



Análisis y simulación de los procesos atmosféricos e hidrológicos usando el modelo atmosférico WRF en el Perú durante el 2014

Noelia Rojas^{1*} y Joel Rojas²

¹*Instituto de Astronomía, Geofísica y Ciencias Atmosféricas. Universidad de São Paulo, Brasil*

²*Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú*

Recibido 09 mayo 2020 – Aceptado 10 diciembre 2020

Resumen

El objetivo de este trabajo ha sido analizar y simular las interacciones de los procesos atmosféricos e hidrológicos usando el Modelo WRF (Weather Research and Forecasting) en el Perú para el año 2014. El SENAMHI registra los datos de precipitación mediante una red meteorológica que se encuentra distribuida en casi todo el territorio peruano. Debido que la precipitación tiene una alta variabilidad espacial y por la escasez de pluviómetros, se empleó el uso de imágenes TRMM, para estimar la precipitación y el modelo atmosférico WRF para analizar las interacciones de procesos atmosféricos e hidrológicos durante diferentes periodos y considerando las parametrizaciones cúmulos (esquema de Kain-Fritsch, KF) y microfísica (esquema de Thompson). Se procesaron 36 imágenes de precipitación acumulada mensual sobre el Perú usando la simulación del modelo atmosférico WRF (dos casos) y del TRMM. Se consideraron 12 estaciones meteorológicas distribuidas por el Perú para el análisis temporal de la precipitación acumulada anual para el 2014. Fueron comparadas los datos de precipitación acumulada in-situ, satelital e simulada por el modelo WRF. Se observó una sobrestimación de los datos de precipitación utilizando el modelo WRF con respecto a los datos in-situ y una super-estimación utilizando el satélite TRMM para todo el año 2014. Utilizando el análisis estadístico e índices de detección, se concluyó que durante el verano (diciembre-marzo) el modelo WRF es más sensible (alta sobrestimación) para todas las estaciones meteorológicas ubicadas a una menor altura en el Perú. Durante los meses de junio - agosto existe una escasez de precipitación sobre el Perú. El TRMM mostró ser menos eficiente que el modelo WRF. Por último, en este trabajo se mostró que el esquema de KF tiene mayor capacidad para simular los datos de precipitación en comparación con el esquema Thompson, siendo igual dos esquemas no adecuados para el área de estudio.

Palabras claves: TRMM, modelo WRF, precipitación.

Analysis and simulation of the atmospheric and hydrological processes using the WRF atmospheric model in Peru during 2014

Abstract

The objective of this work has been to analyze and simulate the interactions of atmospheric and hydrological processes using the WRF Model (Weather Research and Forecasting) in Peru for the year 2014. SENAMHI records precipitation data through a meteorological network found distributed in almost all the Peruvian territory. Due to precipitation has a high spatial variability and to the scarcity of rain gauges, the use of TRMM images was used to estimate precipitation and the WRF atmospheric model to analyze the interactions of atmospheric and hydrological processes during different periods and considering the cumulus parameterizations (Kain-Fritsch scheme, KF) and microphysics (Thompson scheme). Thirty-six images of accumulated monthly precipitation over Peru were processed using the simulation of the atmospheric model WRF (two cases) and the TRMM. Twelve meteorological stations distributed by Peru were considered for the temporal analysis of the annual accumulated precipitation for 2014. The

* noeliab@gmail.com

accumulated precipitation data in-situ, satellite and simulated by the WRF model were compared. An overestimation of the precipitation data was observed using the WRF model with respect to the in-situ data and a super-estimate using the TRMM satellite for all the year 2014. Using the statistical analysis and detection rates, it was concluded that during the Summer (December-March) the WRF model is more sensitive (high overestimation) for all meteorological stations located at a lower altitude in Peru. During the months of June - August there is a shortage of precipitation over Peru. The TRMM was shown to be less efficient than the WRF model. Finally, in this work it was shown that the KF scheme has a greater capacity to simulate precipitation data compared to the Thompson scheme, with two schemes not suitable for the study area being the same.

Keywords: TRMM, WRF model, precipitation.

Introducción

Con el paso de los años, la comunidad científica a podido reconocer la influencia que tiene la hidrología en el sistema atmósfera-superficie [Wetherald y Manabe, 1975], llegando a la conclusión que las sequías, siendo un evento puramente meteorológico [Palmer, 1965] de larga escala de tiempo, no se pueden interpretar correctamente a menos que se tome en cuenta la influencia del sistema hidrológico. La sequía meteorológica es definida a partir de un umbral de déficit de precipitación que se alcanza durante un período de tiempo previamente determinado [OMM. 2006], causando grandes impactos sociales, económicos y en el medio ambiente, como por ejemplo en regiones áridas y semiáridas (ex. Perú) [Salas, 2000].

El Perú al situarse en los trópicos y próximo al océano pacífico (Figura 1), presentan tres regiones geográficas (costa, sierra y selva) y diversos climas. En la costa del Perú, existe mucha humedad y la precipitación es escasa durante casi todo el año, a menos que ocurra el Fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS) que sobrepasa los 500 mm/año [SENAMHI, 2007]. Los diversos mecanismos que ocurren en la cuenca amazónica y con influencia de los vientos alisios, afectan el clima en la región sierra y selva del Perú, lo que conlleva que exista precipitación con más frecuencia e intensa [Avalos, 2005]. De modo que los datos de precipitación son de vital importancia para elaborar modelos hídricos que apoyen el manejo adecuado de recursos hídricos y los estudios del cambio climático.

En el Perú, la precipitación es registrada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), mediante su red de estaciones meteorológicas distribuidas en todo el territorio peruano. Sin embargo, como la precipitación tiene una alta variabilidad espacial y existe una escasez de pluviómetros, la contribución de imágenes satelitales y de los modelos atmosféricos tienen un gran aporte. El objetivo de este trabajo ha sido analizar y simular las interacciones de los procesos atmosféricos e hidrológicos usando el Modelo WRF (Weather Research and Forecasting) en el Perú para el año 2014.

Modelo Atmosférico WRF

El modelo WRF es un sistema de simulación de la atmósfera y de predicción numérica de las variaciones atmosféricas diseñadas para la investigación y las aplicaciones operacionales [Dudhia et al., 2008]. Este modelo ha sido desarrollado por varias instituciones y universidades [Dudhia et al., 2008] y se encuentra disponible gratuitamente en la página web oficial (<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrfv3.6/updates-3.6.html>). Las ecuaciones gobernantes que el modelo WRF usa para simular las condiciones de la atmósfera son:

- Conservación del Momento

$$\begin{aligned} \partial_t U + (\nabla \cdot V u) - \partial_x(p \phi_\eta) + (\nabla \cdot V v) - \partial_y(p \phi_x) &= F_U \\ \partial_t V + (\nabla \cdot V v) - \partial_y(p \phi_\eta) + (\nabla \cdot V u) - \partial_x(p \phi_y) &= F_V \\ \partial_t W + (\nabla \cdot w) - g(\partial_\eta p - \mu) &= F_W \end{aligned}$$

- La conservación de la Energía Térmica

$$\partial_t \theta + (\nabla \cdot V \theta) = F_\theta$$

- La conservación de la masa

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot V) = 0$$

- La ecuación Geopotencial

$$\partial_t \phi + \mu - 1[\nabla \nabla \phi] - gW = 0$$

- Relación inversa a la densidad de diagnóstico

$$\partial_t \phi = -\alpha \mu$$

- Ecuación de estado térmico

$$p = p_0 (R_d \theta / p_0 \alpha)^\gamma$$

donde V es el campo vectorial del viento $(U, V, W); (u, v, w)$ son las velocidades del viento covariante en la dirección horizontal y vertical; θ es la temperatura potencial; ϕ es el geopotencial, p es la presión; $\alpha = 1/p$ es la inversa de la densidad; $\gamma = c_p / c_v$ es la razón entre los calores específicos a presión constante y volumen constante para el aire seco y R_d es una constante para el aire seco. Por último, Los términos F_U, F_V, F_W y F_θ representan las fuerzas inherentes, de acuerdo con el modelo físico, la mezcla de turbulencia, proyecciones esféricas y rotación de la Tierra.

Datos y meteorología

El área de estudio fue delimitada por las coordenadas geográficas 1°57'28"N - 18°58'41"S de latitud y 87°49'48"W - 64°54'7"W de longitud que corresponde al Perú, y parte de sus fronteras (Ecuador, Colombia, Brasil, Bolivia y Chile), incluyendo el océano Pacífico (Fig. 1).

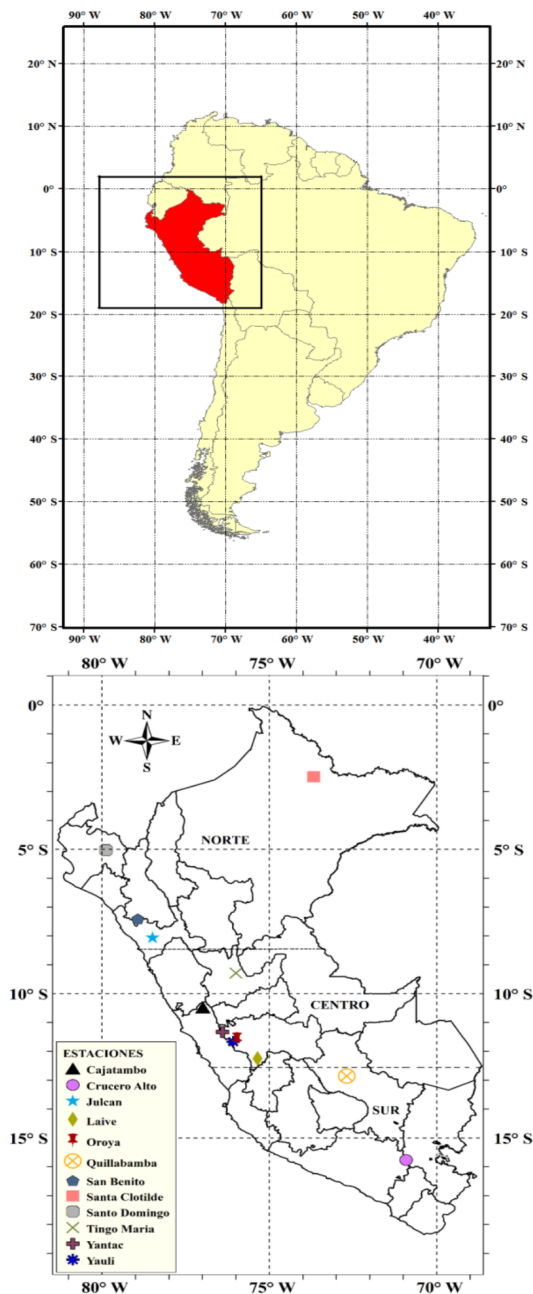


Figura 1: (a) Dominio (línea negra), Perú. (b) 12 estaciones meteorológicas por SENAMHI (2014) distribuida en todo el Perú.

Datos

Se ha usado datos de precipitación registradas a las 07:00 y 19:00, hora local por 12 estaciones meteorológicas del SENAMHI, que se encuentran distribuidas en las tres regiones del Perú con respecto a la latitud: Norte, Centro y Sur (Fig. 1(b)). Debido a la falta de pluviómetros en algunas regiones del Perú, se ha utilizado el satélite TRMM ("Tropical Rainfall Measuring Mission") que estima los datos de precipitación diaria sobre el Perú y un conjunto de datos con un formato GRIB2 (atmosféricos y superficie) del modelo GFS (00, 06, 12 y 18 UTC) como datos de entrada para el modelo WRF para estimar datos de precipitación acumulada mensual acumulada mensual sobre todo el territorio peruano para todo el 2014 [Rojas, 2016].

Metodología

Las 12 estaciones meteorológicas del SENAMHI fueron seleccionadas por regiones: 4 estaciones meteorológicas en el norte, 6 estaciones meteorológicas en el centro y 2 estaciones meteorológicas al sur del Perú. La altura de las estaciones se encuentran en un rango 990 - 4470 metros sobre el nivel del mar. La distribución de las estaciones se ha basado en la topografía del Perú, ya que cerca de los Andes es donde se registra mayor cantidad de precipitación, y en la costa como en la selva se detectan menor cantidad de precipitación, es por ello que la mayor parte de las estaciones meteorológicas se encuentran ubicadas en la sierra del Perú. Las imágenes provenientes del satélite TRMM usan diferentes algoritmos y para este caso, se ha considerado el producto TRMM 3B42RT en tiempo real. La resolución espacial es de 0,25°x0,25° y contiene mediciones cada 3 horas. Primero se obtuvo los datos de precipitación diaria para todo el año del 2014 sobre todo el territorio, luego al extraer para cada estación meteorológica y al final se construyó una serie temporal de la precipitación acumulada mensual para cada estación.

Tabla 1. Configuración del modelo WRF		
Parametrizaciones Físicas	caso 1	caso 2
Radiación de onda corta	Esquema Dubhia	Esquema Dubhia
Radiación de onda larga	RRTM	RRTM
Superficie terrestre	Esquema de Chen-Zhang	Similitud Eta
Capa límite planetaria	Esquema Yonsei University	Esquema Mellor-Yamada-Janjic
Cumulus	Esquema de Kain-Fritsch	Esquema de Kain-Fritsch
Microfísica	Esquema de un solo momento de 3 clases WRF	Nuevo esquema de Thompson

Para el caso del modelo WRF, en el pre-procesamiento (WPS), se consideran datos de topografía, vegetación, uso y cobertura de suelo (datos de entrada del modelo GFS) y la interpolación de datos meteorológicos. El WPS se encarga de preparar los datos de entrada para el procesamiento ARW-WRF [Dudhia et al., 2008]. En el procesamiento del modelo WRF, se toma en cuenta, además de los datos de entrada, las parametrizaciones físicas adecuadas para nuestra área de estudio (Tabla 1). En la ejecución del modelo WRF, se adoptó una integración horizontal de 3 horas (del horario UTC), iniciando a las 00 UTC del 01/01/2014 y terminando a las 24 UTC del 31/12/2014. Por último, se consideró una resolución espacial de 18km y 35 niveles verticales. Para el método de evaluación de los datos de precipitación acumulada mensual del satélite TRMM y del modelo WRF con los datos de precipitación acumulada mensual in-situ, se realiza un análisis estadístico. Errores estadísticos: (sesgo, error medio cuadrático (RMSE) y el coeficiente de Pearson),

$$Sesgo = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Ps_{m_i} - Pp_{m_i})^2$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Ps_{m_i} - Pp_{m_i})^2}$$

$$r = \frac{cov(Ps, Pp)}{\sqrt{var(Ps)} \times \sqrt{var(Pp)}}$$

Índices de detección (probabilidad de detección (POD), tasa de alarma falsa (FAR) y el índice del sesgo de la frecuencia (FBI):

$$POD = \frac{a}{a + c}$$

$$FAR = \frac{b}{a + b}$$

$$FBI = \frac{a + b}{a + c}$$

Resultados y Discusión

En la Figura 2 y 3, muestran la distribución espacial y temporal de la precipitación acumulada mensual obtenida por el modelo WRF para dos casos diferentes (ver Tabla 1) y estimada por el satélite TRMM, sobre el Perú y áreas vecinas para el año 2014. En la figura 2(a), los valores de precipitación se incrementan desde septiembre (1200 mm) hasta marzo (2200 mm), para luego disminuir drásticamente en los meses de abril hasta agosto. Más del 50% de la precipitación total anual se produce en el verano austral (diciembre - febrero) en la parte tropical de América del Sur [Kousky et al., 2004]. En la figura 2(b), se observó que para los meses de diciembre - marzo se

presentan núcleos de precipitación intensos (1 900 mm - 2200 mm) en el sur-este del Perú, donde se encuentran ubicadas las estaciones meteorológicas de Quillabamba, Crucero Alto y las estaciones meteorológicas de Junín. Tanto para el modelo WRF como para las imágenes del satélite TRMM (Figura 2 y 3), el inicio de las precipitaciones se dará en el mes de septiembre u octubre y el fin de la precipitación en el mes de mayo.

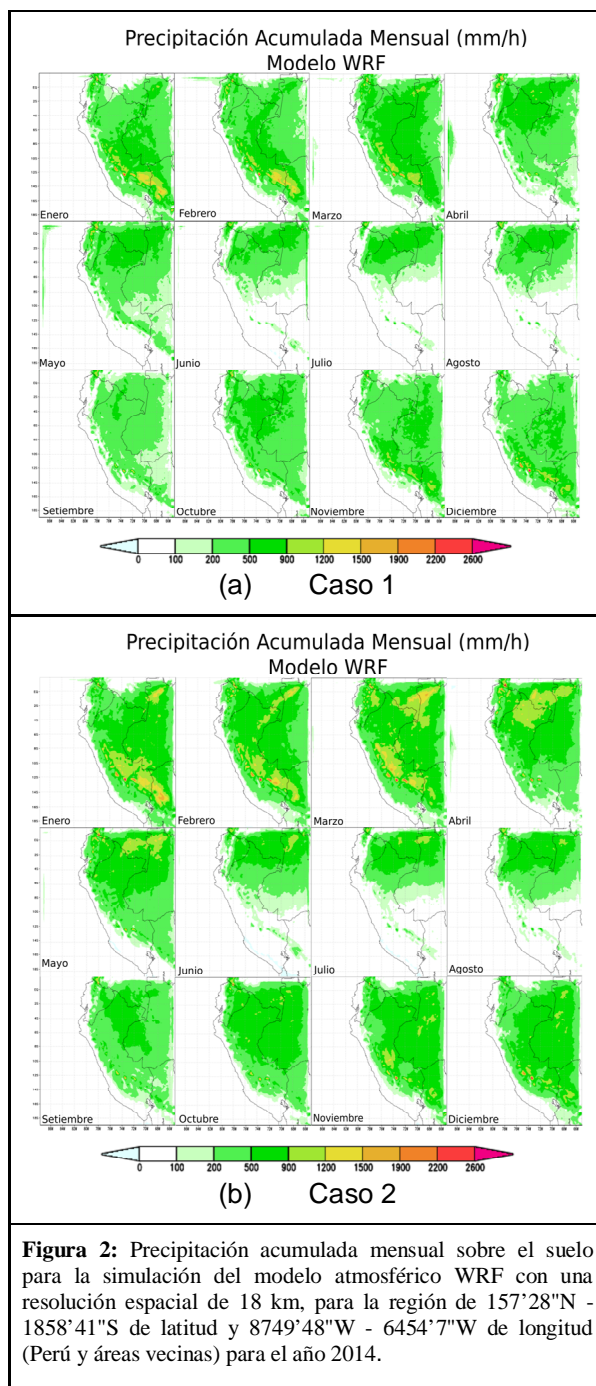


Figura 2: Precipitación acumulada mensual sobre el suelo para la simulación del modelo atmosférico WRF con una resolución espacial de 18 km, para la región de 157°28"N - 1858°41"S de latitud y 8749°48"W - 6454°7"W de longitud (Perú y áreas vecinas) para el año 2014.

Este suceso coincide con las estaciones del año: primavera y verano, donde el sol es intenso, hay mayor vapor de agua en la atmósfera y se generan precipitaciones altas; otoño e invierno las temperaturas en Junín son bajas, menos vapor de agua, precipitación baja o escasa. Una de las fortalezas del modelo WRF es su capacidad para separar la nieve de la lluvia. Los esquemas físicos utilizados en el modelo WRF (caso 1 - ver Tabla 1) no son los adecuados ya que generó datos de precipitación que sobre-estiman a los datos de precipitación in-situ en meses correspondientes a la temporada seca (junio – octubre). A pesar que el modelo WRF no fue capaz de generar datos de precipitación cercanos a los datos de precipitación in-situ, la dinámica en todo el año fue similar, registrando precipitación escasa desde el mes de junio hasta agosto.

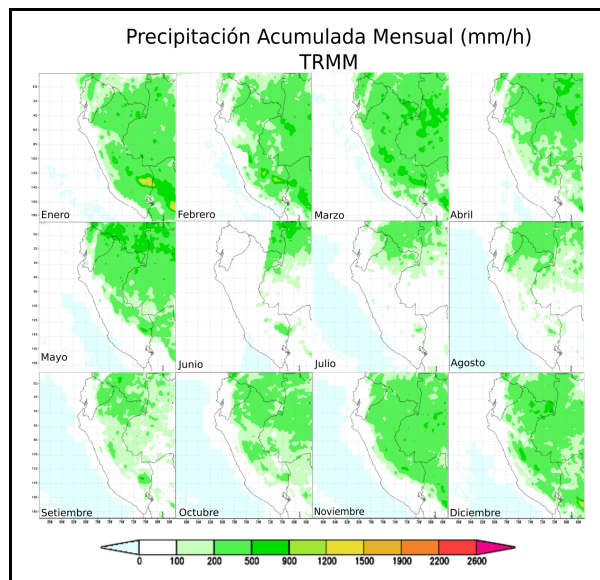


Figura 3: Precipitación acumulada mensual sobre el suelo estimado por el satélite TRMM con una resolución espacial de 0.25x0.25 grados para la región de 157°28'N - 1858'41'S de latitud y 8749'48"W - 6454'7"W de longitud (Perú y áreas vecinas) para el año 2014.

En la Tabla 2, se muestra el promedio de los errores estadísticos de los datos de precipitación in-situ (FBI, POD, FAR, Pearson, Sesgo y RMSE) para cada región del Perú (Norte, Centro y Sur), del satélite TRMM y usando el modelo WRF (caso 1 y caso 2). Se observa que los datos de precipitación utilizando el satélite TRMM super-estiman (sesgo positivo) y el modelo WRF (caso 1 y caso 2) sobre-estiman a los datos de precipitación en las doce estaciones meteorológicas (sesgo negativo). El modelo WRF para el primer caso, genera datos de precipitación más próximos a los datos in-situ (RMSE menor). Con el análisis del POD, se puede observar que el modelo WRF

para el caso 2 detectó datos de precipitación mucho mejor que en el primer caso y que las imágenes TRMM.

Tabla 2. Errores estadísticos de los datos de precipitación in-situ (FBI, POD, FAR, Pearson, Sesgo y RMSE).

Regiones	FBI	POD	FAR	Pearson	Sesgo (mm)	RMSE (mm)
3B42RT						
Norte (n=4)	0.75	0.53	0.29	0.68	2.43	84.88
Centro (n=6)	0.96	0.67	0.30	0.83	2.59	121.16
Sur (n=2)	1.55	0.75	0.51	0.50	1.09	29.54
Todo	0.99	0.65	0.35	0.72	2.28	146.59
WRF caso 1						
Norte (n=4)	1.83	0.90	0.51	0.69	-1.40	48.91
Centro (n=6)	1.51	0.90	0.41	0.81	-2.68	125.58
Sur (n=2)	2.02	0.92	0.55	0.50	-2.32	62.78
Todo	1.66	0.90	0.46	0.86	-2.24	144.28
WRF caso 2						
Norte (n=4)	2.48	0.96	0.61	0.71	-4.68	162.97
Centro (n=6)	1.68	0.94	0.44	0.82	-4.83	226.21
Sur (n=2)	2.28	0.97	0.58	0.50	-3.72	100.56
Todo	1.95	0.95	0.51	0.89	-4.59	295.22

Conclusiones

Las imágenes del satélite TRMM y el modelo WRF (ambos casos) estimaron datos de precipitación para cada mes del año 2014, mostrando una variabilidad adecuada con los eventos de precipitación que acontecen sobre el Perú. Teniendo precipitaciones máximas en la temporada de primavera y verano (septiembre a marzo) y precipitaciones mínimas en invierno (junio a agosto). El esquema según Kain-Frisch posee una baja capacidad de simular precipitaciones máximas en comparación con el esquema según Thompson que posee una alta capacidad de simular precipitaciones máximas puesto que presenta una tendencia de sobrestimar las mismas. Los datos de precipitación acumulada del satélite TRMM super-estima, y el modelo WRF sobre-estiman a los datos de precipitación acumulada in-situ. Por último, usando el análisis estadístico, se concluye que existe una alta sobrestimación en la temporada de verano para todas las estaciones meteorológicas distribuidas en el Perú. Por lo tanto, el modelo atmosférico WRF es muy sensible para generar datos de precipitación sobre el Perú.

Referencias

- Avalos, G. (2005). Validación del pronóstico de precipitación del modelo regional Eta/SENAMHI durante periodos secos y lluviosos. Tesis para optar el título de Ingeniero Meteorólogo - UNALM, 98.
- Dudhia J., Gill, D. Barker, D., Duda, M. Huang, X., Wang, W., Powers, J., Skamarock, W., Klemp. (2008). A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Technical Note, (475).
- Kousky, V., Ropelewski, C. Gan, M. (2004). The South America Monsoon Circulation and its relationship to rainfall over west-central Brazil. *Journal of Climate*, 17:47–66.
- OMM. (2006). Vigilancia y alerta temprana de la sequía: conceptos, progresos y desafíos futuros. *Tiempo, Clima y Agua*, (1006).
- Palmer, C. (1965). *Meteorological Drought*. Addison Wesley, U.S. Department of Commerce. Weather Bureau.
- Rojas, N. (2016). Análisis y simulación de las interacciones de los procesos atmosféricos e hidrológicos usando el modelo wrf durante periodos extremadamente secos en el Perú. Master's thesis, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Salas, J. (2000). Hidrología de zonas áridas y semiáridas. *Ingeniería del Agua*, 7(4):409–429.
- SENAMHI. (2007). Escenarios de cambio climático en la Cuenca del río Mantaro para el año 2100.
- Wetherald, Y. Manabe, S. (1975). The effects of doubling the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model. *Journal Atmospheric Science*, 32:3–15.