

Análisis de los datos horarios de radiación solar y abundancia de ozono del Distrito Metropolitano de Quito del 2007 al 2012

María Cazorla^{1*}

¹Universidad San Francisco de Quito – Instituto de Investigaciones Atmosféricas – Colegio de Ciencias e Ingeniería,
Diego de Robles S/N, Cumbayá

*Autor principal/Corresponding author, e-mail: cazorla.chem@gmail.com

Editado por/Edited by:

Recibido/Received: 11/10/2013. Aceptado/Accepted: 10/11/2013.

Publicado en línea/Published on Web: 09/12/2013. Impreso/Printed: 09/12/2013.

Abstract

This work presents an analysis of the hourly average data of solar radiation flux and ozone concentrations at the surface level in the North and South of Quito for the years 2007 to 2012. The data was obtained from the public archives of the monitoring network in Quito. Monthly diurnal variation profiles were prepared for solar radiation and ozone for each region. A large data dispersion was found, in particular for the solar radiation data set. The Northern region is generally sunnier than the Southern region, although higher ozone is recorded in the South. This feature reveals differences in the nature and abundance of ozone precursors in both regions. The summer months show the largest ozone concentrations, which correlates directly with the seasonal solar radiation intensity at the surface. The ozone concentrations in the South of the city can be four times higher than in the North at daylight hours. In the nighttime high ozone levels, as high as daytime levels, were detected in the South of the city. It is possible that high ozone concentrations in the residual layer become trapped in the nocturnal boundary layer. The results found in this study suggest potential future atmospheric experiments that could help prove some of the proposed hypotheses for the observed phenomena.

Keywords. Ozone, solar radiation, Quito.

Resumen

En este trabajo se presenta un análisis de los datos horarios de radiación solar y de concentraciones de ozono a nivel de la superficie en el norte y sur de Quito del 2007 al 2012. Los datos fueron obtenidos de los archivos públicos de la red de monitoreo del aire de Quito. En este estudio se elaboró perfiles diurnos mensuales de la radiación solar y el ozono en ambas regiones. Se encontró una dispersión muy marcada, sobre todo en el juego de datos de radiación solar. La región norte es, en general, más soleada que la sur. Esta última, sin embargo, presenta concentraciones de ozono más elevadas, revelando diferencias importantes en la calidad y abundancia de sus precursores. Los meses del verano presentan las mayores concentraciones de ozono, correlacionándose directamente con los niveles de radiación solar. Las concentraciones de ozono en horas de luz del día en el sur de la ciudad pueden llegar a ser hasta cuatro veces mayores que en el norte. En horas de la noche, en la región sur, se identificó concentraciones de ozono tan altas como valores diurnos en los meses del verano, debido a un posible atrapamiento del ozono de la capa residual en la capa límite nocturna. Los resultados encontrados sugieren posibles experimentos atmosféricos futuros que podrían diseñarse para probar las hipótesis propuestas.

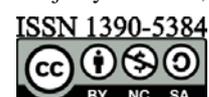
Palabras Clave. Ozono, radiación solar, Quito.

Introducción

Globalmente, las diferentes legislaciones ambientales regulan la abundancia de ozono a nivel de la superficie pues es un contaminante criterio cuya presencia en el aire ambiente, por sobre ciertos niveles de concentración, implica una amenaza inminente a la salud pública y a la integridad de los bienes, los materiales e inclu-

sive bosques y siembras [1–4]. Asimismo, la Organización Mundial de la Salud (OMS), ha establecido guías de niveles de contaminantes atmosféricos, entre ellos el ozono, que idealmente no debieran excederse, a fin de precautelar la salud de los seres humanos [5].

El origen de los contaminantes atmosféricos es tanto primario como secundario. Los contaminantes primarios son emisiones directas de fuentes fijas y móviles,



esto es, las chimeneas industriales que evacuan gases provenientes de operaciones de combustión y los tubos de escape de los vehículos. Los contaminantes secundarios, por otra parte, no son emisiones directas sino productos y subproductos de complejas cadenas de reacciones entre precursores, así como también de reacciones de fotólisis, esto es, la descomposición molecular por la interacción de ciertas longitudes de onda de la radiación solar con la materia.

El ozono es un contaminante de origen secundario que, junto con la fracción aerosol del material particulado fino, forman el llamado smog fotoquímico. El monitoreo de la abundancia de ozono en el aire ambiente es importante por dos razones: por el impacto que tiene en la salud pública y por el efecto directo que causa en la capacidad oxidativa de la atmósfera.

La primera razón es intuitiva: siendo el ozono un gas oxidante que irrita el tracto respiratorio y agrava condiciones preexistentes en pacientes que sufren, por ejemplo, de asma [1, 2], es necesario monitorear los niveles de este contaminante en el aire, a fin de dar alertas a la población, en el caso de que valores de abundancia por sobre la norma, impliquen una amenaza directa sobre la salud. Así, en el Ecuador, la Norma de Calidad del Aire Ambiente [4], establece un límite de $100 \mu\text{g m}^{-3}$ de ozono en condiciones estándar, a no ser excedido durante ocho horas continuas de monitoreo. Este límite está en concordancia con lo recomendado por la OMS [5].

La segunda razón de la importancia del monitoreo ambiental del ozono se explica desde la perspectiva física de los mecanismos de formación de contaminantes secundarios. Primero, la atmósfera es un sistema naturalmente oxidante. Así, en la tropósfera las dos especies con mayor capacidad oxidativa son el ozono y los radicales hidroxilo (OH). Segundo, el cociente entre la abundancia de ozono y de radicales hidroxilo determina la facilidad con la que ciertas especies gaseosas, orgánicas e inorgánicas, puedan oxidarse y condensarse en subproductos de menor volatilidad. Este mecanismo complejo de química heterogénea es el que da lugar a la formación de aerosoles. Finalmente, el radical OH se forma en la tropósfera cuando longitudes de onda en la región ultravioleta interactúan con el mismo ozono troposférico para disociarlo y dar lugar a una reacción entre el oxígeno elemental y la molécula de vapor de agua [6]. Es decir, la presencia, en mayor o menor grado de ozono en el aire ambiente, influye directamente en la formación de radicales OH y, a su vez, la acción combinada de estos dos oxidantes influye en la formación de la fracción aerosol del material particulado fino. Estudios en cámaras ambientales han demostrado la producción de partículas a diferentes niveles de abundancia entre el ozono y el OH [7].

El mecanismo de la producción del ozono troposférico ha sido estudiado extensivamente por varios autores [8–10]. El ozono se forma cuando las emisiones prima-

rias de compuestos orgánicos volátiles (COVs) reaccionan con el radical hidroxilo (OH) para formar radicales hidroperoxilo (HO_2) y otros radicales orgánicos, llamados colectivamente RO_2 . Asimismo, muchos de los compuestos orgánicos se fotolizan con la luz del día y producen radicales. Una vez formadas las especies RO_2 , reaccionan con las emisiones primarias de NO y forman NO_2 secundario. Ahora, el NO_2 tiene un pico de fotólisis de 400 nm, es decir al inicio del espectro de la luz visible. Por esta causa, la luz del día actúa sobre las emisiones primarias y secundarias de NO_2 , siendo los productos de la fotólisis el oxígeno atómico y el NO. Finalmente, el oxígeno atómico se combina con el oxígeno molecular y forma el ozono contaminante a nivel de la superficie. Este mecanismo tiene muchos detalles que pueden ser consultados en las referencias mencionadas. La complejidad del mecanismo implica que los niveles de ozono no puedan ser controlados con estrategias simples de reducción de emisiones primarias, pues los grados de libertad del fenómeno de producción superan la reducción aislada de dichas emisiones. Experiencias en otras latitudes han demostrado en la práctica que los niveles de precursores guardan una relación no lineal con los niveles de ozono [11].

El mecanismo de formación del ozono, por lo tanto, involucra una compleja cadena de reacciones entre emisiones primarias, secundarias y radicales. Adicionalmente, el motor que mueve la producción de ozono y de radicales, es la física del flujo actínico de radiación disponible en la atmósfera para interactuar con la materia. El flujo actínico involucra no solo la radiación solar directa, sino también la radiación difusa proveniente de la dispersión de la radiación con las superficies.

Los archivos de la Secretaría del Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) guardan información horaria recopilada por las redes de calidad del aire y meteorológica, de una antigüedad de unos ocho años. Dada la relevancia del ozono como contaminante y como precursor de otras especies, se ha preparado un análisis preliminar del comportamiento estacional del ozono y los niveles medidos de radiación solar en el norte y sur de la ciudad de Quito. El fin de este análisis es identificar patrones diurnos típicos, determinar el nivel de correlación del ozono con la radiación solar y evaluar la dispersión de los datos. Los resultados de este estudio servirán para preparar un estudio próximo que involucre otras mediciones meteorológicas relevantes, así como valores medidos de precursores del ozono disponibles.

Métodos

Para este análisis preliminar se ha escogido juegos completos de datos de concentraciones horarias de ozono del 2007 al 2012. Estos son datos públicos obtenidos de la Red Automática de Monitoreo (REMAQ) del DMQ, [12].

De igual forma, los datos horarios de radiación solar del 2007 al 2012, son también datos públicos que fueron

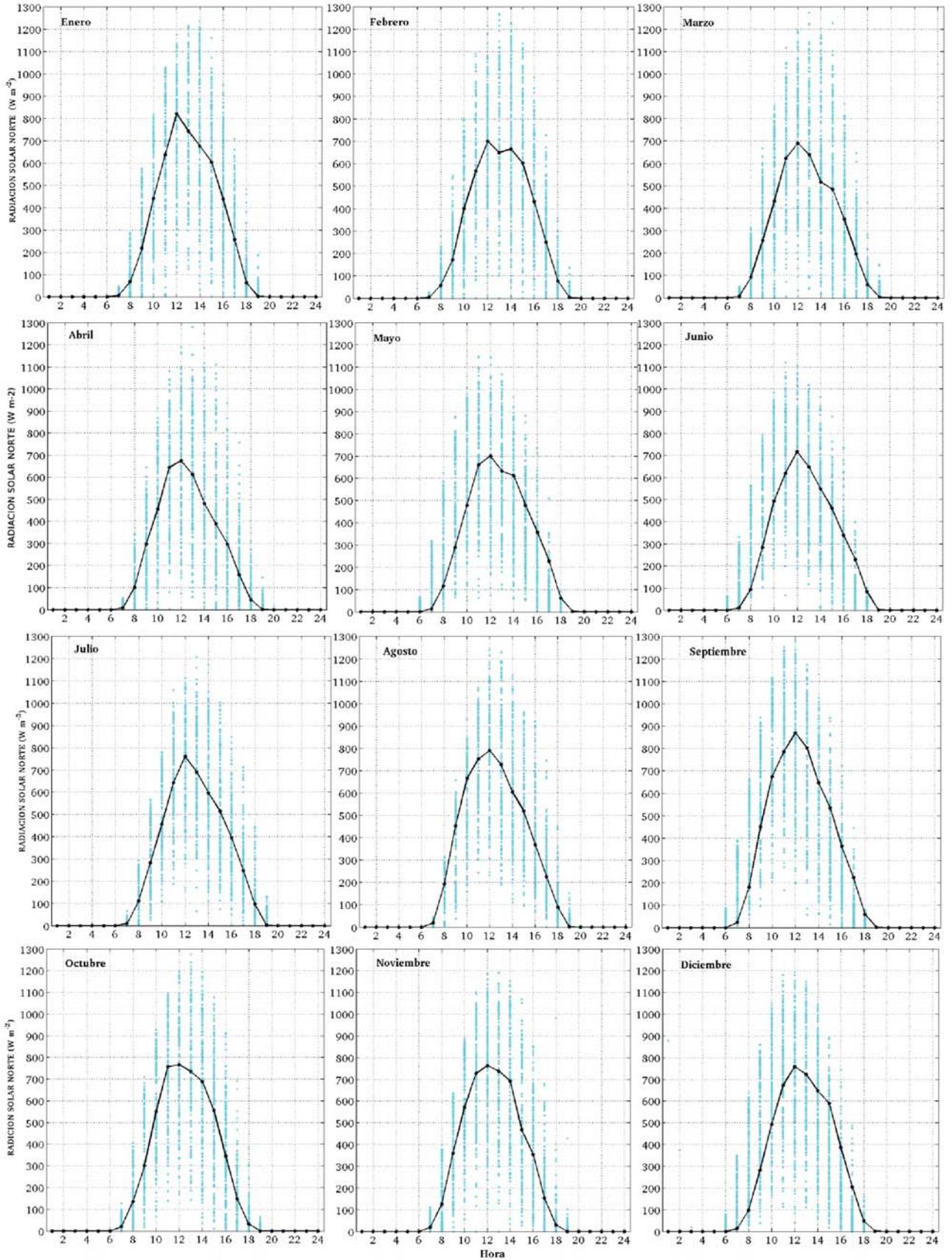


Figura 1: Variaciones diurnas y mensuales del flux de radiación solar a nivel de la superficie en el norte de Quito, estación Cotocollao. Los puntos celestes son las mediciones horarias de los años 2007 al 2012. La línea negra es la mediana de los datos de cada hora.

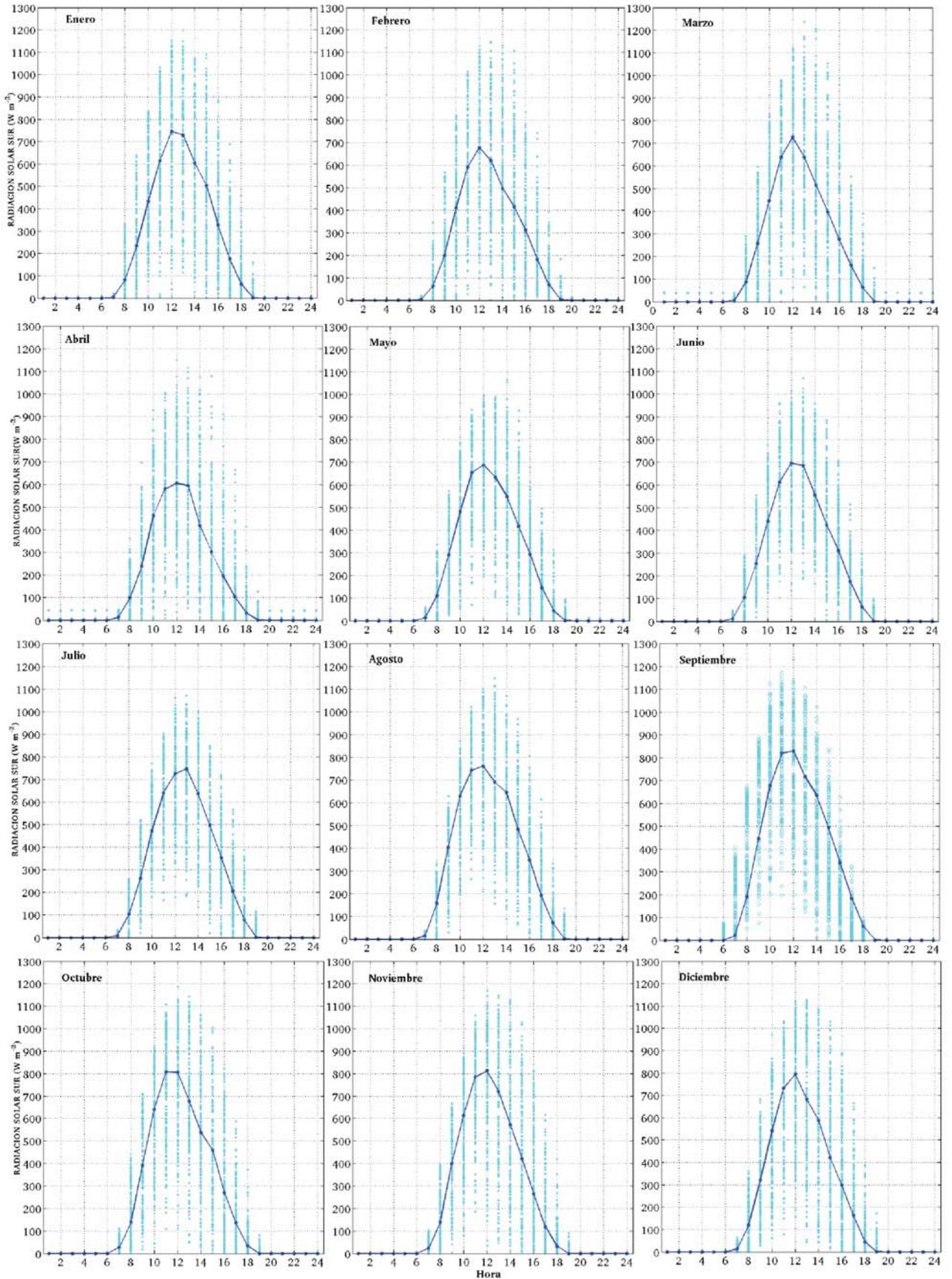


Figura 2: Variaciones diurnas y mensuales del flux de radiación solar a nivel de la superficie en el sur de Quito, estación El Camal. Los puntos celestes son las mediciones horarias de los años 2007 al 2012. La línea azul es la mediana de los datos de cada hora.

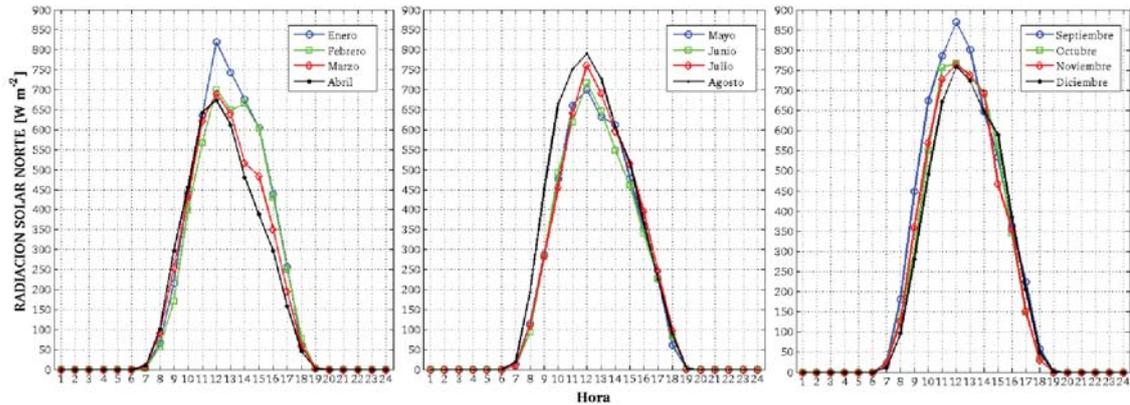


Figura 3: Variaciones diurnas del flux de radiación solar a nivel de la superficie del 2007 al 2012, superpuestas cuatrimestralmente, para el norte de Quito, estación Cotocollao.

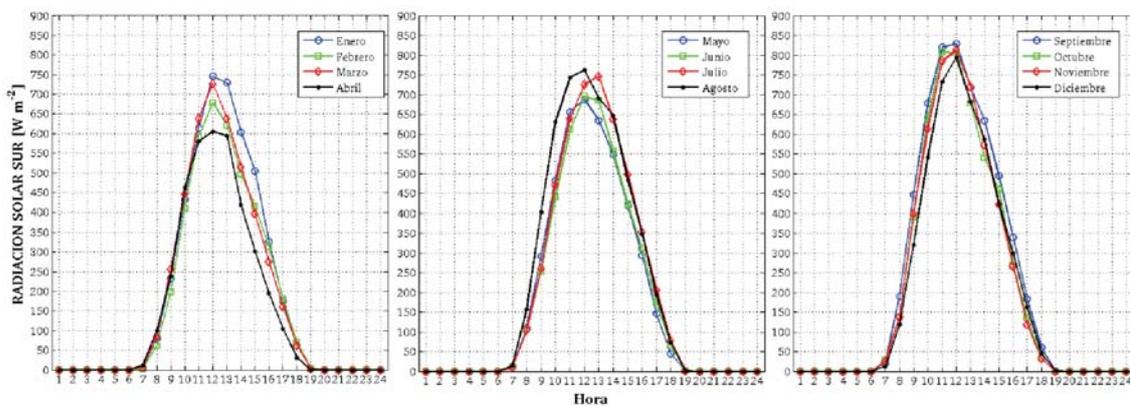


Figura 4: Variaciones diurnas del flux de radiación solar a nivel de la superficie del 2007 al 2012, superpuestas cuatrimestralmente, para el sur de Quito, estación El Camal.

obtenidos de los archivos de la red meteorológica del DMQ [13].

La REMAQ reporta datos de calidad del aire de ocho estaciones dispuestas en el norte, centro, sur de Quito y valles aledaños. Iniciando en el extremo norte y continuando hacia el centro y sur de la ciudad, las estaciones están localizadas en los sectores de Carapungo y Cotocollao, Belisario y Jipijapa, una estación en el Centro histórico, seguida de la estación del Camal y finalmente, al extremo sur, la estación de Guamaní. Las estaciones de la periferia están ubicadas en los valles de Tumbaco y Los Chillos. Las estaciones de la red meteorológica están ubicadas en las localidades de Carapungo, Cotocollao, Belisario, El Camal, Tumbaco y Los Chillos.

El principio de operación de los sensores de ozono de la REMAQ es por absorción de luz ultravioleta. Los datos se reportan en unidades de microgramo por metro cúbico en condiciones estándar, según lo estipula la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire Ambiente, NCAA [4]. El flujo de radiación solar, expresado como energía por unidad de tiempo y de superficie (flux), se mide con un piranómetro de tipo termopila y los datos se reportan en watts por metro cuadrado. Este instrumento no mide el flujo actínico sino la fracción de la luz del día que corresponde a la radiación solar directa.

En los reportes anuales de la calidad del aire del DMQ,

por ejemplo el del año 2011 [14], se puede encontrar un mapa de la ubicación de las estaciones, así como especificaciones de los instrumentos de medición presentes en cada estación. En dicho documento no se hace referencia a los niveles de incertidumbre de las mediciones. Este análisis, se ha hecho al nivel de “usuario de datos públicos” y por lo tanto no se dispone de información operativa pertinente a la producción de los datos.

Siendo el ozono un contaminante fotoquímico que guarda correlación con los niveles de radiación solar en la superficie, se ha buscado sintetizar la abundante información de la red de monitoreo, estableciendo estaciones representativas de la actividad fotoquímica para los extremos norte y sur del DMQ.

Correlaciones de los datos crudos de ozono de las estaciones de Carapungo y Belisario con los datos de la estación de Cotocollao produjeron regresiones lineales con pendientes mayores a 0.83 y coeficientes de regresión mejores que 0.75 para horas de luz del día. Sin embargo, los datos de la estación de Carapungo no son completos. Por esta causa, se ha escogido los datos de la estación Cotocollao para el análisis de la región norte del DMQ.

Comparaciones uno a uno de los datos de ozono de la estación de Guamaní con el resto de estaciones del centro-norte de la ciudad revelaron diferencias sustanciales en-

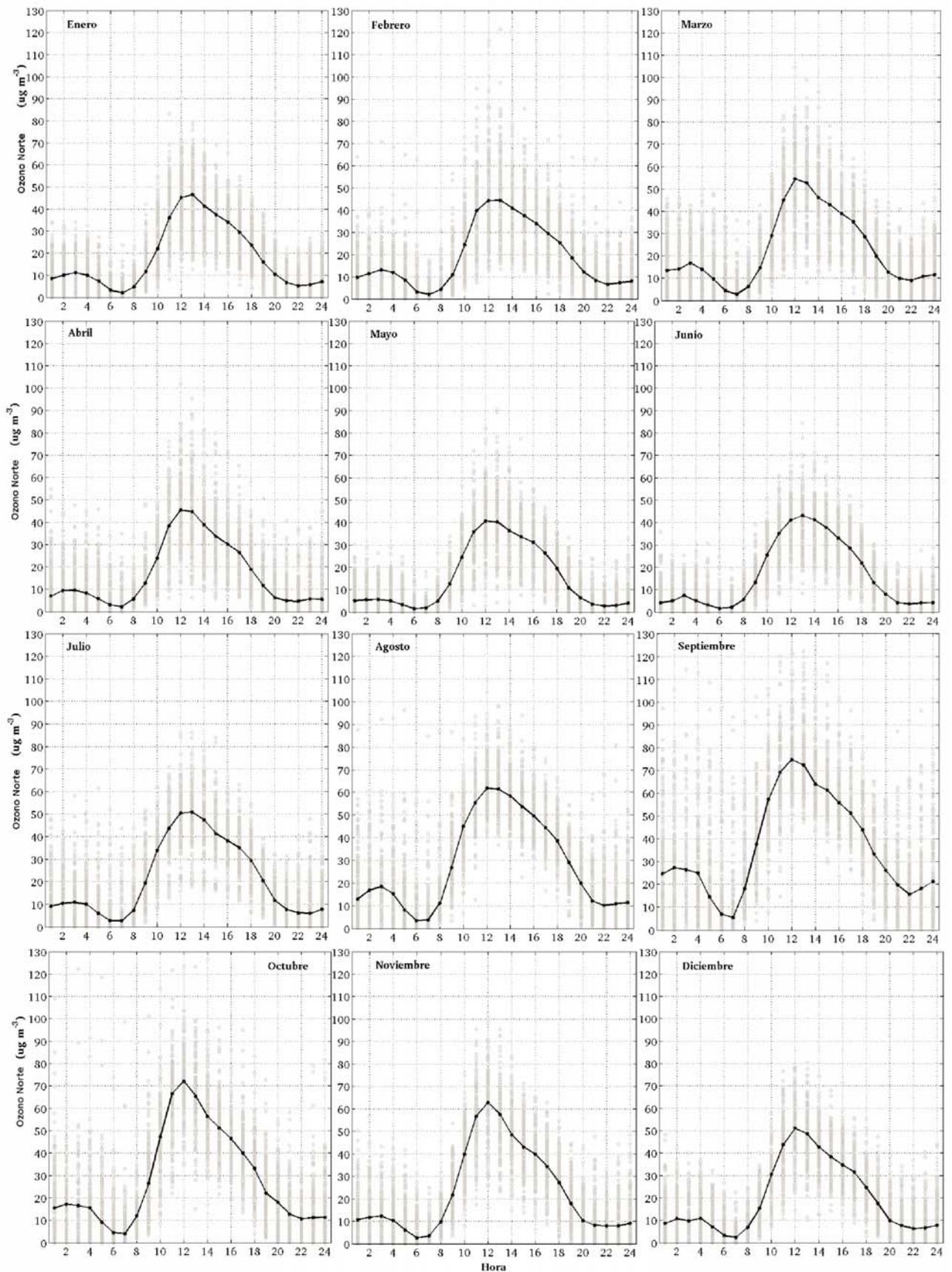


Figura 5: Variaciones diurnas y mensuales de las concentraciones de ozono a nivel de la superficie en el norte de Quito, estación Cotocollao. Los puntos grises son las mediciones horarias de los años 2007 al 2012. La línea negra es la mediana de los datos de cada hora.

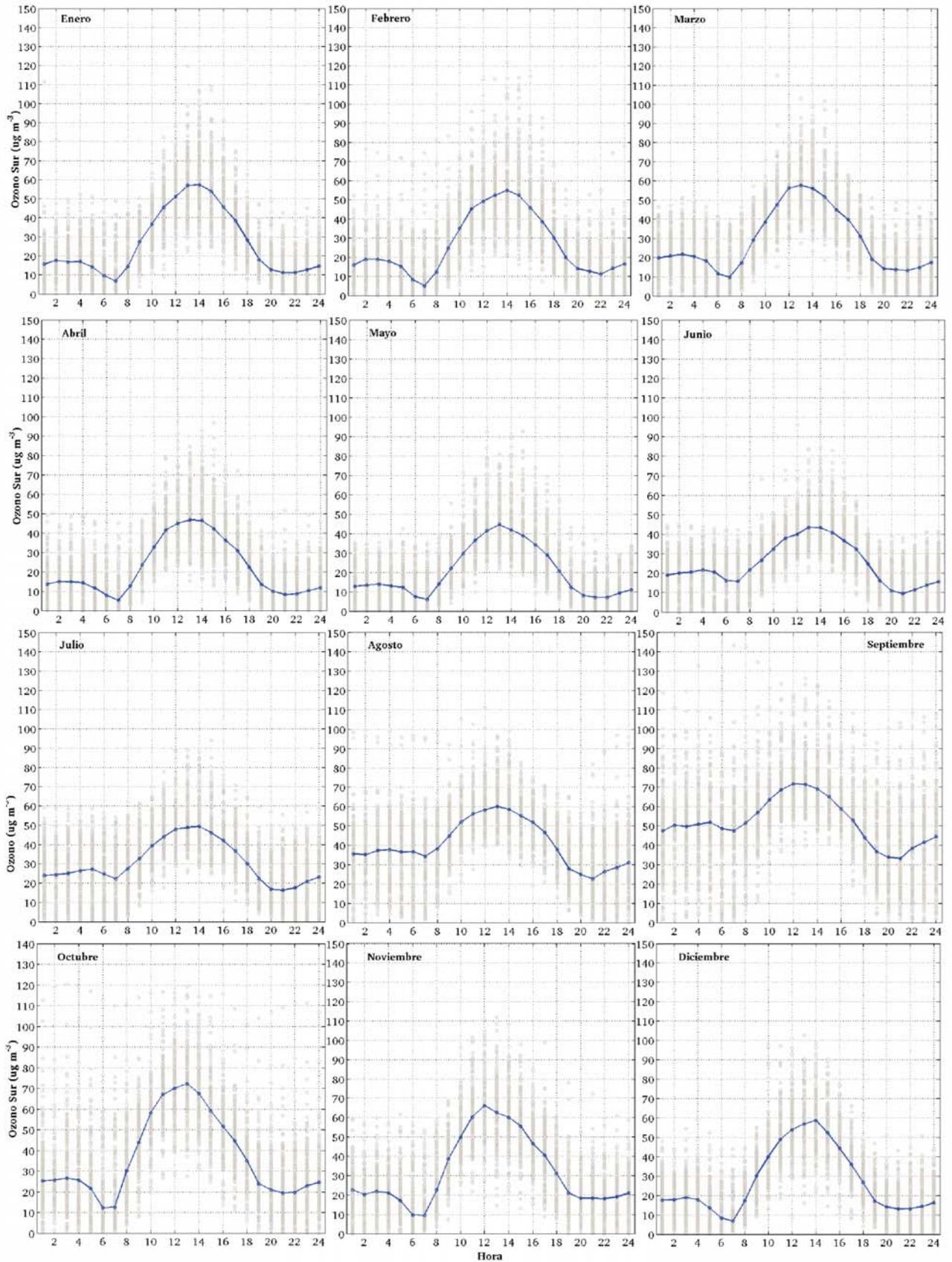


Figura 6: Variaciones diurnas y mensuales de las concentraciones de ozono a nivel de la superficie en el sur de Quito, estación Guamaní. Los puntos grises son las mediciones horarias de los años 2007 al 2012. La línea azul es la mediana de los datos de cada hora.

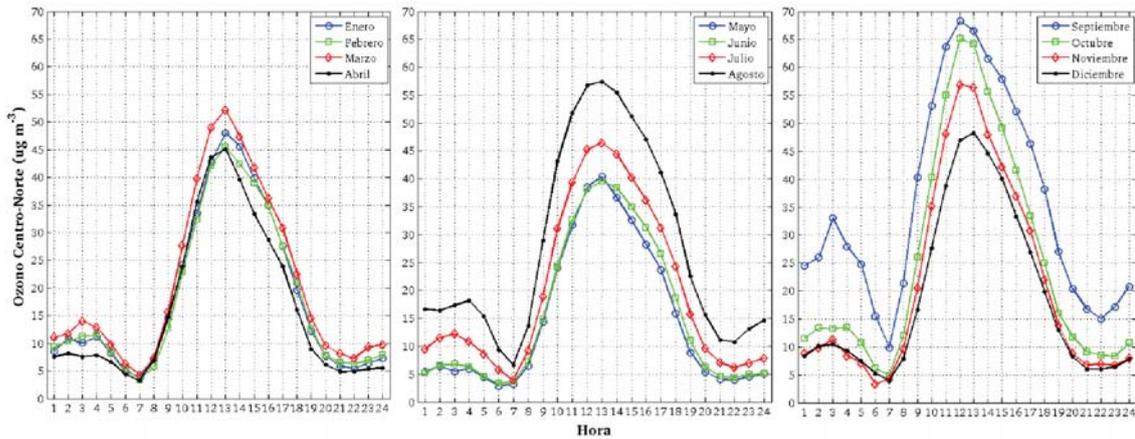


Figura 7: Variaciones diurnas de la concentración de ozono a nivel de la superficie del 2007 al 2012, superpuestas cuatrimestralmente, para el norte de Quito, estación Cotocollao.

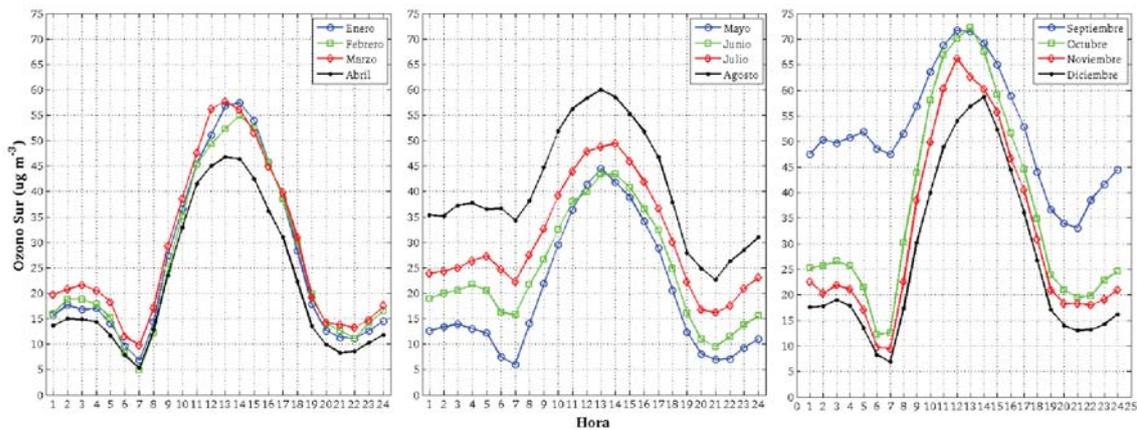


Figura 8: Variaciones diurnas de la concentración de ozono a nivel de la superficie del 2007 al 2012, superpuestas cuatrimestralmente, para el sur de Quito, estación Guamaní.

tre estaciones. Los datos para el extremo sur, por lo tanto, corresponden a los niveles de ozono de la estación Guamaní.

En este análisis preliminar no se incluye los datos de los valles de Tumbaco y Los Chillos.

Respecto de la radiación solar, los datos de la estación meteorológica de Cotocollao fueron escogidos para corresponderlos con los datos de ozono de la región norte, pues corresponden a la misma estación. Paralelamente, para correlacionar los datos de ozono de la región sur, se tomó los datos más cercanos a la estación de Guamaní, que son los datos de la estación meteorológica de El Camal.

Los instrumentos de medición normalmente tienen una resolución temporal de diez segundos. Sin embargo, los datos públicos disponibles, tanto de concentraciones de ozono como de radiación solar, son un promedio de las mediciones instrumentales realizadas en una hora en cada estación, pues las estaciones cumplen con lo que requiere la NCAA. Por lo tanto, la estructura de las series de tiempo ya ha sufrido un suavizamiento considerable.

El número total de puntos de abundancia de ozono y radiación solar válidos para el análisis de los años 2007 al 2012 es de 52608.

Para el análisis se filtró la matriz de datos por hora del día y por mes. Se graficaron, entonces, todos los puntos del 2007 al 2012, tanto del ozono como de la radiación solar, como función de la hora del día y esto se hizo para cada mes del año. Adicionalmente, se procedió a encontrar una correlación entre la radiación solar y la abundancia de ozono en el aire ambiente, en el norte y sur de Quito. Finalmente, se hizo comparaciones uno a uno de las observaciones horarias entre el norte y el sur de Quito.

Resultados y Discusión

El análisis diurno mensual del flujo de radiación solar en el norte y sur de Quito muestra una dispersión de datos considerable aún con 186 puntos graficados en cada hora del día de cada mes, como se aprecia en las Figs. 1 y 2. Esta dispersión de datos persiste inclusive al medio día del mes más soleado, esto es, septiembre, en el norte y sur de Quito y se extiende en un rango desde valores cercanos al cero hasta valores por encima de 1100 W m^{-2} .

Con un volumen de datos numeroso como este, estadísticamente se esperaría que los puntos se encuentren un

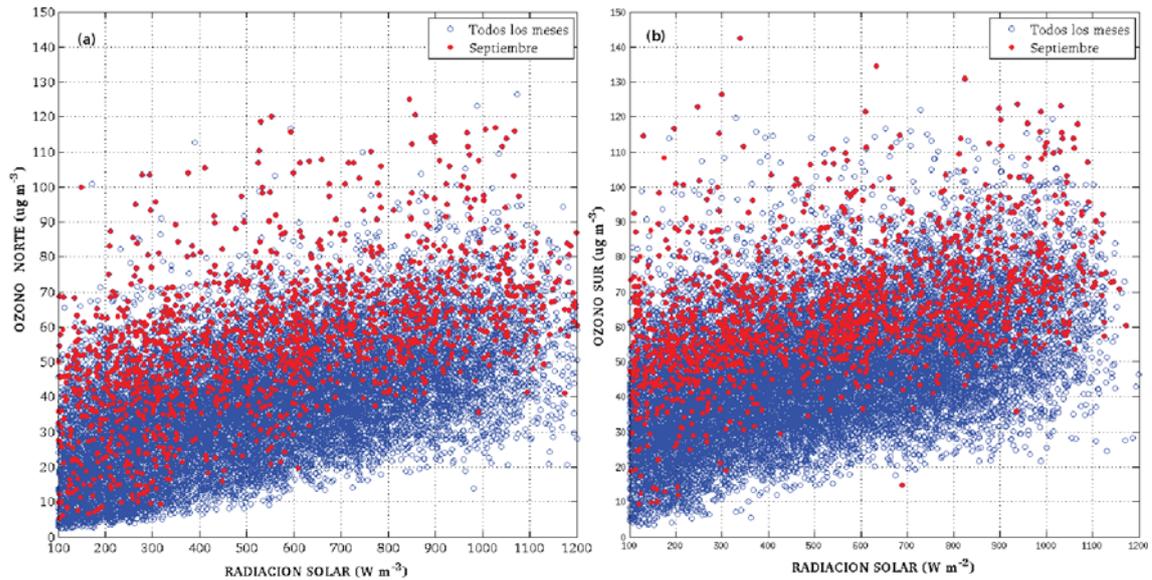


Figura 9: Correlaciones entre la concentración de ozono y la radiación solar para (a) el norte y (b) el sur de Quito. Los puntos azules corresponden a todos los datos horarios del 2007 al 2012. Los puntos rojos son los datos de los meses de septiembre solamente.

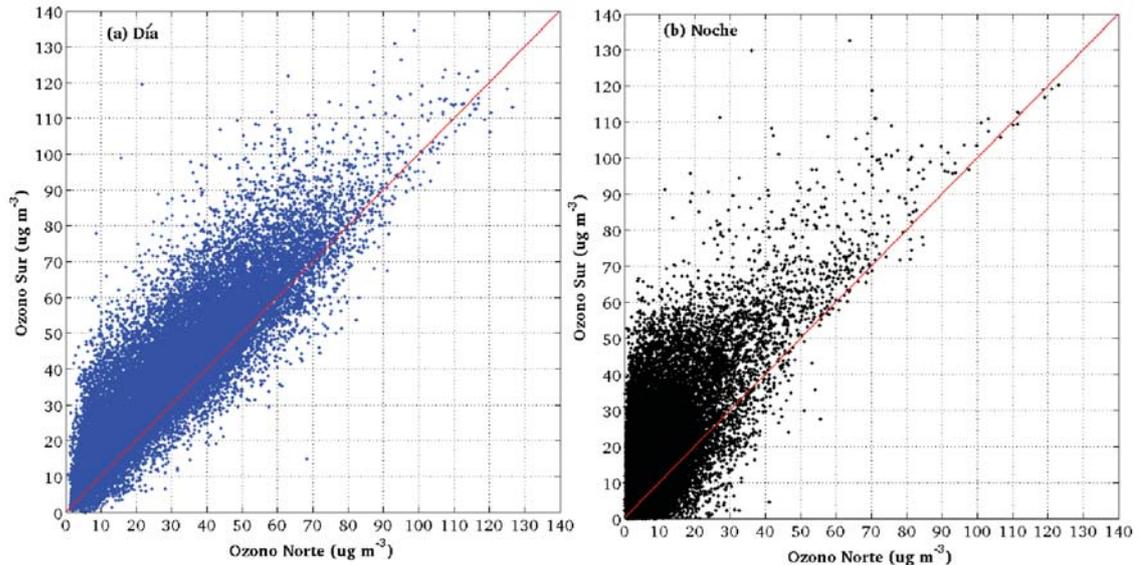


Figura 10: Abundancia horaria de ozono en el sur de Quito con respecto al norte, del 2007 al 2012, para (a) horas de luz del día y (b) horas de la noche.

poco más compactos al rededor de un valor de tendencia central. Sin embargo hay valores muy bajos entre las diez y las dos de la tarde de varios meses en ambos extremos de la ciudad. Una primera interpretación de esta dispersión de los datos es la nubosidad intermitente que existe en nuestra región durante todo el año, inclusive durante los meses del verano. Esta interpretación es cualitativa solamente pues la estructura de las nubes se ha perdido prácticamente de manera completa en este juego de datos. Por ejemplo, las nubes de cielo despejado se registran en una escala de tiempo de minutos. Así, al ser los datos horarios un promedio de las mediciones de toda una hora, aún si el cielo estuviese despejado durante la mayor parte de esa hora, varios minutos de nubosidad pueden sesgar hacia valores demasiado bajos el promedio de la hora. Esta puede ser una segunda cau-

sa de la dispersión de los datos. Sin embargo de estas dos interpretaciones, todavía aparecen datos demasiado bajos para horas de luz del día. Por ejemplo, hay valores cercanos al cero y de cero durante horas del día en el primer trimestre en la región norte e inclusive a las tres de la tarde de septiembre en la región sur, entre otros. Estos valores escaparían a las dos interpretaciones propuestas. La explicación para valores tan bajos tal vez pudiese ser de origen instrumental, sin embargo al momento no se cuenta con información para explorar esta hipótesis.

Puesto que valores demasiado bajos distorsionan el comportamiento real de la radiación solar durante el día, los perfiles diurnos mostrados mediante líneas sólidas en las Figs. 1 y 2 se obtuvieron aplicando un filtro no de media sino de mediana al grupo de datos de cada hora. El propósito de elaborar estos perfiles diurnos es el de

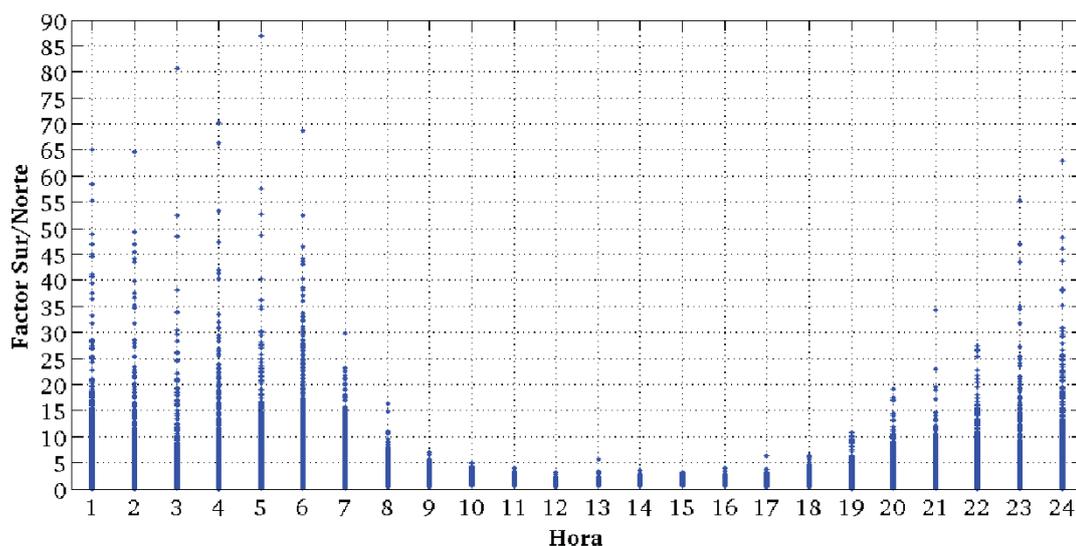


Figura 11: Cociente de las concentraciones de ozono del sur de Quito respecto del norte, para todos los puntos horarios del 2007 al 2012 y representados durante cada hora del día.

obtener un comportamiento que, sin llegar a ser climático, puede dar indicios de ser típico estacional tanto en el norte como en el sur de Quito.

Las Figs. 3 y 4 ponen en perspectiva lo explicado en el párrafo anterior. Los perfiles diurnos de radiación solar se han superpuesto cuatrimestralmente para ambas zonas. En general puede observarse que el norte de la ciudad recibe más radiación solar en la superficie que el sur pues la magnitud del flux radiante es menor en la región sur.

En el norte, los meses de abril y marzo, son los menos soleados. Pasado el equinoccio de primavera y con la llegada del solsticio de verano, las curvas de mayo y junio son todavía poco intensas pero de mayor duración de luz del día. Pasado el solsticio, el flux de radiación solar se incrementa desde julio, se intensifica en agosto y llega a su pico en septiembre, como es de esperarse en el equinoccio vernal. Las curvas de octubre, noviembre y diciembre son parecidas, menos intensas a medida que arriba el invierno. El mes de enero tiene un pico de radiación solar que se acerca al de septiembre. Este efecto pudiera atribuirse al cambio en el ángulo de declinación del planeta de -23.5° hacia valores menos negativos que, físicamente implica el inicio de mayor intensidad de luz solar en el hemisferio norte.

De manera similar, en el extremo sur de la ciudad, el mes de enero presenta un pico medio de radiación si se compara con los otros meses. En febrero y marzo la intensidad y duración de luz del día disminuye y encuentra su mínimo en el mes de abril. Mayo y junio tienen intensidades bajas todavía pero de mayor duración horaria. A partir de julio la intensidad del flux de radiación se intensifica y halla su máximo en septiembre. Octubre y noviembre son parecidos pero poco a poco la intensidad disminuye con la llegada del invierno.

La interpretación de estos datos es directa: influyen el

ángulo de declinación solar y la nubosidad característica de los meses de abril y marzo. No se dispone de datos de la resolución temporal suficiente para inferir la estructura de las nubes ni tampoco de datos de atmósfera superior que demuestren de manera cuantitativa la mayor nubosidad de la región sur.

Las características de radiación solar en cada mes y en cada región se reflejan en la forma e intensidad de las curvas de abundancia de ozono aun cuando este no es el único factor que influye en su formación, como se explicó en la sección introductoria.

En forma análoga al análisis de radiación solar, las Figs. 5 y 6 muestran mensualmente la variación diurna de la abundancia de ozono en los extremos norte y sur de Quito. Los puntos grises son los datos reportados como promedios horarios de ozono en $\mu\text{g m}^{-3}$ y corresponden a todos los puntos del 2007 al 2012. En ambas figuras, las curvas representadas por líneas sólidas corresponden a la variación diurna de la abundancia de ozono y han sido obtenidas aplicando un filtro de mediana de los puntos horarios. Así, como el caso de la radiación solar, se evita sesgos causados por valores muy bajos. De los puntos y las curvas de tendencia central se observa que, a diferencia de un contaminante primario, el ozono no encuentra su máximo de abundancia a las horas pico del tráfico, sino que sigue la variación diurna de la luz del día.

La compactación de los puntos en este juego de datos es mejor que en el de la radiación solar. Cualitativamente puede observarse que los puntos forman una sombra más cercana a la curva de tendencia central representada con líneas sólidas en las Figs. 5 y 6. A continuación se exponen posibles causas que pueden explicar la dispersión observada.

El ozono es un contaminante secundario que se produce en las horas de luz del día. Es por lo tanto de esperarse

que en los meses de mayor radiación solar exista mayor producción de ozono. Es así que la abundancia de ozono en el aire ambiente se incrementa de manera estacional. Tanto en el norte como en el sur de Quito, los niveles de ozono empiezan a crecer a partir del mes de julio, continúan incrementándose en agosto y hallan los valores más altos en septiembre y octubre. Este comportamiento se explica directamente con los picos de radiación solar observados en las Figs. 1 y 2.

Cuando existe nubosidad y la intensidad de la radiación solar disminuye en la superficie, los niveles de ozono se particionan hacia mayor abundancia de NO_2 , por falta de radiación que fotolice esta molécula. Por lo tanto, la dispersión de los puntos de niveles de ozono en el día, tiene parcialmente explicación en la dispersión de los puntos de flux de radiación solar, que tengan su origen en una disminución de la profundidad óptica debido a la nubosidad.

Una segunda causa para la dispersión de los puntos, es la convección y advección causadas por los movimientos verticales y horizontales de las masas de aire, respectivamente. A fin de comprobar esta hipótesis, se requiere hacer un análisis de las correlaciones entre la magnitud y dirección del viento y los niveles de ozono. Los archivos públicos cuentan con esta información horaria, por lo que en un trabajo futuro se procederá a buscar estas correlaciones aun cuando, al igual que con la radiación solar, la resolución temporal de las series de datos es baja y el juego de datos habrá perdido mucho de su estructura.

Finalmente, los niveles de ozono en horas de luz del día varían debido a fluctuaciones en los niveles de sus precursores en el aire ambiente. Estas fluctuaciones son difíciles de analizar en este juego de datos, pues se requiere mediciones tomadas con la misma constante de tiempo, de numerosos hidrocarburos volátiles así como de óxidos de nitrógeno. Mediciones de los primeros son muy especializadas y no se dispone de ellas. Mediciones de los óxidos de nitrógeno, especialmente del NO , existen y requieren ser analizadas en un trabajo futuro.

Respecto de los niveles de ozono, en general, se registra concentraciones más altas en el sur de la ciudad aunque el norte es más soleado, como se explicó anteriormente. Esta característica tiene que ver con la naturaleza de las emisiones precursoras, que, como se ha dicho, cuantitativamente es más complicado de analizar. Niveles por sobre los $100 \mu\text{g m}^{-3}$ se registran mayormente en los meses de septiembre y octubre. Las curvas de la zona norte crecen más rápidamente en horas de la mañana, para hallar su pico al mediodía. En las curvas de la zona sur, los picos son más anchos. Estas diferencias se exploran en los párrafos siguientes.

Existe una característica curiosa en la evolución mensual de la curva de tendencia central, especialmente en la zona sur. Las Figs. 7 y 8 son superposiciones mensuales de las curvas de variación diurna del ozono. Se observa claramente cómo los niveles de ozono empiezan a

incrementarse en el verano y es máxima en septiembre. En la zona sur, Fig. 8, no solo es evidente esto, sino que el brazo izquierdo de la curva, que corresponde a horas de la madrugada, empieza a crecer mensualmente desde un nivel bajo en junio, hasta niveles de concentración diurna en septiembre. Si se observa la Fig. 6, la dispersión nocturna de los puntos entre 00h00 y 06h00 es muy grande durante el verano en el sur. En la zona norte, este comportamiento es menos pronunciado.

La producción fotoquímicamente activa del ozono requiere de radiación solar. Por lo tanto en horas de oscuridad, la acumulación de ozono en la atmósfera tiene otro origen. Los niveles altos de ozono en la noche y madrugada en el sur de la ciudad durante los meses del verano, que se observan en la Fig. 8, posiblemente se deben a la formación de una capa residual con altas concentraciones de ozono al caer la tarde y su posterior atrapamiento en la capa límite atmosférica, que posiblemente tiene pocos metros de altitud a esas horas de la noche en dicha estación. La depresión que se observa a las siete de la mañana en todas las curvas del segundo panel de la Fig. 8 tiene su explicación en la titulación del ozono con emisiones frescas de NO de la hora pico. El NO_2 formado pronto retornará a convertirse en ozono, al incrementarse la intensidad de la radiación solar.

Estos resultados indican que es necesario hacer un análisis futuro del ozono nocturno con la temperatura de la superficie. Este análisis puede servir como indicador de un posible atrapamiento del ozono en la capa límite nocturna. Un análisis a este nivel es, sin embargo, semi cuantitativo pues no se dispone de datos de estructura vertical de la atmósfera que permitan establecer la altura de la capa límite y la altura de la capa de inversión térmica.

La correlación entre la abundancia de ozono en el aire del norte y sur de Quito con la intensidad de la radiación solar se exhibe en las Figs. 9a y 9b, respectivamente. Se observa un alineamiento de las abundancias de ozono como función de la radiación solar. Estas figuras muestran en azul todos los puntos del 2007 al 2012, mientras que los puntos rojos que se ubican en el extremo superior, son los puntos de los meses de septiembre, únicamente.

Finalmente, la mayor abundancia de ozono en el sur de la ciudad respecto del norte, tanto en horas del día como de la noche, se puede observar en las Figs. 10a y 10b. La Fig. 11 presenta el cociente de los valores de concentración de ozono en el sur respecto de los valores del norte. La Fig. 11 muestra que la concentración de ozono en el sur de la ciudad en horas del día puede ser de hasta cuatro veces mayor, mientras que en horas de la noche este factor puede llegar a sobrepasar 30. Los puntos más altos de esta última figura corresponden a los meses de julio a septiembre, en donde se observa el comportamiento descrito sobre la Fig. 8.

Conclusiones

Los datos de radiación solar del 2007 al 2012 presentan una dispersión muy grande con rangos que van de cero a valores de radiación máximos, inclusive en meses soleados y al mediodía. Especialmente los valores muy bajos o ceros en horas de luz del día escapan a interpretaciones meteorológicas y podrían tener origen instrumental. En el caso de diseñar futuros experimentos atmosféricos que requieran de mediciones de radiación solar, se necesitará recuperar instrumentalmente datos de mayor resolución temporal a fin de esclarecer la causa de la dispersión, así como de estudiar la estructura de las nubes y su influencia en contaminantes como el ozono.

La zona sur de la ciudad es, en general, menos soleada que el extremo norte, pero la abundancia de ozono es mayor en un factor de hasta 4 veces, en horas del día. Esto indica que el régimen de producción de ozono y la naturaleza de las emisiones de precursores en el sur es más activa que la del norte, inclusive con menos radiación solar. Con estos resultados se podría diseñar en el futuro un estudio experimental más elaborado que busque explicar, con mediciones especializadas, estas diferencias.

La presencia de niveles altos de ozono, comparables a niveles diurnos, en la atmósfera nocturna, sobre todo en el sur de la ciudad, apuntan a un posible caso de capa residual y atrapamiento por fuerte inversión térmica en la zona sur, que puede ser el origen de eventos de contaminación fotoquímica. Este resultado indica que sería conveniente diseñar futuros estudios de estructura vertical de la atmósfera y altura de la capa límite diurna y nocturna, en esta región.

Agradecimientos

Agradezco a Esteban Tamayo por su ayuda con la organización de las matrices de datos crudos. Agradezco a René Parra por las valiosas discusiones sobre el tema.

Referencias

- [1] Madden, M.; Hogsett, W. 2001. "A Historical Overview of the Ozone Exposure Problem". *Human Ecology Risk Assessment*, 7(5):1121 – 1131.
- [2] Ho, W.; Hartley, W.; Myers, L.; Lin, M.; Lin, Y.; Lien, C.; ; Lin, R. 2007. "Air pollution, weather, and associated risk factors related to asthma prevalence and attack rate". *Environmental Research*, 104:402 – 409.
- [3] U. S. Environmental Protection Agency. 2013. "Technology Transfer Network, National Ambient Air Quality Standards". www.epa.gov/ttn/naaqs/, EPA, Fecha de consulta: Septiembre 2012.
- [4] Ministerio del Ambiente. 2010. "Plan Nacional de la Calidad del Aire". <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/10/libro-calidad-aire-1-final.pdf>, Ministerio del Ambiente, Fecha de consulta: Septiembre 2012.
- [5] World Health Organization. 2013. "WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulphur dioxide. Global Update 2005. Summary or Risk Assessment". http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf, WHO, Fecha de consulta: Octubre 2012.
- [6] Seinfeld, J.; Spyros, P. 2006. "Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change". Wiley&Sons, Inc.: New Jersey.
- [7] Kang, E.; Root, M.; Toohey, D.; Brune, W. 2007. "Introducing the concept of Potential Aerosol Mass (PAM)". *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7:5727 – 5744.
- [8] Haagen-Smit, A.; Bradley, C.; Fox, M. 1953. "Ozone formation in photochemical oxidation of organic substances". *Industrial&Engineering Chemistry*, 45:2086 – 2089.
- [9] Finlayson-Pitts, B.; Pitts, J. 1977. "The chemical basis of air quality: Kinetics and mechanism of photochemical air pollution and application to control strategies". *Advances in Environmental Science and Technology*, Pitts Jr., J. N. and Metcalf, R. L., New York, Wiley-Interscience Publication: 75 – 162.
- [10] Logan, J.; Prather, M.; Wofsy, S.; McElroy, M. 1981. "Tropospheric Chemistry: A global perspective". *Journal of Geophysical Research*, 86:7210 – 7254.
- [11] Gégo, E.; Porter, P.; Gilliland, A.; Rao, S. 2007. "Observation-Based assessment of the impact of Nitrogen Oxides emissions reductions on ozone air quality over the Eastern United States". *Journal of Applied Meteorology and Climate*, 46:994 – 1008.
- [12] Distrito Metropolitano de Quito. 2013. "Red de Monitoreo Atmosférico". *Archivo de datos, Enlace: http://190.152.144.74/DMQ_RMA*, Fecha de descarga: Junio 2013.
- [13] Red de Monitoreo Meteorológico de Quito. 2013. "Archivo de datos". *Enlace: http://Q1/meteoro/index111.html*, REMMAQ, Fecha de descarga: Junio 2013.
- [14] Distrito Metropolitano de Quito. 2011. "Informe Anual 2011. Calidad del Aire". *Enlace: http://190.152.144.74/DMQ*, Fecha de Consulta: Agosto 2012.