

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

DESAGREGACIÓN ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN OBTENIDA DE MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES DE PRONÓSTICO PARA TRES CUENCAS EN EL CENTRO DE CHILE

PAULO LUZZI¹
LINA CASTRO²

RESUMEN

En este trabajo se realiza una desagregación espacial de pronósticos de precipitación del modelo numérico de predicción CFSv2 (Saha et al., 2014), aplicando una metodología llamada SDBC (spatial disaggregation bias correction, por su sigla en inglés), la cual primero realiza una interpolación espacial de los pronósticos a los puntos de interés para luego aplicar el método de corrección de sesgo. Este estudio se realiza con información de 3 cuencas del centro sur de Chile ubicadas en las regiones de Valparaíso, la Metropolitana y la de O'Higgins, considerando un periodo de calibración del método desde 1995 hasta 2010 y un periodo de evaluación de resultados desde el 2011 al 2015. La desagregación espacial se desarrolló en 57 estaciones en la zona de estudio, abarcando todo el ancho del territorio Chileno. Los resultados muestran que al aplicar SDBC, se obtienen pronósticos corregidos con valores entre el 5 y el 10 por ciento de error respecto a los datos observados para años y meses de poca precipitación en toda la región, manteniéndose estos resultados en caso de grandes lluvias para la zona costera y el valle central. En caso de lluvias en la cordillera se produce una sobrestimación considerable para los meses de Junio y Agosto, teniendo un buen comportamiento en los meses de Julio. Los principales alcances del trabajo recaen en la obtención de pronósticos corregidos capaces de pronosticar correctamente la ocurrencia de la precipitación en toda la región con un grado de sobrestimación de los milímetros precipitados en la zona cordillerana. Sin embargo, se considera como un pronóstico conservador dado que puede emplearse en un sistema de alerta temprana ante inundaciones.

¹Paulo Luzzi, Escuela de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso –

²Lina Castro, Escuela de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso –

1. INTRODUCCIÓN

La precipitación impulsa los procesos hidrológicos continentales, y por lo tanto, es la variable más relevante para la evaluación de los recursos hídricos a nivel local, regional y global (Haberlandt, 2007; Hrachowitz & Weiler, 2011). Su comportamiento espacio-temporal y ocurrencia es de naturaleza compleja, depende de los patrones de circulación atmosférica, la localización y características geográficas del terreno, y del tipo de tormenta (convectiva, orográfica o frontal) (Hewitson & Crane, 2005; Hrachowitz & Weiler, 2011). Es por esto, que la capacidad de predecir los eventos de precipitación es de mucha importancia para proyectos de ingeniería relacionados con el ámbito hidrológico, como lo son la estimación de crecientes, diseño de canales y de embalses.

En la actualidad existen modelos de predicción disponibles a nivel global que permiten disponer de muchas variables climáticas, hidrológicas e hidrogeológicas para un plazo de pronóstico que va desde los 3 días hasta los 9 meses. El uso de esta información, especialmente la precipitación, permitirá predecir la magnitud y la temporalidad de la misma para su uso en modelos hidrológicos o sistemas de alerta temprana. Sin embargo, esta información obtenida de modelos de predicción requiere un análisis previo. De hecho, los pronósticos se entregan en distintos intervalos de tiempo, tienen una escala espacial gruesa comparada con el tamaño de las cuencas aportantes, siendo muchas veces su valor no representativo para escalas locales. Es por ello, que es necesario evaluar los productos numéricos de predicción disponibles a nivel global, compararlos con las observaciones históricas y aplicar un método de desagregación tal que la escala espacial de los productos quede a la escala necesaria para la operación de los sistemas hidrológicos y de los sistemas de alerta temprana.

Hoy en día los métodos de desagregación pueden ser del tipo dinámico o estadístico (Trzaska & Schnarr, 2014). El dinámico es de características más complejas de aplicar debido a que requieren de un modelo climático regional para desagregar la información obtenida de modelos numéricos de predicción globales. Los métodos estadísticos emplean información histórica observada en estaciones de monitoreo, y se aplican diversas funciones estadísticas para corregir el sesgo y escalar los productos a nivel de estación. Los métodos estadísticos no requieren grandes recursos computacionales y pueden ser aplicados si existe una buena base de datos histórica del lugar de estudio. En este trabajo se aplica un método de desagregación espacial estadístico en el centro sur de Chile.

2. ZONA ESTUDIO

La zona de estudio abarca tres regiones de la zona central de Chile, la V región, la Metropolitana y la VI Región como se ve en la Figura 1. Toda esta zona se caracteriza por tener un clima mediterráneo clasificado en templado cálido con lluvias invernales y estación seca prolongada (Dirección Meteorológica de Chile, 2001). La V región de Valparaíso se encuentra ubicada entre las coordenadas 32°02' y 33°57' de latitud sur y 70°00' de longitud oeste y tiene una precipitación anual promedio de 370mm (Servicio Meteorológico de la Armada de Chile, 2014). La Región Metropolitana está ubicada en las coordenadas latitud 33.45°S y longitud 70.64°O, en la depresión intermedia entre la cordillera de la costa y la cordillera de Los Andes, las lluvias

ocurren en su mayoría en invierno con alrededor de 313 mm de promedio anual (Dirección Meteorológica de Chile, 2007). La VI región de O'Higgins ubicada entre los 34° y los 35° de latitud sur con un régimen pluviométrico que presenta valores de 600 mm. en la costa y 1000 mm. en la zona andina de promedio anual. (Dirección Meteorológica de Chile, 2001)

Dentro de la zona de estudio hay 76 estaciones pluviométricas con registros de precipitaciones diarias, 5 de las cuales son propiedad de la dirección meteorológica de Chile y 71 de la Dirección general de Aguas. 52 estaciones se encuentran en la Región Metropolitana, 13 en la Región de Valparaíso y 11 en la Región del libertador Bernardo O'higgins. Luego de realizar un análisis exploratorio de datos, se determinó disminuir el periodo de estudio histórico de 1982-2010 al periodo de 1995-2010 debido a que el periodo más lejano reunía información poco representativa comparada con los años más recientes. Además, este análisis permitió reducir a 57 las estaciones utilizadas para el estudio, debido a que se examinaron los datos outliers (sesgados) y porcentajes de datos faltantes por año, lo que permitió seleccionar las estaciones con información más confiable. La ubicación de las estaciones se puede observar en la Figura 1.

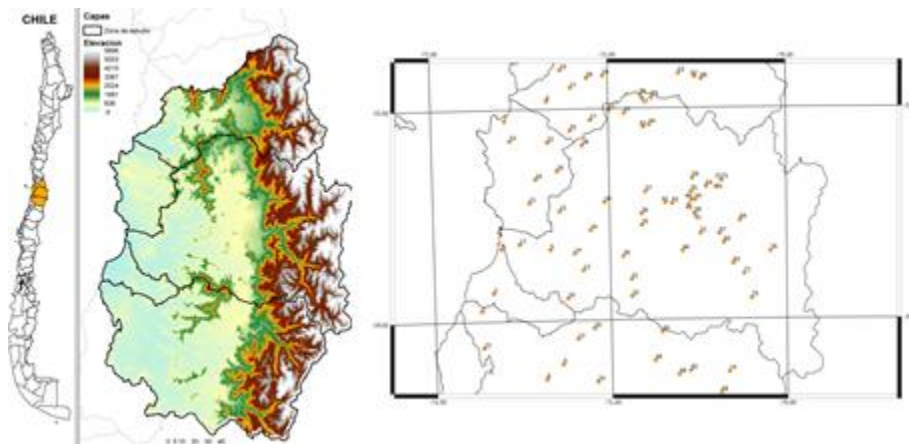


Figura 1. Zona de estudio y estaciones.

Productos Climáticos

Los productos que se utilizarán corresponden a los generados por el Climate Forecast System versión 2 (CFSv2) de la NOAA/NCEP, más específicamente CFSv2Reforecast y CFSv2Operational. Los datos obtenidos de CFSv2Reforecast tienen una resolución de 1° (100 km aprox.) y se entregan cada 5 días con 4 ciclos distintos que inician a las 0-6-12-18 UTC en el periodo de 1982 a 2010. Estos permitirán realizar la comparación de los datos históricos pronosticados con los datos históricos observados para realizar el método estadístico de desagregación y corrección SDBC. Por su parte, CFSv2Operational brindará los datos necesarios para evaluar la calidad del método estadístico utilizado en el periodo 2011-2014. Estos datos también son entregados con una resolución de 1°, y se utilizarán los que se generan todos los días del periodo a las 0-6-12-18 UTC a 9 meses al futuro.

3. METODOLOGÍA

Para realizar la corrección de sesgo se utilizó la metodología SDBC como lo postula Hwang et al. (2014). En dicha metodología, primero se realiza una desagregación espacial (spatial disaggregation - SD) de los puntos de pronósticos del NWP hasta los puntos de interés, en nuestro caso las estaciones, y luego una corrección de sesgo (bias correction - BC) con algún método estadístico. Para la interpolación se decidió usar el método de la distancia inversa (Inverse Distance Weighted - IDW), para estimar la precipitación diaria pronosticada en cada estación a partir de la precipitación pronosticada en los puntos de CFSv2 dentro de un radio de influencia de 110 km. En tanto para la corrección de sesgo se utilizó el método estadístico Quantile Mapping (QM) que se calcula como muestra la Ecuación (1).

$$x_s = CDF_{obs}^{-1}(CDF_{pron}(x_g)) \quad (1)$$

donde CDF son las curvas de frecuencia acumulada de los grupos de datos observados (CDFobs) y pronosticados (CDFpron). Con estas funciones se establece la transformación para generar la desagregación espacial del valor x_g obtenido de un NWP y llevarlo a la escala deseada como el valor x_s siendo este más aproximado a las observaciones reales. Este proceso se realiza para todas las estaciones a una escala diaria de todo el periodo de estudio. En la Figura 2 se muestra un esquema metodológico utilizado para corregir los datos.

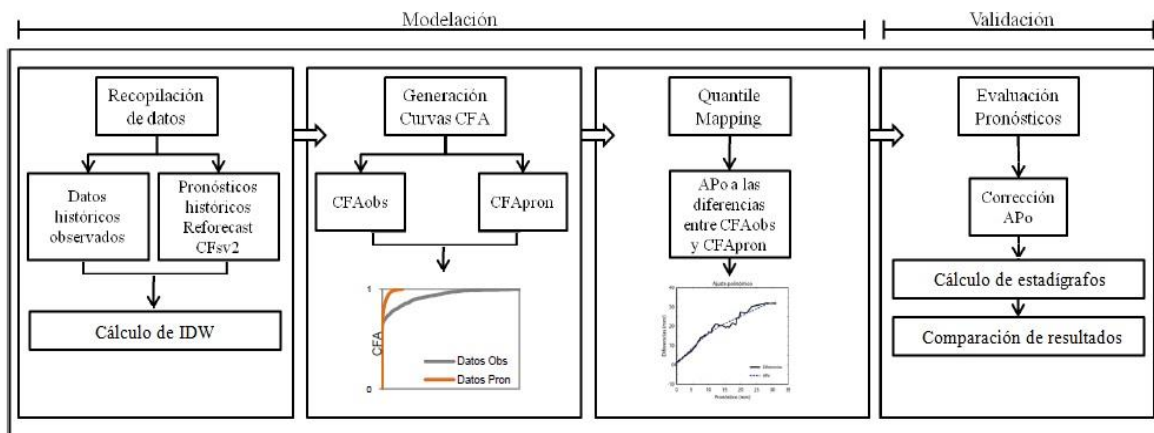


Figura 2. Esquema metodológico corrección pronósticos perteneciente al Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, PUC (2016).

Luego de interpolar los pronósticos diarios a cada estación y obtener los datos observados de cada una de estas, se realiza la corrección de sesgo con QM. Para las CDFobs se consideran todos los datos diarios de precipitación mayor a 0 mm y para las CDFpron se consideran todos los datos diarios de precipitación mayor a 0.1 mm. Una vez ordenados los datos por mes, se ordenan de menor a mayor y se les asigna una probabilidad de excedencia a través del método de Weibull (plotting position), generando las curvas. Luego se obtiene la diferencia entre las curvas CDFobs y CDFpron a la cual se le aplica un ajuste polinómico (APo) de quinto grado para obtener una curva representativa (Brocca et al., 2011). La Ecuación 2 muestra el cálculo del APo:

$$P_c = AP_o(P_{MNP}) \quad (2)$$

Donde AP_o son los coeficientes del ajuste polinómico, P_{MNP} son los pronósticos del NWP y P_c es el valor de corrección del pronóstico. Finalmente, se obtienen los coeficientes de la curva de las diferencias para cada estación y cada mes de estudio. Para la parte de validación, primero se realiza el IDW de los puntos de pronóstico con los valores diarios de CFSv2Operational que correspondan a cada estación para luego sumarles los resultados al aplicar con AP_o , obteniendo así, el pronóstico corregido y luego compararlo con el dato observado en cada estación para cada día del periodo de estudio.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de los resultados se hizo para todas las estaciones de la región de estudio, pero en esta primera sección se muestran los resultados de 3 de las 57 estaciones, una ubicada en la costa, en el valle y la cordillera, las cuales a su vez presentan registro de datos completo para el periodo 2011-2015, situación que entrega seguridad en sus resultados. De la zona costera se consideró la estación Rapel, del valle central la estación Tobaraba y de la zona cordillerana la estación Embalse el Yeso. En el análisis se consideran los datos observados del período, los datos entregados CFSv2Operational interpolados a escala diaria sin corregir referidos como SD y los datos entregados CFSv2Operational interpolados y corregidos denominados SDBC. Las Figuras 3, 4 y 5 muestran la precipitación observada y pronosticada por SDBC y SD en el mes de Julio 2011 para Rapel, Tobaraba y El Yeso respectivamente.

Los resultados de la Figura 3 muestran que ambos pronósticos tienen la habilidad de predecir la ocurrencia y no ocurrencia de la precipitación, alcanzado a predecir correctamente el 83% de los días que no hubo precipitación. Además, en los 7 días que si hubo precipitación, los pronósticos logran predecir 5 días mostrando un 71% de efectividad en sucesos de ocurrencia. Los días en los que se pronostica precipitación y esta no se observa son solo 4 en el mes y todos los pronósticos son inferiores a 5 mm, lo que no representa un mayor error. Al revisar la magnitud de las precipitaciones observamos que SD subestima todos los días de precipitaciones observadas, mostrando diferencias del orden de 15 mm.

Los pronósticos SDBC y SD en la Figura 4 presentan un 83% de eficiencia para pronosticar los 5 días de precipitación observada en el mes. Respecto a los días en donde no se observa precipitación, tanto SDBC como SD pronostican correctamente 23 de los 26 días donde no hubo lluvia, alcanzando un 88% de efectividad. SDBC sobrestima la magnitud de la precipitación observada en 4 de los 5 días de lluvia, alcanzando la mayor holgura el día 14 con 10mm de diferencia positiva. El día que subestima la precipitación observada, SDBC muestra una diferencia negativa de 12 mm precipitados.

En la Figura 5 se muestran los resultados respecto a la cantidad de días precipitados son similares a las estaciones analizadas anteriormente, mostrando una efectividad de un 100% por parte de ambos pronósticos para predecir los días de lluvia. También se observa una buena habilidad al predecir la no ocurrencia de precipitaciones, alcanzando SDBC un 88% de efectividad y SD un 92%. Respecto a las diferencias en la magnitud precipitada entre los pronósticos y los datos

observados, nuevamente SD muestra una subestimación en todos los días de lluvia. SDBC por su parte, sobrestima 4 de los 6 días precipitados. Las diferencias positivas alcanzan un valor promedio de 12 mm aproximadamente y las negativas tienen su mayor valor en el día 24 alcanzando 35 mm de diferencia. Estos resultados nos indican que ninguno de los pronósticos muestra una habilidad para predecir las magnitudes diarias de precipitación en esta estación.

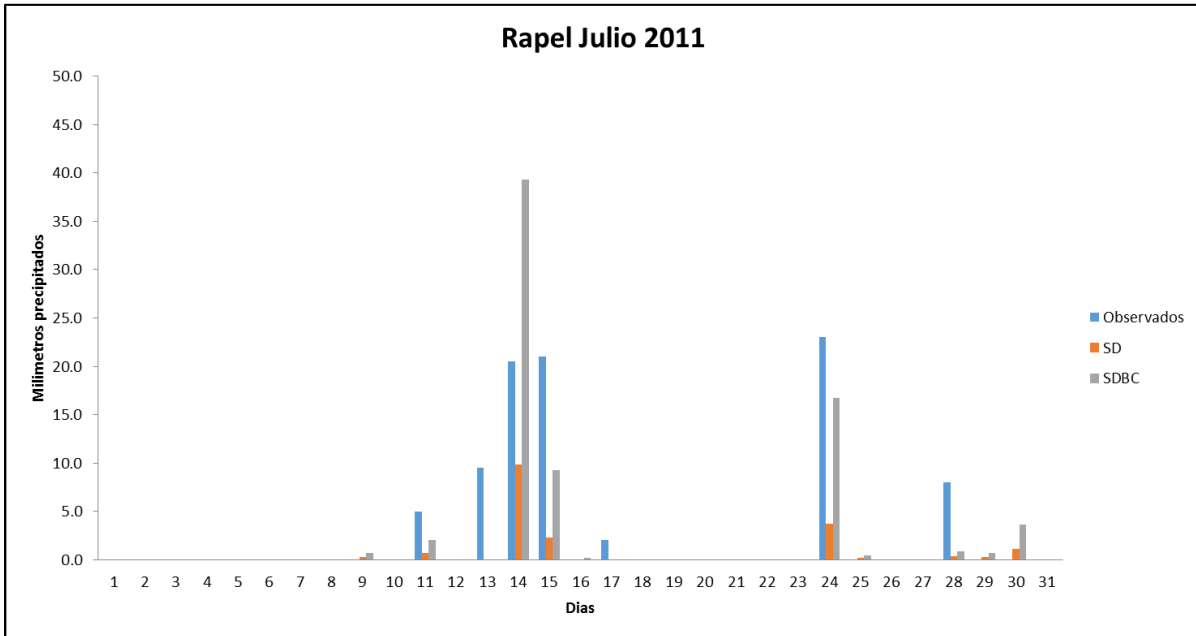


Figura 3. Precipitación diaria estación Rapel Julio 2011.

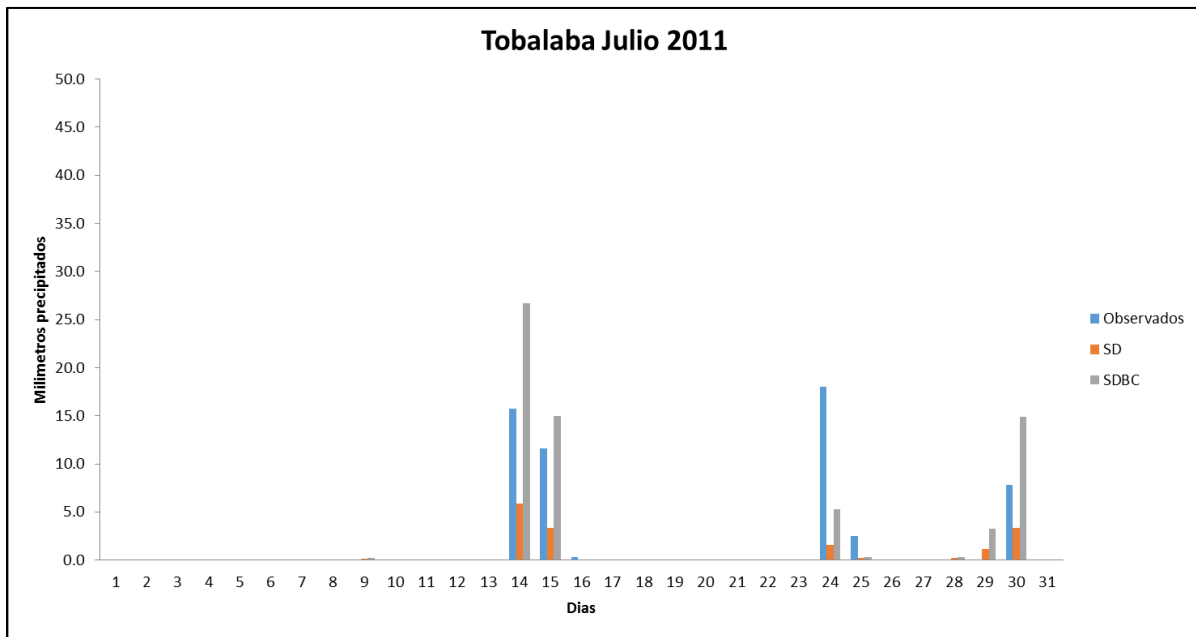


Figura 4. Precipitación diaria estación Tobalaba Julio 2011.

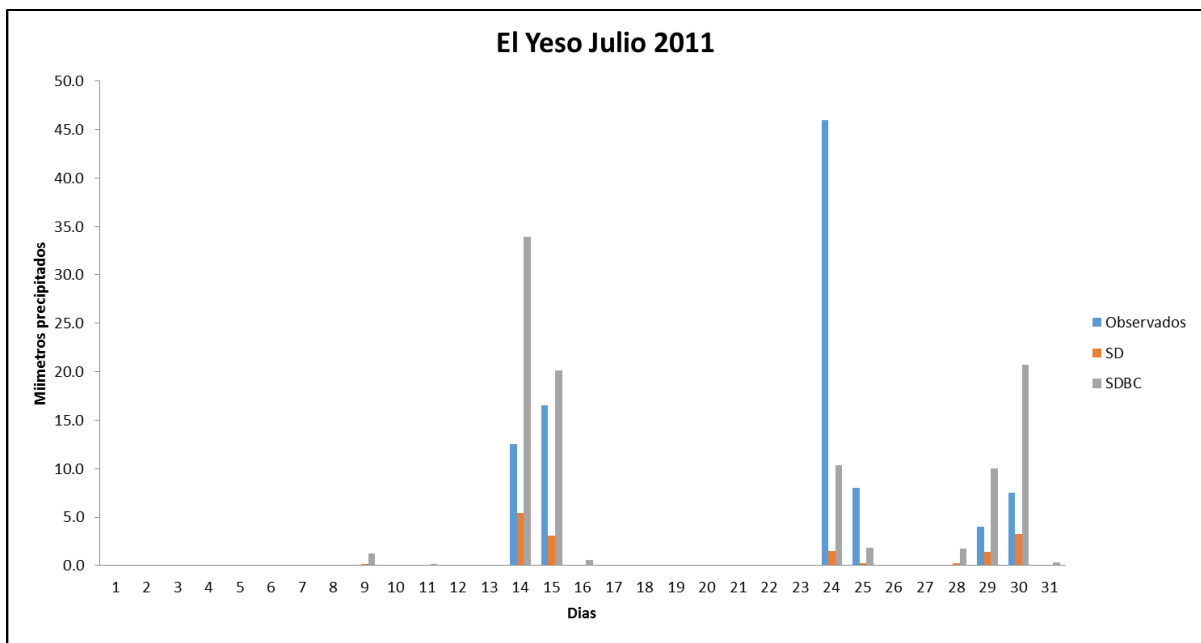


Figura 5. Precipitación diaria estación El Yeso Julio 2011.

En la Tabla 1 se pueden observar los resultados del nivel de ocurrencia en porcentaje de los días que se pronostica precipitación respecto a los días donde se observa precipitación y la precipitación acumulada en milímetros de SD y SDBC. Además, se muestra la precipitación observada acumulada en milímetros para cada mes de Julio dentro del periodo 2011-2015 de las 3 estaciones antes mencionadas. Tanto SD y SDBC muestran un buen nivel de acierto respecto a los días en que si precipita, como se observó en el análisis previo, sin embargo la principal diferencia se produce en las magnitudes de los pronósticos de milímetros precipitados. Los pronósticos corregidos mediante SDBC tienen la capacidad de aproximarse mucho más a los datos observados para los años lluviosos 2011, 2014 y 2015. En el análisis diario se observa que los pronósticos fluctúan subestimando y sobrestimando los datos observados, alcanzando una mayor estabilidad en los valores acumulados sobre todo en las estaciones de Rapel y Tobalaba. En El Yeso se observa que el año 2014 SDBC tiende a sobrestimar en demasía los milímetros precipitados, aunque se considera que este resultado está más conservador que le obtenido por SD debido a que está del lado de la seguridad.

En las siguientes Figuras se muestran tormentas específicas del periodo de validación en las 3 estaciones mostradas a modo de ejemplo, analizando el comportamiento diario de los pronósticos. Se observan el promedio observado y pronosticado para cada estación y los resultados de RMSE (error medio de la raíz cuadrada, por su sigla en inglés) considerando los tres días de altas precipitaciones. Cabe destacar que en todas las situaciones de lluvia, se observa que los pronósticos predicen correctamente la ocurrencia de esta.

Tabla 1. Resultados de los meses de Julio entre 2011-2015 estaciones Rapel, Tobaraba y El Yeso.

Rapel					
Años	SD		SDBC		Observado
	Ocurrencia %	Acumulado mm	Ocurrencia %	Acumulado mm	
2011	71.00	18.72	71.00	73.83	89.00
2012	0.00	1.10	0.00	3.12	0.00
2013	63.00	11.24	100.00	46.45	60.00
2014	100.00	15.75	100.00	59.98	41.00
2015	100.00	23.55	100.00	94.51	92.00
Tobaraba					
Años	SD		SDBC		Observado
	Ocurrencia %	Acumulado mm	Ocurrencia %	Acumulado mm	
2011	83.00	15.76	83.00	65.96	55.90
2012	0.00	1.44	0.00	2.42	0.00
2013	71.00	5.21	86.00	18.95	7.30
2014	100.00	10.27	100.00	38.07	32.50
2015	83.00	15.08	83.00	63.77	49.40
El Yeso					
Años	SD		SDBC		Observado
	Ocurrencia %	Acumulado mm	Ocurrencia %	Acumulado mm	
2011	100.00	15.28	100.00	101.06	94.50
2012	0.00	1.60	0.00	12.42	0.00
2013	100.00	5.32	100.00	38.78	33.40
2014	63.00	10.21	88.00	71.25	43.30
2015	86.00	14.86	100.00	98.43	100.50

En la Figura 6 se puede ver una Tormenta que afecta a la estación de Rapel en 3 días del mes de Junio de 2014. Al observar el comportamiento diario de los pronósticos, se vuelve a repetir la subestimación en magnitud de SD y los resultados más efectivos por parte de SDBC evidenciados en las Figuras 3, 4 y 5. Vemos que en cada día SDBC obtiene resultados muy cercanos a los observados, subestimando 1 día y sobrestimando 2 por valores no mayores a 5 mm. Esto se ve reflejado en el promedio de la Tormenta donde SDBC sobrestima solo por 3 mm los datos observados y SD pronostica solo 9.3 mm precipitados. Los valores de RMSE alcanzan un valor de 6.5 mm de error medio por parte de SDBC, muy inferior a los 28 mm de SD evidenciando aún más la mayor precisión de los pronósticos corregidos.

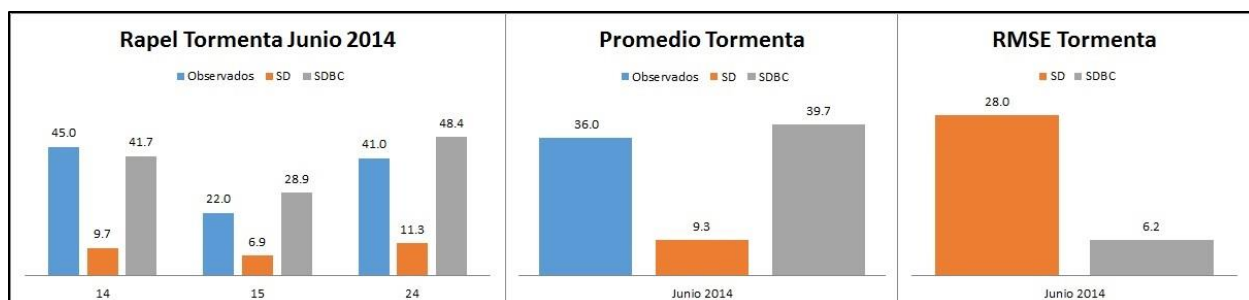


Figura 6. Precipitación acumulada, RMSE y promedio de Tormenta estación Rapel Junio 2014.

En la Figura 7 podemos observar una Tormenta que afecta a la estación de Tobaraba en 3 días del mes de Julio de 2011. En esta estación se observa una mayor irregularidad por parte de los pronósticos de SDBC, marcando diferencias en 2 días cercanas a los 10 mm con los datos observados y alcanzando un valor de RMSE de 10.1 mm durante la tormenta. Este resultado aun así es más conservador que el de SD, que nuevamente subestima los datos observados y alcanza un valor promedio de 4 milímetros precipitados, muy por debajo de los 13.3 mm observados durante la tormenta. Estos resultados muestran que a pesar que los valores diarios no son muy acertados por parte de SDBC, al considerar un periodo de días analizados se obtienen mejores resultados en cuanto a magnitud respecto a SD.

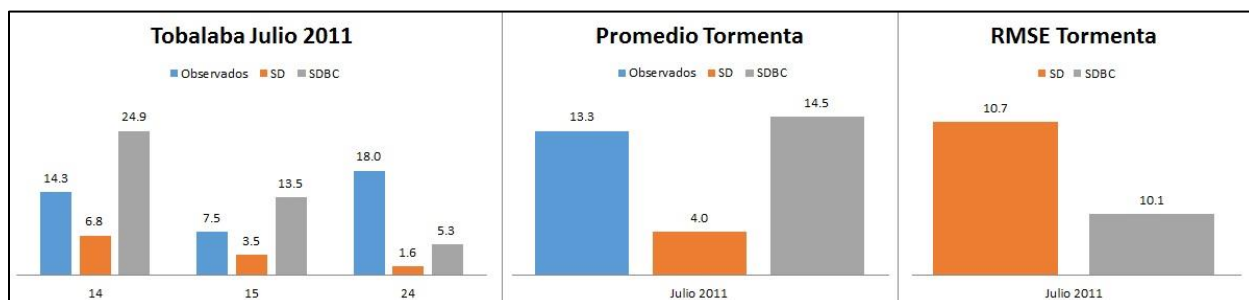


Figura 7. Precipitación acumulada, RMSE y promedio de Tormenta estación Tobaraba Julio 2011.

En la Figura 8 observamos una Tormenta en la estación El Yeso en 3 días del mes de Julio de 2015. Al igual que en el análisis diario y acumulado realizados anteriormente, vemos que en la estación de mayor altitud se obtienen errores en la magnitud de la precipitación pronosticada. SDBC subestima los valores observados, obteniendo un promedio de la Tormenta de casi 9 mm inferior a lo observado. Por su parte los valores de SD presentan un RMSE de 28 mm y un promedio de Tormenta de solo 3.4 mm, muy por debajo de lo observado reafirmando que en cuanto a magnitud, SDBC obtiene resultados mucho más acertados.

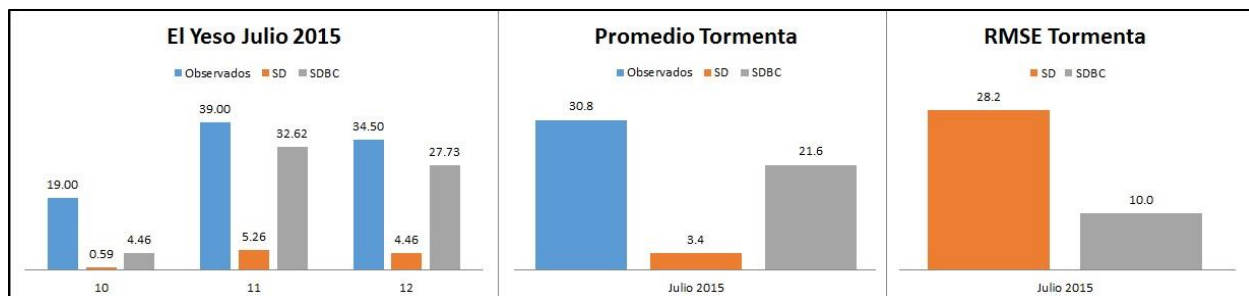


Figura 8. Precipitación acumulada, RMSE y promedio de Tormenta estación El Yeso Julio 2015. Fuente: Elaboración propia.

Por último, en la Figura 9 se ve la distribución espacial de valores de RMSE a nivel diario para el mes de Julio de los años 2011, 2013 y 2015. En tonos amarillos observamos valores de error medio entre los 0 y los 14 mm y en colores más rojizos observamos valores desde los 21 hasta los 35 mm. Los resultados de RMSE muestran que para los tres años observados los valores de error medio son del orden de 7 mm, sin presentarse una gran diferencia entre las estaciones de la costa, el valle y la cordillera. Considerando estos resultados y lo analizado anteriormente, se puede decir que si bien los valores de RMSE son parejos, la mayor diferencia entre lo pronosticado y lo observado se evidenciará en los sectores donde exista mayor cantidad de días precipitados. Esto es debido a que mientras más días se registre precipitación, esto producirá un incremento en la diferencia entre lo pronosticado por SDBC y lo observado.

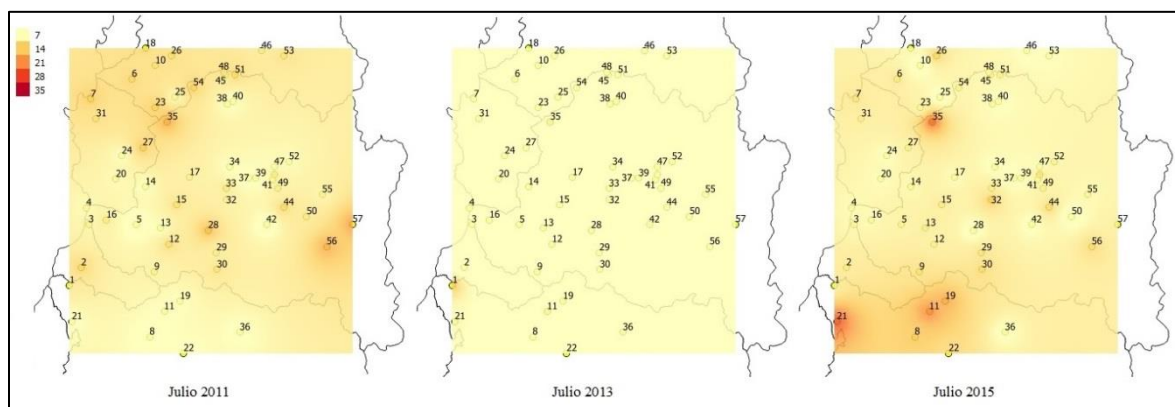


Figura 9. Distribución espacial en la zona de estudio de los resultados de RMSE en Julio 2011, 2013 y 2015.

5. CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos al aplicar la corrección de los pronósticos son certeros respecto a los datos observados para toda la zona de estudio para días y meses donde hubo poca o nula precipitación, al igual que para días de lluvia en la zona costera y el valle central. En la zona cordillerana los pronósticos no son muy precisos en días y meses lluviosos, sobrestimando en cantidad de días y milímetros precipitados los datos observados. A pesar de esto, el método SDBC mejora los pronósticos originales que entrega el modelo numérico CFSv2, y tiene la

habilidad de predecir las ocurrencias de los eventos y la magnitud de los mismos en una muy buena proporción. Por lo tanto, se puede decir que se obtienen resultados satisfactorios utilizando el método SDBC en la zona central de Chile.

AGRADECIMIENTOS

Al Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Pontificia Universidad Católica de Santiago por su colaboración y al estudio previo “Desarrollo de un sistema integrado para el pronóstico de caudales en cuencas de montaña para la operación de centrales hidroeléctricas” desarrollado por esta institución.

BIBLIOGRAFIA

Brocca, L., S. Hasenauer., T. Lacava., F. Melone., T. Moramarco., W. Wagner., W. Dorigo., P. Matgen., J. Martínez-Fernández., P. Llorens., J. Latron., C. Martin, y M.Bittelli. 2011. Soil moisture estimation through ASCAT and AMSR-E sensors: An intercomparison and validation study across Europe. *Remote Sensing of Environment*, 115, 3390–3408.

Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, PUC (2016). Pronóstico Meteorológico con fines de pronóstico hidrológico. *Fondef IT13I20037*.

Dirección Meteorológica de Chile. (2001). *Climatología Regional*.

Dirección Meteorológica de Chile (2007). *Climatología de ciudades*. Recuperado de http://www.meteochile.cl/climas/climas_localidades.html#santiago

Haberlandt, U. (2007). Geostatistical interpolation of hourly precipitation from rain gauges and radar for a large-scale extreme rainfall event. [Article]. *Journal of Hydrology*, 332(1-2), 144-157. doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.06.028

Hrachowitz, M., & Weiler, M. (2011). Uncertainty of Precipitation Estimates Caused by Sparse Gauging Networks in a Small, Mountainous Watershed. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(5), 460-471.

Hwang, S., & Graham, W. D. (2014). Assessment of alternative methods for statistically downscaling daily GCM precipitation outputs to simulate regional streamflow. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 50(4), 1010-1032.

Saha, Suranjana and Coauthors, 2014: The NCEP Climate Forecast System Version 2 Journal of Climate J. Climate, 27, 2185–2208. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>

Servicio Meteorológico de la Armada de Chile. (2014). Obtenido de Informe Pluviométrico Diario por Ciudad: http://meteoarmada.directemar.cl/site/pluvio/ipdcs/201406/ipdc1_20140604.html

Trzaska & Schnarr, USAID (2014). A Review of Downscaling Methods for Climate Change Projections. AFRICAN AND LATIN AMERICAN RESILIENCE TO CLIMATE CHANGE (ARCC). Burlington, Vermont, United States Agency for International Development 56.