

OZONOSONDEOS EN LA ESTACIÓN GAW-USHUAIA

Nota Técnica SMN 2024-185

**Gerardo Carbajal Benitez¹, Lino Condorí¹, Emiliano Petruzzi¹
y Gonzalo Gambarte¹.**

¹ *Servicio Meteorológico Nacional, DNCIPS, DCMC, Argentina*

Diciembre 2024

Información sobre Copyright

Este reporte ha sido producido por empleados del Servicio Meteorológico Nacional con el fin de documentar sus actividades de investigación y desarrollo. El presente trabajo ha tenido cierto nivel de revisión por otros miembros de la institución, pero ninguno de los resultados o juicios expresados aquí presuponen un aval implícito o explícito del Servicio Meteorológico Nacional.

La información aquí presentada puede ser reproducida a condición que la fuente sea adecuadamente citada.

Resumen

Desde el año 2008 y hasta el 2024, se han realizado campañas continuas de ozonosondeos en la Estación GAW-Ushuaia, las cuales iniciaron a través de un convenio entre la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), El Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial (INTA), ambos de España, conjuntamente con la Provincia de Tierra del Fuego y El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina. Este programa ha ido disminuyendo su frecuencia anual, debido a que ya en el 2017 tanto el AEMET como el INTA no pudieron aportar los insumos correspondientes y el SMN asume totalmente la responsabilidad. Los lanzamientos se realizan conforme a normas y procedimientos recomendados por el grupo de expertos de la GAW/WMO. El peso total del paquete ozonosonda con la radiosonda es de aproximadamente 1,5 kg, por lo que puede volar en un globo de 900 g que suele proporcionar la sustentación suficiente para alcanzar entre 30 y 35 km de altura (~10 a 0 hPa), aunque un buen lanzamiento se considera si alcanza a superar los 30 km de altura en Ushuaia. La velocidad de ascenso es ~5 m/s, mientras que, el tiempo de respuesta puede ser entre 18 a 28 s, de modo que la resolución vertical efectiva del perfil de ozono es de ~100 a 150 m. La ozonosonda ECC se basa en el método electroquímico de Komhyr, que es un método químico cuantitativo denominado "titulación" del ozono en una solución de detección de yoduro de potasio (KI) según la reacción Reducción-Oxidación (REDOX). El ozono medido por la sonda se considera como Ozono integrado y posteriormente, a través de un modelo o climatología al cual se denomina ozono residual, se calcula el ozono total. Para todo sistema de medición es necesario cumplir con la adecuada calibración, cálculo de la incertidumbre y su trazabilidad, posteriormente con la verificación de los datos obtenidos, particularmente usamos factor de normalización (NT). Los perfiles obtenidos nos ayudan principalmente a validar instrumentos montados en plataformas satelitales, así como modelos de ozono y radiación UV. El objetivo de este trabajo es complementar, más a detalle, la primera nota técnica implementada en la GAW-Ushuaia, así como iniciar una primera evaluación a los ozonosondeos históricos en dicha estación, para posteriormente en las incertidumbres asociadas a los perfiles.

Abstract

Since 2008 and until 2024, continuous ozonesonde campaigns have been conducted at the GAW-Ushuaia Station. This initiative began through an agreement between the State Meteorological Agency (AEMET) and the National Institute of Aerospace Technology (INTA), both from Spain, in collaboration with the Province of Tierra del Fuego and the National Meteorological Service (SMN) of Argentina. Over the years, the frequency of these campaigns has decreased, particularly since 2017 when AEMET and INTA were unable to provide the necessary support, leaving SMN to assume full responsibility for the launches. The launches adhere to the standards and procedures recommended by the GAW/WMO group of experts. The total weight of the ozonesonde package, including the radiosonde, is approximately 1.5 kg. This weight allows it to be deployed with a 900 g balloon, which typically provides enough lift to reach altitudes between 30 and 35 km (approximately 10 to 0 hPa). A successful launch is defined as reaching an altitude above 30 km in Ushuaia. The ascent speed is around 5 m/s, with a response time ranging from 18 to 28 seconds, resulting in an effective vertical resolution for the ozone profile of about 100 to 150 meters. The ECC ozonesonde employs the Komhyr electrochemical method, a quantitative chemical method known as "titration," which detects ozone in a potassium iodide (KI) solution through a Reduction-Oxidation (REDOX) reaction. The ozone measured by the probe is regarded as integrated ozone. Subsequently, total ozone is calculated using a model or climatological data referred to as residual ozone. To ensure accurate measurements across all systems, it is essential to follow proper calibration procedures, calculate uncertainties, maintain traceability, and verify the obtained data, particularly by using the normalization factor (NT). The profiles obtained from these measurements are crucial for validating instruments mounted on satellite platforms, as well as for refining ozone and UV radiation models. The objective of this work is to provide a more detailed complement to the initial technical note implemented at GAW-Ushuaia and to initiate the first evaluation of the historical ozone soundings at this station, along with an assessment of the uncertainties associated with these profiles.

Palabras clave: Ozone soundings, GAW-Ushuaia, profiles, evaluations, applications.

Citar como:

Carbajal Benítez G., Condorí L., Petruzzi E. y Gambarte G., 2024: Ozonosondeos en la Estación GAW-Ushuaia. Nota Técnica SMN 2024-185

1. INTRODUCCIÓN

Los radiosondeos a los que se acopla una celda electroquímica han sido una herramienta fundamental para monitorear los cambios en la distribución vertical del ozono. Una red de mediciones de perfiles a partir de sondas transportadas por globos ligeros, ha estado en funcionamiento desde fines de la década de 1960, una década antes de que comenzaran las observaciones satelitales cuasi continuas. La alta resolución vertical de las ozonosondas permite una medición precisa de fuertes gradientes de ozono y estructuras de escala fina aparentes en la alta troposfera y la baja estratosfera (Siglas en inglés, UTLS). La celda electroquímica consta de dos celdas electrolíticas, cada una de las cuales contiene una solución de yoduro de potasio (KI). A través de una bomba que succiona aire ambiente, entra a dichas celdas y éstas perturban el equilibrio inicial y fluye una corriente entre ambas celdas. Esta corriente se mide y se convierte en concentraciones de ozono atmosférico. Sin embargo, la calidad de la serie temporal de la sonda de ozono es problemática, especialmente cuando los datos del UTLS se analizan para tendencias a largo plazo, porque el ozono es muy variable y la relación señal-ruido de las sondas es pequeña (Cupeiro, 2013).

Se han desarrollado y utilizado diferentes sensores en los distintos sitios de lanzamiento (sonda Brewer-Mast, BM) por (Brewer y Milford, 1960), sonda de celda de concentración electroquímica (ECC) (Komhyr, 1969), sonda japonesa de carbono de yodo (Kobayashi y Toyama, 1966), entre otras. Todas las cuales muestran diferencias sistemáticas (Smit y Kley, 1998; Smit et al., 2007). Las campañas de intercomparación entre ozonosondas, han demostrado que, las sondas BM son menos sensibles a los aspectos de fabricación y a la preparación previa al vuelo. Las sondas ECC también muestran menos variabilidad de una sonda a otra. La coexistencia de diferentes sensores, fabricantes de instrumentos y métodos de procesamiento de datos requiere, por tanto, comparaciones exhaustivas de las ozonosondas con diferentes sistemas de monitorización del ozono para evitar datos de mala calidad y detectar rupturas en las series temporales.

La información sobre ozono obtenido mediante sondas transportadas por globos, está restringida a un número limitado de sitios de lanzamiento. Otro inconveniente es que, las estaciones de ozonosonda están restringidas a las regiones continentales. Si bien la cobertura global de los satélites es claramente una ventaja, la confiabilidad de las observaciones de ozono y gases traza en la troposfera libre y la UTLS es limitada. En la actualidad, se están realizando esfuerzos considerables para mejorar los algoritmos de recuperación de datos por satélite para obtener datos de mayor calidad y representatividad en la UTLS.

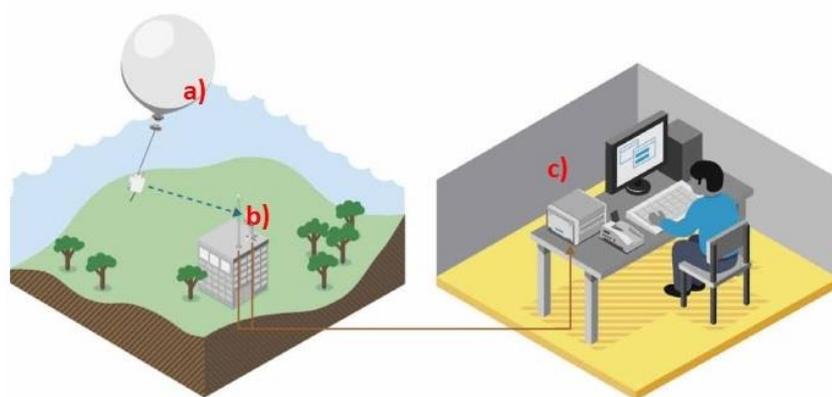
El uso de ozonosondas transportadas por globos es una técnica bien establecida para adquirir datos para detectar cambios a largo plazo del ozono hasta una altitud aproximada de 35 km (Logan, 1994, OMM, 2003, OMM, 2007) y para validar las observaciones satelitales (McPeters et al., 2007, Jiang et al., 2007, Schoeberl et al., 2007, Osterman et al., 2008). Aunque los satélites realizan mediciones rutinarias de los perfiles de ozono estratosférico, los sondeos y el lidar son las únicas técnicas que pueden proporcionar observaciones precisas y con resolución vertical del ozono en toda la troposfera libre y hasta la región de la tropopausa (los detalles de los instrumentos se analizan en la Sección 2) y la estratosfera inferior (p. ej., SPARC-IOC-GAW, 1998). El lidar es más costoso, técnicamente exigente y no es práctico de implementar en docenas de estaciones en todo el mundo. Una ventaja de las ozonosondas es que, a diferencia del lidar y muchos sistemas de observación por satélite, no se ven afectadas por las nubes y pueden resolver fuertes gradientes en la UT/LS (troposfera superior/estratosfera inferior), al tiempo que localizan con precisión la tropopausa térmica.

Recientemente, con los centros de predicción meteorológica que incorporan la química en los pronósticos operativos, existe interés en asimilar los perfiles de ozono (por ejemplo, Derber y Wu, 1998, Riishojgaard et al., 2000, Stajner et al., 2001, Dethof y Holm, 2004, Flemming et al., 2010) para predecir y evaluar los resultados de los modelos. En este sentido, los sondeos nocturnos, que resuelven la contaminación residual de días anteriores, parecen ser indispensables (Morris et al., 2009, Yorks et al., 2009).

Esta nota técnica tiene por objetivo mostrar algunos de los resultados de los datos obtenidos durante la temporada de monitoreo en la estación VAG-Ushuaia y La estación Antártica Belgrano II.

2. MARCO TEÓRICO DE LAS OZONOSONDAS

La configuración de un sistema típico de ozonosondeo se muestra en la Figura 1. Durante el funcionamiento normal de vuelo, éstas se acoplan mediante una electrónica de interfaz a radiosondas meteorológicas estándar, para la transmisión en tiempo real de la corriente medida del sensor de ozono, la temperatura de bombeo, además de los parámetros aerológicos estándar: presión, temperatura, humedad y posición determinada por GPS (Sistema de Posicionamiento Global), incluida la presión GPS derivada, más la dirección y velocidad del viento. Las capacidades de detección de viento de las radiosondas modernas se basan en la navegación por satélite GPS [p. ej., Dabberdt et al., 2014; Guía de instrumentos y métodos de observación (WMO-No.8 Report, 2018)]. El peso total del paquete ozonosonda con la radiosonda es de aproximadamente 1,5 kg, por lo que puede volar en un globo de 900 g que suele proporcionar la sustentación suficiente para alcanzar entre 30 y 35 km de altura (~10 a 0 hPa). Normalmente, los datos se toman durante el ascenso antes de explosión del globo a una velocidad de ascenso típica de ~5 m/s; algunas estaciones también registran datos de descenso, aunque las incertidumbres y la resolución de altitud difieren de la medición del ascenso. El tiempo de respuesta inherente de la ozonosonda es de 18 a 28 s, de modo que la resolución vertical efectiva del perfil de ozono es de ~100 a 150 m.



a) Ozono sonda:

- Globo,
- Celda de Concentración Electroquímica (con interface de datos),
- Radio sonda (con Radiotransmisor)

b) Recepción:

- Antena,
- Radio receptor (Digicora),
- Modem.

c) Control:

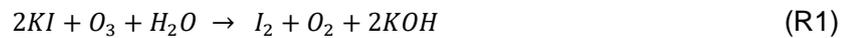
- Computadora,
- Almacenamiento,

Figura 1: Configuración de un sistema de ozonosondeo. Fuente Vaisala.

2.1 Celda de Concentración Electroquímica

Una bomba en miniatura impulsa el aire ambiente a las celdas que sus paredes son de material inerte, llenas de soluciones de yoduro de potasio (KI) en diferentes concentraciones (Fig. 2). La medición del ozono se basa en una reacción química entre las moléculas de O_3 del aire y esas soluciones de KI. La transformación química genera una corriente eléctrica proporcional a la cantidad de ozono, lo que explica el nombre de celda de concentración electroquímica (ECC).

La ozonosonda ECC se basa en el método electroquímico de (Komhyr, 1969). En este sentido la medición del ozono se basa en un método químico cuantitativo denominado "titulación" del ozono en una solución de detección de yoduro de potasio (KI) según la reacción Reducción-Oxidación (redox). Tal como se muestra en la reacción química (R1):



La ECC consta de dos semiceldas, hechas de teflón o plástico moldeado, que sirven como cámaras de cátodo y ánodo. Ambas, contienen electrodos de malla de platino, cada uno de ellos sumergido en una solución de KI de diferentes concentraciones. Las dos cámaras están conectadas entre sí por un puente de iones (longitud ~0,5 cm y diámetro ~0,2 cm) para proporcionar una vía de iones y evitar la mezcla de los electrolitos entre el cátodo y el ánodo. El tamaño de la celda es aproximado de 8 x 8 x 14 cm, está encerrado en una caja de poliestireno ($\approx 19 \times 19 \times 25$ cm).

Las semiceldas de la ECC, una catódica que contiene 3 ml de solución de KI diluida y una celda anódica que contiene 1,5 ml de KI saturado (Fig. 2). Una bomba de pistón de teflón que succiona aire del ambiente que contiene ozono, hacia la solución de la celda catódica, esto produce inmediatamente yodo (I_2). La corriente fluye a través de la celda mediante un circuito externo, reduciendo el yodo nuevamente a yoduro ($2I^-$), ver la reacción química (R2) siguiente:



La corriente de la celda es teóricamente directamente proporcional a la cantidad de ozono (una molécula de ozono da como resultado el flujo de 2 electrones). La presión parcial de ozono se calcula luego mediante la siguiente ecuación (Ec1) (Johnson et al., 2001):

$$P_{O_3} = 4,307 \times 10^{-4} (I - I_{BG}) T_{bomba} T_{100} PCF \quad (Ec1)$$

Donde:

P_{O_3} = Presión Parcial de Ozono (Mili pascales).

$4,307 \times 10^{-4}$ = Constante de conversión de Mili pascales a concentración de ozono.

I = Corriente de la celda (micro Amper) ~ 5 μ Amps a ozono pico en la estratosfera.

I_{BG} = Corriente de fondo en la celda ~ < 0.03 μ Amps en el filtro de ozono cero.

T_{bomba} = Temperatura de la bomba en la celda (K).

T_{100} = Caudal de la bomba: 100 cm³/segundo.

PCF = Factor de corrección para la eficiencia del caudal de la bomba.

Actualmente, en varias estaciones se utilizan varias técnicas para preparar la solución de detección. Además, también se utilizan varios factores de corrección de la eficiencia de la bomba (PCF). El PCF es importante para la parte estratosférica del perfil o cuando se integra el perfil para obtener una cantidad total de ozono en la columna. Se logra una exactitud y precisión de $\pm 5\%$ para las mediciones de ozono en la troposfera y la estratosfera utilizando los protocolos descritos aquí.

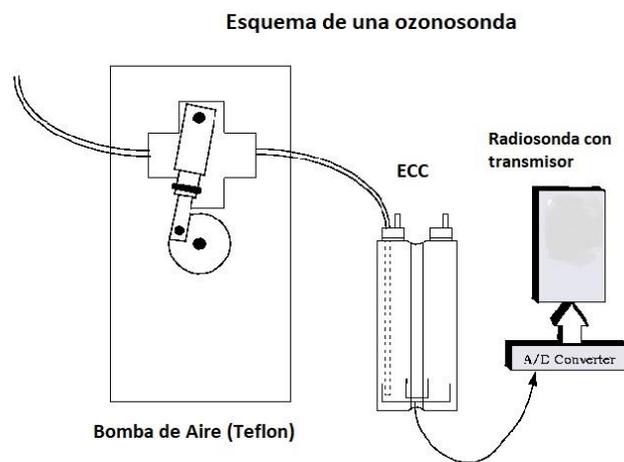


Figura 2: Esquema que muestra la bomba de ozonosonda, la celda electroquímica y la interfaz con la radiosonda.

2.2 Radiosondas

A finales de los años '60 y durante los años '80, el instrumento de ozonosonda se acopló a la radiosonda utilizando técnicas de datos analógicos, y el canal de humedad de la radiosonda se utilizó para la transmisión de la señal de ozono. Se emplearon radioteodolitos o sistemas terrestres de detección de viento como Loran-C u Omega para medir la velocidad y dirección del viento horizontal. Desde principios de los años '90, la introducción de interfaces electrónicas digitales entre la ozonosonda y la radiosonda ha permitido la medición simultánea de los diferentes parámetros y la radiosonda. Además, desde aproximadamente 2010, las radiosondas modernas han empleado la navegación GPS para detectar en vuelo la posición 3-D, lo que produce una altitud GPS junto con la velocidad y dirección del viento horizontal. El uso de una interfaz de ozonosonda digital permite la medición simultánea de la corriente del sensor de ozono y la temperatura de la bomba, además de los parámetros aerológicos adicionales presión, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y dirección del viento. Todas las señales se digitalizan durante el vuelo y se transmiten como un flujo de datos codificados digitalmente a la estación terrestre para su posterior procesamiento. Las

radiosondas pueden funcionar en una banda de frecuencia de radio FM de 401–406 MHz o 1680 MHz, ambas reservadas para fines meteorológicos (WMO/GAW No. 268, 2021)

La interfaz permite realizar mediciones en vuelo de parámetros adicionales utilizados para monitorear el rendimiento de la ozonsonda, incluida la corriente del motor de la bomba y el voltaje de la batería. El procesamiento digital nos permite incluir automáticamente metadatos previos al vuelo, durante el vuelo y otros. Mediante el almacenamiento de todos los datos medidos (en bruto) junto con los metadatos esenciales, los datos de la sonda pueden, en principio, reprocesarse cuando sea necesario.

2.3 Factores que influyen en el rendimiento de las ozonsondas

Cada sondeo de ozono se realiza con un nuevo instrumento que debe caracterizarse antes del lanzamiento. La consistencia de los instrumentos en cuanto a su calidad y características, pero también la estandarización de los procedimientos operativos, es un requisito previo para asegurar mediciones de sonda consistentes. Varios parámetros instrumentales y de procedimiento, además de sus incertidumbres pueden tener una influencia sustancial en la calidad de las mediciones de ozonsonda. Los cambios de estos parámetros a través de cambios en el instrumento, procedimientos operativos o condiciones ambientales pueden tener un impacto significativo en las tendencias de ozono a largo plazo derivadas de las mediciones de ozonsonda. A partir de intercomparaciones entre diferentes estaciones de sondeo que utilizan el mismo tipo de sonda, se ha demostrado que las diferencias observadas se deben, en gran parte, a diferencias en los procedimientos de preparación y corrección aplicados en los diferentes sitios de lanzamiento (SPARC-IOCGAW, 1998, Smit et al., 2007).

Aunque el principio de funcionamiento de las sondas ECC sigue siendo el mismo (Komhyr, 1969), las ECC han sufrido varias modificaciones en cuanto a su instrumento y procedimientos desde que se fabricaron por primera vez. Estas variaciones y sus incertidumbres asociadas pueden tener efectos significativos en el rendimiento de la sonda, lo que genera incertidumbres en el análisis de tendencias (SPARC-IOC-GAW, 1998).

2.3.1 Incertidumbre del instrumental de la sonda

La presión parcial de ozono medida por el sensor electroquímico es una función de la corriente del sensor medida (I_M), la corriente de fondo (I_B), la eficiencia de conversión (η_C), la temperatura de la bomba de muestreo de gas (T_P) y el caudal volumétrico (Φ_P):

$$P_{O_3} = P_{O_3}(I_M, I_B, \eta_C, \Phi_P, T_P) \quad (\text{Ec2})$$

La incertidumbre instrumental del ECC para la medición del ozono, es una combinación de las contribuciones de las incertidumbres individuales de los distintos parámetros instrumentales enumerados anteriormente. Algunas de las contribuciones dependen de la presión del aire, de modo que la incertidumbre general de la medición del ozono será una función de la presión, es decir, de la altitud.

$$\frac{\Delta P_{O_3}}{P_{O_3}} = \sqrt{\frac{(\Delta I_M)^2 + (\Delta I_B)^2}{(I_M - I_B)^2} + \left[\frac{\Delta \eta_c}{\eta_c}\right]^2 + \left[\frac{\Delta \Phi_P}{\Phi_P}\right]^2 + \left[\frac{\Delta T_P}{T_P}\right]^2} \quad (\text{Ec3})$$

2.3.2 Eficiencia de conversión (η_c)

La eficiencia de conversión η_c incluye tanto la eficiencia de absorción de O_3 (α_{O_3}) de la fase gaseosa a la fase líquida de la solución de detección como la estequiometría de la conversión de O_3 en I_2 (S_{O_3/I_2}):

$$\eta_c = \alpha_{O_3} S_{O_3/I_2} \quad (\text{Ec4})$$

Normalmente, en la solución catódica de detección de KI a pH = 7, la estequiometría de la reacción de conversión de ozono en yodo es 1,00 con una incertidumbre de aproximadamente $\pm 0,03$ (Dietz et al., 1973), mientras que la eficiencia de absorción inicial de O_3 gaseoso en la solución de detección será 1,00 con una incertidumbre de $\pm 0,01$. Durante el funcionamiento normal, se supone que ambos parámetros son 1,00, de modo que la eficiencia de conversión también es 1,00. Sin embargo, una fuente de incertidumbre es que, en el curso de un sondeo, las incertidumbres de las características de la celda del sensor pueden aumentar, expresadas por:

$$\frac{\Delta \eta_c}{\eta_c} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \alpha_{O_3}}{\alpha_{O_3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S_{O_3/I_2}}{S_{O_3/I_2}}\right)^2} \quad (\text{Ec5})$$

Cierto porcentaje de la solución de detección se evapora a una velocidad que depende de la temperatura de la celda y de la presión ambiental encontrada durante el sondeo. Aunque esta evaporación reducirá la cantidad de líquido para la absorción de ozono gaseoso, la eficiencia de absorción no se ve afectada significativamente (Komhyr, 1971, Davies et al., 2000). A mayores altitudes, esta absorción se vuelve muy eficiente debido a una transferencia de masa mucho más rápida, es decir, la difusión de gas a presiones más bajas. Esto significa que la eficiencia de absorción se mantiene en 1,00, con una pequeña incertidumbre de menos del 1-2 % a lo largo de todo el perfil.

Para las sondas ECC, significa que debido a la evaporación, la concentración de la solución de detección aumenta, lo que puede mejorar la sensibilidad del sensor ECC y puede aumentar la incertidumbre del ozono medido (Johnson et al. 2002, Smit et al., 2007). Un aumento del factor de estequiometría S_{O_3/I_2} durante los sondeos, puede tener un impacto significativo en el rendimiento de la ozonsonda al introducir incertidumbres o sesgo sistemático en las mediciones, que pueden aumentar significativamente con la altitud (Boyd et al., 1998, Johnson et al., 2002, Smit et al., 2007).

Otra fuente potencial de incertidumbre es, la influencia de la contaminación atmosférica local, que puede tener un efecto perjudicial en la eficiencia de conversión, es decir, en el rendimiento del sensor. Las mediciones de ozono mediante un método KI, como el sensor de ozono electroquímico, son sensibles a las interferencias de los agentes oxidantes o reductores (Schenkel et al., 1982). Sin embargo, varios experimentos de laboratorio muestran que, normalmente, en el caso de un aire moderadamente contaminado, el dióxido de azufre (SO_2)

es el único gas traza que puede producir interferencias negativas significativas en las mediciones de ozono. Como agente reductor, el SO₂ convierte el yoduro producido a partir de la reacción ozono/yodo en yodo.

2.3.3 Corriente del sensor (I_M) y corriente de fondo (I_B)

La incertidumbre de la corriente medida del sensor (I_M) está determinada principalmente por la precisión de la medición de corriente realizada por la electrónica (convertidor de corriente (I) a voltaje (V)) de la placa de interfaz de datos de la sonda, de modo que para corrientes superiores a 1 μ A la incertidumbre de I_M es de aproximadamente ± 1 % del valor medido, mientras que para corrientes inferiores a 1 μ A la incertidumbre será de aproximadamente $\pm 0,01$ μ A.

Antes del lanzamiento del globo, se determina individualmente la corriente de fondo de cada ozonosonda. Las señales de fondo determinadas en la superficie suelen estar en el rango de 0,1-0,5 mPa de ozono equivalente. Por lo tanto, los sondeos de ozono son sensibles a los errores en la corrección de la señal de fondo, en regiones donde la concentración de ozono es baja, es decir, la troposfera superior. Dichos errores tienen el potencial de volverse grandes en caso de que la señal de fondo sea similar en magnitud a la señal de ozono. Esto es particularmente importante en los trópicos, pero también en las regiones polares en caso de un fuerte agotamiento del ozono estratosférico polar (Voemel y Díaz, 2010).

2.3.4 Caudal de la bomba (Φ_P)

El caudal volumétrico de la bomba de muestreo de gas de cada sonda, se mide individualmente en tierra antes del vuelo. El caudal de la bomba de la sonda se mide normalmente con un caudalímetro de burbuja en la salida de gas de la celda de detección. Antes de que el aire de muestreo pase a través de la solución de detección y entre en el caudalímetro de burbuja, normalmente está "no saturado": (HR < 100 %) o incluso generalmente "seco" (HR = 0 %). La evaporación del agua en la solución de detección o en el caudalímetro de burbuja aumenta el caudal real del aire que pasa a través de la bomba. Por lo tanto, el caudal medido debe corregirse para este "efecto de humectación" para obtener el caudal real de la bomba de acuerdo con las siguientes fórmulas:

$$\Phi_{\text{Bombeo actual}} = \Phi_{\text{medio}} \left[\left(\frac{P_{\text{Lab}} - \Delta P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{Lab}}} \right) \right] \quad (\text{Ec6})$$

$$\Delta P_{\text{H}_2\text{O}} = \left[1 - \frac{\text{HR}_{\text{Aire}}}{100} \right] P_{\text{H}_2\text{O sat } T_{\text{Lab}}} \quad (\text{Ec7})$$

$$\Phi_{\text{Bombeo actual}} = \Phi_{\text{medio}} \left[1 - \left[1 - \frac{\text{HR}_{\text{Aire}}}{100} \right] \frac{P_{\text{H}_2\text{O sat } (T_{\text{Lab}})}}{P_{\text{Lab}}} \right] \quad (\text{Ec8})$$

Donde:

Φ_{Medio} = Caudal medio de la bomba con flujómetro de burbuja [ml/min].

Φ_{Medio} = Caudal real de la bomba después de la corrección por "efecto humectante" [ml/min].

P_{Lab} = Presión del aire en el laboratorio [hPa].

T_{Lab} = Temperatura del aire en laboratorio [K]

$\Delta P_{H_2O}(T_{Lab})$ = Presión parcial del vapor de agua [hPa], contribución debido a la evaporación en la muestra de aire a T_{Lab} .

HR_{Air} = Humedad relativa de la muestra de aire [%]

$\Delta P_{H_2O,sat}(T_{Lab})$ = Presión de vapor de agua saturada a T_{Lab} [K] o T_{Lab} [°C]. Esta se puede calcular mediante varias formas empíricas como la de Magnus – Teten (Murray, 1997):

$$\text{Log}_{10}(\Delta P_{H_2O,sat}) = \frac{7.5 T_{Lab}}{T_{Lab} + 273.3} + 0.7858 \quad (\text{Ec9})$$

2.3.5 Temperatura de la muestra

Para corregir los cambios en el caudal de masa de aire que pasa por el sensor debido a los cambios de temperatura, la temperatura real de la bomba se mide en vuelo, ya sea dentro de la bomba o en el recinto del instrumento (caja de poliestireno). En el transcurso de un sondeo, la temperatura de la bomba puede disminuir típicamente entre 10 y 25 °C. Aunque en los sondeos modernos la temperatura se puede medir con una precisión mejor que 1-2 K, la ubicación del sensor de temperatura de la bomba puede seguir siendo una fuente adicional de incertidumbre. A partir de una serie de sondeos de campo ECC, O'Connor et al., (1998) demostraron que las temperaturas medidas dentro o fuera de la bomba pueden diferir significativamente, desde valores de ≈ 1 K, cerca de la superficie hasta valores de $\approx 5-10$ K a presiones más bajas. Un procedimiento común para medir la temperatura de la bomba era pegar con cinta un termistor en el exterior del bloque de teflón de la bomba cerca y a la misma altura que la salida del tubo del bloque (que va a la celda del cátodo), de ahora en adelante conocido como la "temperatura de la bomba externa". Hoy en día, ambos fabricantes de sondas ECC proporcionan sus sondas con un orificio perforado en el bloque de teflón. Esto permite colocar el termistor cerca del pistón y medir la "temperatura interna de la bomba".

2.3.6 Tiempo de respuesta del sensor

El tiempo de respuesta de la señal en vuelo es de aproximadamente 20-30 s para la sonda ECC. A una velocidad de ascenso típica de 5 m/s, esto se traduce en una resolución de altitud de aproximadamente 100 m para ECC y un ligero desplazamiento del perfil en la vertical con respecto al perfil real. La práctica habitual es no realizar ninguna corrección por el retraso en la respuesta. Además, se debe tener en cuenta que la señal de la sonda ECC consta de un segundo componente menor con un tiempo de respuesta mucho más lento de 20-30. Este segundo componente está fuertemente relacionado con la concentración buffer de fosfato en la solución del cátodo y puede tener un efecto significativo en los datos de la sonda ECC.

2.3.7 Ozono Total Normalizado

Como medio para evaluar la calidad de un perfil de ozono medido con sonda, la cantidad de columna integrada se compara con una cantidad de columna de ozono determinada e independientemente (SPARCOTA-GAW,

1998). Por lo general, esto se expresa en el denominado factor de normalización de ozono total (NT), es decir, la relación entre una medición de columna de ozono total realizada independiente, por ejemplo, con un espectrofotómetro Dobson o Brewer (Ω_C) y la columna de ozono total derivada del perfil de la sonda de ozono (Ω_T):

$$N_T = \frac{\Omega_C}{\Omega_T} \quad (\text{Ec10})$$

La columna total de ozono (Ω_T) es la suma del el perfil de ozono integrado de la sonda (Ω_s) más el estimado residual (Ω_R) por arriba de cuando el globo estalla:

$$\Omega_T = \Omega_s + \Omega_R \quad (\text{Ec11})$$

La columna integrada de la sonda (Ω_s) es:

$$\Omega_s = \int_{\text{Superficie}}^{\text{nivel de estallido}} n_{o_3}(z) dz = \int_{z_i=\text{superficie}}^{z_i=\text{nivel de estallido}} n_{o_3}(z_i) \Delta z_i \quad (\text{Ec12})$$

Donde:

$n_{o_3}(z)$ y $n_{o_3}(z_i)$; Son la concentración de ozono en cada nivel de la sonda a una altitud z o z_i , respectivamente.

La estimación del ozono residual por encima del estallido del globo, hasta un nivel alto de la atmosfera (TOA) es:

$$\Omega_R = \int_{\text{nivel de estallido}}^{\text{TOA}} n_{o_3}(z) dz = \int_{z_i=\text{snivel de estallido}}^{z_i=\text{TOA}} n_{o_3}(z_i) \Delta z_i \quad (\text{Ec13})$$

La cantidad de ozono se expresa en Unidades Dobson [UD], de tal manera que 1 UD = 2.68×10^{16} moléculas de ozono por cm^2 . A una temperatura estándar de 273°K y presión de 1013.25 hPa.

Se han desarrollado varios procedimientos para calcular la columna de ozono residual (Ω_R) por encima de la altitud de explosión. El procedimiento estándar más antiguo para calcular Ω_R es suponer una columna residual con una relación de mezcla constante igual al valor medido en la parte superior del perfil de la sonda. Aunque todavía se utiliza comúnmente, las observaciones por satélite han demostrado que la relación de mezcla de ozono disminuye por encima de unos 35 km (SPARC-OTA-GAW, 1998). Las incertidumbres en las lecturas de la sonda de presión y ozono a la altitud de explosión, y también la suposición de una relación de mezcla constante, pueden introducir incertidumbres significativas en la estimación de la columna de ozono residual (Jeannet et al., 2007). Esto se puede mejorar con un método alternativo en el que se utiliza una climatología de los datos de la columna de ozono residual obtenidos a partir de observaciones por satélite (McPeters et al., 1997, 2007). Sin embargo, la influencia de las incertidumbres en las lecturas de presión en el punto de explosión persiste.

Opcionalmente, los perfiles de las ozonosonda se normalizan, por lo que se usa una escala lineal por el factor de normalización de ozono total (N_T). El uso de la normalización para ajustar el perfil es controvertido debido al hecho de que la ozonosonda electroquímica es en principio “*un dispositivo de medición absoluto*”. El escalamiento lineal de un perfil de ozono solo debe realizarse después de realizar todas las correcciones dependientes de la altitud conocida. La normalización del perfil, puede proporcionar estabilidad a la serie temporal de ozono en la región, entre la altitud de 20 y 30 km que contiene la fracción principal de la cantidad de ozono total (Fioletov et al., 2006). Sin embargo, también produce algunos riesgos de que, las regiones con cantidades de ozono más pequeñas (la troposfera y por encima de los 30 km) se vean afectadas negativamente, si no se conocen adecuadamente las correcciones dependientes de la altitud (SPARC-IOC-GAW, 1998).

Incluso si el factor de normalización de ozono total *no se utiliza* para corregir el perfil de la sonda, sigue proporcionando una buena prueba de detección de sondeos no fiables, utilizando el criterio de que el factor de normalización no puede desviarse más de aproximadamente $\pm (0,1 - 0,2)$ (Tiao et al., 1986). Sin embargo, un factor de normalización de uno no es una garantía de que el perfil sea correcto. En el funcionamiento de rutina, los factores de normalización para las sondas ECC están en el rango de 0,9 -1,1.

3. ANÁLISIS DE DATOS

3.1 Indicadores de calidad de datos (DQI)

Existen varias categorías de productos de datos de ozono definidas por el World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre (WOUDC): información de columna total de ozono y perfil vertical de ozonosondas y recuperaciones de Umkehr/Lidar principalmente de plataformas estacionarias terrestres. Las ozonosondas tienen su propio contenido de datos único con sus propios indicadores específicos. La estructura nueva y más avanzada del formato revisado de datos de ozonosondas en el WOUDC con los cuatro segmentos de datos principales: (i) Overhead (ii) Header, (iii) Profile, y (iv) Meta. Incluye información adicional que se utiliza para procesar, reprocesar y evaluar los datos en cuanto a su confiabilidad. El propósito de esta parte es dar algunas pautas al usuario de datos de ozonosondas en forma de indicadores de calidad de datos (DQI). La intención es utilizar el DQI como un medio para hacer una evaluación objetiva de la calidad de los datos de sonda individuales archivados en el WOUDC que se basa en lo que se conoce sobre los conjuntos de datos. Esto se puede hacer en tres niveles: (I) DQI para “examinar” perfiles verticales individuales del desempeño de la sonda y la precisión y exactitud que se pueden esperar (ii) Herramientas para homogeneizar registros a largo plazo de una sola estación de sondeo o para homogeneizar registros de datos de diferentes estaciones de sondeo (iii) DQI para “examinar” aspectos más generales como la información de la estación y sus prácticas de sondeo, trazabilidad, reprocesamiento de datos y uso de datos.

3.2 Detección de perfiles verticales de las ozonosondas

Cada sondeo de ozono se realiza con un instrumento nuevo, que por lo tanto debe caracterizarse adecuadamente antes del vuelo. Sin embargo, la caracterización posterior al vuelo no es posible, por lo que solo se pueden utilizar los datos de sondeo previos y durante el vuelo para evaluar la fiabilidad de los datos de sondeo individuales. La Tabla I contiene criterios cuantitativos para evaluar la calidad de un perfil vertical de datos. Estos criterios no son una garantía, sino que sirven como indicadores más o menos objetivos del rendimiento de la sonda y de la fiabilidad de los datos de sondeo individuales.

Tabla I. Criterios de selección para comprobar la fiabilidad de los datos de perfiles verticales, realizados con los principales tipos de ozonosondas utilizados en la red GAW.

Indicator	ECC SPC	ECC ENSCIZ	BM	KC79/96	Identificados en el WOUDC
Factor de Normalización de ozono total	0.9 - 1.1	0.9 - 1.1	0.8 - 1.2	0.8 - 1.2	Factor de Normalización de ozono total
Flujo de la bomba [ml/min]	210 - 230	200 - 220	200 - 230	100 - 120	Caudal de la Bomba
Tiempo de respuesta (1/e)[s]	20 - 30	20 - 30	20 - 30	40 - 50	
Temperatura de la bomba [K]	273 - 310	273 - 310	273 - 310	273 - 310	Temperatura de la muestra
Metodo de medición para la temperatura de la bomba: In-flight (localización), Tablas, Constantes					Tipo de la temperatura de la muestra
Corriente de fondo IB1 [μ A]	0 - 0.10	0 - 0.105			Ib1
Corriente de fondo IB1ae [μ A]	0 - 0.15	0 - 0.015			Ib1ae
Corriente de fondo IB2 [μ A]	0 - 0.15	0 - 0.15			Ib2
Tipo de solución para la detección (SST)					Tipo de solución para la detección
Corriente de la bomba [mA]	>100 mA	>90 mA			Corriente de la bomba

3.3 Homogenización de los registros de los ozonosondeos espaciales y temporal

El experimento JOSIE (Smit et al., 2007) demostró claramente que, en lo que respecta al rendimiento de la sonda y, por lo tanto, a la interpretación de las tendencias del ozono, se debe tener cuidado al realizar cambios instrumentales o en los procedimientos de preparación/operación. Sin embargo, durante la última década se introdujeron varios cambios en los procedimientos operativos para las ozonosondas, de modo que en la actualidad, las diferentes estaciones de sondeo aplican una variedad de métodos preparatorios y correctivos. Esto puede causar no demasiado desplazamiento en las series temporales de una sola estación, pero si una significativa variabilidad del ozono de estación a estación, lo que puede tener un impacto dramático en la derivación de las tendencias del ozono a largo plazo. Por lo tanto, se necesitan herramientas cuantitativas para homogeneizar: (i) los registros a largo plazo de estaciones de sondeo individuales; (ii) los registros de sondeo entre diferentes estaciones. Una herramienta importante para ello son las “funciones de transferencia” que describen las diferencias cuantitativas de la respuesta de la sonda en función de los cambios del instrumento o de los procedimientos operativos.

3.4 Trazabilidad

Para los registros de sondeos a largo plazo, la trazabilidad es crucial. Las campañas de intercomparación como JOSIE y BESOS (WMO, 2014) han demostrado que pequeños cambios en los instrumentos o en los procedimientos operativos pueden tener un impacto significativo en el registro a largo plazo de una estación de sondeo y en la tendencia a largo plazo derivada de estos registros. Los aspectos importantes de la trazabilidad que se deben considerar son:

- (i) Registro a largo plazo de los cambios en el sistema de sondeo, metodología seguida de preparación, operación y procesamiento posterior al vuelo.
- (ii) Comparación con otras técnicas de elaboración de perfiles como el lidar terrestre o las técnicas de microondas o los satélites.

3.5 Procesamiento de datos

Es muy importante documentar el procesamiento de datos y, en particular, de las revisiones. En este sentido, es importante que exista un número de versión único de los conjuntos de datos, vinculado a la documentación del procesamiento de datos, es decir, la revisión de los datos. Esto también es importante desde una perspectiva histórica en relación con la evolución del procesamiento de datos y su posible influencia en las tendencias a largo plazo derivadas de las series temporales de sondeos de ozono de la estación.

3.6 Uso de los datos

El uso de datos puede referirse al uso de datos de sondeo de estaciones para:

- (i) Publicaciones científicas.
- (ii) Publicaciones instrumentales que evalúan el rendimiento de la sonda utilizada en la estación.

Estas publicaciones pueden hacer referencia a problemas dentro de los conjuntos de datos o, por el contrario, demostrar la alta calidad de un registro en particular. Es importante saber que un registro de datos ya ha sido analizado por alguien en un estudio independiente, especialmente un experto, de modo que no sea necesario “redescubrir” los mismos problemas. También se recomienda la inclusión de estos conjuntos de datos dentro del WOUDC.

4. RESULTADOS

4.1 Evaluación de las ozonosondas

Las actividades del Programa Vigilancia Atmosférica Global de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) Inician en la Argentina, con la creación de la Estación VAG de Ushuaia, cuyo objetivo es medir y estudiar, la composición química y física de la atmosfera en condiciones de fondo, es decir que no sean afectadas por actividades antrópicas, todo en el marco del Cambio Climático Global. Si bien, en algunos lugares ya se monitoreaba la capa de ozono con el espectrofotómetro Dobson, se medía radiación solar y UV con sensores de termopila, etc. Las redes de medición no estaban reguladas en su procedimiento, tampoco los equipos contaban con trazabilidad, de tal manera que al establecerse el programa VAG, regula y homogeniza las redes.

Estación VAG Ushuaia. Inicia el programa en el 2008 con el “Memorándum de Entendimiento” entre 4 partes; a) Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial (INTA) de España, Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) de España, Gobierno de Tierra del Fuego (GTF) Argentina y Servicio Meteorológico Nacional de Argentina. Donde establece que tanto el AEMET e INTA deberán aportar 20 ozonosondas cada institución, siendo un total de 40, en tanto el GTF y SMN los insumos y operadores. En el año 2013 AEMET e INTA, no pudieron sostener el programa, debido a una crisis económica que afecta a su país. Entonces el SMN y GTF toma la responsabilidad de la continuidad.

En la Fig. 3 se muestra los 17 años continuos de ozonosondeos en la estación Vigilancia Atmosférica Global (VAG) de Ushuaia. Durante la complementación del programa de medición de la capa de ozono en la estación GAW-Ushuaia (Dobson + sondeos), se plantea el programa de lanzamiento, el cual consistía en realizar durante el periodo de diciembre a julio, dos lanzamientos por mes (16 por los 8 meses). Mientras que para los meses de agosto a noviembre se harán 2 lanzamientos por semana (aproximadamente 16) por ser

temporada del agujero de ozono en la Antártida, ya que dicho fenómeno atmosférico suele pasar por encima de la ciudad. Un total por año aproximado de 32, situación que solo sucedió los primeros 4 años.

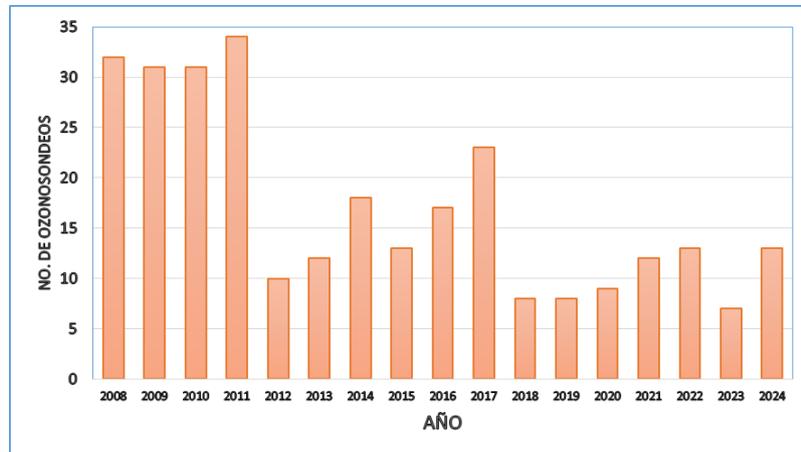


Figura 3: Número de ozonsondeos realizados por año. Se excluyen los que el globo estalla antes de 30 Km.

Para evaluar el rendimiento del total de las ozonsondas para los 17 años de medición en la estación, usamos, por ahora, solo el factor de normalización (NT), expuesto en el apartado anterior, donde se ha mostrado como se calcula. Entendiendo que este tipo de medición es absoluto y la Fig. 4 muestra relativamente las desviaciones. Este NT se obtiene desde el Espectrofotómetro Dobson #131, calibrado internamente cada semana con las lámparas estándar y cada mes con las lámparas de mercurio, y fue calibrado absolutamente en la IV y V Interceptación de Espectrofotómetros Dobson en Buenos Aires en el año 2010 y 2019 (WMO/GAW, 2018), respectivamente. Otra consideración importante es mencionar que el ideal para el NT es que la medición para el Dobson sea a cielo abierto (DS) situación que no siempre se tiene en la estación, es decir hay continúa nubosidad y por lo tanto se mide con la técnica Zenith Cloud (ZS) donde se recurren algunos ajustes y tiende a ser más una estimación.

En la Fig. 4 se muestra como la gran densidad de mediciones caen en los límites propuestos en la nota técnica de WMO/GAW 2014 y 2021 (intervalo ideal 0.9 - 1.1). Son un total de 232 ozonsondeos evaluados de los 17 años de medición, de los cuales 41 están por fuera del intervalo de fiabilidad, representando apenas el 15% del total. Mientras que el resto son 232 que, se encuentran dentro de fiabilidad, que es el 85%. Existe una alta probabilidad que aquellos que se encuentran fuera del intervalo, las mediciones con el espectrofotómetro Dobson hayan sido a través de una medición cenital (nubosidad) o que el globo haya estallado apenas por debajo de los 30 km de altitud, por lo se recomienda hacer dicha evaluación.

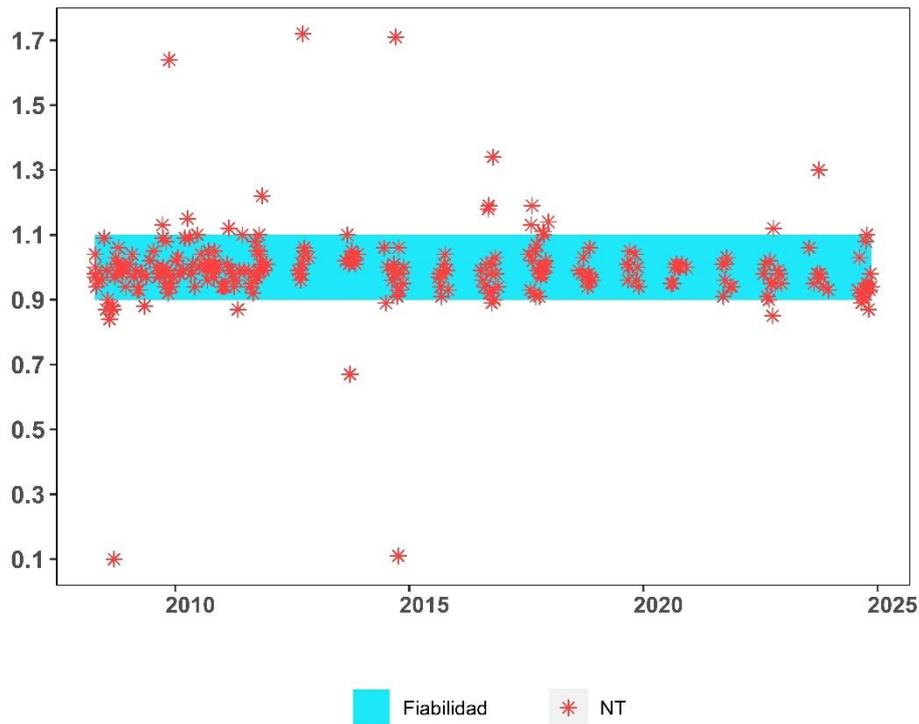


Figura 4: Factor de Normalización (NT) para los ozonsondeos en la ESTACIÓN Gaw-ushuaia (2008 - 2024).

4.2 Algunas aplicaciones

Los ozonsondeos, como se ha mencionado oportunamente, miden el ozono en diversas capas de la atmósfera, hasta un promedio de 32 km de altura. Esta medición de ozono también ofrece perfiles de temperaturas, con lo cual se puede establecer enfriamientos o calentamientos en la estratosfera, de tal manera que es posible detectar Nubes Estratosféricas Polares (NEP) tipo I y II. Esta situación se muestra en la Fig. 5. Como ya se mencionó anteriormente, los ozonsondeos en la estación GAW-Ushuaia siguen los protocolos GAW/WMO y en el repositorio institucional del Servicio Meteorológico Nacional se publica un procedimiento más detallado en la preparación y lanzamiento de los globos junto con la Celda de Concentración Electrolítica con siglas en inglés “ECC” (Cupeiro, 2013). En la misma publicación se muestra la recepción de los datos que van enviando los globos sondas conforme sube y llega a la estratosfera.

La estación GAW-Ushuaia se localiza en la llamada Isla Grande en la Provincia de Tierra del Fuego en Argentina, a unos 10 km al suroeste de la ciudad de Ushuaia (54° 50' S, 68° 18' O, 18 m.a.s.l.). Esta estación se estableció en la zona debido a que está en gran parte del tiempo al borde y apenas afuera del vórtice polar, de tal manera que puede capturar la mayoría de eventos que pueden impactar la estratosfera y la troposfera, en la cercanía de dicho vórtice polar. De hecho, cuando el vórtice se encuentra perturbado, es común que el agujero de ozono pase por encima de la estación y por la ciudad de Ushuaia, de tal manera que se han avistado NEP en la zona.

Otra aplicación que se le ha dado es para identificar vapor de agua en la estratosfera a través de la Humedad Relativa (%HR), tal como sucedió en el año 2023, donde algunos aerosoles de vapor de agua se observaron en la estratosfera de la Antártida, remanentes de la erupción del volcán Hunga Tonga del año 2022,

produciendo un enfriamiento que posteriormente provoca un inicio temprano el agujero de ozono en el año 2023 (Carbajal et al., 2024)

Al ser consideradas las ozonosondas como mediciones absolutas, se usan para la validación y comparación con sistemas satelitales, tal es el caso de el *Limb Profiler* del *Ozone Mapping and Profiler Suite* (OMPS-LP), a bordo del satélite SUOMI NPP (Sepúlveda et al., 2021). Validación de los perfiles de ozono estratosférico y troposférico superior de la versión 2.2 del *Microwave Limb Sounder* (MLS) que es uno de los cuatro instrumentos a bordo del satélite *Earth Observing System (EOS) Aura*, además de usar datos de ozonosonda y lidar, así como datos climatológicos. Donde se comparan las mediciones de ozono de más de 60 estaciones en todo el mundo y tres estaciones lidar con datos coincidentes del MLS. Los datos de ozono estratosférico del MLS entre 150 y 3 hPa concuerdan bien con las mediciones de ozonosonda, dentro del 8% para el promedio global. Los valores del MLS a 215 hPa tienen un sesgo alto en comparación con las ozonosondas de ~20% en latitudes medias a altas, aunque hay mucha variabilidad en esta región de altitud (Jiang et al., 2007).

Los perfiles de ozono obtenidos se pueden comparar con sistemas de medición ópticos que también proveen perfiles, como los perfiles de ozono de Odin/OSIRIS (sistema de espectrógrafo óptico e imagen infrarroja) (versión 3.0 y SaskMART). Donde se sugieren que la orientación de OSIRIS es estable con una exactitud (incertidumbre sistemática) de 100m y una precisión (incertidumbre aleatoria) de 400 m. La comparación de los perfiles coincidentes, reveló una excelente concordancia general con diferencias que generalmente no superan el 10% entre 10 y 35 km (McLinden et al., 2007)

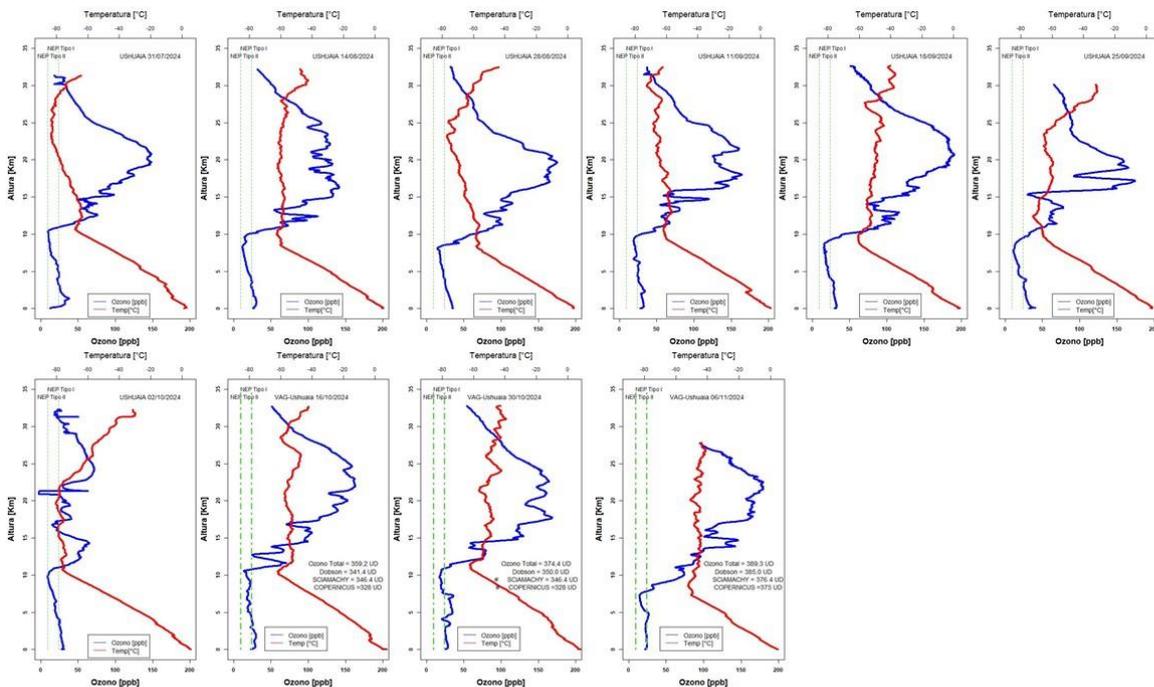


Figura 5: Perfiles derivados de los ozonosondeos en Ushuaia. La línea azul muestra al ozono, la línea roja representa la temperatura y las líneas verticales son el umbral de temperaturas a las cuales se forman las NEP tipo I y Tipo II.

5. CONCLUSIONES

El programa de ozono en la estación GAW-Ushuaia, comprende las mediciones de ozono total, a través de mediciones del Espectrofotómetro Dobson y el NEVA III (Convenio con INTA de España) y perfiles de ozono realizados con ozonosondeos, sobre todo en la temporada del agujero de ozono (Primavera Austral). Las lanzamientos se realizan con los protocolos recomendados por la el programa GAW/WMO, desde la licitación de insumos (Especificaciones Técnicas) hasta la preparación y lanzamiento, además del control de calidad de los datos (Reporte GAW 201, 2014 y Reporte GAW 268, 2021).

La evolución de la cantidad de lanzamientos de sondas, se ha mantenido pese a que en sus inicios, el AEMET y el INTA, ambos de España, colaboraban con el 100% de insumos pero desde el año 2018 el SMN, se hace responsable total de esta actividad.

Parte de la evaluación se centra principalmente en el factor de normalización (NT) donde se compara el ozono total con el espectrofotómetro Dobson, resultando algunos valores con gran dispersión, Con un total de 291 ozonosondeos registrados desde el 2008 hasta lo que llevamos del 2024, el 85% se encuentran dentro del rango de confiabilidad, mientras que 15% se encuentra fuera de dicho rango, pero puede ser debido a que algunas comparaciones se hicieron con mediciones cenitales del Dobson, los cuales se consideran más estimaciones que mediciones.

Los ozonosondeos son una herramienta muy útil para monitorear la capa de ozono, especialmente cuando el agujero de ozono pasa por la ciudad de Ushuaia, ya que esta situación puede incrementar el índice de Radiación Ultravioleta (IUV). Además provee información de la probabilidad de formación de las NEP tipo I y II, así como su distribución espacial, tal como sucede los meses de invierno o cuando el agujero de ozono pasa por la estación. También, al proporcionar perfiles de humedad relativa, se puede evaluar la humedad presente en la estratosfera, tal como ocurrió en el año 2023 donde se detectó aerosoles de vapor de agua provenientes de la erupción volcánica del Hunga Tonga. Los perfiles de ozono, al ser considerados mediciones absolutas, se pueden validar y complementar plataformas satelitales, así como modelos de pronóstico y radiación UV.

Es recomendable también, realizar el ejercicio de NT pero aplicado a valores iniciales de la ozonsonda, es decir valores de superficie compáralos con valores de O₃ superficial medios con un instrumento que cumpla con las especificaciones técnicas GAW/WMO (por ejemplo un TEI 49, TEI49C o TEI49i).

6. REFERENCIAS

Boyd, I.S., G.E. Bodeker, B.J. Connor, D.P.J. Swart, E.J. Brinksma, 1998: An assessment of ECC ozonesondes operated using 1% and 0.5% KI cathode solutions at Lauder, New Zealand, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 2409-2412.

Brewer, A. and Milford, J., 1960: The Oxford Kew ozonesonde, *Proc. R. Soc. Lond.*, 256, 470-495, doi:10.1098/rspa.1960.0120.

- Carbajal Benitez, G., H. Ochoa y H. Estevez Perez, 2024: Nubes Estratosféricas Polares y su seguimiento a través de modelos y ozonosondeos en Ushuaia y Belgrano II. Nota Técnica SMN 2024-169. <http://hdl.handle.net/20.500.12160/2732>
- Cupeiro, M., 2013: Ozonosondeos, Revista Meteoros Segundo ciclo, Año 7, No. 2, páginas 33-37.
- Dabberdt, W. F. and H. Turtiainen, 2014: Radiosondes, in Encyclopedia of Atmospheric Sciences, Second Edition, edited by G.R. North, J.A. Pyle, and F. Zhang, Vol 4, pp. 273– 284, Academic Press, London.
- Davies, J., D. W. Tarasick, C. T. McElroy, J. B. Kerr, P. F. Fogal, and V. Savastiouk, 2000: Evaluation of ECC Ozonesonde Preparation Methods from Laboratory Tests and Field Comparisons during MANTRA. Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium Sapporo, Japan, 2000, R.D. Bojkov and S. Kazuo, eds., pp. 137-138.
- Dietz, R.N., Pruzansky, and J.D. Smith, 1973: Effect of pH on the Stoichiometry of the iometric determination of ozone, Anal. Chem., 45, 402-404.
- Jeannet P., R. Stübi, G. Levrat, P. Viatte, J. Staehelin, 2007: Ozone balloon soundings at Payerne (Switzerland): Reevaluation of the time series 1967–2002 and trend analysis, J. Geophys. Res., 112, D11302, doi:10.1029/2005JD006862.
- Jiang Y, et al., 2007: Validation of Aura Microwave Limb Sounder ozone by ozonesonde and lidar measurements, Journal of Geophysical Research, 112 (D24S34), 10.1029/2007JD008776.
- Johnson, B.J., S.J. Oltmans, H. Vömel, T. Deshler, and C. Kroger, 2001: ECC ozonesonde pump efficiency measurements and tests on the sensitivity to ozone of buffered and unbuffered ECC sensor cathode solutions, J. Geophys. Res.
- Kobayashi, J. and Toyama, Y., 1966: On various methods of measuring the vertical distribution of atmospheric ozone (III)-Carbon iodine type chemical ozonesonde, Pap. Meteorol. Geophys., 17, 113-126.
- Komhyr, W. D., 1969: Electrochemical concentration cells for gas analysis, Ann. Geophys., 25, 203-210.
- Logan J., 1994: Trends in the vertical distribution of ozone: an analysis of ozonesonde data, Journal of Geophysical Research, 99, pp. 25553-25585.
- McLinden C. A., Fioletov V. E, Haley C. S., Lloyd N., Roth C., Degenstein D., Bourassa A., McElroy C. T., and Llewellyn E. J., 2007: An evaluation of Odin/OSIRIS limb pointing and stratospheric ozone through comparisons with ozonesondes. Canadian Journal of Physics. 85(11): 1125-1141. <https://doi.org/10.1139/p07-112>
- McPeters R.D., Labow, G.J., and Logan J.A., 2007: Ozone climatological profiles for satellite retrieval algorithms Journal of Geophysical Research, 112 (D05308), 10.1029/2005JD006823.
- Murray, F. W., 1967: On the computation of saturation vapor pressure, J. Appl. Meteorol., 6, 203-204.
- O'Connor, F.M., Vaughan, G., Murphy, G., 1998: Box and pump temperature measurements and the possible bias between Science Pump Corporation and ENSCI-type sondes, Polar stratospheric ozone 1997, EC Air Pollution Report 66, 712-15.

- Osterman, G. B., et al., 2008: Validation of Tropospheric Emission Spectrometer (TES) measurements of the total, stratospheric, and tropospheric column abundance of ozone, *J. Geophys. Res.*, 113, D1.
- Schenkel, A., and B. Broder, 1982: Interference of some trace gases with ozone measurements by the KI method, *Atmospheric Environment*, 16, 2187-2190.
- Schoeberl M.R., et al., 2007: A trajectory based estimate of the tropospheric column ozone column using the residual method. *Journal of Geophysical Research*, 112 (D24S49), 10.1029/2007JD008873.
- Sepúlveda, E., Cordero, R.R., Damiani, A. et al. 2021: Evaluation of Antarctic Ozone Profiles derived from OMPS-LP by using Balloon-borne Ozonesondes. *Sci Rep* 11, 4288. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81954-6>.
- Smit, H. G. J. and Kley, D., 1998: JOSIE: The 1996 WMO international intercomparison of ozonesondes under quasi flight conditions in the environmental simulation chamber at Julich, *WMO Global Atmos. Watch Rep.*, 130, 1998.
- Smit, H. G. J. et al., 2007: Assessment of the performance of ECC-ozonesondes under quasi flight conditions in the environmental simulation chamber: Insights from the Juelich Ozone Sonde Intercomparison Experiment (JOSIE), *J. Geophys. Res.*, 112, doi:10.1029/2006JD007308.
- SPARC-IOC-GAW Assessment of Trends in the Vertical Distribution of Ozone, 1998: SPARC Report No.1, WMO Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 43, World Meteorological Organization, Geneva.
- Staufer J., 2013: Analysis of ozone in the upper troposphere/lower stratosphere based on ozonesondes and regular aircraft measurements, *Diss. ETH No. 21022*.
- Tiao, G.C., G.C. Reinsel, J.H. Pedrick, G.H. Allenby, C. Mateer, A.J. Miller, and J.J. DeLuisi, 1986: A statistical trend analysis of ozonesonde data, *J. Geophys. Res.*, 91, 13121-13136.
- Voemel, H. and K. Diaz, 2010: Ozone sonde cell current measurements and implications for observations of near-zero ozone concentrations in the tropical upper troposphere, *Atmos.Meas.Tech.*, 3, 495-505, doi:10.5194/amt-3-495-2010, <http://www.atmos-meastech.net/3/495/2010/>.
- WMO-No.8 Report, 2018: Guide to Instruments and Methods of Observation, Vol.I: Measurement of Meteorological Variables, World Meteorological Organization, Geneva. [Available online at https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10179]
- WMO/GAW, 2014: Quality Assurance and Quality Control for Ozonesonde Measurements in GAW GAW Report No. 201, World Meteorological Organization, Geneva.
- WMO/GAW, 2019: Fifth International Comparison of Dobson Spectrophotometers Villa Ortúzar Observatory, Argentina, Report No.267, World Meteorological Organization, Geneva.
- WMO/GAW, 2021: Ozonesonde Measurement Principles and Best Operational Practices, ASOPOS 2.0, (Assessment of Standard Operating Procedures for Ozonesondes) GAW Report No. 268, World Meteorological Organization, Geneva.
- WMO/UNEP, 2003: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002, Global Ozone Research and Monitoring Project – Report No. 47, World Meteorological Organization, Geneva.

WMO/UNEP, 2007: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006, Global Ozone Research and Monitoring Project – Report No. 50, World Meteorological Organization, Geneva.

Instrucciones para publicar Notas Técnicas

En el SMN existieron y existen una importante cantidad de publicaciones periódicas dedicadas a informar a usuarios distintos aspectos de las actividades del servicio, en general asociados con observaciones o pronósticos meteorológicos.

Existe no obstante abundante material escrito de carácter técnico que no tiene un vehículo de comunicación adecuado ya que no se acomoda a las publicaciones arriba mencionadas ni es apropiado para revistas científicas. Este material, sin embargo, es fundamental para plasmar las actividades y desarrollos de la institución y que esta dé cuenta de su producción técnica. Es importante que las actividades de la institución puedan ser comprendidas con solo acercarse a sus diferentes publicaciones y la longitud de los documentos no debe ser un limitante.

Los interesados en transformar sus trabajos en Notas Técnicas pueden comunicarse con Ramón de Elía (rdelia@smn.gov.ar), Luciano Vidal (lvidal@smn.gov.ar) o Martin Rugna (mrugna@smn.gov.ar) de la Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios, para obtener la plantilla WORD que sirve de modelo para la escritura de la Nota Técnica. Una vez armado el documento deben enviarlo en formato PDF a los correos antes mencionados. Antes del envío final los autores deben informarse del número de serie que le corresponde a su trabajo e incluirlo en la portada.

La versión digital de la Nota Técnica quedará publicada en el Repositorio Digital del Servicio Meteorológico Nacional. Cualquier consulta o duda al respecto, comunicarse con Melisa Acevedo (macevedo@smn.gov.ar).