

## TENDENCIAS A LARGO PLAZO DE O<sub>3</sub> TROPOSFÉRICO EN ARGENTINA

CIONCO, RODOLFO G.<sup>1,2</sup>; ORELLANO, PABLO<sup>1,3</sup> Y QUARANTA, NANCY E.<sup>1,2</sup>

1: Grupo de Estudios Ambientales

Facultad Regional San Nicolás - Universidad Tecnológica Nacional

Dirección postal: Colón 332, San Nicolás, Provincia de Buenos Aires, Argentina (2900)

e-mail: gcionco@frsn.utn.edu.ar, porellano@frsn.utn.edu, nquaranta@frsn.utn.edu.ar

2: Comisión de Investigaciones Científicas (CIC)

3: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

**Resumen.** *El ozono troposférico (O<sub>3</sub>T) presente en las capas más bajas de la atmósfera, es un gas de efecto invernadero que a nivel de superficie actúa como contaminante secundario. Si bien la producción de O<sub>3</sub>T está fuertemente influenciada por ciclos anuales e intraestacionales, tendencias globales a largo plazo vienen siendo determinadas regularmente por diversos organismos internacionales. En este trabajo se presentan los primeros resultados tendientes a estimar las variaciones a largo plazo de O<sub>3</sub>T en Argentina. Se utilizan las observaciones del instrumento OMI (Ozone Monitoring Instrument) del satélite de teleobservación terrestre AURA (NASA). Aprovechando la extensa distribución latitudinal del país, se analizaron 4 zonas distribuidas de norte a sur, que incluyeron 12 puntos de observación, desde Salta hasta Río Grande en Tierra del Fuego. Los resultados arrojan tendencias lineales positivas, estadísticamente significativas, entre 0.010 UD/mes y 0.043 UD/mes (UD = unidad Dobson) para las distintas zonas estudiadas. Teniendo en cuenta la heterogeneidad de la muestra geográfica utilizada, la persistencia de las tendencias significativas indica un aumento continuo de O<sub>3</sub>T a lo largo del país que podría ser consistente con un escenario de aumento global en las emisiones de gases de efecto invernadero.*

**Palabras clave:** Ozono troposférico, Instrumento OMI/AURA, Cambio Climático Global

### 1. INTRODUCCIÓN

El ozono troposférico (O<sub>3</sub>T) es un gas que se forma tanto en la estratósfera como en la tropósfera a través de procesos bien diferenciados. En la capa más baja de la atmósfera el O<sub>3</sub>T actúa como contaminante secundario, originándose a partir de precursores (antrópicos y naturales) como óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), metano, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y compuestos orgánicos volátiles (VOCs) entre otros [1]. La toxicidad de O<sub>3</sub>T sobre la salud humana (principalmente a través de la interacción con el tracto respiratorio) y sobre la biósfera en general ha sido bien documentada [2]. El estudio de la variación de la columna de ozono detectada por sobre una dada zona urbana es por lo tanto un tema de gran importancia, pero también de considerable complejidad, ya que la cantidad de O<sub>3</sub>T presente no solo depende de los contaminantes primarios originados en ella (como por ejemplo NO<sub>x</sub>), sino también de factores atmosféricos locales y no locales dependientes, en diferentes escalas espacio-

temporales, de la meteorología y la climatología de la zona, como así también de procesos globales de teleconexión [3, 4, 5]. La atmósfera regula la dispersión de contaminantes locales y puede favorecer la incursión de contaminantes antrópicos y naturales generados en zonas aledañas, como emisiones volcánicas o quema regional de biomasa. La atmósfera permite también el ingreso a la tropósfera de ozono de origen estratosférico [6] y modifica la tasa local de producción de ozono, debido a las alteraciones de la capa nubosa presente. Esto es de suma importancia ya que la radiación solar incidente cumple un rol fundamental como *input* energético en las reacciones fotoquímicas involucradas. Por lo tanto, la variación anual (estacional) de la irradiancia solar recibida o las variaciones de más largo período debidas al Ciclo Magnético Solar (propias del Sol) o cualquier fenómeno atmosférico que modifique persistentemente la irradiancia solar recibida por sobre un determinado sitio (El Niño-Oscilación Sur, la Oscilación Quasibienal, etc.), produce variaciones observables en la tasa de formación de ozono [6]. Además de estos cambios que son, en general de distinto signo, aumentando y disminuyendo en distintas épocas del año o escalas de tiempo más largas, *tendencias a largo plazo* vienen siendo determinadas regularmente por diversos organismos internacionales como el Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) o la American Meteorological Society (AMETSOC) [3]. La determinación de tasas constantes de variación en las concentraciones de O<sub>3</sub>T resulta cada vez más importante y su monitoreo está siendo intensificado en un escenario de cambio climático global, debido a que el O<sub>3</sub>T es además un gas de efecto invernadero [7]. Desde este punto de vista, si la actividad humana modifica sistemáticamente la composición de la atmósfera a través del incremento de gases precursores de ozono, la determinación de tendencias a largo plazo de O<sub>3</sub>T posee una importancia central en el establecimiento y corroboración de la hipótesis de que el cambio climático global está siendo producido, al menos en gran medida, por causas antrópicas. La república Argentina posee una distribución latitudinal muy importante, por lo tanto distintas zonas bien diferenciadas están influenciadas por efectos climatológicos, topográficos y antrópicos muy diversos, fuertemente dependientes de la latitud. Teniendo esto en cuenta, la determinación de tendencias a largo plazo de O<sub>3</sub>T en el país podría ser un buen indicador de efectos globales en el incremento de gases de efecto invernadero. No existen, a la fecha, trabajos publicados que describan relevamientos sistemáticos de O<sub>3</sub>T en Argentina. El trabajo más importante analizando tendencias a largo plazo [3], presenta resultados principalmente del hemisferio norte, aunque se incluyen algunos datos del hemisferio sur, en particular se reportan mediciones efectuadas en Ushuaia con resultados no conclusivos. En este trabajo se presentan las primeras determinaciones tendientes a estimar las variaciones a largo plazo de O<sub>3</sub>T en Argentina, mediante el uso de 10 años de observaciones satelitales de la columna atmosférica total de ozono en diversos puntos del país. Se analizaron cuatro zonas distribuidas de norte a sur, que incluyeron 12 puntos de observación desde Salta hasta Río Grande en Tierra del Fuego.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1. Obtención de los datos**

Los datos de O3T fueron obtenidos de la página NASA Goddard Homepage for Tropospheric Ozone, publicada por el Instituto Goddard de NASA y corresponden al instrumento OMI (Ozone Monitoring Instrument) del satélite de teleobservación terrestre AURA [8]. OMI es un espectrómetro que observa luz solar reflejada desde la superficie terrestre en las bandas espectrales visible y ultravioleta. Las observaciones de O3T disponibles en la citada página web se obtuvieron restando a la columna total de ozono observada, la porción correspondiente a la estratósfera. Los datos se presentan, para cada año calendario, como una matriz de medias mensuales, sobre una grilla geocéntrica de 288 x 120 elementos (celdas), representando el dominio geográfico 179.375° O - 179.375° E en longitud y 59.5° S - 59.5° N en latitud dividido en sectores de 1.25° en longitud por 1° en latitud. Los datos de O3T liberados poseen diversas particularidades; por ejemplo, sustitución de valores ya publicados por cambio en el algoritmo de reducción o recalibración del instrumento [5], como así también datos faltantes. Los datos de O3T se obtienen en *unidades Dobson* (UD). La UD corresponde a una capa de ozono de 0.01 mm de espesor en condiciones normales de temperatura y presión, o de otra forma,  $2.69 \times 10^{16}$  moléculas de ozono por centímetro cuadrado. Las observaciones seleccionadas para este estudio cubren el período octubre de 2004 a diciembre de 2014. Cada mes de la serie se identificó con un índice (número entero) entre 0 y 123.

Teniendo en cuenta los datos disponibles y para una buena distribución en latitud se seleccionaron puntos de observación que incluyen ciudades bien identificables, representativas de cuatro zonas denominadas: Norte, Centro, Patagonia y Sur. De esta forma, se obtuvieron datos de tres ciudades por cada zona, procurándose incluir grandes y pequeñas ciudades, a fin de considerar variaciones propias debidas a los diferentes niveles de contaminación local. El criterio para seleccionar las ciudades correspondientes se basa además, en la cercanía al centro de alguna celda con datos homogéneos de O3T. Las ciudades que caracterizan a las celdas de observación están a una distancia angular menor que 0.5° del centro de las mismas. Las series seleccionadas para el presente trabajo no presentan datos faltantes. Las ciudades seleccionadas se muestran en la tabla 1, donde se especifican sus coordenadas geográficas como así también las coordenadas del centro de las celdas OMI/AURA de observación más cercanas correspondientes. Para automatizar la obtención y disposición final de datos, se desarrolló un programa específico escrito en lenguaje FORTRAN 90 que lee los archivos de datos satelitales, evalúa los valores de O3T, avisa sobre datos faltantes y arma las series temporales correspondientes a cada celda seleccionada.

<b>Norte</b>	<b>Latitud, longitud</b>	<b>Centro de celda</b>
Salta (Salta)	-24.79, -65.412	-24.5, -65.625
Pto. Iguazú (Misiones)	-25.61, -54.582	-25.5, -54.375
Goya (Corrientes)	-29.13, -59.251	-29.5, -59.375
<b>Centro</b>		
Mendoza (Mendoza)	-32.88, -68.827	-32.5, -69.375
Rosario (Santa Fe)	-32.95, -60.663	-32.5, -60.625

Santa Rosa (La Pampa)	-36.62, -64.284	-36.5, -64.375
<b>Patagonia</b>		
Comod. Rivadavia (Chubut)	-45.87, -67.501	-45.5, -68.125
Perito Moreno (Sta. Cruz)	-46.59, -70.924	-46.5, -70.625
Pto. San Julián (Sta. Cruz)	-49.33, -67.759	-49.5, -68.125
<b>Sur</b>		
Río Gallegos (Sta. Cruz)	-51.63, -69.232	-51.5, -69.375
Islas Malvinas (Tierra del Fuego)	-51.75, -59.306	-51.5, -59.375
Río Grande (Tierra del Fuego)	-53.78, -67.702	-53.5, -68.125

Tabla 1. Distribución geográfica de las celdas de observación OMI/AURA usadas en este estudio y las coordenadas de las ciudades seleccionadas que las caracterizan.

## 2.2. Determinación de la tendencia

Para determinar la tendencia presente en cada serie representativa de la ciudad correspondiente, se ajustó la siguiente expresión no lineal:

$$y(t) = a t + b + c \sin\left(\frac{\pi}{6}(t - d)\right) \quad (1)$$

donde  $t$  representa a la variable tiempo (medida por números enteros que identifican a los meses de las series) y  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  son los parámetros a determinar en el proceso de ajuste. El parámetro  $a$ , la pendiente de la componente lineal, es la tendencia que tratamos de conocer. El ajuste se obtuvo por minimización de  $ji$ -cuadrado mediante el método no lineal de Marquardt-Levenberg, univariado, sin pesos ponderados. La idea fue calcular la tasa de variación de O3T en base a un ajuste estadísticamente razonable, teniendo en cuenta no solamente una tendencia lineal sino también la variación cíclica estacional (anual) que es la componente periódica más importante en las variaciones de ozono. También se probó ajustando solo funciones lineales, concluyéndose que la estadística del proceso de ajuste (principalmente el error en la determinación de los parámetros) desmejora significativamente (en más del 10 %) con respecto a la inclusión del ciclo anual, aunque los valores obtenidos de  $a$  no variaron muy

	$a$	Límites a 95%	RMS
<b>Norte</b>			
Salta	0.010	0.009, 0.011	2.623
Pto. Iguazú	0.021	0.020, 0.022	2.774
Goya	0.013	0.011, 0.014	4.671
<b>Centro</b>			
Mendoza	0.028	0.026, 0.029	3.504
Rosario	0.014	0.013, 0.015	3.480
Santa Rosa	0.033	0.031, 0.035	3.854

<b>Patagonia</b>			
Comod. Rivadavia	0.043	0.041, 0.045	4.123
Perito Moreno	0.035	0.033, 0.037	4.108
Pto. San Julián	0.031	0.029, 0.033	4.111
<b>Sur</b>			
Río Gallegos	0.041	0.039, 0.043	4.901
Islas Malvinas	0.042	0.039, 0.044	5.406
Río Grande	0.041	0.039, 0.043	4.650

Tabla 2. Tendencia detectada,  $a$ , en el ajuste de la ecuación (1) a los datos de O3T para cada celda caracterizada por las ciudades indicadas; límites de confianza a 95% y media RMS final de los residuos.

significativamente, indicando una tendencia lineal bien definida. La inclusión de otras periodicidades, como las intraanuales de entre 3 y 4 meses no mejoró la bondad del ajuste, cuantificada por el  $ji$ -cuadrado reducido, por lo tanto no fueron consideradas.

### 3. RESULTADOS

Las tendencias detectadas en el ajuste se muestran en la tabla 2. Los valores obtenidos resultan ser significativamente no nulos con un límite de confianza prefijado del 95%. Los resultados arrojan tendencias *positivas* con valores que van desde 0.010 UD/mes a 0.043 UD/mes para las distintas zonas estudiadas.

El valor de la media RMS de los residuos post-ajuste (apreciablemente mayor que uno) indica la posibilidad de mejorar el modelo propuesto para el ajuste a través de la inclusión de variaciones estacionales o algunos fenómenos atmosféricos y solares, como los descritos en la sección 1 [9]. Los otros coeficientes ajustados resultaron también significativamente no nulos, con errores generalmente menores que el 10 %.

En general, las tendencias a largo plazo pueden ser percibidas a simple vista observando la evolución temporal de las series usadas. En la figura 1, se muestran las tres series de la zona Norte, con líneas de trazo continuo, y el ajuste correspondiente del modelo dado por la ecuación (1), con líneas discontinuas. Para la zona caracterizada por la ciudad de Puerto Iguazú, por ejemplo, la tendencia creciente es claramente visible.

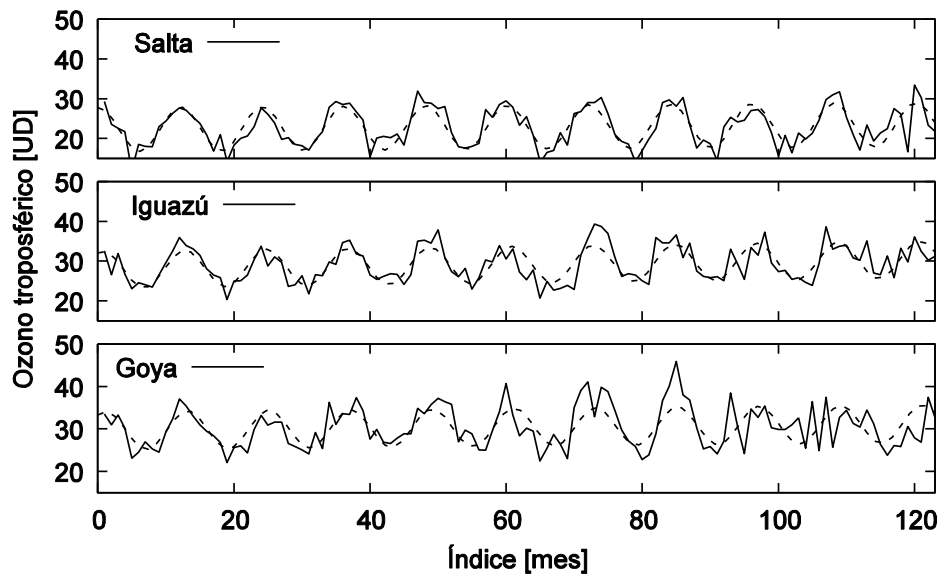


Fig. 1: Series de O3T y ajustes realizados (líneas punteadas) para las ciudades de la zona Norte.

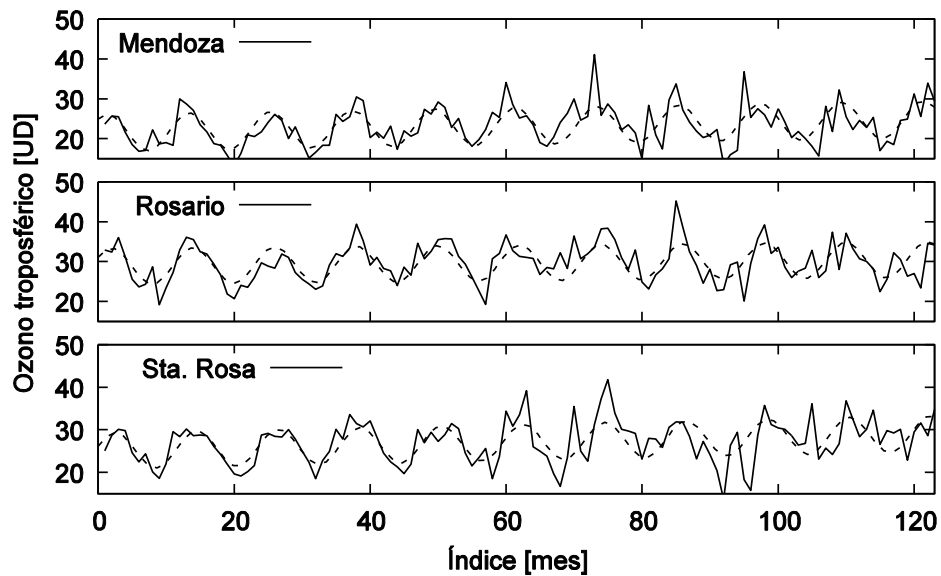


Fig. 2: Series de O3T y ajustes realizados (líneas punteadas) para las ciudades de la zona Centro.

La figura 2 muestra las tres series de la zona Centro y los ajustes correspondientes efectuados (en línea discontinua). Particularmente para la ciudad de Santa Rosa (La Pampa), la tendencia lineal de pendiente positiva es claramente visible (también el buen ajuste del ciclo anual en los primeros 60 meses), mientras que, para Rosario, el aumento sistemático de O3T es más difícil de observar a simple vista.

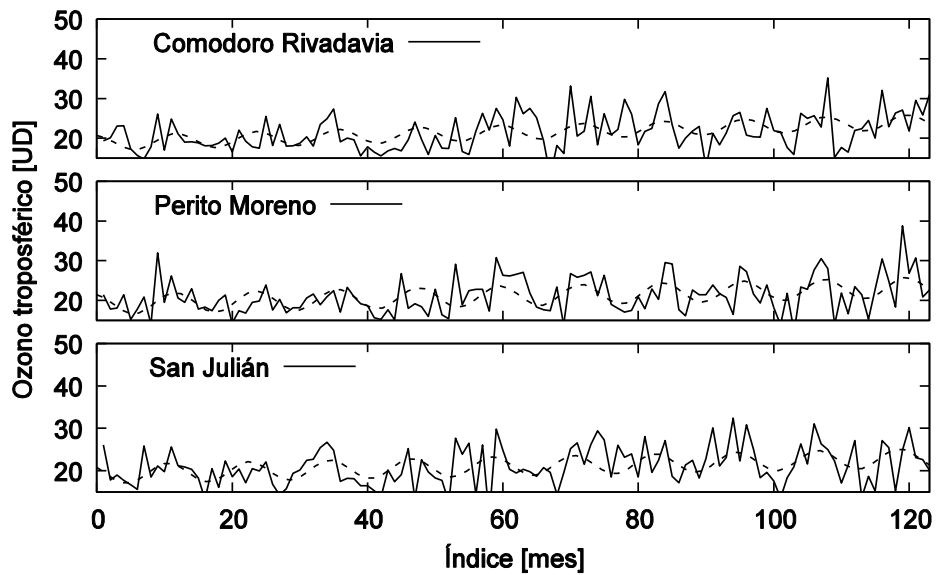


Fig. 3: Series de O3T y ajustes realizados (líneas punteadas) para las ciudades de la zona Patagonia.

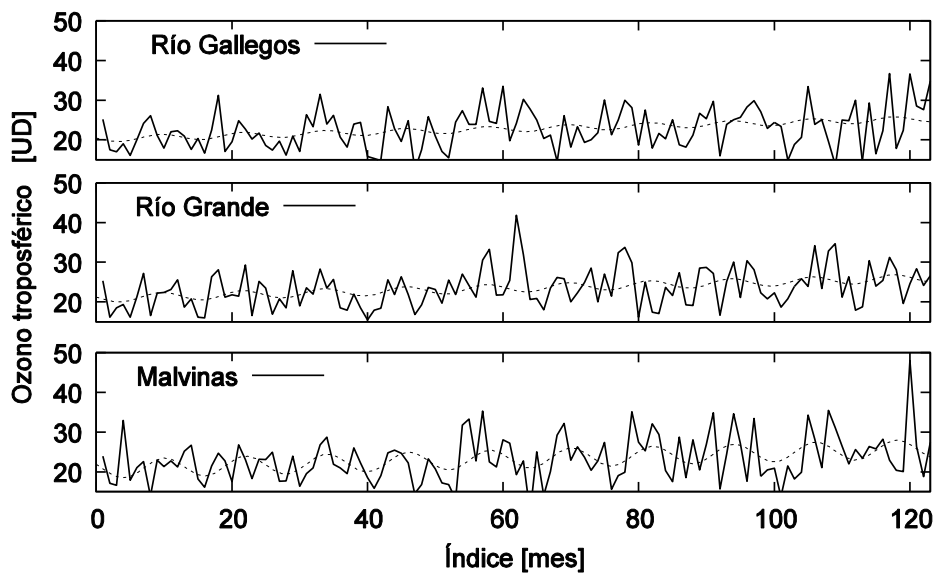


Fig. 4: Series de O3T y ajustes realizados (líneas punteadas) para las ciudades de la zona Sur.

En la figura 3 se muestran las tres series de la zona Patagonia y los ajustes correspondientes realizados. Se observa una tendencia lineal muy importante para todas las series, especialmente para Comodoro Rivadavia. En la figura 4 se presentan las series de la zona Sur. En este caso, además de las tendencias lineales claramente visibles en todas las series, se observan variaciones más rápidas o impulsivas, generalmente de mayor amplitud que en las

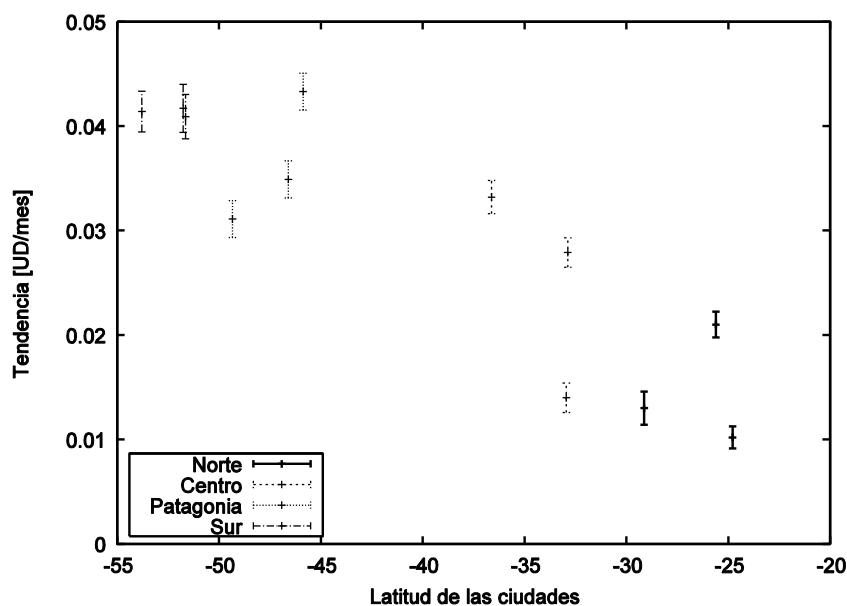


Fig. 5: Variaciones latitudinales en las tendencias calculadas de O3T.

otras zonas estudiadas, respecto a las tendencias lineales detectadas. Aunque en todas las zonas se perciben fluctuaciones rápidas, estas variaciones más impulsivas parecen intensificarse hacia el sur, hecho que claramente se evidencia en el aumento de la media RMS de los residuos (tabla 2). Por otra parte, el análisis gráfico está de buen acuerdo con lo cuantificado en la tabla 2: las tendencias en el aumento de O3T son *dependientes de la latitud*, incrementándose de norte a sur. La Figura 5 muestra las variaciones latitudinales de las tendencias calculadas. En la zona Sur, la tasa mensual promedio de aumento de ozono (0.041 UD/mes) es 2.733 veces mayor que la correspondiente de la zona Norte (0.015 UD/mes).

Es importante observar además, que las cuatro zonas consideradas presentan una climatología bien diferente: viento persistente del N-NE en la zona Norte y Centro (principalmente NE en esta zona debido al anticiclón cuasi-permanente del Atlántico), flujo constante desde el oeste en la Patagonia e ingresos de aire polar en la zona Sur. Por otra parte, la zona Norte puede ser más dependiente de la quema de biomasa (fuente de CO<sub>2</sub> y, potencialmente, VOCs), como así también de intercambios de aire con la estratósfera, fenómeno que también se da en la zona Sur y es propiciado por las altas presiones locales (podría ser la causa de los picos más importantes de O3T). En particular los ingresos estratosféricos asociados con altas presiones locales podría ser la causa del gradiente norte-sur observado en las tendencias de O3T. Aunque todos estos fenómenos atmosféricos deben explorarse más detalladamente, parece improbable que sean los responsables del aumento generalizado de O3T en todo el país, ya que son procesos mayormente estacionales (por ejemplo la quema de biomasa sigue el ciclo agrícola), con marcadas variaciones interanuales (no se presentan todos los años con la misma intensidad).



#### 4. CONCLUSIONES

El presente análisis permitió obtener información novel respecto a la distribución temporal histórica de O<sub>3</sub>T en Argentina y generar hipótesis de trabajo. Teniendo en cuenta la heterogeneidad de la muestra geográfica utilizada, y la discusión de los resultados obtenidos, una hipótesis que puede formularse es que Argentina está cada vez más inmersa en un escenario global de aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero.

#### REFERENCIAS

- [1] J. H. Seinfeld, *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*, John Wiley & Sons, (1985).
- [2] World Health Organization, *WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*, World Health Organization, (2006).
- [3] O. R. Cooper, D. D. Parrish, et al, “Global distribution and trends of tropospheric ozone: An observation-based review”, *Elementa Science of the Anthropocene*. Vol. **2:29**, on-line, (2014).
- [4] Jiang Ningbo, Kim N. Dirks, et al, “Effects of local, synoptic and large scale climate conditions on daily nitrogen dioxide concentrations in Auckland, New Zealand.”, *International Journal of Climatology*. Vol. **34.6**, pp. 1883-1897, (2014).
- [5] Rodolfo G. Cionco, Eduardo A. Agosta, et al, “Differences in the Same OMI/MLS Aura Tropospheric Ozone Data Set Published Before and After January 2013”, *The SIJ Transactions on Advances in Space Research & Earth Exploration (ASREE)*. Vol. **3**, No. 4, pp. 22-27, (2015).
- [6] A. Stohl, P. Bonasoni, et al, “Stratosphere-troposphere exchange: A review, and what we have learned from STACCATO”, *J. Geophys. Res.* Vol. **108**, (D12): 8516, (2003).
- [7] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. Working Group I contribution to the IPCC Fifth Assessment Report *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Final Draft Underlying Scientific-Technical Assessment.
- [8] J. R. Ziemke, S. Chandra, et al, “Tropospheric Ozone Determined from Aura OMI and MLS: Evaluation of Measurements and Comparison with the Global Modeling Initiative's Chemical Transport Model”, *J. Geophys. Res.* Vol. **111**, D19303, (2006).
- [9] D. M. Lal, S. D. Ghude, et al, “Tropospheric ozone and aerosol long-term trends over the Indo-Gangetic Plain (IGP), India”, *Atmospheric Research*. Vol. **116**, pp. 82-92, (2012).