicellular organisms in Earth's history but which would leave no successors in the Phanerozoic; 2) the largest  $\delta^{13}\text{C}$  isotopic excursion in the history of the planet (Shuram excursion) and its relationship with the evolution of the oceans; 3) the existence of a glaciation that reached low latitudes (Gaskiers glaciation) and its global paleoenvironmental impacts; 4) the chronology and kinematics of the final rupture of the supercontinent Rodinia and the subsequent formation of Gondwana; 5) the possibility of very fast true polar displacements of about  $90^\circ$  by exchange of the inertial axes of the planet; 6) the possibility that the magnetic poles were located for long periods at the equator; 7) an ultraweak magnetic field, with the lowest paleointensity on record; 8) a hyperactive magnetic field, with the maximum frequency of known polarity reversions; 9) the possible beginning of the formation of the Internal nucleus and the subsequent change in the mode of the terrestrial geodynamo; and many more. Through systematic paleomagnetic studies it is possible to provide valuable information to resolve many of these questions. For two decades, in the Daniel A. Valencio Paleomagnetism Laboratory of the IGEBA we have been developing systematic multidisciplinary studies in sedimentary and volcanic Ediacaran rocks of the Río de la Plata craton. These investigations are nurtured by a close and continuous collaboration with colleagues from other research groups in Argentina, Brazil and Uruguay. The studies include mainly paleomagnetic investigations in order to reconstruct the paleogeographic evolution of the Ediacaran craton and to contribute to understand the kinematics of the formation of Gondwana. Recently we are also advancing in the knowledge of the polarity reversions of the magnetic paleofield in the late Ediacaran. Accurate geochronological dating, systematic isotopic studies and recent spectacular fossil finds, in addition to paleomagnetic information, are significantly increasing our knowledge of a period that until two decades ago was almost unknown. These advances include a schematic reconstruction of the paleogeographic evolution of the La Plata River craton between approximately 600 and 550 Ma, during which time it would have migrated from low to high latitudes. With this information and that of other West Gondwana cratons, constraints on the ages of annexation with Congo-São Francisco and West Africa are emerging. They also allow speculation with more observational support on the possible existence (or not) of a big ocean called Clymene in late stages of Gondwana formation. The probable record of the Shuram excursion in calcareous sediments of the craton is a concrete possibility as chemostratigraphic studies progress. Although still incipient, the first magnetostratigraphic results we are obtaining

suggest the apparent presence of rapid polarity reversions. This succession of new results marks limits to certain models or non-current proposals while it is compatible with others, opening an important number of new questions. In this paper we present a brief summary of the current global knowledge of many of these controversies, as well as the progress of research in our country.

**KEYWORDS: HISTORY OF THE EARTH; PALEOMAGNETISM; PRECAMBRIAN PERIOD**

## INTRODUCCIÓN

El Precámbrico constituye aproximadamente el 88% de la historia de la Tierra. Comprende desde la formación de nuestro planeta hace unos 4550 millones de años (Ma) hasta la denominada “explosión cámbrica” hace 541 Ma (ej. Marshall, 2006, Briggs, 2015 y referencias ahí citadas). Este enorme lapso ha sido subdividido en tres grandes eones (Gradstein et al., 2020): Hadeano (hasta los 4000 Ma), Arqueano (entre 4000 y 2500 Ma) y Proterozoico (entre 2500 y 541 Ma). El último período del Proterozoico es conocido como Ediacarano (o Ediacárico) y sus límites están establecidos entre 635 Ma y 541 Ma (Xiao y Narbonne, 2020). El inicio está determinado por la finalización de la última glaciación global, llamada “Marinoan”, que habría afectado latitudes ecuatoriales y ha sido interpretada como un evento de varios millones de años en que la Tierra estuvo mayormente cubierta de hielo (“Snowball Earth”, Hoffman et al., 1998; Prave et al., 2016). A la fecha mucho se ha avanzado en el conocimiento del Ediacarano en aspectos paleontológicos, estratigráficos, geocronológicos, paleogeográficos y paleoambientales (véase Xiao y Narbonne, 2020, para un resumen actualizado). Sin embargo, a medida que más y mejor información es extraída del registro geológico de este período, más y mayores peculiaridades aparecen, sugiriendo que estamos en presencia de un lapso extraordinariamente particular de la historia de nuestro planeta. En los próximos apartados se presenta una reseña muy sucinta de varias de estas “rarezas y misterios”, algunas de las principales controversias suscitadas y algunos avances logrados por un trabajo multidisciplinario que se está llevando adelante entre grupos de investigación de Buenos Aires, La Plata, Sao Paulo y Montevideo.

### Las “Faunas” Ediacaranas

El Ediacarano toma su nombre de una localidad de Australia donde a mediados del siglo 20 se reconocieron asociaciones de impresiones fósiles de cuerpos blandos en sedimentitas del Precámbrico tardío. El reconocimiento de la existencia de una biota compleja antecesora de los organismos que constituyeron la “explosión cámbrica” fue un avance notable en el entendimiento de la evolución de la vida en nuestro planeta (ej. Briggs, 2015). Tal vez la característica más notable de los fósiles ediacaranos sea la carencia (con muy contadas excepciones) de exoesqueletos fosilizados. Particularmente en el Ediacarano tardío (580-541 Ma) se desarrollaron biotas complejas y variadas de organismos multicelulares que han sido clasificadas y han permitido definir tres asociaciones sucesivas. Éstas son: la Asociación Avalon (ca. 572-560 Ma), la Asociación del Mar Blanco (“White Sea”, ca. 560-550 Ma) y la Asociación Nama (ca. 550-541 Ma). Las distintas asociaciones están constituidas por ciertos macrofósiles característicos. Pocos de estos fósiles aparecen en más de una asociación (Xiao y Narbonne, 2020). La Asociación del Mar Blanco presenta la mayor variedad de fósiles ediacaranos, siendo las otras dos significativamente más pobres en variedad de macrofósiles. La reconstrucción y asignación de estos registros fósiles a determinados phylas es muy problemático, y ninguno de ellos sobrevivió al límite con el Cámbrico.

## La Glaciación Gaskiers y la Excursión Shuram

Si bien el conocimiento de los macrofósiles ediacaranos es aún incompleto, la evidencia existente indica que estas biotas complejas se desarrollaron en el Ediacarano tardío (véase sin embargo el reciente hallazgo de Liu y Tindal, 2021). En particular, después de ocurrido un evento glaciario muy importante, conocido como Glaciación Gaskiers (ej. Retallack, 2013). A diferencia de la glaciación Marinoan, ya mencionada, la Gaskiers no correspondería a un evento que abarcó todo el globo, ya que su duración habría sido demasiado breve para convertirse en un evento de "Snowball Earth". Ha sido datada con precisión en 580 Ma y su duración habría sido inferior a 1 millón de años (Pu et al., 2016). Este evento glaciario, sin embargo, habría tenido importantes consecuencias ambientales y ha sido definido como el límite entre el Ediacarano Inferior y el Superior (Xiao y Narbonne, 2020).

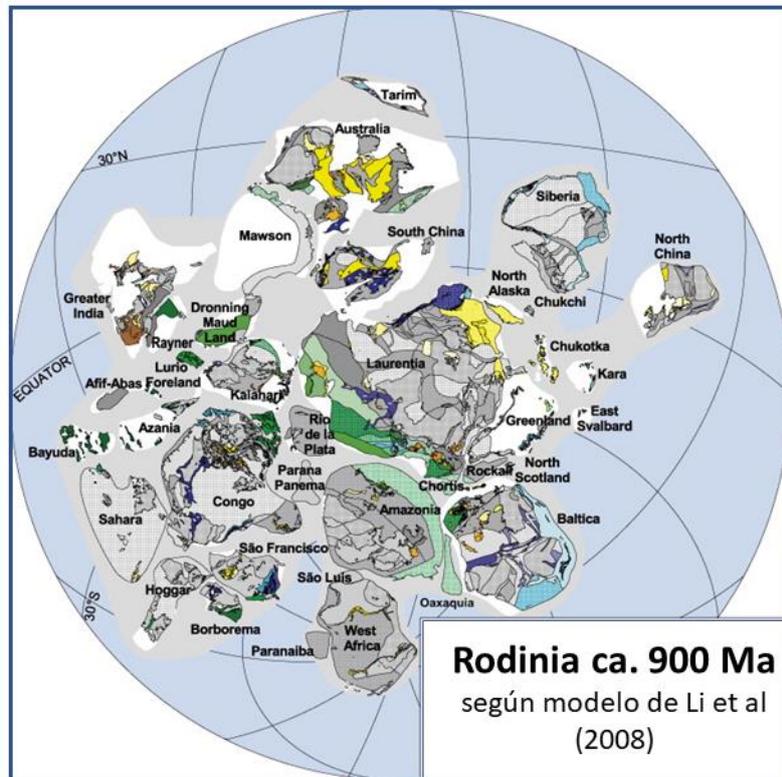
Otro evento sobresaliente en el Ediacarano tardío es la presencia de la mayor excursión isotópica de carbono conocida en el registro geológico. Esta excursión, conocida como Shuram (Grotzinger et al., 2011), registró una anomalía isotópica negativa de  $\delta^{13}\text{C}$  de hasta -12‰. Este evento ha sido observado en diferentes localidades a nivel global y recientes estudios astrocronológicos (Gong y Li, 2020) lo han datado entre 570 y 562 Ma. El desarrollo de la excursión es también muy particular, con una caída muy rápida que habría alcanzado el nadir un millón de años después de su inicio y una recuperación mucho más lenta de 6 a 7 millones de años de duración. El origen de este evento único y su correlación con la aparición de la primera asociación de macrobiotas ediacaranas de organismos multicelulares complejos y diversos, no está claramente comprendido aún (McMenamin, 2018). Un modelo que se ha visto favorecido recientemente (véase Li et al., 2020, por ejemplo) propone que la excursión corresponde a un gran evento global de oxigenación de los océanos profundos, que habría sido la última fase de oxigenación oceánica en la evolución de nuestro planeta (Fike et al., 2006).

## La Paleogeografía del Ediacarano

Los conocimientos sobre la evolución paleogeográfica global a lo largo del Precámbrico son todavía muy fragmentarios e incompletos (ej. Pesonen et al., 2021). A pesar de muchas incertidumbres, hay un amplio consenso en que hacia el inicio del Neoproterozoico (1000 Ma) se produjo la formación de un supercontinente, conocido como Rodinia (McMenamin y McMenamin, 1990; Hoffman, 1991). En la mayoría de las reconstrucciones paleogeográficas del Neoproterozoico temprano, Rodinia es ubicado en latitudes ecuatoriales, con Laurentia en una posición central, rodeado de la mayoría o totalidad de los restantes cratones (ej. Li et al., 2008, Figura 1). Se ha publicado en las últimas dos décadas una amplia gama de modelos paleogeográficos que buscan reconstruir con alguna certeza la geometría, cinemática y cronología del proceso de fracturación y desmembramiento de este supercontinente (ej. Meert y Torsvik, 2003; Kheraskova et al., 2010; Zhao et al., 2018, etc.), no existiendo aún un modelo detallado del mismo que haya alcanzado un razonable consenso. A pesar de ello, para la mayoría de los investigadores, a comienzos del Ediacarano Rodinia ya había desaparecido o estaba en las etapas finales de su desmembramiento (ej. Li et al., 2013, Cawood et al., 2016). También existe consenso en que el continente de Gondwana se formó fundamentalmente durante el Ediacarano (ej. Meert y Liberman, 2008; Rapalini, 2018), aunque los últimos procesos de acreción podrían haber ocurrido en el Cámbrico (Trindade et al., 2006; Tohver et al., 2010). Pero se podría argumentar que ahí terminan los acuerdos. En las últimas décadas, diferentes y muy variados modelos tectónicos y paleogeográficos han sido propuestos y discutidos.

Powell (1995) propuso el nombre de Pannotia para un hipotético supercontinente que habría existido durante el Ediacarano tardío e inicios del Cámbrico. Entre las particularidades de Pannotia

se destaca su breve duración, pocas decenas de millones de años, ya que se habría fragmentado rápidamente para formar los principales continentes paleozoicos (ej. Gondwana, Laurentia, Báltica, Siberia). Esta propuesta ha sido fervientemente discutida, y si bien no cuenta en la actualidad con mucha aceptación, los debates sobre la posibilidad o imposibilidad de su existencia continúan (véase como ejemplos Evans, 2021 y Murphy et al., 2021).



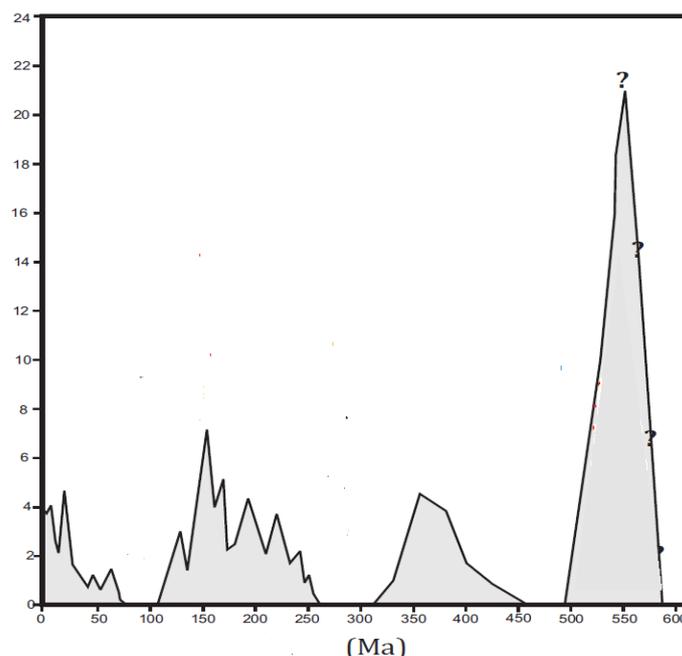
**Figura 1.** Modelo de reconstrucción de Rodinia propuesto por Li et al. (2008) para alrededor de los 900 Ma (modificado de Li et al., 2008)

En las reconstrucciones paleogeográficas del Ediacarano y Cámbrico, los datos paleomagnéticos cumplen un rol fundamental. Varios modelos e hipótesis han surgido a partir de nueva información paleomagnética o han sido validados o invalidados por estos datos. Symons y Chiasson (1991) y Meert y Van der Voo (1994) fueron de los primeros en señalar que la curva de deriva polar aparente (CDPA) de Laurentia para el Ediacarano tenía rasgos muy particulares. Según la misma, Laurentia habría migrado desde latitudes tropicales en el Ediacarano temprano (ca. 615 Ma) hasta latitudes polares hacia los 590-570 Ma, para regresar a latitudes ecuatoriales en un lapso muy breve (ca. 560 Ma). Esta posible ida y vuelta en la deriva de Laurentia (véase McCausland et al., 2007) despertó una gran polémica y diferentes propuestas, desde la invalidación de la información paleomagnética que indica posiciones de alta latitud (ej. Bono y Tarduno, 2015), a un campo magnético dipolar con los polos en posiciones ecuatoriales (Abrajevitch y Van der Voo, 2010, véase próximo apartado), velocidades de deriva continental extremas (Mc Causland et al., 2007) o desplazamiento polar verdadero por intercambio de ejes de inercia (IITPW, Kirschvink et al., 1997; Robert et al., 2017). En particular, estos últimos autores han propuesto la existencia de dos eventos de IITPW en el Ediacarano, uno entre aproximadamente 610 y 590 Ma y otro entre ca. 575 y 565 Ma. Según Robert et al. (2018) las CDPA de Laurentia, Báltica y África Occidental presentan evidencias notorias de estos rápidos desplazamientos de casi 90° del manto y la corteza terrestres respecto al eje de rotación. Esta hipótesis aguarda la obtención de un mayor número de polos paleomagnéticos de calidad de los intervalos mencionados en otros cratones para ser validada (o invalidada).

## El campo magnético en el Ediacarano

La paradoja de los polos paleomagnéticos del Ediacarano “medio” de Laurentia, comentado más arriba, llevó a Abrajévitch y Van der Voo (2010) a proponer que durante ese lapso el campo magnético terrestre tuvo una configuración “exótica”. Esta habría consistido en un campo dipolar estable, al menos por cientos de miles o unos pocos millones de años, con los polos geomagnéticos ubicados en el ecuador. De este modo la aparente migración de Laurentia (y otros continentes) a latitudes polares no sería otra cosa que la ubicación de estos polos geomagnéticos exóticos en posiciones ecuatoriales. Si bien la rotación terrestre ha sido siempre considerada como un factor fundamental en la configuración dipolar y axial del campo magnético (Merril et al., 1998), algunos modelos numéricos de dínamos en esferas en rotación han producido campos dipolares ecuatoriales con cierta estabilidad bajo condiciones específicas (Aubert y Wicht, 2004).

Por su parte, hacia finales del Ediacarano (555-540 Ma, Bazhenov et al., 2016), el campo magnético terrestre habría tenido un comportamiento “hiperactivo” expresado por una tasa de reversiones de polaridad extremadamente alta. Se ha calculado que podrían haber ocurrido del orden de 20 reversiones de polaridad por millón de años (Levashova et al., 2021), transformándola, posiblemente, en la tasa más alta de reversiones conocida (Figura 2). Esta hiperactividad de reversiones se habría extendido al Cámbrico Inferior (Duan et al., 2018). A pesar de esa hiperactividad el campo magnético terrestre habría mantenido su carácter dipolar (Bazhenov et al., 2016).



**Figura 2.** Estimación de la frecuencia de reversiones de polaridad del campo magnético terrestre en los últimos 600 millones de años. En ordenadas el número de reversiones por millón de años. Nótese la altísima tasa de reversiones para el Ediacarano tardío y Cámbrico. Modificado de Meert et al. (2016).

El comportamiento particular del campo magnético ediacarano se extendería también a su intensidad. Según una serie de estudios recientes de paleointensidades absolutas (véase Thallner et al., 2021 y referencias ahí citadas), el campo magnético terrestre habría alcanzado su mínima intensidad en el Ediacarano. La misma, que implicaría un orden de magnitud menor a la actual, habría durado varias decenas de millones de años, entre los 600 y 560 Ma, aproximadamente, con una probable y lenta recuperación de la paleointensidad hacia fines del Ediacarano y comienzos del Cámbrico. Esta recuperación se habría prolongado durante el Paleozoico

temprano. Esta debilidad del paleocampo magnético puede ser interpretada como una causa factible de un comportamiento direccional y/o configuración anómala del mismo. Sin embargo, datos paleomagnéticos de diferentes continentes para el intervalo aproximado de 590-565 Ma indican que el campo habría sido dipolar con reversiones de polaridad relativamente frecuentes (Symons y Chiasson, 1990, Meert y Van der Voo, 1994, Moloto-A-Kenguemba et al., 2008, Rapalini et al., 2015).

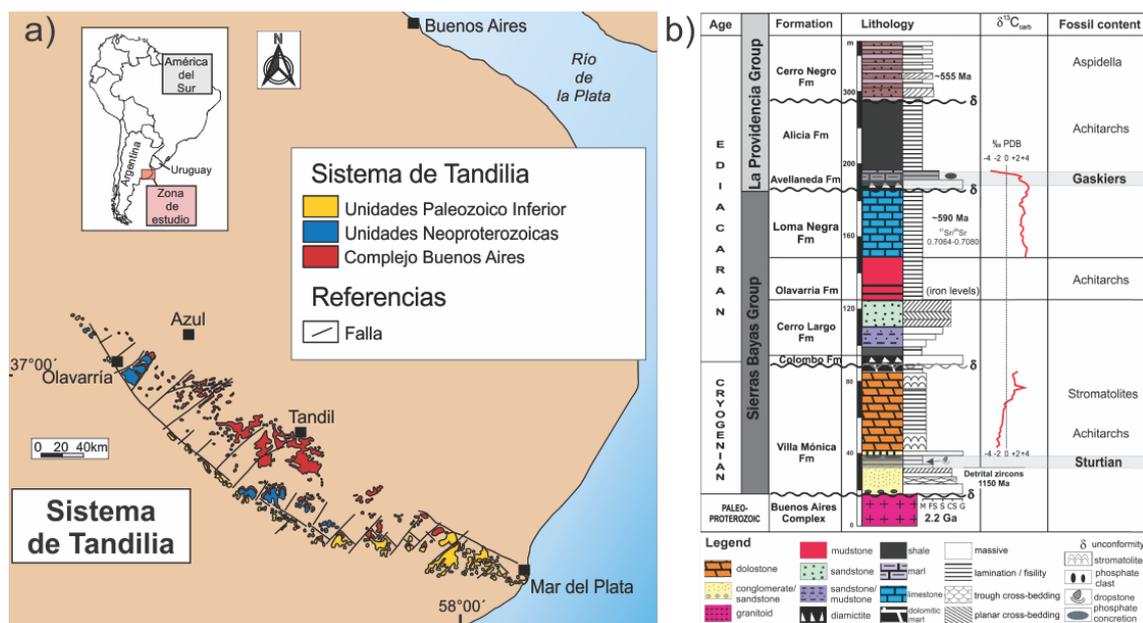
Un conocimiento más robusto de las diferentes características del campo magnético en el Ediacarano puede tener implicancias muy relevantes para la evolución de nuestro planeta. En la última década, aproximadamente, muchos modelos termodinámicos han propuesto que el núcleo interno de la Tierra sería relativamente joven (ej. Aubert et al., 2009, Landeau et al., 2017). En estos modelos, la geodinamo habría tenido dos etapas diferentes. Una primera etapa en que la convección fue de origen exclusivamente térmico, y que debería haber presentado un régimen de energía declinante hasta que se alcanzaran las condiciones para el comienzo de la cristalización del núcleo interno. A partir del cual, el régimen convectivo se habría hecho progresivamente más vigoroso por la producción de calor latente de cristalización y por la convección composicional debida a la liberación de elementos livianos durante la solidificación del núcleo (Merril et al., 1998). Los escasos datos robustos de paleointensidades absolutas del Precámbrico (Lloyd et al., 2021) serían consistentes con una tendencia al decrecimiento de la intensidad del campo magnético terrestre durante el Neoproterozoico hasta el mínimo ediacarano. Éstos han sido indicados como posibles evidencias de la edad joven del núcleo interno. Sin embargo, recientes estudios experimentales sobre la conductividad térmica de aleaciones de hierro con elementos livianos a presiones y temperaturas del interior terrestre profundo (ej. Konôpková et al., 2016, Basu et al., 2020) sugieren que el núcleo interno podría tener una edad de entre 2000 y 4000 Ma.

De los párrafos anteriores se puede inferir que el Ediacarano es un período crucial en la historia física, geológica, ambiental y biológica de nuestro planeta y cuyos misterios y rarezas están siendo revelados con dificultad y lentitud.

A continuación, presento de manera suscita algunos avances que hemos realizado en el conocimiento de varios de los aspectos mencionados a partir de nuestros estudios en los registros ediacaranos del cratón del Río de la Plata.

### **Avances en el Ediacarano del cratón del Río de la Plata**

En las últimas dos décadas, el avance en el conocimiento de múltiples aspectos del registro ediacarano del cratón del Río de la Plata ha sido manifiesto. Estos avances han incluido aspectos estratigráficos, geocronológicos, paleontológicos, paleoambientales y paleogeográficos.



**Figura 3.** A) mapa geológico simplificado del Sistema de Tandilia (tomado de Franceschinis, 2019 y modificado de Cingolani, 2011). B) Columna estratigráfica de la cobertura neoproterozoica del Sistema de Tandilia (extraído de Gómez Peral et al., 2018)

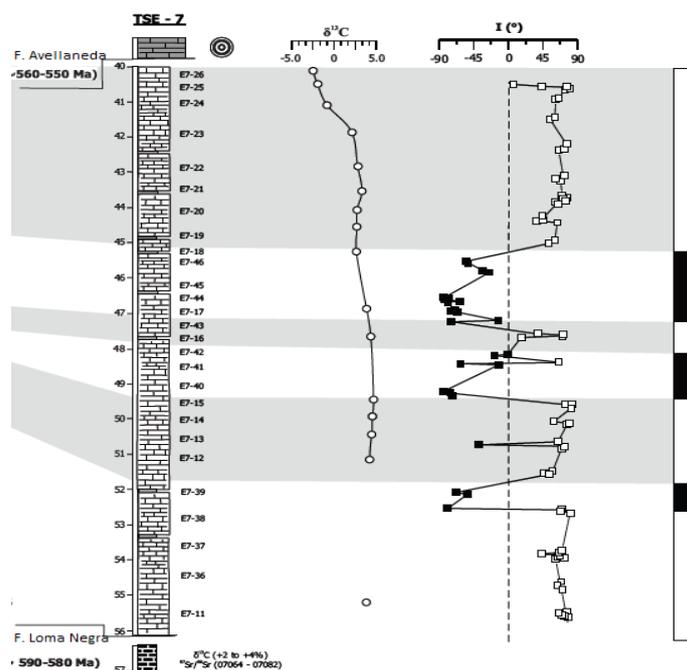
En particular, se ha refinado notoriamente la estratigrafía de la cobertura sedimentaria neoproterozoica del sistema de Tandilia (Figura3), en la provincia de Buenos Aires, merced al trabajo sistemático realizado por el grupo del CIG-Universidad Nacional de La Plata dirigido por el Dr. Daniel Poiré y colaboradores (ej. Gómez Peral et al., 2007, 2019, Arrouy et al., 2015, 2017 y referencias ahí citadas). El esquema estratigráfico actual aceptado para esta cobertura, sin metamorfismo y con escasa deformación, es la subdivisión en los Grupos Sierras Bayas y La Providencia (Figura 3B). El primero incluiría las Formaciones Villa Mónica (dolomías y cuarcitas) de probable edad criogeniana, Colombo (diamictitas asignadas al Ediacarano temprano), Cerro Largo (pelitas y cuarcitas del Ediacarano temprano), Olavarría (pelitas y areniscas de fines del Ediacarano temprano) y Loma Negra (calizas del tope del Ediacarano temprano, ca. 580 Ma). El Grupo La Providencia está constituido por las Formaciones Avellaneda (margas y pelitas del Ediacarano tardío temprano, ca. 570 Ma), Alicia (limolitas y areniscas de ca. 565-560 Ma) y Cerro Negro (areniscas y pelitas de ca. 560-550 Ma). De este modo, la cobertura neoproterozoica de Tandilia tendría un registro casi completo del Ediacarano tardío y de parte del Ediacarano temprano.

Entre los hallazgos más notables y espectaculares recientes en la cobertura sedimentaria de Tandilia están los microfósiles discoidales ediacaranos (Arrouy et al., 2016) encontrados en la Formación Cerro Negro, la unidad cuspidal de la sucesión (Figura4). Estas formas han sido tentativamente asignadas al género *Aspidella* y atribuidas con mayor probabilidad a la Asociación del Mar Blanco (White Sea), sugiriendo una edad entre 560 y 550 Ma para los niveles superiores de esta formación.



**Figura 4.** imágenes de algunos de los fósiles edicaranos hallados en la Formación Cerro Negro (extraído de Arrouy et al., 2016)

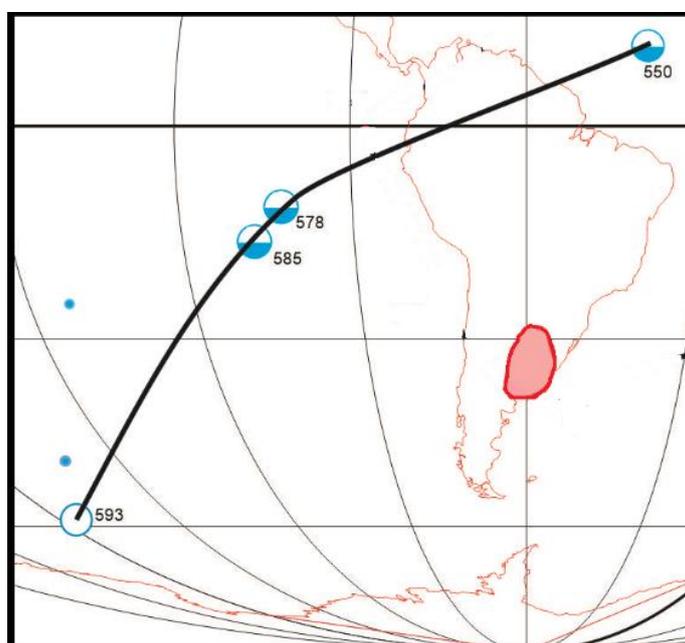
Gómez Peral et al. (2018) reportaron en las margas de la Formación Avellaneda, base del Grupo La Providencia, una anomalía negativa de  $\delta^{13}\text{C}$  de hasta  $-6\text{‰}$  en pocos metros de esta unidad. El registro se trunca a esos valores. Los autores interpretaron esta excursión como un registro parcial de cambios ambientales pos-glaciares, posteriores a la glaciación Gaskiers. Nuevas determinaciones realizadas en el marco de la colaboración con los grupos de La Plata y Sao Paulo (Figura 5), han confirmado la existencia de esa abrupta excursión hacia valores negativos de  $\delta^{13}\text{C}$  (Afonso et al., 2019, 2020). A la fecha se consideran dos posibles interpretaciones: la original de Gómez Peral et al. (2018) y la posibilidad de que corresponda al inicio de la excursión Shuram. En este último caso se podrían datar los niveles superiores de la Formación Avellaneda en 570 Ma.



**Figura 5.** Magnetoestratigrafía preliminar de un testigo corona de la Formación Avellaneda en la localidad de Olavarría. Tomado de Afonso et al. (2019). El espesor está indicado en metros. Los números a la derecha de la columna refieren a las muestras paleomagnéticas estudiadas. Los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  fueron obtenidos sobre las mismas muestras. Nótese el inicio de una excursión abrupta hacia valores negativos en los términos cuspidales de la columna. I: inclinación magnética. En el extremo de la derecha se representa la columna magnetoestratigráfica local preliminar; intervalos negros (blancos) corresponden a polaridad normal (reversa). Extraído de Afonso et al. (2020).

Resultados magnetoestratigráficos preliminares sobre la Formación Avellaneda (Afonso et al., 2019, 2020), obtenidos en coronas de pozo, han demostrado que durante la depositación de esta unidad se habrían sucedido siete intervalos de polaridad del campo magnético terrestre (Figura4), sugiriendo una alta tasa de reversiones. El inicio de la excursión de  $\delta^{13}\text{C}$  en la Formación Avellaneda habría ocurrido durante un intervalo reverso del campo magnético, coincidente con lo determinado para la excursión Shuram, entre su inicio y el nadir en el valor de la anomalía (Minguez y Kodama, 2017). Esto es consistente con la posibilidad de que tengamos el registro del inicio de la excursión isotópica Shuram en la parte superior de la Formación Avellaneda.

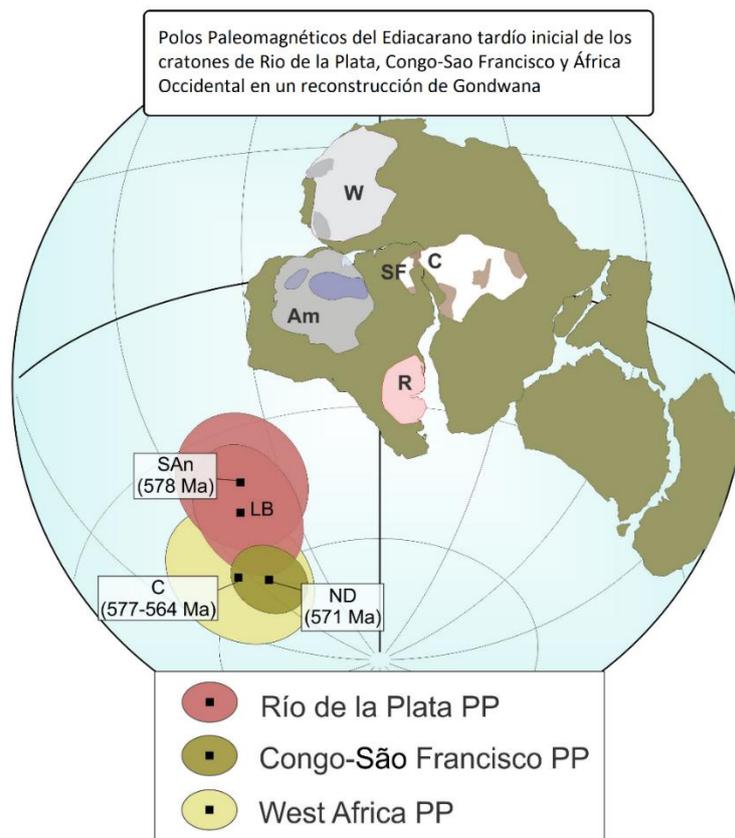
En los últimos 20 años, trabajos en colaboración con colegas de Uruguay, La Plata y Sao Paulo han permitido obtener varios polos paleomagnéticos ediacaranos para el cratón del Río de la Plata (véase Rapalini et al., 2021). Estos resultados han llevado a construir un trazado preliminar de la CDPA del cratón para el intervalo aproximado entre 600 y 550 Ma (Figura6). Esta curva sugiere una rápida deriva polar que involucró una migración hacia latitudes más australes y una rotación antihoraria de ca. 150°.



**Figura 6.** Curva de desplazamiento polar ediacarana para el cratón del Río de la Plata, según Rapalini et al. (2021). Los números indican la edad más probable de las posiciones polares. Símbolos abiertos (cerrados, mixtos) indican polaridades reversas (normales, mixtas). Los símbolos pequeños son polos paleomagnéticos de menor confianza que los mayores (polos de referencia). En rojo, la extensión aproximada del cratón. Modificado de Rapalini et al. (2021).

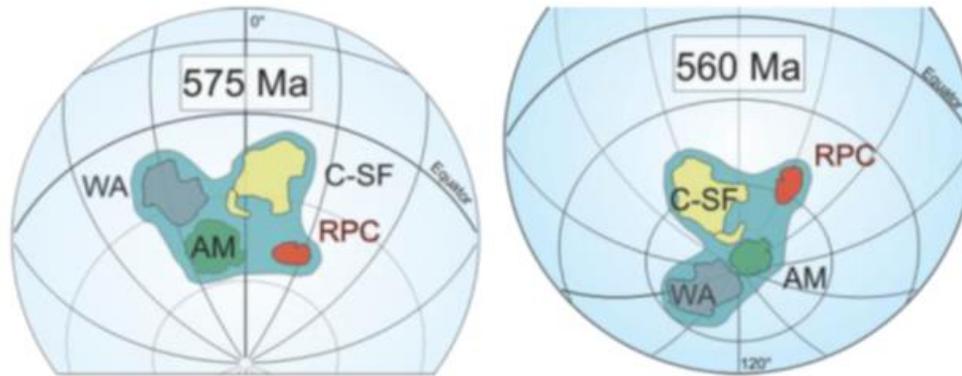
Estos movimientos habrían tenido lugar durante las etapas finales de formación del Gondwana Occidental (Rapalini, 2018). La comparación de la posición de dos polos paleomagnéticos de alta calidad del cratón, de edades comprendidas entre 585 y 575 Ma (Rapalini, 2006, Rapalini et al., 2015) con otros aproximadamente coetáneos del cratón del Congo (Moloto-A-Kenguemba et al., 2008) y uno reciente de África Occidental (Robert et al., 2017) sugiere que los tres cratones se encontraban cercanos o ya unidos hacia los 575 Ma (Figura7). Rapalini et al. (2015) avalaron, en base a los datos paleomagnéticos disponibles, la existencia de un gran océano Clymene a fines del Ediacarano Inferior, entre el cratón de Amazonia (y África Occidental) y los cratones de Congo-Sao Francisco y Río de la Plata. Sin embargo, la coincidencia en los polos ilustrados en la Figura 7 sugiere que, de existir todavía, Clymene habría sido mucho más estrecho y reducido a fines del Ediacarano temprano.

Muy recientemente, Franceschinis (2019) y Franceschinis et al. (2019) han aportado un polo paleomagnético preliminar para la Formación Avellaneda, basado en muestras de afloramientos y testigos de pozo. Este polo preliminar indica latitudes altas para el cratón hacia los 570 Ma, cercanas a los 50°S, coherentes con la depositación de esta unidad tras la finalización de la Glaciación Gaskiers (Poiré et al., 2018). La comparación con los polos ligeramente más antiguos de Sierra de las Animas (Rapalini et al., 2015) y Los Barrientos (Rapalini, 2006) de ca. 585-575 Ma, sugiere un desplazamiento polar aparente extraordinariamente rápido, principalmente por una rotación antihoraria, que podría haber superado los 60° (Figura 8). El mismo es aproximadamente coetáneo y en el mismo sentido que el hipotético IITPW propuesto por Robert et al. (2018), sugiriendo que si bien no se alcanzarían los 90° de desplazamiento podría obedecer al mismo proceso.



**Figura 7.** Polos paleomagnéticos de referencia de los cratones de Río de la Plata, Congo-Sao Francisco y África Occidental para inicios del Ediacarano tardío (580-570 Ma, aproximadamente) en una reconstrucción del Gondwana. Nótese la consistencia en la posición de los polos de los tres cratones sugiriendo que la ubicación relativa de los tres en la figura es permisible paleomagnéticamente y estaban ya muy próximos o acrecionados. LB: Los Barrientos (Rapalini, 2006), SAn (Sierra de Ánimas, Rapalini et al., 2015), ND: diques Nola (Moloto-A-Kenguemba, 2008), C: Adrar-n-Takoucht (Robert et al., 2017). Tomado de Rapalini et al. (2021)

La finalización de estos estudios en marcha, así como estudios paleomagnéticos sistemáticos acompañados de determinaciones geocronológicas precisas en diferentes unidades ediacaranas del cratón, tanto en Argentina como en Uruguay, aportarán nuevas restricciones a los modelos e hipótesis en discusión. Probablemente también abrirán nuevos interrogantes.



**Figura 8.** Reconstrucciones paleogeográficas propuestas para el Ediacarano “medio” (ca. 575 Ma) y tardío (ca. 560 Ma) para los cratones de Río de la Plata (RPC), Congo-Sao Francisco (C-SF), África Occidental (WA) y Amazonia (AM). Nótese la rotación mayúscula de los cratones en un lapso breve de tiempo geológico. Modificado de Franceschinis et al. (2021)

## CONCLUSIONES

El Ediacarano (635-541 Ma) es tal vez el período de la historia geológica más misterioso y lleno de interrogantes. Probablemente, también sea el más apasionante. Los sucesos ocurridos en ese lapso cambiaron definitivamente y de manera radical la evolución de la Tierra. Durante el Ediacarano se desarrollaron formas de vida multicelulares complejas y diversas, muchas de cuyas características son aún desconocidas. Estas biotas, aparentemente, no tuvieron descendencia en el Fanerozoico. Cambios ambientales mayúsculos, como la última etapa de oxigenación de los océanos a escala global habría sido coetánea de la formación del megacontinente de Gondwana. Estos sucesos aparentemente habrían ocurrido mientras el campo magnético era extraordinariamente débil, aunque aún dipolar y con una frecuencia de reversiones de polaridad muy alta. En primera instancia, estas características serían compatibles con el comienzo de cristalización del núcleo interno durante el Ediacarano. Es posible que el planeta haya sufrido dos eventos de deriva polar verdadera de cerca de 90° en el Ediacarano temprano y medio, respectivamente, aunque esta interpretación podría no ser necesaria si se acepta que el campo magnético tuvo un período exótico, con una geometría dipolar estable, pero con los polos geomagnéticos ubicados cerca del ecuador terrestre en lugar de los polos geográficos.

Muchos misterios y rarezas del Ediacarano quedan por ser confirmados o descartados y muy probablemente muchos otros están aún escondidos en las sucesiones geológicas de esa edad en todo el globo.

## Agradacimientos

Hace aproximadamente 25 años iniciamos con Leda Sánchez Bettucci, de la Universidad de la República (Uruguay), los primeros estudios paleomagnéticos en unidades ediacaranas del cratón del Río de la Plata. La colaboración con ella sigue tan activa como al inicio. Una parte importante de los avances reseñados de modo muy sucinto no se hubieran logrado sin la colaboración activa y abierta de Daniel Poiré (CIG-Universidad Nacional de La Plata) y sus discípulas María Julia Arrouy (IHLLA, UNCPBA) y Lucía Gómez Peral (CIG-UNLP). Los estudios se enriquecieron enormemente con la colaboración total de Ricardo Trindade, director del Laboratorio de Paleomagnetismo del IAG (Universidad de Sao Paulo) y recientemente con la participación de Jhon Afonso, tesista doctoral en esa institución. La participación de Eric Tohver (en ese momento en la USP) fue muy importante aportando dataciones radimétricas de alta precisión. Afortunadamente, la colaboración entre los tres grupos es cada vez más activa y con la participación de más investigadores jóvenes o en formación. Una parte sustancial de los avances en el último lustro han sido debidos al incansable trabajo y curiosidad de Pablo Franceschinis

(IGEBA-UBA) quien continúa llevando adelante buena parte de los estudios paleomagnéticos. Andrés Cukjati se sumó recientemente a estos estudios. Durante muchos años el apoyo técnico y profesional de Carlos A. Vásquez y Horacio Lippai fue esencial para desarrollar muchas de las tareas de campo y laboratorio. Las empresas Loma Negra y Cementos Avellaneda gentilmente permitieron trabajar en sus instalaciones. CONICET, la Universidad de Buenos Aires, la Agencia de Promoción Científica y Técnica de Argentina y FAPESP proveyeron apoyo económico para las investigaciones a lo largo de más de dos décadas. El trabajo continúa.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abrajevitch, A., & Van der Voo, R. (2010). Incompatible Ediacaran paleomagnetic directions suggest an equatorial geomagnetic dipole hypothesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 293(1-2), 164-170.
- Afonso, J., Franceschinis, P., Rapalini, A., Arrouy, M. J., Poiré, D., & Trindade, R. I. F. (2019) Middle to Late Ediacaran Magnetostratigraphy of the Avellaneda Formation, Rio de La Plata Craton. *Latinmag Letters*, 9, Special Issue, B09-O, 1-6.
- Afonso, J., Trindade, R., Franceschinis, P., & Rapalini, A. (2020). Magnetostratigraphy and Carbon isotopes of Ediacaran Avellaneda Formation, Rio de La Plata Craton, Argentina. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 1162).
- Arrouy, M.J., Poiré, D., Gómez Peral, L.E., Canalicchio, J.M., 2015. Sedimentología y estratigrafía del grupo La Providencia (nom. nov.): cubierta superior neoproterozoica, Sistema de Tandilia, Argentina. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*. 22, 2, 171–189
- Arrouy, M. J., Warren, L. V., Quaglio, F., Poiré, D. G., Simões, M. G., Rosa, M. B., & Peral, L. E. G. (2016). Ediacaran discs from South America: probable soft-bodied macrofossils unlock the paleogeography of the Clymene Ocean. *Scientific Reports*, 6(1), 1-10.
- Aubert, J., & Wicht, J. (2004). Axial vs. equatorial dipolar dynamo models with implications for planetary magnetic fields. *Earth and Planetary Science Letters*, 221(1-4), 409-419.
- Aubert, J., Labrosse, S., & Poitou, C. (2009). Modelling the palaeo-evolution of the geodynamo. *Geophysical Journal International*, 179(3), 1414-1428.
- Basu, A., Field, M. R., McCulloch, D. G., & Boehler, R. (2020). New measurement of melting and thermal conductivity of iron close to outer core conditions. *Geoscience Frontiers*, 11(2), 565-568.
- Bazhenov, M. L., Levashova, N. M., Meert, J. G., Golovanova, I. V., Danukalov, K. N., & Fedorova, N. M. (2016). Late Ediacaran magnetostratigraphy of Baltica: evidence for magnetic field hyperactivity?. *Earth and Planetary Science Letters*, 435, 124-135.
- Bono, R. K., & Tarduno, J. A. (2015). A stable Ediacaran Earth recorded by single silicate crystals of the ca. 565 Ma Sept-Îles intrusion. *Geology*, 43(2), 131-134.
- Briggs, D. E. (2015). The cambrian explosion. *Current Biology*, 25(19), R864-R868.
- Cawood, P. A., Strachan, R. A., Pisarevsky, S. A., Gladkochub, D. P., & Murphy, J. B. (2016). Linking collisional and accretionary orogens during Rodinia assembly and breakup: Implications for models of supercontinent cycles. *Earth and Planetary Science Letters*, 449, 118-126.
- Cingolani, C. A. (2011). The Tandilia System of Argentina as a southern extension of the Río de la Plata craton: an overview. *International Journal of Earth Sciences*, 100(2), 221-242.
- Duan, Z., Liu, Q., Ren, S., Li, L., Deng, X., & Liu, J. (2018). Magnetic reversal frequency in the Lower Cambrian Niutitang Formation, Hunan Province, South China. *Geophysical Journal International*, 214(2), 1301-1312.
- Evans, D. A. (2021). Pannotia under prosecution. *Geological Society, London, Special Publications*, 503(1), 63-81.

- Fike, D. A., Grotzinger, J. P., Pratt, L. M., & Summons, R. E. (2006). Oxidation of the Ediacaran Ocean. *Nature*, 444(7120), 744-747.
- Franceschinis, P.R. (2019). Evolución paleogeográfica del cratón del Río de la Plata en el Precámbrico y su relación con el terreno Pampia en el Cámbrico. Universidad de Buenos Aires, Tesis Doctoral, inédita. 357 pp.
- Franceschinis, P.R., Afonso, J., Arouy, M.J., Gómez Peral, L., Poiré, D.G., Trindade, R.I.F & Rapalini, A.E. (2021). Paleogeography of the Río de la Plata craton in the Ediacaran: paleomagnetic poles for the Avellaneda and Cerro Negro Formations, Tandilia System, Argentina. *Precambrian Research*, enviado.
- Gómez Peral, L. E., Poiré, D. G., Strauss, H., & Zimmermann, U. (2007). Chemostratigraphy and diagenetic constraints on Neoproterozoic carbonate successions from the Sierras Bayas Group, Tandilia System, Argentina. *Chemical Geology*, 237(1-2), 109-128.
- Gómez-Peral, L. E., Kaufman, A. J., Arrouy, M. J., Richiano, S., Sial, A. N., Poiré, D. G., & Ferreira, V. P. (2018). Preglacial palaeoenvironmental evolution of the ediacaran loma Negra formation, far southwestern gondwana, Argentina. *Precambrian Research*, 315, 120-137.
- Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M. D., & Ogg, G. M. (Eds.). (2020). *Geologic Time Scale 2020*. Elsevier.
- Grotzinger, J. P., Fike, D. A., & Fischer, W. W. (2011). Enigmatic origin of the largest-known carbon isotope excursion in Earth's history. *Nature Geoscience*, 4(5), 285-292.
- Hoffman, P. F. (1991). Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside-out?. *Science*, 252(5011), 1409-1412.
- Hoffman, P. F., Kaufman, A. J., Halverson, G. P., & Schrag, D. P. (1998). A Neoproterozoic snowball earth. *Science*, 281(5381), 1342-1346.
- Hsieh, W. P., Goncharov, A. F., Labrosse, S., Holtgrewe, N., Lobanov, S. S., Chuvashova, I. & Lin, J. F. (2020). Low thermal conductivity of iron-silicon alloys at Earth's core conditions with implications for the geodynamo. *Nature communications*, 11(1), 1-7.
- Kheraskova, T. N., Bush, V. A., Didenko, A. N., & Samygin, S. G. (2010). Breakup of Rodinia and early stages of evolution of the Paleasian ocean. *Geotectonics*, 44(1), 3-24.
- Kirschvink, J. L., Ripperdan, R. L., & Evans, D. A. (1997). Evidence for a large-scale reorganization of Early Cambrian continental masses by inertial interchange true polar wander. *Science*, 277(5325), 541-545.
- Konôpková, Z., McWilliams, R. S., Gómez-Pérez, N., & Goncharov, A. F. (2016). Direct measurement of thermal conductivity in solid iron at planetary core conditions. *Nature*, 534(7605), 99-101.
- Landeau, M., Aubert, J., & Olson, P. (2017). The signature of inner-core nucleation on the geodynamo. *Earth and Planetary Science Letters*, 465, 193-204.
- Levashova, N. M., Golovanova, I. V., Rudko, D. V., Danukalov, K. N., Rudko, S. V., Salmanova, R. Y., & Meert, J. G. (2021). Late Ediacaran magnetic field hyperactivity: Quantifying the reversal frequency in the Zigan Formation, Southern Urals, Russia. *Gondwana Research*, 94, 133-142.
- Li, Z. X., Bogdanova, S., Collins, A. S., Davidson, A., De Waele, B., Ernst, R. E., ... & Vernikovskiy, V. (2008). Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis. *Precambrian research*, 160(1-2), 179-210.
- Li, Z., Cao, M., Loyd, S. J., Algeo, T. J., Zhao, H., Wang, X., ... & Chen, Z. Q. (2020). Transient and stepwise ocean oxygenation during the late Ediacaran Shuram Excursion: Insights from carbonate  $\delta^{238}\text{U}$  of northwestern Mexico. *Precambrian Research*, 344, 105741.
- Li, Z. X., Evans, D. A., & Halverson, G. P. (2013). Neoproterozoic glaciations in a revised global palaeogeography from the breakup of Rodinia to the assembly of Gondwanaland. *Sedimentary Geology*, 294, 219-232.

- Liu, A. G., & Tindal, B. H. (2021). Ediacaran macrofossils prior to the ~ 580 Ma Gaskiers glaciation in Newfoundland, Canada. *Lethaia*, 54(2), 260-270.
- Marshall, C. R. (2006). Explaining the Cambrian “explosion” of animals. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 34, 355-384.
- McCausland, P. J., Van der Voo, R., & Hall, C. M. (2007). Circum-lapetus paleogeography of the Precambrian–Cambrian transition with a new paleomagnetic constraint from Laurentia. *Precambrian Research*, 156(3-4), 125-152.
- McMenamin, M. A. (2018). *Deep time analysis: A coherent view of the history of life*. Springer. 273 pp.
- McMenamin, M.A.S. & McMenamin, D.L.S. (1990). *The emergence of animals: The Cambrian breakthrough*. Columbia University Press, New York. 217 pp
- Meert, J. G., & Lieberman, B. S. (2008). The Neoproterozoic assembly of Gondwana and its relationship to the Ediacaran–Cambrian radiation. *Gondwana research*, 14(1-2), 5-21.
- Meert, J. G., & Torsvik, T. H. (2003). The making and unmaking of a supercontinent: Rodinia revisited. *Tectonophysics*, 375(1-4), 261-288.
- Meert, J. G., Van der Voo, R., & Payne, T. W. (1994). Paleomagnetism of the Catocin volcanic province: A new Vendian-Cambrian apparent polar wander path for North America. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B3), 4625-4641.
- Meert, J. G., Levashova, N. M., Bazhenov, M. L., & Landing, E. (2016). Rapid changes of magnetic field polarity in the late Ediacaran: linking the Cambrian evolutionary radiation and increased UV-B radiation. *Gondwana Research*, 34, 149-157.
- Merrill, R.T., McElhinny, M.W., McFadden, P.L. (1998). *The Magnetic Field of the Earth*. International Geophysical Series, v.63. Academic Press. 533 pp.
- Minguez, D., & Kodama, K. P. (2017). Rock magnetic chronostratigraphy of the Shuram carbon isotope excursion: Wonoka Formation, Australia. *Geology*, 45(6), 567-570.
- Moloto-A-Kenguemba, G. R., Trindade, R. I., Monié, P., Nédélec, A., & Siqueira, R. (2008). A late Neoproterozoic paleomagnetic pole for the Congo craton: Tectonic setting, paleomagnetism and geochronology of the Nola dike swarm (Central African Republic). *Precambrian Research*, 164(3-4), 214-226.
- Murphy, J. B., Nance, R. D., Cawood, P. A., Collins, W. J., Dan, W., Doucet, L. S., Heron, P.J., Li, Z.X., Mitchell, R.N, Pisarevsky, S., Pufahl, P.K., Quesada, C., Spencer, C.J, Strachan, R.A. & Wu, L. (2021). Pannotia: in defence of its existence and geodynamic significance. *Geological Society, London, Special Publications*, 503(1), 13-39.
- Pesonen, L.J., Salminen, J., Elming, S., Evans, D.A.T., Veikkolainen, T. (Eds.) (2021). *Ancient Supercontinents and the Paleogeography of Earth*. Elsevier, 646p.
- Poiré, D. G., Peral, L. E. G., & Arrouy, M. J. (2018). The Glaciations in South America. In *Geology of Southwest Gondwana* (pp. 527-541). Springer, Cham.
- Powell, C.M., 1995. Are Neoproterozoic glacial deposits preserved on the margins of Laurentia related to the fragmentation of two supercontinents? *Comment. Geology* 23, 1053–1054
- Prave, A. R., Condon, D. J., Hoffmann, K. H., Tapster, S., & Fallick, A. E. (2016). Duration and nature of the end-Cryogenian (Marinoan) glaciation. *Geology*, 44(8), 631-634.
- Pu, J. P., Bowring, S. A., Ramezani, J., Myrow, P., Raub, T. D., Landing, E., Mills, A, Hodkins, E. & Macdonald, F. A. (2016). Dodging snowballs: Geochronology of the Gaskiers glaciation and the first appearance of the Ediacaran biota. *Geology*, 44(11), 955-958.
- Rapalini, A. E. (2018). The assembly of western Gondwana: Reconstruction based on paleomagnetic data. In *Geology of Southwest Gondwana* (pp. 3-18). Springer, Cham.
- Rapalini, A. E., Tohver, E., Bettucci, L. S., Lossada, A. C., Barcelona, H., & Pérez, C. (2015). The late Neoproterozoic Sierra de las Ánimas Magmatic Complex and Playa Hermosa Formation,

- southern Uruguay, revisited: Paleogeographic implications of new paleomagnetic and precise geochronologic data. *Precambrian Research*, 259, 143-155.
- Rapalini, A.E., Franceschinis, P.R., Sanchez Bettucci, L., Arrouy, M.J. & Poiré, D.G., 2021. The Precambrian drift history and paleogeography of Rio de la Plata craton. En L. Pesonen et al. (Eds.), *Ancient Supercontinents and the Paleogeography of Earth*. Chapter 7. Elsevier. 243-262. ISBN 9780128185339
- Retallack, G. J. (2013). Ediacaran Gaskiers glaciation of Newfoundland reconsidered. *Journal of the Geological Society*, 170(1), 19-36.
- Robert, B., Besse, J., Blein, O., Greff-Lefftz, M., Baudin, T., Lopes, F., ... & Belbadaoui, M. (2017). Constraints on the Ediacaran inertial interchange true polar wander hypothesis: A new paleomagnetic study in Morocco (West African Craton). *Precambrian Research*, 295, 90-116.
- Robert, B., Greff-Lefftz, M., & Besse, J. (2018). True polar wander: A key indicator for plate configuration and mantle convection during the late Neoproterozoic. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(9), 3478-3495.
- Symons, D. T. A., & Chiasson, A. D. (1991). Paleomagnetism of the Callander Complex and the Cambrian apparent polar wander path for North America. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 28(3), 355-363.
- Thallner, D., Biggin, A. J., & Halls, H. C. (2021). An extended period of extremely weak geomagnetic field suggested by palaeointensities from the Ediacaran Grenville dykes (SE Canada). *Earth and Planetary Science Letters*, 568, 117025.
- Tohver, E., Trindade, R. I. F., Solum, J. G., Hall, C. M., Riccomini, C., & Nogueira, A. C. (2010). Closing the Clymene ocean and bending a Brasiliano belt: Evidence for the Cambrian formation of Gondwana, southeast Amazon craton. *Geology*, 38(3), 267-270.
- Trindade, R. I., D'Agrella-Filho, M. S., Epof, I., & Neves, B. B. B. (2006). Paleomagnetism of Early Cambrian Itabaiana mafic dikes (NE Brazil) and the final assembly of Gondwana. *Earth and Planetary Science Letters*, 244(1-2), 361-377.
- Xiao, S. H., & Narbonne, G. M. (2020). The Ediacaran Period. In *Geologic Time Scale 2020* (pp. 521-561). Elsevier.
- Zhao, G., Wang, Y., Huang, B., Dong, Y., Li, S., Zhang, G., & Yu, S. (2018). Geological reconstructions of the East Asian blocks: From the breakup of Rodinia to the assembly of Pangea. *Earth-Science Reviews*, 186, 262-286.

## EFFECTOS DE LA PRECIPITACIÓN DE PARTÍCULAS ENERGÉTICAS DE ORIGEN SOLAR EN LA ATMOSFERA DE LA TIERRA

Marta M. Zossi<sup>1,2</sup>, Gustavo A. Mansilla<sup>1,2</sup> y Elda M. Zotto<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Laboratorio de Ionosfera, Atmosfera Neutra y Magnetosfera, INFNOA (CONICET-UNT), Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, San Miguel de Tucumán, Argentina*

<sup>2</sup> *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina*

<sup>3</sup> *Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas, Universidad Nacional de Catamarca, San Fernando del Valle de Catamarca, Argentina.*

[mzossi@herrera.unt.edu.ar](mailto:mzossi@herrera.unt.edu.ar)

### RESUMEN

La Tierra es continuamente "bombardeada" por partículas energéticas cargadas procedentes del espacio exterior que penetran en la atmósfera y pueden influir en una variedad de procesos atmosféricos.

El Sol emite ondas de radio, rayos X y partículas energéticas, además de la luz visible. El transporte de energía desde el Sol hacia la Tierra se produce de dos formas: (1) radiación electromagnética, que emite alrededor de  $4 \times 10^{33}$  erg/s irradiando la Tierra con  $1,37 \times 10^3$  W m<sup>-2</sup> y (2) radiación corpuscular (el viento solar con el campo magnético interplanetario "congelado" en él y cualquier partícula solar energética que puede estar presente).

El ingreso de partículas energéticas solares a la magnetosfera de la Tierra produce efectos sobre las especies químicas de la atmósfera alta y media cuando precipitan en las zonas aurorales de ambos hemisferios guiadas por el campo geomagnético.

La ionosfera, como parte del entorno meteorológico espacial, juega un papel crucial a través de la modulación del circuito electrodinámico global, su acoplamiento a la magnetosfera y como medio clave para la comunicación, el sondeo y la navegación. Por tanto, una comprensión profunda de su variabilidad en todas las escalas de tiempo es un importante aporte al estudio de la meteorología espacial.

Como consecuencia de la intensificación de la precipitación de partículas durante periodos de tormenta geomagnética, se produce un aumento de la ionización, la creación de nitrógeno impar (NOx) y de hidrógeno impar (HOx) en la atmósfera superior, afectando la química del ozono estratosférico. Por otro lado, los campos eléctricos de origen magnetosférico, las perturbaciones atmosféricas viajeras, la circulación termosférica, y los cambios de composición química, explican las características ionosféricas de la densidad electrónica durante las distintas fases de tormentas geomagnéticas y en diferentes latitudes.

**Palabras clave:** precipitación de partículas energéticas, tormenta geomagnética, densidad electrónica, foF2, NOx, ozono

### ABSTRACT

The Earth is continuously "bombardeated" by energetic charged particles from outer space that penetrate the atmosphere and can influence a variety of atmospheric processes.

The Sun emits radio waves, X-rays and energetic particles in addition to visible light. The energy transport from the Sun to the Earth occurs in two forms: (1) electromagnetic radiation, which emits

about  $4 \times 10^{33}$  erg/s irradiating the Earth with  $1.37 \times 10^3$  W m<sup>-2</sup> and (2) corpuscular radiation (the solar wind with the interplanetary magnetic field "frozen" into it and any energetic solar particles that may be present).

The inflow of solar energetic particles into the Earth's magnetosphere produces effects on chemical species in the high and middle atmosphere as they precipitate into the auroral zones of the two hemispheres guided by the geomagnetic field.

The ionosphere, as part of the space weather environment, plays a crucial role through modulation of the global electrodynamic circuitry, its coupling to the magnetosphere, and as a key medium for communication, sounding, and navigation. Therefore, a deep understanding of its variability on all time scales is an important contribution to the study of space weather.

As a consequence of intensified particle precipitation during periods of geomagnetic storms, there is an increase in ionization, the creation of odd nitrogen (NO<sub>x</sub>) and odd hydrogen (HO<sub>x</sub>) in the upper atmosphere, affecting the chemistry of stratospheric ozone. Also, electric fields of magnetospheric origin, circulating atmospheric disturbances, thermospheric circulation, and chemical composition changes explain the ionospheric characteristics of the electron density during different phases of geomagnetic storms and at different latitudes.

**Key words: energetic particle precipitation, geomagnetic storm, electron density, foF2, NO<sub>x</sub>, ozone**

## INTRODUCCION

La potencia del viento solar modifica el campo geomagnético intrínseco de la Tierra en el espacio cercano a la Tierra, creando una cavidad llamada magnetosfera, que está llena de plasma tanto del viento solar como de origen ionosférico (Akasofu,1998). El acoplamiento dinámico del viento solar con la magnetosfera de la Tierra da como resultado la aceleración de las partículas cargadas, en su mayoría electrones, que son acelerados y atrapados en la magnetosfera de la Tierra. Estas partículas se precipitan en la atmósfera desde varias regiones de la magnetosfera, tanto impulsadas por las condiciones del viento solar como por los procesos magnetosféricos intrínsecos. La multitud de procesos y su variabilidad dinámica conduce a grandes variaciones en las distribuciones espacial, temporal, de flujo y de energía de las partículas precipitantes. En la cúspide polar y el cono de pérdida de la región del casquete polar las partículas precipitan directamente en las líneas abiertas del campo magnético, mientras que en los óvalos aurales y latitudes subaurales la precipitación en las líneas del campo cerrado ocurre cuando las partículas atrapadas son empujadas hacia el cono de pérdida, lo que puede ocurrir incluso en latitudes medias para la precipitación de electrones relativistas desde los cinturones de radiación.

Un papel importante en los procesos atmosféricos lo desempeña la precipitación de partículas energéticas en zonas polares, a latitudes  $> 60^\circ$ , pueden ser electrones: aurales y del cinturón de radiación (electrones relativistas), protones: solares (partículas energéticas solares) y galácticos (rayos cósmicos galácticos), según se resume en Seppälä (2007) y Mironova et al. (2015). Los electrones aurales son partículas con energías de hasta unas pocas decenas de keV y su precipitación se conoce como precipitación auroral porque precipitan en la región del óvalo auroral, proceden de la lámina de plasma de la cola de la magnetosfera y son los más fuertemente acelerados antes de precipitar en la atmósfera. Los electrones relativistas son partículas procedentes del anillo de radiación exterior (principalmente electrones con energías de hasta 10 MeV, llamados electrones relativistas) que forman una aurora difusa en una parte del óvalo auroral hacia el ecuador.

Hay varias regiones en la magnetosfera, donde existe un proceso de intercambio de energía. La reconexión magnética puede ocurrir en latitudes bajas en el lado diurno, así como en latitudes altas y en la cola magnética distante, que es la región de la física de las subtormentas aurorales.

En los sistemas de corrientes magnetosféricas, las corrientes alineadas en el campo se relacionan con la precipitación vista como el óvalo auroral, mientras que la precipitación en las líneas de campo abierto se produce a partir de la vaina magnética o directamente del viento solar. En la magnetosfera interior, se puede tener precipitación de partículas del cinturón de radiación, por ejemplo, en interacciones onda-partícula, o una precipitación más débil por la dispersión de la corriente de anillo. Las energías de las partículas precipitantes a menudo exceden los disponibles de las partículas del viento solar, por lo que varios mecanismos de aceleración deben estar presentes en la magnetosfera.

Cuando tiene lugar un evento protónico solar, asociado con eyecciones de masa coronal o fulguraciones solares, partículas energéticas, principalmente protones con energías de hasta cientos de MeV, de origen solar precipitan a altas latitudes geomagnéticas donde tienen acceso a la atmósfera (Kivelson y Russell, 1995); estos sucesos se conocen como Eventos Protónicos Solares y son un elemento importante en la Meteorología Espacial. La energía de una partícula al llegar a la atmósfera determina la profundidad a la que la partícula puede penetrar a ella: un protón que posee 10 MeV de energía cinética es capaz de ionizar la atmósfera a 65 km (Hargreaves, 1992).

El mecanismo de precipitación de partículas mencionado que permite el acoplamiento de la atmósfera superior e inferior, es llamado de efecto indirecto. Fue estudiado hace casi cuatro décadas por Solomon et al. (1982), usando un modelo de dos dimensiones y también observado frecuentemente a través de mediciones (Callis et al, 1996, 1998a, 1998b; Jackman et al, 1980, 1995, 2001.; Randall et al, 1998, 2001.; Rinsland et al., 1996; Russell et al., 1984; Siskind et al., 1997, 2000). En los lugares de la estratosfera en donde se produce in situ el componente nitrogenado NO<sub>x</sub> (= NO + NO<sub>2</sub>, el efecto se conoce como efecto directo de la precipitación de partículas (Jackman et al., 2005; Rohen et al, 2005). El efecto directo de la precipitación de partículas requiere partículas de muy alta energía y por lo tanto ocurre con menos frecuencia.

Puesto que el nitrógeno y el oxígeno son los componentes predominantes en la atmósfera neutra, son los más afectados por la ionización. Actualmente, los efectos por ionización secundaria de la precipitación de partículas energéticas que afectan el ambiente se resumen como sigue: producción de los gases NO<sub>x</sub> = N + NO + NO<sub>2</sub>, y HO<sub>x</sub> = H + OH + HO<sub>2</sub>; influencia en la temperatura y la dinámica atmosféricas durante eventos protónicos solares intensos (Jackman et al., 2007); incrementos de NO<sub>x</sub> y una subsecuente pérdida de ozono durante la precipitación de electrones energéticos con cambios significativos en las temperaturas polares y alturas geopotenciales, cambios se llevarían a cabo como resultado de la disminución del ozono o a través de calentamiento Joule (Rozanov et al., 2005; 2012); y aumentos de HO<sub>x</sub> y liberación de cloro desde el reservorio de cloro atmosférico HCl. Los incrementos en las especies de la familia de cloro impar ClONO<sub>2</sub> también han sido observados en la estratosfera media después de eventos protónicos solares (López-Puertas et al., 2005).

En este trabajo se presentan los efectos producidos por la precipitación de partículas con altas energías en la atmósfera de la Tierra del Hemisferio Sur durante y luego de la ocurrencia de tormentas geomagnéticas intensas sobre: a) Ionosfera y b) Estratosfera.

#### a) Ionosfera

La respuesta de la capa F2 a una tormenta geomagnética se conoce como tormenta ionosférica. Las tormentas ionosféricas pueden ser "positivas" o "negativas", según aumente o disminuya la densidad de electrones máxima de la capa F2 (NmF2) en comparación con los valores medios de los días geomagnéticamente tranquilos (Rishbeth y Garriott, 1969). Los cambios significativos en la densidad de electrones y otros parámetros clave de la región F

ionosférica dan como resultado una reducción en la precisión de la posición y en el rendimiento del seguimiento de los satélites e incluso dan como resultado la pérdida de la comunicación por satélite, entre otros efectos.

La morfología de la tormenta ionosférica es bastante complicada porque la reacción de la ionosfera puede ser bastante diferente en distintas estaciones ionosféricas aún durante la misma tormenta geomagnética, dependiendo de la latitud de la estación y su ubicación en el hemisferio de invierno o en el hemisferio de verano, hora local de la ocurrencia de perturbaciones magnéticas, la intensidad y algunos otros parámetros (Danilov, 2001). Sin embargo, aunque muchos estudios han informado los efectos de las tormentas geomagnéticas en la ionosfera, todavía no es posible pronosticar con precisión la respuesta de la ionosfera a una tormenta geomagnética debido a la complejidad y el carácter único de cada tormenta geomagnética. Actualmente se conoce que la precipitación de partículas energéticas, los campos eléctricos de origen magnetosférico, las perturbaciones atmosféricas viajeras, la circulación termosférica, los cambios de composición de neutros, pueden explicar las características ionosféricas de la densidad electrónica durante las diferentes fases de las tormentas geomagnéticas en diferentes latitudes.

En Mansilla and Zossi (2019) se estudiaron las variaciones de parámetros ionosféricos y termosféricos en estaciones ecuatoriales y de baja latitud del sector sudamericano durante la tormenta geomagnética ocurrida entre el 19 al 22 de diciembre de 2015.

Se trabajó con datos de sondeos ionosféricos (frecuencia crítica de la capa F2 (foF2) y su altura máxima (hmF2)) que se obtuvieron (cada 1 h) de la base de datos de Ionogramas digitales, DID Base (<http://giro.uml.edu/didbase/scaled.php>). La figura 1 muestra un mapa con las ubicaciones geográficas de las estaciones utilizadas en el trabajo.

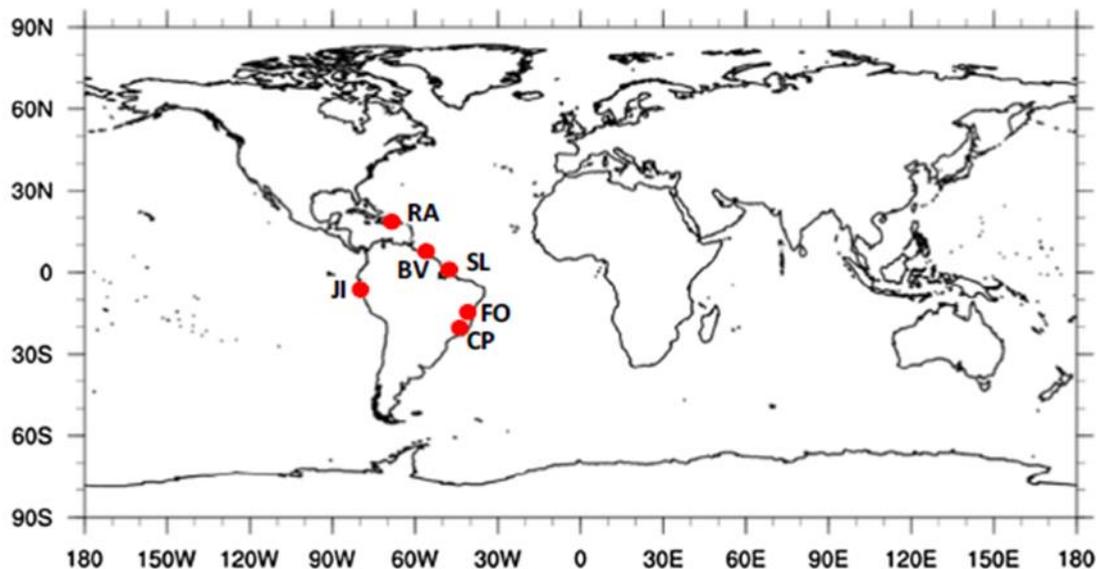


Fig. 1. Map with the geographical locations of the stations used in this study.

**Figura 1.** Mapa con las ubicaciones geográficas de las estaciones utilizadas en el trabajo (Mansilla and Zossi, 2019).

Los parámetros interplanetarios y geofísicos: componente Bz del campo magnético interplanetario (IMF), velocidad del viento solar (sw), densidad de protones, índices geomagnéticos AE y SYM-H se obtuvieron de la base de datos OMNI (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>). La relación  $[O] / [N_2]$  integrada en la columna del generador de imágenes ultravioleta global (GUVI) a bordo del satélite NASA's Thermosphere, Ionosphere, and Mesosphere, Energetics and Dynamics (TIMED) y la deriva del plasma a una altitud de 150 km del Jicamarca Unattended Long-term Investigations of the Ionosphere and Atmosphere (JULIA) radar

(<http://jro.igp.gob.pe/madrigal/>) para el período en estudio. Se utilizó el modelo de campo eléctrico de penetración rápida hacia el este del Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences (CIRES), que se basa en datos del satélite Advanced Composition Explorer (ACE), del radar JULIA y del magnetómetro del satélite CHAMP, el que se corrió a lo largo del sector longitudinal de las estaciones consideradas (<http://geomag.org/models/PPEFM/RealtimeEF.html>).

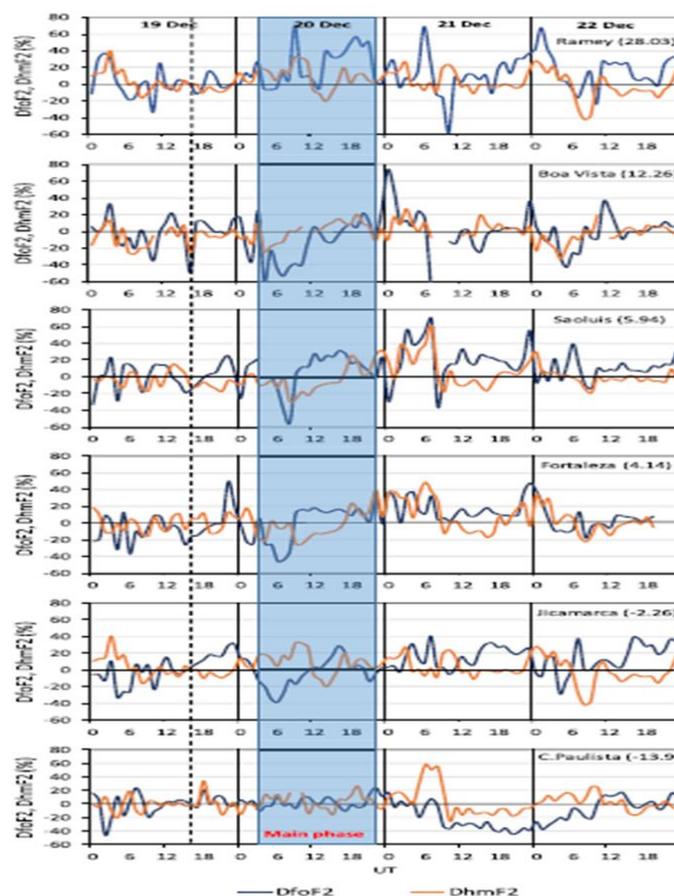
Con el fin de analizar los cambios producidos por la tormenta ionosférica se calcularon dos desviaciones relativas DfoF2 y Dhmf2:

$$\text{DfoF2} = (\text{foF2dist} - \text{foF2quiet}) / \text{foF2quiet} \times 100$$
$$\text{Dhmf2} = (\text{hmf2dist} - \text{hmf2quiet}) / \text{hmf2quiet} \times 100$$

donde foF2dist y hmf2dist son los valores horarios de la frecuencia crítica foF2 y la altura máxima de la capa F2 durante los días perturbados y foF2quiet y hmf2quiet son los valores correspondientes al día magnético tranquilo (18 de diciembre), que se utilizaron como valores de referencia.

La figura 2 muestra la respuesta ionosférica a la tormenta en términos de DfoF2 y Dhmf2 en las estaciones ecuatoriales y de baja latitud Jicamarca, Fortaleza, São Luís, Boa Vista, Cachoeira Paulista y Ramey durante el período 19-22 de diciembre de 2015. El rectángulo azul claro corresponde al período de la fase principal de la tormenta. El ssc (storm sudden commencement = comienzo súbito o repentino de la tormenta) ocurrió alrededor del mediodía local en este sector. Poco después del inicio de la tormenta a las 16:16 UT del 19 de marzo, se observaron aumentos de DfoF2 en São Luís, Fortaleza y Jicamarca y con menor amplitud en Ramey, Boa Vista y Cachoeira Paulista.

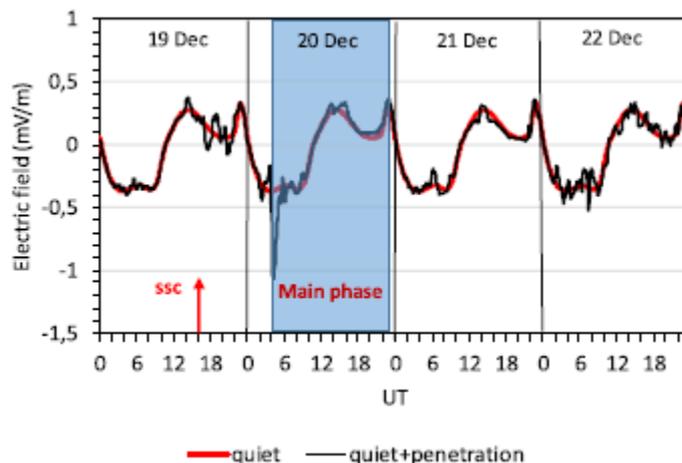
Estos efectos positivos irregulares de tormenta se mantuvieron en general hasta alrededor de las 00 UT del 20 de diciembre los que tuvieron asociadas disminuciones en la altura máxima de la capa F2, excepto en Fortaleza, donde se observó un aumento. Al inicio de la fase principal, sobre las estaciones de baja latitud Boa Vista, São Luís y Fortaleza y la cercana Jicamarca ecuatorial se iniciaron descensos en DfoF2, mientras que en Ramey se observó un aumento dos horas después y ningún efecto de la tormenta en Cachoeira Paulista. Los efectos negativos de la tormenta tuvieron diferente duración. En Boa Vista, el efecto de tormenta negativa se extendió hasta alrededor de las 17 UT, en São Luís y Fortaleza hasta ~ 10 UT y en Jicamarca hasta ~ 12 UT del 20 de diciembre. A excepción de Jicamarca, que tuvo incrementos en la altura del pico durante el efecto de tormenta negativa, las otras tres estaciones presentaron disminuciones de diferente amplitud en Dhmf2. Los efectos negativos de la tormenta cambiaron a efectos positivos irregulares con amplitud variable durante la fase principal. En Boa Vista el efecto positivo de tormenta se produjo desde alrededor de las 18 UT hasta las 06 UT del 21 de diciembre, mientras que en São Luís, Fortaleza y Jicamarca los efectos positivos se mantuvieron durante todo el 21 de diciembre. En general, estos efectos tuvieron asociadas reducciones en Dhmf2 durante la fase principal y luego incrementos irregulares durante la primera parte de la recuperación hasta alrededor de 06-07 UT. Durante el resto del 21 de diciembre, volvieron a producirse descensos de Dhmf2. Durante la fase principal, se presentaron fluctuaciones (inferiores al 20%) en ambos parámetros en Cachoeira Paulista y al inicio de la recuperación se observó un efecto positivo de corta duración hasta alrededor de las 08 UT del 21 de diciembre, al que siguió un efecto negativo que persistió el resto de ese día.



**Figura 2.** Variaciones horarias de DfoF2 y Dhmf2 del 19 al 22 de diciembre de 2015 en Ramey, Boa Vista, São Luís, Fortaleza, Jicamarca y Cachoeira Paulista. La línea punteada vertical indica el comienzo repentino de la tormenta. El rectángulo azul claro define el período de la fase principal de la tormenta. (Mansilla and Zossi, 2019).

El efecto positivo tuvo asociado un aumento abrupto de Dhmf2 a valores cercanos a cero, mientras que el efecto de tormenta negativo tuvo asociadas disminuciones en Dhmf2. En Ramey persistió un efecto de tormenta positivo de amplitud irregular a lo largo de la fase principal y la recuperación, salvo un efecto negativo de corta duración entre las 06 UT y las 11 UT del 20 de diciembre. En general, Dhmf2 se mantuvo por encima del nivel cero casi todo este tiempo, excepto por 3 períodos de corta duración alrededor de 12 UT - 16 UT el 20 de diciembre, y 03 UT - 06 UT y 12 UT - 22 UT el 21 de diciembre.

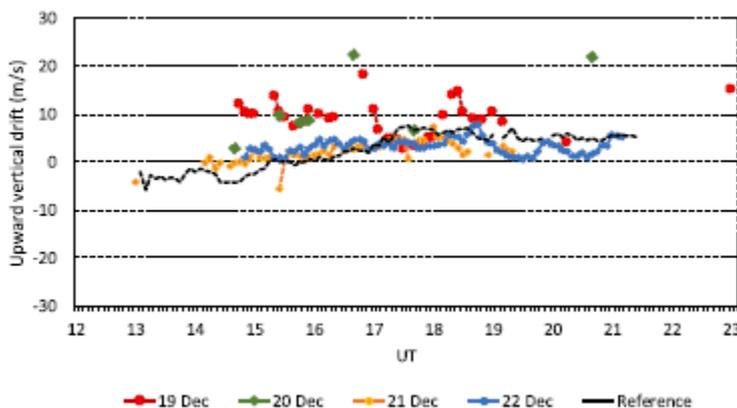
Los resultados muestran en general una caída en foF2 (efectos negativos de tormenta) después de la medianoche local en latitudes cercanas a la ecuatorial y bajas al comienzo de la fase principal. Esto posiblemente requiera un mecanismo rápido como uno electrodinámico. Un campo eléctrico hacia el oeste posiblemente produzca un movimiento descendente de la capa F2 donde la recombinación es fuerte, produciendo los efectos negativos de la tormenta (Mikhailov and Leschinskaya, 1991; Prölss, 1995; Astafyeva et al., 2018). Para confirmar esta suposición, se utilizó el modelo de campo eléctrico de penetración rápida (PPEF) de CIRES. Este modelo se corrió para una longitud de 300°E. La Figura 3 muestra un pico significativamente negativo (~ 1 mV / m) aproximadamente a las 04 UT del 20 de diciembre, lo que indica un campo eléctrico perturbado hacia el oeste que conduce a derivas de plasma descendentes durante la noche.



**Figura 3.** Campo eléctrico de penetración rápida en las longitudes de las estaciones utilizadas entre el 19 y el 22 de diciembre de 2015(Mansilla and Zossi, 2019).

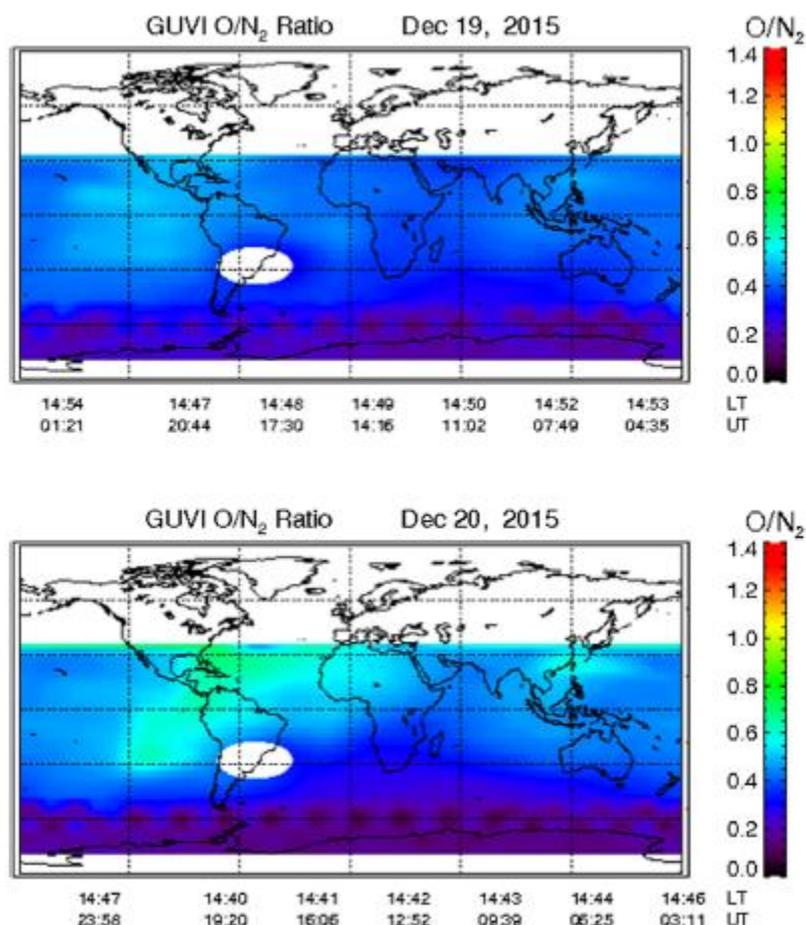
Sugerimos que las perturbaciones ionosféricas observadas al comienzo de la fase principal de la tormenta estarían relacionadas con un campo eléctrico de penetración rápida. Sin embargo, este campo eléctrico parece no afectar la ionosfera sobre Cachoeira Paulista. Modelos estadísticos (Fejer and Scherliess, 1995, 1997) apoyan esta suposición, ya que las derivas iónicas verticales ecuatoriales están asociadas con campos eléctricos de penetración muy variables cuya fuerza y dirección dependen de la hora local. Cuando el IMF está orientado hacia el sur, la deriva iónica vertical es hacia arriba durante el día y hacia abajo durante la noche.

El comportamiento posterior del PPEF indica que éste no habría influido en las perturbaciones de la ionosfera observadas posteriormente. Esto se puede ver en la Figura 4, que muestra derivas de plasma verticales promediadas cada cinco minutos a 155 km de altura, medidas en Jicamarca del 19-22 de diciembre de 2015, con el instrumento JULIA. Los valores del 3 de diciembre de 2015 ( $\Sigma k_p = 7-; q_2$ ) fueron tomados como referencia. Desafortunadamente, no existen mediciones de deriva vertical a la medianoche local, lo que permitiría verificar el efecto del campo eléctrico en la región F2. Mediciones entre 13 UT y 21 UT (10 LT - 16 LT) muestran incrementos significativos en la deriva vertical ascendente de los valores disponibles del 20 de diciembre y en menor medida del 19 de diciembre, lo que podría atribuirse a las pequeñas perturbaciones en PPEF observadas estas días. Los días 21 y 22 de diciembre de 2015 se observaron valores similares a los de referencia.



**Figura 4.** Derivas verticales promediadas a 155 km de altura medidos sobre Jicamarca con instrumento JULIA del 19 al 22 de diciembre de 2015. (Mansilla and Zossi, 2019).

Se conoce que los efectos negativos de las tormentas están bien correlacionados con los cambios en la composición del gas neutro (disminución de la relación  $O / N_2$ ) en latitudes altas, medias y bajas, durante una tormenta geomagnética (Prölss, 1980, 1995; Danilov, 2013). Un cambio a gran escala en la circulación termosférica es causado por el calentamiento en la región de latitudes altas, lo que produce un descenso de las especies neutras a través de superficies de presión constante en latitudes medias y bajas de la región F, esto es, una zona de perturbación de la composición, aumentando así la densidad de  $O$  en relación con  $N_2$  y  $O_2$  (Fuller-Rowell et al., 1997; Buonsanto, 1999; Ngwira et al., 2012). Los efectos positivos de la tormenta que ocurrieron varias horas después del inicio de la tormenta también se han atribuido a aumentos en la relación  $O / N_2$ , que se producen por aumentos en la densidad de oxígeno atómico y el consiguiente aumento en la relación  $O / N_2$  (Prölss, 1995). La Figura 5 muestra las variaciones en la relación  $O / N_2$  de la medición GUVI durante 19-22 de diciembre de 2015. En comparación con el 19 de diciembre, se puede ver el 20 de diciembre que hubo un incremento en la relación  $O / N_2$  en latitudes ecuatoriales y bajas. Esto posiblemente contribuya, junto con la perturbación del campo eléctrico, a los efectos positivos que se observan durante la fase principal y primera parte de la recuperación. Los menores valores de la relación  $O / N_2$  en latitudes cercanas a Cachoeira Paulista podrían ser una de las razones de la asimetría norte-sur del EIA durante la fase principal y de los efectos negativos sobre esta estación durante la fase de recuperación de la tormenta. Este efecto negativo de tormenta se debe posiblemente a que en verano coinciden las circulaciones de fondo y las inducidas por la tormenta (ambas hacia el ecuador), lo que favorece la llegada de gas neutro con la relación  $O / N_2$  incrementada a latitudes bajas (Danilov, 2001; 2013). El 21 de diciembre, la relación  $O / N_2$  se mantuvo alta en comparación con el 19 de diciembre, lo que explicaría los efectos positivos de la tormenta este día.



**Figura 5.** Mapas con la relación O / N<sub>2</sub> termosférico derivado de TIMED / GUVI durante el 19-22 de diciembre de 2015. (Mansilla and Zossi, 2019).

Concluyendo, del análisis de los efectos ionosférico-termosférico sobre estaciones ecuatoriales y de baja latitud del sector sudamericano, se surge que una rápida penetración de campos eléctricos magnetosféricos de polaridad hacia el oeste durante la noche parece ser la causa más probable de que la altura de la capa F2 disminuya inicialmente durante la fase principal. Para la excursión negativa de la componente Bz del campo magnético interplanetario que se produjo alrededor de las 04 UT del 20 de diciembre, existe una fuerte evidencia de la penetración de un campo eléctrico hacia el oeste en latitudes bajas y ecuatoriales. El efecto de este campo eléctrico es disminuir la densidad máxima de electrones de la capa F2 en latitudes ecuatoriales y bajas. Al mismo tiempo, la altura del pico F2 desciende en latitudes bajas pero aumenta sobre latitudes ecuatoriales. La cresta sur de la anomalía de ionización ecuatorial no se vio afectada significativamente por el PPEF. Las variaciones de plasma verticales ascendentes significativas en latitudes ecuatoriales parecen ser la causa más probable de los efectos positivos de la tormenta que reemplazaron los efectos negativos iniciales de la tormenta durante el desarrollo de la fase principal. Los cambios en la relación O / N<sub>2</sub> (aumentos o disminuciones) pueden ser los principales responsables de los efectos positivos y negativos observados durante la fase de recuperación de la tormenta.

#### b) Estratósfera

Crutzen et al. (1975) observaron que la inyección de grandes cantidades de protones en la atmósfera media durante los eventos de protones solares (SPE) conducía a una intensa producción de nitrógeno atómico. Brausser and Solomon (2005) indicaron que la presencia de NO<sub>x</sub> = NO + NO<sub>2</sub> y compuestos nitrogenados relacionados como el ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) en la atmósfera media, resultan de la oxidación del óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y de la ionización del nitrógeno molecular (N<sub>2</sub>) por partículas solares de alta energía. Además, gran parte de la energía transportada por los protones solares podría afectar la atmósfera media dando lugar a interacciones atmosféricas que incrementarían la producción de constituyentes de NO<sub>x</sub>, lo que puede provocar variaciones en el contenido de ozono (Solomon et al., 1982; Jackman, 1991; Jackman et al., 1995; 2014). Las partículas solares energéticas (protones, con energías entre 1 MeV y unos pocos cientos de MeV; y electrones, con energías entre decenas de keV y unos pocos MeV) son una fuente importante de ionización para la mesosfera y la estratosfera superior (Turunen et al., 2009; Rozanov et al, 2012; Sepällä et al, 2014). Durante las SPE, la precipitación de partículas en la atmósfera puede producir una disminución del ozono con un aumento de NO<sub>2</sub> en latitudes  $\geq 45^\circ$  en la estratosfera superior (Sepällä, 2004, 2006; López-Puertas et al., 2005). Von Clarmann et al. (2013) observaron una respuesta inmediata de NO<sub>x</sub> a las SPEs que ocurrieron durante los primeros meses de 2012. Luego de que ocurriera una SPE en marzo de 2012, se observó un aumento de NO<sub>x</sub> entre los 47 km y 66 km de altura en el hemisferio sur en latitudes superiores a 60° y sin subsidencia del aire. Los aumentos de NO<sub>x</sub> podrían atribuirse a la producción "in situ" por parte de la SPE. Zossi et al. (2016) detectaron aumentos en las anomalías de la columna total de ozono en estaciones ubicadas entre los 70° y 75° S después de la ocurrencia de dos tormentas geomagnéticas. Ese comportamiento podría explicarse a través de efectos dinámicos.

Laštovička y coautores analizaron los efectos de tormentas geomagnéticas sobre el ozono total en latitudes medias; encontrando solo efectos estadísticamente significativos en el círculo de latitud 50° N, para tormentas fuertes (índice Ap > 60), en invierno y durante la fase E de QBO. Los efectos observados podrían deberse a la redistribución del ozono causada por cambios en la dinámica atmosférica relacionados con las tormentas (Laštovička and Mich 1999; 2005; 2009).

El bajo campo magnético en la zona de la Anomalía Magnética del Atlántico Sur (SAA) facilita la entrada de partículas con alta energía desde la magnetosfera (Pinto and González, 1989a; Pinto et al., 1992; Selesnick et al., 2003; Hartmann and Pacca, 2009). La SAA ocupa una importante región de América del Sur y del Sur del Océano Atlántico. La dispersión del ángulo de inclinación y las perturbaciones magnéticas en tiempo de tormenta, entre otros mecanismos magnetosféricos, pueden provocar un aumento de la precipitación de partículas en la zona SAA (Abdu et al., 1981; Abel and Thorne, 1999). Además, la interacción onda-partícula puede conducir a un aumento del cono de pérdida de las partículas a la deriva y con otros procesos producir la pérdida de partículas del cinturón de radiación interno en la zona SAA (Abdu et al, 2005). Las partículas que se desplazan en órbitas cerradas alrededor de la Tierra, cuando alcanzan la zona SAA, pueden quedar casi atrapadas en lugar de quedar atrapadas de forma estable o precipitarse. Las partículas que están casi atrapadas tienen ángulos de inclinación fuera del SAA, no están en el cono de pérdida local, pero sus ángulos de inclinación son lo suficientemente pequeños como para precipitarse cuando entran en la región de SAA. Se dice que estas partículas están en el cono de pérdida de deriva, que es el cono de máxima pérdida local dentro de la región SAA. (Asikainen and Mursula, 2005). Asikainen and Mursula (2008) estudiaron el comportamiento de las partículas de los cinturones de radiación con energías entre 30 keV y 2,5 MeV, y en escalas de tiempo más largas dentro del SAA en diferentes horas locales.

Abel and Thorne (1999) modelaron la precipitación de electrones energéticos en la atmósfera de la Tierra desde el cinturón de radiación interno ( $L \leq 2$ ). Descubrieron que estos flujos de precipitación están correlacionados con las variaciones del tamaño del cono de pérdida en el área de SAA; y podría ser una fuente importante de ionización mesosférica cerca de la zona mencionada.

En Zossi et al. (2021) se analizaron los posibles efectos de la precipitación de protones energéticos en la región SAA durante y después de la ocurrencia de dos intensas tormentas geomagnéticas ocurridas en noviembre de 2003 y noviembre de 2004. Consideramos un rectángulo ubicado entre 5 y 40 grados de latitud sur y entre -45 y -60 grados de longitud este, incluidos en la región SAA. Los dos períodos de intensas tormentas geomagnéticas analizados en Zossi et al. (2021), ocurrieron el 20 de noviembre de 2003 y el 8 de noviembre de 2004, durante la primavera en el Hemisferio Sur. Las características de las tormentas geomagnéticas: índice geomagnético, Dst; los parámetros del campo magnético interplanetario, IMF, y datos de viento solar, se usaron datos horarios de OMNI a 1AU ([ftp://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low\\_res\\_omni/](ftp://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low_res_omni/)). Por su lado, los datos de protones fueron los medidos por instrumentos MEPED (detector de electrones de protones de energía media) a bordo de los satélites NOAA-15 y NOAA-16 en órbita polar, canal mep0p2: MEPED-0 protones de 80 keV a 240 keV, en recuentos/segundo ([http://www.ngdc.noaa.gov/stp/sa\\_satellite/poes](http://www.ngdc.noaa.gov/stp/sa_satellite/poes)). Finalmente, con el fin de analizar los posibles efectos sobre la zona SAA, se hizo uso de: datos diarios de ozono, en unidades Dobson (DU), registrados por TOMS (<https://science.nasa.gov/missions/TOMS>), y SBUV Merged Ozone Data (<https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/anonftp/toms/sbuV/AGGREGATED/>).

Para el análisis de los efectos en la columna de ozono total durante las tormentas geomagnéticas, se utilizó el índice TCOR, que da la desviación relativa del ozono de la columna total diaria, TCO, de su comportamiento durante los días tranquilos, y se define como:

$$TCOR = \frac{TCO - TCOQ}{TCOQ}$$

donde TCOQ, es el promedio de la columna de ozono total de cinco días geomagnéticos tranquilos del mes de cada tormenta geomagnética (Zossi et al, 2016).

Se consideraron las siguientes tres estaciones ubicadas en la región SAA: Bauru, São Paulo y Cachoeira Paulista. Todas ellas están localizadas en el área del rectángulo elegida para el análisis. Sus coordenadas geográficas y geomagnéticas para el año 2005 (Servicio de Datos Geomagnéticos, Universidad de Kyoto, <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/gggm/index.html>) se listan en la Tabla I.

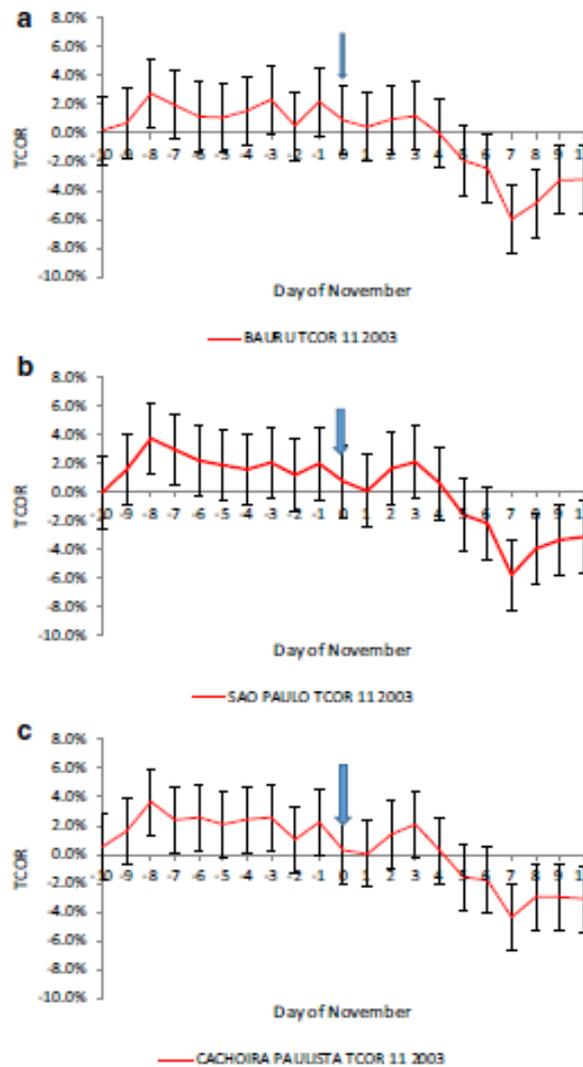
**Tabla I.** Coordenadas geográficas y geomagnéticas para 2005 de las estaciones ubicadas en la región SAA elegidas para el análisis. (Zossi et al, 2021).

Stations	Geog. lat.	Geog. long.	2005	
			Geom. lat.	Geom. long.
Bauru	-22.33	-49.05	12.37	21.61
Sao Paulo	-23.56	-46.74	13.57	24.37
Cachoeira Paulista	-22.68	-45	12.66	25.4

Se calcularon los TCOR, con datos registrados por TOMS, para cada estación desde diez días antes de la fase principal de la tormenta hasta diez días después de la ocurrencia del valor mínimo del índice Dst. El día del valor mínimo del índice Dst se indica en el eje de abscisas con 0; con -1 a -10, los diez días anteriores; y del 1 al 10 los diez días siguientes.

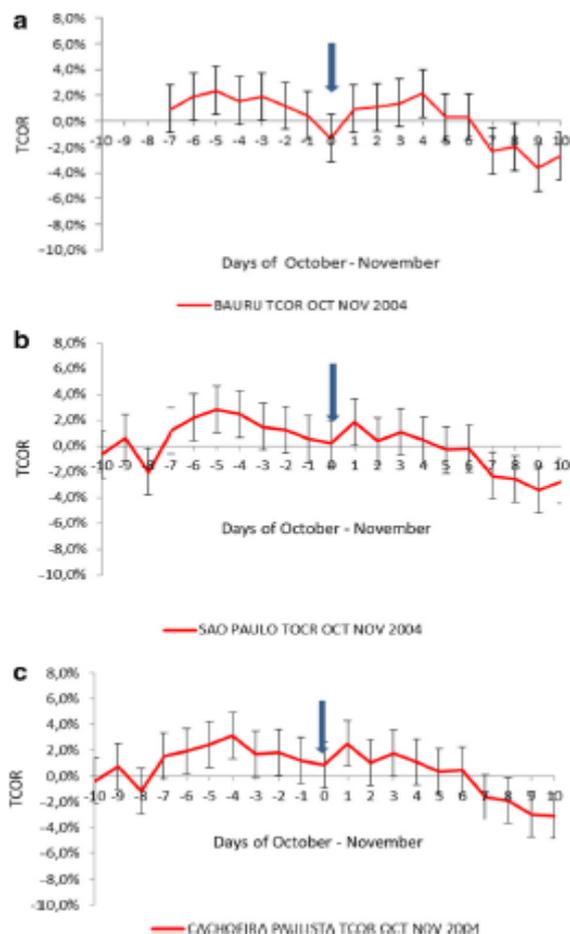
Las Figuras 6 a-c muestran los valores de TCOR del 10 al 30 de noviembre de 2003 para las estaciones de Bauru, São Paulo y Cachoeira Paulista, respectivamente. En cada figura se indican barras de error de un  $\sigma$  (desviación estándar).

Sobre Bauru se observan valores positivos no significativos de TCOR el día del valor mínimo del índice Dst y durante los 10 días anteriores; estos valores son del orden del 2,0%. São Paulo y Cachoeira Paulista, en general, muestran comportamientos similares a Bauru, excepto por incrementos significativos (alrededor del 4%) 8 días antes del valor mínimo de Dst (el 12 de noviembre). Estos aumentos no se pueden explicar por la perturbación estudiada. El 27 de noviembre (día + 4) TCOR comienza a tomar valores negativos, alcanzando valores estadísticamente significativos en las tres estaciones analizadas el día +7 (~ 4,4% a 6,0%).



**Figuras 6 a-c.** Valores TCOR entre el 10 y el 30 de noviembre de 2003, para las estaciones de Bauru, São Paulo y Cachoeira Paulista, respectivamente. Se indican las barras de error. (Zossi et al, 2021).

Las Figuras 7 a-c muestran los valores de TCOR del 29 de octubre al 18 de noviembre de 2004 para las estaciones de Bauru, São Paulo y Cachoeira Paulista, respectivamente. En cada figura se indican barras de error de un  $\sigma$ . Las figuras muestran, en general, una oscilación cuasiperiódica en los valores de TOCR. En las tres estaciones, TOCR tiene un aumento en los días -4 y -5 antes del valor mínimo del índice Dst, y un mínimo que se observa alrededor del día -8 solo en São Paulo y Cachoeira Paulista, ya que Bauru no tiene datos ese día. Siete días después del valor mínimo del índice Dst, el 15 de noviembre, se observan disminuciones estadísticamente significativas del orden de 4.0% en todas las estaciones analizadas. Estos valores se mantienen hasta el día 10.



**Figuras 7 a-c.** Valores TCOR entre el 29 de octubre y el 18 de noviembre de 2004, para las estaciones de Bauru, São Paulo y Cachoeira Paulista, respectivamente. Se indican las barras de error. (Zossi et al, 2021).

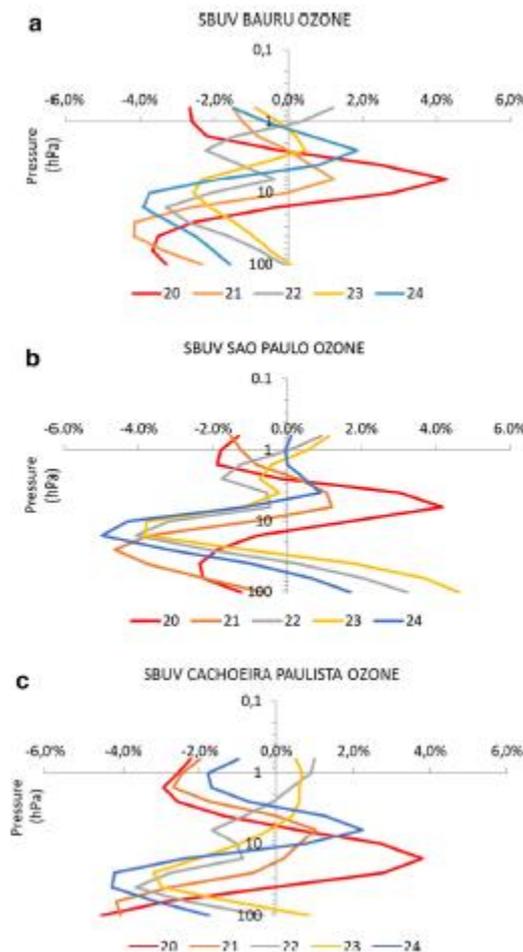
Para analizar los efectos sobre los perfiles de ozono medidos por SBUV, entre 0,639 hPa (~ 53,3 km) y 101,3 hPa (~ 15,8 km), se calculó para cada altura, la diferencia relativa con respecto a su comportamiento en el día geomagnético tranquilo, elegido para cada tormenta (Tabla II)

**Tabla II.** Días geomagnéticamente tranquilos utilizados para el análisis de los efectos durante los períodos de las tormentas de 2003 y 2004. (Zossi et al, 2021).

	Q days used November 20, 2003 storm	Q days used November 08, 2004 storm
TOMS	05-08-07-19/Nov/2003	02-05-06-15-18/Nov/ 2004
SBUV	19/Nov/2003	23/Nov/2004
UARS-	19/Nov/2003	23/Nov/2004
HALOE		

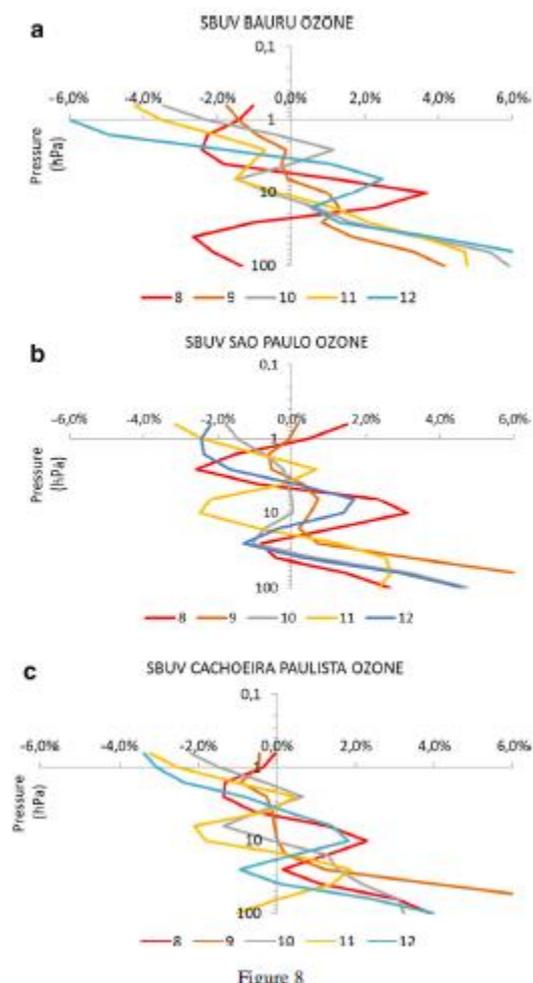
Las Figuras 8 a-c muestran los perfiles de la diferencia relativa de ozono entre 0,639 hPa y 101,3 hPa, para las estaciones Bauru, São Paulo y Cachoeira Paulista respectivamente del 20 al 24 de noviembre de 2003, (línea roja para el día 20, línea marrón para el día 21, línea gris para el día 22, línea naranja para el día 23 y línea azul claro para el día 24). Los perfiles de ozono muestran un comportamiento similar en la forma de su variación, pero se diferencian en las alturas en las que se presentan los máximos de los aumentos y disminuciones. Solo se observan incrementos significativos el 20 de noviembre, día del valor mínimo del índice Dst, a diferentes alturas de la

estratosfera media, en todas las estaciones analizadas: en Bauru y São Paulo a 6,4 hPa (36,3 km); y en Cachoeira Paulista a 10,1 hPa (32,9 km). También se observan aumentos en São Paulo los días 22, 23 y 24 de noviembre en la estratosfera inferior. Todos los días analizados se observan disminuciones en la diferencia relativa de ozono, en la estratosfera superior y en la parte baja y baja de la estratosfera media y disminuciones significativas en la estratosfera inferior. Por ejemplo, para Bauru, la disminución mínima, del 4,1%, se observa el día 21, a 40 hPa (22,7 km); mientras que para São Paulo, del 5,0%, el día 24 a 16,1hPa (29,4 km); Cachoeira Paulista muestra el valor mínimo del orden del 4.0% todos los días en la estratosfera inferior.



**Figuras 8 a-c.** Perfiles de diferencia relativa de ozono del 20 al 24 de noviembre de 2003, para alturas entre 0,639 y 101,3 hPa, para las estaciones de Bauru, São Paulo y Cachoeira Paulista, respectivamente. Línea roja para el día 20, línea marrón para el día 21, línea gris para el día 22, línea naranja para el día 23 y línea azul claro para el día 24 (Zossi et al, 2021).

Las figuras 9 a-c muestran los perfiles de la diferencia relativa de ozono entre 0,639 y 101,3 hPa, para las estaciones Bauru, São Paulo y Cachoeira Paulista respectivamente del 08 al 12 de noviembre de 2004 (línea roja para el día 8, línea marrón para el día 9, línea gris para el día 10, línea naranja para el día 11 y línea azul claro para el día 12). Las figuras no muestran incrementos significativos, en los días 8 y 12, a las mismas alturas de la estratosfera media; e incrementos significativos, con valores entre 3,0% y 6,0%, todos los días en la estratosfera inferior. Se observan disminuciones en los perfiles de los valores de ozono en la estratosfera superior todos los días y en las tres estaciones consideradas. Un descenso significativo, entre el 4,0% y el 6,0%, los días 11 y 12, muestra la estación de Bauru. Además, se observan disminuciones significativas, entre 4.0% y 6.0%, en Bauru los días 11 y 12 a ~ 1hPa.



**Figuras 9 a-c.** Perfiles de diferencia relativa de ozono del 08 al 12 de noviembre de 2004, para alturas entre 0,639 y 101,3 hPa, para las estaciones de Bauru, São Paulo y Cachoeira Paulista, respectivamente. Línea roja para el día 20, línea marrón para el día 21, línea gris para el día 22, línea naranja para el día 23 y línea azul claro para el día 24 (Zossi et al, 2021).

Resumiendo, los valores de TCOR muestran disminuciones estadísticamente significativas entre 7 y 10 días después de la ocurrencia de las intensas tormentas primaverales. Esto podría estar asociado con la precipitación de protones en la zona SAA desde el cinturón interno de radiación de Van Allen. Existe evidencia de que el anillo de radiación interna exhibe una disminución aguda durante los períodos de tormentas geomagnéticas que siguen con una recuperación prolongada (Zou et al., 2011); el día del Dst mínimo, la diferencia relativa de los perfiles de ozono, de los datos de SBUV, indica incrementos en la estratosfera media durante ambas tormentas. Se observan disminuciones significativas todos los días analizados en la estratosfera superior, pero en la estratosfera inferior los efectos son diferentes para cada tormenta.

Es necesario incrementar las estadísticas de períodos perturbados, analizar los posibles efectos sobre otros trazadores estratosféricos y estudiar cómo la dinámica tropical podría afectar los efectos observados.

## REFERENCIAS

- Abdu, M. A., Batista, I. S., Piazza, L. R., Massabani, O., 1981. Magnetic storm associated enhanced particle precipitation in the South Atlantic anomaly: Evidence from VLF phase measurements, *J. Geophys. Res.* 86, 7533–7542.
- Abdu, M.A., Batista, I.S., Carrasco, A.J., Brum, C.G.M., 2005. South Atlantic magnetic anomaly ionization: A review and a new focus on electrodynamic effects in the equatorial ionosphere, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 67, 1643–1657.
- Abel, B., Thorne, R. M., 1999. Modeling energetic electron precipitation near the South Atlantic anomaly, *J. Geophys. Res.*, 104, 7037–7044.
- Asikainen, T., Mursula, K., 2005. Filling the South Atlantic anomaly by energetic electrons during a great magnetic storm, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L16102, doi:10.1029/2005GL023634.
- Asikainen, T., Mursula, K., 2008. Energetic electron count rates behaviour at low L-shells and its relation to the South Atlantic Anomaly, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 70 (2008) 532–538. doi:10.1016/j.jastp.2007.08.061
- Astafyeva, E., Zakharenkova, I., Hozumi, K., Alken, P., Coïsson, P., Hairston, M.R., Coley, W.R., 2018. Study of the equatorial and low latitude electrodynamic and ionospheric disturbances during the 22–23 June 2015 geomagnetic storm using ground-based and spaceborne techniques. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 123, 2424–2440. <https://doi.org/10.1002/2017JA024981>.
- Akasofu, S.I. (1998). *Aurora. From the Sun, Auroras, magnetic Storms, Solar Flares, Cosmic Rays.* Suess, S., Tsurutani, B. (Ed.). American Geophysical Union. 1, 11.
- Baker, D. N., Mason, G. M., and Mazur, J. E., 2012. A small spacecraft mission with large accomplishments. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 93(34):325-326.
- Barthia, P. K., McPeters, R. D., Mateer, C. L., Flynn, L. E., Wellemeyer, C., 1996. Algorithm of the estimation of vertical ozone profiles from backscattered ultraviolet technique, *J. Geophys. Res.*, 101, N- D13, 18793-18806.
- Buonsanto, M.J., 1999. Ionospheric storms—a review. *Space Sci. Rev.* 88, 563–601. <https://doi.org/10.1023/A:1005107532631>
- Brasseur, G. P., Solomon, S., 2005. *Aeronomy of the Middle Atmosphere: Chemistry and Physics of the Stratosphere and Mesosphere*, Springer, Third revised and enlarged edition, Netherlands.
- Callis, L. B., Boughner, R. E., Baker, D. N., Mewaldt, R. A., Bernard Blake, J., Selesnick, R. S., Cummings, J. R., Natarajan, M., Mason, G. M., and Mazur, J. E., 1996. Precipitating electrons: Evidence for effects on mesospheric odd nitrogen. *Geophysical research letters*, 23(15):1901-1904.
- Callis, L. B., Natarajan, M., Evans, D. S., and Lambeth, J. D., 1998a. Solar atmospheric coupling by electrons (SOLACE): 1. Effects of the May 12, 1997 solar event on the middle atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D21):28405-28419.
- Callis, L. B., Natarajan, M., Lambeth, J. D., and Baker, D. N., 1998b. Solar atmospheric coupling by electrons (SOLACE): 2. Calculated stratospheric effects of precipitating electrons, 1979-1988. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D21):28421-28438.
- Crutzen, P. J., Isaksen, I. S. A., Reid, G. C., 1975. Solar proton events: Stratospheric sources of nitric oxide, *Science*, 189, 457–458.

- Danilov, A.D., 2001. F2-region response to geomagnetic disturbances. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 63, 441–449. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00175-9](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00175-9).
- Danilov, A.D., 2013. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances. *Adv. Space Res.* 52, 343–366. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.04.019>.
- Fejer, B.G., Scherliess, L., 1995. Time dependent response of equatorial ionospheric electric fields to magnetospheric disturbances. *Geophys. Res. Lett.* 22 (7), 851–854. <https://doi.org/10.1029/95GL00390>.
- Fejer, B.G., Scherliess, L., 1997. Empirical models of storm time equatorial zonal electric fields 24,047–24,056. *J. Geophys. Res.* 102 (A11). <https://doi.org/10.1029/97JA02164>.
- Fuller-Rowell, T.J., Codrescu, M., Forbes, J.M., 1997. Neutral density specification using first principle models: semi-annual variations and storms. *Adv. Astronaut. Sci.* 97, 565–581.
- Hargreaves, J. K., 1992. *The solar-terrestrial environment: an introduction to geospace the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere, and magnetosphere.* Cambridge University Press.
- Hartmann, G. A., Pacca, I. G., 2009. Time evolution of the South Atlantic Magnetic Anomaly, *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, 81(2): 243-255.
- Jackman, C., Frederick, J., and Stolarski, R., 1980. Production of odd nitrogen in the stratosphere and mesosphere: An intercomparison of source strengths. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 85(C12):7495-7505.
- Jackman, Ch. H., 1991. Effects of Energetic Particles on Minor Constituents of the Middle Atmosphere, *J. Geomag. Geoelectr.*, 43, Suppl., 637-646.
- Jackman, C. H., Cerniglia, M. C., Nielsen, J. E., Allen, D. J., Zawodny, J. M., McPeters, R. D., Douglass, A. R., Rosenfield, J. E., and Rood, R. B., 1995. Two-dimensional and three-dimensional model simulations, measurements, and interpretation of the influence of the October 1989 solar proton events on the middle atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 100(D6):11641-11660.
- Jackman, C. H., McPeters, R. D., Labow, G. J., Fleming, E. L., Praderas, C. J., and Russell, J. M., 2001. Northern Hemisphere atmospheric effects due to the July 2000 solar proton event. *Geophysical Research Letters*, 28(15):2883-2886.
- Jackman, C. H., DeLand, M. T., Labow, G. J., Fleming, E. L., Weisenstein, D. K., Ko, M. K., Sinnhuber, M., and Russell, J. M., 2005. Neutral atmospheric influences of the solar proton events in October-November 2003. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 110(A9).
- Jackman, C. H., Roble, R. G., and Fleming, E. L., 2007. Mesospheric dynamical changes induced by the solar proton events in OctoberNovember 2003. *Geophysical Research Letters*, 34(4).
- Jackman, C.H., Randall, C.E., Harvey, V.L., Wang, S., Fleming, E.L., Lopez-Puertas, M., Funke, B., Bernath, P. F., 2014. Middle atmospheric changes caused by the January and March 2012 solar proton events, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 1025–1038. doi:10.5194/acp-14-1025-2014
- Lastovicka, J, & Mich, P., 1999. Is ozone affected by geomagnetic storms? *Adv. Space Res.*, 24 (5), 631-640.
- Lastovicka, J, & Krizan, P., 2005. Geomagnetic Storms, Forbush decreases of cosmic rays and total ozone at northern higher middle latitudes, *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, 67, 119-124.

- Lastovicka, J, & Krizan, P., 2009. Impact of strong geomagnetic storms on total ozone at southern higher middle latitudes *Stud, Geophys, Geod.*, 53, 151–156.
- Lopez-Puertas, M., Funke, B., Gil-Lopez, S., von Clarmann, T., Stiller, G. P., Hopfner, M., Kellmann, S., Fischer, H., Jackman, C. H., 2005. Observation of NO<sub>x</sub> enhancement and ozone depletion in the Northern and Southern Hemispheres after the October–November 2003 solar proton events, *J. Geophys. Res.*, 110, A09S43, doi:10.1029/2005JA011050.
- Kivelson, M. G. and Russell, C.T., 1995. *Introduction to space physics*. Cambridge University Press.
- Mansilla, G. A. and Zossi, M. M. , 2019. Effects on the equatorial and low latitude thermosphere and ionosphere during the 19–22 December 2015 geomagnetic storm period, *Advances in Space Research*, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.09.025>
- Mikhailov, A.V., Leschinskaya, T.Yu, 1991. On the mechanism of day time F2-layer negative disturbances at the geomagnetic equator. *Geomag. Aeron.* 31, 1027–1031.
- Mironova, I. A., Aplin, K. L., Arnold, F., Bazilevskaya, G. A., Harrison, R. G., Krivolutsky, A. A., Nicoll, K. A., Rozanov, E. V., Turunen, E., and Usoskin, I. G., 2015. Energetic particle influence on the Earth's atmosphere. *Space Science Reviews*, 194(1):1-96.
- Ngwira, C.M., Lee-Anne McKinnell, P.J., Cilliers, Coster, A.J., 2012. Ionospheric observations during the geomagnetic storm events on 24–27 July 2004: Long-duration positive storm effects. *J. Geophys. Res.* 117, A00L02. <https://doi.org/10.1029/2011JA016990>.
- Prölss, G.W., 1980. Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere: recent results obtained by satellite-borne gas analyzers. *Rev. Geophys. Space Phys.* 18, 183–202. <https://doi.org/10.1029/RG018i001p00183>.
- Prölss, G.W., 1995. Ionospheric F-region storms. *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*, vol. 2. CRC Press, Boca Raton, pp. 195–248.
- Randall, C., Rusch, D., Bevilacqua, R., Hoppel, K., and Lumpe, J., 1998. Polar ozone and aerosol measurement (POAM) II stratospheric NO<sub>2</sub>, 1993/1996. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D21):28361-28371.
- Randall, C., Siskind, D., and Bevilacqua, R., 2001. Stratospheric NO<sub>x</sub> enhancements in the southern hemisphere vortex in winter/spring of 2000. *Geophysical Research Letters*, 28(12):2385-2388.
- Rawat, R., Echer, E., Gonzalez, W.D. , 2018. How different are the solar wind-interplanetary conditions and the consequent geomagnetic activity during the ascending and early descending phases of the solar cycles 23 and 24?. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 123, 6621–6638. <https://doi.org/10.1029/2018JA025683>.
- Rinsland, C., Gunson, M., Salawitch, R., Newchurch, M., Zander, R., Abbas, M., Abrams, M., Manney, G., Michelsen, H., Chang, A., 1996. ATMOS measurements of H<sub>2</sub>O + 2CH<sub>4</sub> and total reactive nitrogen in the November 1994 Antarctic stratosphere: Dehydration and denitrification in the vortex. *Geophysical research letters*, 23(17):2397-2400.
- Rishbeth, H., Garriott, O.K., 1969. *Introduction to Ionospheric Physics*. Academic press, New York and London.
- Rohen, G., Von Savigny, C., Sinnhuber, M., Llewellyn, E., Kaiser, J., Jackman, C., Kallenrode, M.-B., Schröter, J., Eichmann, K.-U., Bovensmann, H., 2005. Ozone depletion during the solar proton events of October/November 2003 as seen by SCIAMACHY. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 110(A9).

- Rozanov, E., Callis, L., Schlesinger, M., Yang, F., Andronova, N., and Zubov, V., (2005). Atmospheric response to NO<sub>y</sub> source due to energetic electron precipitation. *Geophysical Research Letters*, 32(14).
- Rozanov, E., Calisto, M., Egorova, T., Peter, T., and Schmutz, W., 2012. Influence of the precipitating energetic particles on atmospheric chemistry and climate. *Surveys in geophysics*, 33(3-4):483-501.
- Russell III, J. M., Solomon, S., Gordley, L. L., Remsberg, E. E., and Callis, L. B., 1984. The variability of stratospheric and mesospheric NO<sub>2</sub> in the polar winter night observed by LIMS. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 89(D5):7267-7275.
- Seppälä, A., 2007. Observations of production and transport of NO<sub>x</sub> formed by energetic particle precipitation in the polar night atmosphere. PhD thesis, Faculty of Science of the University of Helsinki
- Seppälä, A., Matthes, K., Randall, C. E., Mironova, I. A., 2014. What is the solar influence on climate? Overview of activities during CAWSES-II. *Progress in Earth and Planetary Science Springer Open Journal*, 1:24.
- Siskind, D. E., 2000. On the coupling between middle and upper atmospheric odd nitrogen. *Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, 123:101-116.
- Siskind, D. E., Bacmeister, J., Summers, M., and Russell III, J., 1997. Two-dimensional model calculations of nitric oxide transport in the middle atmosphere and comparison with Halogen Occultation Experiment data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 02(D3):3527-3545.
- Solomon, S., Crutzen, P. J., and Roble, R. G., 1982. Photochemical coupling between the thermosphere and the lower atmosphere: I. Odd nitrogen from 50 to 120 km. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 87(C9):7206-7220.
- McPeters, R. D., P. K. Bhartia, Arlin J. Krueger, and Jay R. Herman. 1998. Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS), Data Products User's Guide, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, NASA Reference Publication.
- Pinto Jr O., Gonzalez W. D., 1989a. Energetic electron precipitation at the South Atlantic Magnetic Anomaly: a review. *J Atmos Solar-Terr Phys* 51(5):351–365.
- Pinto Jr O., Gonzalez W. D., Gonzalez, A.L.C. 1989b. Time Variations of X ray fluxes at the South Atlantic Magnetic Anomaly in association with a strong geomagnetic storm. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 94, N. A12, pages 17,275-17,280.
- Pinto Jr O., Gonzalez, W. D., Pinto, I. R. C. A., Gonzalez, A. C., Mendes Jr, O., 1992. The South Atlantic Magnetic Anomaly: three decades of research. *J Atmos Solar-Terr Phys* 54:1129–1134.
- Rozanov, E, Calisto, M., Egorova, T., Peter, T., Schmutz, W., 2012. Influence of the precipitating energetic particles on atmospheric chemistry and climate. *Surv. Geophys.* 33, 483–501, doi:10.1007/s10712012-9192-0. DOI 10.1007/s10712-012-9192-0
- Selesnick, R.S., Blake, J.B., Mewaldt, R.A., 2003. Atmospheric losses of radiation belt electrons. *Journal of Geophysical Research* 108 (A12), 1468.
- Sepällä, A., Verronen, P. T., Kyrola, E., Hassinen, S., Backman, L., Hauchecorne, A., Bertaux, J. L., Fussen, D., 2004. Solar proton events of October-November 2003: Ozone depletion in the Northern Hemisphere polar winter as seen by GOMOS/Envisat, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L19107, doi:10.1029/2004GL021042.

- Sepälä, A., Verronen, P. T., Sofieva, V. F., Tamminen, J., Kyrola, E., Rodger, C. J., Clilverd, M. A., 2006. Destruction of the tertiary ozone maximum during a solar proton event, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L07804, doi:10.1029/2005GL025571.
- Seppälä, A., Matthes, K., Randall, C. E., Mironova, I. A., 2014. What is the solar influence on climate? Overview of activities during CAWSES-II. *Progress in Earth and Planetary Science Springer Open Journal*, 1:24.
- Solomon, S., Crutzen, P. J., Roble, R. G., 1982. Photochemical coupling between the thermosphere and the lower atmosphere 1. Odd nitrogen from 50 to 120 km, *J. Geophys. Res.*, 87, 7206–7220.
- Turunen, E., Verronen, P. T., Seppälä, A., Rodger, C. J., Clilverd, M. A., Tamminen, J., Enell C. F., Ulich, Th., 2009. Impact of different energies of precipitating particles on NO<sub>x</sub> generation in the middle and upper atmosphere during geomagnetic storms, *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, 71, pp. 1176-1189, doi:10.1016/j.jastp.2008.07.005.
- Von Clarman, T., Funke, B., Lopez-Puertas, M., Kellmann, S., Linden, A., Stiller, G. P., Jackman, C. H., Harvey, V. L., 2013. The solar proton events in 2012 as observed by MIPAS, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 2339–2343, doi:10.1002/grl.50119.
- Zossi, M. M. and Fernandez, P. (2010), Trends in Total Ozone and the effect of the Equatorial Zonal Wind QBO, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 72, 565-569.
- Zossi de Artigas, M., Zotto, E.M., Mansilla, G.A. Fernandez de Campra, P., 2016: Effects of energetic particles precipitation on stratospheric ozone in the Southern Hemisphere. *Adv. Space Res.* 58, 2080-2089. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2016.02.019>
- Zou, H., Zong, Q. G., Parks, G. K., Pu, Z. Y., Chen, H. F., and Xie, L., 2011: Response of high-energy protons of the inner radiation belt to large magnetic storms, *J. Geophys. Res.*, 116, A10229, doi:10.1029/2011JA016733.
- Zossi, M.M., Zotto, E.M., and Mansilla, G.A, 2021: Can Geomagnetic Storms Affect Stratospheric O<sub>3</sub> and NO<sub>x</sub> in the South Atlantic Anomaly Zone? *Pure and Applied Geophysics*, 178(1), pp. 141–154.

**XXIX Reunión Científica de la  
Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, edición 2021**

**MESA REDONDA DE GEODESIA**

**LA GEODESIA ARGENTINA, HISTORIA, PRESENTE Y FUTURO**

La Mesa Redonda de Geodesia que se desarrolló en la XXIX Reunión Científica de la AAGG durante las primeras semanas de agosto de 2021, desafió circunstancias totalmente diferentes a las tradicionales, innovó en entornos virtuales y superó las expectativas de los organizadores, participantes y concurrentes. Además, la jerarquía de los participantes respaldó el grado superlativo alcanzado y en un marco virtual dio cuenta de los inconmensurables avances de los últimos, casi 100 años, de la Geodesia en la Argentina y las perspectivas de un futuro promisorio.

El Agrimensor Rubén Rodríguez, en "*Geodesia argentina*"- Síntesis Histórica, realiza una muy apretada semblanza de los comienzos de la Geodesia en la Argentina, resaltando sus hitos históricos tales como, la adopción del elipsoide de Hayford en concierto con la Asociación Internacional de Geodesia (IAG) en 1924, y poco después la elección de la proyección Gauss-Krüger para la cartografía que el IGN, la sanción de la Ley Nacional 12.334 en el año 1937, o primera ley de geodesia y la ley de la carta, y con ella se adoptó el punto Campo Inchauspe como datum de la red geodésica argentina. Posteriormente, el desarrollo, ampliación y compensación de la red geodésica a lo largo del territorio nacional adaptándose a nuevas tecnologías, siendo el Observatorio Argentino Alemán de Geodesia (AGGO) el último hito de su reseña.

El Dr. Ezequiel Pallejá, comparte con nosotros la actividad del Instituto de Geodesia de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires (ahora Instituto de Geodesia y Geofísica Aplicadas), en "*La Geodesia y la Geofísica en la FIUBA*", donde también ha sido director los últimos años. En relación a la actividad del Instituto en sus inicios, Pallejá, destaca la precisión de las redes geodésicas realizadas bajo la dirección del fundador del Instituto, el Ing. Eduardo Baglietto, aportes del Instituto a la gravimetría argentina como, la determinación de la gravedad absoluta con péndulos en Migueletes, en 1969 la observación de la gravedad en la cima del Aconcagua y mediciones gravimétricas submarinas en el Río de la Plata, que formaron parte de una incansable actividad. En relación a los últimos años, el Instituto tuvo una participación muy activa en la Comisión Nacional del Límite de la Plataforma Continental Argentina desarrollando estudios fractales y estudios gravimétricos para la determinación del límite entre cortezas.

La Dra. Maria Virginia Mackern, en "*Las estaciones permanentes GNSS, el gran paradigma en la Geodesia. Una mirada desde Argentina y América Latina*", realiza una apretada síntesis del cambio de paradigma en el posicionamiento gracias al advenimiento de la tecnología satelital desarrollada para dar coordenadas a los usuarios.

La Dra. Maria Eugenia Gómez, en su presentación, "*Técnicas geodésicas espaciales en argentina: actualidad y perspectiva a futuro*", nos brinda información sobre las últimos y más modernas técnicas geodésicas espaciales en Argentina en el contexto internacional, con el propósito de la materialización de los marcos geodésicos de referencia local, regional o internacional. Explica brevemente como Orbitografía y Radio posicionamiento Doppler Integrado por Satélite (DORIS), Sistemas de Navegación Satelital Global (GNSS), Mediciones Láser a Satélites (SLR) e Interferometría de Base Muy Larga (VLBI). Gómez, nos indica que la Argentina participa con estas técnicas. Gómez nos plantea algunas cuestiones sobre la capacidad para manejar todas las técnicas y el procesamiento de los datos.

El Dr. Claudio Brunini, en "*Una senda de crecimiento para la Geodesia argentina*" propone un Programa Nacional de Geodesia que, contribuirá a maximizar el beneficio que la Argentina extrae

de ellos. Desde la instalación de tres observatorios multi-técnicas con instrumental sofisticado, la Argentina se ha convertido en un ejemplo de cumplimiento de la resolución del 2015 de la ONU, titulada “Un Marco de Referencia Geodésico Global para el Desarrollo Sostenible”. El programa propuesto, de alcance nacional, tendrá tres objetivos específicos: generar espacios formativos innovadores, mejorar la dotación y la sostenibilidad de RRHH y promover y articular trabajos conjuntos entre los principales actores nacionales. Una serie de instituciones dedicadas a la Geodesia y a la formación de RRHH es mencionada efectos de ejemplificar y aclarando que la nómina no es excluyente.

La Dra. Claudia Noemí Tocho, en “*Hacia la implementación del Marco de Referencia Geodésico Global*”, nos introduce en la descripción científica realizada por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG) acerca de la implementación del Marco de Referencia Geodésico Mundial (GGRF) para el desarrollo sostenible adoptado en la Asamblea General de las Naciones Unidas (UN) el 26 de febrero de 2015. Tocho, resalta que el Marco de Referencia Geodésico Global como el GGRF no puede ser implementado por una sola persona, o una sola entidad o un solo país. La implementación del GGRF solo es posible bajo una cooperación internacional global, fuerte y estructurada como la construida bajo la Asociación Internacional de Geodesia.

*María Alejandra Arecco  
Coordinadora  
Buenos Aires, agosto 2021*

## GEODESIA ARGENTINA (SÍNTESIS HISTÓRICA)

Rubén C. Rodríguez

[geonotas.rr@gmail.com](mailto:geonotas.rr@gmail.com)

### RESUMEN

En este breve documento intentaremos dar cuenta de los hitos históricos más significativos de su desarrollo comenzando por mencionar que en el año 1899 la Argentina participaba de la geodesia del mundo como lo expresó Wolfgang Torge, expresidente de la Asociación Internacional de Geodesia, en la conferencia conmemorativa del 150° aniversario de la AIG celebrada en Potsdam en el año 2013.

### ADOPCIÓN DE UN SISTEMA DE REFERENCIA GEODÉSICO

Era la época en que en la que Luis Dellepiane (Figura 1) era profesor de geodesia en la Universidad de Buenos Aires y director del Instituto Geográfico Militar. El mismo que trajo los alambres de invar que se utilizaron por primera vez en la medición de la base geodésica Campo de Mayo de 3000 metros en el año 1906 para dar escala a la red extendida entre Zárate y Gándara con 23 puntos.



**Figura 1.** Teniente General Luis J. Dellepiane.

En el año 1925 el Instituto Geográfico Militar adopta el Elipsoide Internacional recomendado por la Asociación Internacional de Geodesia en 1924, también identificado como elipsoide de Hayford, que desarrolló los estudios que lo definieron.

Lo estableció la Disposición Permanente 197/1925 (Figura 2) en la que también eligió la proyección Gauss-Krüger para la cartografía que el IGM (hoy IGN) tenía y tiene a su cargo elaborar. Es la misma proyección utilizada por casi todo el mundo, aunque bajo la denominación de UTM que solo difiere con GK en la forma de aplicación: de tangente a secante, el ancho de las fajas o zonas y el origen de la X (o Norte).

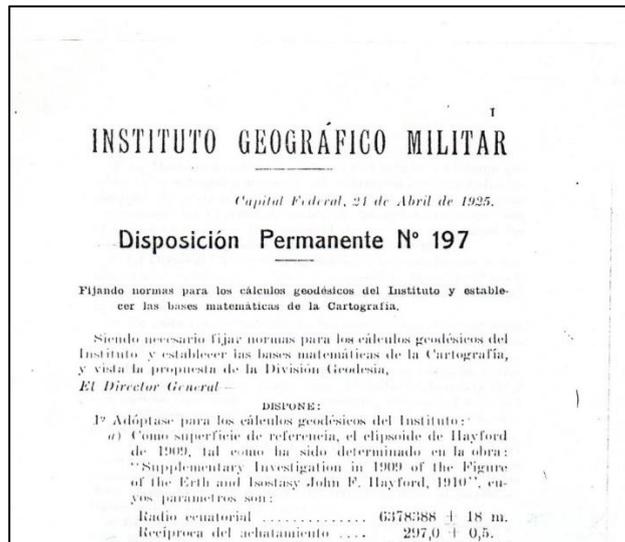


Figura 2. Disposición Permanente 197/1925.

### REDES GEODÉSICAS, ARCO DE MERIDIANO Y LEY DE LA CARTA

En enero del año 1934 se lleva a cabo en Mendoza la primera campaña geodésica de la Universidad de Buenos Aires proyectada y dirigida por Eduardo E. Baglietto (Figura 3) a la que le siguieron más de 40.



Figura 3. Ing. Eduardo E. Baglietto.

La red de triangulación se extendió entre la ciudad de Mendoza y el Cristo Redentor de los Andes con bases geodésicas, estaciones astronómicas, nivelación geodésica y líneas medidas con electrodistanciómetros. La compensación, llevada a cabo con los programas que mencionaremos más adelante, produjo un error medio de 0,7”.

Félix Aguilar (Figura 4) pronuncia una conferencia en el Instituto Popular de Conferencias (La Prensa) el 28 de agosto de 1936 sobre el proyecto de medición de un arco de meridiano que el 21 de diciembre del mismo año el congreso nacional sanciona la ley 12334 que señala “Procédase a la medición de un arco de meridiano a lo largo de todo el territorio nacional, a fin de satisfacer las necesidades prácticas de las obras públicas y de la investigación de la forma y dimensiones de la tierra” que consideramos la primera ley geodésica argentina.



Figura 4. Prof. Ing. Félix Aguilar.

Por sendos decretos del presidente Agustín P. Justo designa presidente de la comisión que tuvo a su cargo la medición a Félix Aguilar y a sus integrantes y también el reglamento de la misma. Los trabajos de la comisión suman 95 puntos medidos y 7 bases del total de reconocidos además de 1600 km de nivelación y 96 estaciones gravimétricas.

En 1941 se sanciona la ley 12696, conocida como ley de la carta (Figura 5), donde se le encomienda al Instituto Geográfico Militar en el artículo 1º, "Procédase a realizar los trabajos geodésicos fundamentales y el levantamiento topográfico de todo el territorio de la Nación." Expresa en el artículo 4º, "Los trabajos geodésicos fundamentales se ajustarán a las prescripciones de los congresos científicos internacionales".

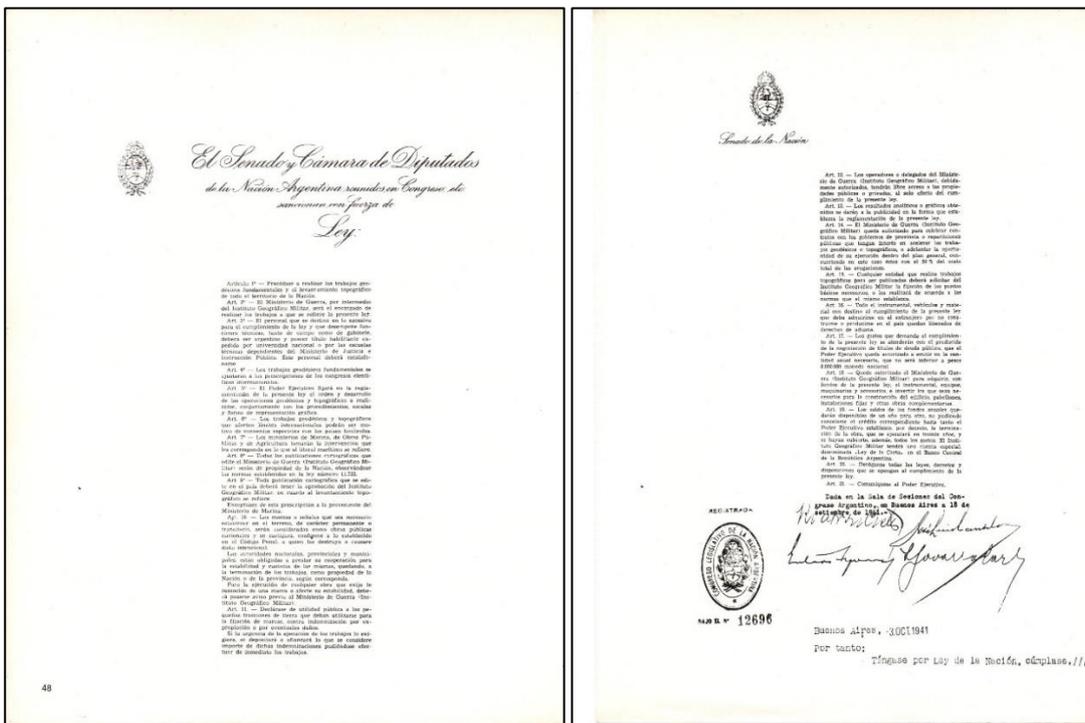


Figura 5. Ley 12696 de 1941, ley de la carta.

La ley no menciona el marco de referencia geodésico nacional ni cuál es la autoridad que lo establece y lo dejó, entonces, bajo la responsabilidad de las provincias en virtud de las facultades

no delegadas al gobierno federal. Esta situación ocasionó distintos inconvenientes y la solución se encontró recién en 2015 mediante el acta acuerdo firmada entre el Instituto Geográfico Nacional (IGN) y el Consejo Federal del Catastro (CFC) con el apoyo de la FADA (Federación Argentina de Agrimensores).

### **CAMPO INCHAUSPE – COMPENSACIÓN DE REDES**

El año 1946 constituye la oportunidad para, después de una serie de estudios preliminares, adoptar el punto Campo Inchauspe (latitud - 35° 58' 17", longitud - 62° 10' 12") (Figura 6) como punto de tangencia (dátum) para la red argentina (Disposición Permanente 440/1946 del IGM)



**Figura 6.** Pilar del punto Campo Inchauspe. (Imagen tomada de [https://www.ign.gob.ar/descargas/sig/dia\\_del\\_sig/sist\\_refygeorref.pdf](https://www.ign.gob.ar/descargas/sig/dia_del_sig/sist_refygeorref.pdf))

Para el año 1954 las redes de triangulación implantadas en función de la ley de la carta habían alcanzado a completar 10 anillos y se consideró apropiado someterla a una compensación que se llevó a cabo mediante el sistema de ecuaciones de condición. Teniendo presente que solo se contaba en la época con calculadoras electromecánicas los resultados no fueron totalmente satisfactorios.



**Figura 7.** Esteban Horvat. (Imagen tomada de <https://academianacionaldeagrimensura.org/2019/09/13/esteban-horvat/>)

Participaron de las operaciones Guillermo Riggi O'Dwyer, Esteban Horvat (Figura 7), Nicolás Beljajew y Alberto Christensen.

Unos 15 años después tuvo lugar una nueva compensación que la integraron 19 anillos y 1000 puntos incluyendo mediciones angulares, puntos Laplace y bases geodésicas. El resultado arrojó como error medio el valor 0,42" que dio lugar al sistema Campo Inchauspe 1969. Las redes se

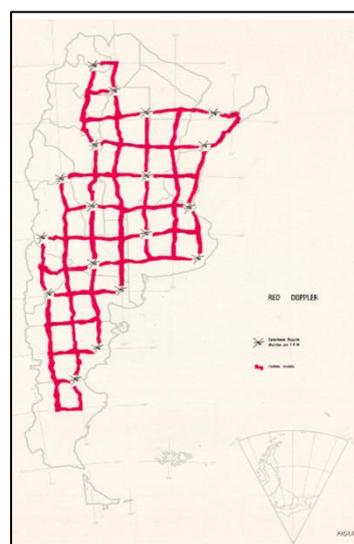
fueron extendiendo alcanzando a completar 44 anillos de los cuales una buena parte fueron densificados.



**Figura 8.** De izquierda a derecha David Byars, Alberto Christensen y Alfredo Elías. (Imagen tomada de <https://academianacionaldeagrimensura.org/2019/07/29/campo-inchauspe-1969/>)

Los programas fueron elaborados por Alberto Christensen y Alfredo Elías (Figura 8. En la fotografía con David Byars del Army Map Service) mediante un conjunto de 35 programas de cálculo Fortran y más de 30 subrutinas utilizando el método de variación de coordenadas. El mismo año se completó el llamado punto datum sudamericano 1969 (SAD 69) dirigido por Irene Fischer constituido por 800 puntos con origen en Chuá (Brasil) cuyo cálculo dio un error medio de 0.67”.

Con la llegada de la tecnología Doppler se llevó a cabo en el año 1976 una medición experimental en el punto Campo Inchauspe y al año siguiente tuvo lugar una campaña con la misma tecnología en 20 vértices de la red argentina de triangulación con una precisión de  $\pm 1,5$  metros (Figura 9), que permitió determinar los parámetros de transformación entre Campo Inchauspe 1969 y el marco geodésico internacional de la época, WGS 72.



**Figura 9.** Red argentina de triangulación Doppler.

## ESTACIONES PERMANENTES GPS

La instalación de estaciones GPS permanentes se inicia en 1979 con la ubicada en la Estación Astronómica Río Grande (Figura 10) a la que luego le siguieron La Plata y Salta en 1995 e IGM0 y Bahía Blanca en 1998.



Figura 10. Estación permanente GPS de Río Grande.

En la revista editada por el Instituto Geográfico Militar en 1989 se publica una nota titulada “Una red GPS para el país: el proyecto **POSGAR**”, que la dirección del IGM hace suyo en la misma revista (Figura 11).

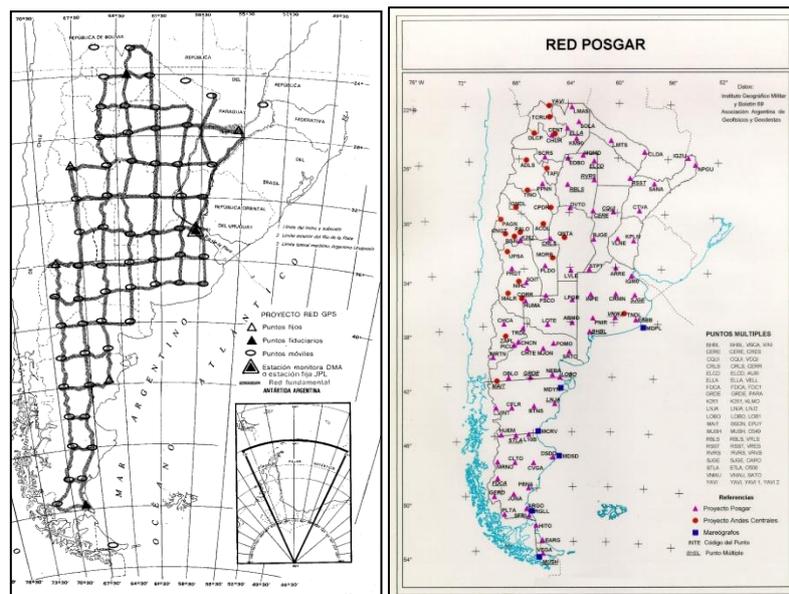
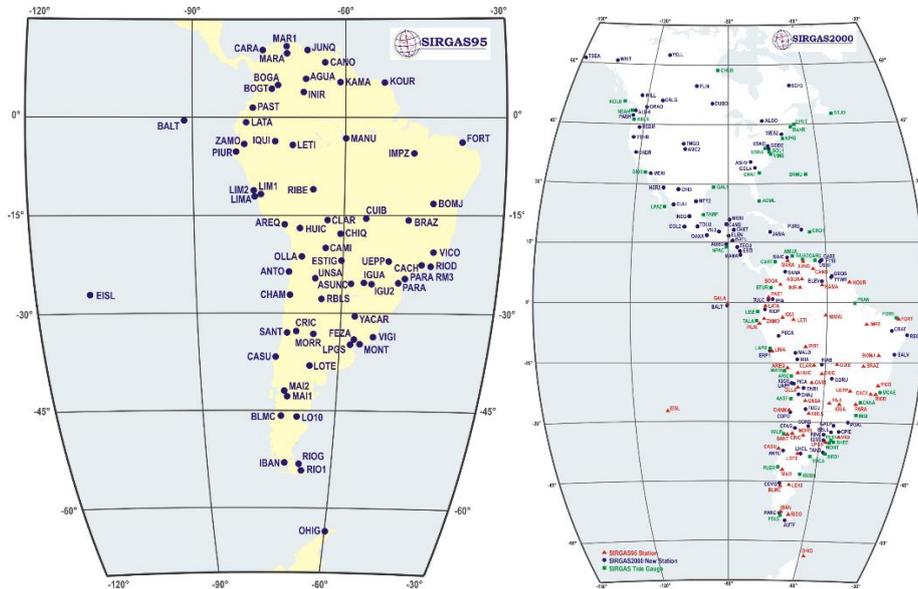


Figura 11. Izquierda Proyecto red GPS. Derecha Proyecto red POSGAR.

Su ejecución tuvo lugar durante el año 1993 en una campaña en la que participaron 127 estaciones. El cálculo fue llevado a cabo por la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata (FCAyG) mediante un *software* comercial para los vectores y la compensación mediante programas propios dando lugar al marco POSGAR 94 con una precisión de 1:1.000.000. Estuvo a cargo de Juan Carlos Usandivaras, Claudio Brunini, Juan Moirano y otros. Usando los mismos vectores fue compensada con un reconocido *software* comercial (GeoLab) alcanzándose resultados similares (8; 1 y 20 mm fueron las diferencias promedio en latitud, longitud y altura). En el 1998 se llevó a cabo un nuevo cálculo en la misma FCAyG con un programa científico (Bernese) con una precisión de 5 mm en cada una de las coordenadas.

En 1993 en Asunción se reúnen los geodestas de los países sudamericanos, la Asociación Internacional de Geodesia, el Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH) y la entonces Agencia Cartográfica de los Estados Unidos de América para discutir acerca de una red continental donde se establece el Sistema de Referencia Geodésico para América del Sur (SIRGAS) (Figura 11), que años después se extiende a todo el continente.



**Figura 11.** Sistema de Referencia Geodésico para América del Sur (SIRGAS).

La primera campaña se llevó a cabo en 1995 con 95 estaciones, 10 de las cuales se encontraban en la Argentina. La segunda y última fue en el 2000 (184 estaciones, 20 en la Argentina) dado que a partir de entonces el marco de referencia quedó sostenido por las estaciones continuas o permanentes. La Argentina tuvo, desde el inicio, una activa participación del proyecto ejerciendo la presidencia en dos períodos, a cargo de Claudio Brunini, y tres veces la vicepresidencia: Eduardo Lauría, María Virginia Mackern y actualmente Diego Piñón. Destacamos que no solo en SIRGAS se encuentra la participación argentina pues también está en la Asociación Internacional de Geodesia, en la Organización de las Naciones Unidas y en el IPGH.

Si bien pertenece al presente la instalación del Observatorio Argentino Alemán de Geodesia (AGGO) (Figura 12) en el año 2015 apreciamos que corresponde incluirlo como el último hito de la síntesis histórica reseñada.



**Figura 12.** Observatorio Argentino Alemán de Geodesia

El propio observatorio define su objetivo: AGGO tiene la misión de medir con altísima confiabilidad, registrar a largo plazo y poner a disposición de la comunidad científica internacional, una variedad de señales geodésicas necesarias para entender los procesos

de deformación de la tierra sólida, de la superficie de los océanos y de los grandes campos de hielo; las variaciones espaciales y temporales del campo de gravedad del Planeta; las irregularidades de la rotación de la Tierra en el espacio; la forma en que el agua cicla entre la atmósfera, los ríos, los mares y la biomasa; y otra variedad de procesos geodinámicos y de cambio global que afectan al 'Sistema Tierra'.

## REFERENCIAS

Acta acuerdo (2015)

[https://www.ign.gob.ar/archivos/geodesia/Acta\\_Acuerdo\\_IGN\\_CFC\\_FADA.pdf](https://www.ign.gob.ar/archivos/geodesia/Acta_Acuerdo_IGN_CFC_FADA.pdf)

Cerrato, Ángel A. (1996) La obra de un precursor. Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires.

Christensen, A. H. J/Elías, A. V. (1973) Programación de la Compensación de las redes del Instituto Geográfico Militar (Simposio Internacional sobre Métodos de Computación en Geodesia Geométrica de la Asociación Internacional de Geodesia)  
<https://academianacionaldeagrimensura.org>

Fischer, Irene (1972). Estructura básica del datum sudamericano de 1969. Revista Cartográfica.

Instituto Geográfico Militar (1979) 100 años en el Quehacer Cartográfico del País, IGM, Buenos Aires.

La Prensa (edición del 29 de agosto de 1936).

Rodríguez, Rubén C. (1977). El establecimiento de estaciones Doppler en la red fundamental argentina. Revista Cartográfica.

Rodríguez, Rubén C. (1989). Una red GPS para el país: el proyecto POSGAR. Revista IGM 4 – 6.

Rodríguez, Rubén C. (2012) 50 años de geodesia argentina. Universidad de Morón.  
<https://es.scribd.com/document/101123499/50-anos-de-geodesia-argentina>

Sistema de referencia geodésico para las Américas. SIRGAS <https://www.sirgas.org>

Torge, Wolfgang (2013). From a Regional Project to an International Organization: The “Bayer-Helmert-Era” of the International Association of Geodesy 1862-1916. IAG 150 Years. Springer.

## LA GEODESIA Y LA GEOFÍSICA EN LA FIUBA

Ezequiel Pallejá<sup>1</sup>

[epalleja@gmail.com](mailto:epalleja@gmail.com)

<sup>1</sup> Ex director del Instituto de Geodesia y Geofísica Aplicadas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires

### RESUMEN

El Instituto de Geodesia y Geofísica Aplicadas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, representa el esfuerzo continuado de trabajos, experiencias e investigaciones, dando además apoyo a las tareas docentes de las carreras de Ingeniería Geodésica y Geofísica e Ingeniería en Agrimensura que se dictan en el Departamento de Agrimensura de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires.

### INTRODUCCIÓN

Este Instituto, originalmente denominado “Instituto de Geodesia”, fue creado el 19 de diciembre de 1951 en la entonces Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales (Resolución N° 749 del 19 de diciembre de 1951) pasando a la Facultad de Ingeniería por Resolución del Consejo Universitario N° 1357 del 3 de junio de 1953. Este año 2021 cumplirá 70 años de actividad ininterrumpida.

El 1 de agosto de 2006 el Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería resolvió denominar al ‘Instituto de Geodesia’ como ‘INSTITUTO DE GEODESIA Y GEOFÍSICA APLICADAS’ (IGGA) por Resolución N° 694/2006.

Su fundador, el Ing. Eduardo Esteban Baglietto, fue Profesor Emérito de la Universidad de Buenos Aires, y dirigió el Instituto hasta su fallecimiento en 1971 con la convicción de que

“Un Instituto de una Facultad debe llegar a ser la expresión del más alto nivel científico de las disciplinas que involucra, por sus trabajos, experiencias e investigaciones”.

Los siguientes directores fueron Ing. Ángel Cerrato, Agrim. Jorge Luis Mazzeo, Dr. Ing. Ezequiel Pallejá y actualmente la Dra. Ing. Patricia Larocca.

### DESARROLLO Y TRAYECTORIA

El Instituto desarrolló 41 campañas geodésicas en los meses de enero de cada año, desde 1934 hasta 1980, en la zona cordillerana de la provincia de Mendoza las cuales incluyeron docentes y alumnos y proporcionaron datos de observación que dieron origen a trabajos de investigación aplicada en el campo de la geodesia y de la geofísica.

El 16 de abril de 1959 comenzaron a impartirse las carreras de Ingeniero Geodesta Geofísico e Ingeniero Hidrógrafo bajo la dirección del Instituto de Geodesia. Sus egresados actúan en las más diversas instituciones y empresas del país y del exterior, como el *Jet Propulsion Laboratory* de la NASA, empresas de fotogrametría nacionales y extranjeras, Servicio de Hidrografía Naval (SHN),

Instituto Geográfico Nacional (IGN), empresas de energía, empresas relacionadas con el agua, universidades nacionales y extranjeras, etc.

Algunos de los trabajos más importantes desarrollados por el IGGA durante su vida institucional fueron:

- Desarrollo de un anillo de triangulación en alta montaña, con más de 50 vértices de primer orden, medición de 3 bases, medición angular de alta precisión, nivelación trigonométrica y geométrica, desde 1951. En los años 60 fue reprocesado y anexado a la red de primer orden del Instituto Geográfico Militar (IGM) actualmente IGN.
- Determinación de la altitud del Cerro Aconcagua y componentes de la desviación Topográfica isostática de la vertical. Publicado en 1958.
- Determinación absoluta del valor de la gravedad con péndulos de tubo de cuarzo en Miguelete, provincia de Buenos Aires. Valor obtenido 979694,8 mGal +/- 0,5 mGal. Publicado en 1958.
- Medición de gravedad en la cumbre del Cerro Aconcagua. Punto más alto en el que se midió gravedad en el mundo hasta fines de siglo XX. Valor obtenido: 977726,0 mGal. Publicado en 1969
- Medición de las bases de triangulación en Villavicencio, Cacheuta y Uspallata. Con alambres de invar. Publicado en 1951.
- Determinación de la desviación relativa de la vertical en puntos de la red de triangulación cordillerana. 17 vértices medidos por método astronómico geodésico. Publicado en 1969.
- Nivelación trigonométrica recíproca y estudio de variación del coeficiente de refracción atmosférico en la triangulación cordillerana. Publicado en 1958 y 1969.
- Mediciones electrónicas de distancias con geodímetro y telurómetro. Primeras mediciones de este tipo en el país. Publicado en 1969.
- Base de calibración argentina para gravímetros estáticos (BACARA). El Instituto participó con mediciones pendulares y con gravímetros estáticos. Decenas de puntos en todo el país. Publicado en 1969.
- Medición de gravedad en los vértices de triangulación de la zona cordillerana. Publicado en 1969.
- Mediciones gravimétricas submarinas. Cálculo de anomalías y trazado de isoanómalas en el Río de la Plata y en la Bahía de Samborondón. Publicado en 1969.
- Perfil gravimétrico Este – Oeste en latitud 34<sup>a</sup> 30' entre los océanos Atlántico y Pacífico. Publicado en 1969.
- Determinaciones para el estudio del gradiente vertical de la gravedad en edificios de Buenos Aires. Publicado en 1958.
- Nivelación de precisión Mendoza-Uspallata. Publicado en 1950.
- Vinculación Gravimétrica Buenos Aires – Sudáfrica. Publicado en 1970.
- Medición de gravedad en una campana submarina. Publicado en 1951.
- Vinculación Gravimétrica Cambridge – Buenos Aires. Publicado en 1951

- Vinculación Gravimétrica Buenos Aires – Asunción. Publicado en 1951
- Vinculación Gravimétrica Teddington – Buenos Aires. Publicado en 1965.
- Vinculación Gravimétrica Madrid – Buenos Aires. Publicado en 1965.
- Vinculación Gravimétrica Ezeiza – Carrasco. Publicado en 1965.
- Determinaciones de la desviación de la vertical por el método gravimétrico. Publicado en 1965.
- Perfil geoide – elipsoide en la zona cordillerana. Publicado en 1961.
- Nivelación geométrica: estudio comparativo de miras de invar. Con respecto a miras de madera en zona montañosa. Publicado en 1961.
- Anomalías topográfico sofisticas en la provincia de Buenos Aires. Publicado en 1961.
- Vinculación de la red Geodésica del Instituto Geográfico Militar con la red del Instituto en la zona cordillerana. Publicado en 1971.
- Vinculación Gravimétrica Buenos Aires – Mowbray (África del Sur). Publicado en 1975.
- Densificación de líneas de gravedad en la zona de la costa de la Provincia de Buenos Aires. Publicado en 1979.
- Densificación de líneas gravimétricas en la zona sud de la Provincia de Buenos Aires. Publicado en 1980.
- Remedición de la línea Gravimétrica Mendoza – San Juan – Guayabas 1949 – 1982. Publicado en 1983.
- Remedición en líneas gravimétricas antiguas con propósitos geodinámicos. Publicado en 1986.
- Campañas gravimétricas en la provincia de Buenos Aires. Publicado en 1989.
- Calibración gravímetros.
- Relevamiento gravimétrico minero
- Modelo del régimen del Río de la Plata.
- Investigación geometría fractal
- Aplicación del GPS a la microgeodesia.
- Estudio sobre mareas en la península antártica.
- Colaboración con el Instituto Antártico Argentino.
- Estación GPS permanente en Córdoba.
- Mediciones GPS para Aguas Argentinas.
- Trabajos para Comisión Nacional del Límite de la Plataforma Continental Argentina (COPLA).
- Evaluación de las Precisiones del Sistema GPS a partir de las Efemérides GPS Radiotransmitidas.
- Experiencia con Plaqueta GPS OEM-AIV-10.
- Estudios con navegadores GPS.

- Determinación de una cavidad somera en el subsuelo con gravimetría.
- Colaboración con el Instituto Argentino del Petróleo y el Gas (IAPG)
- Aplicación de la Geometría Fractal al estudio de la plataforma submarina del mar epicontinental argentino.

Micro gravimetría urbana.

- Estudio de costas.
- Efectos geomagnéticos en sistemas de tuberías.
- Actividad solar, alta atmósfera y campo magnético terrestre.
- Cursos de posgrado en GPS.

El IGGA se ha caracterizado por desarrollar la geodesia y la geofísica en cuanto a su utilización práctica especialmente en su aplicación a las ingenierías. Para ello hizo hincapié en la recolección de datos reales obtenidos en sus trabajos de campo, y en una sólida base científica conceptual que se nutría de relaciones nacionales e internacionales de alto nivel.

De esta manera logró brindar contribuciones a las geociencias concretas en el país y por otro lado, formar profesionales que extendieron a través de su ejercicio profesional estos beneficios en los ámbitos en los que actuaron.

Se destaca la participación activa de alumnos de grado y posgrado en cada uno de los emprendimientos abordados.

## **LAS ESTACIONES PERMANENTES GNSS, UN GRAN PARADIGMA EN LA GEODESIA. Una mirada desde Argentina y América Latina, en los últimos 30 años.**

Maria Virginia Mackern<sup>1,2,3</sup>

[vmackern@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:vmackern@mendoza-conicet.gob.ar)

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo

<sup>2</sup>CONICET

<sup>3</sup>Facultad de Ingeniería y Enología, Universidad Juan Agustín Maza

### **RESUMEN**

En los últimos 30 años la Geodesia ha evolucionado a pasos agigantados influenciada por el conocimiento que ha aportado principalmente la geodesia satelital. En una revisión de los últimos 30 años identificamos un cambio de paradigma en el “posicionamiento”. Ha surgido y se ha instalado en la sociedad una nueva expresión la “Georreferenciación”. Para los usuarios de coordenadas, requirió una etapa de adaptación y de capacitación acelerada. La tecnología de los Sistemas de Posicionamiento Satelital se impuso en la década del 90, no contándose con la infraestructura de base necesaria, ni tampoco con recursos humanos formados para su aprovechamiento eficiente.

Parados en este momento del tiempo, año 2021, recordamos y tratamos de escribir esa historia transcurrida, esa etapa de transición que fue necesario experimentar. Se ha tratado de dejar un legado en honor de los que nos precedieron y necesario para el conocimiento de los usuarios de coordenadas que vendrán.

En esta contribución se presenta una mirada específica de lo que fue la evolución de la infraestructura geodésica, centrados en la república argentina y su participación en el contexto continental e internacional. Acompañando a esa historia, se han tratado de exponer los procesos de capacitación de recursos humanos que permitieron aggiornar a los especialistas para afrontar las tareas de planificación, relevamiento y cálculo, que demandan las nuevas tecnologías de posicionamiento satelital.

**Palabras claves:** POSGAR, SIRGAS, Estaciones permanentes GNSS, RAMSAC, Argentina

### **INTRODUCCIÓN**

En el año 1991 comenzaban a realizarse en Argentina los primeros relevamientos con GPS (Sistema de Posicionamiento Global) y el requerimiento de contar con puntos de coordenadas conocidas en el sistema geocéntrico, compatible con las órbitas satelitales, para usar como base en el posicionamiento relativo, no se podía cubrir en gran parte del territorio nacional.

En esa época el marco de referencia oficial del país era Campo Inchauspe 69 (CAI69), una red de puntos pasivos, medidos (en fechas anteriores a 1969) en base a triangulaciones geodésicas clásicas, cuyas coordenadas surgidas de un ajuste realizado en 1969 materializaban el marco de referencia nacional, un marco geodésico local. Los primeros usuarios de GPS, georreferenciaban a puntos CAI69, a partir de sus coordenadas geodésicas, a las cuales les aplicaban los parámetros de transformación determinados por la DMA (Defense Mapping Agency). Se obtenían de esta forma

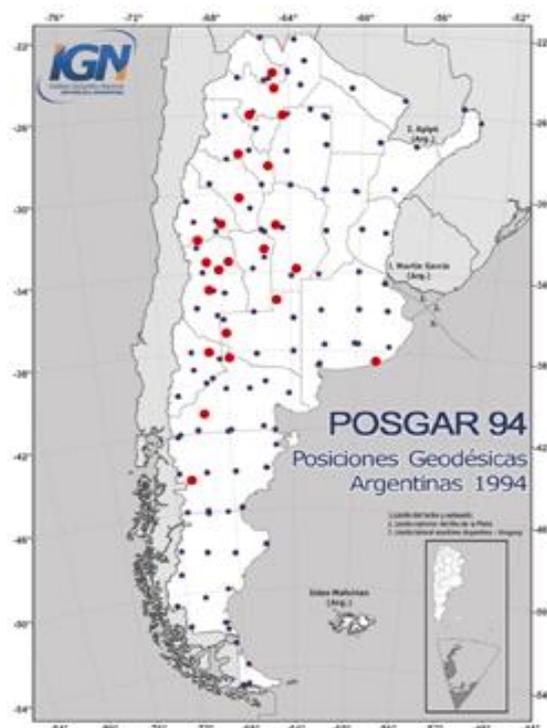
coordenadas cartesianas geocéntricas en WGS84, con precisión de algunas decenas de metros. En el mejor de los casos, en el oeste argentino se pudo contar con algunos puntos de la red CAP (Central Andes Project) que tenían coordenadas en WGS84. Frente a la globalización económica que surgía y la privatización de empresas de servicios, en Argentina, se incrementó la demanda de disponer de un marco de referencia geocéntrico y global.

En los años 1991 y 1992 comenzaron a surgir proyectos provinciales financiados por organismos internacionales que tenían como base la implementación de un marco de referencia geocéntrico global. En esa misma época se implementó una política de apertura a inversiones mineras y las empresas multinacionales también demandaban la georreferenciación y la cartografía en sistemas de referencia globales.

Por todo lo mencionado, a lo que se sumaron las demandas regionales para el uso de los sistemas de posicionamiento satelital, se fundamentó la instalación en una primera etapa de redes de puntos materializados (preexistentes o nuevos) medidos con GPS. De esta forma se definió el primer marco pasivo con coordenadas geocéntricas globales de Argentina, POSGAR94 (Posiciones Geodésicas Argentinas) Figura 1, al cual refirieron las densificaciones en algunas redes geodésicas provinciales (Jujuy, Santiago del Estero, Entre Ríos, San Luis, Neuquén y Río Negro) y la red PASMA (Proyecto de Apoyo al Sector Minero Argentino). El objetivo de esta última, fue generar una red de puntos de densificación en las áreas de interés minero a lo largo de todo el territorio nacional (Mackern, 2003).

En una segunda etapa, motivados por la evolución en el uso de la técnica GPS, se comenzaron a instalar las estaciones activas. El contexto internacional y el proyecto SIRGAS (Sistema de Referencia Geodésico para las Américas) a nivel continental, alrededor del año 2000, mostraban las ventajas de contar con marcos activos de estaciones permanentes GPS, por sobre las redes pasivas. En Argentina se calculó POSGAR98, como una significativa mejora de la red POSGAR94, apoyada en las observaciones de las estaciones permanentes GPS que estaban operativas, y vinculada mediante vectores medidos con GPS, con la red continental SIRGAS (Moirano, et al., 1998).

Surgió para esas épocas, un nuevo paradigma “La Georreferenciación a redes continentales”, lo cual requirió cooperación y coordinación. En América se iniciaba la red SIRGAS-CON (Red de estaciones SIRGAS CONTinua) como un modelo de cooperación y el resultado de su eficiente coordinación se comprueba en la calidad y continuidad de sus productos (coordenadas y velocidades), por 30 años. De manera similar surgió y se fortaleció la red activa RAMSAC (Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo) con coordenadas precisas en el sistema global y por sobre todo con la ventaja de su mantenimiento (física y matemáticamente) en el tiempo. RAMSAC, surgió siguiendo las recomendaciones del contexto internacional y las guías fundadas en la



**Figura 1.** Puntos POSGAR94 (azules), puntos CAP integrados en POSGAR94 (rojos) (Cimbaro, 2018)

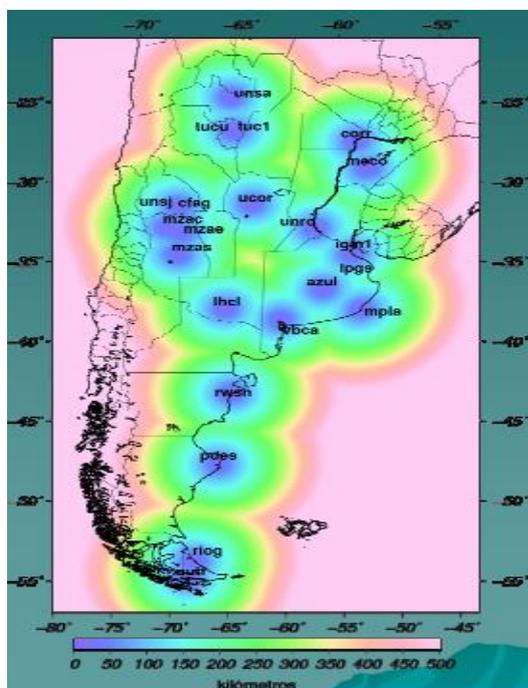
cooperación continental de SIRGAS. En la actualidad es un marco geodésico preciso, accesible a los usuarios que requieren georreferenciación. A la vez ofrece información a la ciencia para estudios geodinámicos y atmosféricos, entre otros. Brinda servicios de tiempo real y realiza un aporte de reconocimiento internacional, encontrándose al nivel de las redes geodésicas activas más precisas del planeta.

Argentina cuenta hoy con una infraestructura geodésica de posicionamiento, que cumple con los estándares internacionales de precisión, control y mantenimiento. Es claro que la etapa de transición sobrellevada en estos 30 años, fue necesario recorrerla. Cabe mencionar que detrás del desarrollo tecnológico hubo un acompañamiento de la docencia universitaria que brindó la especialización tanto a nivel de grado, como la actualización a nivel de posgrado, siendo ambos fundamentales. Esta especialización permitió contar con profesionales que de alguna manera fueron faros que dieron luz y marcaron el rumbo a seguir. Gracias a ellos hoy Argentina cuenta con una infraestructura geodésica que nos enorgullece a nivel internacional. Esta revisión histórica trata de exponer una breve síntesis del quehacer geodésico, de estos 30 años, en el contexto señalado en esta introducción.

## EL CONTEXTO NACIONAL E INTERNACIONAL

Analizando el contexto internacional, en 1987 se establecía el IERS (International Earth Rotation and Reference System Service), coordinando los esfuerzos de las comunidades internacionales de Astronomía, Geodesia y Geofísica. Su misión desde los orígenes fue proporcionar datos y estándares sobre los parámetros de rotación de la Tierra y definir los marcos de referencia terrestre y celeste. En 1991 en Viena la IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) definió y adoptó el Sistema de referencia terrestre internacional (ITRS) mediante su resolución N°2. Se establecieron los servicios internacionales de las distintas técnicas geodésicas, entre los cuales se fundó el Servicio Internacional de la técnica GNSS (refiriendo la G a GPS, en los orígenes). A fines de la década del 80 se contaba ya con los primeros marcos de referencia Internacionales. El ITRF88 fue computado incluyendo observaciones de las técnicas VLBI, LLR y SLR. La primera solución que incluyó GPS fue la combinación de 1991 y en 1994 se incluyeron observaciones de la técnica DORIS. Si miramos la Figura publicada por Bosy en 2014, en el ITRF88 América del Sur sólo contaba con 4 estaciones de coordenadas, no encontrándose ningún sitio ITRF88 en Argentina. Dicha figura es una muestra de la situación Geodésica al momento de la llegada de la técnica GPS a nuestro país. Los vínculos científicos internacionales establecidos por investigadores de las Universidades Nacionales de La Plata y Salta, gestionaron la instalación de las primeras estaciones GPS continuas: LPGS, en la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata, RIOG, en la Estación astronómica Rio Grande, en Tierra del Fuego, dependiente de la UNLP y UNSA, en la Universidad Nacional de Salta. Desde el Proyecto geodinámico “CAP, por su nombre en inglés *Central Andes Project*”, se instalaron con el apoyo del por ese entonces IGM (Instituto Geográfico Militar) actual IGN de Argentina y algunos grupos de investigación locales, las estaciones GPS de CFAG (en Coronel Fontana, Provincia de San Juan), TUCU (en Tucumán), LHCL (en Lihuel Calel, La Pampa) y CORD (en Falda del Carmen, provincia de Córdoba). Para fines de la década del 90 desde un proyecto liderado por los Doctores Claudio Brunini y Juan Carlos Usandivaras de la UNLP se instalaron las estaciones GPS permanentes de VBCA (en la Universidad Nacional del SUR, en la ciudad de Bahía Blanca), MPLA (en Mar del Plata, provincia de Buenos Aires), RWSN (en Rawson, provincia de Chubut) y PDES (en Puerto Deseado, en la provincia de Santa Cruz). Estas últimas con el fin de vincular los mareógrafos (referencias altimétricas del nivel del mar) con alturas elipsoidales (referencias altimétricas a la superficie del elipsoide) y su monitoreo en el tiempo (Natali, et al., 2002).

En los 10 años transcurridos entre 1990 y 2000, las primeras estaciones GPS continuas mencionadas (Figura 2), disponían sus observaciones en bases de datos de las instituciones que las administraban (Tabla 1), que en una primera instancia no fueron públicas. Desde su incorporación a la red IGS comenzaron a publicar sus registros en la base de datos internacional, al igual que sus reportes de infraestructura (log file).



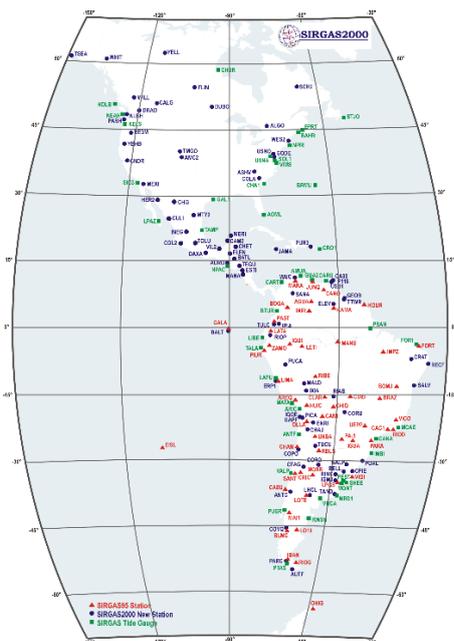
**Figura 2.** estaciones GPS permanentes operativas en Argentina en la creación de RAMSAC en el 2006 y radio de cobertura (escala de colores).

N	EP GNSS	Entidad
1	RWSN	Catastro Chubut
2	CORR	Catastro Corrientes
3	MECO	Catastro Corrientes
4	TUC1	Catastro Tucuman
5	MZAS	CatastroMza
6	MZAE	CatastroMza
7	AZUL	CPA/IGM
8	IGM1	IGM
9	AUTF	IGM
10	LHLC	IGM/ Parques
11	CFAG	INPRES/IGM
12	MZAC	CRICYT
13	UCOR	UNCordoba
14	MPLA	UNCuyo/SHN
15	PDES	UNCuyo/SHN
16	LPGS	UNLP
17	RIO2	UNLP
18	UNRO	UNRosario
19	UNAS	UNSalta
20	UNSJ	UNSan Juan
21	VBCA	UNSur /UNCuyo
22	TUCU	UNTucuman

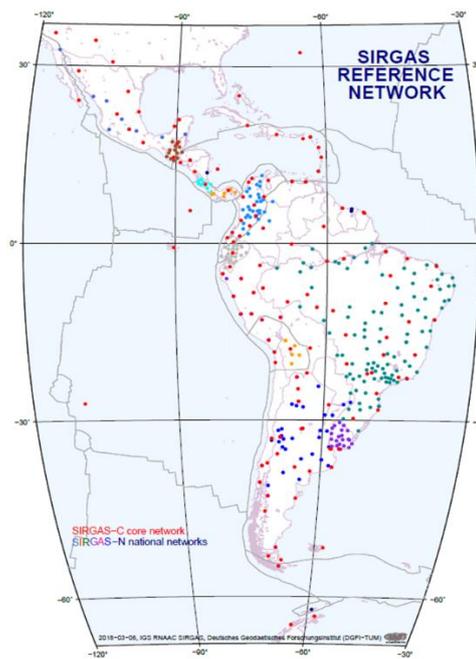
Tabla 1. Dependencia de las estaciones GPS que se integraron a RAMSAC en sus inicios. De Catastros provinciales (morado), IGM (amarillo) e Institutos de investigación o universidades (azul).

Desde Argentina durante esa primera década, no se estimaron coordenadas para dichas estaciones como parte del cálculo de una red geodésica nacional o regional vinculada al ITRF. La primera solución que incluyó estaciones GPS de Argentina, calculada como parte de un procesamiento riguroso con software científico fue desarrollada en la tesis doctoral de Juan F. Moirano en el 2000, la cual fue denominada POSGAR98. En la cual se siguió la metodología de densificación propuesta por el IERS y adoptada por el IGS para las soluciones de redes GPS (Moirano et al., 1998).

A nivel continental se había realizado la campaña GPS en América del Sur en mayo de 1995 y la misma se intentó repetir en mayo del año 2000. Esta última se extendió a América del Norte y Central, no pudiendo remedir en la totalidad de sitios de la primera campaña (Figura 3). De estas dos campañas se pretendía monitorear los desplazamientos geodinámicos, lo cual se pudo estimar, pero se concluyó en no volver a realizar mediciones sobre puntos pasivos a futuro, sino invertir en la instalación de estaciones continuas GPS. Fue así como se creó la red SIRGAS-CON (red de estaciones continuas GPS en América) y desde el 2000 al 2022 la misma se ha densificado, contando en la actualidad con más de 440 estaciones distribuidas en todo el continente (Figura 4).



**Figura 3.** Estaciones SIRGAS2000 (azules), estaciones SIRGAS95 (rojos), estaciones GPS en mareógrafos



**Figura 4.** Red SIRGAS-CON, estaciones IGS (rojo), estaciones de densificación nacionales (diferentes colores) (www.SIRGAS.org)

El éxito de la red SIRGAS-CON es el resultado de un trabajo coordinado y colaborativo de las distintas organizaciones geodésicas que se fueron sumando en los diferentes países americanos. Empezando por América del Sur y sumando luego a los países de América Central e Islas del Caribe, incluyendo en el 2021 EEUU de América y Canadá.

En los 22 años transcurridos entre la segunda campaña SIRGAS del 2000 y la actualidad, en la comunidad geodésica de América Latina se ha trabajado constantemente, no sólo instalando mas estaciones continuas, sino mejorando el equipamiento, el cual se ha ido reemplazando por receptores que adquieren observables de GPS, conjuntamente con GLONASS, y en algunos casos Galileo y otras constelaciones. Se ha invertido también en algunos países, en Centros de datos Nacionales, los cuales aseguran la disponibilidad de los registros observacionales bajo los estándares internacionales. Se impulsaron Centros de Análisis (CA) regionales, los cuales en una primera etapa fueron 3 y a la fecha ya son 8 CA activos y 1 CA de atmósfera neutra.

Todo el esfuerzo colaborativo impulsado por SIRGAS, sus reuniones científicas y talleres de capacitación permitieron la formación de recursos humanos en los diferentes países de América. Desde la cooperación de los CA se incluyeron las normativas que establecía el IERS y el IGS en la implementación de marcos de referencia que densifican al ITRF hacia el interior de los continentes y países. Fue en este contexto en el cual las redes activas de GNSS fueron apareciendo como redes de georreferenciación y desplazaron a las redes pasivas (puntos materializados a remedir con instrumental propio para usar como punto de coordenadas conocidas).

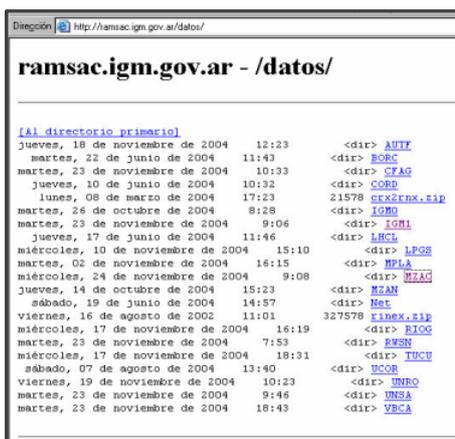
### LA EVOLUCIÓN QUE DIO LUGAR A LA RED RAMSAC EN ARGENTINA

Desde las primeras estaciones GNSS que se instalaron en la década del 90 en Argentina a la actual red RAMSAC, hay una inmensurable evolución. Tratando de cuantificar esa transición de

mencionar como primeros maestros de la geodesia satelital en Argentina a los doctores Víctor Haar, Juan Carlos Usandivaras y Eduardo Patiño quienes brindaron en las universidades argentinas los primeros fundamentos del posicionamiento satelital. Junto a científicos extranjeros realizaron las primeras experiencias de medición en el país. A ellos se sumaron el Agrimensor Ruben Rodriguez desde el IGM y los astrónomos Raúl Perdomo, Claudio Brunini y Daniel Del Cogliano de la Universidad Nacional de La Plata. Todos ellos, junto a una nueva generación de discípulos entre quienes me incluyo, junto a Juan Moirano, Aldo Mangiaterra, Raúl Márquez, Gustavo Noguera, Mauricio Gende, Amalia Mesa, Hernán Alvis Rojas, Ana María Pacheco, Darío Terluk, Luis Lenzano, Carlos Giobellina y seguramente muchos otros hacia el interior del país, impulsamos las primeras instancias de capacitación que incluyeron la definición y materialización de marcos de referencia geocéntricos precisos, ¿cómo medir mediante GPS?, ¿cómo procesar las observaciones?, ¿cómo diseñar una red geodésica regional y nacional? Y por sobre todo ¿cómo vincular coordenadas de los sistemas antiguos al nuevo marco de referencia nacional POSGAR94?

Mediante la participación en las campañas POSGAR de 1993 y de 1994, SIRGAS de 1995 y del 2000, como también desde las campañas GPS llevadas a cabo en las diferentes provincias argentinas y la extensa red PASMA, se fueron capacitando profesionales en las distintas regiones del país. Cabe destacar la importante contribución que realizaron los colegas de la Universidad Nacional de Rosario, de San Juan, de Mendoza y de Córdoba, quienes se comprometieron a brindar cursos de actualización entre los profesionales de la Ingeniería de las distintas provincias. Desde el IGM los colegas Eduardo Lauría y Sergio Cimbaro, formalizaron liderados por el Dr. Claudio Brunini de la UNLP, los Talleres Nacionales de estaciones GNSS permanentes. En los mismos se delinearon las principales demandas a resolver, en colaboración con los diferentes grupos del país que disponían y/o administraban las estaciones GNSS permanente, en un concepto federal. Los dos primeros talleres se realizaron en Buenos Aires en el 2003 y 2004, a los cuales siguieron 5 más organizados por distintos referentes del país (en Mar del Plata en 2005, en Bahía Blanca en 2006, en Mendoza en 2007, en Tucumán en 2008 y en San Luis en 2009) de los cuales surgió como principal demanda la necesidad de contar con un Centro de datos nacional, donde las estaciones continuas pudiesen brindar públicamente sus registros de observación. Se analizaron los estándares internacionales a cumplir y se establecieron requerimientos de integración a la futura red GPS nacional. Estos talleres fueron el paso previo a la creación de la red RAMSAC. Paralelamente se organizaron 5 talleres de usuarios de estaciones GPS. Su objetivo fue difundir y capacitar en el uso de las mismas. Fue el caso de los talleres desarrollados en Mendoza en el 2004, en Corrientes y La Plata en el 2005 y en Córdoba en el 2006. En todas estas instancias se fortalecieron los vínculos entre los grupos de investigación de diferentes instituciones nacionales, docentes de las casas de estudio y por sobre todo con las autoridades y profesionales que concretaron la creación de la red RAMSAC desde el Instituto Geográfico Militar (hoy Instituto Geográfico Nacional)

Inmersos en este contexto, se crea la red RAMSAC en el 2006 y las diferentes estaciones continuas preexistentes se integran a la misma (Figura 2). Comienza de esta manera a desarrollarse e implementar, la base de datos nacional como ventana de búsqueda para los usuarios de todo el país, al igual que el monitoreo de las mismas, desde un conector federal (Figuras 5 y 6).



**Figura 5.** Sitio de descarga de los archivos de observación GNSS, previo a la creación de RAMSAC (Captura en noviembre 2004) estaciones SIRGAS95 (rojos), estaciones GPS en mareógrafos (verdes)(www.SIRGAS.org)



**Figura 6.** Sitio de descarga de los archivos de observación GNSS de estaciones RAMSAC (Captura junio 2022). El menú incluye: estado de las estaciones, mapa, estadísticas de descarga, etc. (https://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Ramsac/DescargaRinex)

## NO SOLO OBSERVACIONES, SINO COORDENADAS, VELOCIDADES Y MONITOREO ATMOSFERICO

En la segunda década analizada (2000 al 2010) Argentina ya contaba con la red de observaciones GPS, el siguiente desafío fue establecer una estrategia rigurosa de cálculo de coordenadas y velocidades para asegurar la precisión del marco de referencia nacional en el tiempo. El liderazgo que para ese entonces tenía SIRGAS como referente geodésico a nivel de América Latina, y la participación activa de colegas argentinos en el Comité ejecutivo de SIRGAS (Lauría y Brunini) hicieron que en Argentina se conformaran 3 grupos, que recibieron el entrenamiento apropiado para estimar coordenadas y velocidades mediante un cálculo riguroso con software científico. Fue así que se conformó el Centro de Procesamiento de La Plata (CEPLAT) en 2005, luego el Centro de Procesamiento de Ingeniería en Mendoza Argentina (CIMA) oficializado en el 2008 y finalmente el Centro de Procesamiento del Instituto Geográfico Nacional (GNA) en el 2010.

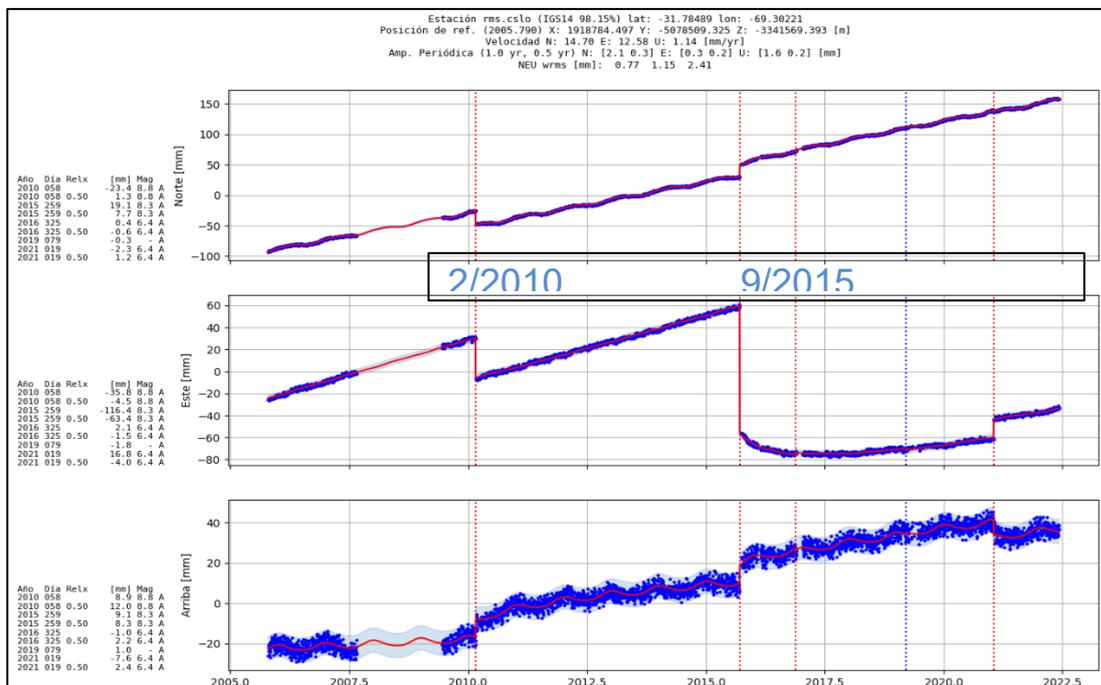
Desde el 2006, como parte del procesamiento semanal de la red SIRGAS se calculan las observaciones de las estaciones RAMSAC incorporadas en SIRGAS (en la actualidad se incluyen en SIRGAS un 30% del total de estaciones argentinas operativas de RAMSAC). De esta forma se introduce a la red nacional el marco de referencia internacional y se mantiene su monitoreo en el tiempo.

Dentro del contexto de SIRGAS se estiman soluciones semanales y multianuales las cuales incluyen coordenadas para una determinada época y velocidades geodésicas en cada estación. Luego mediante las mismas, se estima un modelo de velocidades que permite la actualización de coordenadas en cualquier sitio de América Latina. A la fecha se cuenta con los modelos de velocidades VEMOS, siendo el más reciente VEMOS17 (Drewes y Sánchez, 2017).

Desde el 2006, GNA realiza el cálculo diario del total de estaciones GNSS de RAMSAC en Argentina, vinculado a las coordenadas de las SIRGAS. Esto permite el monitoreo geodinámico en las distintas regiones del país. Como ejemplo de la ventaja que este monitoreo ofrece, se tienen las

publicaciones realizadas sobre los desplazamientos ocurridos durante los sismos y las deformaciones posteriores a los terremotos de Maule en 2010, de Illapel en 2015, de San Juan en 2021, entre los más significativos (Figura 7). El modelo VELAr (Gómez, D., et al. 2016) es también un aporte muy importante que muestra un producto surgido del esfuerzo y cooperación, mantenido en esta escala geodésica (precisión y monitoreo en el tiempo) (<https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/VEL-Ar>).

Por último, es oportuno mencionar el aporte que la red de estaciones GNSS ofrece en el monitoreo atmosférico. Desde los Centros de análisis de la Universidad de La Plata y de Mendoza (CIMA), se encaminaron en la última década (2010 al 2020) investigaciones orientadas a monitorear desde las observaciones GNSS el contenido de electrones en la ionosfera y el retardo troposférico. Como productos del monitoreo atmosférico se dispone de las grillas y mapas de Contenido total de electrones vertical, VTEC (Figuras 8 y 9), calculados con el modelo LPIM (Brunini, et al., 2009), disponibles hasta el 2013

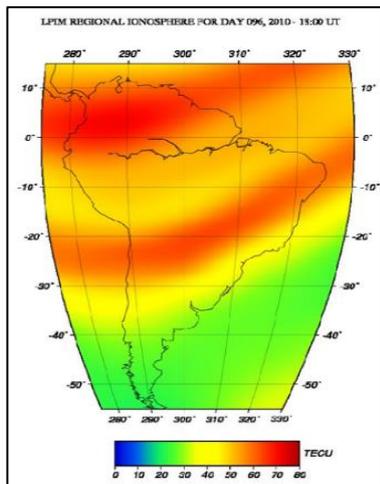


**Figura 7.** Serie temporal de coordenadas Norte, Este y altura. Estación CSLO (Casleo, Barreal, San Juan). Se marcan las fechas de los 3 terremotos más significativos. Se observan los desplazamientos y deformación post-sísmica en cada uno (<https://www.ign.gob.ar/archivos/ramsac/estacion2.php?estacion=CSLO>)

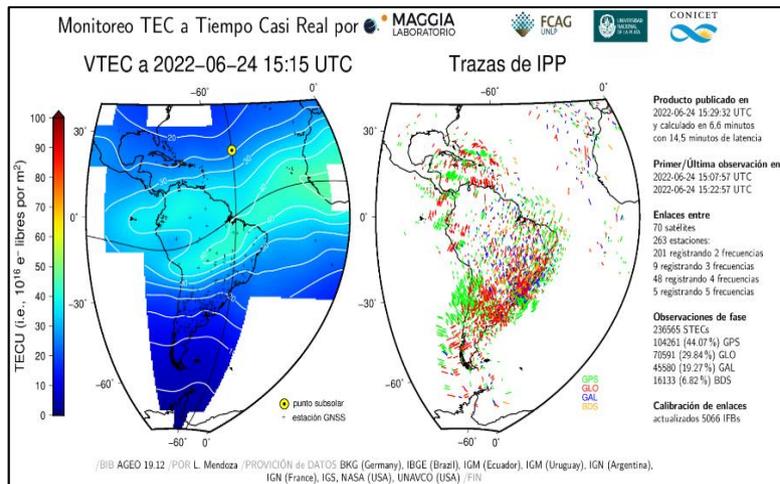
Desde el Laboratorio MAGGIA de la UNLP, se estima el VTEC en cuasi tiempo real, cada 15 minutos, desde las observaciones GNSS disponibles online (Mendoza, et al., 2019). Se puede acceder a los mismos desde el sitio web de MAGGIA ([https://www.maggia.unlp.edu.ar/articulo/2017/1/6/monitoreo\\_ionosfera](https://www.maggia.unlp.edu.ar/articulo/2017/1/6/monitoreo_ionosfera)).

Se dispone también, de los retardos cenitales troposféricos (ZTD) estimados en la Facultad de Ingeniería de la UNCuyo, por CIMA, con un registro horario en cada estación GNSS operativa de SIRGAS. Los mismos se encuentran publicados en la página web de SIRGAS, bajo los estándares que establece el IGS (<https://sirgas.ipgh.org/productos/retrasos-troposfericos/>). Otro aporte al

monitoreo atmosférico es el cálculo del vapor de agua integrado (IWV) en cada sitio, sus series temporales (Figura 10) y los mapas horarios de IWV (Figura 11) (Mackern et al., 2021).

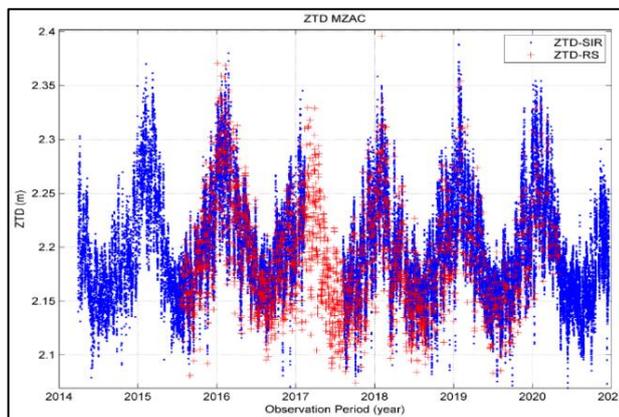


**Figura 8.** VTEC calculado desde GNSS por LPIM, para el día 096 del año 2010.

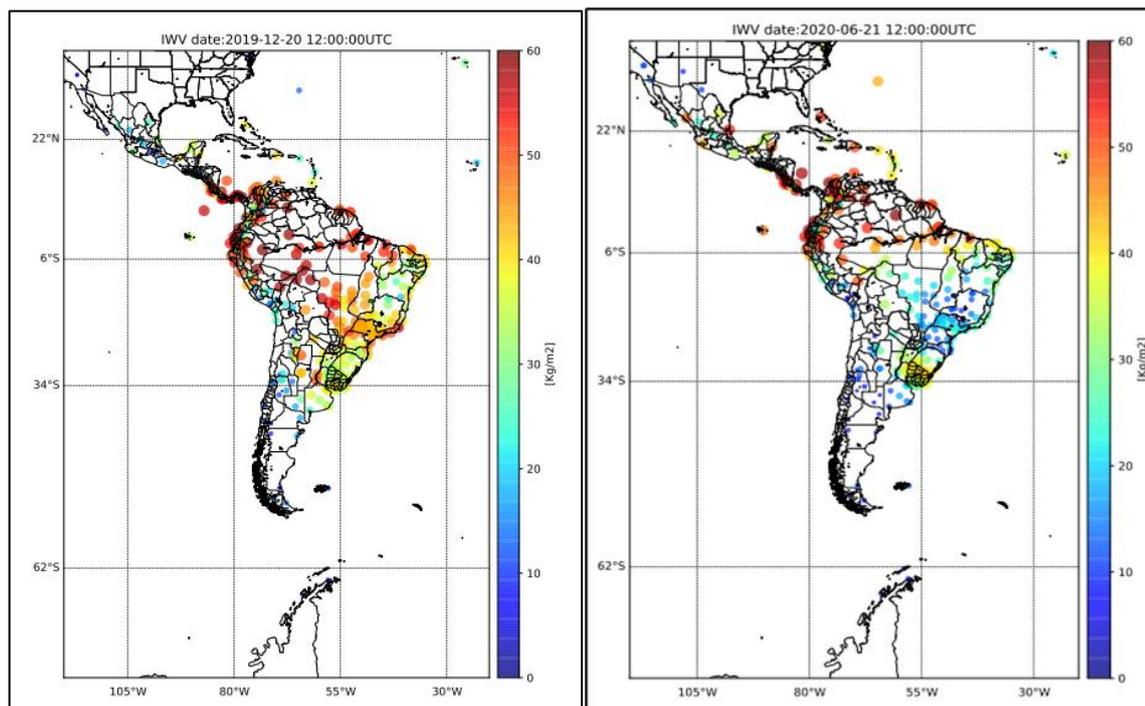


**Figura 9.** VTEC a cuasi tiempo real, calculado desde GNSS por MAGGIA (fecha 24 de junio 2022, 15:15 UTC) (<http://wilkilen.fcaglp.unlp.edu.ar/ion/ultimo.png>)

A modo de ejemplo se han mencionado algunos aportes científicos realizados a partir de las observaciones GNSS disponibles de las redes nacionales como RAMSAC y la continental SIRGAS-CON, con el objetivo de mostrar el valor agregado que estas redes han incrementado.



**Figura 10.** Serie de tiempo del ZTD, estación MZAC (Mendoza, Capital) (azul). Validación con ZTD calculado en estación de radiosondeo SAME (rojo).



**Figura 11.** Vapor de agua integrado (IWV), calculado por CIMA desde el ZTD en estaciones SIRGAS. Verano en Argentina, 20 de diciembre 2019 (izquierda). Invierno en Argentina, 21 de junio 2020 (derecha). En ambos casos 12 h UTC.

El

## MARCO LEGAL Y LOS NUEVOS SERVICIOS

No demos dejar de mencionar por la importancia que tuvo en el desarrollo y mejora de la red RAMSAC, la promulgación de la ley 26209 “Ley federal del catastro”. En la misma se establece la obligatoriedad de la georreferenciación de los inmuebles. Esta ley impone el marco legal que estaba faltando para fundamentar la existencia de actualizar el marco de referencia oficial. Surge así la oficialización de POSGAR2007. Marco nacional vinculado a SIRGAS y a ITRF a través del procesamiento continuo de la red RAMSAC. Desde el IGN en coordinación con los catastros provinciales se establecen acuerdos para el mantenimiento conjunto, de las estaciones GNSS de RAMSAC. Se desarrollan talleres de capacitación orientados a los usuarios, bajo el título de talleres de “Georreferenciación”.

Frente a los avances de la tecnología GNSS y las comunicaciones se desarrolla e implementa a partir del 2010, el servicio a tiempo real denominado RAMSAC-NTRIP, como nuevas estrategias orientadas a la georreferenciación precisa y eficiente (<https://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/Geodesia/RamsacNtrip>)

## CONCLUSIONES

De todo lo expuesto, se desprende que Argentina cuenta con una infraestructura geodésica, la red RAMSAC de gran potencial geodésico. Los resultados que se empiezan a obtener son el producto de un poco más de 30 años de esfuerzo, de cooperación, de gestión, de capacitación.

Hoy nos preocupan nuevos desafíos: integrar todas las constelaciones GNSS, combinar la red GNSS con las dos estaciones SLR (Oafa, de San Juan y AGGO, de La Plata). Desarrollar aplicaciones combinando técnicas, a partir de las estaciones SLR mencionadas, DORIS (en Rio Grande y en San Juan) y VLBI (actualmente en AGGO y próxima en CART, en San Juan). La

comunidad académica de la Geodesia nacional y continental se prepara para esos desafíos. Se ha identificado la necesidad de formar más especialistas porque no serán suficientes. Esto mismo que sucedió con GPS en las décadas descritas, nos afectará en un futuro no tan lejano frente a la demanda que presentan las estaciones geodésicas de AGGO, Oafa y CART. Nos preguntamos: ¿cómo instalar y poner operativas estaciones SLR, DORIS y VLBI?, ¿cómo vincular las soluciones entre técnicas?, ¿estamos en condiciones de determinar los vínculos locales, "local ties"?, ¿estamos preparados para procesar todo ese tipo de observables?

Mi conclusión, es que, si podremos aggiornarnos, como lo hicimos en el pasado, desde luego tomando como patrón del éxito la cooperación internacional y la colaboración entre agentes involucrados, comencemos.

## REFERENCIAS

- Bosy, J. Global, Regional and National Geodetic Reference Frames for Geodesy and Geodynamics. *Pure Appl. Geophys.* 171, 783–808 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00024-013-0676-8>
- Brunini, C.; Azpilicueta, F.; Gende, M.; Aragón Ángel, A.; Hernández Pajares, M.; Juan, J. M.; Sanz, J. (2009). Toward a SIRGAS service for mapping ionosphere electron density. *IAG Symposia* 136: 753-760.
- Drewes, H. y Sánchez, L. (2017). Velocity model for SIRGAS 2017: VEMOS2017, Technische Universitaet Muenchen, Deutsches Geodaetisches Forschungsinstitut (DGFI-TUM), IGS RNAAC SIRGAS
- Gómez, DD, Piñón, DA, Smalley, R. et al. Acceso al marco de referencia bajo los efectos de grandes terremotos: un enfoque de colocación de mínimos cuadrados para la evolución post-sísmica no secular. *J Geod* 90, 263–273 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0871-8>
- Mackern M.V., Mateo M.L., Camisay M.F., Morichetti P.V. (2020). Tropospheric Products from High-Level GNSS Processing in Latin America. *International Association of Geodesy Symposia Series*, Vol 152, open access, [doi: 10.1007/1345\\_2020\\_121](https://doi.org/10.1007/1345_2020_121).
- Mendoza, L. P. O., Meza, A. M. y Aragón Paz, J. M. (2019). A multi-GNSS, multi-frequency and near real-time ionospheric TEC monitoring system for South America", *Space Weather*, 17, <https://www.doi.org/10.1029/2019SW002187>;
- Moirano J., Brunini C., Drewes H., Kaniuth K. (1998). Realización de un sistema geodésico de referencia en Argentina en conexión con SIRGAS. *Serie de Simposios de la Asociación Internacional de Geodesia*; Springer, Berlín, Heidelberg; vol. 118:199-204, [https://doi.org/10.1007/978-3-662-03714-0\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-662-03714-0_32).
- Natali M., Brunini C., Kaniuth K., Drewes H. (2002). Monitoreo de puntos de referencia de mareógrafos en Argentina por GPS. *Serie de Simposios de la Asociación Internacional de Geodesia*; Springer, Berlín, Heidelberg, vol. 124:255-258, [https://doi.org/10.1007/978-3-662-04683-8\\_48](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04683-8_48).

## TÉCNICAS GEODÉSICAS ESPACIALES EN ARGENTINA: ACTUALIDAD Y PERSPECTIVA A FUTURO

María Eugenia Gómez<sup>1,2</sup>

[megomez@fcaglp.unlp.edu.ar](mailto:megomez@fcaglp.unlp.edu.ar)

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

<sup>2</sup>CONICET

### RESUMEN

Desde la primera estación DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) en el país, a la fecha no sólo se han incrementado continuamente las técnicas geodésicas espaciales, en particular estaciones GNSS (Global Navigation Satellite System) permanentes, sino que han permitido el avance de las aplicaciones y sus contribuciones a nivel global. Pero no sólo se ha expandido GNSS, sino que a ella se han sumado otras como SLR (Satellite Laser Ranging) y recientemente VLBI (Very Long Baseline interferometry). De esto se desprende que Argentina no sólo tiene una rica historia en lo que hace a la geodesia espacial sino que la existencia de otras técnicas permite plantearnos algunos interrogantes como los que veremos a continuación.

**Palabras claves:** GNSS, VLBI, SLR, DORIS, Argentina

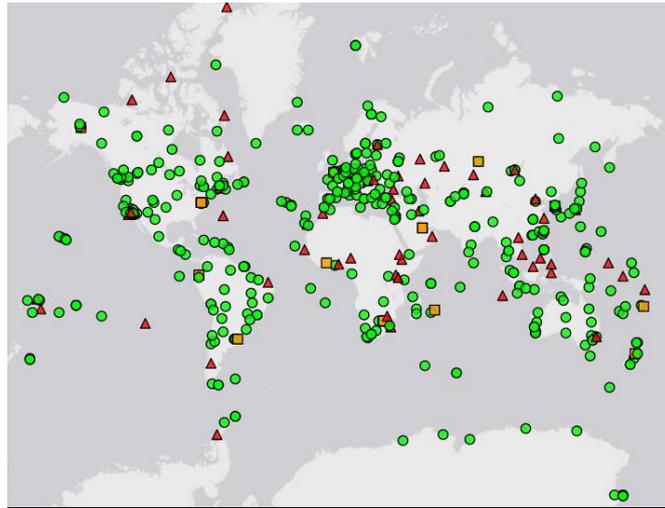
### INTRODUCCIÓN

En el presente texto, haremos una breve reseña de las técnicas geodésicas espaciales con las que cuenta el país y su integración en un contexto global. No obstante, las técnicas geodésicas no son importantes por sí mismas sino por los productos que se pueden obtener con ellas como por ejemplo, formar parte de la materialización de los marcos de referencia local, regional o internacional, contribuir de la estimación de parámetros de orientación terrestre (EOP, por sus siglas en inglés), estudios geodinámicos, servicios de posicionamiento en tiempo real o formar parte de los sistemas de alarma ante eventuales catástrofes naturales, entre otros.

A continuación presentamos las técnicas tanto en un contexto global como a nivel regional y local.

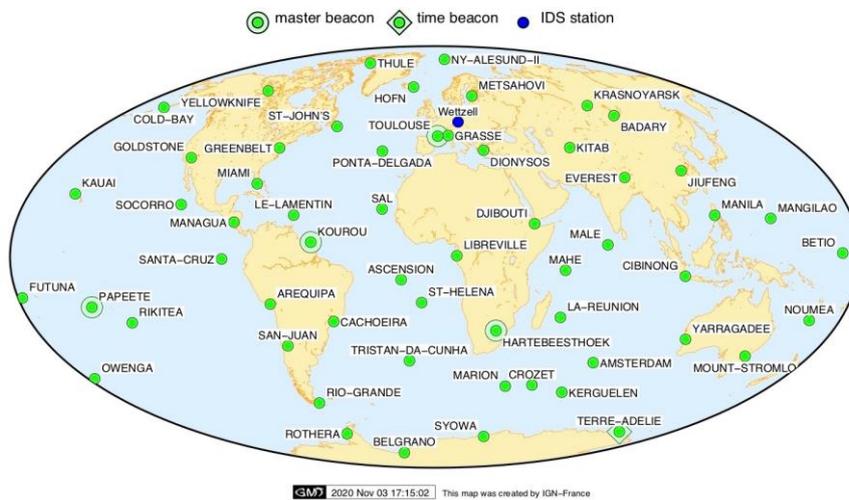
### EL CONTEXTO INTERNACIONAL

Si se mira el contexto internacional en lo que hace a la distribución de las técnicas de observación se puede observar que todas las técnicas carecen de una distribución homogénea. Que a medida que los costos de instalación y operación aumentan, la disparidad entre hemisferios se acentúa, siendo el IGS (International GNSS Service) una de las redes que mayor número de estaciones tiene en el mundo (Figura 1).



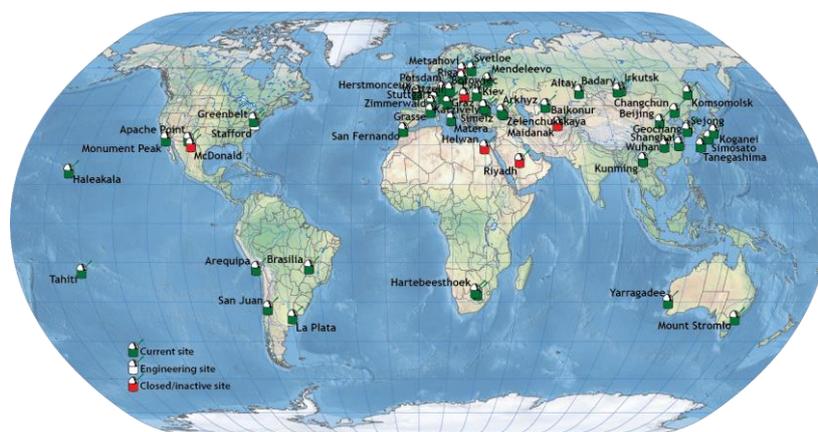
**Figura 1.** En verde las estaciones activas, y en rojo y naranja aquellas no disponibles o con datos poco recientes, respectivamente. Fuente: <https://igs.org/network/#station-map-list>

DORIS por su parte también presenta globalmente una muy buena distribución, incluso más homogénea que GNSS pero menos densa (Figura 2).

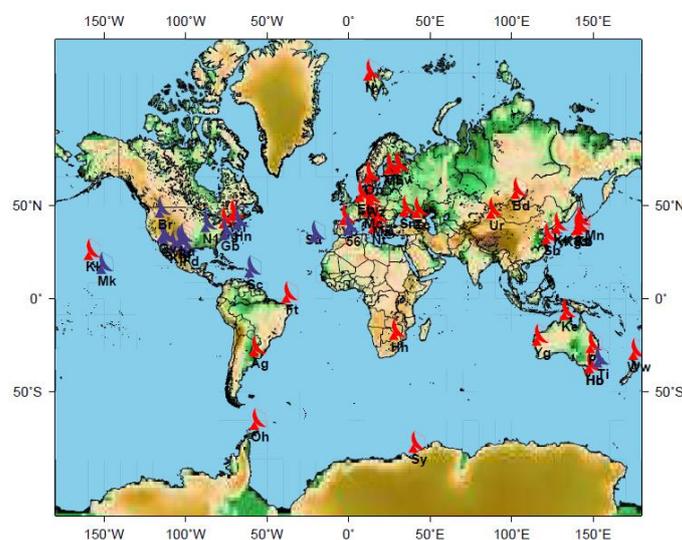


**Figura 2.** Estaciones que conforman la red del IDS (International DORIS Service). Fuente: [https://ids-doris.org/images/doris/permanent\\_network\\_Nov2020.png](https://ids-doris.org/images/doris/permanent_network_Nov2020.png)

SLR y VLBI pertenecen a las técnicas más costosas, razón por la cual el número de estaciones disminuye en el hemisferio sur mientras que en el hemisferio norte, la concentración de estaciones es muy alta (Figs. 3 y 4).



**Figura 3.** Red del ILRS (International Laser Ranging Service). Fuente: <https://ilrs.gsfc.nasa.gov/network/stations/index.html>



**Figura 4.** Red del IVS (International VLBI Service). En rojo las estaciones de la red IVS y en violeta las que prestan colaboración en determinadas sesiones

## ARGENTINA y LA REGIÓN

Desde la primera estación DORIS instalada en Tierra del Fuego y la primera estación GNSS permanente ubicada en La Plata, el número de técnicas geodésicas se ha incrementado de tal manera que a la fecha se cuenta incluso con una estación fundamental en AGGO (Observatorio Argentino - Alemán de Geodesia, en español) y está en construcción el sitio para una nueva antena de VLBI en San Juan.

La expansión de GNSS ha favorecido la creación de redes regionales como SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas) o nacionales como POSGAR (Posiciones Geodésicas Argentinas), o la red RAMSAC (Red Argentina de Monitoreo Continuo) de estaciones continuas.

Actualmente la red SIRGAS consta de más de 400 estaciones, al tiempo que RAMSAC cuenta con unas 135 estaciones de las cuales aproximadamente 45 son comunes con SIRGAS y 6 son parte del IGS. En lo que respecta a la red POSGAR, ésta está apoyada íntegramente en GNSS.

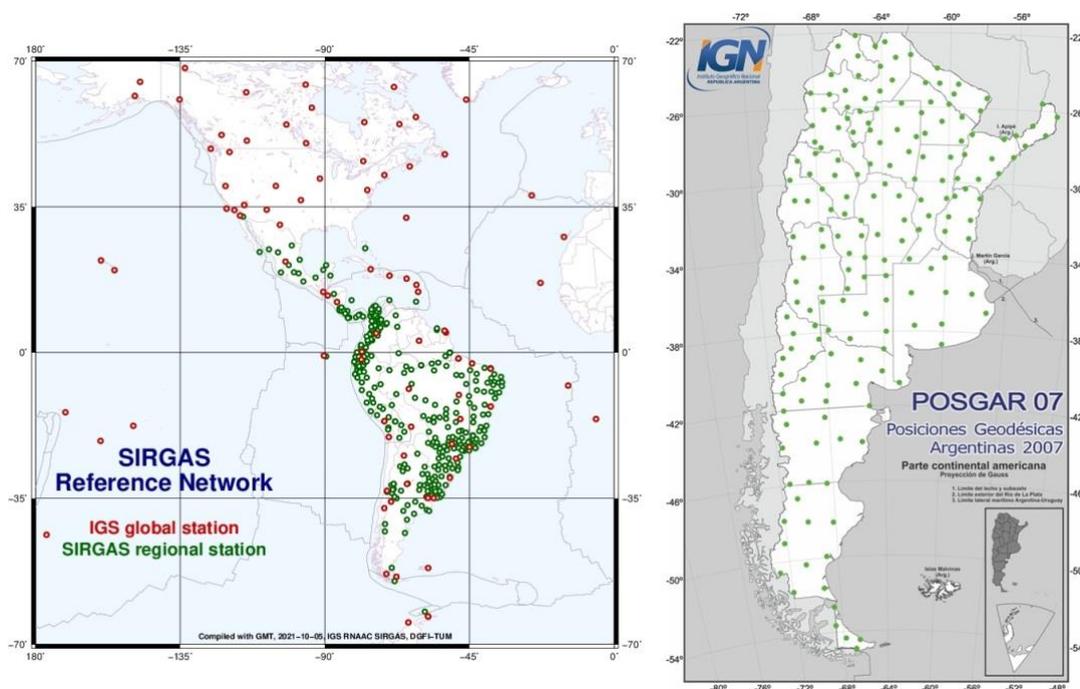


Figura 5. SIRGAS a la izquierda; mapa de la red POSGAR a la derecha. Fuentes:

<https://www.sirgas.org/fileadmin/images/Mapas>  
<https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Introduccion>

A nivel regional se tienen 5 estaciones DORIS de las cuales dos están ubicadas en Argentina: Tierra del Fuego (la primera técnica geodésica instalada en el país), y desde 2018 hay una ubicada en San Juan.

Desde 2005, el país cuenta con la primera estación SLR instalada en San Juan y desde 2015, se tiene una antena VLBI y un equipo SLR en AGGO, en colocación con otras técnicas. A esto se le deben sumar dos antenas de espacio profundo, productos de la cooperación con la ESA (Agencia Espacial Europea) y la CLTC (Agencia Nacional China de Lanzamiento, Seguimiento y Control General de Satélites)

En todos los casos, a excepción de varios sitios GNSS, la mayoría es el producto de estrechas cooperaciones con instituciones internacionales europeas, norteamericanas y asiáticas lo que resalta la necesidad de la cooperación para avanzar en este sentido.

Como se dijo al principio, las técnicas son importantes por los servicios y productos que se obtienen a partir de ellas. En la Tabla 1 se lista el instrumental con que cuenta el país y los productos o servicios de los que participan.

**Tabla1.** Técnicas disponibles en el país y su participación en la obtención de distintos productos o servicios.

Técnica	Número de estaciones	Servicios/Productos
GNSS	~131	Marco de ref., NTRIP, geodinámica, EOP,...
SLR	2 (1 activo)	ITRF, EOP, geodinámica
DORIS	2	ITRF, EOP, ionósfera, orbitas
VLBI	1	EOP
Antenas de espacio profundo	2	Seguimiento misiones espaciales, DSA3 (ICRF3)

Argentina ha participado con sus estaciones, de manera muy activa en servicios como el IGS y también en la red SIRGAS. El último logro, en este sentido, es su participación como centro asociado de análisis del IVS, iniciada en 2020.

### **PREGUNTAS RELACIONADAS CON EL FUTURO PROXIMO**

De lo expuesto, se desprende que Argentina cuenta con un gran potencial geodésico que ha sabido explotar en parte, pero que aún queda mucho por recorrer.

La existencia de estas técnicas en el país, nos permite plantearnos algunos interrogantes, como la viabilidad de un marco de referencia regional que integre todas las técnicas. Ya vimos que SIRGAS solo está compuesto por estaciones GNSS, pero ¿es posible y necesario sumar otras técnicas?

Contamos con un 10% de tiempo de observación de las antenas de espacio profundo, ¿podemos integrarlas al resto para ciertos estudios?

Y si nos centramos en el capital humano, ¿tenemos la capacidad para manejar todas las técnicas y el procesamiento de sus datos? Seguramente la respuesta sea afirmativa pero con seguridad, tal como en su momento se formaron especialistas en el manejo de equipos GNSS y en el procesamiento de sus datos, sea necesario en el actualidad seguir fomentando la formación pero en otras técnicas.

Por último, cabe recordar que ninguna de las técnicas mencionadas es nueva, sino que lo que ha sido reciente es su instalación en el país. De modo que para evitar futuros desfasajes entre las técnicas existentes y la formación de personas capacitadas en ellas, valga la pena preguntarse si es necesario esperar a que se instale una nueva técnica en el país para comenzar a formarse en ella.

## UNA SENDA DE CRECIMIENTO PARA LA GEODESIA ARGENTINA

Claudio Brunini<sup>1,2,3</sup>, Raúl Perdomo<sup>1</sup>, Daniel Del Cogliano<sup>1</sup>

[claudio@fcaglp.unlp.edu.ar](mailto:claudio@fcaglp.unlp.edu.ar)

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata

<sup>2</sup>Observatorio Argentino Alemán de Geodesia

<sup>3</sup>CONICET

### RESUMEN

Se propone un Programa Nacional de Geodesia que, con una inversión menor a la que el país hace en grandes instrumentos, contribuirá a maximizar el beneficio que la Argentina extrae de ellos. La premisa es que los instrumentos argentinos fortalecen la infraestructura geodésica global en una de las regiones más necesitadas del mundo y son intensamente explotados por la comunidad internacional, pero su uso en el país es todavía limitado por la falta de coordinación inter-institucional y por no contar con suficientes RRHH especializados.

En años recientes se han instalado instrumentos de vanguardia que han transformado al país en el mejor equipado de la región: tres observatorios multi-técnica dedicados 100% a la Geodesia el Observatorio Argentino Alemán de Geodesia (AGGO), el Observatorio. Astronómico. Félix Aguilar (OFA) y la Estación Astronómica Rio Grande (EARG) e instrumentos muy sofisticados parcialmente dedicados a esta disciplina el Radio Telescopio Chino Argentino (CART), la estación ESA Deep Space 3 (ESA-DS3) y (CALTC). Las instalaciones funcionan en sociedad con instituciones extranjeras que aportan los instrumentos, pero la inversión argentina acumulada en el tiempo es tanta o más grande que la extranjera.

Esto ha transformado a la Argentina en un ejemplo de cumplimiento de la resolución de 2015 de la ONU, titulada “Un Marco de Referencia Geodésico Global para el Desarrollo Sostenible”. La misma apunta a enfrentar una variedad de problemas globales cuyo abordaje demanda el uso de satélites artificiales muy sofisticados (cambio del nivel del mar, ciclo del agua terrestre, riesgos geológicos, eventos meteorológicos extremos y cambio climático, dinámica de los ecosistemas). La operación de esos satélites exige mejoras en el Marco de Referencia Geodésico Global que no pueden lograrse agregando instrumentos en los países más desarrollados. Por el contrario, es necesario agregarlos en los que carecen de ellos, especialmente en el hemisferio sur.

El requerimiento de la ONU recae sobre la Geodesia y enfrentarlo implica el mantenimiento de servicios científicos internacionales y la realización de trabajos de muy largo aliento. Ello reduce la posibilidad de publicar frecuentemente en revistas de alto impacto y hace que los indicadores bibliométricos convencionales de los científicos que los abordan crezcan con relativa lentitud. Pero esto no significa que tales trabajo carezcan de jerarquía científica ni que quienes los realizan tengan poca creatividad. Son trabajos de largo aliento que despiertan el interés de ciertos científicos, pero no de aquellos cuya vocación es la generación rápida y frecuente de nuevos conocimientos. Los indicadores bibliométricos convencionales, que son adecuados para medir ciertas cualidades,

desfavorecen el desarrollo de los RRHH que el país necesita para aprovechar mejor su gran inversión en instrumental geodésico.

Un programa pluri institucional y de alcance nacional con los objetivos de coordinar estratégicamente y en beneficio del país el aprovechamiento de su extraordinaria infraestructura geodésica y de generar espacios formativos innovadores y mejorar la dotación y la sostenibilidad de RRHH, permitirá un aumento significativo del valor científico argentino agregado a los datos que producen sus instrumentos.

En el ítem (1) de este documento se describe la infraestructura geodésica existente en el país; en el (2) se exponen las razones que justifican la inversión argentina en esos instrumentos y las que justificarían la implementación de este programa; y en (3) se formulan algunas ideas preliminares sobre su implementación.

## **1. LA INFRAESTRUCTURA GEODÉSICA ARGENTINA**

En las últimas décadas, la principal infraestructura geodésica argentina ha sido la red RAMSAC, que actualmente cuenta con más de 100 estaciones GNSS (Figura 1, izq.). Es administrada por el IGN con la cooperación de numerosas organizaciones argentinas y extranjeras. Satisface la mayoría de los requerimientos prácticos, aún con la limitación de estar basada en una única técnica de medición.

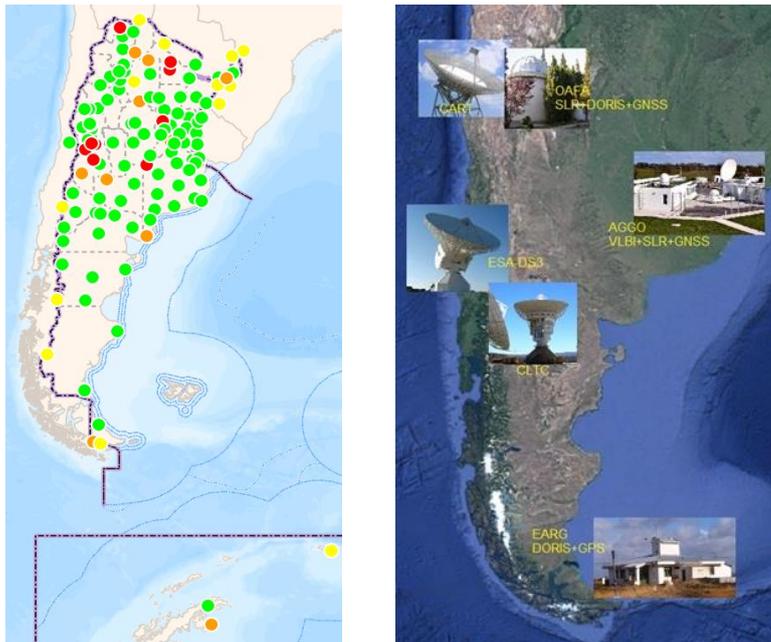
En años recientes se han instalado instrumentos geodésicos de vanguardia que han transformado al país en el mejor equipado de la región (Figura 1, derecha). Contamos con tres observatorios en los que dos o más técnicas de medición operan conjuntamente:

- AGGO es el único en América Latina que reúne a las principales técnicas en un solo sitio: VLBI, SLR, GNSS, tiempo atómico y gravimetría absoluta y relativa.
- Oafa cuenta con SLR, GNSS y DORIS, instalados en cooperación con China y Francia.
- EARG cuenta con GNSS y DORIS.

Los tres dedican el 100% del tiempo a la Geodesia y la co-localización de diferentes instrumentos potencia su importancia.

A ellos se agregan otros observatorios, que sin contar con instrumentos co-localizados ni dedicar el 100% del tiempo a la Geodesia, contribuyen a ubicar al país en una situación excepcional en cuanto a disponibilidad de instrumentos de vanguardia:

- El radiotelescopio CART, que se está instalando en la Estación de Altura del Oafa, en colaboración con China y con apoyo del MinCyT y del CONICET.
- Los radiotelescopios ESA-DS3 y CATC, instalados en Malargüe y en Bajada del Agrío por la UE y China, respectivamente, en sociedad con Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE).



**Figura 1.** Estaciones GNSS que componen la red RAMSAC (izquierda) e instrumental geodésico de vanguardia instalado en la Argentina (derecha).

## 2. RAZONES QUE JUSTIFICAN LA INVERSIÓN EN INSTRUMENTOS GEODÉSICOS Y AVALAN LA NECESIDAD DE IMPLEMENTAR UN PROGRAMA QUE LOS RESPALDE

Se dijo que la Geodesia argentina se apoyó en la infraestructura GNSS de la red RAMSAC y que esta solventa la mayoría de los requerimientos prácticos. No obstante, el país ha invertido y continúa invirtiendo recursos cuantiosos en instrumentos geodésicos sofisticados. Las inversiones se realizan en sociedad con instituciones extranjeras que aportan instrumentos a los que el país no podría acceder con sus solos recursos. Pero esto no debe eclipsar la realidad de que la inversión argentina en suelo, infraestructura, costos operativos y personal, acumulada en el tiempo, es tanta o más grande que la extranjera.

Es válido preguntarse qué sentido tienen esta inversión cuando el país cuenta con una infraestructura capaz de satisfacer la mayoría de sus necesidades prácticas. Para el mundo científico la respuesta es clara: el acceso a más y mejores instrumentos facilita el avance de la ciencia que contribuye al conocimiento universal. Otro tanto ocurre para el mundo tecnológico: el desarrollo es un proceso de *moto continuo* en el que la tecnología que hoy nos satisface se vuelve obsoleta mañana.

Es oportuno, también reflexionar sobre la resolución de 2015 de la Asamblea General de la ONU, titulada “Un Marco de Referencia Geodésico Global para el Desarrollo Sostenible”. ¿Por qué la ONU recomienda mejorar el Marco de Referencia Geodésico a escala Global? ¿Y por qué asocia esa mejora con el Desarrollo Sostenible? Porque algunos macro-problemas originados por la acción combinada de la Naturaleza y del Hombre amenazan la sostenibilidad de la vida sobre el Planeta; porque esa clase de problemas no puede abordarse a otra escala que la global; porque el abordaje global no puede hacerse con otra herramienta que los satélites artificiales; porque sin un Marco de Referencia Geodésico es imposible operar misiones satelitales; y porque los satélites se mueven alrededor del globo y no se los puede controlar si no se rastrea la totalidad de sus órbitas. La figura (2) esquematiza los macro-problemas de los que estamos hablando: cambio del nivel del mar; ciclo del agua terrestre; riesgos geológicos; meteorología y clima; y dinámica de ecosistemas.



**Figura 2:** Visión esquemática de cinco macro-problemas que implican amenazas a la sostenibilidad de la vida sobre el Planeta. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo: cambio del nivel del mar; ciclo del agua terrestre; riesgos geológicos; meteorología y clima; y dinámica de ecosistemas.

El abordaje de esta clase de problemas debe hacerse a escala global, porque el Sistema Tierra se asemeja a un cuerpo humano, en el que una afección no puede tratarse examinando solo la parte que presenta los síntomas. La herramienta para ese abordaje son los satélites artificiales y los expertos coinciden en que la precisión de las órbitas de todas las misiones con sensores activos que miden alturas, deformaciones superficiales, variaciones en la distribución de masas subterráneas, etc., deben mejorar al menos un orden de magnitud (ej.: *US National Academies Press (2020) Evolving the Geodetic Infrastructure to Meet Social Needs, ISBN 978-0-309-49778-7*). Este desafío va de la mano con la mejora del Marco de Referencia Geodésico Global y, como ya se explicó, la globalidad del problema hace que la mejora no pueda lograrse agregando más y mejores instrumentos en los países más desarrollados. Más bien al contrario, es necesario agregarlos en los países que carecen de ellos, especialmente en el hemisferio sur.

La problemática de la que hablamos tiene dimensión ‘macro’ y su abordaje demanda la intervención de múltiples actores que ataquen los problemas ‘micro’ que conforman lo ‘macro’. La figura (3) sintetiza este concepto y muestra que la Geodesia proporciona la base de una pirámide en cuyo vértice converge a las respuestas deseadas.



**Figura 3:** Aporte de la Geodesia al abordaje de los cinco macro-problemas que amenazan la sostenibilidad de la vida sobre el Planeta

La posibilidad de generar resultados novedosos y publicaciones de alto impacto aumenta a medida que ascendemos en la pirámide. Consecuentemente, los índices bibliométricos convencionales de los científicos que pueblan los escalones más altos crecen más rápido que los de los que pueblan los más bajos. Sería absurdo interpretar este hecho como un indicador de que la Ciencia solo necesita los escalones más altos, porque sin los más bajos se desmoronaría el edificio. Cabría preguntarse si los científicos que pueblan los escalones más altos son más creativos que los que pueblan los más bajos; si la tarea que se realiza en los escalones más bajos no requiere de científicos; o si fallan los indicadores bibliométricos convencionales.

Nosotros creemos que todos los escalones deben estar poblados con científicos, porque todos plantean problemas que solo pueden abordarse con el método científico. No creemos que sea la creatividad lo que varía de escalón en escalón, sino la vocación: la de unos, dominada por la búsqueda de nuevos conocimientos; y la de otros, por el sostenimiento de un servicio. Tampoco creemos que fallen los indicadores bibliométricos convencionales, sino que solo miden ciertas cualidades de los científicos. En particular, creemos que esos indicadores desfavorecen a los escalones más bajos de la pirámide y limitan los beneficios que el país extrae de la gran inversión en instrumental geodésico.

### **3. IDEAS PRELIMINARES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA.**

La premisa sobre la que se basa esta propuesta es que la Argentina realiza una gran inversión en instrumentos sofisticados, que dichos instrumentos fortalecen la infraestructura geodésica global en una de las regiones más necesitadas del mundo y que la comunidad internacional los usa intensamente para abordar problemas de gran trascendencia para la humanidad; pero que su uso en la Argentina es todavía limitado.

Un programa pluri-institucional y de alcance nacional, con una inversión menor que la destinada a la instrumentación, permitiría un aumento significativo del valor científico argentino agregado a los datos que producen sus instrumentos. En la actualidad, la presencia argentina decrece a medida que ascendemos del primer al tercer escalón de la pirámide de la figura 3. El objetivo del Programa sería incrementar esa presencia.

El MinCyT, por su competencia en la implementación de políticas nacionales de C&T, y el MinDef, por su competencia sobre la cartografía y la geodesia del país (a través del IGN) y por su participación en AGGO, podrían conformar el brazo articulador del Programa, cuyo gerenciamiento podría quedar a cargo de un comité integrado por representantes de las principales instituciones nacionales comprometidas con la geodesia.

Es fácil decir 'las principales instituciones nacionales comprometidas con la geodesia', pero es difícil decir cuáles son con la certeza de la imparcialidad. Mencionaremos solo a algunas, a efectos de ejemplificar y aclarando que la nómina no es excluyente ni implica prioridades:

- La UNLP, y más específicamente la FCAG, por contar con un grupo científico numeroso y prestigiosos y por su involucramiento en la EARG;
- El CONICET, y más específicamente AGGO, por administrar el observatorio geodésico más completo del país;
- El IGN, por ser el organismo técnico del Estado con incumbencia directa sobre la Geodesia del país;
- La UNSJ, y más específicamente el Oafa, por su involucramiento en SLR, GNSS, DORIS y CART;
- La CONAE, por su involucramiento en ESA – DS3 y CLTC;
- La UBA, donde se dicta uno de los pocos postgrados en geodesia que existen en el país;

- ...

Los objetivos específicos del programa serían tres:

- Generar espacios formativos innovadores para el aprovechamiento del instrumental geodésico de vanguardia existente en el país.
- Mejorar la dotación y la sostenibilidad de RRHH en las instituciones comprometidas con el Programa.
- Promover y articular trabajos conjuntos entre los principales actores nacionales, basados en la infraestructura geodésica de vanguardia con la que cuenta el país.

La inversión económica requerida para poner en práctica el programa abarca un rubro menor y uno mayor, aunque la suma de ambos es menor que la inversión económica que hace el país en grandes instrumentos geodésicos. El menor es para la implementación de mecanismos formativos innovadores y para intercambios entre diferentes grupos. El mayor es para la dotación y la sostenibilidad de RRHH en las instituciones comprometidas con el Programa.

Es necesario generar mecanismos de incorporación, evaluación y sostenibilidad de RRHH alternativos a los que se ofrecen actualmente. El mecanismo casi excluyente para acceder a una posición permanente y de tiempo completo consiste en obtener una beca doctoral, doctorarse y acumular publicaciones de alto impacto, obtener una beca post-doctoral y repetir el esquema y, finalmente, acceder a una posición permanente y de tiempo completo para investigar y/o ejercer la docencia.

No hay nada objetable en ese mecanismo que ha permitido que la Argentina desarrolle C&T de excelencia. La Geodesia lo ha usado con resultados satisfactorios en términos de los indicadores bibliométricos convencionales. Con ese mecanismo se han desarrollado varios grupos de excelencia, todos especializados en la tecnología GNSS. Pero la regla general ha sido evitar los problemas que demandan un largo aprendizaje, durante el cual es difícil publicar resultados. El precio ha sido contar con pocas personas formadas para explotar los nuevos instrumentos geodésicos y poblar adecuadamente los tres escalones más bajos de la pirámide de la figura 3. Ya se explicó que en esos escalones se generan datos y productos sofisticados, cuya importancia no se refleja en los indicadores bibliométricos convencionales, sino en la solidez del cimiento que proporcionan a los escalones superiores.

El Programa debería implementar un mecanismo que permita el ingreso de una cantidad determinada de personas dedicadas full time a la explotación de las nuevas herramientas geodésicas disponibles en el país (por ejemplo, tres personas por año durante cinco años consecutivos).

Los candidatos deberían poseer la formación básica para adquirir los conocimientos novedosos necesarios para el aprovechamiento de las tecnologías geodésicas de vanguardia (como mínimo, ser egresado universitario de carreras afines), pero la experiencia previa en la materia no debería ser una condición excluyente, dado que su trabajo consistirá, justamente, en adquirirla.

En concordancia con lo anterior, se les concederá un plazo prologado (por ejemplo, cinco años) durante el cual se los evaluará por sus progresos en el aprendizaje y por la producción de resultados que no sean necesariamente novedosos pero demuestren progresos acordes al estado del arte en la materia.

La experiencia no completamente cerrada de los proyectos PDTs, que resultaron claramente planteados pero no lograron plasmar el perfil de los investigadores dedicados a temas estratégicos, cuya labor se enfocaba en aplicaciones claras y valiosas como las que plantea el presente

programa, también es un camino para recorrer en la discusión de esta propuesta que puede resultar un ejemplo a seguir por otras disciplinas.

Las fortalezas de esta visión:

- Formación de muy alto nivel de investigadores en temas estratégicos.
- Aprovechamiento pleno de las capacidades instaladas.
- Fuerte vinculación internacional.

Las oportunidades

- Crecimiento sostenido de una disciplina tradicional y aplicada.
- Fuerte vinculación entre instituciones del sistema científico, universitario y de servicios estratégicos (para el caso se plantea Defensa pero en forma no excluyente, dado que los usuarios de productos que se desprenden de las actividades definidas por el programa son diversos).

Las debilidades

- Un planteo equivocado del programa que conduzca a una formación técnica o profesional y no a investigadores aplicados.
- Un conjunto de normas de evaluación facilistas, excesivas, mal orientadas, etc.

Las amenazas

- Que los propios investigadores no se sientan tales y restrinjan su horizonte a tareas relativamente rutinarias.
- Las comisiones evaluadoras sean “del gran área disciplinar”.

Algunos parámetros centrales en el proceso de evaluación de la permanencia y jerarquización de los investigadores del Programa:

- Evaluación por expertos (relativamente sencillo por tratarse de un conjunto de temas acotados).
- Desarrollo de nuevos productos o perfeccionamiento de los mismos.
- Contribución a aplicaciones concretas.
- Participación efectiva en el marco de proyectos exitosos.
- Contribución con proyectos multi-institucionales.

## HACIA LA IMPLEMENTACIÓN DEL MARCO DE REFERENCIA GEODÉSICO GLOBAL

Claudia Tocho <sup>1, 2, 3</sup>

[ctocho@fcaglp.unlp.edu.ar](mailto:ctocho@fcaglp.unlp.edu.ar)

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata

<sup>2</sup>Comisión de Investigaciones Científicas (CIC)

<sup>3</sup>Member-at-Large GGOS Coordinating Board

### RESUMEN

Mi intervención en la mesa redonda: Contribución a la Historia, Presente y Futuro de la Geodesia en la Argentina, estuvo centrada en presentar la descripción científica realizada por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG<sup>1</sup>) acerca de la implementación del Marco de Referencia Geodésico Mundial (GGRF<sup>2</sup>) para el desarrollo sostenible adoptado en la Resolución A/RES/69/266 en la Asamblea General de las Naciones Unidas (UN<sup>3</sup>) el 26 de febrero de 2015 ([https://ggim.un.org/documents/A\\_RES\\_69\\_266\\_S.pdf](https://ggim.un.org/documents/A_RES_69_266_S.pdf)).

### ESTRUCTURA DE LA ASOCIACIÓN INTERNACIONAL DE GEODESIA

La Asociación Internacional de Geodesia (IAG) es una de las ocho asociaciones científicas que conforman la Unión Geodésica y Geofísica Internacional (IUGG<sup>4</sup>). La IAG es la organización científica responsable del avance de la Geodesia a nivel mundial. Su estructura se compone de 4 comisiones, 2 comités intercomisiones, un proyecto, servicios técnicos (tanto geométricos y generales así como también los servicios gravimétricos) y del Sistema de Observación Geodésico Global (GGOS<sup>5</sup>). GGOS se inició en julio de 2003 con el fin de monitorear el Sistema Tierra y el cambio global, y es la componente fundamental dentro de la estructura de la IAG para la implementación de la Resolución de las Naciones Unidas, sobre el *Marco de Referencia Geodésico Mundial para el Desarrollo Sostenible*, ya que la IAG y GGOS realizan acciones importantes dentro del Subcomité de Geodesia del Comité de Expertos sobre Gestión Mundial de Información Geoespacial de las Naciones Unidas (UN-GGIM<sup>6</sup>). GGOS también interactúa con la Unión Astronómica Internacional (IAU<sup>7</sup>).

Se sugiere visitar los sitios webs: <https://www.iugg.org/>; <https://www.iag-aig.org/>; <https://ggos.org/>

### DESCRIPCIÓN CIENTÍFICA DEL MARCO DE REFERENCIA GEODÉSICO GLOBAL

---

<sup>1</sup> International Association of Geodesy

<sup>2</sup> Global Geodetic Reference Frame

<sup>3</sup> United Nations

<sup>4</sup> International Union of Geodesy and Geophysics

<sup>5</sup> Global Geodetic Observing System

<sup>6</sup> UN Committee of Experts on Global Geospatial Information Management

<sup>7</sup> International Astronomical Union

En abril de 2016, la IAG escribe un documento en donde describe cuáles son los fundamentos científicos sobre los que debe implementarse el Marco de Referencia Geodésico Global (GGRF<sup>8</sup>) para cumplir con los objetivos previstos por Naciones Unidas. El documento se puede descargar de: <https://office.iag-aig.org/doc/5d886c7c1bf43.pdf>.

## Concepto General

El sistema de referencia geodésico global que permita la medición y monitoreo simultáneo, consistente y preciso de la geometría de la Tierra, su campo de gravedad y su orientación en el espacio exterior se denomina Sistema de Referencia Geodésico Global (GGRS<sup>9</sup>). La realización precisa del GGRS es el GGRF, el cual es indispensable para generar información geoespacial confiable, requerida para estudiar los cambios que ocurren en el Sistema Tierra (monitoreo del cambio global, mitigación de desastres naturales, estudios del cambio climático global, aumento del nivel del mar, entre otros).

El GGRF se basa en observaciones geodésicas, centros de datos, centros de análisis, así como centros combinados y de productos geodésicos. Si bien el concepto general del GGRF se centra predominantemente en cuestiones técnicas, operativas y de infraestructura, también se deben considerar las actividades de investigación e innovación asociadas. La disponibilidad permanente de infraestructura geodésica de última generación y personal científico y técnico para generar productos geodésicos y aportar a los servicios de la IAG es crucial para lograr un GGRF sostenible.

Las bases para la realización del GGRF son las múltiples infraestructuras de observación geodésica. GGOS clasifica a la arquitectura de observación en 5 niveles:

- Nivel 1: infraestructura geodésica y gravimétrica terrestre.
- Nivel 2: misiones satelitales de órbita terrestre baja (LEO<sup>10</sup>) con alturas entre 180 y 2000 km.
- Nivel 3: misiones satelitales de órbita terrestre alta: (MEO<sup>11</sup> y GEO<sup>12</sup>) con alturas hasta 36.000 km.
- Nivel 4: objetos planetarios y satélites naturales como la Luna.
- Nivel 5: objetos extragalácticos (p. ej. quásares).

Estos cinco niveles están conectados por muchos tipos de observaciones de manera compleja para formar un sistema integrado de observación geodésica. Con las técnicas espaciales las observaciones son globales y regionales, mientras que, con las técnicas terrestres, las observaciones se utilizan principalmente para la interpolación en el espacio y el tiempo, y así registrar características locales específicas.

---

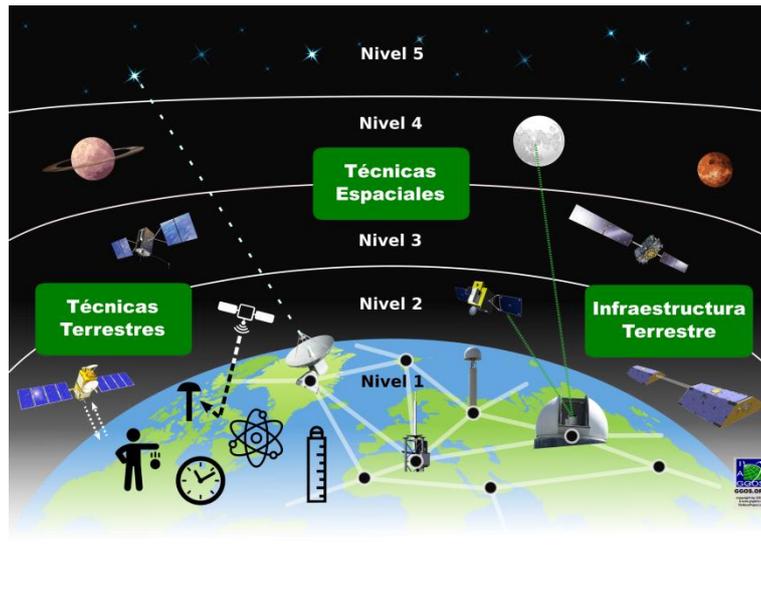
<sup>8</sup> Geodetic Global Reference Frame

<sup>9</sup> Global Geodetic Reference System

<sup>10</sup> Low Earth Orbiter

<sup>11</sup> Medium Earth Orbiter

<sup>12</sup> Geostationary Earth Orbiter



**Figura 1.** Martin Sehnal (2022). Distintas observaciones geodésicas que proveen los fundamentos para la determinación y mantenimiento del GGRF. <https://ggos.org/obs/>

## SISTEMA DE REFERENCIA GEODÉSICO GLOBAL

El concepto general del Sistema de Referencia Geodésico Global (GGRS) se basa en Die Figur der Erde (La figura de la Tierra) de Bruns (1878).

El GGRS incluye una componente terrestre y una componente celeste. La componente terrestre es una referencia común para describir la geometría y el campo de gravedad terrestre en cualquier momento. En la Figura 2, se observa que la posición de un punto P sobre la superficie terrestre debe describirse mediante la ecuación (1):

$$P(\mathbf{X}, \mathbf{W}, \mathbf{g}) = P(\mathbf{X}, \mathbf{W}, -\Delta\mathbf{W}) = P(\mathbf{X}, \mathbf{W}, -\partial\mathbf{W}/\partial\mathbf{H}), \quad (1)$$

donde  $\mathbf{X}$  es la coordenada geocéntrica cartesiana,  $\mathbf{W}$  el valor de potencial real de gravedad terrestre,  $\mathbf{g}$  el vector de gravedad (gradiente del potencial de gravedad terrestre) y  $\mathbf{H}$  la altura física.

El Sistema de Referencia Celeste Internacional (ICRS<sup>13</sup>) provee la base celeste al GGRS para describir la orientación de la Tierra en el espacio exterior en cualquier momento.

La vinculación entre la componente terrestre y la componente celeste está dada por los parámetros de orientación terrestre (EOPs<sup>14</sup>) que también permiten relacionar cantidades gravimétricas con geométricas.

<sup>13</sup> International Celestial Reference System

<sup>14</sup> Earth Orientation Parameters

- $X$  se determina con técnicas geodésicas espaciales (p. ej. GNSS) y se refiere al Marco de Referencia Internacional Terrestre (ITRF<sup>15</sup>).
- La altura física  $H$  es la diferencia  $-\Delta W$  entre el potencial  $W(P)$  del campo de gravedad terrestre en el punto  $P$  considerado y el potencial de gravedad del geode  $W_0$ .
- La unidad de tiempo es el segundo y la unidad de longitud es el metro en el Sistema Internacional (SI).
- Geometría y gravedad son funciones del tiempo  $\dot{X}$ ,  $\dot{W}$ ,  $\dot{H}$  &  $\dot{g}$ .
- Se requieren parámetros fundamentales, convenciones para los modelos sean consistentes tanto para la geometría y gravedad.

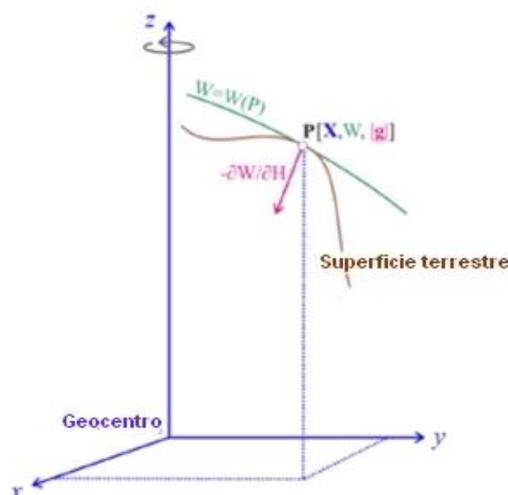


Figura 2: Modificado de Sánchez (2020)  
[https://sirgas.ipgh.org/docs/Boletines/Webinar\\_20200625\\_Sanchez\\_IHRS.pdf](https://sirgas.ipgh.org/docs/Boletines/Webinar_20200625_Sanchez_IHRS.pdf)

## MARCO DE REFERENCIA GEODÉSICO GLOBAL

El Marco de Referencia Geodésico Global (GGRF) es la realización del Sistema de Referencia Geodésico Global (GGRS). Se materializa a través de puntos físicos en la superficie de la Tierra, satélites con órbitas cercanas a la Tierra y objetos celestes, junto con parámetros que describen la geometría y la gravedad a lo largo del tiempo.

Los puntos sobre la superficie terrestre tienen cobertura global, con densificaciones de la infraestructura geodésica a nivel regional y nacional.

Las estaciones del GGRF generalmente comprenden:

- Observatorios geodésicos fundamentales que emplean todas las técnicas geodésicas geométricas espaciales (VLBI<sup>16</sup>, SLR<sup>17</sup>, GNSS<sup>18</sup>, y DORIS<sup>19</sup>), colocalizadas con técnicas gravimétricas (gravímetros absolutos, superconductores, atómicos), permitiendo la conexión entre  $X$ ,  $W$  y  $g$  y realización del tiempo (relojes de referencia);
- Otras estaciones geodésicas que incluyan mareógrafos de referencia, puntos de referencia de altura y mediciones de gravedad, complementadas con técnicas geodésicas espaciales.

El GGRF es un marco de referencia geodésico integrado, que comprende el Marco de Referencia Celeste, el Marco de Referencia Terrestre, el Marco de Referencia de Altura y el Marco de Referencia de Gravedad (Figura 3).

<sup>15</sup> International Terrestrial Reference Frame

<sup>16</sup> Very Long Baseline interferometry

<sup>17</sup> Satellite Laser Ranging

<sup>18</sup> Global Navigation Satellite System

<sup>19</sup> Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite



Figura 3. Martin Sehnal (2022). Marcos de referencia. <https://ggos.org/products/>

Todas las estaciones GGRF deben:

- Operar en forma continua, a largo plazo, para garantizar la estabilidad del GGRF;
- Estar equipadas con tecnología de observación de última generación para producir observaciones de alta calidad;
- Estar monitoreadas en forma continua para detectar deformaciones de la superficie de la Tierra; y
- Estar vinculadas a redes verticales nacionales para la unificación de los sistemas de alturas existentes.

### IMPLEMENTACIÓN DEL GGRF A NIVEL GLOBAL Y PARTICIPACIÓN DE ARGENTINA

El GGRF es un marco de referencia geodésico que incorpora el Marco de Referencia Internacional Celeste (ICRF<sup>20</sup>), el Marco de Referencia Internacional Terrestre (ITRF<sup>21</sup>), el Marco de Referencia Internacional de Altura (IHRF<sup>22</sup>) y el Marco de Referencia Internacional de Gravedad (IGRF<sup>23</sup>). Los dos últimos fueron introducidos con las Resoluciones No. 1 y No. 2 de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG) durante la Asamblea General de la Unión Geodésica y Geofísica Internacional (IUGG) realizada en Praga en 2015 (Drewes et al., 2016).

La definición, materialización y mantenimiento de un sistema de referencia de altura global, unificado, físico (dependiente del campo de gravedad terrestre), exacto y bien definido (IHRF) es, hoy en día, uno de los objetivos de la Geodesia (Sánchez et al., 2021). En este sentido, junto al Geof. Ezequiel D. Antokoletz participamos activamente en los siguientes grupos de trabajo:

<sup>20</sup> International Celestial Reference Frame  
<sup>21</sup> International Terrestrial Reference Frame  
<sup>22</sup> International Height Reference Frame  
<sup>23</sup> International Gravity Reference Frame

- JWG<sup>24</sup> 0.1.2. Working Group on Strategy for the Realization of the International Height Reference System (IHRF).  
Periodo 2015-2019  
Chair: Laura Sánchez (Alemania)
- JWG 0.1.3: Implementation of the International Height Reference Frame (IHRF).  
Periodo 2019-2023 (Poutanen M. y S. Rózsa, 2020)  
Chair: Laura Sánchez (Alemania), Lead of the GGOS Focus Area Unified Height System  
Vice-chair: Riccardo Barzaghi (Italia), Chair of the International Gravity Field Service

El establecimiento de un nuevo sistema de referencia gravimétrico (IGRS) es otro de los principales objetivos de la IAG por lo que también participamos activamente en el

- JWG 2.1.1 Establishment of a global absolute gravity reference system.  
Periodo 2015-2019  
Periodo 2019-2023 (Poutanen M. y S. Rózsa, 2020)  
Chair: Hartmut Wziontek (Alemania)  
Vice-chair: Sylvain Bonvalot (Francia)

para lograr el monitoreo global, preciso, homogéneo y a largo plazo del campo de gravedad de la Tierra, aprovechando el potencial de las mediciones de gravedad absoluta actuales (Wziontek et al., 2021).

El Observatorio Argentino-Alemán de Geodesia (AGGO<sup>25</sup>), cuenta con la capacidad y la infraestructura para participar activamente en la materialización del IHRF y del IGRS. En AGGO, se garantiza la conexión entre el sistema de referencia geométrico (coordenadas geocéntricas cartesianas) con los sistemas de referencia físicos (altura y gravedad).

Por otra parte, la combinación de las observaciones del gravímetro superconductor y el gravímetro absoluto instalado en el Laboratorio de Gravimetría ha permitido la determinación de una función de referencia de gravedad continua y precisa para el Observatorio (Antokoletz et al., 2020). Con esto, AGGO se convierte en la primera estación de referencia en América Latina y el Caribe con facilidades para la comparación de gravímetros absolutos, y vinculada al ITRF y al IHRF (Tocho et al., 2020).

Por último, quisiera mencionar que desde mayo de 2021 fui electa Member-at-Large del GGOS Coordinating Board, y que las tareas que realiza GGOS en la implementación del GGRF son:

- Organizar los servicios (gravimétricos y geométricos) de la IAG con un alto nivel científico y técnico;
- Apoyar el desarrollo de tecnologías y productos geodésicos sobre la base de compartir datos, productos, estándares y convenciones geodésicas;
- Brindar apoyo científico a todas las organizaciones científicas, agencias geodésicas nacionales y Estados Miembros, en materia geodésica;
- Desarrollar y mejorar teorías y metodologías para la implementación del GGRF;

---

<sup>24</sup> Joint Working Group

<sup>25</sup> Argentinean-German Geodetic Observatory

- Ayudar a la divulgación de la geodesia para que sea más comprensible a la sociedad.

Por último, cabe resaltar que el Marco de Referencia Geodésico Global como el GGRF no puede ser implementado por una sola persona, o una sola entidad o un solo país. La implementación del GGRF solo es posible bajo una cooperación internacional global, fuerte y estructurada como la construida bajo la Asociación Internacional de Geodesia.

## REFERENCIAS

- Antokoletz E.D., Wziontek H., C.N. Tocho, R. Falk. 2020. Gravity reference at the Argentinean-German Geodetic Observatory (AGGO) by co-location of superconducting and absolute gravity measurements. *J Geod* 94, 81 <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01402-7>
- Bruns H. 1878). *Die Figur der Erde*. Publication des Königl. Preussischen Geodätischen Instituts, Berlin.
- Drewes H, F. Kuglitsch, J. Ádám, S. Rózsa. 2016. Geodesist's Handbook 2016, *J Geod* 90, 907.
- Poutanen M. y S. Rózsa. 2020. The Geodesist's Handbook 2020. *J Geod* 94, 109. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01434-z>
- Sánchez L., J. Ågren, J. Huang, Y.M. Wang, J. Mäkinen J., R. Pail, R. Barzaghi, G.S. Vergos, K. Ahlgren, Q. Liu. 2021. Strategy for the realisation of the International Height Reference System (IHR). *Journal of Geodesy*, 95(3). <https://doi.org/10.1007/s00190-021-01481-0>
- Tocho C.N., Antokoletz E.D., Piñón D.A. (2020) Towards the Realization of the International Height Reference Frame (IHRF) in Argentina. In: *International Association of Geodesy Symposia*. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/1345\\_2020\\_93](https://doi.org/10.1007/1345_2020_93)
- Wziontek H., S. Bonvalot, R. Falk, G. Gabalda, J. Mäkinen, V. Pálinkáš, A. Rülke, L. Vitushkin. 2021. Status of the International Gravity Reference System and Frame. *J Geod* 95, 7. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01438-9>

## LOS AVANCES EN EL MARCO DE REFERENCIA GEODÉSICO EN ARGENTINA Y LAS PERSPECTIVAS FUTURAS, BASADO EN LOS LINEAMIENTOS INTERNACIONALES

Sergio Cimbaro <sup>1,2</sup>

[scimbaro@ign.gob.ar](mailto:scimbaro@ign.gob.ar)

<sup>1</sup>*Instituto Geográfico Nacional*

<sup>2</sup>*Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería.*

### RESUMEN

A partir de la Resolución de la Asamblea General de las Naciones Unidas A/RES/69/266 “Marco de Referencia Geodésico Global para el Desarrollo Sostenible” del 26 de febrero de 2015, la geodesia pasó a tener un lugar de relevancia más allá de sus aspectos científicos, porque visibiliza en un aspecto más global la importancia de contar con coordenadas precisas para múltiples actividades necesarias en el marco del Desarrollo Sostenible.

Esta presentación trata sobre el desarrollo por parte del Instituto Geográfico Nacional de los avances y perspectivas futuras en relación al Marco de Referencia Geodésico Nacional y exponer las necesidades de articulación para el fortalecimiento de la Geodesia Nacional.

Los Marcos de Referencia, se materializan a través de puntos con coordenadas y alturas precisas, y son fundamentales para el desarrollo global sostenible, y permiten integrar la información geoespacial generada por múltiples actores. Bajo esta premisa, desde las Naciones Unidas se promueve la construcción de Infraestructuras de Datos Espaciales en cada país, ya que permiten llevar adelante actividades tales como la confección de cartografía; ejecución de obras civiles; actualización de los catastros; prospección de hidrocarburos; navegación terrestre, marítima y aérea; aprovechamiento de los recursos naturales; y la investigación de fenómenos naturales asociados al cambio climático y otras áreas de incumbencia de las Ciencias de la Tierra.

Las actividades del Instituto Geográfico Nacional dan cuenta de recientes esfuerzos para definir los Marcos de Referencia Geodésicos de la República Argentina, así como también, el sostenimiento de los diferentes servicios que brinda el organismo, como base fundamental para el desarrollo de la Infraestructura Geodésica y de Datos Espaciales de la República Argentina (IDERA).

## **RESEÑA DE LA MESA REDONDA CRIOSFÉRICA “LOS GRANDES RETOS DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA EN LOS GLACIARES SUDAMERICANOS”.**

**Coordinador: Andrés Rivera (Universidad de Chile)**

**Organizada por la Universidad de Chile (Andrés Rivera)**

**Laboratorio de Geomática Andina – IANIGLA (María Gabriela Lenzano)**

En el marco de la XXIX Reunión de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas el día 3 de agosto del 2021 se llevó a cabo la Mesa redonda criosférica sobre los resultados recientes y retos futuros de la investigación científica en los glaciares sudamericanos. Esta mesa contó con la participación de destacados científicos internacionales que expusieron sus trabajos más recientes llevados a cabo a lo largo de todos los Andes, quienes compartieron sus ideas y proyectos con más de 100 participantes no presenciales que con gran interés, escucharon, comentaron y preguntaron sobre el presente y futuro de la criósfera sudamericana.

La mesa redonda fue coordinada e introducida por Andrés Rivera del Departamento de Geografía de la Universidad de Chile, quien dio el marco de la discusión, resaltando la importancia y prestigio de los expositores y moderando las preguntas y comentarios que surgieron de esta interesante actividad. El primer expositor fue Matthias Braun del Institut für Geographie, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Alemania, quien expuso sus trabajos sobre la observación de glaciares en los Andes a partir de datos de multi misiones satelitales. Luego fue el turno de Mathias Vuille del Department of Atmospheric & Environmental Sciences, University of Albany, State of New York, EEUU, quien presentó sus investigaciones sobre los impactos del cambio climático en la criósfera tropical andina. A continuación, fue el turno de Lucas Ruiz de IANIGLA-CONICET, Mendoza, Argentina, quien dio una introducción al conocimiento de la criósfera en los Andes, los vacíos de investigación y los temas estratégicos que deberán abordarse a futuro, y finalmente, presentó María Gabriela Lenzano también de IANIGLA-CONICET, Mendoza, Argentina, quien conferenció sobre los desafíos glaciológicos actuales en los Andes australes de Sudamérica.

Los temas tratados en la mesa son de gran importancia no solo para la comunidad científica especializada que presenció la discusión, sino que, para la sociedad en su conjunto, tal como ha quedado demostrado en la reciente reunión de la COP 26 llevada a cabo en Glasgow a principios de noviembre del presente, donde uno de los ejes más relevantes fue analizado en el Pabellón de la Criósfera. Allí se discutieron los impactos del cambio climático en la nieve, Antártica y Groenlandia, así como en los glaciares de montaña del planeta, entre los que destacan los cerca de 42,300 glaciares existentes en Sudamérica que poseen un área de 31,173 km<sup>2</sup> (Rivera et al., 2016).

En la mesa redonda quedó claro que los glaciares de Sudamérica están experimentando pérdidas de masa a una de las tasas más altas del planeta, tal como explicó Matthias Braun. En su presentación demostró con datos recientes que los balances de masa de la gran mayoría de los glaciares sudamericanos son negativos y que las consecuencias de este proceso ya se están sintiendo, en especial en términos de disponibilidad de agua de fusión glacial y en términos de riesgos naturales asociados. El énfasis de su presentación fue mostrar datos recientes destacando la pérdida de más de 19 Gt por año de hielo debido a adelgazamiento de glaciares de los Andes entre el año 2000 y el 2011-15, donde el 83% provenía de los campos de hielo patagónicos (Braun et al., 2019). Para enfrentar esta problemática planteó algunos desafíos científicos de gran

relevancia, en particular, la necesidad de modelar en forma más precisa y certera los cambios futuros. Para ello, Matthias ha focalizado sus proyectos recientes en el análisis de grandes volúmenes de datos de origen satelital para el estudio de las causas de los cambios glaciares recientes y sus posibles consecuencias. Uno de los ejemplos que mostró de este gran esfuerzo es la generación de una página web (<http://retreat.geographie.uni-erlangen.de>) que permite el cálculo en tiempo real de velocidades del hielo para numerosas regiones del planeta, incluidos los glaciares de Patagonia. Los resultados pueden visualizarse en pantalla o bajarse para análisis sin restricción, constituyéndose en un inigualable aporte a toda la comunidad científica internacional.

En la siguiente exposición de la mesa redonda Mathias Vuille habló desde una perspectiva climatológica sobre los glaciares de los Andes tropicales que van desde Colombia hasta Bolivia y el Norte de Chile analizando las causas de los cambios presentes y las posibles proyecciones de sus cambios. Esos cuerpos de hielo tienen en términos relativos poca importancia por su escasa contribución potencial al aumento global del nivel del mar, pero están en una región muy diversa donde hay una relación muy particular de la sociedad con la Cordillera Andina. Los glaciares de esta región han experimentado fuertes pérdidas volumétricas durante el siglo XX y en lo que va del XXI, debido en gran medida a que los Andes tropicales han experimentado un calentamiento de 0.13°C por década desde 1950, lo que se espera se exacerbe en todos los escenarios de cambio climático futuros (Vuille et al., 2017). Sin embargo, explicó que no todos los Andes tropicales se calentarán a las mismas tasas, siendo las zonas ubicadas a mayores altitudes las que experimentarán aumentos más fuertes de temperatura, lo que tendrá un impacto directo en los glaciares que se ubican sobre 4500 m de altura y cuyas líneas de equilibrio son altamente sensibles a la altura del punto de congelación. Los glaciares tropicales son muy importantes para las comunidades Alto Andinas, porque usan en forma creciente las aguas provenientes de glaciares, se ven afectadas por los crecientes riesgos asociados a la recesión de glaciares y porque tienen un sistema de creencias que se ven lesionadas por la deglaciación en curso. Por lo anterior, terminó su alocución enfatizando que el estudio del hielo tiene relevancias medioambientales, económicas e incluso culturales, las que hay que abordar en forma integrada.

Luego fue el turno de Lucas Ruiz quien expuso sobre el estado de la criósfera en los Andes con énfasis en Argentina, donde recientemente se terminó el inventario de sus glaciares y cuyos resultados pueden ser analizados en Zalazar et al., (2020). En su presentación mostró los avances recientes en investigación glaciológica en Argentina, en especial los estudios de balance de masa y cambios volumétricos, no solo de glaciares descubiertos, sino que también de los de escombro, donde se dan particularidades que requieren estudios más detallados, en especial porque tienen una mayor resiliencia a los cambios climáticos en curso. Este tipo de glaciares, tanto los de origen periglacial o glacial, han adquirido una mayor relevancia en la última década por el aporte que tienen a los caudales de los ríos, en especial en zonas áridas y semiáridas, donde el agua de fusión es muy relevante, por lo que su estudio ha adquirido creciente interés. Terminó su exposición relevando la importancia de modelar de mejor forma y menores incertidumbres, las proyecciones de cambios glaciares en respuesta a los distintos escenarios de cambios climáticos.

La última exposición de la mesa redonda fue de María Gabriela Lenzano que disertó sobre los desafíos glaciológicos actuales en los Andes Australes, particularmente en el Campo de Hielo Patagónico Sur (CHPS), la mayor masa de hielo continua del continente sudamericano, donde ha trabajado especialmente en los glaciares desprendentes de la cuenca del río Santa Cruz. El Campo de Hielo Sur es probablemente la zona englaciada más estudiada del continente con decenas de trabajos desde 1899 con casi 300 autores que han investigado la zona según explicó, siendo las últimas dos décadas las que concentran el mayor número de estudios. Resaltó, sin embargo, que solo el 7% de todos los autores de los trabajos más relevantes en la zona han tenido participación de mujeres, la mayor parte de las cuales se han incorporado en años recientes. Mostró que los estudios han pasado de tener carácter exploratorio, luego de escala local hasta la actualidad donde

los trabajos tienen carácter más regional, utilizando sensores remotos satelitales combinados con mediciones directas en terreno y modelación. Considerando más de 10 trabajos recientes en el Campo de Hielo, hizo una síntesis de las pérdidas de hielo, que muestran en primer lugar, una heterogénea distribución espacial de los cambios de elevación, con zonas de engrosamiento (pío XI), otras estables, pleateaux del Europa) y otras zonas con fuertes pérdidas (mitad norte, sector oriental del CHPS en el parque Nacional Los Glaciares de Argentina y parque Nacional Torres del Paine en Chile. Destacó el rol del desprendimiento de témpanos (*calving* en literatura inglesa) que en la mayor parte de los casos, ha acelerado las pérdidas de masa en aquellos glaciares que terminan en lagos. Para estudiar esta zona, Gabriela describió los trabajos que han realizado en el glaciar Viedma, Upsala y Perito Moreno, donde ha instalado estaciones GPS, cámaras fotográficas y numerosos sensores para medir los cuerpos de hielo de la zona en forma integrada (Lenzano et al., 2018).

A continuación, se dio una interesante discusión a partir de las preguntas de los asistentes y los comentarios entre los panelistas, todos los cuales apuntaron a los desafíos futuros de investigación en la zona. Quedó claro que los glaciares son relevantes no solo para la región, sino que para todo el planeta, en especial lo que ocurre en Patagonia, donde los aporte al nivel del mar global son mayores al que podría esperarse por el volumen de hielo allí existente. Esto implica que, entre las mayores urgencias detectadas, está la necesidad de integrar y complementar los esfuerzos científicos para un mejor entendimiento de estas respuestas, la existencia de anomalías y las proyecciones futuras de la zona. Hubo consenso que el abordaje más relevante es el de estudios regionales, basado en grandes cantidades de datos de origen satelital, todo lo cual permitirá un mejoramiento de la capacidad de modelación de cambios actuales y futuros. Quedo claro también, que estos esfuerzos de modelación no servirán si no hay una complementariedad con trabajos de validación y calibración con datos en terreno, cuya captura posee una difícil logística y requiere personal especializado que es difícil de encontrar y formar, en especial de mujeres y minorías étnicas y culturales. Por encima de todo lo anterior, el problema es la inexistencia de infraestructura de apoyo a la investigación en las zonas englaciadas, la pobre red de estaciones de medición en las proximidades de los glaciares y la nula existencia de estaciones en el hielo. Para integrar la modelación y la validación, es necesaria una aproximación multiescala y multidisciplinaria, que mejore las líneas de base, haga estudios de procesos con mayores niveles de certidumbre, de acceso libre a los datos generados y permita abordar todos los servicios ecosistémicos que proveen los glaciares (Rivera et al., 2021).

En síntesis, la mesa redonda fue una excelente oportunidad de escuchar a algunos de los mejores científicos trabajando en la criósfera de Sudamérica. Todos abogaron por más estudios, sinergismo y colaboración entre los grupos de cada país y una mayor colaboración internacional. Para ello, la búsqueda de financiamiento nacional e internacional debe intensificarse, compartiendo objetivos, combinando logísticas e incorporando nuevas generaciones de científicos interesados en estas materias.

En pocas palabras, fue una gran reunión¡¡

## Referencias

Braun, M. H., Ph. Malz, Ch. Sommer, D. Farías-Barahona, T. Sauter, G. Casassa, A. Sorucco, P. Skvarca and T. C. Seehaus (2019). Constraining glacier elevation and mass changes in South America. *Nature Climate Change* 9, 130-136.

Lenzano, M.G., E. Lannutti, C. Toth, A. Rivera and L. Lenzano (2018). Detecting Glacier Surface Motion by Optical Flow. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing Journal (PE&RS)* 84(1): 33-42.

Rivera, A., F. Bown, F. Napoleoni, C. Muñoz & M. Vuille (2016). Balance de masa glaciar. Ediciones CECs, Valdivia, Chile, 203 pp.

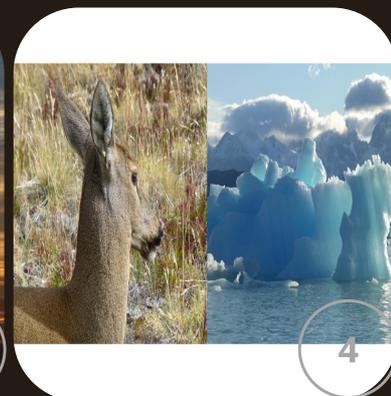
Rivera A., J. C. Aravena, A. Urra and B. Reid (2021). Glaciares de la Patagonia Chilena y Consecuencias Medioambientales de sus Cambios. En: Castilla, J. C., Armesto, J. J., y Martínez-Harms, M. J. (Eds.). Conservación en la Patagonia chilena: evaluación del conocimiento, oportunidades y desafíos. Santiago, Chile: Ediciones Universidad Católica, Santiago de Chile, Capítulo 15, pp 473-491.

Vuille, M., M. Carey, C. Huggel, W. Buytaert, A. Rabatel, D. Jacobsen, A. Soruco, M Villacis, C. Yarleque, O. Elison-Timm, T. Condom, N. Salzmann and J.E. Sicart (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews* 176, 195-213.

Zalazar, L., L. Ferri, M. Castro, H. Gargantini, M. Gimenez, P. Pitte, L. Ruiz, M. Masiokas, G. Costa and R. Villalba (2020). Spatial distribution and characteristics of Andean ice masses in Argentina: Results from the first National Glacier Inventory. *Journal of Glaciology* 66(260), 938-949.

# I CONCURSO FOTOGRÁFICO CIENTÍFICO AAGG2021

## Fotografías ganadoras del certamen



1 AUTOR: **MARIA VIRGINIA MACKERN**  
TÍTULO: UNA MIRADA GEODESICA ENTRE ARGENTINA Y CHILE

2 AUTOR: **MARÍA BONGIOVANNI**  
TÍTULO: LÍNEA DE MEDICIÓN DE GEOELÉCTRICA .CORDOBA

3 AUTOR: **TOMAS BARRIENTOS**  
TÍTULO: AMANECER CON DESFILE DE NUBES EN NIVELES ALTOS DE LA ATMÓSFERA

4 AUTOR: **ESTEBAN LANNUTTI**  
TÍTULO: HUEMUL Y GLACIAR

5 AUTOR: **MIGUEL ALBERTO JAULAR**  
TÍTULO: FAMATINA CUIDEMOS EL RECURSO

6 AUTOR: **ABELARDO ROMERO**  
TÍTULO: LAGO VIEDMA

7 AUTOR: **NICOLÁS REZZANO**  
TÍTULO: VOLCÁN ALUMBRERA. ANTOFAGASTA. CATAMARCA

8 AUTOR: **CRISTIAN DANIEL VILLARROEL**  
TÍTULO: GLACIAR DE ESCOMBRO EL GIGANTE

9 AUTOR: **CARLOS LOPEZ ANGULO**  
TÍTULO: POSTAL MENDOCINA. VOLCÁN MAIPO

10 AUTOR: **HERNÁN ALVIS ROJAS**  
TÍTULO: MIRANDO A LOS ANDES" ESTACIÓN DE ALTURA CARLOS ULRICO CESCO, BARREAL

**ASOCIACIÓN ARGENTINA DE GEOFÍSICOS Y GEODESTAS**

Avenida Cabildo 381 (CP 1426). Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Argentina

<http://www.aagg.org.ar>