

ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES DE PRECIPITACIÓN EN LA SUBCUENCA DEL RÍO PATATE

PhD. Cand. Mercy Ilbay Yupa^{*1}, MSc. Kalina Fonseca Largo¹, MSc. Andrés Quichimbo Miguitama¹, MSc. Renán Lara Landázuri¹, Sr. José Tiche Toasa¹

¹Universidad Técnica de Cotopaxi, 05108, CAREN 2266164. E-mail: kaly_1989secafon@hotmail.com, andresquichimbo@gmail.com, renan.lara@utc.edu.ec, jggabicho@hotmail.com

^{*}Autor para la correspondencia. Email: merckyu@hotmail.com

Recibido: 25-10-2017 / Aceptado: 27-12-2017

RESUMEN

Se evaluaron seis métodos de completación de datos faltantes: razón q, razones de distancia, promedios vecinales, regresión lineal, distancia inversa ponderada (IDW) y método del vector regional (MVR); para conocer su aplicabilidad en la Subcuenca del Río Patate (SRP). La escala temporal de análisis fue mensual y comprendió un período entre 1995-2003, en seis estaciones ubicadas dentro del área de estudio. La evaluación de los métodos se realizó mediante diferentes índices que miden el ajuste de los valores observados a los simulados. Los índices utilizados fueron: índice de Nash, coeficiente de correlación de Pearson (R^2), coeficiente de determinación (CD) y el error típico. Los resultados demuestran una gran heterogeneidad en los diferentes métodos, siendo el MVR el que mejor resultados presenta para las estaciones: Rumipamba, Querochaca, Cusubamba y Tisaleo. Sin embargo, los resultados para las estaciones Pastocalle y Tisaleo no permitieron seleccionar un método debido al bajo rendimiento de los índices evaluados.

Palabras clave: Subcuenca del río Patate, completación de datos, precipitación, vector regional.

ESTIMATION OF RAINFALL MISSING DATA IN THE PATATE RIVER SUB-BASIN

ABSTRACT

Six methods of completing missing data were evaluated: This is: q ratio, distance reasons, average neighbors, linear regression, weighted inverse distance (IDW) and regional vector method (MVR) in order to know its applicability in the Sub-basin of the Patate River (SRP). The analysis was carried out every month and comprised a period between 1995-2003. The evaluation of the models was performed using a combination of indexes that measured the adjustment of the observed values to the simulated ones. The indices used were: Nash index, Pearson correlation coefficient (R^2), coefficient of determination (CD) and typical error. The results showed high heterogeneity in the methods. The best completion estimates were obtained with the MVR method for the stations: Rumipamba, Querochaca, Cusubamba and Tisaleo. However, the results for the Pastocalle and Tisaleo stations did not allow selection of a filling method due to the low performance of the models.

Key words: Sub-basin of the Patate river, data completion, precipitation, regional vector.

ESTIMAÇÃO DOS DADOS FALTANTES DA PRECIPITAÇÃO NA SUB-BACIA DO RIO PATATE

RESUMO

Foram avaliados seis métodos para completar os dados faltantes: razão q , razões da distância, medias vizinhas, regressão linear, distância inversa ponderada (IDW) e método do vetor regional (MVR); para conhecer a sua aplicabilidade na Sub-bacia do Río Patate (SRP). A escala temporal da análise foi mensal e compreendeu um período entre 1995-2003, em seis estações encontradas dentro da área de estudo. A avaliação dos métodos se realizou mediante diferentes índices que medem o ajuste dos valores observados aos simulados. Os índices utilizados foram índice de Nash, coeficiente de correlação de Pearson (R^2), coeficiente de determinação (CD) e o erro típico. Os resultados mostram uma grande heterogeneidade nos diferentes métodos, onde MVR proporcionou melhores resultados para as estações: Rumipamba, Querochaca, Cusubamba e Tisaleo. No entanto, os resultados para as estações Pastocalle e Tisaleo não permitiram selecionar um método devido ao baixo rendimento dos índices avaliados.

Palavras chaves: Sub-bacia do rio Patate, dados faltantes, precipitação, vetor regional

1. INTRODUCCIÓN

Datos observados de precipitación son insumos imprescindibles para estudios hidrológicos. La caracterización de la precipitación es importante para una modelización precisa de otros flujos hidrológicos como la escorrentía y la evapotranspiración, ya que la lluvia controla su comportamiento estadístico, distribuciones promedio y extremas. Los flujos hidrológicos pueden ser necesarios para el diseño de la infraestructura o evaluaciones de riesgos, convirtiendo efectivamente la lluvia en una parte importante del diseño y la toma de decisiones (Xu, Booij, & Tong, 2010; Paixao, Auld, Mirza, Klaassen, & Shephard, 2011; Arnbjerg-Nielsen *et al.*, 2013). Mediante el tratamiento e interpretación de datos pluviométricos, es posible planear procesos y alternativas de solución logrando finalmente, disminuir el grado de incertidumbre en la toma de decisiones (Antelo & Long, 2014). Pero en la mayoría de las estaciones no se dispone de series temporales de datos meteorológicos continuos, homogéneos y que abarquen el máximo intervalo temporal posible (Escoda, 2004). La falta de datos meteorológicos se debe a la ausencia de personal, destrucción o pérdida de registro, fallas en los instrumentos, fallas en el proceso de medición, además de otros problemas (Medina, 2008). El hecho de manejar datos carentes de información resulta una tarea complicada, al momento de realizar análisis de riesgos de déficit hídricos en la agricultura y a su vez constituye una fuente adicional de error cuando se modelan los balances hidrológicos (Giddings & Soto, 2016).

Existen diversos métodos de completación de datos pluviométricos para períodos mensuales, cada uno de ellos con requerimientos específicos para completar o interpolar datos de precipitación. La organización meteorológica mundial (WMO) (1983) propone utilizar la regresión lineal, por ser un método simple, que resulta de la correlación entre dos variables. Otros autores han utilizado el método de la razón q (Barger, 1960; WMO 1966; WMO 1983), aplicados a pares de estaciones que permite rellenar valores de diferentes períodos utilizando valores anuales o mensuales. Vauchel (2005) propone el uso del paquete computacional HYDRACCES, mediante el método de vector regional (MVR). En el caso del método de razones de distancias, una de las limitaciones principales para su aplicación es la disposición espacial de las estaciones. El método de promedios vecinales considera como una distribución espacial triangular de las estaciones completas (Pizarro *et al.*, 1993). El método IDW es útil cuando existen picos altos. Cada uno de estos métodos son validados por distintas alternativas para conocer su ajuste (Cañizares, Barroso & Alfonso, 2004).

En la actualidad se han desarrollado diferentes bibliotecas y paquetes de software para controlar la calidad de datos de series de tiempo de lluvia, completar datos perdidos y crear series virtuales (Burton, Kilsby, Fowler, Cowpertwait, & O'Connell., 2008; Burton, Glenis, Jones, & Kilsby., 2013; Kretzschmar, Tych, & Chappell., 2014; Mehrotra, Li, Westra, & Sharma., 2015; Serrano-Notivoli, de Luis, & Beguería., 2017). Sin embargo, en la Subcuenca del Río Patate (SRP) no se han evaluado métodos de completación y generación de datos de precipitación mensual.

2. METODOLOGÍA

2.1. Datos

Se ha recopilado datos de precipitación mensual y anual de 15 estaciones meteorológicas, provenientes del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) (**Tabla 1**). Para asegurar la mayor disponibilidad de datos se seleccionó seis estaciones meteorológicas con un periodo común (1995-2003). La ubicación geográfica de las estaciones se muestra en la **Figura 1**.

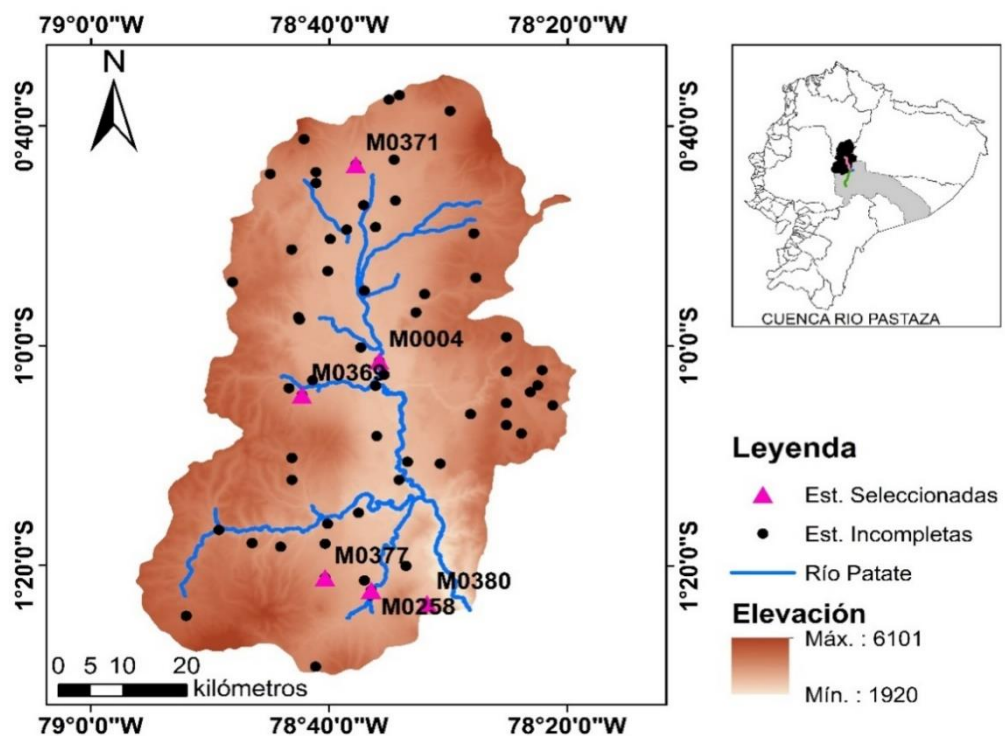
Tabla 1. Estaciones meteorológicas, serie 1995-2003.

Código	Nombre	Tipo	Cuenca	Latitud	Longitud	Altitud
				(°S)	(°W)	(msnm)
M0004	Rumipamba-Salcedo	AG	Pastaza	-1,02	-78,59	2685
M0258	Querochaca(UTA)	AU,CP	Pastaza	-1,37	-78,61	2865
M0380	Huambalo	PV	Pastaza	-1,83	-78,53	2880
M0371	Pastocalle	PV	Pastaza	-0,72	-78,62	3074
M0369	Cusubamba	PV	Pastaza	-1,07	-78,70	3175
M0377	Tisaleo	PV	Pastaza	-1,34	-78,67	3266

Fuente: INAMHI; AU= Automática, AG= Agrometeorológica, CO= Climatológica Ordinaria, CP= Climatológica Principal, PG= Pluviográfica, PV= Pluviométrica.

2.2. Área de Estudio

La SRP nace de los deshielos del Cotopaxi, ubicado en la zona centro del país, entre las coordenadas 00°35'18"-01°30'37"S y 78°19'19"-78°56'22"W. Tiene una superficie aproximada de 4700 km² y su altitud varía desde los 1920 y los 6101 msnm. La precipitación media anual es de 700 mm, en promedio la temperatura mínima desciende hasta 2°C. El río Patate recorre de norte a sur, regando varias zonas agrícolas hasta unirse al río Chambo y formar el río Pastaza que finalmente desemboca en el Amazonas (**Figura 1**).

**Figura 1.** Ubicación de la Subcuenca del río Patate, Ecuador.

2.3. Análisis exploratorio de datos (AED)

Se realizó el AED a las 6 estaciones mediante el método del vector regional (MVR) (Hiez, 1977; Brunet, 1979), para evaluar la calidad de datos. El MVR crear una estación ficticia, un *vector* de todas las estaciones de una zona homogénea, que se compara con cada estación, en lugar de comparar estaciones pares por correlación o doble masa (Hiez, 1977; Vauchel, 2005).

2.4. Métodos de completación de datos

- Razón q

Se aplica a pares de estaciones, en donde A tiene los datos completos y B no. La razón q entre los valores mensuales, anuales o medios, tiende a ser constante. Así, si se tienen dos estaciones (A y B), donde se determina “ q ” como:

$$q = \frac{\sum b_i}{\sum a_i} \quad (1)$$

Donde:

i : desde 1 hasta n

n : número total de datos de la serie

b_i : dato i de la estación B incompleta

a_i : dato i de la estación A completa

El valor faltante se obtiene como:

$$b_j = q * a_i \quad (2)$$

b_j : dato faltante correspondiente a la estación B. Este método permite completar diferentes períodos y puede ser utilizado para valores mensuales y anuales (Medina, 2008).

- Método de regresión lineal

Este método consiste en el cálculo de los valores inexistentes entre dos estaciones por el ajuste, a través del método de los mínimos cuadrados, de una recta de regresión lineal del tipo:

$$y = a + bx \quad (3)$$

Donde y es la precipitación estimada, x es la precipitación de la estación completa que proporciona la variable independiente de la cual depende la anterior. La base teórica del

cálculo considera la hipótesis: que entre dos series a comparar existe una correlación, de tal modo que las variaciones que se producen en ambas son similares. Las estaciones utilizadas de referencia presentan un coeficiente de correlación lineal de $0,8 \leq R \leq 0,8$ (Pizarro *et al.*, 1993; Pizarro *et al.*, 2009, Romero & Lavado, 2015).

- Método por razones de distancias.

Se utiliza para la estimación de datos menores a un año, en zonas planas, donde las estaciones deben tener una disposición espacial lineal (**Figura 2**).

$$PX = PA + a \times (PB - PA) \quad (a+b) \quad (4)$$

Donde;

A y B, estaciones con datos completos

X, estación incompleta

PX, PA, PB es la precipitación de las estaciones X, A, B

a y b, distancia desde la estación incompleta a las completas (**Figura 2**) (Romero & Lavado, 2015).

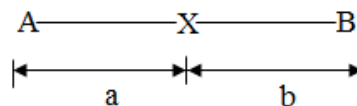


Figura 2. Disposición espacial para la completación por razones de distancia.

- Método por promedios vecinales

Se utiliza para la completación de datos menores de un año, en zonas planas no montañosas. Se debe considerar la distribución espacial en donde la estación con carencia de datos, queda ubicada al centro de tres estaciones con estadística completa (**Figura 3**), en este caso se aplica la ecuación (5) (Romero & Lavado, 2015).

$$PX = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{n} \quad (5)$$

Donde;

P_i es la precipitación de las estaciones A, B y C

n es el número de estaciones

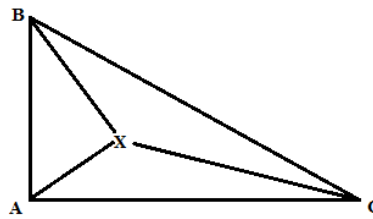


Figura 3: Disposición espacial para la completación de datos por promedios vecinales.

- Métodos por vector regional

Se calcula mediante el concepto de precipitación media, para evitando problemas de las estaciones más lluviosas sobre las menos lluviosas. Empleando el método de mínimos cuadrados para encontrar los índices pluviométricos regionales anuales Z_i y la precipitación media extendida P_j , esto se logra al minimizar la siguiente expresión (Espinoza, 2005).

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left(\frac{P_{ij}}{P_i} - Z_i \right)^2 \quad (6)$$

Donde; i es el índice del año, j es el índice de la estación, N es el número de años, M es el número de estaciones. P_{ij} es la precipitación anual en la estación j el año i , P_i es la precipitación media extendida al período de N años y finalmente Z_i es el índice pluviométrico regional del año i . Se ejecutó este método mediante HYDRACCES (Vauchel, 2005).

- Método de la Distancia Inversa Ponderada

Uno de los métodos más conocidos por sus siglas en ingles IDW (Di Piazza, Conti, Noto, Viola & Loggia, 2011). El rendimiento del método IDW depende en gran medida de la alta correlación espacial entre las estaciones (Vasiliev, 1996). El método de la distancia inversa ponderada, considerado un método determinístico, estima los valores faltantes de una serie temporal usando los valores observados de estaciones por medio de la siguiente ecuación (Teegavarapu, Tufail, & Ormsbee., 2009; Bennett, Newham, Croke & Jakeman, 2007):

$$P_{\text{estimada}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot d_i^{-k}}{\sum_{i=1}^n d_i^{-k}}$$

Donde P_{estimada} es el valor estimando, n es el número de estaciones, P_i es el valor de precipitación observado, la i es la i -ésima estación, d_i es la distancia entre la estación y la estación i , y k es un factor que varía entre 0,5 y 2.

2.5. Calidad de estimación

Se realizó el análisis comparativo de la calidad de datos estimados mediante el índice de Nash, coeficiente de determinación (CD), coeficiente de correlación de Pearson (R^2) y el error típico.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El método de regresión lineal y razón q no presentan grandes diferencias para el error típico, R^2 y CD. El método de razones de distancia (estación Rumipamba-Salcedo) fue el de menor ajuste en comparación a los demás métodos, no así para la estación Querochaca (**Tabla 2**). El método de promedios vecinales no se consideró, al no cumplir con la distribución espacial en donde la estación con carencia de datos, queda ubicada al centro de tres estaciones con estadística completa. En el caso del IDW fue un método que permitió la completación de datos faltantes con una buena calidad de estimación en base a los diferentes índices de ajuste. Sin embargo, el método de vector regional (MVR) presentó el mejor ajuste de los datos simulados para las estaciones: Rumipamba-Salcedo, Querochaca, Cusubamba y Tisaleo. Estos datos concuerdan con Romero & Lavado (2015) para estaciones cercanas y una altitud similar, presentando precipitaciones con buena correlación en cuanto a la distribución espacial. En las estaciones Pastocalle y Huambalo no presenta un ajuste adecuado para la completación de datos, en el contexto estadístico los datos simulados no son cercanos a los observados (**Tabla 2**).

La reconstrucción de datos de precipitación se ve fuertemente afectada debido a la falta de estaciones meteorológicas cercanas o áreas donde hay un bajo número de estaciones (Antelo & Long, 2014; Beguería, Vicente-Serrano, Tomas-Burguera, & Maneta, 2016).

Los métodos de completación de datos con mayor ajuste como razón q , IWD y MVR fueron evaluados en el pronóstico de la lluvia mensual para un periodo de ocho años (1995-2003) El MVR demostró ser el método con mayor ajuste (Nash $>0,83$), siendo una herramienta de análisis y pronóstico de las lluvias en la SRP (**Figura 4**).

Estimación de Datos Faltantes de Precipitación en la Subcuenca del Río Patate

Tabla 2. Estaciones meteorológicas, serie 1995-2003 de acuerdo a los métodos usados con relación a los índices que miden el ajuste de los valores observados a los simulados.

Rumipamba-Salcedo_M0004				
Estación				
Métodos	Error Típico	Nash	CD	R ²
Razón q	16,716	0,715	0,938	0,744
Razones de distancia	18,991	0,442	0,662	0,670
Vector Regional	11,746	0,873	1,168	0,874
IDW	15,996	0,716	1,007	0,766
Querochaca_M0258				
Estación				
Métodos	Error Típico	Nash	CD	R ²
Razón q	15,230	0,627	0,812	0,733
Regresión Lineal	15,266	0,640	0,754	0,732
Razones de distancia	12,698	0,492	0,626	0,815
Vector Regional	11,620	0,832	0,940	0,845
IDW	12,394	0,561	0,679	0,823
Huambalo_M0380				
Estación				
Métodos	Error Típico	Nash	CD	R ²
IDW	266,447	0,3894	14,632	0,5734
Pastocalle_M0371				
Estación				
Métodos	Error Típico	Nash	CD	R ²
Razón q	31,261	0,474	1,402	0,556
IDW	30,972	0,471	2.206	0.565
Cusubamba_M0369				
Estación				
Métodos	Error Típico	Nash	CD	R ²
Razón q	17,775	0,735	1,092	0,760
Vector Regional	12,000	0,870	1,078	0,890
IDW	18,744	0,719	1,485	0,733
Tisaleo_M0377				
Métodos				
	Error Típico	Nash	CD	R ²
Razón q	156,519	0,6768	11,347	0,7737
Regresión Lineal	156,519	0,7280	13,214	0,7737
Vector Regional	116,828	0,8456	0,9596	0,8739
IDW	149,898	0,7005	12,743	0,7924

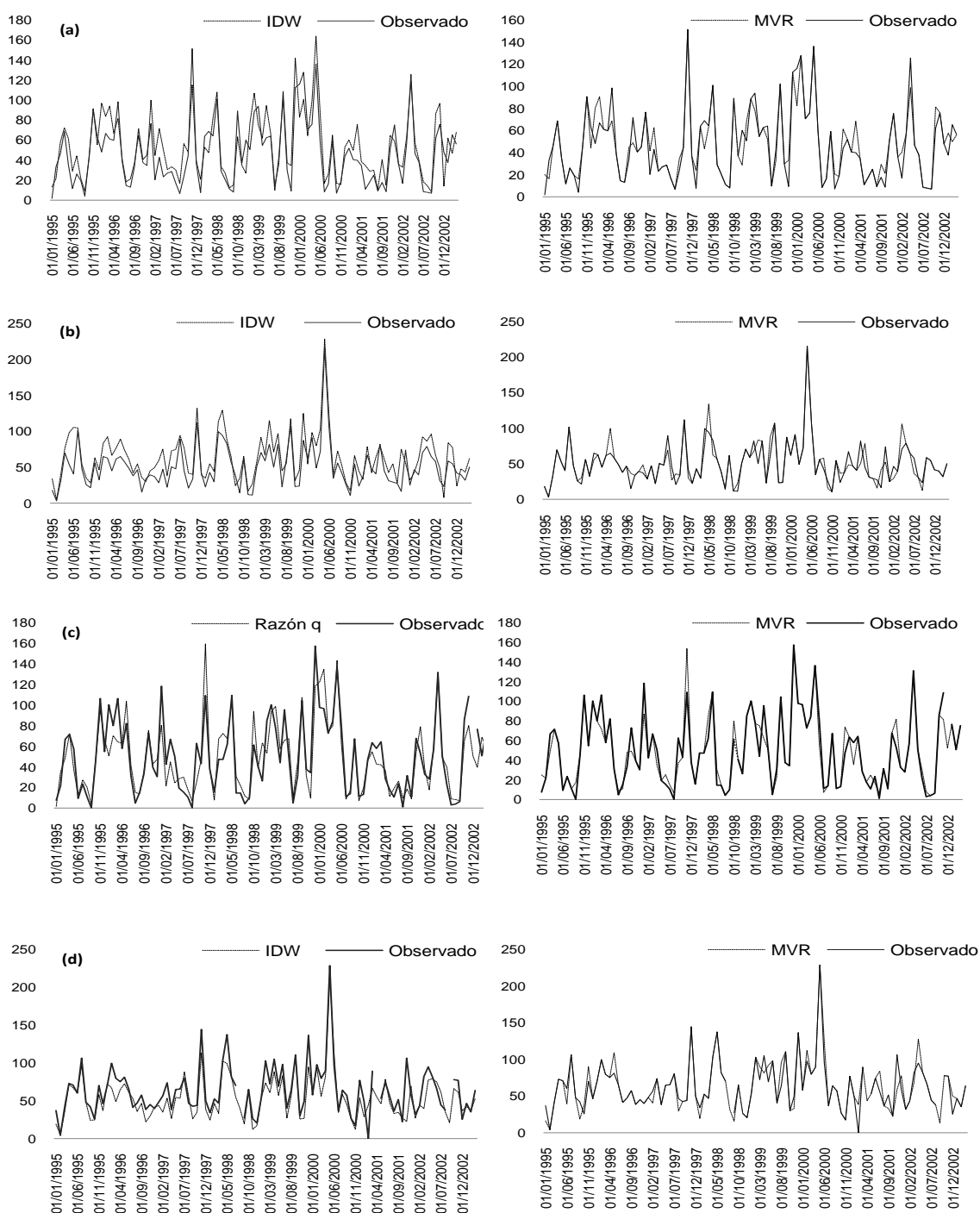


Figura 4. Gráficas de series de precipitación media mensual por el método del vector regional (MVR), razón q y distancia inversa ponderada (IDW) en la Subcuenca del Río Patate, estación (a) Rumipamba-Salcedo, (b) Querochaca, (c), Cusubamba y (d) Tisaleo.

4. CONCLUSIONES

La evaluación de seis métodos de completación de series de precipitación mensual para seis estaciones meteorológicas determinó que el método del vector regional es el adecuado para la zona centro y sur de la Subcuenca del río Patate, según los indicadores estadísticos.

Siendo una alternativa eficiente para completar datos faltantes, cuando se cuenta con información para el mismo periodo y escala temporal proveniente de tres estaciones cercanas.

La reconstrucción de datos de precipitación mensual se ve fuertemente afectadas en la zona norte y sur-este de la Subcuenca del río Patate debido al bajo número de estaciones y a las distancias existentes.

5. REFERENCIAS

- Antelo, M.R. & Long, M. (2014). "Estimación de datos faltantes de precipitación diaria para las distintas ecorregiones de la República Argentina". Accedido agosto 24. <http://www.ina.gov.ar/ifrh-2014/Eje3/3.02.pdf>.
- Arnbjerg-Nielsen, K., Willems, P., Olsson, J., Beecham, S., Pathirana, A., Gregersen, I.B., Madsen, H., & Nguyen, V.T.V. (2013). Impacts of climate change on rainfall extremes and urban drainage systems: a review. *Water Sci. Technol.*, 68,16-28.
- Barger, L. & Nyhan, J.C. (1960). *Climatology at work*. Washington D.C. Estados Unidos.
- Beguiría, S., Vicente-Serrano, S., Tomas-Burguera, M., & Maneta, M. (2016). Bias in the variance of gridded data sets leads to misleading conclusions about changes in climate variability. *Int. J. Climatol.*, 36, 3413-3422.
- Bennett, N.D., L.T.H. Newham, B.F.W. Croke, & A.J. Jakeman. (2007). Patching and disaccumulation of rainfall data for hydrological modelling. In: Oxley, L., D. Kulasiri (Eds.), *Int. Congress on Modelling and Simulation (MODSIM 2007)*, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc., New Zealand, 2520-2526.
- Brunet, M. (1979). Homogénéisation des précipitations. *Cahiers ORSTOM. Série Hydrologie*, 16, 3-4.
- Burton, A., Kilsby, C., Fowler, H., Cowpertwait, P., & O'Connell, P. (2008). Rainsim: a spatial-temporal stochastic rainfall modelling system. *Environ. Model. Softw.*, 23, 1356-1369.
- Burton, A., Glenis, V., Jones, M., & Kilsby, C. (2013). Models of daily rainfall cross-correlation for the United Kingdom. *Environ. Model. Softw.*, 49, 22-33.
- Cañizares, M., Barroso, I., & Alfonso, K. (2004). Datos incompletos: Una mirada crítica para su manejo en estudios sanitarios. In: *Gac Sanit.*, 18(1), 58-63.
- Di Piazza, A., F.L. Conti, L.V. Noto, F. Viola, & G. La Loggia. (2011). Comparative analysis of different techniques for spatial interpolation of rainfall data to create a serially complete monthly time series of precipitation for Sicily, Italy. *Int. J. Appl. EarthObs. Geoinf.*, 13, 396-408.
- Escoda, A. (2004). Técnicas de completado de series mensuales y aplicación al estudio de la influencia de la NAO en la distribución de la precipitación en España. Accedido agosto 24. <http://zucaína.net/Publicaciones/barrera-dea.pdf>.
- Espinoza, J. (2005). Utilización del vector regional con HYDRACCES. SENAMHI- PERÚ.

- Giddings, L. & Soto, M. (2006). Participación de América Latina y del Caribe en los Registros Globales Climatológicos, GHCN. *Interciencia: Revista de Ciencia y Tecnología de América*, 31(9), 632-637.
- Hiez, G. (1977). L' homogénéité des données pluviométriques. *Cahiers ORSTOM. série Hydrologie*, 14, 129-172.
- Kretzschmar, A., Tych, W., & Chappell, N. (2014). Reversing hydrology: estimation of sub-hourly rainfall time-series from streamflow. *Environ. Model. Softw.*, 60, 290-301.
- Medina, R. (2008). Estimación estadística de valores faltantes en series históricas de lluvia. Tesis de maestría. pp 7, 12-15, 77-80.
- Mehrotra, R., Li, J., Westra, S., & Sharma, A. (2015). A programming tool to generate multi-site daily rainfall using a two-stage semi parametric model. *Environ. Model. Softw.*, 63, 230-239.
- Pizarro, R., Ausensi, P., Aravena, D., Sangüesa, C., León, L., & Balocchi, F. (2009). Evaluación de métodos Hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones de la región de Maule, Chile. Chile. *Revista Aqua-LAC.*, 1(2), 172-185.
- Paixao, E., Auld, H., Mirza, M.M.Q., Klaassen, J., & Shephard, M.W. (2011). Regionalization of heavy rainfall to improve climatic design values for infrastructure: case study in southern ontario, Canada.
- Pizarro, R., Ausensi, P., Aravena, D., Sangüesa, C., León, L., & Balocchi, F. (1993). Elementos técnicos de Hidrología III. Proyecto regional mayor sobre uso y conservación de recursos hídricos en áreas rurales de América Latina y el caribe. Talca: Universidad de Talca. 135.
- Romero, A., & Lavado, W. (2015). Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones de la cuenta Jetepeque, Perú. *Revista Tecnológica-ESPOL*, 28 (3).
<http://www.rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/400>.
- Serrano-Notivol, R., de Luis, M., & Beguería, S. (2017). An R package for daily precipitation climate series reconstruction. *Environ. Model. Softw.*, 89, 190-195.
- Teegavarapu, R.S.V., M. Tufail, L. & Ormsbee. (2009). Optimal functional forms for estimation of missing precipitation data. *J. Hydrol.*, 374, 106-115.
- Vasiliev, I.R. (1996). Visualization of spatial dependence: An elementary view of spatial autocorrelation. In: Arlinghaus, S.L. (Ed.), *Practical Handbook of Spatial Statistics*, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 17-3.
- Vauchel, P. (2005). Hydraccess: Logiciel de gestion et traitement de données hydro météorologiques, version 2.1.4. Downloadable at <http://www.mpl.ird.fr/hybam.01/01/2011>
- World Meteorological Organization (WMO). (1966). Some Methods of Climatological Analysis. WMO - No. 199.TP. 103.
- World Meteorological Organization (WMO). (1983). Guide to Climatological Practices. WMO - No. 100.
- Xu, Y.P., Booij, M., & Tong, Y.B. (2010). Uncertainty analysis in statistical modeling of extreme hydrological events. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 24, 567-578