

## Introducción

La región de nuestra atmósfera que presenta una población significativa de iones y electrones se denomina "Ionósfera". Se estima que se ubica entre 80 y 1000 km de altura. La presencia de electrones libres en esta región es muy importante para las telecomunicaciones, la operación de satélites y la geolocalización. Una de las principales fuentes de ionización (proceso en el que las especies neutras se dividen en iones y electrones) es la radiación solar, por lo que un eclipse solar se convierte en un laboratorio natural único para estudiar la ionósfera y comprender cómo el cubrimiento parcial del Sol impacta en los procesos que en ella ocurren, así como a qué tasa los iones y electrones colisionan, formando nuevamente especies neutras. Los años 2019 y 2020 ocurrieron dos eclipses solares, ambos pasando por América del Sur y su totalidad por Chile, por lo que dos campañas fueron realizadas para hacer mediciones de un radar de incidencia vertical (ionosonda) en La Serena y Chillán, respectivamente. Se describen similitudes y diferencias entre ambos eclipses, principalmente relacionadas con la altura, la hora de ocurrencia del evento y la distancia con respecto al ecuador magnético.

## Objetivos

- Comprender las modificaciones que sufre la ionósfera durante un eclipse solar.
- Analizar los cambios con respecto a un día sin la influencia de la sombra producida por la Luna.
- Entender los fenómenos físicos que explican los cambios observados.

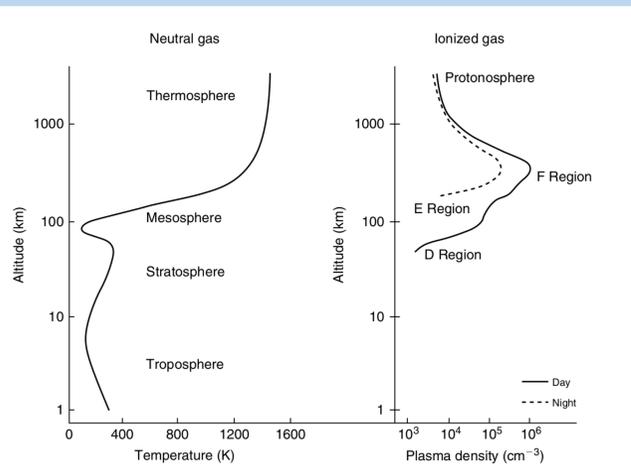


Figura 1: Ubicación de la ionósfera y su distribución vertical. Se encuentra entre la mesósfera y la termosfera. Extraído de *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*, M. Kelley (2009)

	Hora de inicio (UT)	Hora de máximo (UT)	Hora de término (UT)	% de oscuridad en lugar de medición (300 km)
Eclipse 2019	19.37	20.73	21.77	96.4
Eclipse 2020	14.61	16.03	17.55	95

## Metodología y mediciones

Dos eclipses ocurrieron el 2 de julio de 2019 y el 14 de diciembre de 2020, ambos con su totalidad pasando sobre Chile. Las horas de inicio, máximo y término del eclipse a alturas ionosféricas (300 km) son presentados en la Tabla 1.

Para ambas campañas, se utilizó una ionosonda IPS-42 (Figura 2), operando cada 15 minutos en los días sin eclipse y con una mayor frecuencia de muestreo durante el paso de la sombra. Esta fue instalada en dos estaciones ionosféricas que poseen una antena delta doble en arreglo ortogonal, montadas en un mástil de 30 metros. Para el eclipse de 2019, la estación Juan Soldado (J2P; 29.9° S, 288.7° E) fue escogida para medir, mientras que para el de 2020, se optó por la estación de Chillán en el Fundo Las Mariposas (J3P; 36.6° S, 288.0° E), ambas cercanas a la totalidad. Las imágenes de salida, llamadas ionograma, fueron sometidas a un análisis visual para obtener los parámetros ionosféricos (escalado de ionogramas) usando un software dedicado para ello. Los parámetros escogidos corresponden a la frecuencia de penetración de las capas de la ionósfera (foE, foF1 y foF2), proporcionales a su concentración electrónica. Estos valores numéricos obtenidos durante el evento fueron comparados a una "ionósfera de referencia", obtenida por el cálculo de la mediana de los días donde no hay actividad geomagnética y/o usando el modelo *International Reference Ionosphere* (IRI).



Figura 2: Ionosonda IPS 42 usada en ambos eventos.

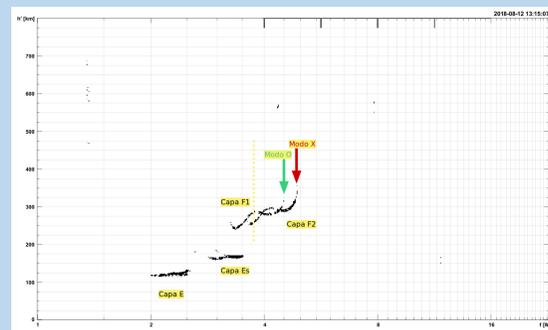


Figura 3: Ejemplo del producto de un radar de incidencia vertical, el ionograma. Se indican ejemplos de lo que se puede observar en él.

Tabla 1: Horarios y porcentajes de oscuridad en los lugares de medición.

## Resultados

- Se observó en ambos eclipses una depresión de foE y foF1 (rombos azules y cuadrados verdes, Figuras 4 y 5), lo cual ocurre al mismo tiempo que la sombra del eclipse llega al punto de medición, lo cual se ha observado en otros eclipses (ej: Reinisch et al., 2017). En el caso de 2019, no se observa una recuperación, debido a que el evento ocurre cerca de la puesta de sol; en el evento de 2020, que ocurre cerca del mediodía local, la recuperación comienza posterior al punto de máxima oscuridad, llegando a los valores de la ionósfera de referencia.
- Por el contrario, en ambos eclipses se observa que la foF2 (círculos rojos) responde de forma poco clara. Esto se debe a que otros procesos ocurren en esta región. En el caso del 2019, La Serena (inclinación 30°) se encuentra cerca del ecuador magnético (inclinación 0°), por lo que hay un mayor impacto del denominado Efecto Fuente, enmascarando la disminución (Bravo et al., 2020). Para el eclipse de 2020, el impacto es más apreciable, posiblemente por estar más lejos de estos procesos (inclinación 38°), aunque también existe un retardo de la respuesta.

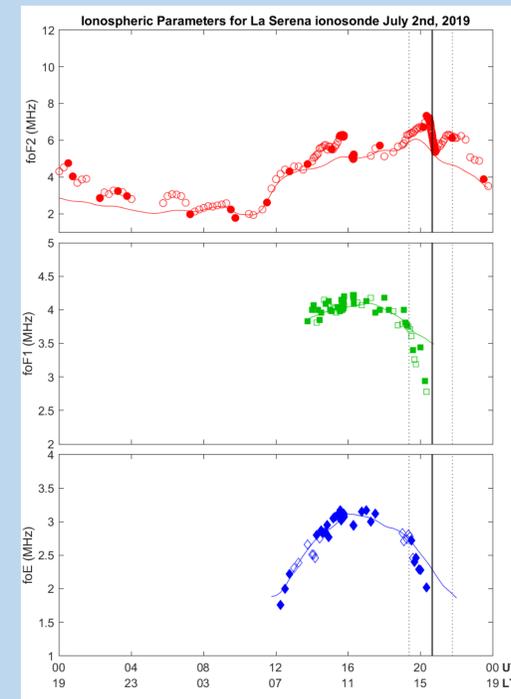


Figura 4: Variación de parámetros ionosféricos durante el eclipse del 2 de julio de 2019. Los símbolos corresponden a los valores del evento (relleno indica valor dudoso), la línea de cada color corresponde a la curva de referencia, las líneas verticales punteadas corresponden al inicio y al término del evento y las verticales continuas al máximo de oscuridad.

## Conclusiones

- El eclipse de 2020 presenta una respuesta más clara en regiones bajas por ser cercano al mediodía.
- Las regiones E y F1 presentan una respuesta inmediata al paso de la sombra, debido a su relación directa con la radiación ultravioleta, mientras que la región F2 responde con retardo.
- Procesos como el Efecto Fuente tuvieron un rol más predominante en el eclipse de 2019, debido a su cercanía con el ecuador.

## Referencias

- Bravo, M., Martínez-Ledesma, M., Foppiano, A., Urra, B., Ovalle, E., Villalobos, C., et al. (2020). First report of an eclipse from Chilean ionosonde observations: Comparison with total electron content estimations and the modeled maximum electron concentration and its height. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125, e2020JA027923. <https://doi.org/10.1029/2020JA027923>
- Reinisch, B. W., Dandenault, P. B., Galkin, I. A., Hamel, R., & Richards, P. G. (2018). Investigation of the electron density variation during the 21 August 2017 solar eclipse. *Geophysical Research Letters*, 45, 1253– 1261. <https://doi.org/10.1002/2017GL076572>

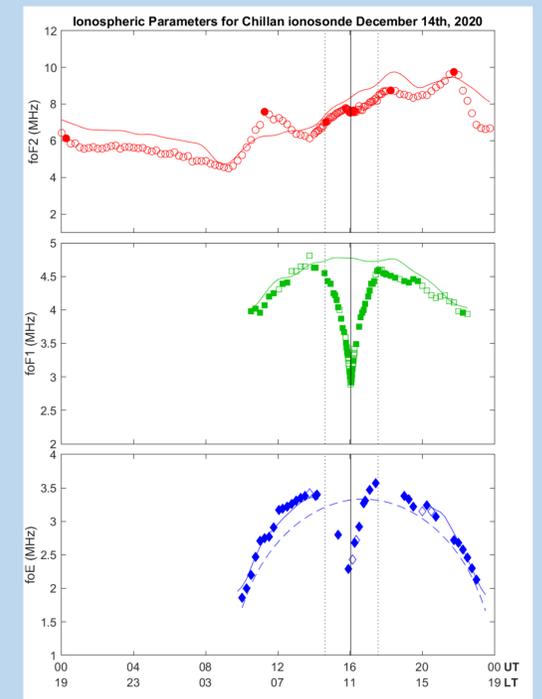


Figura 5: Variación de parámetros ionosféricos durante el eclipse del 14 de diciembre de 2020. Se utiliza la misma simbología de la figura 4. Para compensar la falta de datos de la referencia de foE (figura de abajo), se usó el modelo IRI (línea segmentada)

## Agradecimientos

Agradecemos a las universidades de La Serena y Adventista de Chile por permitir la operación de las estaciones ionosféricas de este trabajo en sus dependencias. También agradecemos a sus operadores por la mantención del equipo y antenas.