

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

XX CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA

ANALISIS COMPARATIVO DE LA PRECIPITACION OBTENIDA DE SENSORES REMOTOS CON REGISTROS PLUVIOMETRICOS EN LA REGION BIO BIO.

LINA MABEL CASTRO HEREDIA¹
MARCELO MIRANDA²
BONIFACIO FERNANDEZ³

RESUMEN

La precipitación es una variable crucial en la modelación hidrológica. Sin embargo, la actual red pluviométrica de Chile, como la de la mayoría de países en Latinoamérica, es escasa y no logra cumplir con el mínimo exigido por la OMM; por lo tanto, cualquier estimación espacial presenta un alto grado de incertidumbre. No obstante, una adecuada estimación espacial de la precipitación proporciona simulaciones y pronósticos de caudales más precisos. La teledetección o los sensores remotos podrían convertirse en la solución a la escasez o nula información en regiones poco monitoreadas de Chile. El presente trabajo busca realizar una comparación entre las estimaciones hechas por sensores remotos y los registros pluviométricos de la DGA a nivel diario, mensual y estacional. Para ello, se realizó un análisis espacial con semivariograma y semivariograma cruzado, se estimó estadígrafos de comparación como el sesgo, RMSE y el coeficiente de correlación de Pearson, y también se usó estadística categórica para analizar la correspondencia o no los eventos en ambas fuentes de información. El análisis espacial con semivariograma muestra como a medida que crece el nivel de agregación temporal mejora la representación espacial del fenómeno; mientras que las estimaciones obtenidas por teledetección, dada por la forma de captura de la información, muestran estructura y dependencia espacial en todos los niveles temporales estudiados. Los estadígrafos y los resultados categóricos encontrados muestran una subestimación en las estimaciones por teledetección de alrededor del 50 %, pero con un coeficiente de correlación que aumenta por encima de 0.8 a medida que el nivel de agregación temporal aumenta.

¹Estudiante PhD, Programa de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Pontificia Universidad Católica de Chile - mail: lecastro@uc.cl

²Profesor Asistente, Departamento de Ecosistema y Medio Ambiente. Pontificia Universidad Católica de Chile - mail: mmirands@uc.cl

³Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Pontificia Universidad Católica de Chile - mail: bfernand@ing.puc.cl

1. INTRODUCCION

La precipitación es una variable crucial en la modelación hidrológica debido a que es el origen del agua en las cuencas e influye en procesos hidrológicos como la infiltración, la escorrentía, la acumulación y derretimiento de nieve. La modelación hidrológica requiere información pluviométrica actualizada y con la mejor resolución posible para la simulación y predicción de caudales, sobre todo si se trata de modelos hidrológicos distribuidos. Sin embargo, la alta variabilidad espacial y temporal, y la intermitencia en la ocurrencia de los eventos de precipitación, hace necesario tener una alta densidad de estaciones de medición si se pretende tener una alta precisión en la distribución espacial de la precipitación. En Chile, las estaciones meteorológicas son escasas y en su mayoría se encuentran ubicadas sobre el valle central. Lo anterior impide realizar una evaluación precisa de la distribución espacial de la precipitación sobre el territorio y más aún sobre la Cordillera de Los Andes, donde nacen los principales ríos de Chile pero donde existen la menor cantidad de estaciones pluviométricas. Una posible solución a este problema es usar información meteorológica obtenida de sensores remotos, fuente de información valiosa para capturar la precipitación y entender el comportamiento terrestre de la misma en regiones sin estaciones de medición o de difícil acceso como es algunas regiones de la Cordillera de los Andes.

En años recientes, las estimaciones de precipitación obtenidas por sensores remotos de alta resolución (cada 3 horas, y $0,25^\circ$ a nivel espacial) están disponibles para todo el mundo y de forma gratuita en entidades como la NASA (<http://trmm.gsfc.nasa.gov/>). Esta información es una mezcla de datos Geosincronicos en la región Infrarroja (Geo-IR) con estimaciones de microondas pasivas (MW – microwave) (Sapiano 2010). La información que tiene la NASA, disponible para uso público, se encuentra resumida con el nombre de Análisis de Precipitación Multisatelite de la Misión de Medición de Precipitación Tropical (TMPA, Tropical Rainfall Measuring Mission Multisatellite Precipitation Analysis) (Huffman et al. 2007). Otras fuentes de información pluviométrica son: PERSIANN (Precipitation Estimation form Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks) del Centro de Hidrometeorológica y Sensores remotos de la Universidad de California (<http://chrs.web.uci.edu/>) (Hsu and Sorooshian 2008), y el CMORPH del Centro de Predicción Climática de la NOAA (CPC MORPHing technique) (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/janowiak/cmorph_description.html) (Joyce et al. 2004). Sin embargo, en este estudio se usó la información disponible en la página de la NASA ya que fue fácil y practico obtener los datos que se requerían, y además presenta un formato de trabajo compatible con las herramientas computacionales tradicionales que usan sistemas de información geográfica. TMPA está disponible de forma gratuita con cobertura global entre los 50°N y 50°S . Sin embargo, las estimaciones provenientes de los sensores también presentan incertidumbre debido a los algoritmos de estimación usados para obtener la precipitación y a las características de los sensores usados para la captura (Hossain and Huffman 2008; Scheel et al. 2010).

Dada la oportunidad que se tiene de descargar datos de precipitación desde sensores remotos, o también llamada teledetección, vale la pena evaluar esas estimaciones con la precipitación registrada en las estaciones de medición sobre el terreno. Comparar las dos fuentes de información puede ser un reto considerando la diferencia en escala espacial para cada una de las dos fuentes. Mientras la información satelital es obtenida en pixeles de

0,25°*0,25°, representando un promedio de lo observado en esa área, la información adquirida en terreno representa lo medido en un punto en el espacio que ocupa algunos centímetros cuadrados. Además, la captura de la información por parte de los satélites se hace de forma instantánea en un instante de tiempo, lo que representa una desventaja pues la precipitación registrada en estaciones pluviométricas representa la lluvia acumulada en un periodo de tiempo, usualmente diario.

El presente trabajo tiene como objetivo comparar las estimaciones de TMPA y los registros de la DGA (Dirección General de Aguas) a escala temporal diaria, mensual y estacional (periodo húmedo y seco) en la región del Bio Bio. Para ello, se realizó un análisis de la variabilidad espacio temporal de ambas fuentes de información usando el Semivariograma, se estableció el grado de relación espacial entre ellas usando el semivariograma cruzado y el correlograma cruzado, y se cuantificó el nivel de similitud por medio de estadígrafos y tablas de contingencia. En este trabajo se usó el producto de la NASA TRMM 3B42 V.6 (0.25° x 0.25°, precipitación diaria) y el producto TRMM_3B43 (0.25° x 0.25°, precipitación mensual) con el propósito de compararlas con los registros de 48 estaciones pluviométricas ubicadas en la región del Bio Bio.

2. Zona de estudio

La región del Bio Bio está ubicada en el Centro - Sur de Chile y contiene las cuencas del río Bio Bio y del río Itata (Figura 1). La región presenta un área de aproximadamente 36000 km² y está entre los límites latitudinales 36°15'S y 38°24'S y límites longitudinales 71°07'W y 73°34'W. El relieve de la región está conformado por la Cordillera de Los Andes al este, la depresión central, la Cordillera de la Costa al oeste y la plataforma costera adyacente. La diversidad morfológica y altitudinal del lugar permite que exista un régimen nival en las zonas medias y altas de la cuenca, mientras las zonas bajas se caracterizan por un régimen de lluvias con precipitaciones anuales de 1300 mm (DGA 2004). El clima está fuertemente influenciado por la Cordillera de Los Andes con una disminución de la temperatura y un aumento de la precipitación con la elevación. La región del Bio Bio se caracteriza por un clima templado con un periodo seco que va de Octubre a Marzo, y un periodo húmedo entre Abril y Septiembre. La precipitación en la cuenca es principalmente de carácter frontal caracterizado por un régimen de lluvias generalizadas sobre toda la cuenca de baja intensidad y larga duración.

A pesar de la extensión de la cuenca con casi 36000 km² de área y la importancia que tiene la misma en el sector agrícola e hidroeléctrico, sólo cuenta con 48 estaciones de precipitación (Figura 1), lo que da una densidad de una estación por cada 730 km². Según, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en terrenos montañosos se requiere por lo menos un pluviómetro por cada 25 km² y en terrenos planos uno cada 50 km². Como se observa en la Figura 1, la distribución geográfica de las estaciones de precipitación es algo densa en la depresión central y bastante dispersa en la Cordillera de Los Andes o en la cabecera de la cuenca. La poca densidad de estaciones dificulta cualquier intento por realizar interpolación con métodos geoestadísticos como el Kriging con el propósito de distribuir la precipitación sobre el territorio. Lo que dificulta así mismo, su incorporación a modelos hidrológicos del tipo distribuido y/o agregado. Es por ello importante buscar otras

fuentes de información sobre todo en regiones con escasa densidad pluviométrica o de difícil acceso, y la información obtenida por teledetección podría ser la respuesta.

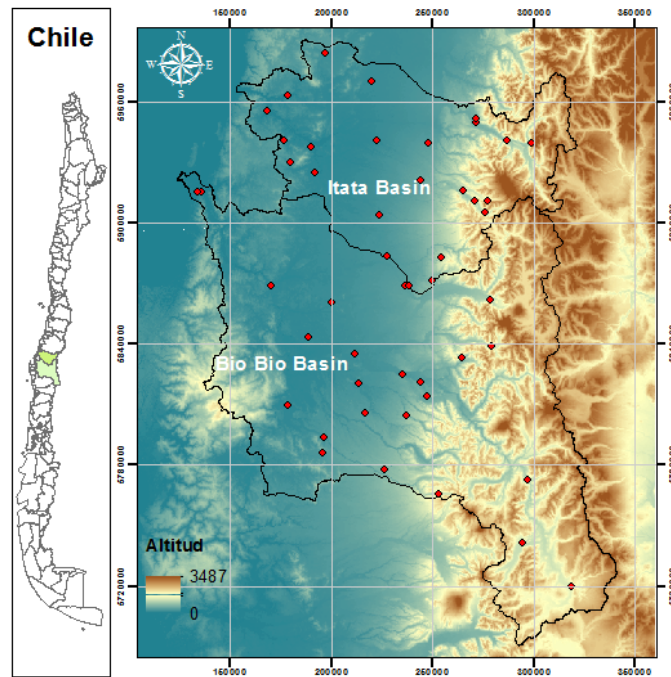


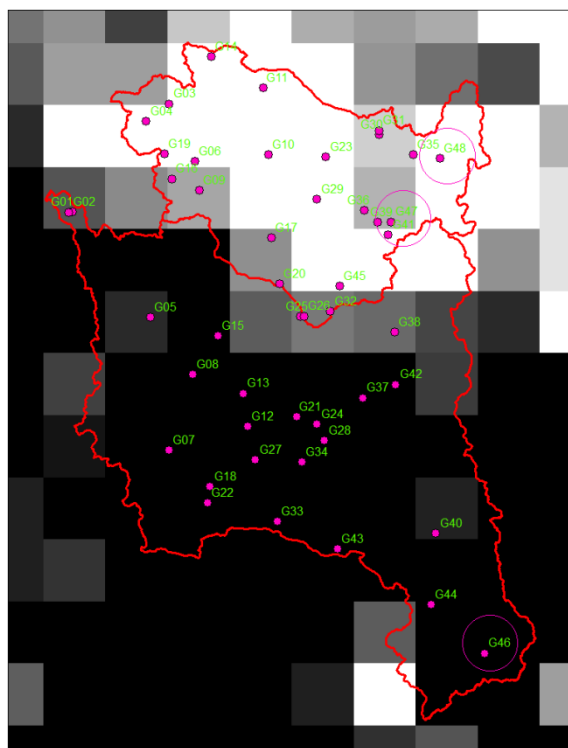
Figura 1.- Localización de la region del Bio Bio.

3. DESCRIPCION DE LA INFORMACIÓN

La información pluviométrica en la región del Bio Bio fue suministrada por la Dirección General de Aguas (DGA) conforme a un convenio de cooperación entre ésta entidad y la Pontificia Universidad Católica de Chile. El periodo de estudio comprende desde el 1 de Enero de 2008 y 31 de Mayo de 2010, periodo en el cual los datos faltantes no superaron el 4% del total de datos diarios utilizados. Las estaciones pluviométricas se encuentran en su mayoría (36 de 48 estaciones) sobre el valle central en alturas comprendidas entre los 0 msnm y los 700 msnm en una cuenca que tiene parte de la cordillera de los Andes con alturas que van hasta los 3500 msnm. La Figura 2 muestra la distribución, nombre y elevación de las estaciones ordenadas por elevación desde la más baja (G01, Rio Bio Bio en Desembocadura) a la más elevada (G48, Caman).

Los productos TMPA, específicamente las imágenes TRMM están disponible desde finales de 1997 y desde la fecha se han convertido en el instrumento más importante de evaluación de precipitaciones, tormentas y procesos climáticos en los trópicos (Adler et al. 2007). TMPA proporciona productos calibrados a partir de la combinación de estimaciones de múltiples satélites y estaciones de medición cuando éstas están disponibles (Huffman et al. 2007). Las fuentes de información de los productos TMPA provienen de dos regiones del espectro electromagnético: microondas e infrarrojo. La información adquirida en el rango del microondas pasivas es recolectada por una serie de satélites de baja órbita incluyendo el Microwave Imager (TMI) ubicado en el TRMM, el Special Sensor Microwave Imager (SSM/I) sobre el conjunto de satélites del DMSP (Defense Meteorological Satellite

Program), el Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System (AMSR-E) en el satélite Aqua, y el Advanced Microwave Sounding Unit-B (AMSU-B) sobre los satélites NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Por otra parte la información del canal infrarrojo visible es obtenida de la constelación de satélites GEO (Geosynchronous Earth Orbit) (Huffman et al. 2007).



Nombre	Estación	Altitud (m)
G01	BIOBIO EN DESMBOCADURA - DCP	5
G02	CONCEPCION DGA	16
G03	SAN AGUSTIN DE PUÑUAL	23
G04	COELEMU	32
G05	LAJA	35
G06	NUEVA ALDEA	52
G07	ANGOL (LA MONA)	59
G08	LOS ANGELES	86
G09	CHILLANCITO	88
G10	CHILLAN VIEJO	98
G11	MILLAUQUEN	109
G12	MULCHEN	118
G13	SAN CARLOS DE PUREN	149
G14	MANGARRAL	154
G15	LAS ACHIRAS FUNDO	160
G16	CANCHA LOS LITRES	165
G17	PEMUCO	181
G18	COLLIPULLI	182
G19	RAFAEL	205
G20	CHOLGUAN	212
G21	QUILACO	221
G22	ERCILLA VIDA NUEVA	250
G23	COIHUECO EMB	275
G24	BIO-BIO EN RUCALHUE - DCP	276
G25	RIO LAJA EN TUCAPEL - DCP	297
G26	TUCAPEL	327
G27	PILGUEN	332
G28	CERRO EL PADRE	368
G29	MAYULERMO	390
G30	ÑUBLE EN SAN FABIAN 2 - DCP	433
G31	SAN FABIAN	467
G32	TRUPAN	491
G33	ENCINAR MALLECO	498
G34	POCO A POCO	533
G35	CARACOL	604
G36	DIGUILLIN	690
G37	QUILLAILLEO	719
G38	Abanico	770
G39	ATACALCO FUNDO	828
G40	BIO-BIO EN LLANQUEN - DCP	839
G41	SAN LORENZO FUNDO	860
G42	SAN LORENZO BIO-BIO	882
G43	LAGUNA MALLECO	884
G44	LONQUIMAY	905
G45	LAS CRUCES	941
G46	LIUCURA	1091
G47	LAS TRANCAS	1408
G48	CAMAN	1430

Figura 2.- Localización de estaciones en la region del Bio Bio sobre una imagen TMPA.

Los productos TMPA pueden ser descargados gratuitamente de la página <http://mirador.gsfc.nasa.gov/>, con resoluciones espaciales que varían según el producto. Para este trabajo se usó el producto 3B42 V.6 (llamado TRMM_3B42) con una resolución espacial de $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ y un paso de tiempo de 3 horas (0000, 0300, ..., 2100 UTC) (para Chile UTC – 4, invierno; UTC – 3, verano). Las estimaciones diarias de TMPA se obtienen de la suma de los productos 3B42 V.6 empezando a las 0000 y terminando a las 2100. En este trabajo se evaluaron el producto diario y mensual TRMM_3B42.

4. ANALISIS ESPACIAL - SEMIVARIOGRAMA

El análisis geoespacial, utilizando el Semivariograma, ha sido básicamente utilizado en métodos geoestadísticos de interpolación de variables continuas en el espacio. Sin embargo,

el análisis espacial va mas allá de eso, ya que permite determinar la dependencia espacial de los datos, describir la continuidad espacial del fenómeno natural, modelar la variación espacial de la información en términos de varianza y distancia, identificar tendencias y determinar funciones teóricas que describen esa estructura de variabilidad. El Semivariograma se conoce como la función geoestadística básica para describir esa variabilidad espacial. En términos matemáticos, el semivariograma, $\gamma(h)$, mide el cuadrado de la diferencia de la variable entre puntos separados una distancia h , la ecuación se expresa como:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

donde h es la separación espacial entre dos puntos, $Z(x_i)$ y $Z(x_i+h)$ son los valores observados en x_i y (x_i+h) respectivamente, y $N(h)$ es el número total de puntos separados una distancia h en el espacio posible de puntos. Las propiedades del semivariograma son el rango, la meseta y el efecto pepita. La *meseta* representa la máxima varianza de la variable (σ^2 o $C+C_o$), el *rango* es la distancia a la cual se alcanza la meseta (A_o), y el *efecto pepita* corresponde a la variabilidad que ocurre a una escala muy fina (C_o).

Por otra parte existe otra herramienta geoestadística llamada Semivariograma Cruzado, el cual permite determinar el grado de relación espacial entre dos variables continuas en términos de varianza y distancia. Cuando las dos variables son manejadas en forma simultánea, el semivariograma cruzado puede ser visto como una expresión multivariada de correlación espacial. El semivariograma cruzado se define como:

$$\gamma_{AB}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z_A(x_i) - Z_A(x_i + h)][Z_B(x_i) - Z_B(x_i + h)] \quad (2)$$

donde Z_A y Z_B son variables correlacionadas.

5. INDICADORES ESTADÍSTICOS

Dado que el objetivo de este trabajo es evaluar y comparar las estimaciones de TMPA con respecto a los registros de las estaciones a una escala diaria y mensual, se hace necesario usar estadígrafos como el error cuadrático medio (RMSE, root mean square error), coeficiente de correlación de Pearson (r^2 , correlation coefficient) y el sesgo (Bias). Por otra parte, existe estadística categórica útil para este tipo de comparaciones tal como: la relación de falsa alarma (False Alarm Ratio, FAR), el índice de sesgo (Frequency Bias Index, FBI) y la probabilidad de detección (Probability of Detection, POD) (Scheel et al. 2010; Su et al. 2008). La descripción matemática de los estadígrafos se muestra en la Tabla 1 y en la Tabla 2 se muestra la tabla de contingencia para determinar los estadígrafos categóricos.

Tabla 1.- Indicadores estadísticos

Estadígrafo	Expresión
<i>Error Cuadrático Medio (RMSE)</i>	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [P_{si} - P_{gi}]^2}$
<i>Sesgo</i>	$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [P_{si} - P_{gi}]$
<i>Coefficiente de Correlación</i>	$r_{xy} = \frac{Cov(x, y)}{\sigma_x \sigma_y}$

Tabla 2.- Tabla de contingencia y estadígrafos categóricos.

	Gauges rain	Gauges no-rain	
Satellite rain	a	b	$FAR = \frac{a}{(a+b)}$
Satellite no-rain	c	d	$FBI = \frac{(a+b)}{(a+c)}$
			$POD = \frac{a}{(a+c)}$

donde P_{si} y P_{gi} son las estimaciones del satélite (TMPA) y de la estación (DGA) respectivamente, N es el número de registros usados sean diarios o mensuales. σ_x y σ_y representan la desviación estándar de la estimación por TMPA y la DGA. FAR mide la fracción de falsas alarmas en las estimaciones del producto TMPA; FBI es la relación que existe entre los eventos de lluvia y los observados por el satélite, y POD cuantifica la fracción entre los eventos de lluvia que están correctamente estimados por el satélite y los medidos por la estación meteorológica.

6. RESULTADOS

6.1 Evaluación espacial de la información

Estaciones Meteorológica de terreno - DGA

Para hacer el análisis espacial con el semivariograma, se determinó la precipitación acumulada para cada una de las escalas de tiempo usadas en este análisis. Los registros diarios se acumularon para formar los mensuales, y éstos últimos para formar el semestral (húmedo: abril-septiembre, seco: octubre-marzo). En la Figura 3 se muestra el semivariograma de 2 días del año 2009: uno a mediados de enero (verano, 15 de Feb 2009) y otro a mediados de junio (invierno, 16 de Jun 2009). También se muestra el semivariograma de dos meses representativos de cada estación (Ene 2009 y Jun 2009) y dos periodos estacionales (verano: oct – marzo, invierno: abr - sep).

La variación espacial a escala diaria, mostrada en términos de varianza y rango en el semivariograma, muestra que no existe dependencia espacial, toda la variación corresponde a efecto pepita lo que significa que la variabilidad se encuentra a una distancia menor que la menor de las distancias entre estaciones. A escala mensual comienza a aparecer estructura y

algunos modelos teóricos (Esférico, Gaussiano) ajustan los semivariogramas experimentales. Los semivariogramas muestran también mayor dependencia espacial entre las estaciones y cierta diferencia en homogeneidad entre los meses del año, es decir el rango (A_0) para Enero es mayor (35 km aprox.) que para Junio (25 km aprox.) lo que se traduce en mayor homogeneidad para un mes característico del verano y menor homogeneidad para un mes representativo de invierno. La escala estacional muestra una mejor representación de la estructura espacial que la observada a escala mensual, sin embargo también muestra la variación en homogeneidad que se observó a escala mensual.

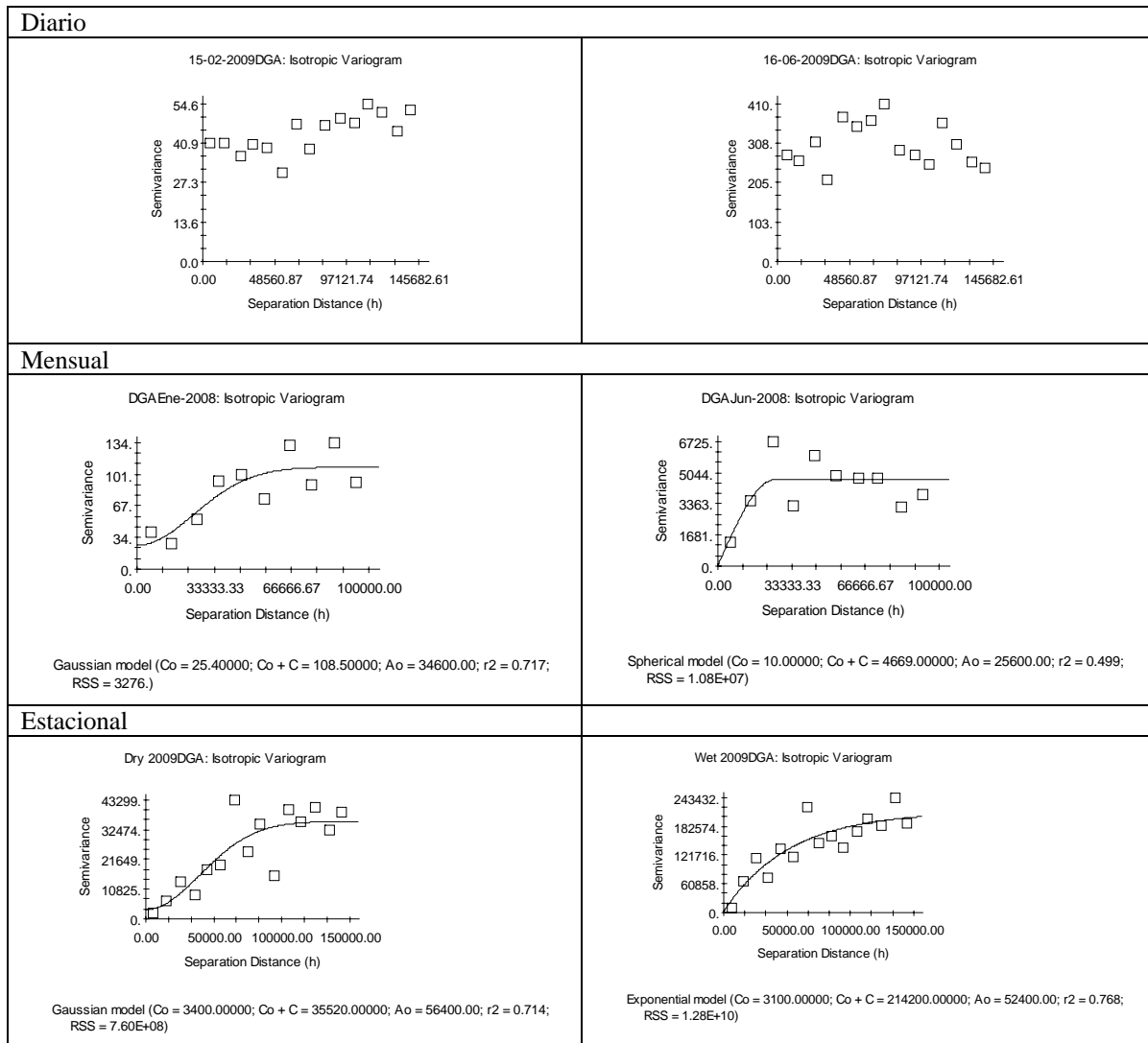


Figura 3.- Semivariogramas isotrópicos a escala diaria, mensual y estacional.

Información TMPA

Las imágenes satelitales tienen una resolución espacial de 25 km aproximadamente, lo que implica una mayor homogeneidad espacial de la precipitación comparada con las obtenidas en las estaciones meteorológicas. El semivariograma a escala diaria muestra una estructura espacial (Figura 4), a diferencia de la evaluación hecha con los registros de la DGA (Figura

3), con varianzas de 25 ó 5 mm para dos puntos separados 100 km para el día 15 Feb 2009, y de 275 ó 17 mm para dos puntos separados 52 km para el 17 de Junio 2009, lo que indica mayor homogeneidad en la distribución de la precipitación para ese día de verano que para el día de invierno. La agregación a escala mensual mejora la representación espacial de la variabilidad pero no así la agregación a escala estacional donde parece haber más de una estructura o escala dentro del área de estudio.

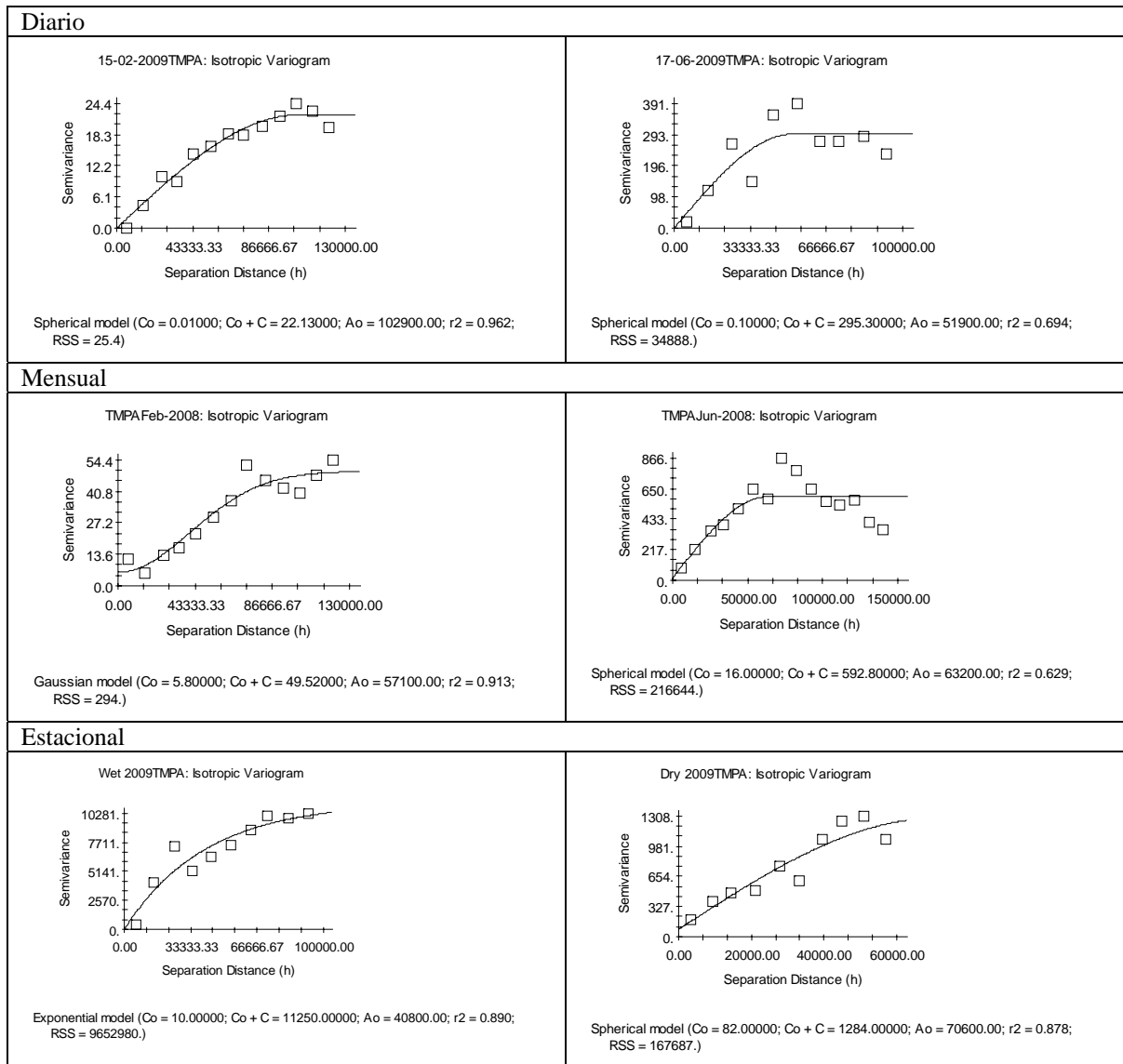


Figura 4.- Semivariogramas isotrópicos de las estimaciones de TMPA a escala diaria, mensual y estacional.

Semivariograma cruzado

La evaluación de la correlación espacial entre las estimaciones de TMPA y los registros de la DGA se realizó utilizando la herramienta GS+ (Geostatistics for the Environmental Sciences, <http://www.gammadesign.com/>), con la cual se obtienen los semivariogramas cruzados así como también la correlación cruzada. Esta última función es más diciente en

términos de correlación, ya que nos da una idea del grado de asociación entre las dos fuentes de información y la distancia a la cual ocurre. Las características de obtención de la precipitación, y la resolución temporal y espacial de captura, influyen en los resultados del semivariograma cruzado y del correlograma cruzado. Sin embargo, los resultados que se observan en la Figura 5 muestran una correlación positiva por encima de los 50 km en la mayoría de las agregaciones, y cuyo nivel de correlación aumenta al pasar de escala diaria a mensual y estacional.

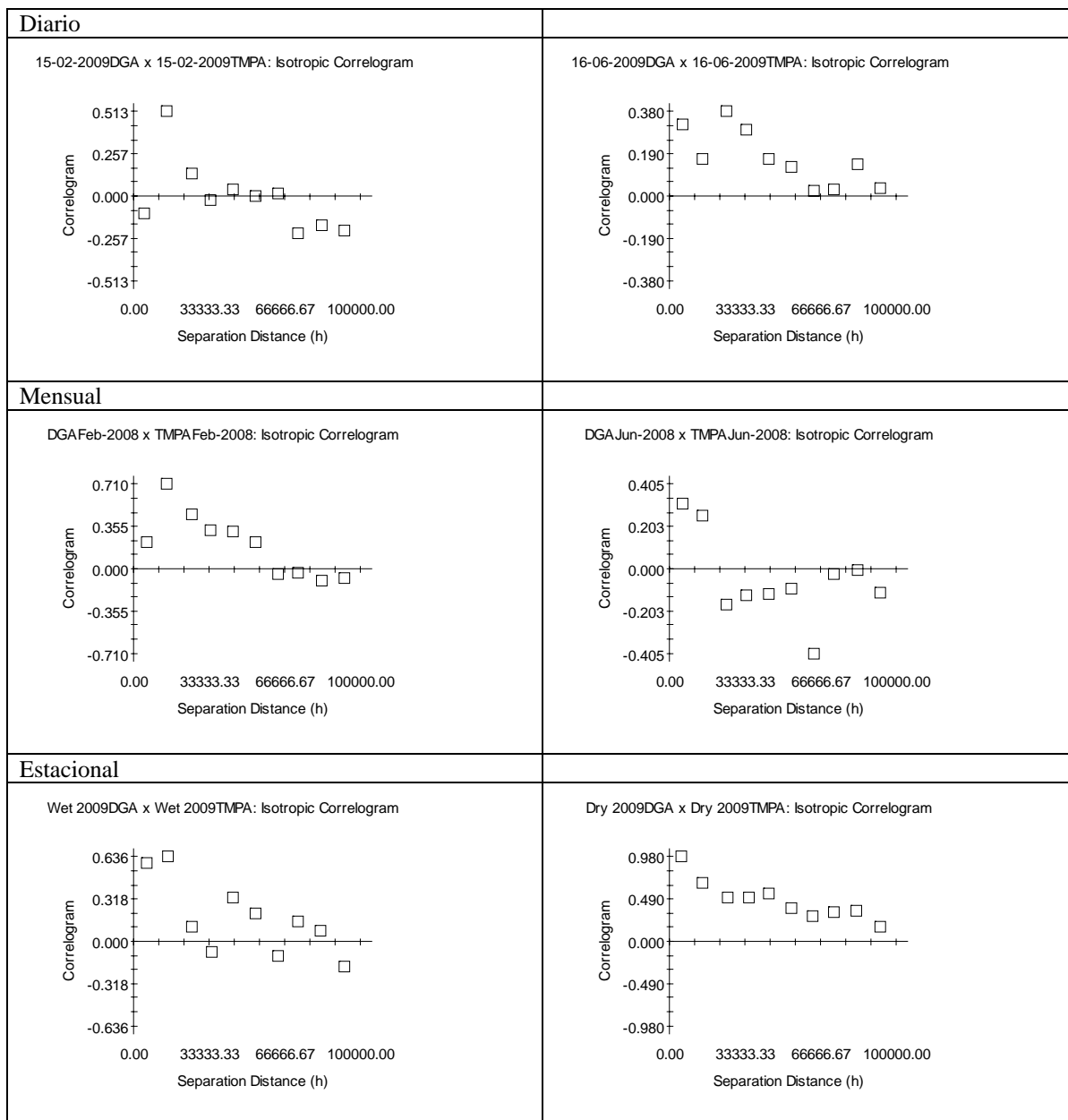


Figura 5.- Correlograma cruzado entre la información de la DGA y el TMPA.

6.2 Evaluación temporal de los registros de la DGA y TMPA

Los diagramas de puntos mostrados en la Figura 6 y Figura 7 representan la estimación diaria y mensual de los productos TMPA comparado con la lluvia diaria o mensual acumulada de las estaciones meteorológicas por encima de los 700 msnm desde la G37 hasta la G48 para el periodo Enero 2008 a Mayo 2010. Los resultados muestran una subestimación en ambos enfoques, pero en menor proporción para el caso mensual. Ésta figura muestra como las estimaciones del TMPA y lo observado en las estaciones tienen mayor correspondencia para precipitaciones acumuladas menores a los 100 mm (Figura 7). Por su parte, los valores acumulados diarios muestran una buena correspondencia para precipitaciones diarias acumuladas menores a los 30mm (Figura 6), pero en general muestra subestimación y no correspondencia en los días que no ocurre la lluvia, dado que el sensor muestra precipitación y las estaciones no.

La evaluación por periodos (seco y lluvioso) para ambas fuentes de información (DGA y TMPA) muestra estacionalidad en el comportamiento de la precipitación con mayor variabilidad en el período lluvioso comparada con el periodo seco (Tabla 3). Específicamente para los datos obtenidos de la DGA, la estación G48 (Caman, la más elevada de la región en estudio) presenta una desviación estándar de 17.81 mm aproximadamente comparada con una precipitación promedio diaria de 4.86 mm. En esta estación como en otras, se presentan precipitaciones que van desde los 0 mm a los 190 mm por día dentro de un mismo año siendo el relieve y las características climáticas de la zona las que influyen en este comportamiento. Por otra parte la variabilidad mostrada por los datos TMPA, si bien muestra el mismo comportamiento de los datos de la DGA, la magnitud de esa variabilidad (en términos de varianza) es menor comparada con la DGA. La razón de lo anterior es debido a la resolución espacial a la cual el TMPA es capturado.

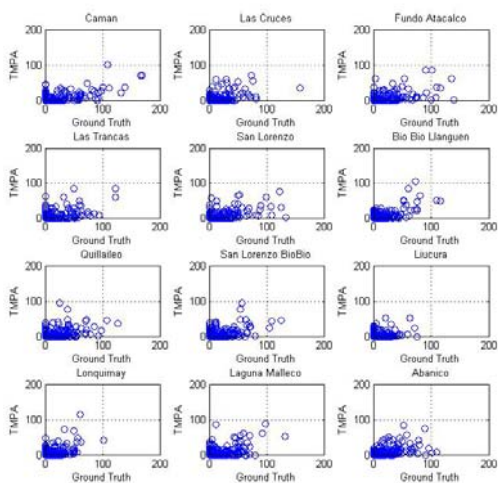


Figura 6.- Diagrama de puntos de la precipitación diaria entre estimaciones TMPA y registros de la DGA para tres estaciones meteorológicas para el periodo Enero 2008 - Mayo 2010.

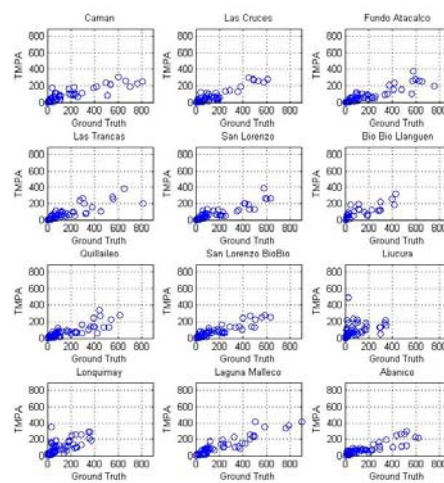


Figura 7.- Diagramas de puntos de la precipitación mensual proveniente de TMPA y la DGA para tres estaciones meteorológicas para el periodo Enero 2008 - Mayo 2010.

Tabla 3.- Resultados estadísticos de la comparación entre la información diaria obtenida del TMPA y la DGA.

Caman	Las trancas	Liucura
-------	-------------	---------

	Periodo completo	Estación Seca	Estación húmeda	Periodo completo	Estación Seca	Estación húmeda	Periodo completo	Estación Seca	Estación húmeda
Muestra	842	454	388	881	454	427	852	455	397
Total DGA[mm]	4090.6	606	3484.6	3406.2	588.8	2817.4	2167.5	484.4	1683.1
Total TMPA[mm]	1877.1	345.6	1531.5	1529.6	197.0	1332.5	1629.3	639.1	990.2
Promedio Estación	4.86	1.33	8.98	3.87	1.30	6.60	2.54	1.06	4.24
Promedio TMPA	2.23	0.76	3.95	1.74	0.43	3.12	5.126	4.40	5.80
Desvest Estación	17.81	6.82	24.57	13.19	6.09	17.48	8.16	4.25	10.81
Desvest TMPA	7.35	2.35	10.27	7.22	2.13	9.96	5.13	4.40	5.80
RMSE	14.25	6.45	19.79	11.13	5.80	14.82	8.50	5.53	10.95
Sesgo	-0.54	-0.43	-0.56	-0.55	-0.67	-0.53	-0.25	0.32	-0.41
Coeff Correlación	0.67	0.33	0.68	0.56	0.33	0.57	0.25	0.19	0.27
Lluvia en la estación	118	133	145	30	37	47	88	96	98
Lluvia satélite	265	159	307	108	57	147	157	102	160
FAR	0.71	0.85	0.62	0.53	0.72	0.43	0.71	0.78	0.65
FBI	2.25	3.60	1.78	1.20	1.54	1.06	2.12	3.13	1.63
POD	0.64	0.53	0.68	0.56	0.43	0.60	0.61	0.68	0.57

Tabla 4.- Resultados estadísticos de la comparación entre la información mensual obtenida del TMPA y la DGA.

	Camán			Las trancas			Liucura		
	Periodo completo	Estación Seca	Estación húmeda	Periodo completo	Estación Seca	Estación húmeda	Periodo completo	Estación Seca	Estación húmeda
Muestra	24	14	10	28	14	14	28	15	13
Promedio Estación	159.8	43.3	323.0	121.3	41.3	201.2	77.4	32.3	129.5
Promedio TMPA	67.0	29.48	119.4	60.2	20.8	99.7	72.1	49.2	98.5
Desvest Gauge	216.6	53.9	255.0	146.3	59.7	164.7	95.0	47.7	110.4
Desvest TMPA	76.5	37.2	87.9	70.5	28.4	78.5	56.0	50.1	52.2
RMSE	174.55	38.36	266.57	111.02	41.60	151.39	85.26	33.95	119.69
Sesgo	-0.58	-0.32	-0.63	-0.50	-0.50	-0.50	-0.07	0.52	-0.24
Coeff Correlación	0.90	0.73	0.89	0.85	0.87	0.76	0.44	0.81	0.04

Las estimaciones totales anuales (periodo Enero 2008 – Mayo 2010) del TMPA muestran una subestimación con respecto a la precipitación total anual para el mismo periodo obtenidas en las estaciones de la DGA (Tabla 3). La precipitación acumulada en el periodo de estudio por el TMPA representa en promedio el 50% de la cantidad obtenida por las estaciones de la DGA. Al calcular la magnitud del error (RMSE) en la totalidad de las estaciones meteorológicas, se observó una tendencia positiva a medida que la elevación de las estaciones aumenta, incrementándose la brecha entre el valor observado por la DGA y el valor estimado por el TMPA. Sin embargo, a pesar de la subestimación que realiza la TMPA, el grado de asociación entre los valores diarios registrados por la DGA y estimados por TMPA presenta coeficientes de correlación (r^2) en un rango entre 0.25 y 0.74 a nivel diario, y se incrementa a un rango entre 0.44 a 0.95 si se evalúa los acumulados mensuales (Tabla 4).

Para medir la magnitud promedio de los errores, y también para estimar la diferencia promedio entre los valores obtenidos por TMPA y los observados en las estaciones, se

estimó el RMSE y el Sesgo respectivamente. Como cabe esperar, tanto para nivel diario como mensual, el mayor RMSE lo representa el periodo lluvioso, variando en forma similar a la varianza mostrada en la Tabla 3 y en la Tabla 4. El error responde tanto a la variabilidad espacial de la precipitación sobre la cuenca como a las diferencias en la estimación de ambas fuentes, con una tendencia a incrementar el RMSE a medida que aumenta la cantidad de precipitación. Por otra parte el sesgo calculado a nivel diario mostró que en promedio la estimación diaria es subestimada en un 50% a nivel diario y mensual.

Contradictoriamente al error RMSE presentado en la Tabla 3, donde las estimaciones de TMPA están subestimando lo observado en las estaciones de monitoreo, la Tabla 3 presenta el número de días con lluvia para ambas fuentes de información (Lluvia satélite y Lluvia en la estación respectivamente) mostrando que los sensores estiman lluvia más días al año que las estaciones de la DGA. En el periodo húmedo esa proporción puede ser hasta del orden del 200% y en el periodo seco puede llegar a ser hasta un 400% más que el efectivamente observado. La elevada frecuencia con la cual el TMPA captura eventos de precipitación ayuda a explicar el índice de falsa alarma (FAR) que está por sobre el 50% en la mayoría de las estaciones con una leve tendencia positiva a medida que aumenta la elevación de las estaciones. Éste comportamiento también está apoyado en los resultados obtenidos con el FBI donde en la mayoría de las ocasiones se obtiene una sobreestimación de los eventos actuales de precipitación sobre todo en las partes elevadas de la región de estudio. Por otra parte los resultados del POD o la fracción de eventos de lluvia correctamente estimados muestran que el mejor periodo lo representa el periodo lluvioso y el más discontinuo o variable lo representa el periodo seco.

7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los registros de precipitación sobre la cuenca del Bio Bio muestran una alta variabilidad espacial sobretodo en época lluviosa. Los valores diarios registrados en las estaciones pueden variar desde los 0 a 190 mm, con elevadas precipitaciones en las zonas altas de la cuenca. El TMPA también es capaz de capturar esa variabilidad aunque en menor proporción dada la resolución espacial de captura, pero muestra la misma tendencia y variabilidad espacial. El comportamiento en ambas fuentes de información, está directamente relacionado con las características topográficas y climáticas de la zona en estudio. Por una parte, las características topográficas con altas pendientes, crestas y valles modifica el régimen de precipitaciones en la zona. La Cordillera de Los Andes y su fuerte relieve, incide en la magnitud y distribución de la precipitación. Por otra parte, el carácter frontal de la precipitación en época lluviosa sobre la zona, hace que se presenten lluvias continuas sobre superficies muy extensas, con abundante nubosidad y muchas veces también en precipitaciones de distintas características. Sin embargo, existen algunos eventos de precipitación, inclusive dentro del mismo periodo húmedo, que se manifiestan en algunos sectores de la cuenca e incluso pueden diferir en magnitud entre dos estaciones ubicadas a distancias inferiores a 20 km entre sí. Un ejemplo de ello es lo que sucede con las estaciones G21 (Quilaco, 221 msnm, orientación Sur) y G34 (Poco a Poco, 533 msnm, orientación Norte) cuya distancia radial es de aproximadamente 20 km (entran dentro de una de las celdas del TMPA), pero con grandes diferencias en la magnitud de la precipitación para un día de invierno, presentándose en Quilaco un tercio de la precipitación observada en Poco a Poco. Esto es relevante si se requiere realizar cualquier

tipo de interpolación o extrapolación a una escala de tiempo diaria, donde la variabilidad es tanta y las estaciones son tan pocas que cualquier método de interpolación o extrapolación tendría incorporada una gran incertidumbre.

Aunque en forma general el TMPA muestra una subestimación en la precipitación total multianual del periodo de estudio, el coeficiente de correlación dice que existe una buena correspondencia entre los datos estimados con el sensor y los observados por la DGA. En la evaluación de los valores diarios ese coeficiente es en promedio de 0,53 (rango entre 0,25 a 0,74) y en el caso de la evaluación a nivel mensual el valor es mucho más alto siendo en promedio de 0,87 (rango 0,44 a 0,95). Huffman et al. (2007) muestran que las estimaciones de TMPA a escalas de tiempo corto tienden a presentar más incertidumbre que aquellas que se hacen a escalas de tiempo mayores, en este caso mensuales. La naturaleza de la precipitación en la región, que es generalmente frontal en el periodo húmedo y convectiva en el periodo seco, influyen en el comportamiento temporal de la precipitación. El producto TRMM_3B42_daily es una suma acumulada del producto TRMM_3B42 que representa la lluvia estimada en mm/h de un “snapshot” cada 3 horas (empezando a las 00 UTC y terminado a la 21 UTC). Por lo tanto las características específicas de la lluvia afectarán el valor obtenido por los sensores, ya que éste representa lo que está pasando en un instante de tiempo y no el acumulado de las 3 horas de lluvia. Esta clase de incertidumbres se ven disminuidas si la agregación temporal aumenta. Scheel et al. (2010) afirma que la mejora en la correspondencia de ambas fuentes de información (TMPA y DGA mensual) es producto del algoritmo usado para procesar TMPA. Éste algoritmo implica la calibración basado en histogramas mensuales, aspecto que no considera la temporalidad de la información y por lo tanto no necesariamente mejora las estimaciones diarias y horarias que se hagan.

La subestimación obtenida con TMPA y la tendencia positiva de la misma a medida que la elevación de la estaciones aumenta, puede ser causada por factores físicos y biológicos de la cuenca (relieve y cobertura) como por la captura de las radiaciones con los sensores que componen el TMPA (microondas, IR, VSIR). Mätzler & Standley (2000) hablan del efecto que tienen principalmente la elevación, la orientación y el efecto sombra sobre las señales del radiómetro de microondas. El relieve de la zona de estudio y los diferentes tipos de superficie presentes en ella pueden interactuar radiativamente, no solo con la atmósfera, sino también entre ellos, lo que conduce a un cambio en la emisión efectiva que se pretende medir con el sensor. Cabe agregar que las emisiones capturadas por el sensor se pueden ver afectadas por la variación en la cubierta de nieve afectando la temperatura de brillo y su polarización (Amlien 2008). Los algoritmos usados para estimar la precipitación usando microondas dependen de las señales de dispersión difícilmente estimables en superficies frías o con cobertura nival (Scheel et al. 2010).

Las fuentes de error en las estimaciones del TMPA son múltiples, muchos de ellos relacionados con los sensores o los algoritmos usados para mezclar esta información (Huffman et al. 2007). Son varios los sensores que se usan para estimar la precipitación, capturando información a diferentes altitudes lo que en consecuencia trae diferencias en la escala temporal y espacial de cada una de ellas. El primer conjunto de sensores son los pasivos de microondas (TMI, AMSR-E y SSM/I) cuya información es convertida a precipitación a partir del algoritmo GPROF (Goddard Profiling Algorithm). Kummerow et al. (2001) explican que los valores estimados a partir de estos sensores y este algoritmo,

presentan errores de muestreo al ser función del número de visitas y a su vez de la frecuencia de la lluvia, pero que los errores también se pueden deber a la comparación como tal entre el TMPA y las estaciones de medición. Desde el punto de vista de la estación de medida, las fuentes de error son probablemente dos, la primera relacionada con la no homogeneidad de la precipitación sobre un área de 0.25° de grilla, que se supone ser representativa de una estación que ocupa algunos centímetros cuadrados. La segunda es que la estaciones de medida como tal estén operando inapropiadamente o sean tan pocas que no sean representativas de la zona y las características climáticas de la misma. Por su parte el segundo grupo de sensores compuestos por los que ven en el canal del IR visible (~ 10.7) presentan la limitación de estimar temperaturas de brillo de la capa superior de las nubes, lo que está poco correlacionada con la precipitación a escalas de tiempo y espacio pequeñas, pero bien correlacionada cuando la escala de tiempo es un día y el tamaño de grilla es 2.5° .

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Dirección General de Aguas por la información suministrada para este estudio, así como también el apoyo económico dado por CONICYT para la realización del Programa de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería de la autora principal y a la Pontificia Universidad Católica de Chile.

REFERENCIAS

- Adler, R., Braun, S., Stocker, E., & Marius, J. (2007). Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM, Senior Review Proposal. *Laboratory for Atmospheres, NASA Goddard Space Flight Centre, Greenbelt, MD, USA*
- Amlien, J. (2008). Remote sensing of snow with passive microwave radiometers. A review of current algorithms. In
- DGA (2004). Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del Río Bio Bio. In Santiago: Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas.
- Hossain, F., & Huffman, G.J. (2008). Investigating error metrics for satellite rainfall data at hydrologically relevant scales. *Journal of Hydrometeorology*, 9, 563-575
- Hsu, K.-L., & Sorooshian, S. (2008). Satellite-Based Precipitation Measurement Using PERSIANN System. In S. Sorooshian, K.-L. Hsu, E. Coppola, B. Tomassetti, M. Verdecchia & G. Visconti (Eds.), *Hydrological Modelling and the Water Cycle* (pp. 27-48): Springer Berlin Heidelberg
- Huffman, G.J., Bolvin, D.T., Nelkin, E.J., Wolff, D.B., Adler, R.F., Gu, G., Hong, Y., Bowman, K.P., & Stocker, E.F. (2007). The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8, 38-55
- Joyce, R.J., Janowiak, J.E., Arkin, P.A., & Xie, P. (2004). CMORPH: A Method that Produces Global Precipitation Estimates from Passive Microwave and Infrared Data at High Spatial and Temporal Resolution. *Journal of Hydrometeorology*, 5, 487-503
- Kummerow, C., Hong, Y., Olson, W.S., Yang, S., Adler, R.F., McCollum, J., Ferraro, R., Petty, G., Shin, D.-B., & Wilheit, T.T. (2001). The Evolution of the Goddard Profiling Algorithm (GPROF) for Rainfall Estimation from Passive Microwave Sensors. *Journal of Applied Meteorology*, 40, 1801-1820

- Mätzler, C., & Standley, A. (2000). Technical note: relief effects for passive microwave remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 2403-2412
- Sapiano, M.R.P. (2010). An evaluation of high resolution precipitation products at low resolution. *International Journal of Climatology*, 30, 1416-1422
- Scheel, M., Rohrer, M., Huggel, C., Villar, D.S., Silvestre, E., & Huffman, G. (2010). Evaluation of TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) performance in the Central Andes region and its dependency on spatial and temporal resolution. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 7, 8545-8586
- Su, F., Hong, Y., & Lettenmaier, D.P. (2008). Evaluation of TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata basin. *Journal of Hydrometeorology*, 9, 622-640