

Análisis de sensibilidad de un modelo numérico de clima en alta resolución para el estudio de precipitación y temperatura en Bolivia

Marko Andrade^{1,2,*}, Jorge E. Nava^{1,2}, Rocio Guzmán^{1,2}, Edgar Tejerina^{1,2}

¹Centro de Monitorio Climático, Departamento de Física, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

²Proyecto de Hidroclimatología, Departamento de Física, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

*markoandrade.u@fcyt.umss.edu.bo

Resumen

Se realizó un experimento de sensibilidad en modelación numérica de clima usando RegCM 4.7.0 para cuantificar la habilidad de cinco modelos climáticos de reproducir los regímenes espaciotemporales de precipitación y temperatura en Bolivia para el periodo 2005 – 2015. Los modelos corrieron en el clúster computacional de alto rendimiento de la UMSS con una reducción de escala desde 70 km (modelo global) hasta 5 km (modelo regional de alta resolución) pasando por reducciones intermedias de 30 y 10 km. Cada modelo fue evaluado en dos dominios espaciales: uno que comprende la totalidad del territorio boliviano y otro que comprende solo el departamento de Cochabamba. Los parámetros estudiados fueron la resolución espacial, la resolución temporal, el esquema de parametrización convectiva, la microfísica de nubes y la capa límite planetaria. Se pudo apreciar que el esquema de convección es el parámetro dominante, tanto para precipitación como para temperatura. La contrastación de los modelos se realizó con el producto de reanálisis ERA5, habiéndose encontrado que, para la región Cochabamba, el esquema convectivo de Tiedtke es el que tiene el mejor rendimiento tanto en precipitación como en temperatura. En cuanto al dominio Bolivia, el modelo con mejor desempeño para temperatura es de nuevo Tiedtke, pero para la precipitación se observó que el esquema convectivo Grell-Emanuel, combinado con el esquema de microfísica Nogherotto – Tompkins tiene un desempeño superior. El resultado de este trabajo representa una mejora importante en comparación con modelaciones previas en el área de estudio, y fue posible gracias a la capacidad de cómputo provista por el clúster de alto desempeño recientemente instalado en la UMSS.

Palabras clave: *Estudio de sensibilidad, Modelo climático regional, Climatología Bolivia, Temperatura superficial, Precipitación.*

Abstract

A sensitivity experiment in numerical climate modeling was carried out using RegCM 4.7.0 to quantify the ability of five climate models to reproduce the spatiotemporal precipitation and temperature regimes in Bolivia for the period 2005 – 2015. The models ran on the computational cluster of high performance of the UMSS with a scale reduction from 70 km (global model) to 5 km (high resolution regional model) passing through intermediate reductions of 30 and 10 km. Each model was evaluated in two spatial domains: one that covers the entire Bolivian territory and another that covers only the department of Cochabamba. The parameters studied were spatial resolution, temporal resolution, convective parameterization scheme, cloud microphysics, and planetary boundary layer. It was possible to appreciate that the convection scheme is the dominant parameter, both for precipitation and temperature. The contrasting of the models was carried out with the ERA5 reanalysis product, having found that, for the Cochabamba region, the Tiedtke convective scheme is the one that has the best performance in both precipitation and temperature. Regarding the Bolivia domain, the model with the best performance for temperature is once again Tiedtke, but for precipitation it was observed that the Grell-Emanuel convective scheme, combined with the Nogherotto-Tompkins microphysics scheme, has a superior performance. The result of this work represents an important improvement compared to previous modeling in the study area, and was possible thanks to the computing capacity provided by the high-performance cluster recently installed at UMSS.

Key words: *Sensitivity study, Regional climate model, Climatology of Bolivia, Surface temperature, Precipitation.*

1. Introducción

Desde su lanzamiento, originalmente en 1989, el modelo climático RegCM ha sido estandarizado como uno de los más usados por diferentes conglomerados de simulación alrededor del planeta por su flexibilidad y confiabilidad. No obstante, debido a la gran complejidad de los cálculos y de las limitaciones en capacidad computacional, los modelos globales y regionales disponibles llegan a tener una baja resolución temporal (por lo general se cuenta con un dato cada 3 horas) y baja resolución espacial (en general inferior a los 0.25° , alrededor de 25 km).

Tal como lo indican Soria-Auza, et.al. (2010), la calidad de los modelos climáticos que son utilizados en diferentes estudios influye mucho en los resultados a los que estos arriban. Es decir, un modelo climático impreciso puede conducir a apreciaciones futuras imprecisas. En el caso de Bolivia, la calidad de los modelos está sujeta a superar algunas dificultades como las que se menciona a continuación.

Para empezar, Bolivia es un país con muchos pisos ecológicos, con características climáticas diferentes y cuyas fronteras tienden a ser abruptas; esto dificulta la obtención de un único modelo para describir toda la región. Por este motivo, se suele realizar regionalizaciones con el fin de mejorar los resultados (Abadi, et. al., 2020), (Zamuriano, 2014).

El segundo problema tiene que ver con la información provista por modelos globales, los cuales tienen una resolución espacial de aproximadamente 25 km, que de ser utilizados sobre las principales ciudades de Bolivia arrojarían no más de 1 o 2 datos para describir regiones bastante extensas. Esto obliga a pensar en reducciones de escala para aumentar la data disponible.

Finalmente, mencionamos una región particular del territorio boliviano: el Chapare, en el trópico cochabambino, el cual tiene tasas de precipitación muy elevadas que lo convierten en una anomalía o “hot spot”. Este punto no es el único en Sud América, habiéndose reportado puntos similares en Ecuador (Laraque, et. al., 2007), Perú y Colombia. A pesar del conocimiento que se tiene respecto a esta zona, este es solo conocimiento empírico (Andrade, et. al. 2021), ya que no se cuenta con documentación respecto a este fenómeno, aunque diversas teorías respecto a la naturaleza del mismo se han postulado (Zamuriano, Brönnimann, 2017).

2. Materiales y métodos

Área de estudio y datos

Debido al requerimiento de gran capacidad de cómputo, los cálculos que se presentan se realizaron en el clúster computacional de la Universidad Mayor de San Simón, Neitor HPC (UMSS, 2021) usando el modelo climático regional RegCM del Centro Internacional de Física Teórica (ICTP, 2023).

Basados en las recomendaciones realizadas por el proyecto CORDEX y observando los resultados obtenidos por colectivos de simulación climática como los de Pareja, Franchito y Reyes (2021) y el de Maurya, et. al. (2018), se optó por elegir como datos de partida (globales) los del Reanálisis Era - Interim (EIN15) (ECMWF, s.f.); este catálogo provee datos de reanálisis con una resolución espacial de 0.75° (alrededor de 80 km).

Para obtener los mejores resultados posibles del experimento acorde a las capacidades computacionales disponibles, se optó por un periodo de 10 años de simulación, del 1 de enero de 2005 al 30 de diciembre de 2015, dejando los primeros seis meses de cada experimento como periodo de “spin up” del modelo (seis meses de datos no considerados en el análisis).

El “down-scaling” dinámico, o reducción de escala, se realizó de la siguiente manera con tres dominios y resoluciones como se explica a continuación:

- Resolución Continental, a 30 km, este dominio se construyó de manera que incluyese la totalidad del continente sudamericano.
- Resolución Nacional, a 10 km, se construyó para albergar la totalidad del territorio boliviano.
- Resolución Departamental, a 5 km, contempla la totalidad del departamento de Cochabamba.

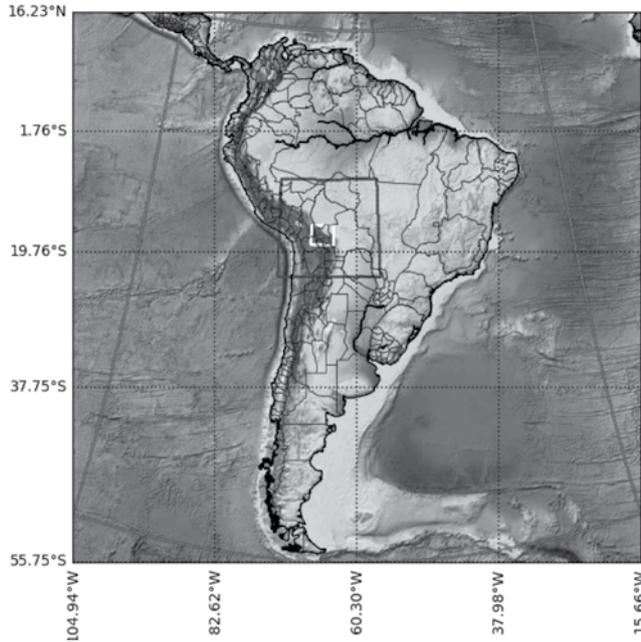


Figura 1. Dominios elegidos para el experimento de sensibilidad.

Caracterización de los modelos

Cada resolución fue replicada en cinco modelos diferentes denominados “sensit01” al “sensit05” con las características que se muestran en la Tabla 1. Las diferencias entre cada modelo radican en la parametrización convectiva, el esquema de microfísica de nubes y la parametrización de la capa límite planetaria. También fue necesario cambiar la resolución temporal para que exista consistencia con la reducción de escala espacial. Esta, sin embargo, fue idéntica en los cinco modelos por lo que no se la considera para fines de comparación.

Sobre la contrastación de resultados

Se optó por utilizar los datos de reanálisis ERA5 (ECMWF, 2023); dicho conjunto de datos representa una mejora respecto a la generación anterior (EIN15), brindando datos con una resolución espacial de 0.25° (alrededor de 25 km) que son mucho más realistas para representar la climatología de Bolivia que su predecesor.

Tabla 1

Características de los modelos usados en el experimento

Experimento	Resolución Espacial (km)	Resolución Temporal (s)	Esquema Convectivo en Tierra	Esquema Convectivo en Océano	Esquema de Microfísica de Nubes	Esquema de Límite Planetario
sensit01	30	30	Grell (Grell, et.al., 1991)	Emanuel (Emanuel, Živković - Rothman, 1999)	SUBEX (Pal, et. al., 2000)	Holtslag (Beljaars, et. al., 1990)
	10	10				
	5	5				
sensit02	30	30	Emanuel (Emanuel, Živković - Rothman, 1999)	Grell (Grell, et.al., 1991)	SUBEX (Pal, et. al., 2000)	Holtslag (Beljaars, et. al., 1990) UW (McCaa, Bretherton, 2004)
	10	15				
	5	10				
sensit03	30	30	Tiedtke (Tiedtke, 1996)	Tiedtke (Tiedtke, 1996)	SUBEX (Pal, et. al., 2000)	Holtslag (Beljaars, et. al., 1990)
	10	15				
	5	10				
sensit04	30	25	Grell (Grell, et.al., 1991)	Kain (Kain, Fritsch, 1990) (Kain, 2004)	SUBEX (Pal, et. al., 2000)	Holtslag (Beljaars, et. al., 1990)
	10	10				
	5	3				
sensit04	30	30	Grell (Grell, et.al., 1991)	Emanuel (Emanuel, Živković - Rothman, 1999)	Nogherotto - Tompkins (Nogherotto, et. al., 2012)	Holtslag (Beljaars, et. al., 1990)
	10	15				
	5	5				

3. Resultados y discusión

Lo primero que puede evidenciarse es que la resolución espacial de los modelos afecta mucho al resultado: resoluciones bajas no captan correctamente la topografía de la zona de estudio. Focalizando

el análisis en el departamento de Cochabamba, queda claro que los modelos tienen que ser de alta resolución porque de otro modo no logran percibir cambios altitudinales bruscos como los que se tiene al pasar del valle central al altiplano, cordillera y trópico departamental.

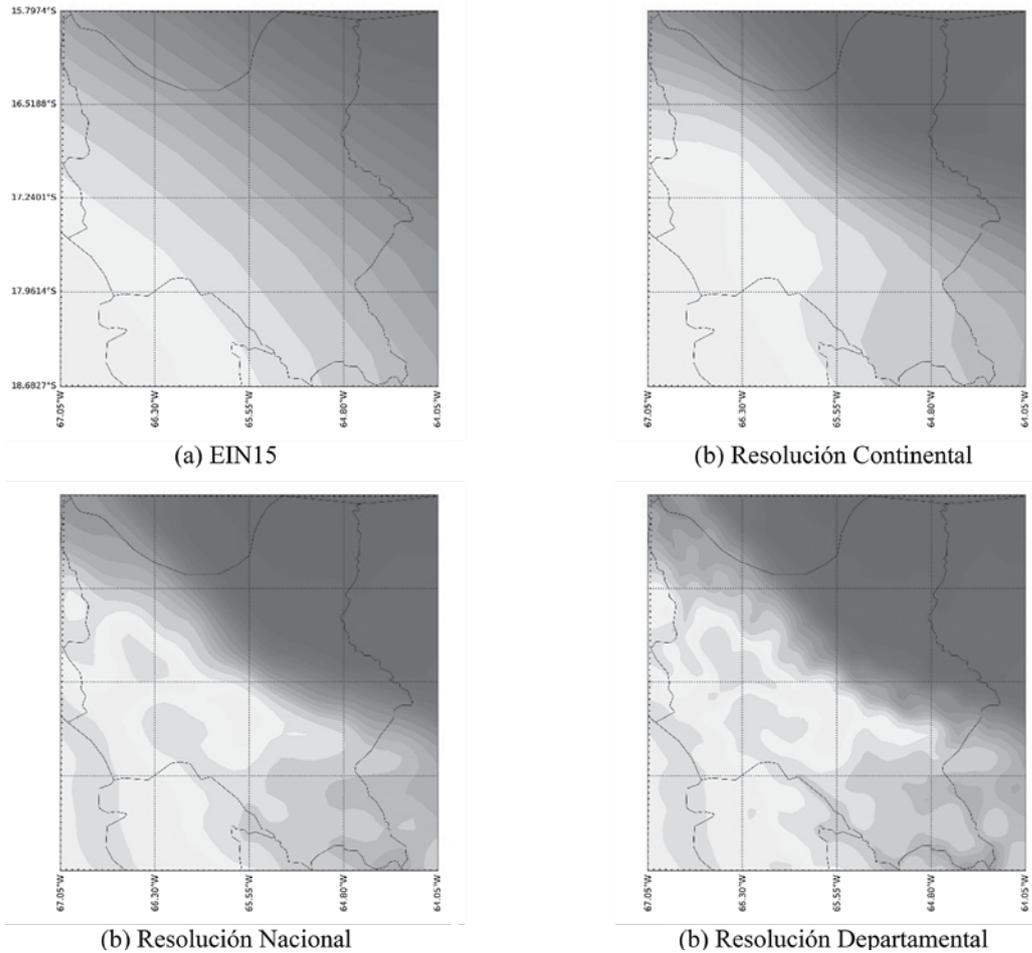


Figura 2. Topografía detectada por los modelos a diferentes resoluciones.

Análisis en alta resolución para el dominio Cochabamba

Se estudió la habilidad de los modelos de reproducir el patrón de precipitación en el departamento, especialmente para la época de lluvia que va de noviembre a marzo y prestando mayor atención a la zona de transición subandina-trópico (Chapare) antes mencionada.

Como primer criterio de comparación se presenta la evolución temporal del promedio mensual de

precipitación, en toda la región, para los cinco modelos vs. los datos de reanálisis. Ver Figura 3. Las series temporales muestran que los modelos lograron replicar el comportamiento de la precipitación, con un mínimo en la época de estiaje (junio-julio) y un aumento progresivo hasta alcanzar sus valores máximos entre los meses de diciembre y enero. Destaca sensit03 como el mejor modelo, seguido por sensit02 y sensit05. Los restantes modelos se descartan por no tener buena concordancia con la base de referencia (sobreestiman la precipitación).

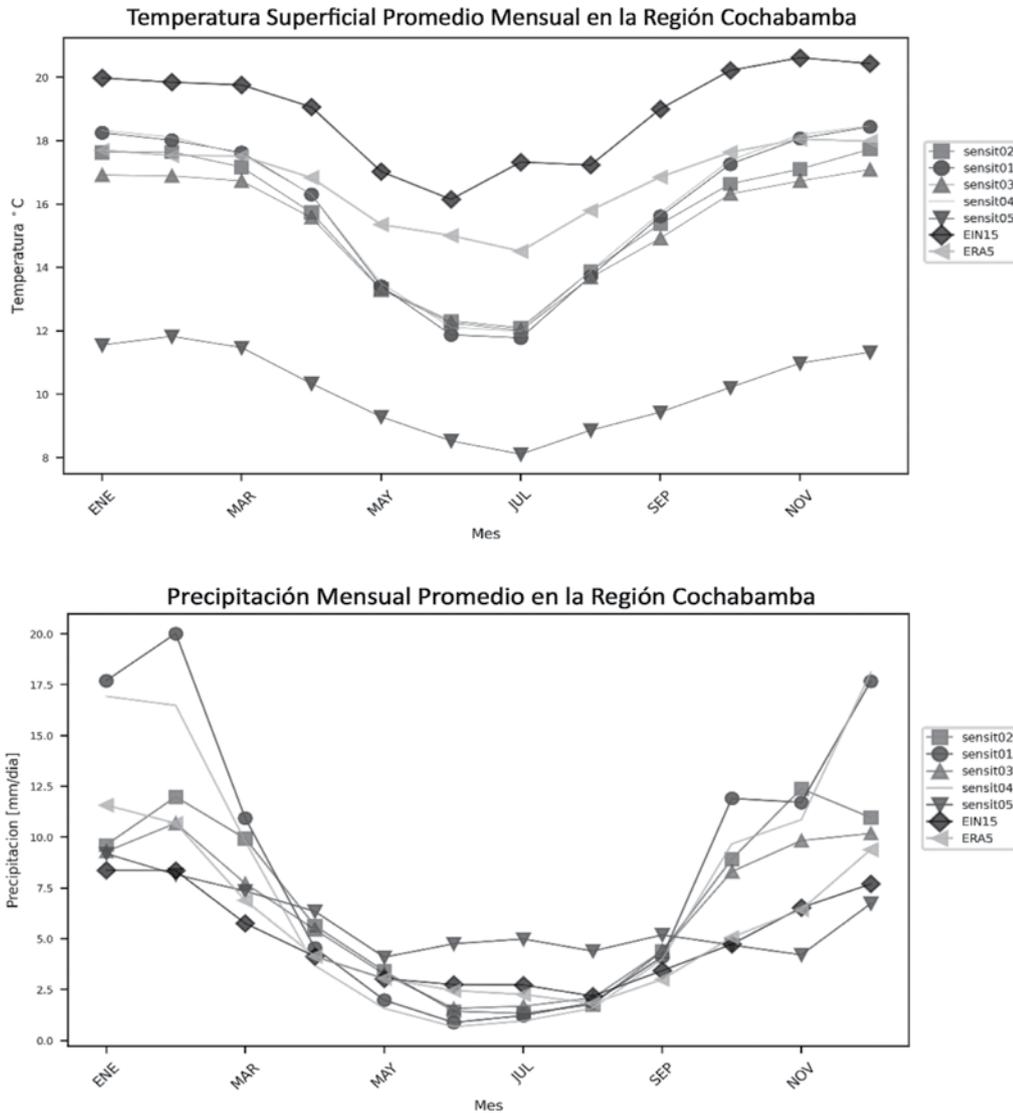


Figura 3. Comparación de los valores de precipitación mensual promedio y temperatura superficial promedio en Cochabamba.

Como segundo análisis se estudió la variación espacial de la precipitación y la temperatura. En esta ocasión se optó por separar el análisis en época húmeda y época seca, obteniendo el sesgo (o “bias”) sobre toda la región versus los datos de reanálisis para ambas variables. Las distribuciones espaciales de los sesgos se hallan en la Figura 4. Se muestra el resultado de solo los 3 mejores modelos, siendo consistentes con el primer análisis que descartó a los otros 2.

En cuanto a la precipitación durante la época de lluvia, es notable que los tres modelos tienden a sobreestimar en las regiones próximas al límite subandino-tropical del departamento, aunque lo

hacen en diferente grado. Esta sobreestimación de los modelos es previsible debido al cambio altitudinal brusco que se comentó previamente.

Se observa que el modelo sensit02 es eficiente al determinar la precipitación en la región del cono sur cochabambino y en la región noreste del departamento, no obstante, la sobreestimación subandino-tropical es mayor que en los otros modelos. Al contrario, el modelo sensit05 muestra una menor sobreestimación en el límite subandino-tropical, pero a costa de una subestimación de la lluvia en el resto del departamento. En promedio, se puede apreciar que sensit03 hace predicciones más acertadas si se

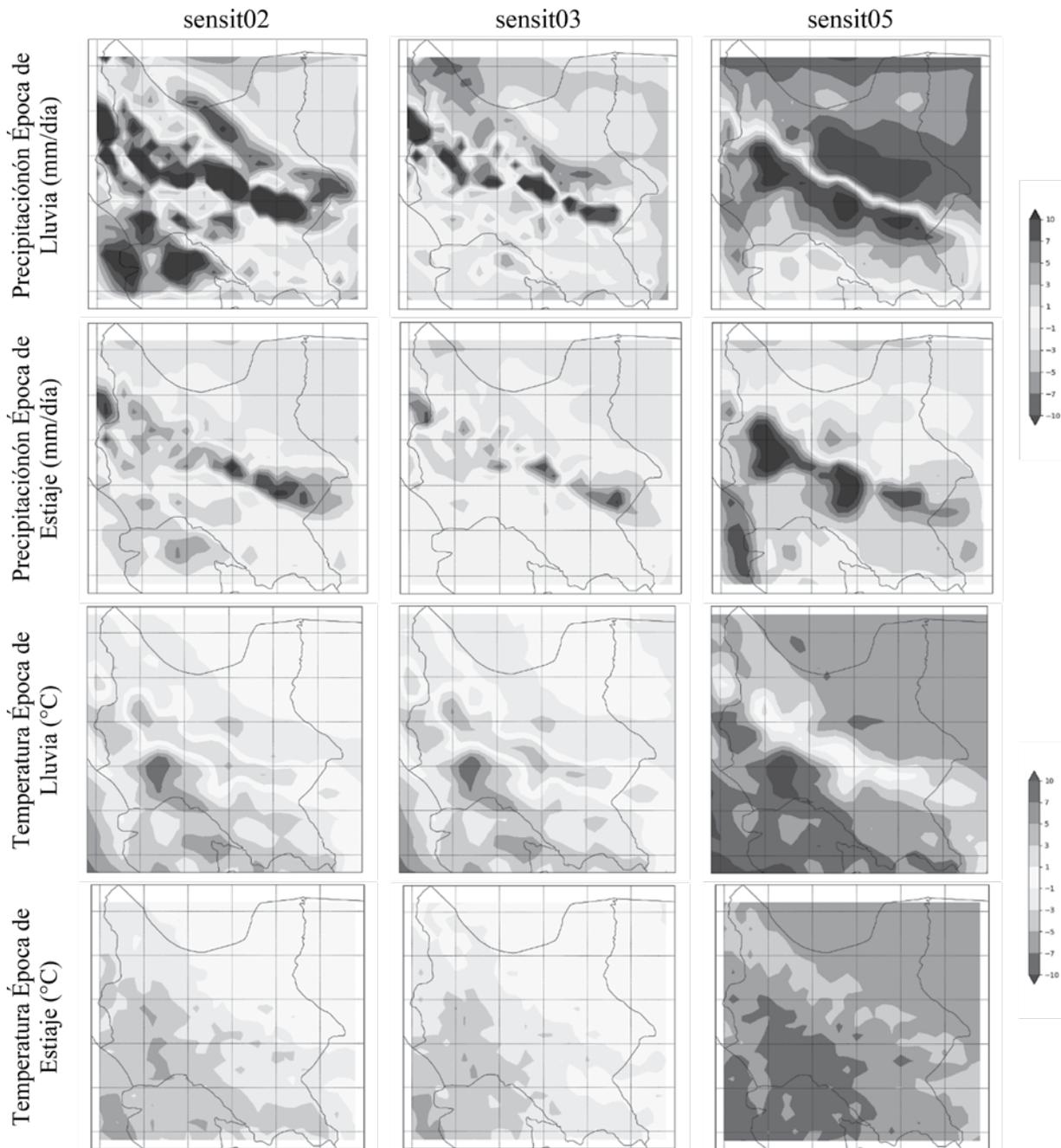


Figura 4. Distribución espacial del sesgo (“bias”) de las variables analizadas en el departamento de Cochabamba.

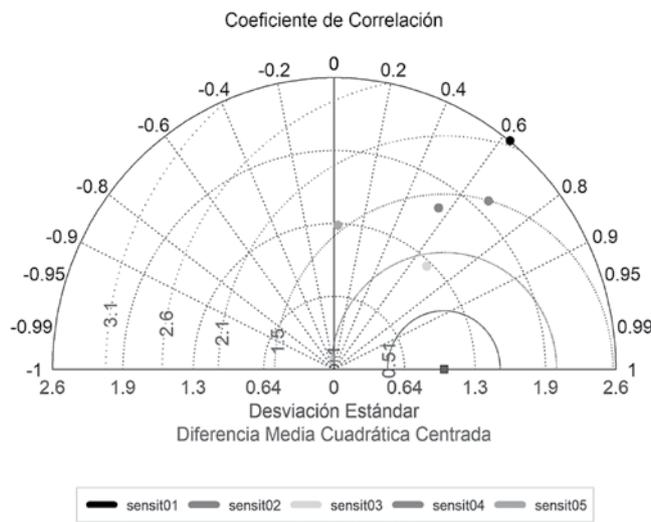
considera a todo el departamento. Esta es una nueva evidencia de que un solo modelo no sería capaz de captar correctamente el régimen de precipitación, incluso en un dominio departamental.

Por el lado de la temperatura en superficie, se confirma lo que mostraba la evolución temporal, con un modelo sensit05 bastante por debajo de la base de referencia y una diferencia especialmente notable en la región subandina del departamento. Ante esta situación, se

puede decir que un ajuste de parámetros en sensit05 (corrección de sesgo) podría ser la solución para aprovechar su buena correlación y acercarlo aún más a la realidad. Los otros dos modelos tienen mayor similitud en temperatura comparado con la base de reanálisis, y guardan una alta correlación entre sí.

Una forma de sintetizar todos los resultados mostrados hasta aquí es por medio de un Diagrama de Taylor (2001) (ver Figura 5). De este, se pueden verificar los

Diagrama de Taylor de Precipitación Anual para Cochabamba Con Referencia a ERA5 en el Periodo de Estudio



Precipitación Acumulada Anual Promedio Cochabamba

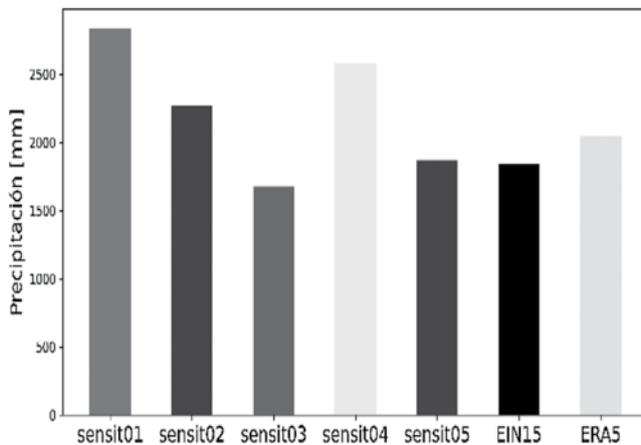


Figura 5. Diagrama de Taylor y diagrama de barras de la precipitación total acumulada anual en Cochabamba.

comportamientos descritos anteriormente, notando que sensit03 es el modelo más adecuado para describir, en promedio, la precipitación en el departamento de Cochabamba, ya que puede reproducir los datos de reanálisis con una diferencia media del orden de la unidad, un coeficiente de correlación entre 0.6 y 0.7, convirtiéndolo en el modelo que mejor se acerca a los datos de referencia. Como prueba adicional, se adjuntan los diagramas de barras con precipitación acumulada, dando nuevamente a sensit03 como el

mejor modelo en promedio para el departamento de Cochabamba. Esto de la pauta de que en posteriores estudios se concentren los esfuerzos en mejorar sensit03 mediante un ajuste fino (“tunning”) de sus parámetros.

Análisis en resolución intermedia para el dominio Bolivia

Al observar la evolución temporal de los resultados en la escala nacional, no se distinguió ningún modelo para eliminarlo a priori. Es por esto que en la Figura 6 se muestran las distribuciones del sesgo para los cinco modelos y para las dos variables climáticas. A esta escala, recién se hace notorio que tanto sensit01 como sensit04 no son capaces de reproducir adecuadamente la precipitación, pues gran parte del territorio presenta una sobreestimación, motivo por el cual son nuevamente descartados. A pesar de esto, no deja de ser significativo el buen desempeño regional de estos modelos “descartados” para el promedio nacional pero que en la Amazonía beniana y en la región del Altiplano mejoran significativamente, por lo que podrían ser utilizados en futuros estudios focalizados en tales regiones de Bolivia.

De la observación de sensit02 y sensit03 a esta escala, se evidencia que se produjo una sobreestimación significativa de lluvia en época húmeda en la región fronteriza entre la región subandina y la cordillera oriental, coincidiendo con Salamanca (2008). En cuanto a la temperatura en superficie, se hizo evidente que ambos modelos estiman adecuadamente los valores medios, notando que las diferencias más significativas se encuentran fuera del territorio nacional. Pasando a sensit05, se puede señalar que a nivel de precipitación en época de lluvia es el que más tiende a acercarse a los datos de reanálisis, con una discrepancia en la región de Chapare que podría resolverse con un ajuste fino de parámetros. Al contrario, con la temperatura se hace claro que este modelo es con mucho el que más se aleja de las observaciones, dando valores muy por debajo de los esperados en toda la región de estudio.

A partir de estas observaciones, es que se puede deducir que, a diferencia de lo logrado con la escala departamental, al parecer no será posible tener un único modelo para la descripción de ambas variables. Considerando además que los resultados en estiaje fueron consistentes entre los modelos, se

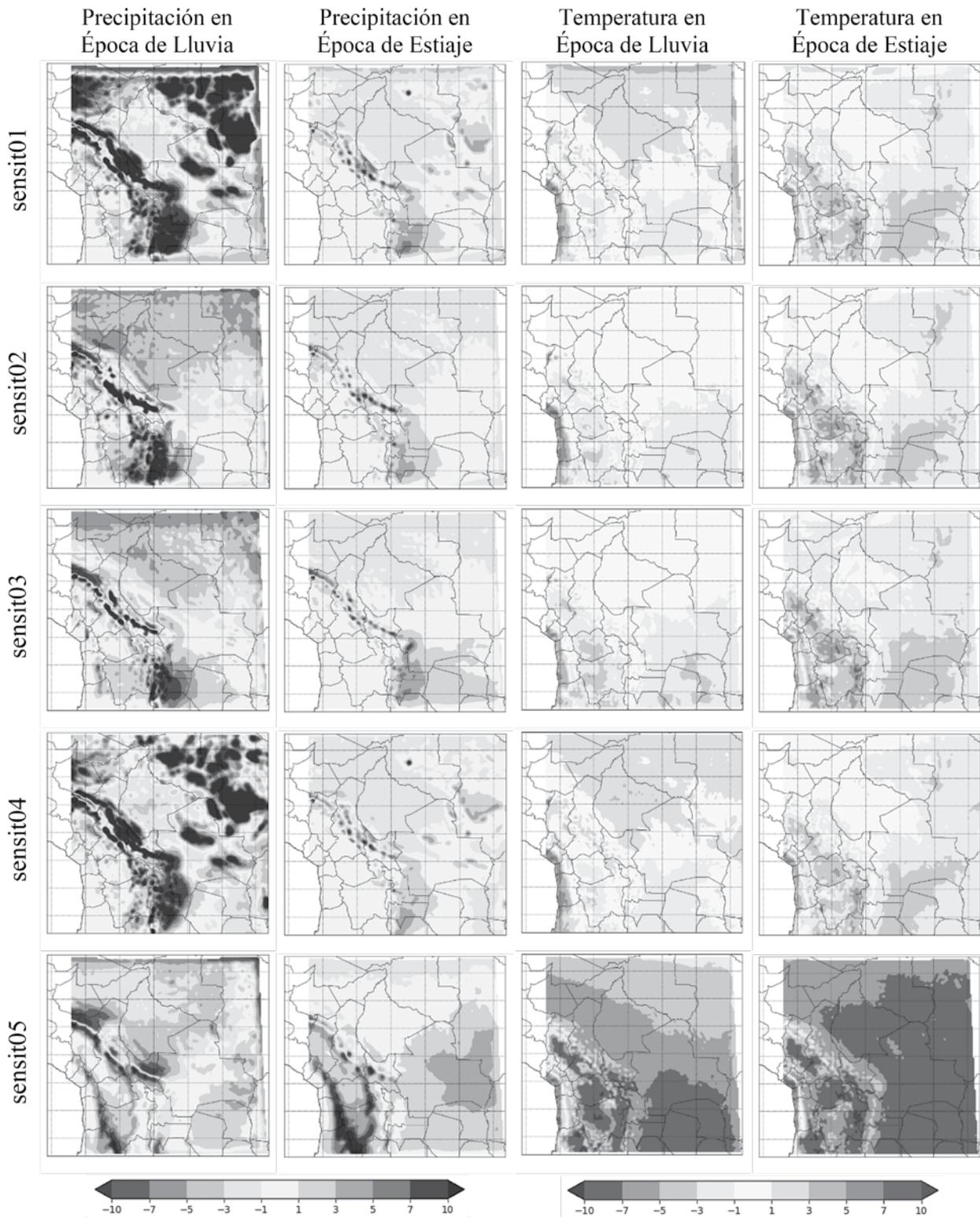


Figura 6. Distribución espacial del sesgo de precipitación y temperatura en el dominio Bolivia.

opta por realizar el análisis estadístico a partir de los Diagramas de Taylor para la época de lluvias en el periodo de análisis (ver Figura 7).

Por la parte de la temperatura, es evidente que sensit05 es el modelo que más se aleja de las mediciones tal como se había notado anteriormente. Los demás

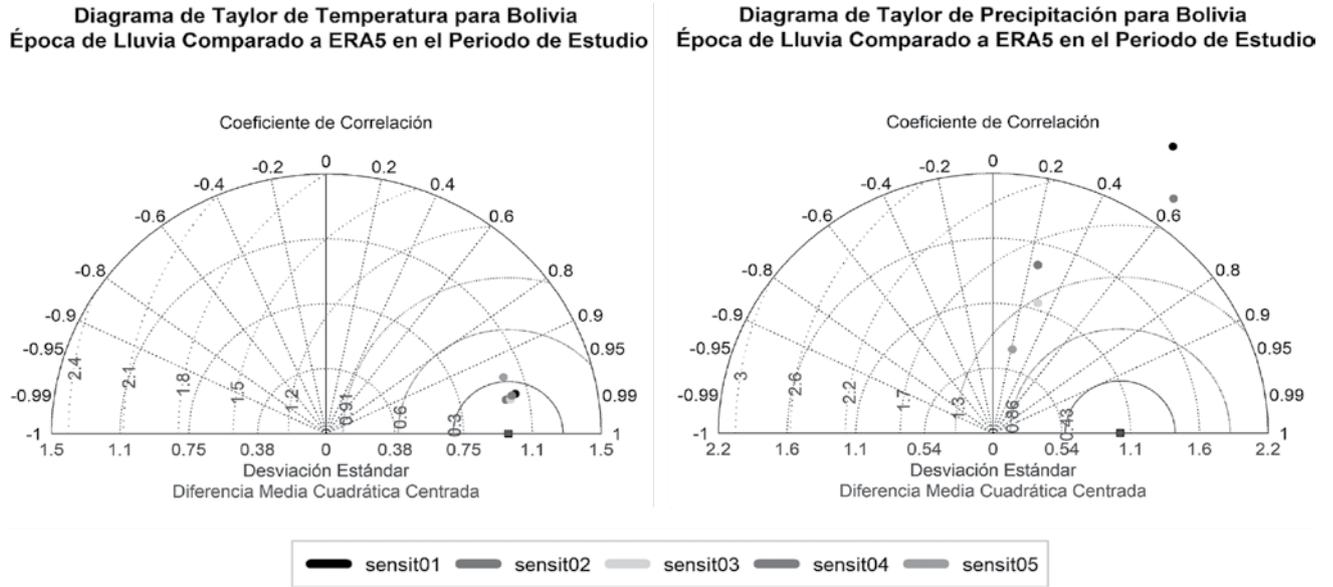


Figura 7. Diagramas de Taylor para la precipitación y temperatura superficial en el territorio boliviano.

modelos parecen mostrar un comportamiento muy similar entre ellos, aunque es notable que los más cercanos (por una pequeña diferencia) a los datos de reanálisis llegan a ser sensit02 y sensit03; llegando a tener un coeficiente de correlación en el orden de 0,99. Al cuantificar las diferencias medias cuadráticas, es que finalmente se observó que, en temperatura superficial, sensit03 es el modelo de mejor desempeño en el territorio nacional.

Pasando al análisis en el caso de la precipitación, es notable que ninguno de los tres modelos de mayor consistencia supera una correlación de 0,3; esto debido a las significativas áreas de discrepancia que

se observaron. Entre estos, sensit03 logra un valor superior, aunque lo hace a costo de incrementar su error medio hasta superar el orden de la unidad. Sumando lo bien que logra reproducir la distribución espacial de los resultados, es que se puede ver que sensit05 es el modelo que tuvo mejor desempeño, aunque una serie de ajustes son necesarios para mejorar los resultados.

4. Discusión

Los hallazgos de este trabajo pueden encontrarse resumidos en la Tabla 2.

Tabla 2

Resumen de resultados del análisis de sensibilidad

Escala	Modelo Recomendado	Observaciones
Departamental (resolución alta, 5 km)	Tiedtke - Tiedtke	Modelo apto para la descripción de precipitación y temperatura.
Nacional (resolución intermedia, 10 km)	Tiedtke - Tiedtke	Modelo óptimo para describir la temperatura.
	Grell – Emanuel + Nogherotto - Tompkins	Modelo óptimo para describir la precipitación.

Con base en los resultados de los experimentos numéricos, se pudo notar claramente que tres configuraciones destacan sobre los demás por su capacidad de representar la climatología del área de estudio. Asimismo, fue muy evidente que la resolución

espacial juega un papel importante en los resultados, pues el modelo que mejor representó ambas variables a nivel Cochabamba, no lo hizo de la misma manera para el territorio boliviano en su totalidad.

De esta manera, se notó que, al centrarse en el departamento de Cochabamba, el modelo sensit03 que corresponde al esquema convectivo de Tiedtke (Tiedtke, 1989) (Tiedtke, 1993), aplicado tanto en tierra como en océano, es por mucho el más adecuado para representar el brusco cambio altitudinal que se encuentra en la frontera entre la región subandina y el trópico del departamento.

No obstante, al cambiar la escala a una menor resolución para abordar el dominio nacional, se evidenció que sensit03 bajaba su calidad de representación de la precipitación, con lo que puede comprobarse efectivamente la ganancia que se obtiene de la mejora de resolución en los modelos climáticos. Esto se contrasta al comparar los resultados con el conjunto de datos de partida (EIN15); se observaron diferentes fenómenos que no se percibían a la escala original.

A esta escala, se pudo ver la capacidad de Tiedtke como esquema convectivo; especialmente a la hora de reproducir la temperatura media en superficie; de modo que se optó por elegirlo como el modelo de temperatura a esta escala. No obstante, se pudo notar que el esquema combinado Emanuel en tierra y Grell en océano se encontraba bastante cerca de Tiedtke en ambas variables. Al comparar los resultados de este experimento con los de la escala departamental, se puede ver que para esta parametrización el esquema de límite planetario UW (Bretherton, et. al., 2004) permite una reducción significativa del error medio. Por tanto, se recomienda que en un futuro trabajo se pueda combinar este con el esquema de Emanuel (Emanuel, Živković-Rothman, 1999) en tierra y el esquema de Grell (Grell, et.al., 1991) en el océano para contrastar con los resultados de este trabajo.

Por el lado del modelo regional de precipitación en la escala Bolivia, finalmente, los resultados conllevaron a elegir la combinación del esquema mixto Grell en tierra y Emanuel en océano; trabajando en conjunto con el esquema de Nogherotto – Tompkins de microfísica de nubes como el modelo adecuado para la descripción. Este mostró ser particularmente el modelo que más problemas tiene para captar las variaciones de temperatura superficial; por tanto, es recomendable hacer un experimento más tanto con este modelo como con Tiedtke para determinar si es posible decantarse por alguno de los dos como único modelo para el estudio de precipitación y temperatura en Bolivia.

Por otra parte, se recomienda ampliar este estudio, usando los datos de ERA5 como base de datos de entrada para el modelo, de modo que se pueda verificar si los datos de reanálisis llevan a una mejoría de los resultados.

Por la capacidad de los modelos de reproducir las condiciones observadas, se hace evidente que se pueden usar estos esquemas para hacer predicciones a corto y largo plazo para la región; y se recomienda realizarlo en un futuro estudio.

Finalmente, destacamos que el resultado de este trabajo representa una mejora importante en comparación con modelaciones previas en el área de estudio, y fue posible gracias a la capacidad de cómputo provista por el clúster de alto desempeño recientemente instalado en la UMSS.

5. Referencias bibliográficas

- Abadi, A. M., Rowe, C. M., y Andrade, M. (2020). *Climate regionalization in Bolivia: a combination of non-hierarchical and consensus clustering analyses based on precipitation and temperature. International Journal of Climatology*, 40(10), 4408-4421. <https://doi.org/10.1002/joc.6464>
- Andrade M., Terrazas, J., y Guzmán, R. (2021). Homogeneización de series mensuales de temperatura y precipitación en Bolivia a partir de registros SENAMHI entre 1980 y 2015. *Ciencia y Tecnología*, 1 (13), 78-86.
- Beljaars, A. C. M., Holtslag, A. A. M., y Turkenburg, W. C. (1990). *Diabatic wind speed profiles in coastal regions: comparison of an internal boundary layer (IBL) model with observations. Boundary-layer meteorology*, 51, 49-75. <https://doi.org/10.1007/BF00120461>
- Bretherton, C. S., McCaa, J. R., y Grenier, H. (2004). *A new parameterization for shallow cumulus convection and its application to marine subtropical cloud-topped boundary layers. Part I: Description and 1D results. Monthly weather review*, 132(4), 864-882. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<0864:ANP FSC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<0864:ANP FSC>2.0.CO;2)

- ECMWF. (s.f.). *ECMWF Reanalysis - Interim (ERA-Interim)*. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Recuperado de: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-interim>
- ECMWF. (2023). *ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present*. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Recuperado de: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>
- Emanuel, K. A., y Živković-Rothman, M. (1999). *Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models*. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56(11), 1766-1782. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056<1766:DAEOAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<1766:DAEOAC>2.0.CO;2)
- Grell, G. A., Kuo, Y. H., y Pasch, R. J. (1991). *Semiprognostic tests of cumulus parameterization schemes in the middle latitudes*. *Monthly weather review*, 119(1), 5-31. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1991\)119<0005:STOCP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1991)119<0005:STOCP>2.0.CO;2)
- ICTP. (2023). RegCM. Trieste, Italia: *International Centre for Theoretical Physics*. Recuperado de: <http://clima-dods.ictp.it/regcm4/>
- Kain, J. S., y Fritsch, J. M. (1990). *A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization*. *Journal of Atmospheric Sciences*, 47(23), 2784-2802. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1990\)047<2784:AODEPM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1990)047<2784:AODEPM>2.0.CO;2)
- Kain, J. S. (2004). *The Kain-Fritsch convective parameterization: an update*. *Journal of applied meteorology*, 43(1), 170-181. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2)
- Killeen, T. J., Douglas, M., Consiglio, T., Jørgensen, P. M., y Mejia, J. (2007). *Dry spots and wet spots in the Andean hotspot*. *Journal of Biogeography*, 34(8), 1357-1373. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01682.x>
- Laraque, A., Ronchail, J., Cochonneau, G., Pombosa, R., y Guyot, J. L. (2007). *Heterogeneous distribution of rainfall and discharge regimes in the Ecuadorian Amazon basin*. *Journal of hydrometeorology*, 8(6), 1364-1381. <https://doi.org/10.1175/2007JHM784.1>
- Maurya, R.K.S., Sinha, P., Mohanty, M.R. y Mohanty, U.C. (2018). *RegCM4 model sensitivity to horizontal resolution and domain size in simulating the Indian summer monsoon*. *Atmospheric Research*, 210, 15-33. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.04.010>
- McCaa, J. R., y Bretherton, C. S. (2004). *A new parameterization for shallow cumulus convection and its application to marine subtropical cloud-topped boundary layers. Part II: Regional simulations of marine boundary layer clouds*. *Monthly weather review*, 132(4), 883-896. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<0883:ANPFSC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<0883:ANPFSC>2.0.CO;2)
- Nogherotto, R., Tompkins, A. M., Giorgi, F., y Coppola, E. (2012). *The new microphysic cloud scheme implemented in RegCM4*. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 8017). Recuperado de: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2012EGUGA..14.8017N/abstract>
- Pal, J. S., Small, E. E., y Eltahir, E. A. (2000). *Simulation of regional-scale water and energy budgets: Representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM*. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D24), 29579-29594. <https://doi.org/10.1029/2000JD900415>
- Pareja-Quispe, D., Franchito, S.H. y Fernandez, J.P.R. (14 agosto 2021). *Assessment of the RegCM4 Performance in Simulating the Surface Radiation Budget and Hydrologic Balance Variables in South America*. *Earth Syst Environ* 5, 499-518. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00249-y>
- Salamanca Mazuelo, L. A. (2008). *PROPUESTA PARA EL VI PLAN DE ACCIÓN DEL PROGRAMA DIPECHO*. Comisión Europea de Ayuda Humanitaria. Recuperado de: https://ec.europa.eu/echo/files/funding/opportunities/interest_dipecho6_bolivia.pdf
- Soria-Auza, R. W., Kessler, M., Bach, K., Barajas-Barbosa, P. M., Lehnert, M., Herzog, S. K., y Böhner, J. (2010). *Impact of the quality of climate*

- models for modelling species occurrences in countries with poor climatic documentation: a case study from Bolivia. Ecological Modelling*, 221(8), 1221-1229. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.01.004>
- Taylor, K. E. (2001). *Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. Journal of geophysical research: atmospheres*, 106(D7), 7183-7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Tiedtke, M. (1989). *A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. Monthly weather review*, 117(8), 1779-1800. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1779:ACMFSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1779:ACMFSF>2.0.CO;2)
- Tiedtke, M. (1993). *Representation of clouds in large-scale models. Monthly Weather Review*, 121(11), 3040-3061. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1993\)121<3040:ROCI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121<3040:ROCI>2.0.CO;2)
- Tiedtke, M. (1996). *An extension of cloud-radiation parameterization in the ECMWF model: The representation of subgrid-scale variations of optical depth. Monthly weather review*, 124(4), 745-750. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1996\)124<0745:AEOCRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1996)124<0745:AEOCRP>2.0.CO;2)
- Universidad Mayor de San Simón. (2021). neitor. Cochabamba, Bolivia: Universidad Mayor de San Simón. Recuperado de <https://neitor.umss.edu.bo/>
- Zamuriano, M., y Brönnimann, S. (2017, Abril). *Numerical investigations with WRF about atmospheric features leading to heavy precipitation and flood events over the Central Andes' complex topography. In EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 12551). Recuperado de: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017EGUGA..1912551Z/abstract>