***Título del tema de investigación****: Los forzantes climáticos de la precipitación estival en la Cuenca del río Bermejo y su posibilidad de pronóstico en escalas mensuales.*

**Objetivos:** El objetivo general del presente plan es diseñar modelos de pronóstico de precipitación mensual en la Cuenca del Río Bermejo utilizando técnicas estadísticas.

Para poder cumplimentar el objetivo general se enumeran los siguientes objetivos específicos:

1. Analizar el comportamiento de la precipitación y su relación con el caudal del Río Bermejo, en escalas que abarcan desde los eventos individuales de precipitación hasta la precipitación acumulada mensual. Estudiar como los mismos repercuten en el caudal del río en distintos sectores del mismo, haciendo hincapié en el retardo entre la lluvia y el aumento del caudal especialmente en la época estival (octubre a marzo) donde se producen los máximos de precipitación.
2. Estudiar la relación existente entre diferentes forzantes climáticos y la variabilidad interanual de las anomalías de precipitación mensual en la época estival y regiones de la cuenca: El Niño-Oscilación Sur, el comportamiento del océano Indico, la acción de los oestes sobre el Pacífico, el efecto del anticiclón del Atlántico y el monzón sudamericano
3. Establecer la incidencia de los forzantes estudiados sobre la variabilidad espacial de la precipitación estival de la cuenca y los alrededores
4. Generar modelos estadísticos de pronóstico de precipitación mensual y determinar la eficiencia de los mismos.

**Antecedentes:** La cuenca del río Bermejo forma parte de la cuenca del Plata con alrededor de 123.162 Km2, de los cuales el 90% se ubica en territorio argentino (Chaco, Formosa, Jujuy y Salta), albergando una población estimada es de 1.500.000 habitante (http://corebe.org.ar/). El Río Bermejo tiene una longitud de 1.300 km y corre desde la Cordillera de los Andes hacia la llanura chaqueña. Por sus características geomorfológicas la cuenca se divide en Alta y Baja. La Alta Cuenca está definida por cuatro tributarios principales del Río Bermejo: el Río Grande de Tarija, el Río Alto Bermejo, el Río Pescado y el Río San Francisco. En la Baja Cuenca el Río Bermejo recibe un número importante de arroyos. La cuenca alta sufre crecidas repentinas muy importantes y problemas de erosión, debido a la importante pendiente mientras que al alcanzar la llanura la pendiente es prácticamente nula y el río no presenta un cauce estable y definido, lo cual favorece las inundaciones. El Bermejo es responsable por el aporte de aproximadamente el 80% de los sedimentos que llegan a los ríos Paraguay y Paraná. El régimen hidrológico de los ríos es netamente pluvial, es decir que el caudal es regulado enteramente por las precipitaciones, y está caracterizado por un período de altos caudales en la época lluviosa (75% del escurrimiento entre enero y marzo y un 85% en todo el período estival) y otro de caudales mínimos en la época seca (abril a septiembre). Esto implica que la variabilidad interanual de la precipitación sobre la cuenca influye en forma importante sobre el caudal del río y por lo tanto incide en las crecidas que se producen tanto en la cuenca alta como en la baja. En este contexto, el pronóstico anticipado de la precipitación y del caudal en escalas mensuales, resulta un elemento que puede ayudar a planificar actividades económicas y a mitigar posibles impactos negativos derivados de las inundaciones y crecidas que sufre la región. Es por ello que resulta importante el estudio de los diferentes factores que influencian la variabilidad interanual de la precipitación estacional en el área (Rolla y González 2018). Aunque el fenómeno El Niño-Oscilación Sur (ENOS) sea el principal forzante remoto (Trenberth 1996, 1997, Ropelewski y Halpert 1987, Vera et al 2004, Grimm 2011, entre muchos otros autores), no se debe descartar la influencia de otros forzantes, que adquieren relevancia sobre todo en situaciones de ENOS neutrales. Existe una clara influencia sobre la precipitación, de las anomalías de temperatura de la superficie del mar en el océano Indico ya sea a través del patrón del Dipolo del Indico (Saji et al 1999) como de su calentamiento o enfriamiento generalizado (Taschetto y Ambrizzi 2012). La acción del monzón sudamericano (Kousky 1988) y la variabilidad interanual de la convección sobre la selva brasilera, sobre todo en las épocas de inicio y fin del verano también afectan a la precipitación estacional (González y Barros 1998, 2002, Barros et al 2002). Las ondas de Rossby desplazándose en el Pacífico y el efecto del modo anular del Sur (SAM) también son condicionantes en la precipitación de Argentina (Nogues Paegle 2012, Mo 2000, Silvestri y Vera 2003, González 2013). Por otro lado, la posición e intensidad del anticiclón del Atlántico también regula los procesos advectivos de humedad hacia el continente que influencian la precipitación en el norte argentino (Garbarini 2016, González et al 2016). En este plan se propone estudiar la forma en que cada uno de estos factores afecta a la precipitación estival en la cuenca del río Bermejo pero con una base de datos de mediciones de precipitación con resolución espacial mayor que la que provee el Servicio Meteorológico Nacional y que permitirá detectar la diferente respuesta de los forzantes en distintas zonas de la cuenca. A partir de los resultados obtenidos se propone diseñar modelos de pronóstico estadístico para estimar la precipitación mensual y relacionarlo con el posible caudal del río en distintos sectores en el semestre de verano. La postulante se encuentra actualmente escribiendo su tesis de Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera donde ensayó un modelo estadístico de pronóstico para la precipitación de primavera en la cuenca (Ayala et al 2016). Los resultados obtenidos alientan a profundizar en el tema del análisis de los forzantes remotos, con el fin de derivar modelos de pronóstico de precipitación mensual en el semestre estival y relacionarlos con el posible caudal del río.

***El grupo de trabajo en el que se inserta la postulante a esta beca doctoral, está consolidado y trabaja conjuntamente con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en la elaboración de los pronósticos trimestrales de precipitación y temperatura cada mes en reuniones de consenso realizadas para tal fin desde 2007. Se adjunta nota que certifica esta interacción. Además, ha firmado acuerdos específicos como, por ejemplo: en diciembre de 2015 por resolución Nº3174 del CD de la FCEN UBA, un Convenio Marco de Cooperación Académica entre la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Comahue y la FCEN UBA donde este grupo de trabajo se compromete a la cooperación mutua para el desarrollo de modelos estadísticos de pronóstico de precipitación y temperatura para la región del Comahue, con el objetivo de mejorar la operatividad de las presas hidroeléctricas; una carta de intención de cooperación mutua con la Comisión Regional del Río Bermejo (COREBE) firmada en septiembre de 2008 entre CIMA (CONICET-UBA) y COREBE, y otra que actualmente se encuentra en trámite para renovar la anterior.***

***Esta beca se enmarca dentro de Temas Estratégicos del Plan Argentina Innovadora 2020:* Sistemas de información asociados al cambio climático y los servicios meteorológicos.** Captura, procesamiento y puesta en disponibilidad de datos ambientales, con énfasis en validación e interpretación de información; monitoreo y evaluación de comportamiento de sistemas naturales y antropizados; respuestas a eventos extremos.

**Actividades y metodología:** Para poder desarrollar los objetivos mencionados se detallan las siguientes actividades:

**Actividad 1.** Se elaborará una base de datos de precipitación diaria y mensual y de caudal con los datos provenientes de diversas fuentes en el área de la cuenca del Río Bermejo: Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Comisión Regional del Río Bermejo (COREBE), Administración de Aguas de Chaco (APA) y Secretaría de Recursos Hídricos de la Nación, para el mayor registro común disponible. La información debe consistirse y se debe hacer un tratamiento adecuado de los datos faltantes. Se trabajará con datos de variables meteorológicas y oceánicas provenientes de los reanálisis del NCEP (Kalnay et al 1994).

**Actividad 2.** Se analizará el ciclo medio anual de la lluvia y las tendencias a largo plazo de las series de precipitación anual acumulada y mensual, en cada una de las estaciones consideradas. También se analizarán las series de caudales medios mensuales, estableciendo el año hidrológico y el caudal pico. Se determinarán las posibles tendencias a largo plazo en el caudal medio y en el caudal máximo.

**Actividad 3.** Se determinarán estaciones de referencia en cada subcuenca (alta y baja) para comparar la precipitación diaria y mensual en cada año con el caudal del río, con el fin de determinar el tiempo de retardo existente entre un máximo de lluvia (en diferentes escalas temporales) y el máximo de caudal en diferentes sectores del río.

**Actividad 4.** Se evaluará la incidencia del fenómeno ENOS (El Niño-Oscilación Sur) sobre la precipitación mensual de la cuenca. Para ello se clasificará a cada mes de cada año en Niño, Niña o Neutro utilizando uno o varios índices que se estimen adecuados. Esta clasificación se utilizará para evaluar los campos compuestos de anomalías de precipitación mensual para cada grupo en particular.

**Actividad 5.** Se evaluará la incidencia de las anomalías de la temperatura de la superficie del mar (TSM) en el Océano Indico sobre la precipitación mensual de la cuenca. Para ello se analizarán las anomalías de la TSM bajo 2 aspectos diferentes. El primero es la presencia del Dipolo del Océano Indico (DI) (Saji et al 1999). El segundo está referido al calentamiento/enfriamiento generalizado de la cuenca del Indico (GCI) (Taschetto y Ambrizzi 2012). Se identificarán estos patrones utilizando la metodología de componentes principales sobre las anomalías de TSM en el Océano Indico. Se evaluará, a través del análisis de los campos compuestos en situaciones de presencia del DI o GCI, la respuesta observada en las anomalías de precipitación mensual.

**Actividad 6.** Se determinará la incidencia del monzón sudamericano (Zhou y Lau 1998, González y Barros 1998) sobre la precipitación estival de la cuenca. Para ello se establecerá el área con mínimo valor de OLR (Radiación de onda larga saliente) para cada mes de cada año y se la relacionará con la variabilidad interanual de la precipitación en ese mes. Por otro lado, se identificarán índices (Kousky 1988, Gan et al 2006) que permitan estimar la fecha de inicio y fin del monzón para relacionarlos con la precipitación de los meses de inicio y fin de la estación estival en la cuenca.

**Actividad 7.** Se utilizarán las series mensuales de intensidad y posición del anticiclón del Océano Atlántico a partir de datos de geopotencial el 1000 hPa (Garbarini 2016, González et al 2016). Se analizará si existe una respuesta en los campos de anomalías mensuales de precipitación en la cuenca cuando el anticiclón tiene una intensidad anormalmente alta o baja, o cuando su ubicación es muy diferente de la normal esperada. Para ello se analizarán las series de los índices y se evaluarán los campos compuestos de anomalías de precipitación en cada caso extremo.

**Actividad 8.** Se construirán los patrones de variabilidad del geopotencial en 500 hPa para los meses estivales con el fin de representar el comportamiento de las ondas de Rossby en el Océano Pacifico (Mo 2000, Silvestri y Vera 2003, González 2013). Para ello se aplicará la metodología de componentes principales a las anomalías mensuales de dicha variable. Se estudiará si los patrones derivados están relacionados con la variabilidad interanual de la precipitación en la cuenca a través de la comparación de campos compuestos. También se analizará la incidencia del modo anular del sur (SAM) utilizando el método de correlación.

**Actividad 9.** A partir de los resultados derivados del estudio de los forzantes en las actividades previas y su relación con la precipitación, se definirán índices que representen a los forzantes. Se aplicará el método de componentes principales (modo T) a la precipitación acumulada estival en la cuenca y sus alrededores para determinar patrones de comportamiento de la precipitación. Los autovectores derivados de la aplicación de esta técnica se relacionarán con los índices anteriormente definidos con el fin de poder determinar para cada año cuales factores actuaron simultáneamente.

**Actividad 10.** Para cada subcuenca (alta y baja) del río Bermejo y para cada mes de la estación estival, se determinará una serie promedio de precipitación representativa de dicha subcuenca. Se utilizarán dichas series para detectar predictores de anomalías de precipitación mensual, correlacionándolas con variables meteorológicas y oceánicas observadas el mes anterior (temperatura de la superficie del mar, la altura geopotencial en diferentes niveles, la humedad atmosférica, la convección en la selva brasilera y el viento en capas bajas y todos los índices determinados en las actividades previas). Los predictores deberán ser independientes entre sí y tener significado físico. Especial cuidado se pondrá en la selección de los mismos con el fin de evitar que se generen regresiones espúreas (overfitting) o que se propongan modelos que no sean estables. Para ello se aplicará la técnica LASSO (James et al 2013) que permite obtener objetivamente el mejor conjunto de predictores independientes que se utilizan en el modelo.

Se diseñarán modelos estadísticos para el pronóstico la precipitación mensual en la estación estival para cada una de las localidades de la cuenca y los alrededores, utilizando técnicas de regresión múltiple, como por ejemplo backward stepwise (Hyndman and Athanasopoulos 2013). Esto permitirá generar campos espaciales de lluvia con pronósticos cuantitativos para cada mes de la época estival.

Se validarán los modelos resultantes con metodologías de crossvalidación. Esta técnica permite analizar la estabilidad del modelo, observando que los coeficientes de regresión sean similares. Se analizará la eficiencia de los mismos con índices pertinentes (entre ellos: el error general, la probabilidad de detección, la relación de falsa alarma, el error cuadrático medio, el índice AIC, el índice de Heidke, índice de Brier).

**Actividad 11.** Redacción del trabajo de tesis.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Actividad – Año 1** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** | **11** | **12** |
| 1 2 3 | x | x | x | x | x | x |  |  |  |  |  |  |
| 4 5 |  |  |  |  |  |  | x | x | x | x | x | x |
| **Actividad – Año 2** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** | **11** | **12** |
| 6 7 8 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| **Actividad – Año 3** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** | **11** | **12** |
| 9 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| **Actividad – Año 4** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** | **11** | **12** |
| 10 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| **Actividad – Año 5** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** | **11** | **12** |
| 10 | x | x | x | x | x | x |  |  |  |  |  |  |
| 11 |  |  |  |  |  |  | x | x | x | x | x | x |

**Factibilidad:** Se cuenta con computadoras personales, impresoras, un sistema de cómputos y almacenamiento conformado por una red de 33 servidores, un Cluster con 248 procesadores, 2 sistemas de almacenamiento masivo de datos (data storage) con una capacidad total de 45 terabytes y servicio de internet de alta velocidad, para transferencias y conexiones al exterior, apoyadas en una red estructurada de voz y datos acorde a las necesidades actuales y al avance tecnológico. Todo ello protegido por un sistema de UPS central para mantenimiento de energía en caso de eventuales cortes eléctricos. El servicio de internet de alta velocidad es provisto por la FCEN (UBA) y con acceso a Internet II y bases de datos que incluyen los reanálisis de NCEP y del Centro Europeo, que proveen los datos diarios y mensuales de todas las variables meteorológicas en varios niveles de la atmósfera. Actualmente la directora de la postulante dirige proyectos de investigación que proveen los recursos económicos para llevar adelante la labor.

**Referencias Bibliográficas:**

Ayala S, Vita Sánchez M, González MH. 2016. Los forzantes climáticos de la precipitación de primavera en la Cuenca del Río Bermejo IFRH,  INA, Buenos Aires, Argentina, 6-7 octubre 2016

Barros V, Moira Doyle, Marcela González, Ines Camilloni, Rubén Bejarán y Mario Caffera, 2002: "Revision of the south american monsoon system and climate in subtropical South America south of 20°S", Meteorologica, 27, 33-58. ISSN 0325 187X

Garbarini EM, 2016. Los océanos y la circulación como precursores del pronóstico estadístico de precipitación y temperatura estacional en Argentina. Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera. DCAO-FCEN-UBA.

Gonzalez y Barros, 1998: “The relation between tropical convection in South America and the end of the dry period in subtropical Argentina”, International Journal of Climatology, vol 18, nº 15, pp 1671-1687.

González y Barros, 2002: "On the forecast of the onset and end of convective season in the Amazon", Theoretical and Applied Climatology, ed. Springer, 73, 3-4, 169-188. ISSN 0177 798X

González, Marcela Hebe, 2013.  "Some indicators of interannual rainfall variability in Patagonia (Argentine)”, Chapter 6 en Climate Variability ‐ Regional and Thematic Patterns

González, M.H., Garbarini, E.M., Rolla, A.L. and Eslamian, S. 2016. Meteorological Drought Indices: Rainfall Prediction in Argentina en *Handbook of Drought and Water Scarcity: Vol. 1, Principle of Drought and Water Scarcity, Chapter 29, 540-567,*

Hyndman, R.J. and Athanasopoulos, G. (2013) Forecasting: principles and practice. OTexts: Melbourne, Australia

James, Witten, Hastie y Tibshirani. 2013. An Introduction to Statistical Learning with Applications in R. Springer.

Kousky, V. E., 1988: Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American sector. Rev. Brasil. Meteor., 3, 217–231.

Mo, K. C., Relationships between low frequency variability in the Southern Hemisphere and sea surface temperature anomalies. *J Climate* 2000, *vol 13*, 3599-3610

Saji, N.H., Goswami, B.N., Vinayachandran, P.N., and Yamagata, T., 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean, Nature 401, 360-363

Silvestri, G y Vera C. 2003. Antarctic Oscillation signal on precipitation anomalies over southeastern South America. Geophysical Research Letters 30(21)

Taschetto, A. y Ambrizzi, T. 2012 Can Indian Ocean SST anomalies influence South American rainfall? Clim Dyn. 38: 1615-1628

Trenberth, K. E. (1997) The Definition of El Nino. Bulletin of the American Meteorological Society, 78, 2771-2777.

Vera, C., Silvestri, G., Barros, V. and Carril, A. 2004. Differences in El Niño response in Southern Hemisphere. J. Climate 17, 9: 1741-1753.

**Nota de recomendación:**

