

ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ESPACIO TEMPORAL ENTRE LA PRECIPITACIÓN ESTIMADA POR EL SATÉLITE TRMM (3B42RT) Y EL CAUDAL MEDIO DIARIO EN LA CUENCA DEL RÍO IGUAZÚCarolina G. Cerrudo^{1,2}, Gonzalo M. Díaz^{1,2}, Sabrina H. Juárez¹, Lorena J. Ferreira¹¹Departamento de Hidrometeorología, Servicio Meteorológico Nacional²Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. FCEyN UBA

(Manuscrito recibido el 10 de diciembre de 2015, en su versión final el 5 de mayo de 2016)

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es analizar la relación espacio temporal entre la precipitación diaria estimada por el satélite TRMM Versión 3B42RT en la cuenca del río Iguazú y el caudal medio diario en los puertos Iguazú y Andresito durante el período 2001 - 2013. Se realizan correlaciones teniendo en cuenta la precipitación diaria areal en la cuenca, así como también considerando los valores de precipitación estimados en cada punto de retículo. Asimismo se realiza un estudio para los eventos de crecida del río Iguazú ocurridos en junio de 2013 y junio de 2014, con el objetivo de analizar el impacto de la precipitación estimada sobre el caudal medio diario en el puerto Iguazú. Los resultados obtenidos a partir del análisis realizado teniendo en cuenta la precipitación areal muestran para el puerto Iguazú que la lluvia estimada para un día tiene mayor influencia en el caudal del río entre 5 a 7 días posteriores a la ocurrencia del evento de precipitación. Mientras que para Andresito el impacto tiene lugar entre 2 y 3 días después de ocurrido el evento de precipitación. En ambos casos se observa que el impacto observado en la tasa de cambio del caudal es más inmediato. Respecto de la relación espacio temporal se observa que el valor de caudal medio diario del puerto Iguazú se encuentra mayormente influenciado por la precipitación estimada ocurrida en la cuenca media y alta, entre 5 y 7 días después de ocurridos los eventos de precipitación. Por su parte, para el puerto Andresito las mayores correlaciones se encuentran entre 2 y 4 días posteriores al evento de precipitación en casi toda la extensión de la cuenca, con máximos en la cuenca alta y media. A partir del análisis de los dos eventos de crecidas analizados se obtienen resultados coherentes con lo mencionado anteriormente.

Palabras clave: precipitación estimada, caudal medio diario, Cuenca del río Iguazú

ANALYSIS OF TEMPORAL AND SPATIAL RELATIONSHIP BETWEEN ESTIMATED PRECIPITATION FROM TRMM SATELLITE (3B42RT) AND DAILY AVERAGE STREAMFLOW IN THE IGUAZÚ RIVER BASIN**ABSTRACT**

The aim of this study is to analyse the spatial-temporal relationship between daily precipitation estimated by TRMM satellite Version 3B42RT in Iguazu River Basin and daily average streamflow in the Iguazú and Andresito Ports during the period

2001- 2013. Correlations are made using areal daily precipitation estimated in the whole basin, as well as using precipitation estimated in each grid point. In addition, two case studies of Iguazú River floods are analysed, one occurred in June 2013 and the other one in June 2014. Results obtained from the areal precipitation analysis for Iguazú Port show that daily estimated precipitation has better influence in the river streamflow about 5 to 7 days after the precipitation event occurrence, whereas that in Andresito Port the most impact takes place between 2 and 3 days after the precipitation event occurrence. In both cases the impact observed in the streamflow rate change is earlier. In respect of the spatial – temporal relationship, it is found that the daily average streamflow in Iguazú Port is mostly influenced by the estimated precipitation occurred in the middle and upper basin, between 5 and 7 days after precipitation events occurred. On the other hand, the highest correlations that are found in Andresito Port are between 2 and 4 days after the precipitation event occurrence in all the basin area, with maximum values in the upper and middle basin. Moreover, the analysis of the two particular case studies of floods show consistent results compared with the above mentioned.

Keywords: estimated precipitation, daily average streamflow, Iguazú river basin

1. INTRODUCCIÓN

La precipitación es una de las variables meteorológicas más influyentes en el sistema hidrológico y juega un papel fundamental en distintas relaciones físicas como es el balance de agua (Seneviratne y otros, 2010). Es una de las componentes más importantes y determinantes en los eventos hidrológicos de fuerte impacto como son las inundaciones por crecidas de ríos. Es un parámetro de entrada fundamental para los sistemas hidrológicos (cuencas y/o subcuencas hídricas), influenciando de forma local o remota en el caudal medio diario de un punto de cierre específico de la cuenca hídrica. La disponibilidad de un registro continuo de precipitación, así como también del caudal, es relevante para determinar el comportamiento de un sistema hidrológico. Conocer la relación entre ambas variables es una tarea de interés, ya que permite determinar el grado de impacto de los eventos precipitantes sobre el sistema hidrológico de influencia.

En Argentina, las poblaciones asentadas en las regiones ribereñas son las más vulnerables ante la ocurrencia de este tipo de eventos (Latrubesse y Brea, 2010). El impacto social y económico que tienen en la sociedad es muy alto (Chamorro, 2006), por ello es de importancia su continuo

estudio, monitoreo y predicción para atenuar sus efectos.

Para determinar la precipitación areal en una cuenca se pueden emplear redes de pluviómetros instalados en superficie. En muchas situaciones estas redes no tienen suficiente cobertura espacial o no funcionan en los tiempos operativos requeridos para la determinación de situaciones de desastres. Si bien hay muchas iniciativas tendientes a mejorar este aspecto, una alternativa viable es la utilización de estimaciones satelitales de precipitación. Uno de los productos más utilizados es el de la misión TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission, por sus siglas en inglés), el cual es generado a partir de información extraída de las bandas visible, infrarrojo, microondas pasivo y del radar a bordo del satélite. En la actualidad existen numerosos trabajos que emplean estimaciones satelitales de precipitación en lugar de observaciones de superficie debido al beneficio de su gran cobertura espacial. Su y otros (2008) evalúan el desempeño de las estimaciones satelitales de precipitación en la Cuenca del Plata, con el objetivo de ser utilizadas en el proceso de asimilación de datos en modelos hidrológicos. Para un empleo adecuado de dicha información, es muy importante la verificación y evaluación del

error. En este sentido, análisis sobre los errores en las estimaciones satelitales de precipitación se pueden encontrar en trabajos como los de Salio y otros (2015), Cerrudo y otros (2013) y Hobouchian y otros (2012).

Existen en la bibliografía estudios que analizan la relación entre el caudal y la precipitación a nivel mensual y/o anual para distintas cuencas en Argentina, como el caso de Romero y González (2014) para las cuencas de los ríos Limay, Neuquén, Negro y Colorado en la región norte de la Patagonia. También, Camilloni y Barros (2003) para la cuenca del Alto Paraná, muestran a nivel mensual, la existencia de una fuerte relación entre las precipitaciones generadas en esa sección de la cuenca y los caudales ocurridos en la ciudad de Corrientes. Un 40 % del aporte de agua en Corrientes es proveniente del Alto Paraná y en menor medida del río Paraguay. Asimismo, también concluyen que las mayores crecidas del río Paraná en esa sección están asociadas principalmente a las fases Niño del ENSO (El Niño-Southern Oscillation, por sus siglas en inglés), debido al aumento de las precipitaciones en la región por este efecto. Por otra parte, Barros y otros (2004) presentan un análisis similar para la cuenca del río Paraguay, aunque encuentran en este caso que la señal del Niño no es determinante para los eventos de crecidas de dicha cuenca. A pesar de que la mitad de los casos analizados muestran anomalías positivas de caudal durante la fase del Niño, hay otro 50 % que se produjo debido a otros modos de oscilación. En este sentido, se destaca la importancia de estudiar la relación entre los distintos modos de oscilación en la atmósfera-océano y la ocurrencia de precipitaciones.

Todos los estudios mencionados anteriormente analizan la relación entre caudal y precipitación en escalas mensuales. Debido a la necesidad de profundizar la relación entre caudal y precipitación en escala diaria, en este trabajo se analiza la relación espacio temporal entre la precipitación diaria estimada por el satélite TRMM Versión 3B42RT en la cuenca del río Iguazú y el caudal medio diario en los puertos

Iguazú y Andresito. Asimismo, con el objetivo de afirmar los resultados obtenidos, se diagnostican los casos de crecidas ocurridos en el puerto Iguazú en junio 2013 y junio 2014.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

La región de estudio es la correspondiente a la subcuenca hídrica de río Iguazú, perteneciente al sistema hidrológico de la Cuenca del Plata (Figura 1). La mayor parte de la cuenca del Iguazú se encuentra en el territorio de Brasil. El río Iguazú nace en el cordón montañoso brasileño denominado Serra do Mar en el estado de Paraná, donde comienza su recorrido de aproximadamente 1300 kilómetros hasta su desembocadura en el río Paraná.

Esta subcuenca pertenece a una de las regiones más lluviosas de la Cuenca del Plata debido a que recibe precipitaciones a lo largo de todo el año (en promedio, 5 mm/día aproximadamente). La Figura 1 (b) muestra el modelo de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés) con una resolución espacial de 1 km de la misión SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, por sus siglas en inglés). A partir de este, puede apreciarse que gran parte de la cuenca media (definida entre Salto Osorio y Uniao da Vitoria, indicados con un punto rojo en Figura 1 (b)) se encuentra aproximadamente 500 mts más elevados sobre el nivel del mar que la cuenca baja. Las secciones de la cuenca consideradas en el trabajo (baja, media y alta) son las aplicadas por el Instituto Nacional del Agua (INA) en función de la distribución de embalses que se encuentran en la región (Goniadzki y Borús, 2015).

La delimitación de la cuenca del río Iguazú utilizada (Figura 1) fue brindada por el INA. La misma se presenta con el punto de cierre en puerto Andresito, donde es más representativo el funcionamiento de la cuenca como tal, es decir, que el río tiene un comportamiento fluvial propio e independiente del Paraná. Mientras que los niveles del río registrados en puerto Iguazú están influenciados por el río Paraná. Sin embargo, teniendo conocimiento de ese efecto,

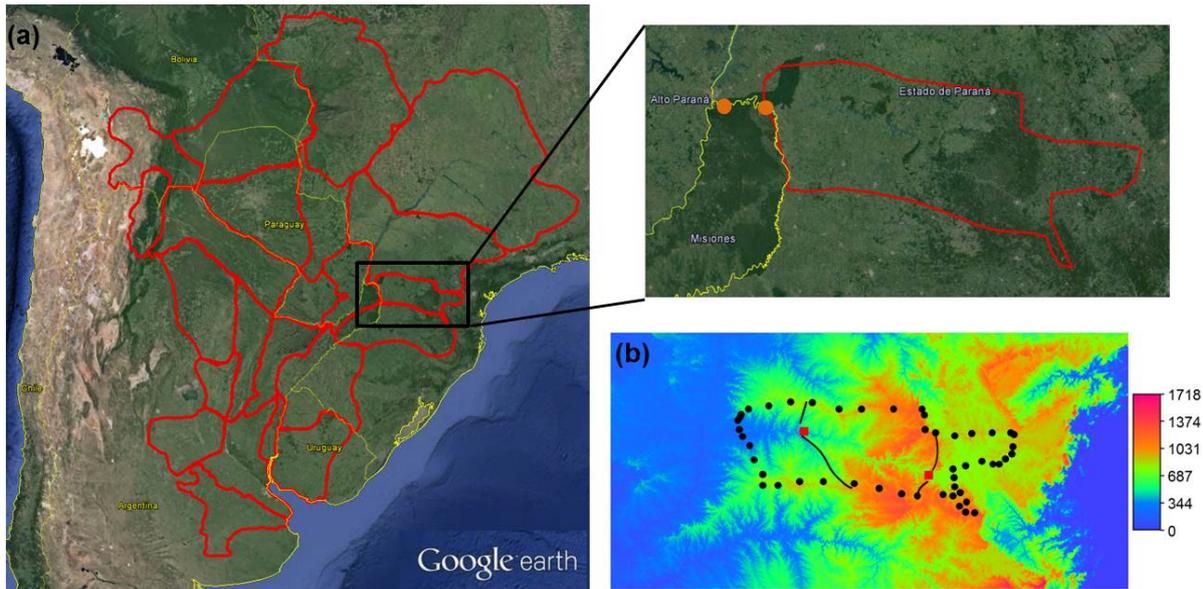


Figura 1: Región de estudio: (a) Sistema hidrológico de la Cuenca del Plata junto con la subcuenca del río Iguazú. En naranja se indica la posición del puerto Iguazú (oeste) y puerto Andresito (este). (b) DEM de la región de la cuenca Iguazú con el límite aproximado de la cuenca (puntos negros). Los puntos rojos y líneas negras llenas indican aproximadamente los límites de cada una de las secciones de la cuenca Iguazú. Desde la región este de la cuenca hasta el primer punto rojo (Uniao da Vitoria) se define la cuenca alta, desde esta ubicación hasta el siguiente punto rojo (Salto Osorio) se encuentra la cuenca media y finalmente, entre esta locación y la zona oeste se limita la cuenca baja.

en este trabajo se han utilizado los datos de caudal provenientes tanto del puerto Iguazú como Andresito, para analizar diferencias y/o similitudes en los resultados obtenidos en ambos puertos.

Los datos utilizados para el trabajo son las estimaciones de precipitación acumulada en 24 horas a partir del satélite TRMM Versión 3B42RT para la cuenca Iguazú y el caudal medio diario del puerto Iguazú ($54^{\circ} 34' 47.5''$ O y $25^{\circ} 35' 35.7''$ S) para el período 2001 – 2013, obtenido mediante la siguiente expresión de relación altura-caudal brindada por el INA:

$$Q = 15,1062H^2 + 534,337H + 2462 \quad (1)$$

donde Q es el caudal y H es el valor de altura registrado en el puerto. También se utilizaron los datos de caudal medio diario del puerto Andresito ($53^{\circ} 59' 42.0''$ O y $25^{\circ} 35' 26.0''$ S) para el período 2001 – 2013 obtenidos de la base hidrológica de la

Subsecretaría de Recursos Hídricos (http://www.hidricosargentina.gov.ar/acceso_bd.php).

La decisión de utilizar la estimación de precipitación TRMM en lugar de otra se fundamenta principalmente en que la misma tiene una disponibilidad acorde a los tiempos requeridos en tareas operativas, así como también una longitud temporal mayor que permite realizar estudios estadísticos. Cabe aclarar que si bien existen versiones corregidas de las estimaciones de precipitación realizadas a partir del satélite TRMM (como ser las Versiones 6 y 7 de 3B42), en este trabajo se utiliza la salida 3B42 “RT” (Real Time, por sus siglas en inglés) debido a que es el producto utilizado en forma operativa, y disponible en tiempo real, para las actividades de monitoreo diario de la precipitación en el Servicio Meteorológico Nacional. Las características principales del satélite TRMM son: resolución espacial de 0.25°

x 0.25°, resolución temporal de 3 hrs, dominio global de 50°N-50°S y disponibilidad de datos desde el año 1998.

Respecto de la calidad de las estimaciones satelitales de precipitación cabe señalar el trabajo de Salio y otros (2015), quienes evalúan el desempeño de seis estimaciones, entre ellas, TRMM Versión 3B42RT, utilizando datos diarios de precipitación para el período diciembre 2008 – noviembre 2010. Los autores encuentran para la región de interés del presente estudio una sobrestimación de la precipitación en la cuenca baja del río Iguazú, con valores de BIAS % entre +10 % y +30 %, mientras que en la cuenca alta estos valores disminuyen a -10 % y +10 %. En concordancia, en este trabajo se utilizó la información histórica de la estimación del satélite TRMM Versión 3B42RT disponible para calcular el valor del estadístico BIAS % en las estaciones del SMN (Iguazú y Bernardo de Irigoyen) pertenecientes a la cuenca del río Iguazú para el período 2001 – 2013, considerando la estimación satelital diaria en los puntos más cercanos a dichas estaciones. Dicho cálculo muestra valores acordes con los encontrados por Salio y otros (2015), entre -5 % y +5 %. Esto demuestra la importancia de conocer el error sistemático y las limitaciones de cualquier herramienta que se desee utilizar.

La metodología utilizada para el tratamiento de datos faltantes en la serie de caudales fue utilizar el promedio entre el día anterior y posterior para completar dichas carencias. La cantidad de faltantes corresponde aproximadamente a un 1 % del total de la serie. Sin embargo, en los casos en donde hubo cantidad de días sucesivos con dato faltante, se verificó que en ninguno de esos días se hubieran producido abundantes precipitaciones que pudieran haber afectado el caudal diario del puerto. En los casos particulares de junio del 2013 y 2014, también se utilizaron las observaciones pluviométricas provenientes de la red de monitoreo del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para la estación Iguazú Aero.

Con el objetivo de evaluar el tiempo de respuesta

hidrológica de la cuenca a la ocurrencia de precipitación, se analizó en primer lugar la correlación desfasada temporalmente para varios días (lags) entre la precipitación areal diaria y el valor de caudal diario observado en el puerto. La precipitación areal diaria consiste en sumar los valores de precipitación para cada punto de retículo dentro de la cuenca y así obtener un único valor diario para toda el área. Este procedimiento se repitió con la serie de diferencias diarias de caudal y se realizó para los puertos Iguazú y Andresito. Se utilizó la siguiente expresión para calcular el coeficiente de correlación desfasado (Wilks, 2006):

$$rd = \frac{\sum_{i=1}^{n-d} [(x(i) - \bar{x})(y(i+d) - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-d} (x(i) - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n-d} (y(i+d) - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

donde n es la cantidad de pares de datos totales, d es el desfasaje temporal (toma valores de 0 a 16), $x(i)$ es el valor de precipitación diario areal estimado, $y(i+d)$ es el valor diario de caudal (o de diferencias diarias de caudal) desfasado temporalmente, \bar{x} e \bar{y} , son los valores medios de la serie de precipitación diaria areal estimada y de la serie diaria de caudal (o de diferencias diarias de caudal) respectivamente.

Para evaluar la significancia de los coeficientes de correlación calculados se asumió distribución normal debido a la gran cantidad de datos utilizados. Los valores del coeficiente de correlación superiores a 0.028 y 0.037 son significativos al 95 % y 99 % respectivamente. Cabe aclarar que si bien la cantidad de datos totales cambia para cada coeficiente de correlación calculado (debido al desfasaje temporal de la serie), los valores críticos difieren en el cuarto decimal, motivo por el cual se decidió utilizar el mismo valor crítico para todos los casos.

En segundo lugar, con el objetivo de encontrar una relación espacio temporal entre la precipitación ocurrida en la cuenca del río

Iguazú y los valores de caudal diario en cada uno de los puertos, se calculó la correlación entre la precipitación diaria estimada TRMM Versión 3B42RT en cada punto de retículo contenido dentro de la cuenca del río Iguazú, y el caudal diario en los registros del puerto Iguazú y puerto Andresito. Por otra parte, para evaluar el tiempo de respuesta hidrológica de la cuenca a la ocurrencia de precipitación, se analizó la correlación desfasada temporalmente entre las variables mencionadas anteriormente en cada punto de retículo. De esta manera, se obtuvieron distintos campos de correlación desfasada a paso diario (desde lag 0 hasta lag 16).

Por último, a raíz de los resultados obtenidos, se realiza un estudio para dos eventos particulares de crecidas del río Iguazú, como fueron los ocurridos en junio de 2013 y junio de 2014, con el objetivo de corroborar el impacto de la precipitación sobre el caudal medio diario en el puerto Iguazú. Para ello se analizó la distribución espacial y temporal de la precipitación estimada y observada en relación al momento del pico de crecida en cada caso.

3. RESULTADOS

En primer lugar se presenta el análisis de la correlación desfasada temporalmente entre la precipitación areal diaria y el valor obtenido de caudal medio diario en el puerto, así como también con la serie de diferencias diarias de caudal para los puertos Iguazú y Andresito (Figura 2). Si bien los valores de correlación calculados resultan en su mayoría significativos al 95 % y 99 % para todos los lags (salvo algunas excepciones), se focaliza el estudio en los máximos valores de correlación obtenidos.

A partir de la Figura 2(a) para el caso del puerto Iguazú, se observan las mayores correlaciones en los lags 5, 6 y 7. Esto significa que la lluvia estimada para un día tiene mayor influencia en el caudal del río entre 5 a 7 días posteriores a la ocurrencia del evento de precipitación. A partir del día 7 el impacto de la precipitación en el caudal disminuye lentamente hasta que

a partir del día 12 se estaciona. También se observa un importante cambio entre el lag 0 (cuya correlación no resultó significativa), 1 y 2.

Al realizar la correlación entre la serie de precipitación diaria estimada y la serie de diferencias diarias de caudal (Figura 2 (c)) se observa que las mayores correlaciones ocurren en el lag 2 y 3. Esto significa que la lluvia ocurrida un día tiene mayor influencia en la tasa de cambio del caudal que registra el río Iguazú dentro de los tres días subsiguientes al evento de precipitación. Si bien este resultado no necesariamente tiene relación con un valor extremo en el caudal observado, es importante ya que tiene implicancia en el manejo de cuencas reguladas. En el caso de Andresito (Figura 2 (b) y (d)), se observa que el mayor impacto en el caudal del río tiene lugar entre 2 y 3 días después de ocurrido el evento de precipitación, mientras que el impacto observado en la tasa de cambio del caudal es más inmediato, tal como se observó para el puerto Iguazú.

A continuación se presentan los resultados de realizar el análisis espacio temporal entre la precipitación ocurrida en la cuenca del río Iguazú en cada punto de retículo y el valor de caudal diario en cada uno de los puertos.

La Figura 3 representa los campos de correlación desde lag 0 hasta lag 16 entre la precipitación estimada en los puntos de retículo del satélite TRMM pertenecientes a la cuenca del Iguazú y el caudal medio diario en el puerto Iguazú. La escala representada en la Figura 3 se define a partir del nivel de significancia al 95 % de 0.028. Las regiones en blanco indican que el coeficiente de correlación no es significativo al 95 %.

A partir de la Figura 3 se puede observar que las máximas correlaciones se dan principalmente en la mayor parte de la extensión de la cuenca media/alta en los lag 5, 6 y 7, con valores de coeficiente de correlación que se encuentran entre 0.15 y 0.20. Estos máximos se indican con un círculo rojo. Asimismo hay máximos locales absolutos que alcanzan valores de 0.19 (este

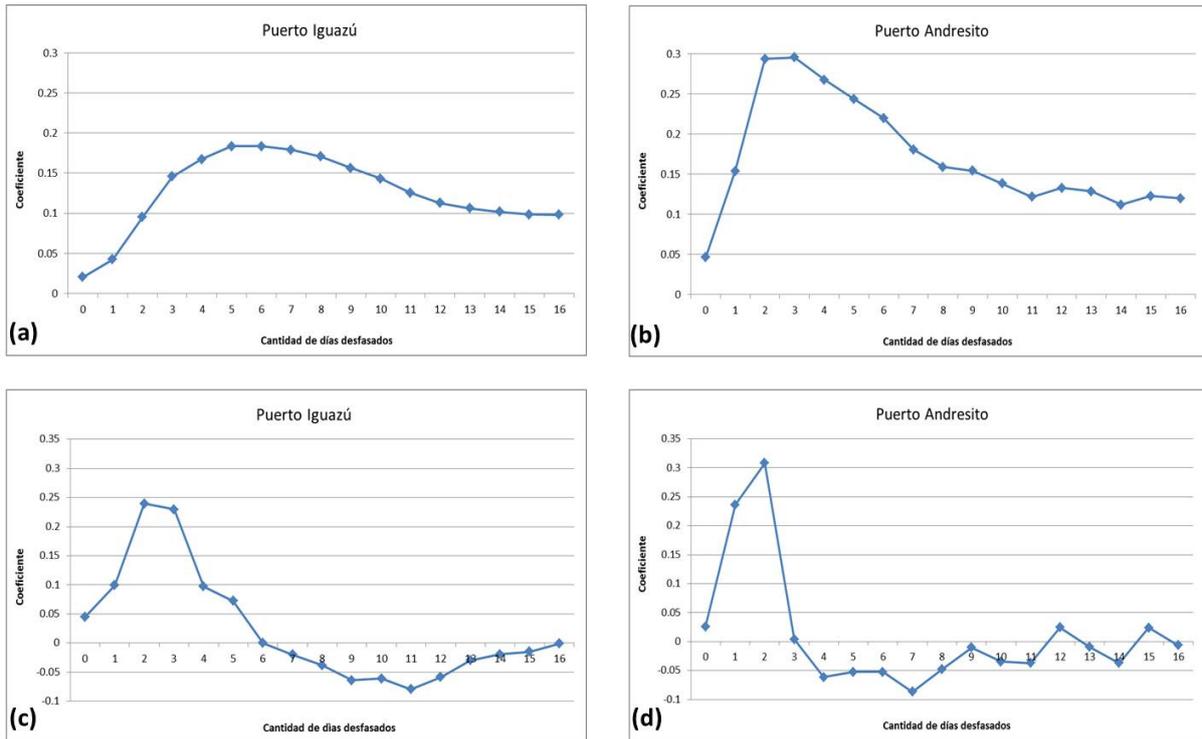


Figura 2: Coeficiente de correlación entre la serie de precipitación areal diaria estimada para la cuenca del río Iguazú y el valor diario de caudal del río para distintos lags obtenido en: a) puerto Iguazú, b) puerto Andresito. La serie desfasada corresponde a la de caudal. Coeficiente de correlación entre la serie de precipitación areal diaria estimada para la cuenca del río Iguazú y la serie de diferencia diaria de caudal del río para distintos lags obtenido en: c) puerto Iguazú, d) puerto Andresito. La serie desfasada corresponde a la de diferencia diaria de caudal.

valor no se detalla según la escala presentada en la Figura 3). Cabe mencionar que valores de correlación entre 0.15 y 0.20 se observan también en la región de la cuenca alta para los lags 4 y 8. También se observa un importante cambio entre el lag 0, 1 y 2, ya que entre el lag 0 y 2 hay un aumento del doble en la correlación espacio temporal, y en consecuencia, esta relación se convierte en significativa en toda la extensión de la cuenca. A partir del lag 11 en adelante, los valores de correlación disminuyen progresivamente de oeste a este, primero en la región de la cuenca baja, y luego en las cuencas media y alta, obteniéndose valores entre 0.05 y 0.10 en la mayor parte de la cuenca a partir del lag 14. Cabe recordar que los valores del coeficiente de correlación superiores a 0.028 y 0.037 son significativos al 95 % y 99 % respectivamente. Por lo analizado anteriormente,

se puede concluir que el caudal medio diario obtenido en el puerto Iguazú se encuentra mayormente influenciado por la precipitación estimada ocurrida en gran parte de la cuenca media/alta y entre 5 y 7 días después de ocurridos los eventos de precipitación. Sin embargo, vale destacar que las mayores correlaciones comienzan a aparecer a partir del lag 2, momento en el cual los valores se duplican con respecto al lag 0. Estos resultados son consistentes a los observados a partir del estudio de correlación realizado con la precipitación areal (Figura 2 (a)).

Análogamente se llevó a cabo el análisis realizado anteriormente para el puerto Andresito (Figura 4). La escala representada en dicha figura se define a partir del nivel de significancia al 95 % de 0.028. En este caso las mayores correlaciones se encuentran para los lags 2 y 3 (de forma

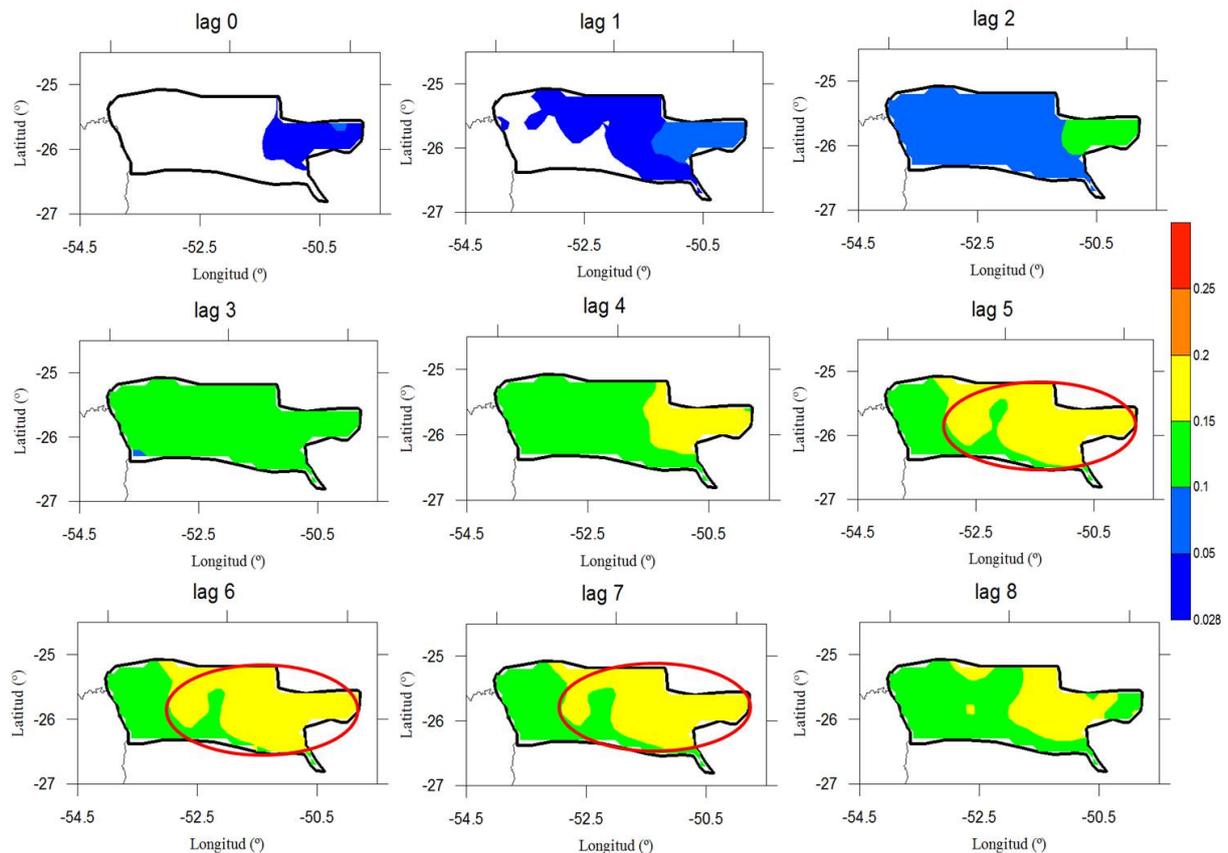


Figura 3: Campos de correlación entre la precipitación estimada en cada punto de retículo del satélite TRMM Versión 3B42RT dentro de la cuenca del Iguazú y el caudal medio diario en el puerto Iguazú. Las correlaciones van desde lag 0 (superior izquierda) hasta lag 16 (inferior). El rango de valores de correlación se define entre 0.028 y 0.30. Los círculos rojos indican la región de la cuenca en donde las correlaciones son máximas.

similar a lo concluido previamente en la Figura 2 (b)) y a lo largo de casi toda la extensión de la cuenca, con los máximos valores de correlación entre 0.25 y 0.30 para la cuenca media y alta (estos valores de correlación son superiores a los obtenidos para el puerto Iguazú). Para el lag 4 la región de máximos se acota a una zona más reducida, abarcando principalmente la cuenca alta y parte de la cuenca media, pero conserva altos valores de correlación en la mayor parte de la cuenca, superiores a 0.20. Entre el lag 5 y 8 se observa una disminución de la correlación de aproximadamente la mitad, alcanzando valores del orden de 0.10 en el lag 8. A partir del lag 9 se observan valores de correlación entre 0.05 y 0.15 con cierta variabilidad espacial, sin un patrón tan definido como en el caso de puerto Iguazú,

destacándose los menores valores de correlación situados en la región de la cuenca baja. Por lo tanto, los resultados indican una mayor relación entre la precipitación estimada en la región de la cuenca media y alta con el caudal del río Iguazú registrado en el puerto Andresito para la mayor parte de los lags mostrados en la figura, con un máximo de correlación entre los lags 2 y 3.

Por último, se lleva a cabo el análisis de las crecidas ocurridas en junio del 2013 y junio del 2014. El evento de crecida en el caso del 2013 ocurrió en la segunda mitad del mes, mientras que en el caso del 2014, en la primera mitad. Vale la pena destacar que en ambos casos hay ciertos patrones de circulación atmosférica, como ser la existencia de trenes de ondas

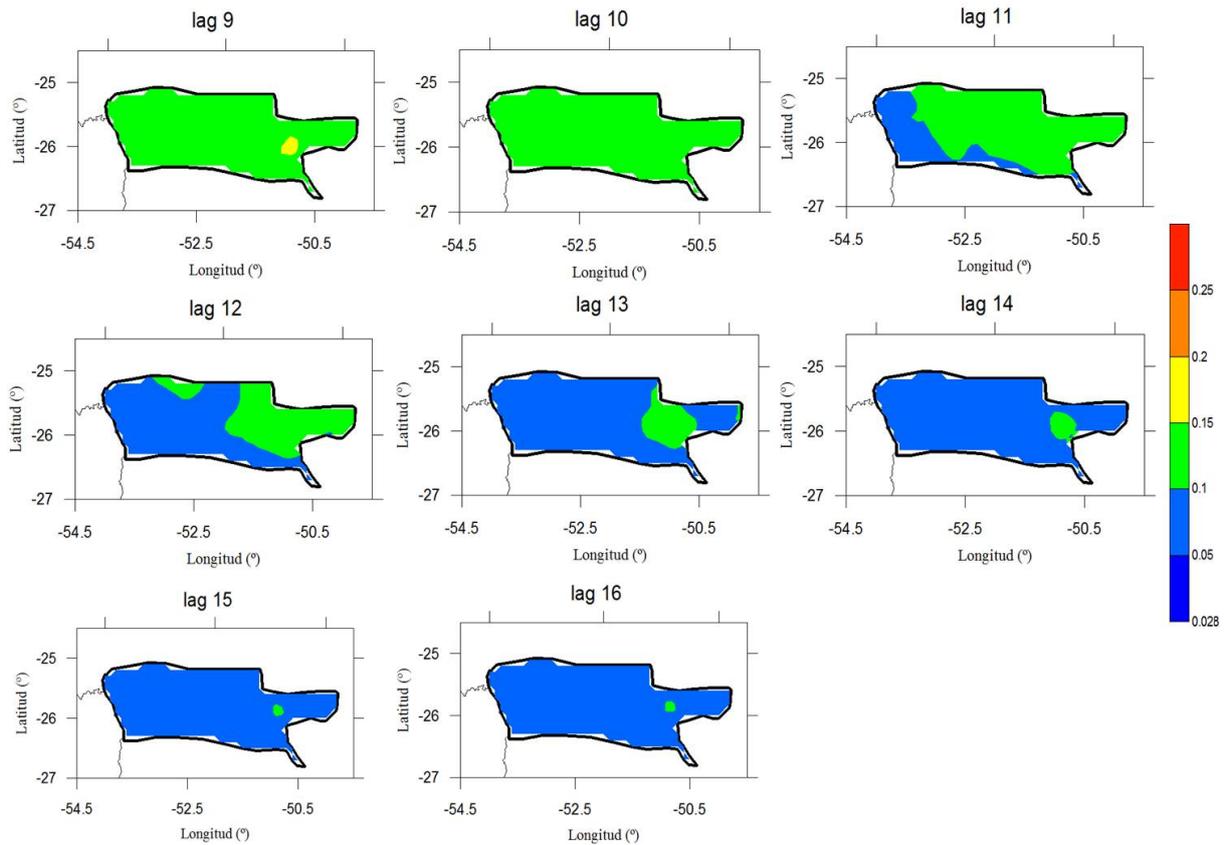


Figura 3: Continuación.

de Rossby y una importante actividad de la Oscilación de Madden Julian (MJO, por sus siglas en inglés) intensificando la variabilidad intraestacional (<http://cawcr.gov.au/staff/mwheeler/maproom/RMM/phasediag.list.htm>) en la región de estudio.

La Figura 5 (a), (b) y (c) muestra los campos diarios de precipitación estimada por el satélite TRMM Versión 3B42RT para los días 18, 19 y 20 de junio 2013. La Figura 5 (d) muestra la evolución temporal de la precipitación diaria observada en la estación Iguazú Aero (en barras) y la marcha del caudal medio diario en el puerto Iguazú (en línea) para el mes de junio de 2013. Cabe destacar que los valores de caudal registrados en el puerto Iguazú se encuentran influenciados también por el aporte del río Paraná, debido a la ubicación de la escala de medición de dicho puerto. Esto no sucede en el puerto Andresito, motivo por el cual hay

diferencias en los órdenes de magnitud de los caudales observados en ambos puertos.

A partir de la Figura 5 (d) se observa que, a pesar de que la estación Iguazú Aero registró precipitaciones de aproximadamente 100 mm para el día 18 de junio, el valor de caudal del puerto Iguazú no muestra un importante cambio hacia el día siguiente y lo mismo sucede entre los días 19 y 20 de junio. Observando la Figura 5 (a) se puede apreciar que la mayor cantidad de precipitación ha ocurrido en la cuenca baja, mientras que en la Figura 5 (b) el máximo de precipitación se presenta en la cuenca media. Por otro lado, el campo del 20 de junio (Figura 5 (c)), muestra un máximo generalizado de precipitación en la cuenca alta y media. A partir del día 20 de junio se observa un aumento importante del caudal diario en el puerto Iguazú (Figura 5 (d)), el cual se mantiene hasta llegar a su pico máximo de crecida aproximadamente el día

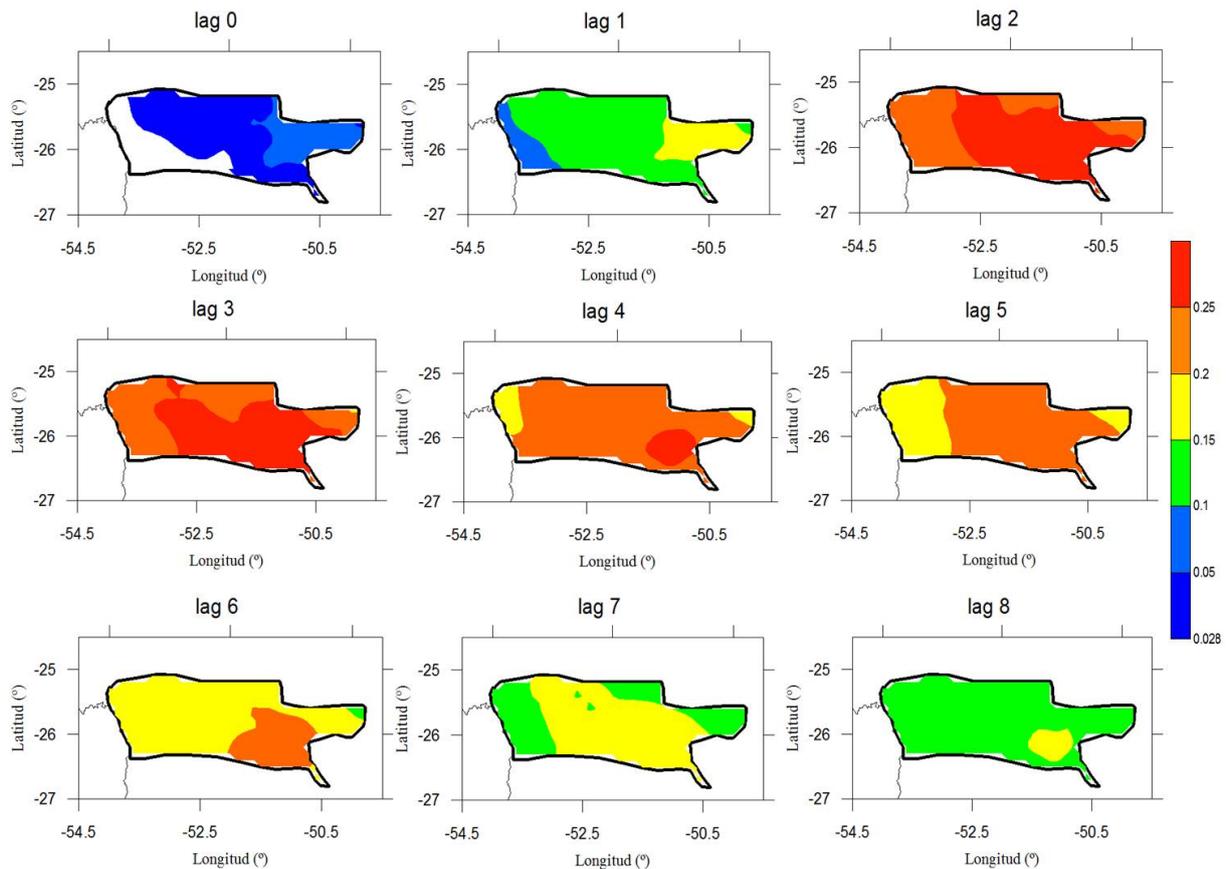


Figura 4: Campos de correlación entre la precipitación estimada en cada punto de retículo del satélite TRMM Versión 3B42RT dentro de la cuenca del Iguazú y el caudal medio diario en el puerto Andresito. Las correlaciones van desde lag 0 (superior izquierda) hasta lag 16 (inferior). El rango de valores de correlación se define entre 0.028 y 0.30.

27, una semana después de las precipitaciones registradas en la cuenca alta el día 20.

Análogamente se analizó el evento ocurrido en junio del 2014 (Figura 6). Las precipitaciones máximas que se produjeron en la cuenca alta y media, particularmente en la cuenca alta, sucedieron los días 07 y 08 de junio (Figura 6 (a) y (b)). A partir del día 08 se observa un importante aumento en el caudal medio diario en puerto Iguazú, hasta alcanzar su pico máximo el día 10 de junio (Figura 6 (d)), cuatro días después de ocurridas las precipitaciones mencionadas anteriormente en la cuenca el día 07. Luego, el caudal disminuye. Por otra parte, cabe destacar que a pesar de que el día 13 de junio se produjeron precipitaciones de casi igual magnitud que el día 07 en la estación Iguazú Aero, el valor de caudal

en el puerto no refleja una importante respuesta a las mismas. Por último, al observar el campo de precipitación del día 13 (Figura 6 (c)), se puede apreciar que las máximas precipitaciones se ubicaron en la parte más baja de la cuenca, sin contribuir a un aumento importante en el flujo de agua en el puerto.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a partir de la sección anterior para el puerto Iguazú permiten concluir que la lluvia areal estimada para un día tiene mayor influencia en el caudal del río entre 5 a 7 días posteriores a la ocurrencia del evento de precipitación, mientras que para Andresito el impacto tiene lugar entre 2 y 3 días después de ocurrido el evento de precipitación. En ambos

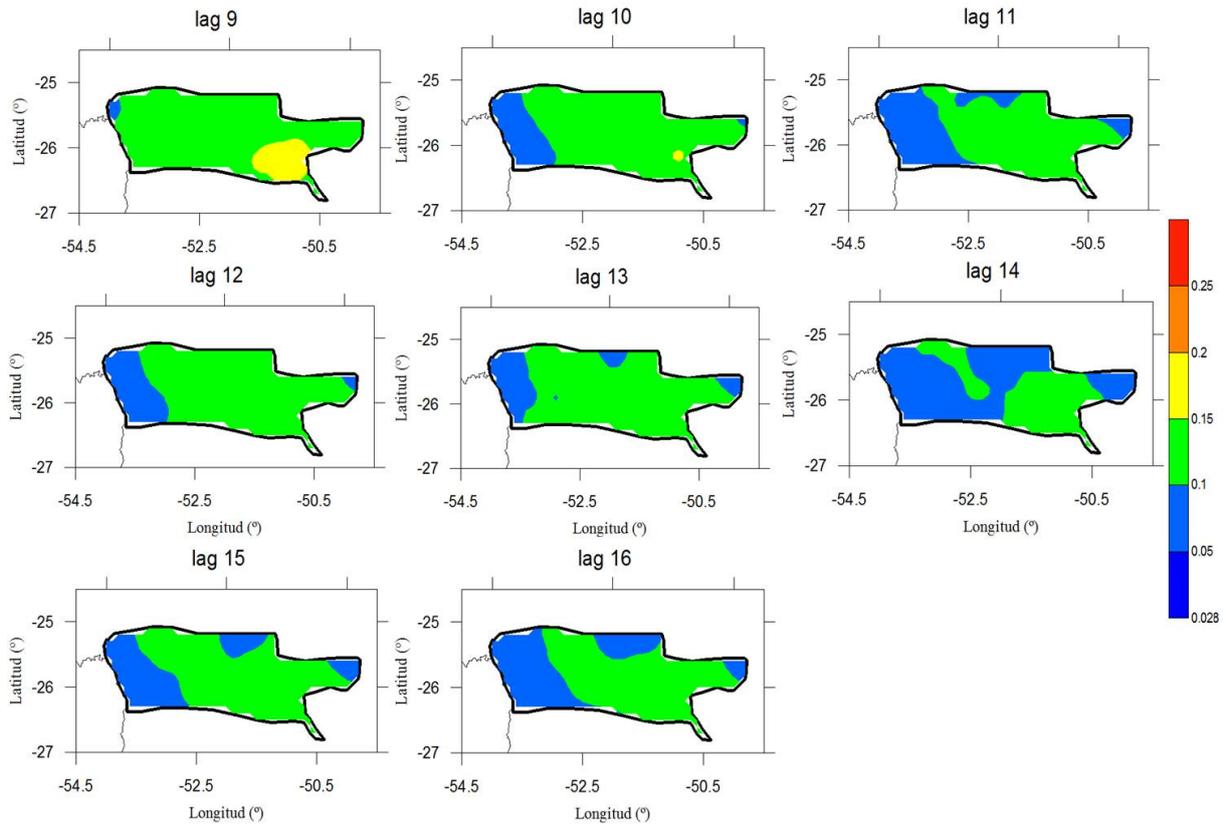


Figura 4: Continuación.

casos se observa que el impacto observado en la tasa de cambio del caudal es más inmediato. En este sentido, se observa que el caudal medio diario en el puerto Iguazú es más sensible a la precipitación diaria ocurrida en la región media/alta de la cuenca, principalmente entre 5 y 7 días después de ocurrido el evento de precipitación, similar al resultado obtenido en el análisis areal. Este efecto puede ser justificado por la topografía de la cuenca (ver Figura 1 (b)), que muestra una mayor altura del terreno en la zona de la cuenca alta, permitiendo un mayor escurrimiento del agua caída en esta zona. Por su parte, para el puerto Andresito, las mayores correlaciones fueron encontradas entre 2 y 4 días posteriores al evento de precipitación en casi toda la extensión de la cuenca, con los máximos valores en la cuenca media y alta. Se destaca la importancia de estos resultados desde el punto de vista operativo, dado que se pueden aplicar al monitoreo diario de precipitación y caudal de ríos, y contribuir a una toma de decisión tanto en

el manejo de cuencas como en potenciales eventos de inundación.

Por otra parte, el análisis de los casos particulares de crecidas de junio 2013 y junio 2014 evidencia resultados consistentes con los obtenidos a partir del análisis de correlación espacio temporal entre la precipitación diaria estimada y el caudal diario en el puerto a partir de 13 años de datos.

Por último, se remarca el rol de la circulación atmosférica en la ocurrencia de estos eventos de crecida del río Iguazú. Según Alvarez y otros (2014), quienes estudian el patrón principal de variabilidad intraestacional para el trimestre junio – julio – agosto (índice SIS_JJA), en la región del sudeste de Sudamérica y su relación con la precipitación diaria, encuentran para la estación Iguazú más de un 68.4 % de probabilidad que durante una fase positiva del SIS_JJA se produzcan eventos de 2 y 3 días consecutivos de lluvia. Este resultado podría estar asociado con

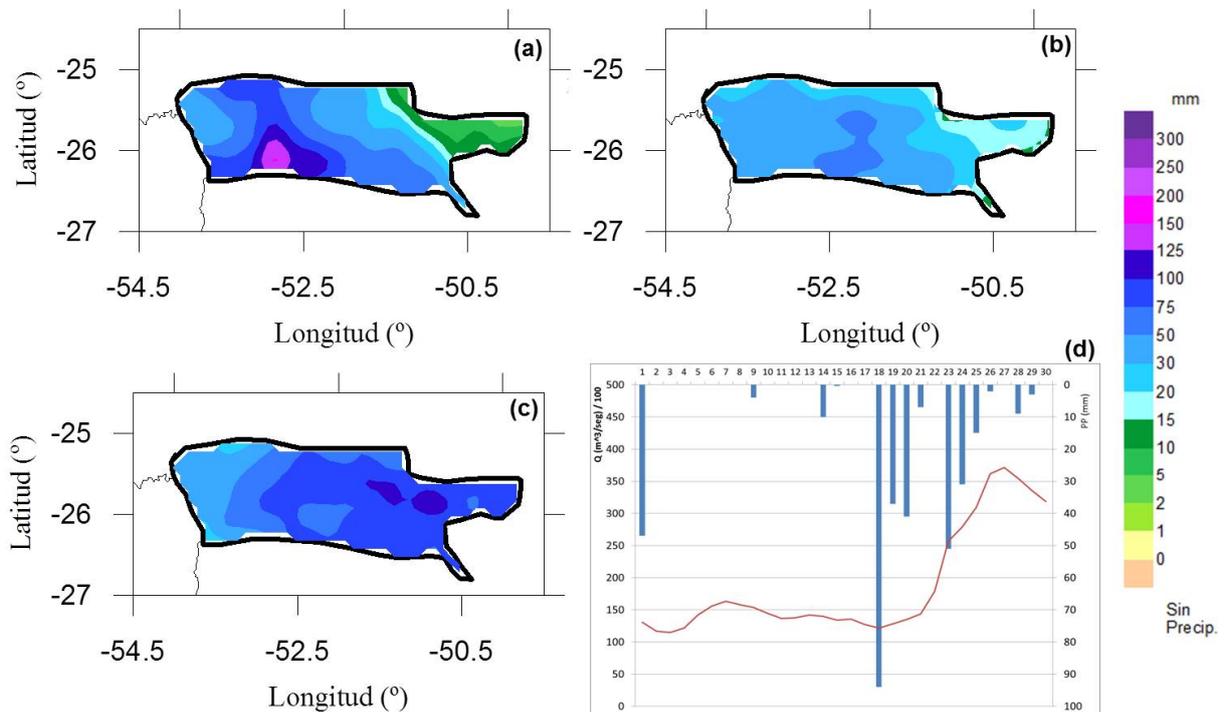


Figura 5: Campos de precipitación estimada por el satélite TRMM Versión 3B42RT en la cuenca del Iguazú y alrededores: (a) 18 de junio 2013, (b) 19 de junio 2013, (c) 20 de junio 2013 y (d) Precipitación diaria (barras azules) en mm y caudal medio diario (línea llena roja) en $10^2 \text{ m}^3/\text{seg}$, en la estación Iguazú Aero y el puerto Iguazú respectivamente, para junio 2013.

los casos analizados en este trabajo. De todas maneras, el análisis de esa relación excede los objetivos perseguidos en este trabajo.

A futuro se propone analizar esta misma metodología para distintas estimaciones satelitales de precipitación y para distintas cuencas. De esta manera, se busca obtener la respuesta hidrológica de otras cuencas y/o subcuencas de Argentina y por otro lado, realizar un estudio comparativo entre las estimaciones TRMM y otras estimaciones satelitales.

Agradecimientos: Al Ing. Juan A. Borús y parte de su equipo, Lic. Juan F. Bianchi, de la Dirección de Sistemas de Información y Alerta Hidrológico del Instituto Nacional del Agua, por proveer la información referente a la delimitación de las distintas secciones de la cuenca Iguazú y a la variabilidad de la serie histórica de caudales en

los puertos Iguazú y Andresito.

REFERENCIAS

- Alvarez M., Vera C., Kiladis G., and Liebmann B., 2014: Intra-seasonal Variability in South America during the Cold Season. *Climate Dynamics*, 42, 3253-3269.
- Barros V., Chamorro L., Coronel G. y Baez J., 2004: The major discharge events in the Paraguay River: Magnitudes, source regions, and climate forcings. *Jour. of Hydrometeorology*, vol 5, 1161-1170.
- Camilloni, I. y Barros, V., 2003: Extreme discharge events in the Paraná River and their climate forcing. *Jour. of Hydrology*, 278, 94-106.
- Cerrudo C., Díaz G. y Ferreira L., 2013: Evaluación preliminar de la precipitación estimada por satélite en un conjunto de subcuencas pertenecientes a la Cuenca del Plata. V Simposio Internacional de

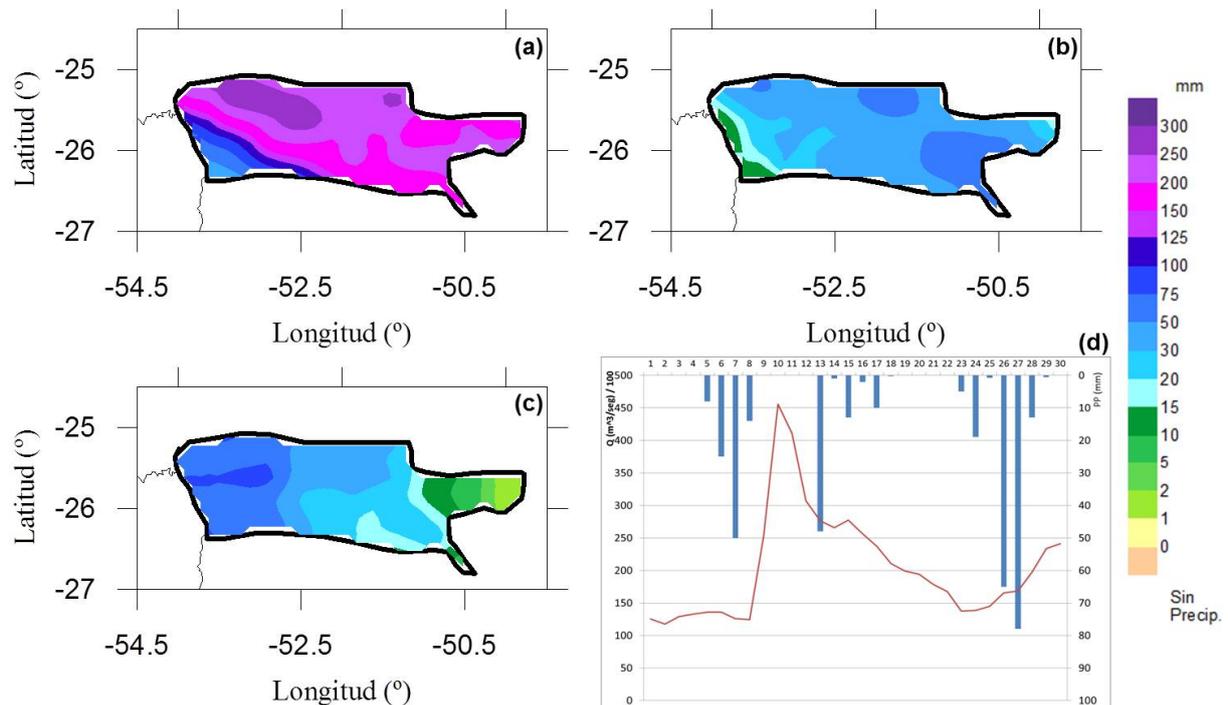


Figura 6: Campos de precipitación estimada por el satélite TRMM Versión 3B42RT en la cuenca del Iguazú y alrededores: (a) 07 de junio 2014, (b) 08 de junio 2014, (c) 13 de junio 2014 y (d) Precipitación diaria (barras azules) en mm y caudal medio diario (línea llena roja) en $10^2 \text{ m}^3/\text{seg}$, en la estación Iguazú Aero y el puerto Iguazú respectivamente, para junio 2014.

Climatología. Florianópolis, Brasil.

Chamorro L., 2006: Los principales usos y problemas de los recursos hídricos. El cambio climático en la Cuenca del Plata. Editores: Vicente Barros, Robin Clarke y Pedro Silva Dias. 1era edición. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). 232 p.

Goniadzki D. y Borús J., 2015: Monitoreo hidrológico de la cuenca del río Iguazú. Dirección de Sistemas de Información y Alerta Hidrológico. Instituto Nacional del Agua - Ezeiza, Argentina.

Hobouchian M. P., Salio P., Vila D. y García Skabar Y., 2012: Validación de estimaciones de precipitación por satélite sobre Sudamérica utilizando una red de observaciones de alta resolución espacial. XI Congreso Argentino de Meteorología. Mendoza, Argentina.

Latrubesse E. y Brea D., 2010: Floods in Argentina. Developments in Earth Surface Processes Volume 13, 2009,

Pages 333–349. Natural Hazards and Human-Exacerbated Disasters in Latin America.

Romero P. y González M., 2014: Relación entre caudales y precipitación en algunas cuencas de la Patagonia norte. 2do Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. 23 al 26 de septiembre de 2014. Santa Fe, Argentina.

Salio P., Hobouchian, M.P., GarcíaSkabar Y. y Vila D., 2015: Evaluation of high-resolution satellite precipitation estimates over southern South America using a dense rain gauge network. Atmospheric Research. 11/2014, 163. DOI: 10.1016/j.atmosres.2014.11.017.

Seneviratne S., Corti T., Davin E., Hirschi M., Jaeger E., Lehner I., Orlowsky B. y Teuling A., 2010: Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. Earth-Science Reviews 99.125-161.

Su F., Hong Y. y Lettenmaier D.P., 2008: Evaluation of TRMM Multisatellite

Precipitation Analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata Basin. *Jour. of Hydrometeorology*, 9, 4, 622-640.

Wilks D.S., 2006: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Second Ed., Elsevier Inc., 649 págs.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.