

NAP Costas

Plan Nacional de
Adaptación Costera
de Uruguay

Documento preparatorio

Variabilidad observada del clima en Uruguay





**PROYECTO “FORTALECER LAS CAPACIDADES DE
URUGUAY PARA LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO
EN LA ZONA COSTERA”**

**Variabilidad observada del clima
en Uruguay**

PRODUCTO 2

Marcelo Barreiro
Fernando Arizmendi, Romina Trinchin

Departamento de Ciencias de la Atmósfera
Instituto de Física, Facultad de Ciencias

Noviembre 2019

1. Introducción

En este documento se describe el clima de nuestro país considerando las características climáticas estacionales medias así como sus variaciones interanuales, inter-decaderiales y las tendencias observadas en el siglo XX y comienzos del siglo XXI. Comenzamos definiendo nociones básicas de tiempo y clima, luego introducimos la motivación del análisis y por último se muestran los resultados.

1.1 Tiempo y clima

El tiempo atmosférico es el estado de la atmósfera en un determinado instante. El clima, en cambio, se define comúnmente como la estadística del tiempo, es decir como el promedio y variaciones típicas de las condiciones atmosféricas en un determinado lugar durante un período de tiempo suficientemente largo; por lo menos unos 30 años. Ejemplos de variables meteorológicas que se usan para describir el clima de una región son la temperatura, la precipitación, la humedad, la cobertura nubosa, los vientos, etc.

Una definición mas moderna de clima toma en cuenta que la atmósfera es uno de los componentes del Sistema Climático, que está formado además por la hidrósfera, criósfera, biósfera y los continentes. En ese marco, es posible definir el clima como el estado del medio ambiente habitable (descrito estadísticamente) que resulta de la interacción entre los componentes del Sistema Climático. Además de las complejas interacciones existentes entre las componentes del Sistema Climático el clima se encuentra condicionado por ciertos forzantes externos, tanto naturales (el Sol) como antropogénicos.

El termino “variabilidad climática” se refiere a fluctuaciones naturales de las propiedades estadísticas del clima sobre períodos de meses, años, décadas, o miles o millones de años. “Cambio climático”, por otro lado, se reserva a aquellas variaciones en el clima debido a la acción humana.

1.2 Motivación

Uruguay está ubicado geográficamente en una región de gran variabilidad climática en todas las escalas de tiempo, desde sub-estacionales a décadas y centenios. El clima de Uruguay comparte características con la región del sudeste de Sudamérica, definida entre los $\sim 20^{\circ}$ - 40° S al este de 60° W. Además, las condiciones climáticas de nuestra región dependen de factores que van mas allá de estos límites geográficos. Por lo tanto para entender el clima de Uruguay (el promedio y sus variaciones) es necesario considerar la circulación atmosférica a escala continental así como la existencia de los océanos circundantes.

La variabilidad natural del clima induce cambios año a año sobre Uruguay muy grandes, principalmente en precipitaciones. En esta escala de tiempo, los océanos globales, y en particular el Pacífico tropical, juegan un rol fundamental. Entre ellos se destaca El Niño-Oscilación Sur (ENOS), que es un fenómeno que resulta del acoplamiento entre el océano y la

atmósfera en la región del Pacífico tropical. A nivel oceánico El Niño (La Niña) consiste en un calentamiento (enfriamiento) anómalo de las aguas ecuatoriales del océano Pacífico central y oriental. Durante un evento ENOS las anomalías de temperatura de superficie del mar induce cambios en la precipitación tropical que altera las regiones de liberación del calor que gobiernan los movimientos atmosféricos. Como respuesta la atmósfera genera ondas que se propagan dentro de la región tropical y hacia altas latitudes de ambos hemisferios (patrones de teleconexión). Algunas de estas ondas se propagan hacia Sudamérica e inducen anomalías de circulación sobre nuestra región alterando la posición e intensidad de la corriente en chorro, así como el Jet de capas bajas (Barreiro 2017). Por lo tanto, ENOS es capaz de alterar las precipitaciones, vientos y la temperatura de nuestro país. Así, el estudio de la variabilidad climática natural de nuestra región debe considerar el impacto de este fenómeno.

Más allá de estas variaciones año a año, el clima presenta variabilidad década a década lo cual se denomina variabilidad inter-decaderial. En estas escalas de tiempo los océanos también juegan un papel fundamental. Un ejemplo de variaciones inter-decaderiales que tiene relevancia para nuestro país es la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP), que consiste en un patrón de anomalías similar a la de El Niño pero con escalas temporales más largas (Mantua et al 1997). Durante la fase cálida de la ODP la temperatura de la región tropical-este del Pacífico está por encima de lo normal mientras que en el Pacífico norte está anormalmente fría. Asimismo, durante la fase cálida de la ODP los eventos Niño tienden a ser más frecuentes e intensos que en la fase fría. Por lo tanto la influencia de El Niño, y en particular sobre el sudeste de Sudamérica, será diferente en diferentes décadas ya que cambios en la evolución del evento pueden alterar los patrones de teleconexión y por ende las anomalías atmosféricas sobre nuestra región (Barreiro 2010).

Superpuesto a la variabilidad natural, se encuentra la señal del cambio climático, que se refiere a las variaciones climáticas causadas por las actividades humanas. Al día de hoy científicamente no existen dudas sobre el efecto antropogénico sobre el clima. No obstante, el estudio del cambio climático tiene dos etapas -detección y atribución- y es bueno resaltar que la detección de un cambio en el clima no implica directamente que pueda ser atribuible a la acción antropogénica. Dado que el clima varía naturalmente en un continuo de escalas temporales desde horas y días a siglos y milenios es necesario contar con series observadas largas para estudiar y detectar los efectos de la acción humana. Además, el cambio climático se observa más fácilmente a escala global. Factores como cambios en el uso del suelo o contaminación local complican la detección de la señal de calentamiento antropogénico en escalas pequeñas. Por ello, para atribuir un cambio a la acción humana debe existir una comprensión del fenómeno ocurrido y de los procesos involucrados.

El clima se define sobre un período de al menos 30 años. Por lo tanto, una forma de ver los cambios ocurridos en el clima es tomar la diferencia entre dos períodos consecutivos de 30 años. No obstante, la variabilidad inter-decaderial natural esconderá la señal antropogénica. Además, de acuerdo a la teoría, los procesos de radiación involucrados en el efecto invernadero predicen que un aumento exponencial en la concentración de CO₂ en la atmósfera da lugar a un aumento lineal de la temperatura. Por ello, para estudiar el cambio climático es

más usual considerar la tendencia en todo el período considerado, que si bien estará “contaminada” por la variabilidad natural, se espera que represente mejor el impacto del aumento exponencial de la concentración de CO₂ en la atmósfera debido a las actividades humanas.

El cambio climático no se restringe a un cambio en las condiciones medias en las lluvias o temperatura de una región, sino que generalmente está acompañado por cambios en la frecuencia de ocurrencia e intensidad de los extremos meteorológicos (por ej. olas de frío y calor) e hidroclimáticos (por ej. sequías). Así, en este trabajo consideraremos los cambios observados y proyectados para las condiciones climáticas medias y la variabilidad.

2. Datos

Las características del clima de Uruguay se describirán considerando la temperatura media (TM), máxima (TX) y mínima (TN) y la precipitación acumulada. Para ello usamos datos mensuales de 17 estaciones meteorológicas en el período 1961-2017 provistos por el Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET). Su ubicación se muestra en los mapas. Para estudiar los extremos de lluvia y precipitación se utilizará la base de datos CLIMDEX (<https://www.climdex.org/>) en el período 1948-2010.

Para estudiar el clima a nivel regional se usará medias mensuales de la temperatura media, TX, TN y las precipitaciones del Climate Research Unit-Univ. of East Anglia (CRU) en el período 1948-2017. Es importante tener en cuenta que esta base de datos grillada fue construida a partir de una distribución espacial no homogénea de datos y cuya cobertura varía mucho entre décadas.

El análisis se separará en las 4 estaciones del año definidas como Diciembre-Enero-Febrero (DEF), Marzo-Abril-Mayo (MAM), Junio-Julio-Agosto (JJA) y Setiembre-October-Noviembre (SON).

Finalmente, a los efectos de estudiar la variabilidad en los caudales de los ríos se usará datos medias diarias del Instituto Nacional del Agua (INA, Argentina) durante el período 1988-2018.

3. Condiciones climáticas medias

3.1 Descripción en el contexto regional

Se describirá primero las condiciones medias de temperatura y precipitación en la región para situar climáticamente a Uruguay. La Figura 1 muestra claramente que Uruguay se encuentra en una región de transición caracterizada por fuertes gradientes meridionales que separan la región tropical cálida y la zona mas fría de latitudes altas. Durante el verano la región norte de

nuestro país llega a adquirir temperaturas altas comparables a las temperaturas de otras regiones mas tropicales, mientras que en invierno el norte del país tiene condiciones mucho mas frías que las anteriores regiones. La figura 1 muestra también que las estaciones intermedias tienen características similares entre sí, aunque el contraste norte-sur es mayor durante la primavera.

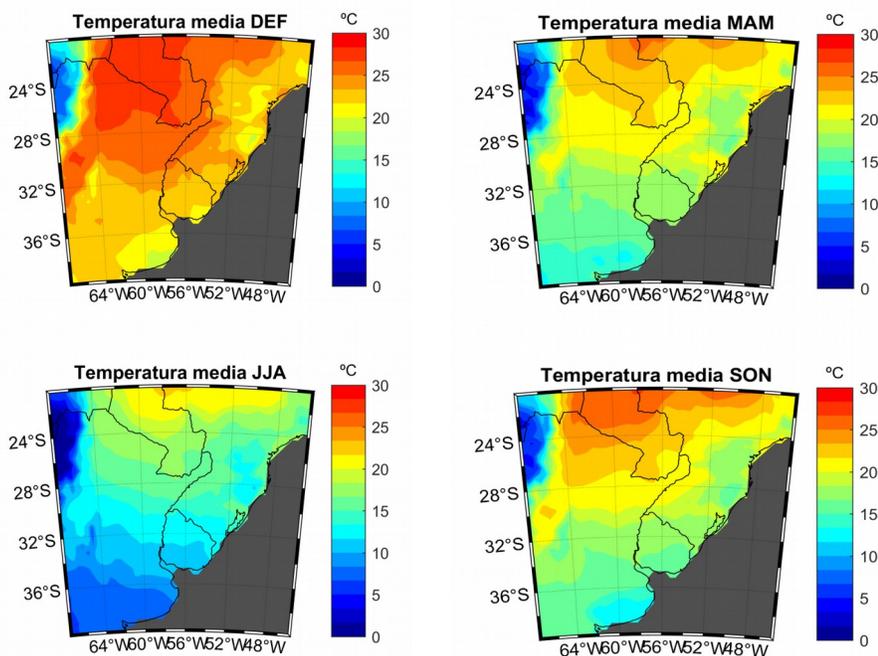


Figura 1 – Temperatura media promedio para las 4 estaciones del año.

Las temperaturas máximas (Figura 2) y mínimas (Figura 3) tienen las mismas características que la temperatura media, siendo los contrastes norte-sur mayores (menores) en la temperatura máxima (mínima).

Variabilidad observada del clima en Uruguay (E2)

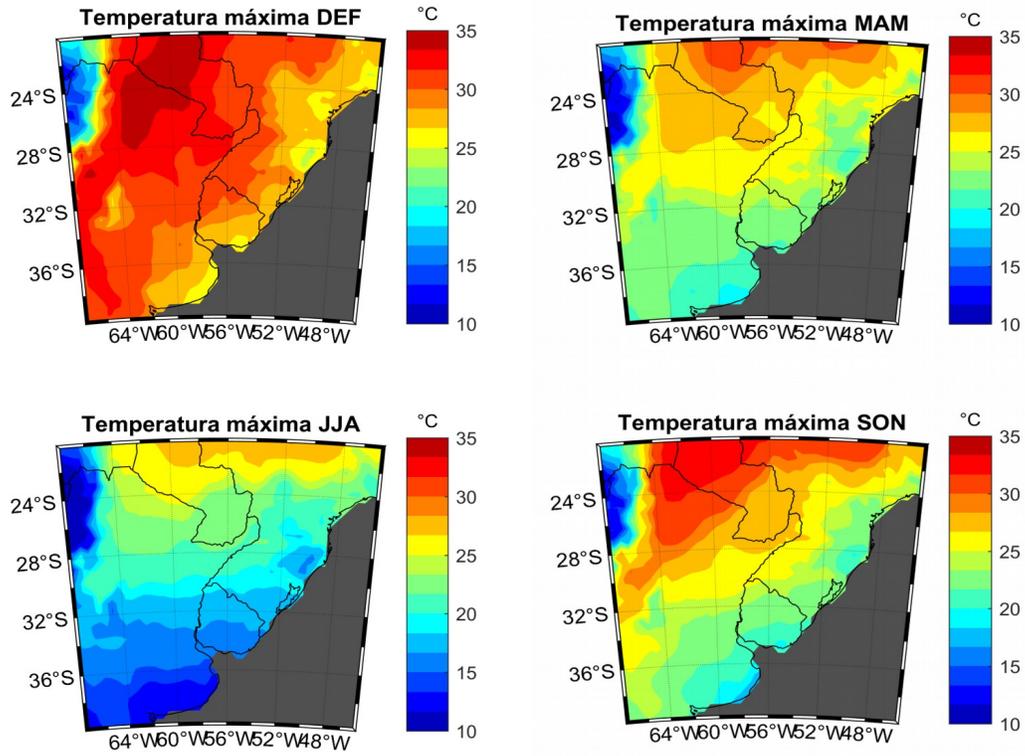


Figura 2 – Temperatura máxima promedio para las 4 estaciones del año.

Variabilidad observada del clima en Uruguay (E2)

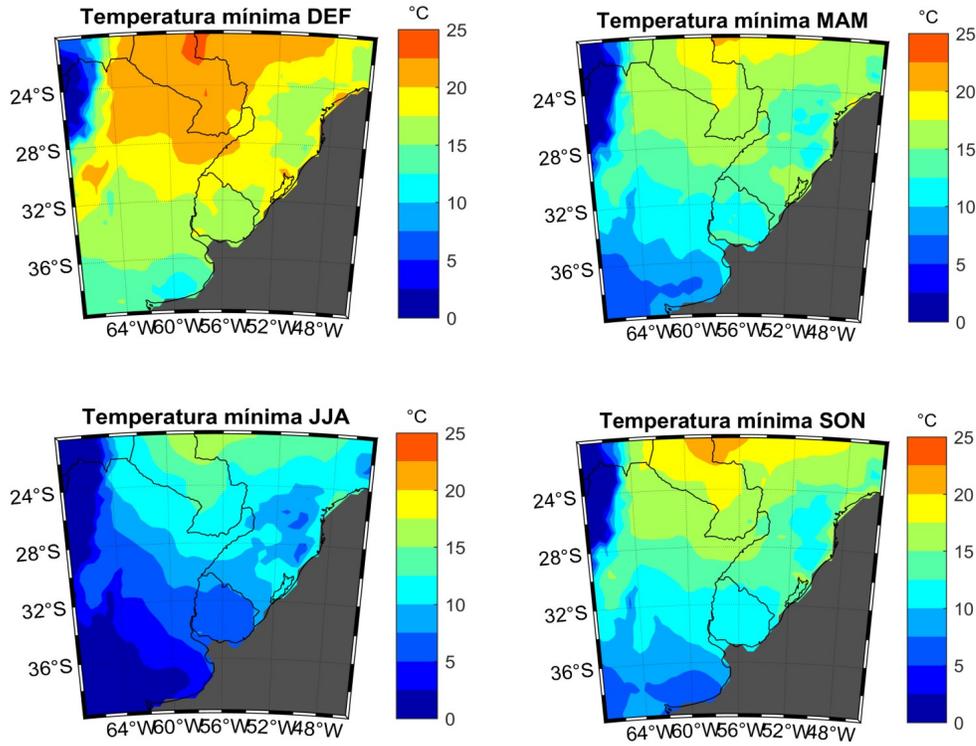


Figura 3 – Temperatura mínima promedio para las 4 estaciones del año.

Los mapas de precipitación nos brindan información aún más interesante (Figura 4). En el verano el máximo de precipitación continental se encuentra en el Amazonas y se extiende en la dirección sureste marcando la parte continental de la Zona de Convergencia del Atlántico Sur con valores acumulados superiores a los 450 mm. Este régimen de lluvias es característico del monzón de América del Sur. En esta estación la región de lluvias se extiende hacia el sur cubriendo nuestra región, hasta unos 40°S. Mas al sur las lluvias son mínimas, como por ejemplo en la Patagonia.

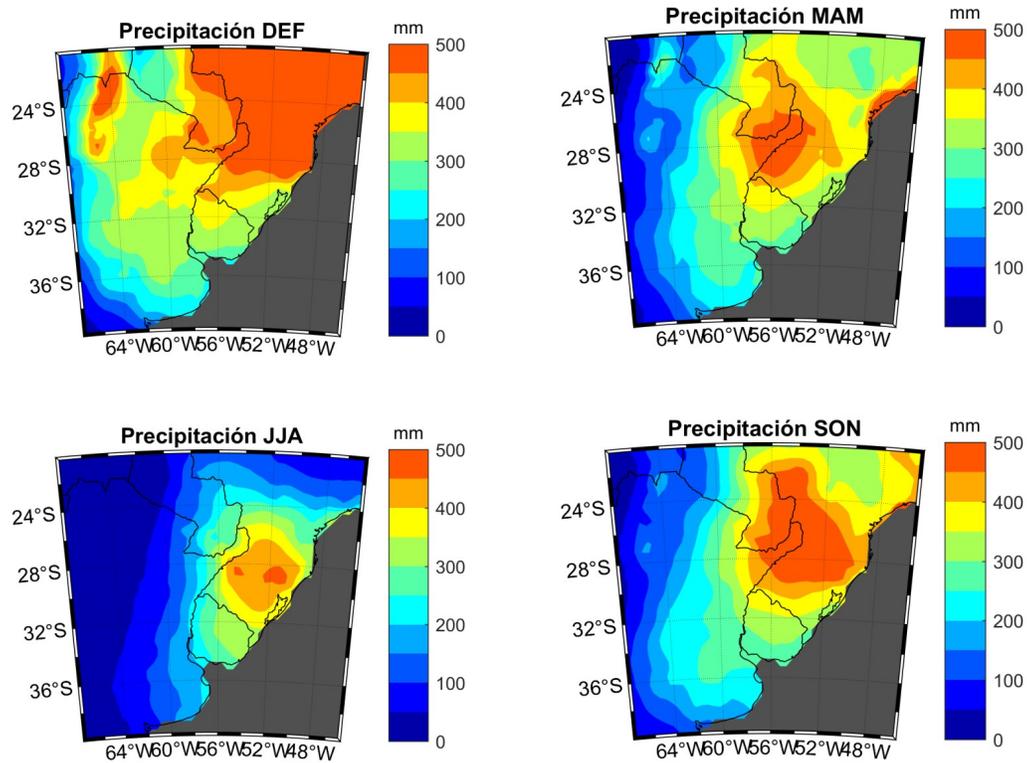


Figura 4 - Precipitación acumulada media para las 4 estaciones del año.

Una característica importante de nuestra región es que necesita del transporte lateral de humedad para mantener las lluvias; la evaporación local no es suficiente. En verano este transporte de humedad es realizado por el Jet de capas bajas que es una corriente de dirección noroeste-sureste de vientos intensos que trae humedad desde la región Amazónica hasta estas latitudes. El Jet de capas bajas está asociado a una región de baja presión ubicada sobre Paraguay denominada “Baja del Chaco”, que tiende a tener baja presión durante todo el año pero se intensifica durante el verano debido al calentamiento de la superficie.

Al este de Uruguay, sobre el océano Atlántico se encuentra el anticiclón semipermanente del Atlántico Sur, cuyo centro está situado en una latitud promedio cercana a los 30°S. Los vientos asociados al anticiclón del Atlántico Sur son en sentido anti-horario y afectan el clima de nuestro país. Durante el verano este anticiclón es relativamente débil y está situado un poco más al sur que su media anual. Por lo tanto los vientos asociados no penetran mucho en el continente y juegan un papel secundario en el transporte de humedad a nuestra región.

Durante el invierno la distribución de lluvias en los subtrópicos es diferente a la del verano. El máximo de lluvias se encuentra al sur de Brasil y se observa una distribución con un gradiente longitudinal con mayores lluvias al este hasta los 24°S. Durante esta estación el anticiclón del Atlántico Sur se intensifica y se mueve un poco hacia el noroeste de forma tal que penetra en el continente hasta cerca de los 60°W. Los vientos asociados transportan vapor de agua desde el océano Atlántico tropical hasta nuestra región convirtiéndose en un factor fundamental para mantener las lluvias.

En invierno, en niveles altos de la atmósfera los vientos son del oeste en casi todo el continente al sur del ecuador y la corriente en chorro subtropical se ha corrido al norte de nuestro país. La combinación de un gran gradiente latitudinal de temperatura en superficie y la inestabilidad propia de los intensos vientos del oeste en altura genera condiciones propicias para el desarrollo de ciclogénesis, o sea la formación de centros de baja presión intensos y desarrollo de tormentas. El pasaje de frentes y la ocurrencia de ciclones explica el máximo de precipitaciones en el sudeste de Sudamérica durante el invierno. La formación de ciclones también contribuye en forma importante a las lluvias en las demás estaciones, principalmente en primavera, en Uruguay (Gan y Seluchi 2009).

En las estaciones de transición la circulación atmosférica tiene características intermedias y parecidas entre sí. En primavera el anticiclón del Atlántico es más intenso, la baja continental está más desarrollada y consecuentemente los vientos del norte en capas bajas son más intensos que en el otoño. Estas condiciones, sumadas a que en altura la corriente en chorro es más intensa y se encuentra sobre Uruguay propician el desarrollo de complejos convectivos de mesoscala que son sistemas meteorológicos que generan lluvias muy intensas y contribuyen sustancialmente a las lluvias observadas. En nuestro país estos sistemas traen lluvias fundamentalmente en la región norte durante primavera y verano. Por otro lado, en otoño el máximo de lluvias en el sudeste de Sudamérica se encuentra más al sur que durante la primavera lo que implica mayores lluvias acumuladas al norte del país.

3.2 Descripción a nivel de país

Nos enfocamos ahora con más detalle en el clima de Uruguay. La Figura 5 muestra la temperatura máxima media para las 4 estaciones del año, mientras que la figura 6 muestra la temperatura mínima media. La ausencia de topografía significativa resulta en que las isotermas sean, como sería de esperar basado solamente en la radiación recibida, aproximadamente paralelas a los círculos de latitud con mayores valores al norte del país.

La región norte es alrededor de 3 °C más cálida que la región sur. No obstante, se observa en particular en primavera y verano una inclinación suroeste-noreste que evidencia la presencia del mar, el cual modera el calentamiento de la región costera. En invierno este mismo efecto resulta en un menor enfriamiento de la costa rochense comparada con la región sur del país. El efecto depende de la cercanía al mar pues esto implica un mayor contenido de humedad en la región costera lo cual disminuye las variaciones de temperatura. Un papel secundario también

lo juega la corriente cálida de Brasil que tiende a extender la zona tropical hacia el sur, aunque este efecto es más acentuado en la costa este de Brasil y no tanto en nuestras latitudes. Como consecuencia, si bien la amplitud del ciclo estacional es en general cercano a los 10-11 °C entre invierno y verano para las diferentes regiones, es un poco mayor en el norte que en el sur. El otoño tiene menor diferencia térmica entre las diferentes regiones del país que las otras estaciones.

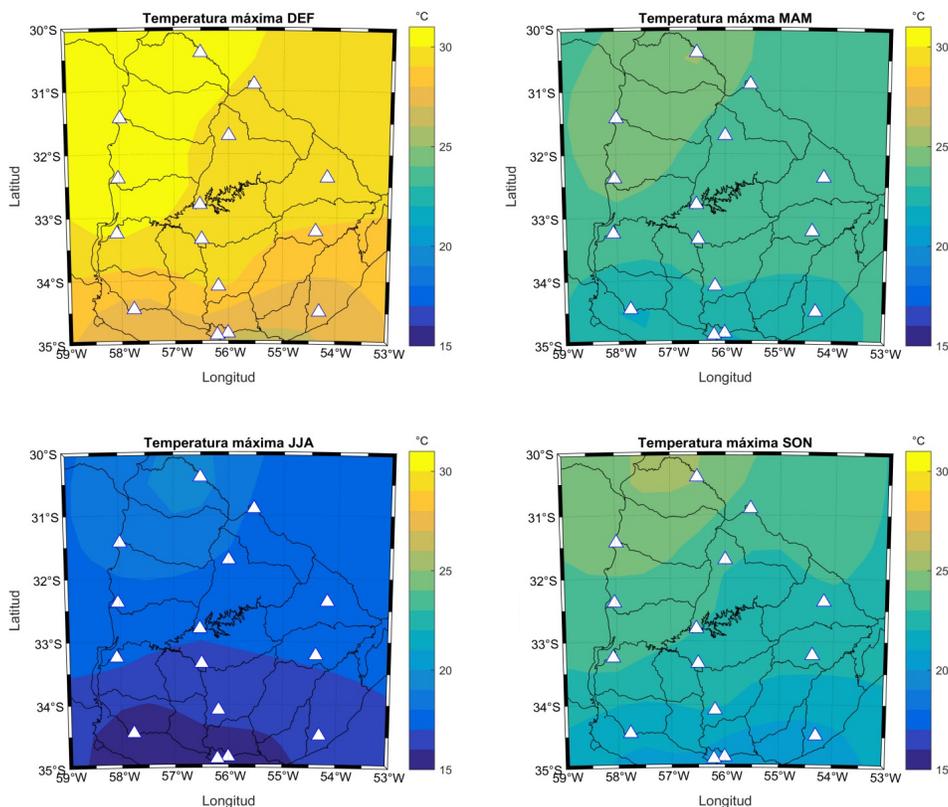


Figura 5 – Temperatura máxima media para las 4 estaciones del año sobre Uruguay.

Las precipitaciones climatológicas acumuladas en cada trimestre se muestran en la Figura 7. En general los acumulados de lluvia están igualmente distribuidos en las 4 estaciones del año con valores cercanos a los 300-350 mm por trimestre, lo cual implica unos 1300 mm por año. No obstante, hay diferencias significativas a nivel de trimestres y regiones del país. Por ejemplo, la distribución de lluvias durante primavera, verano y otoño es latitudinal con mayores registros en el norte donde pueden llegar a valores de 400 mm, mientras que en el sur los registros son más cercanos a los 300 mm. Consistente con lo visto en la sección anterior, durante el invierno la distribución de lluvias es longitudinal con mayores valores al este (mayores a 300 mm) y menores al oeste del país donde llueve alrededor de 200 mm.

A nivel anual nuestro país tiene un balance de (precipitación-evaporación) positivo, es decir llueve más de lo que evapora por lo que es necesario un transporte lateral de humedad para mantener las lluvias. A nivel estacional este balance positivo es válido para todas las estaciones excepto el verano cuando la evaporación excede las lluvias.

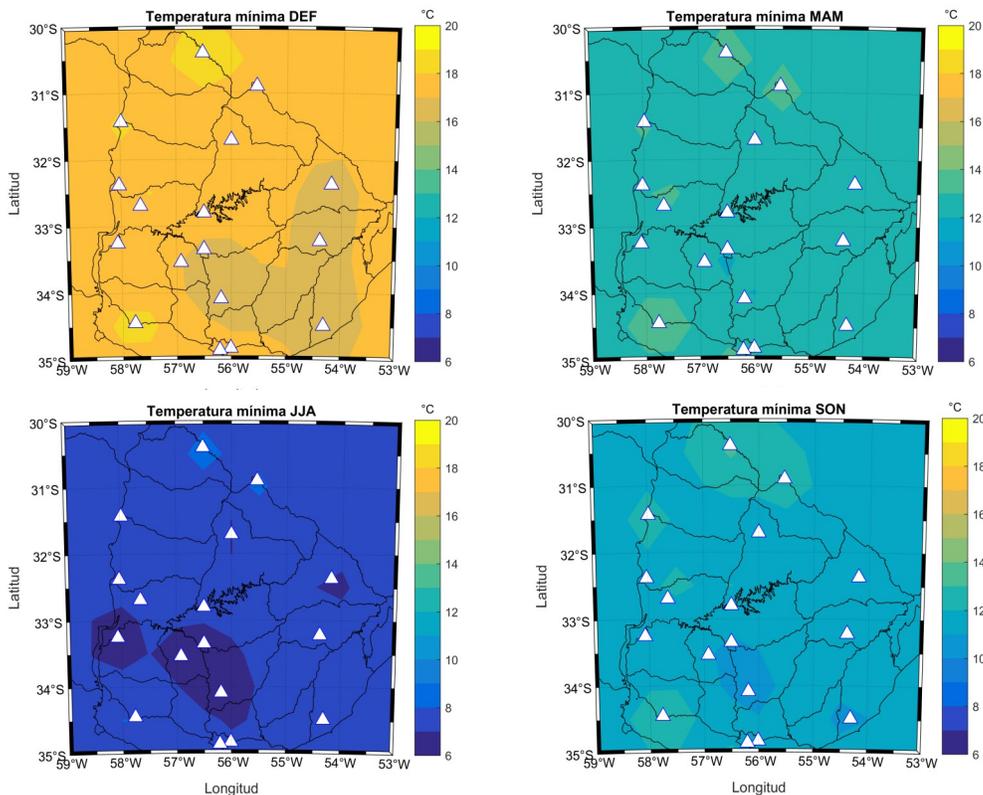


Figura 6 – Temperatura mínima media para las 4 estaciones del año sobre Uruguay.

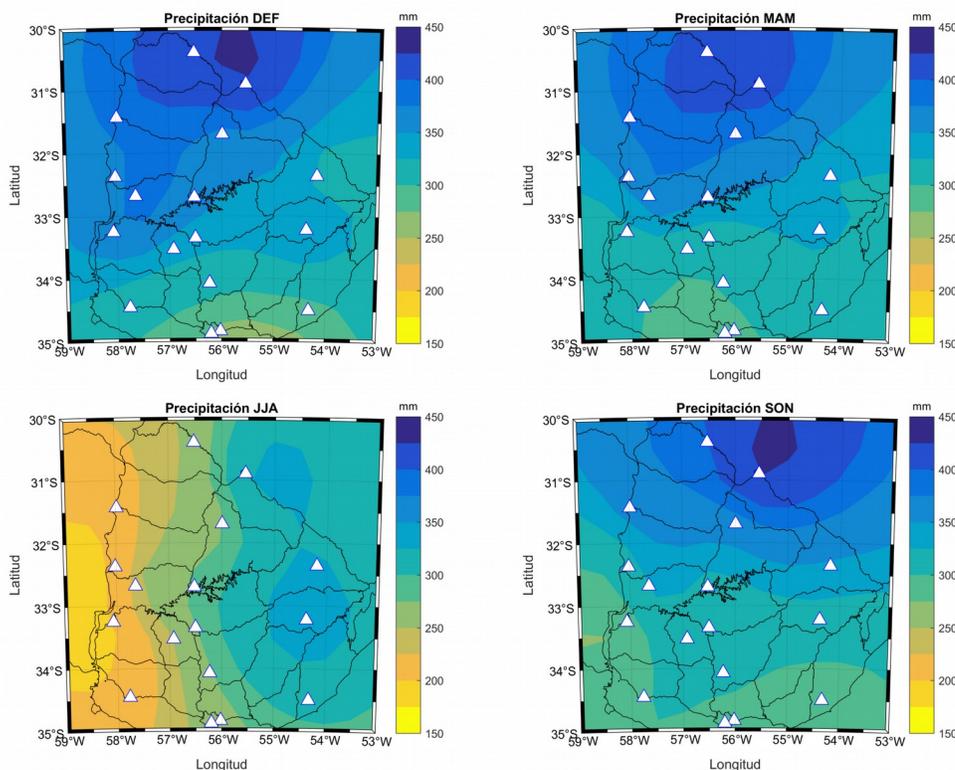


Figura 7 – Precipitación media acumulada en las 4 estaciones del año.

4. Variabilidad climática

En la sección anterior describimos las principales características climáticas medias de Uruguay centrándonos en precipitación y temperatura, y en forma muy sucinta, mencionamos las condiciones atmosféricas que contribuyen a las precipitaciones en nuestro país en las diferentes estaciones del año. Para una descripción más detallada de la circulación atmosférica en el continente se recomienda los siguientes artículos: Grimm (2009) y Satyamurty et al (1998).

En esta sección describiremos desviaciones del clima respecto a las medias climáticas. Como vimos, el clima medio resulta de la interacción de diferentes elementos de la circulación atmosférica con las condiciones terrestres y oceánicas locales. Por lo tanto variaciones en estos campos, por ejemplo, en la intensidad de los vientos del norte, en la posición del anticiclón del Atlántico Sur, etc, pueden afectar el régimen de lluvias y de temperatura de Uruguay en los diferentes años. Consideraremos primero la variabilidad interanual, o sea aquella que ocurre año-a-año y que es la más importante en nuestra región. Luego consideraremos variaciones climáticas con escalas de tiempo mas largas.

4.1 Variabilidad interanual

La comprensión de la variabilidad climática y su predictibilidad es uno de los focos centrales de la investigación en clima. En general la variabilidad atmosférica puede dividirse en dos partes. Una parte que es debida a la dinámica interna de la atmósfera y no es predecible mas allá de 2 semanas, límite impuesto por la característica turbulenta y caótica de la atmósfera extratropical. La otra parte de la variabilidad es forzada por las condiciones de borde de la atmósfera, en primer lugar por los océanos tropicales y en segundo lugar por la humedad del suelo. Los océanos tienen una gran inercia, una evolución mas lenta que la atmósfera y por lo tanto representan una fuente de memoria en el Sistema Climático. Además, variaciones en las condiciones de superficie de los océanos tropicales pueden alterar la atmósfera local y esta señal se propaga luego en forma de ondas hacia diferentes puntos del planeta. Este proceso se denomina teleconexión y es a través de estos procesos que los océanos pueden inducir anomalías atmosféricas en regiones remotas. Dado que es posible predecir la evolución de los océanos tropicales con una anterioridad de 6 a 9 meses, es posible entonces predecir la ocurrencia de ciertas anomalías climáticas en ciertas regiones del planeta con cierta probabilidad. El fenómeno por excelencia que genera variabilidad y da predictibilidad a anomalías climáticas año-a-año en nuestra región es el fenómeno de ENOS. Asimismo, este fenómeno está muchas veces asociado a eventos climáticos extremos (sequías, inundaciones, etc).

Como mencionámos antes, ENOS resulta del acoplamiento entre el océano y la atmósfera del océano Pacífico tropical. A nivel oceánico El Niño (La Niña) consiste en un calentamiento (enfriamiento) anómalo de las aguas ecuatoriales del océano Pacífico central y oriental. Durante un evento Niño el calentamiento corre hacia el este la región de máximas lluvias sobre el ecuador lo cual genera teleconexiones atmosféricas por medio de ondas que pueden alterar durante una estación del año la posición e intensidad de la corriente en chorro en altura, así como el Jet de capas bajas. De esta forma El Niño (y La Niña) es capaz de alterar las precipitaciones y la temperatura de nuestro país.

La influencia de ENOS sobre el clima de nuestra región ha sido estudiada en varios trabajos y (por ej. Ropelewski y Halpert 1987, Pisciottano et al 1994; Barreiro 2010, Barreiro 2017). Todos los eventos Niño (y Niña) son distintos entre sí. La estructura de anomalías de temperatura de superficie del mar, si bien exhibe características comunes, es en cada evento diferente. Por lo tanto, y dado que la atmósfera es muy sensible al patrón espacial de anomalías de temperatura en el océano, es esperable que cada evento Niño o Niña genere anomalías atmosféricas distintas. Esto, sumado a que: (1) otros océanos pueden influenciar al mismo tiempo y modificar la señal proveniente de El Niño (por ej. Barreiro y Tippmann 2008, Barreiro et al 2014), y (2) esta señal compite con la variabilidad atmosférica interna de la atmósfera, hace que cada evento tenga un impacto diferente en el clima de regiones remotas y en particular sobre Uruguay. No obstante, es posible estudiar la influencia promedio de todos los eventos Niño y Niña en nuestro país.

La evolución típica de los eventos El Niño es un crecimiento en la primavera austral, un pico de máxima intensidad entre noviembre y enero y un decaimiento en otoño (Figura 8). Así, se mostrará el impacto de los eventos ENOS centrado en DEF, con SON siendo la estación de crecimiento del evento y MAM la estación de decaimiento.

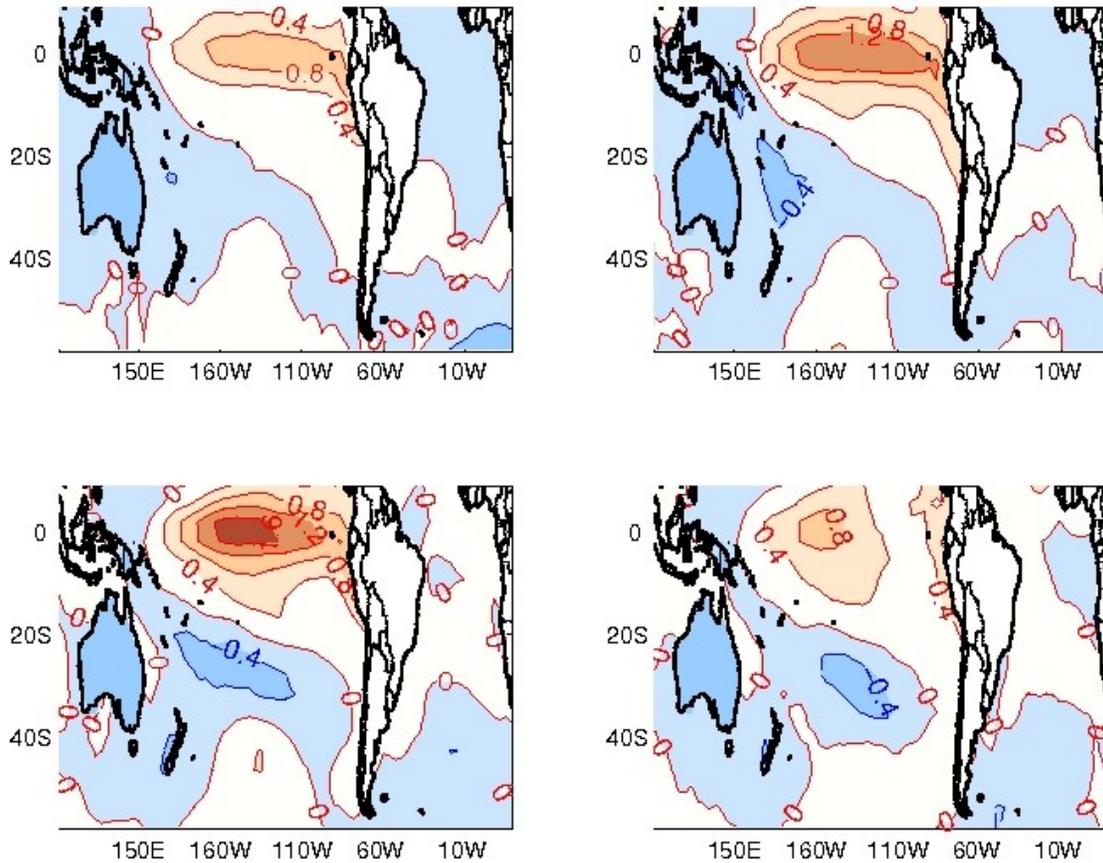


Figura 8 – Evolución de las anomalías de temperatura de superficie del mar asociadas a un evento Niño promedio para las estaciones de JJA (arriba izquierda), SON (arriba derecha), DJF (abajo izquierda) y MAM (abajo derecha).

Se consideran los siguientes años Niño y Niña de acuerdo al índice ONI:

- **Niño:** 1952, 1954, 1958, 1959, 1964, 1966, 1970, 1973, 1977, 1978, 1980, 1983, 1987, 1988, 1992, 1995, 1998, 2003, 2005, 2007, 2010, 2015, 2016
- **Niña:** 1950, 1955, 1956, 1965, 1971, 1972, 1974, 1975, 1976, 1984, 1985, 1989, 1996, 1999, 2000, 2001, 2006, 2008, 2009, 2011, 2012.

4.1.1 Precipitación

La Figura 9 muestra la evolución temporal de las lluvias anuales acumuladas promediadas al norte y sur del río Negro en el período 1961-2017. La primera conclusión que salta a la vista es la gran variabilidad año a año que exhibe esta variable: por ejemplo, en el norte del país en 1989 llovió cerca de 800 mm en todo el año mientras que en 2002 llovió cerca de 2400 mm, o sea 3 veces más. En el sur del país las variaciones no son tan grandes con un mínimo cercano a 700 mm en 2008 y un máximo de 1800 mm en 2014.

La comparación entre las dos curvas de la figura 9 muestra que si bien existe correlación entre las variaciones de las lluvias al norte y sur del río Negro, cada región tiene una componente de variabilidad propia. Para apreciar mejor la diferencia en variabilidad a nivel país, la figura 10 muestra la desviación estándar para cada estación del año. Se observa una mayor variabilidad en el norte del país durante verano y las estaciones de transición, con desviaciones mayores a 160 mm en el trimestre. Durante invierno las variaciones año a año en las lluvias son relativamente modestas en todo el país, con valores típicos de 110 mm. En la región la variabilidad es máxima durante otoño, particularmente en la cuenca del río Uruguay (figura 11).

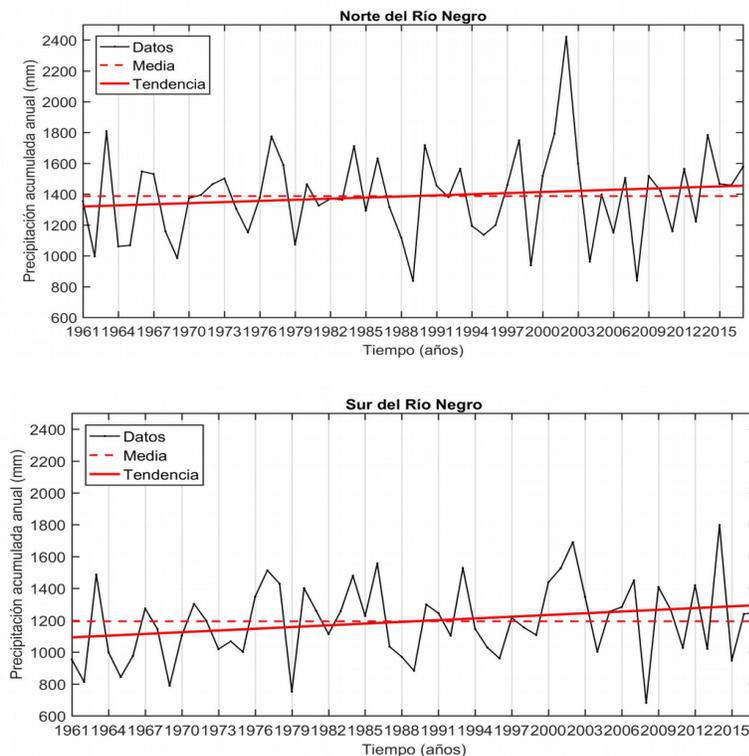


Figura 9 – Acumulados de lluvia anual al norte y sur del río Negro. Se muestra además el promedio en todo el período (línea punteada) y la tendencia lineal (línea sólida).

Variabilidad observada del clima en Uruguay (E2)

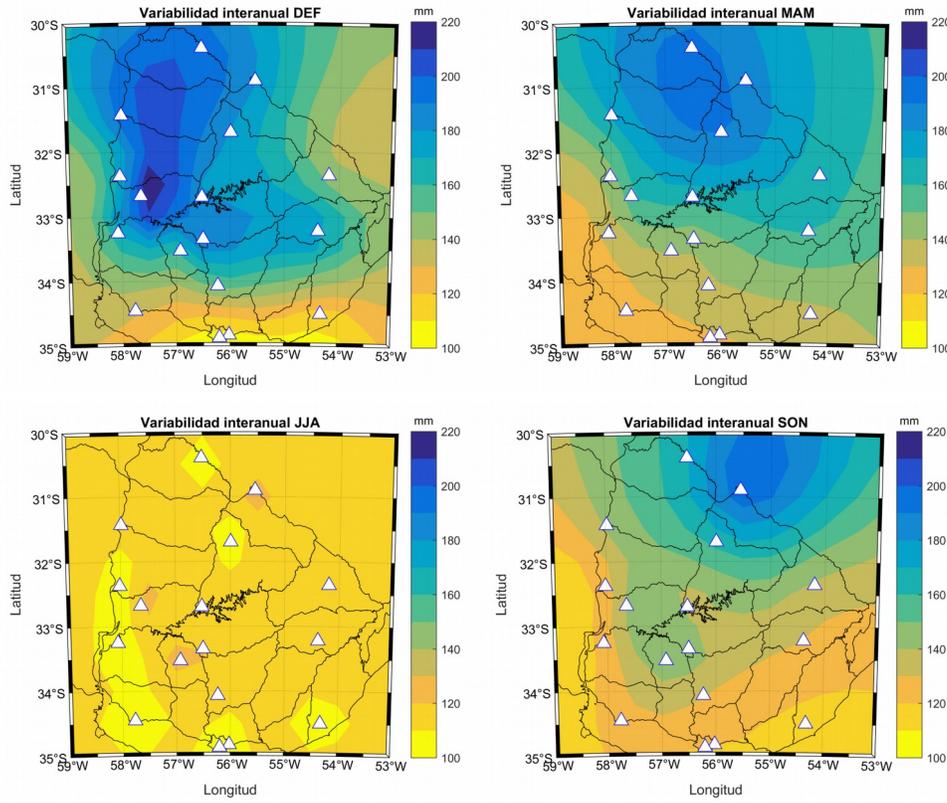


Figura 10 – Variabilidad interanual de las precipitaciones sobre Uruguay durante las cuatro estaciones del año (mm).

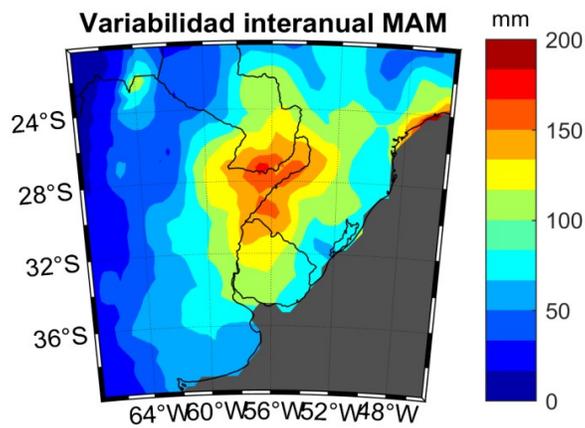


Figura 11 – Variabilidad interanual de las precipitaciones durante MAM.

Gran parte de la variabilidad interanual está relacionada con ENOS. La figura 12 muestra las precipitaciones típicas sobre Uruguay durante años caracterizados por eventos El Niño y La Niña, así como para años neutros.

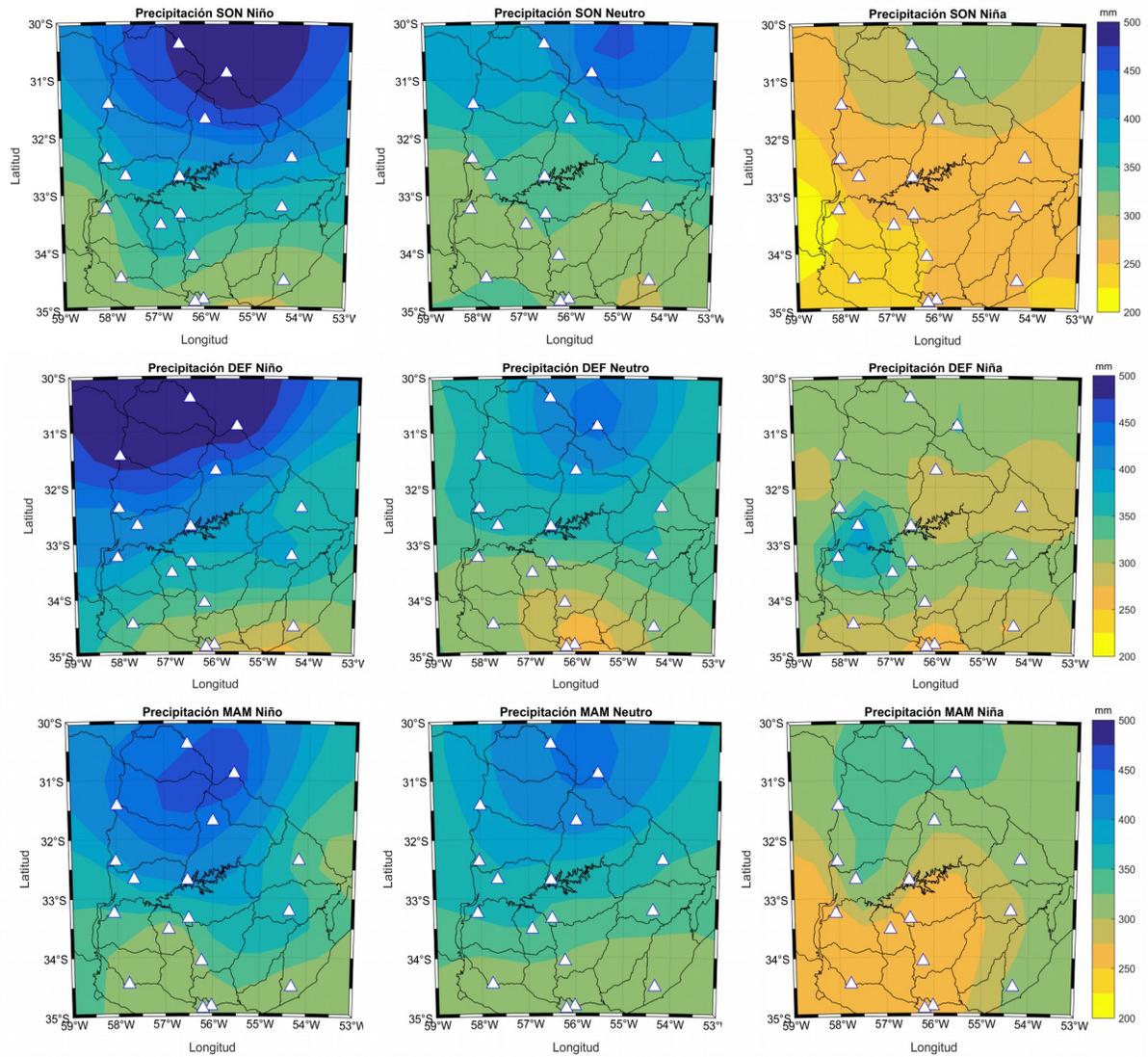


Figura 12 – Precipitaciones promedio durante años El Niño (izquierda), Neutro (centro) y La Niña (derecha) para SON (fila superior), DEF (fila central) y MAM (fila inferior).

Claramente, durante años El Niño se observa lluvias por encima de lo normal particularmente al norte del río Negro durante las tres estaciones con mayor impacto en DEF. Durante La Niña hay déficit de lluvias en todo el país, observándose las anomalías mas negativas también en el norte. Notar que los patrones espaciales de cambios en las lluvias durante años ENOS se corresponden fuertemente con los patrones de variabilidad interanual mostrados en la figura 10. En invierno el impacto de ENOS es pequeño.

El impacto de ENOS no es únicamente sobre Uruguay, sino que se observa a nivel regional, con máxima amplitud sobre la cuenca del río de la Plata (figura 13).

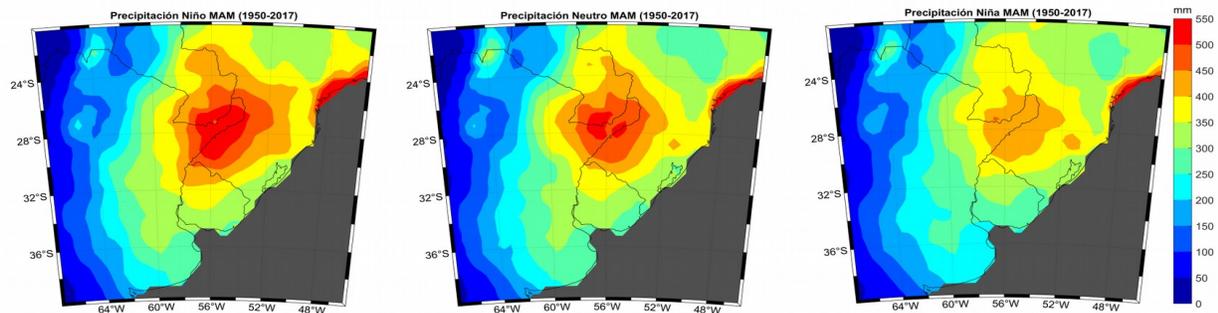


Figura 13 - Precipitación promedio durante años El Niño (izquierda), Neutro (centro) y La Niña (derecha) para MAM.

Durante años ENOS cambia no sólo la precipitación media, sino que también puede cambiar la varianza de la distribución. Para ver eso consideremos los diagramas de caja mostrados en la figura 14. Por ejemplo, para SON el diagrama muestra claramente el incremento en la mediana (línea roja) durante años Niño comparado con años Niña para la región norte del país. Además, la extensión extremo a extremo de las líneas punteadas es mayor lo cual indica que existe una gran diferencia en los montos de lluvia acumulados en el norte del país durante los diferentes eventos Niño, que van desde valores cercanos a 250 mm hasta valores algo mayores a los 700 mm en el trimestre (casi 3 veces). Durante La Niña las lluvias son consistentemente menores a la mediana de los años neutros y la diferencia entre eventos es menor (de 100 a 400 mm), aunque mayor en términos relativos (4 veces). En la región sur, por otro lado, la mediana durante años Niño es algo menor que durante años neutros, pero la dispersión en los acumulados trimestrales es significativamente mayor.

Es interesante notar el caso de MAM. Mientras que en el norte del país las lluvias medias aumentan durante años Niño comparados con los neutros y años La Niña, el ancho de la distribución no parece cambiar lo cual marca una gran variabilidad en la respuesta del clima sobre Uruguay a ENOS. En el sur del país, en cambio, la señal mas notable es la disminución de la varianza en las lluvias trimestrales durante La Niña comparado con años neutros y años El Niño.

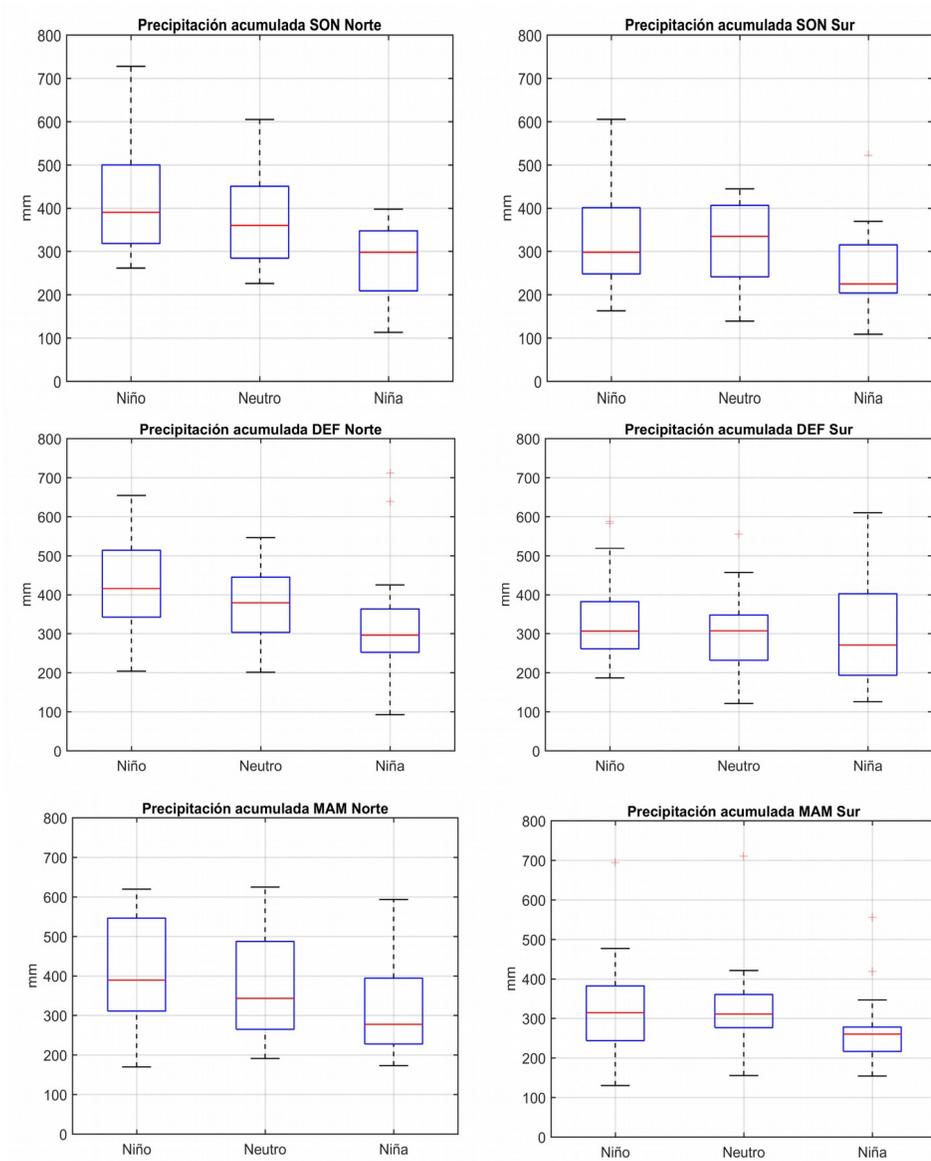


Figura 14 - Diagrama de cajas para la lluvia en años El Niño, La Niña y neutros para estaciones al norte y sur del río Negro durante SON (arriba), DEF (centro) y MAM (abajo). En cada caja la marca central (roja) indica el valor de la mediana (percentil 50), y los extremos los percentiles 25 y 75 de la distribución. Los bigotes se extienden hasta los valores mas extremos no considerados atípicos. Los valores atípicos se marcan con una cruz roja.

El aumento de lluvias en nuestro país durante El Niño está bien estudiado y es resultado de la circulación regional en capas bajas y en altura (por ej. Barreiro 2010). Durante El Niño aumentan los vientos de capas bajas del norte-noreste que traen humedad a nuestra región en todas las estaciones. Estas anomalías son relativamente débiles en invierno, pero aumentan en primavera y son máximas en verano. En verano, además, el aumento de los vientos del este ecuatoriales aumenta el contenido de humedad en la región Amazónica que luego es transportada hacia el sur hasta nuestra región por el Jet de capas bajas que está intensificado. Las anomalías de viento son máximas sobre Paraguay y luego disminuyen hacia el sur lo cual implica una convergencia de aire cálido y húmedo en la región norte de Uruguay.

Por otro lado, el impacto de El Niño en niveles altos se traduce sobre nuestra región en una intensificación de la corriente en chorro durante primavera (fundamentalmente) y verano. Además, en primavera se desarrolla una anomalía de vientos anticiclónica al este del continente (cerca de 30°S) y otra ciclónica al suroeste de Sudamérica (cerca de 40°S). Estas condiciones favorecen la advección de vorticidad ciclónica sobre el sudeste de Sudamérica por una corriente en chorro subtropical mas intensa lo cual favorece movimientos ascendentes. Esto, sumado al aumento en la convergencia de humedad en superficie favorecen el aumento de lluvias en esta región. Estas condiciones son particularmente favorables al final de la primavera, mientras que en verano los cambios en altura son relativamente débiles por lo que las anomalías de lluvias son más importantes de octubre a diciembre. Durante eventos La Niña las anomalías son las opuestas causando un déficit de lluvias.

La influencia de ENOS en la circulación atmosférica regional ocurre a través de fenómenos de teleconexión que no se describirán aquí. El lector interesado puede consultar la amplia bibliografía al respecto (por ej. Grimm y Ambrizzi 2009, Barreiro 2017).

Cabe mencionar que ENOS impacta no sólo en los acumulados mensuales/trimestrales de precipitación, sino también en la frecuencia e intensidad de los eventos extremos de lluvias diarias. Grimm y Tedeschi (2009) mostraron que El Niño (La Niña) aumenta (disminuye) la frecuencia y la intensidad de los eventos de precipitación intensa en el sudeste de Sudamérica durante noviembre, enero y febrero, incluyendo la región norte de nuestro país.

4.1.2 Temperatura

La temperatura no varía mucho año a año de acuerdo a las figuras 15 y 16 para las mínimas medias y máximas medias al norte y sur del río Negro. Como se mostró antes el norte del país es mas cálido que el sur y en estos gráficos se muestra que las variaciones interanuales son muy parecidas del orden de 1 C. En cuanto a la temperatura mínima media se observan mínimos cercanos a los 11 C y máximos de 14 C en el norte, y valores algo mas bajos en el sur. Se destacan los años 2001 y 1964 como los mas cálidos y fríos, respectivamente, tanto en el norte como en el sur del país.

Variabilidad observada del clima en Uruguay (E2)

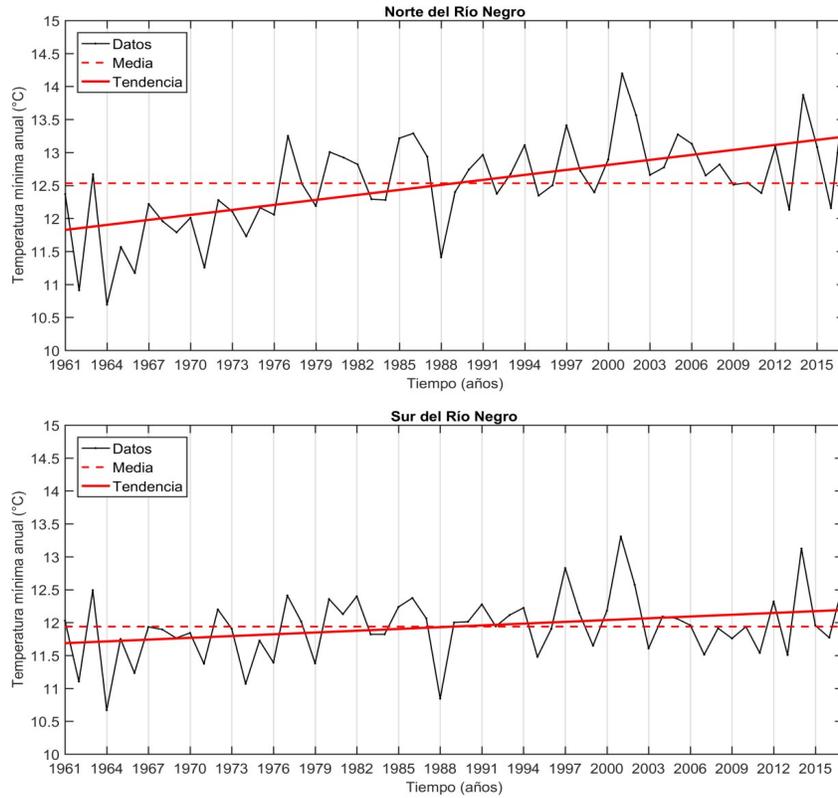


Figura 15 – Evolución de la temperatura mínima media anual al norte (arriba) y sur (abajo) del río Negro.

Por otro lado, la temperatura máxima media en el norte es casi 2 C mayor que en el sur del país con variaciones año a año algo mayores en el norte (figura 16). Asimismo, si bien tienen evoluciones similares, la variabilidad es diferente al norte y al sur. En particular los años extremos para la región norte son 1989 y 1966, mientras que para el sur lo son los años 2017 y 1984.

Variabilidad observada del clima en Uruguay (E2)

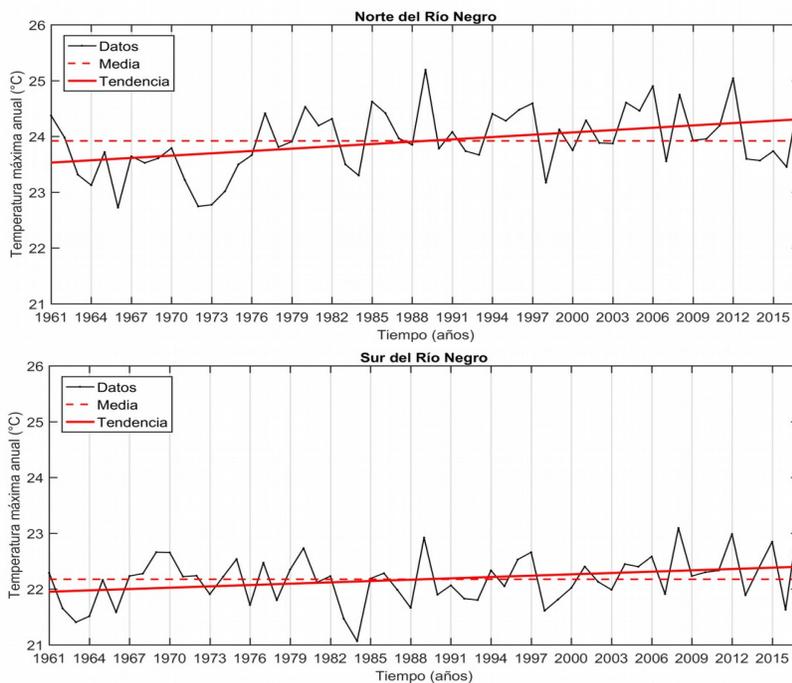


Figura 16 - Evolución de la temperatura máxima media anual al norte (arriba) y sur (abajo) del río Negro.

La variabilidad interanual de la temperatura media en Uruguay y la región es máxima durante el invierno, con valores de desviación estándar mayores a 0.8 C durante el trimestre. En promedio, el litoral noroeste presenta mayor variabilidad que el resto del país. En verano, por el contrario, la variabilidad es mínima con valores típicos próximos a los 0.5 C (figura 17). La temperatura máxima y mínima se comportan en forma similar.

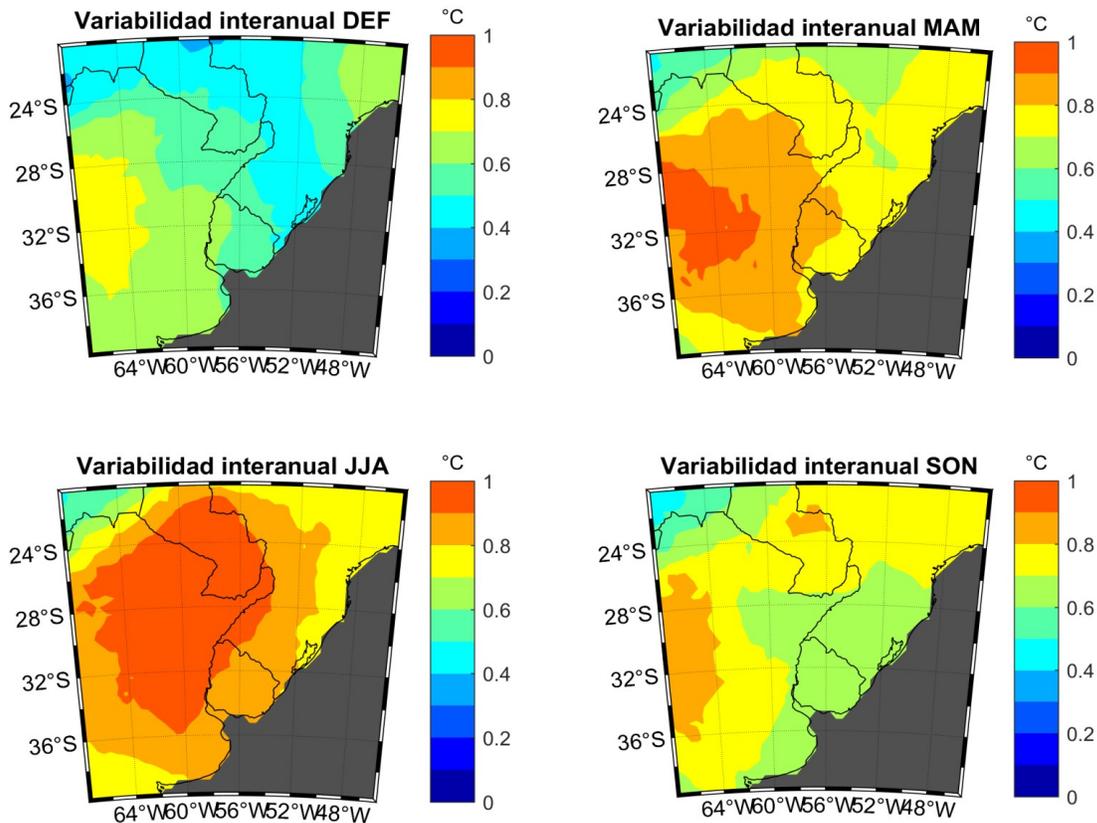


Figura 17 – Desviación estándar interanual de la temperatura media trimestral.

Es interesante recalcar que el aumento de los vientos en capas bajas durante años Niño no solamente trae aire húmedo, como fue mencionado mas arriba, sino también cálido, por lo que sería de esperar un aumento de las temperaturas en nuestra región durante eventos El Niño y una disminución de temperaturas durante años La Niña si este fuera el único efecto. No obstante, el aumento en las lluvias mostrado mas arriba trae asociado un aumento de la cobertura nubosa y evaporación lo cual tiende a disminuir la temperatura y compensa la advección de calor desde el norte (Barros et al 2002). Los diagramas de caja en las figuras 18 y 19 muestran el impacto de ENOS en la temperatura mínima y máxima media para el norte y sur del país. En líneas generales no se observan impactos significativos consistentes en las temperaturas durante años ENOS. La excepción es en verano cuando se puede detectar temperaturas máximas mayores durante años La Niña en todo el país y menores durante años Niño en el norte. Esto es probablemente debido a que durante años Niña la energía disponible se use mayormente para calentar la superficie y no para evaporar agua debido a la disminución en las lluvias (Barreiro y Diaz 2011).

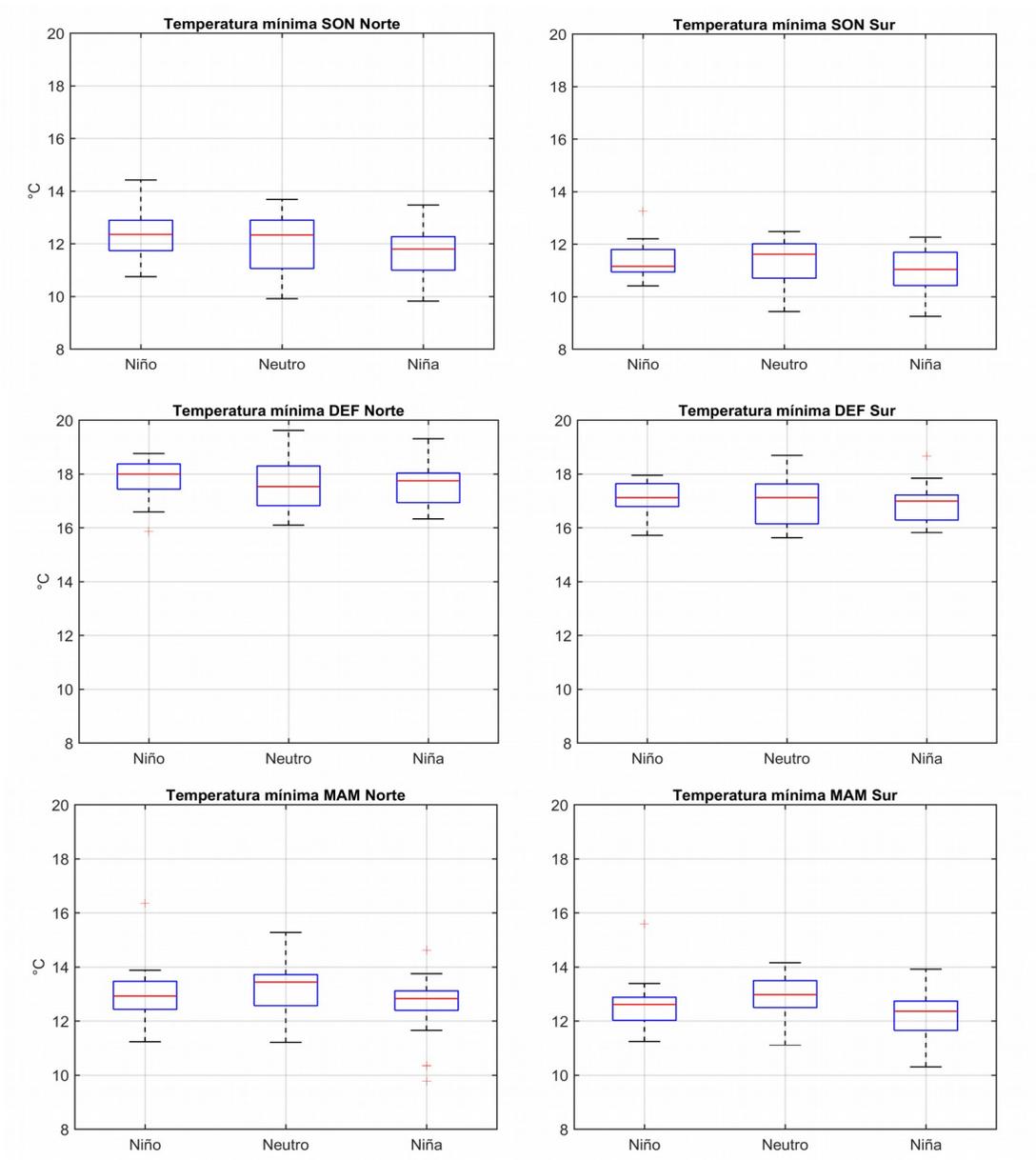


Figura 18 - Diagrama de cajas para Tmin en años El Niño, La Niña y neutros para estaciones al norte y sur del río Negro durante SON (arriba), DEF (centro) y MAM (abajo). En cada caja la marca central (roja) indica el valor de la mediana (percentil 50), y los extremos los percentiles 25 y 75 de la distribución. Los bigotes se extienden hasta los valores mas extremos no considerados atípicos. Los valores atípicos se marcan con una cruz roja.

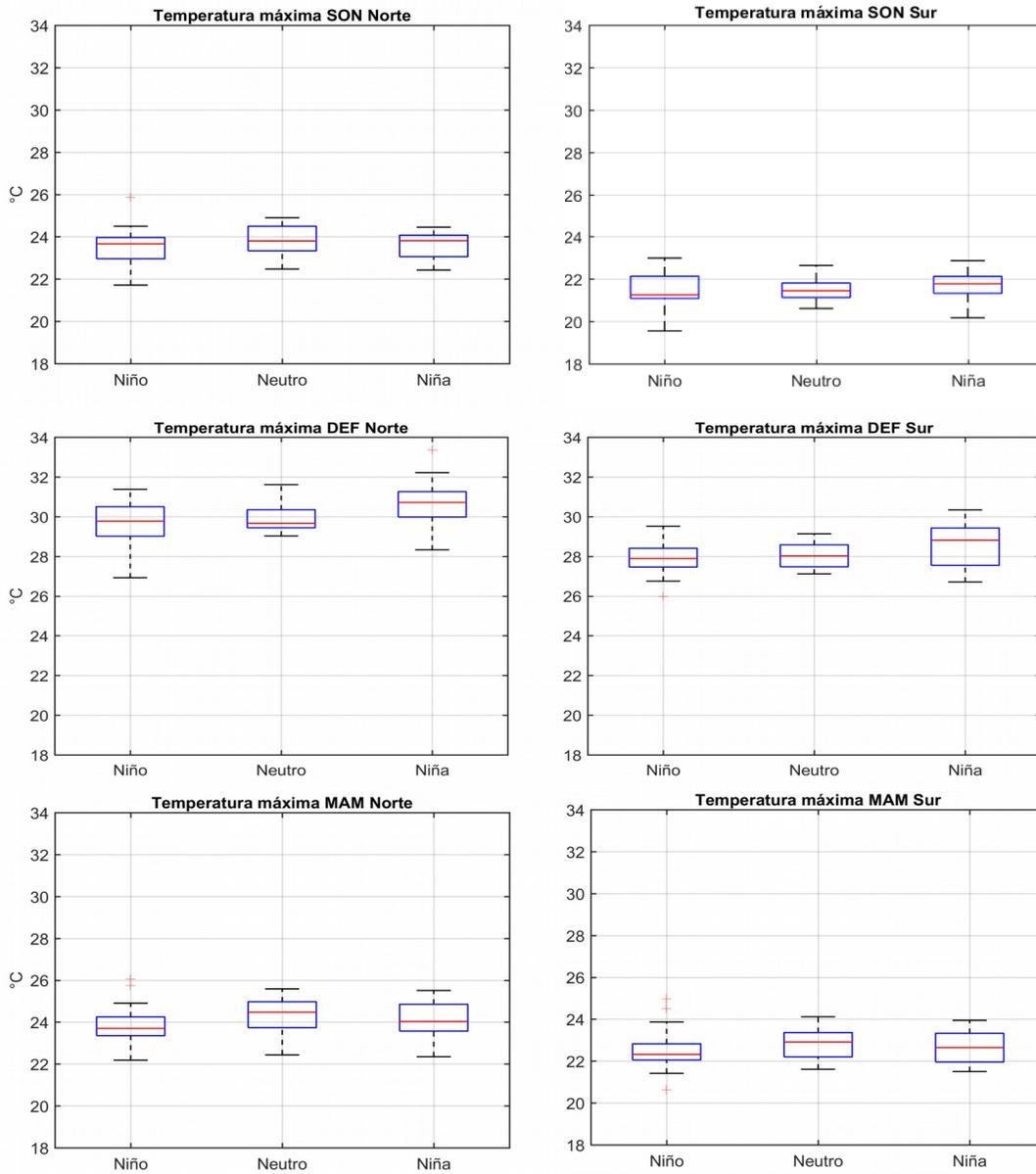


Figura 19 - Diagrama de cajas para Tmax en años El Niño, La Niña y neutros para estaciones al norte y sur del río Negro durante SON (arriba), DEF (centro) y MAM (abajo). En cada caja la marca central (roja) indica el valor de la mediana (percentil 50), y los extremos los percentiles 25 y 75 de la distribución. Los bigotes se extienden hasta los valores mas extremos no considerados atípicos. Los valores atípicos se marcan con una cruz roja.

Si bien no se muestra, durante comienzos de invierno el flujo de calor desde norte debido al aumento en los vientos en capas bajas durante El Niño tiende a aumentar la temperatura en la región subtropical ya que no existen anomalías de precipitación asociadas (Barreiro 2010).

Para terminar es bueno recordar que si bien océano Pacífico es el que tiene mayor influencia sobre las variaciones climáticas interanuales en nuestro país, otros océanos tropicales también juegan un papel. Por ejemplo, Barreiro y Tippmann (2008) mostraron que durante el verano el océano Atlántico ecuatorial puede modular la influencia de los eventos Niño sobre las lluvias del sudeste de Sudamérica. Asimismo, Chan et al (2008) encuentran que en la primavera el océano Índico puede influenciar las precipitaciones de nuestra región. Recientemente Martin y Barreiro (2015) mostraron cómo la influencia combinada de diferentes océanos genera variabilidad interdecadal en las lluvias de nuestra región. Esto abre nuevas líneas de investigación que pueden resultar en una mejora de la predictibilidad climática estacional mas allá de la debida al fenómeno de El Niño.

4.2 Variabilidad inter-decaderial

El clima varía naturalmente en todas las escalas de tiempo. El Niño tiene una periodicidad de entre 2 y 7 años y es un claro ejemplo de variabilidad climática en escalas interanuales. Mas allá de estas variaciones año a año, el clima presenta variabilidad década a década lo cual se denomina variabilidad inter-decaderial. En estas escalas de tiempo los océanos juegan un papel fundamental. Tanto el océano Pacífico como el Atlántico tienen variabilidad en estas escalas.

Un ejemplo de variaciones inter-decaderiales que tiene relevancia para nuestro país es la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP), que consiste en un patrón de anomalías similar a la de El Niño pero con escalas temporales mas largas (Mantua et al 1997). Durante la fase cálida de la ODP la temperatura de la región tropical-este del Pacífico está por encima de lo normal mientras que en el Pacífico norte está anormalmente fría. La serie temporal asociada a este patrón muestra oscilaciones con período cercanos a los 15-25 años y 50-70 años. La última fase fría de la ODP ocurrió entre 1947 y 1976, mientras que desde 1977 hasta mediados de los '2000 estuvo en la fase cálida. En los últimos años la ODP ha estado fundamentalmente en la fase fría.

El impacto de la ODP sobre nuestra región se muestra en la figura 20 para el caso de una fase negativa de la ODP durante verano. Se observa una disminución de las lluvias en toda la cuenca del Plata con un máximo en el sur de Brasil por lo que los impactos son mayores en el norte de Uruguay. Por lo tanto, la ODP tiene una influencia similar a la de ENOS pero en escalas temporales mas largas. Es decir, cuando la ODP está en fase cálida (el Pacífico tropical está mas cálido que lo normal) tiende a inducir lluvias por encima de lo normal en el sudeste de Sudamerica, y vice versa.

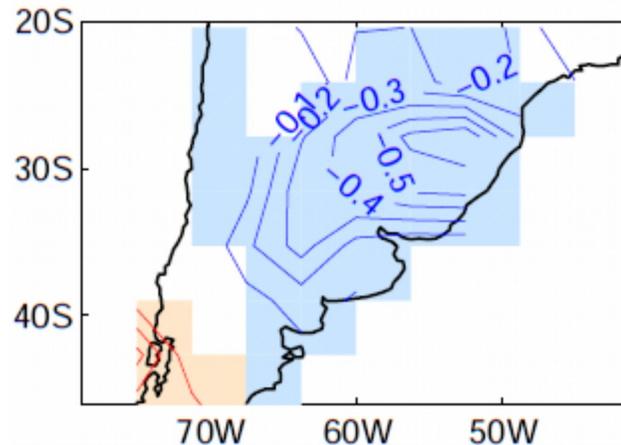


Figura 20 – Anomalías de lluvia en mm/día asociados a la fase negativa de la ODP durante verano. De Barreiro et al (2014).

Trabajos han mostrado que la fase de la ODP influye sobre el comportamiento de El Niño (Wang 1995). Se ha encontrado que los eventos Niño (o Niña) anteriores a 1976 tuvieron una evolución diferente a aquellos pos-1976: mientras que los eventos anteriores a 1976 comenzaron con un calentamiento en el Pacífico ecuatorial oriental que se propagó hacia el Pacífico central, los eventos posteriores a 1976 evolucionaron en forma opuesta. Asimismo, durante la fase cálida de la ODP los eventos Niño tienden a ser mas frecuentes e intensos que en la fase fría. Por lo tanto la influencia de El Niño, y en particular sobre el sudeste de Sudamérica, será diferente en diferentes décadas ya que cambios en la evolución del evento pueden alterar los patrones de teleconexiones y por ende las anomalías atmosféricas sobre nuestra región (Barreiro 2010).

Además de la ODP, otros procesos pueden jugar un papel importante en la generación de variabilidad inter-decaderial. El océano Atlántico posee variabilidad multi-decadal debida a cambios en la circulación oceánica termohalina. En particular, la Oscilación Multidecadal del Atlántico, relacionada a variaciones en la circulación termohalina, influencia nuestra región (Seager et al 2010, Barreiro et al 2014). Por último, es importante resaltar que la atmósfera es turbulenta y presenta variabilidad interna (independiente de las condiciones de los océanos) en todas las escalas de tiempo, incluyendo la decadal.

5. Cambio climático

5.1 Introducción

El cambio climático se refiere a las variaciones climáticas causadas por las actividades humanas y está superpuesto a la variabilidad climática natural. El estudio del cambio climático tiene dos etapas: detección y atribución. Es bueno resaltar que la detección de cambio en el clima no implica directamente que pueda ser atribuible a la acción antropogénica. Dado que el clima varía naturalmente en un continuo de escalas temporales desde horas y días a siglos y milenios es necesario contar con series instrumentales de observación largas para estudiar los efectos de la acción humana. Además, el cambio climático se observa más fácilmente a escala global. Factores como cambios en el uso del suelo o contaminación local complican la detección de la señal del cambio climático antropogénico en escalas pequeñas. Por ello, para atribuir un cambio al hombre debe existir una comprensión del fenómeno ocurrido y de los procesos involucrados.

Antes de presentar los cambios observados en el siglo XX y comienzos del XXI es bueno repasar cómo el hombre puede influir sobre el clima.

La temperatura media terrestre es aquella para la cual el planeta recibe y emite igual cantidad de energía. Por un lado, la Tierra recibe energía del Sol, de la cual cerca de 30% es reflejada mayormente por las nubes y los hielos y devuelta al espacio (albedo terrestre). Por otro lado, la energía emitida por el planeta depende de la temperatura media del mismo. Si la atmósfera no existiera, la Tierra emitiría a la temperatura de la superficie, la cual sería muy fría (-18 °C). No obstante, la atmósfera absorbe la energía de onda larga irradiada por la Tierra emitiéndola nuevamente hacia la superficie y hacia el espacio. Este fenómeno natural se debe a los gases de efecto invernadero (como el vapor de agua y el dióxido de carbono CO₂) y mantiene una temperatura mayor en la superficie de la Tierra (cerca a 15 °C). Entonces, si disminuye el albedo terrestre o aumenta la concentración de gases de efecto invernadero la temperatura aumentará para llegar a un nuevo equilibrio en el cual la Tierra emite la misma energía que gana. La actividad humana ha aumentado ambos debido a la quema de combustibles fósiles y a la deforestación: aumentó el albedo a través de la emisión de partículas a la atmósfera (aerosoles) y aumentó en más de un 30% la concentración de CO₂ desde la Revolución Industrial (actualmente está cerca de los 410 ppm).

Como se mencionó en la introducción el clima se define sobre un período de al menos 30 años. Una forma, entonces, de ver los cambios ocurridos en el clima es tomar la diferencia entre dos períodos consecutivos de 30 años. No obstante, la variabilidad multi-decadal natural esconderá la señal antropogénica. Además, la teoría de los procesos de radiación involucrados en el efecto invernadero predice que un aumento exponencial en la concentración de CO₂ en la atmósfera de lugar a un aumento lineal de la temperatura. Por ello para estudiar el cambio climático es usual considerar la tendencia en todo el período considerado, que si bien estará “contaminada” por la variabilidad natural, se espera que represente mejor el aumento exponencial de la concentración de CO₂ en la atmósfera debido a las actividades humanas.

5.2 Tendencias observadas en el clima de Uruguay y la región

De acuerdo al informe SR1.5 del IPCC (2019) a nivel global, las actividades humanas han causado aproximadamente 1.0 C de calentamiento en las temperaturas de superficie con respecto al período pre-industrial, con un rango de entre 0.8 y 1.2 C. Este aumento no fue constante: hubo períodos de rápido calentamiento (1910-1945, 1976-2000) y otros de relativo enfriamiento (1945-1976). Se ha sugerido que el intervalo de enfriamiento fue debido a que los aerosoles emitidos tuvieron un efecto de enfriamiento más importante que el de calentamiento debido al CO₂. Tampoco fue uniforme: el calentamiento ha sido mayor en los continentes que en los océanos y más acentuado en las altas latitudes septentrionales. Asimismo, los regímenes de precipitaciones también cambiaron: en las regiones donde llovía tiende a llover más y en las que llovía muy poco, las lluvias son aún menores.

5.2.1 Precipitación

La figura 9 muestra que tanto al norte como al sur del país hay una tendencia positiva hacia el aumento en las precipitaciones desde 1961 hasta 2017. En el norte los acumulados anuales pasaron de 1325 mm a 1450 mm en ese período, lo que implica un aumento cercano al 10%. En la región sur la tendencia fue mayor, en el entorno del 15-20 %, pasando de 1100 mm a 1300 mm.

Otra forma de ver los cambios es comparar dos períodos, uno al inicio y otro al final de la serie. La figura 21 muestra la distribución de acumulados mensuales durante 1961-1989 y 1990-2017 al norte y sur de Uruguay. Coincidente con la figura 9 se observa un corrimiento de la mediana hacia valores mayores en el último período, mas pronunciado en la región sur. Asimismo, la distribución de los valores mensuales muestra un corrimiento sistemático, aunque pequeño, hacia valores de mayor acumulación. Los valores atípicos son mas comunes durante 1990-2017 y están caracterizados por montos mayores. Todo esto muestra un cambio en la distribución de lluvias mensuales en todo el país caracterizado por un aumento en las lluvias medias y en los extremos.

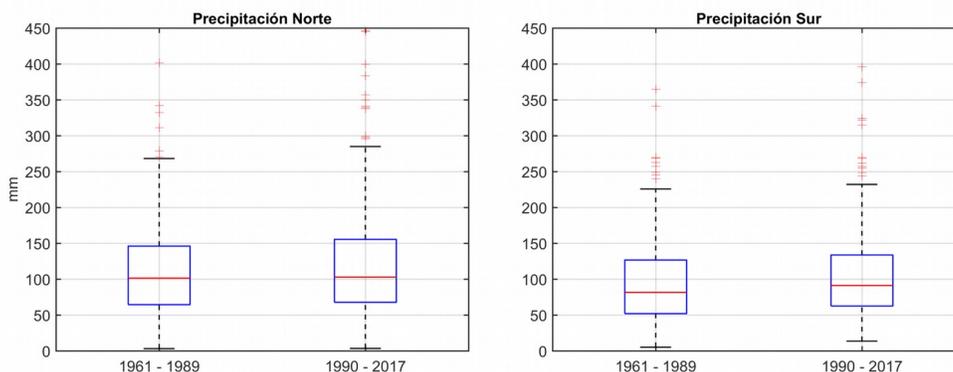


Figura 21 – Diagrama de cajas para acumulados de lluvia mensual para dos períodos en las regiones norte y sur del país.

El aumento en las lluvias anuales se observa en toda la región (figura 22), siendo la significancia estadística mayor en el sur de Uruguay, región central de Argentina y costa del sur de Brasil.

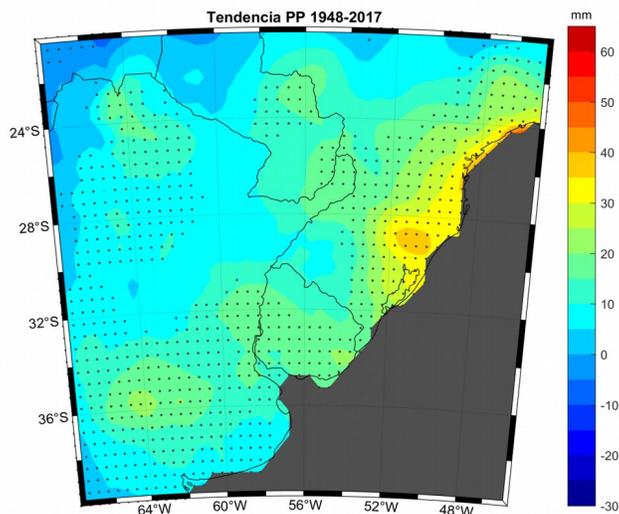


Figura 22 – Tendencia observada en los acumulados anuales de lluvia durante el período 1948-2017. Las regiones punteadas indican donde la tendencia es estadísticamente significativa al 5%.

A nivel trimestral el aumento en las lluvias en Uruguay se observa durante verano, otoño y primavera con valores máximos de 40-50 mm en un trimestre (figura 23). En verano el aumento es mayor en la región norte, mientras que en otoño la tendencia positiva es mayor en el litoral este del país. En primavera el aumento es menor. Por el contrario, en invierno la región norte del país muestra una clara tendencia a la disminución de lluvias, mientras que el resto del país no ha sufrido cambios.

5.2.1.1 Extremos de lluvia

La figura 24 muestra una distribución típica de acumulados diarios de lluvia, caracterizada por un decaimiento exponencial desde muchos días con ausencia de precipitaciones o de valores pequeños hasta la presencia de muy pocos días con valores muy grandes. Estos acumulados grandes de lluvia son los extremos diarios que tienen gran impacto en las actividades socio-económicas. Por lo tanto interesa saber si su frecuencia de ocurrencia ha cambiado debido a la acción humana.

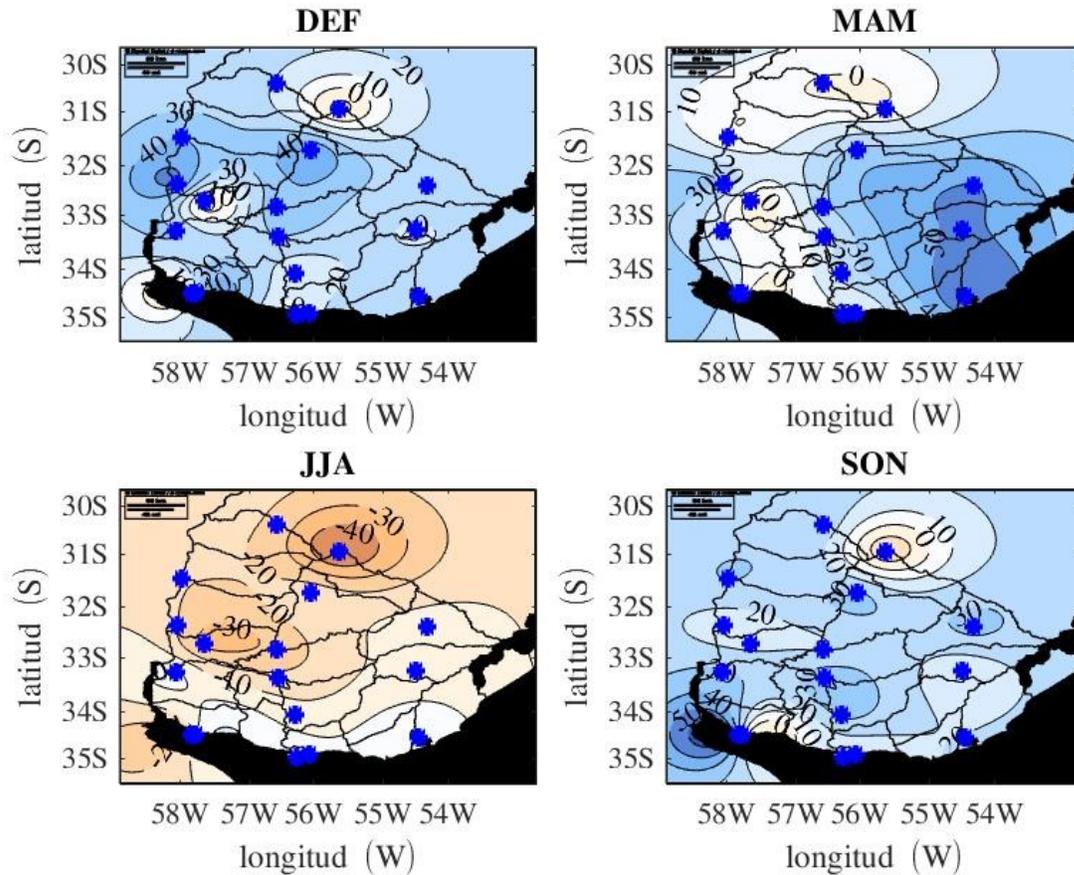


Figura 23 – Tendencia observada en los acumulados de lluvia para DEF, MAM, JJA y SON durante el período 1961-2016.

Como mostramos antes, existe una tendencia hacia un aumento en las precipitaciones en todo el país. Por lo tanto, deberá existir un aumento en la ocurrencia de días con acumulados importantes de lluvia (ver figura 25).

Hay muchas formas de definir los extremos diarios de lluvia. Una forma usual es definir extremo a aquellos días en los cuales llovió por encima de 10 mm. El índice que caracteriza la ocurrencia de estos eventos se denomina R10mm. Otro índice es aquel que caracteriza la ocurrencia de los eventos con acumulados de lluvia diaria superior al percentil 95 de la distribución: R95p. Por último, se puede considerar un índice que caracteriza la lluvia acumulada durante 5 días consecutivos: Rx5day. A continuación mostramos las tendencias en estos tres índices.

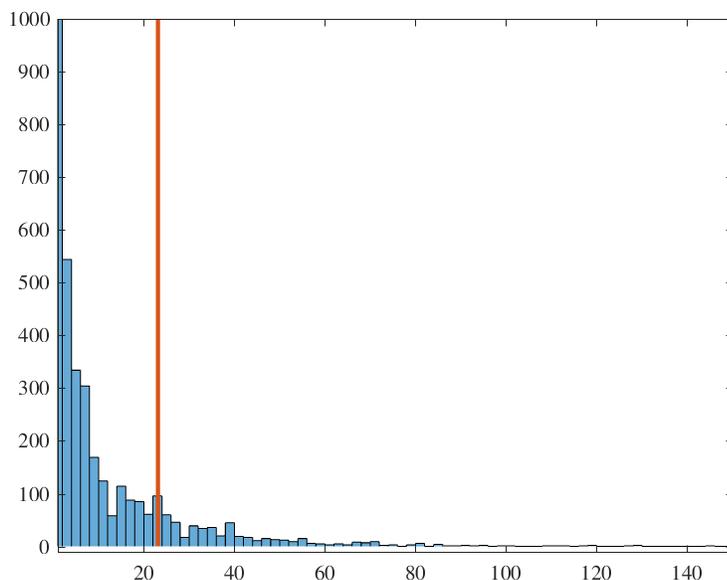


Figura 24 – Distribución típica de ocurrencia de lluvias diarias. El eje de las abscisas indica el acumulado diario y el de las ordenadas el número de veces que ocurrió cada valor. La línea roja indica el percentil 95, que en este caso ocurre para acumulados mayores a los 23 mm/día.

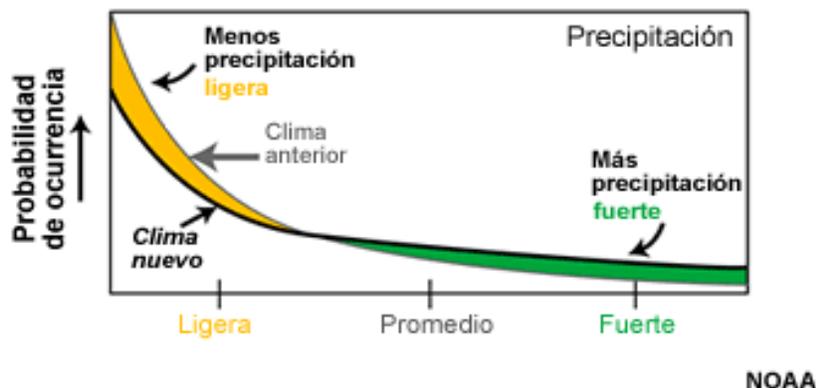


Figura 25 – Esquema de cambio en la distribución de lluvias diarias.

La figura 26 muestra la tendencia observada en el período 1948-2010 de R10mm, mostrando un claro y significativo aumento en todo el país. La tendencia positiva es mayor en el norte y menor en el sur con valores típicos de 0.1 días/año, lo cual implica un aumento de 5 días con lluvias extremas adicionales en 50 años. El índice R95p también muestra tendencia positiva en

la mayor parte del país aunque los valores no son significativos. Por otro lado, el índice de acumulados de lluvia de 5 días no muestra tendencia positiva y, en su lugar, se observa una tendencia negativa al sur del país aunque no es estadísticamente significativa. En resumen, a nivel anual existe una tendencia positiva en la ocurrencia de extremos de lluvia diarios en todo el país cercana al 5-10% (ver también Marengo et al 2010).

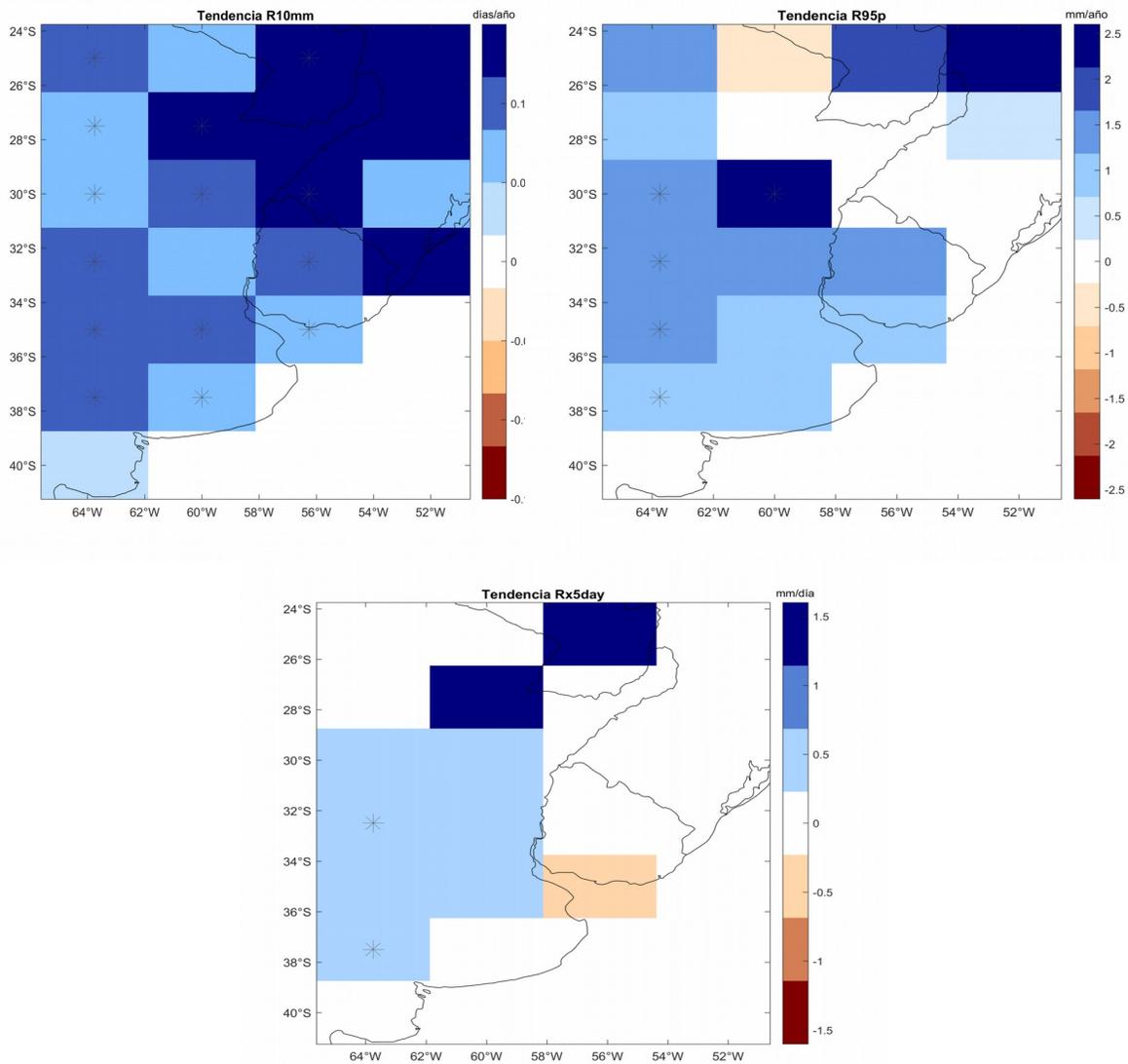


Figura 26 – Tendencia en R10mm anual (arriba izquierda), R95p anual (arriba derecha) y Rx5day anual (debajo). Los “*” indican valores estadísticamente significativos.

A nivel estacional se observa un aumento en la intensidad de los eventos extremos diarios de lluvia fundamentalmente en otoño al este del país coincidiendo con el aumento en los acumulados trimestrales. En primavera también se observa un aumento en la intensidad de los eventos aunque es menor que en otoño, mientras que en verano los cambios son pequeños. En invierno, por otro lado, se observa una disminución en la intensidad de los extremos diarios de lluvia, particularmente en el litoral oeste del país, en consonancia con la disminución en las precipitaciones acumuladas trimestrales (Carril et al 2016).

5.2.2 Temperatura

La temperatura mínima y máxima media anual muestran claras tendencias positivas desde 1961 a la fecha tanto al norte como al sur del país (figuras 15 y 16). En el caso de la temperatura mínima la tendencia es mayor en el norte mostrando un aumento de 1.7 C en 56 años, mientras que el sur muestra una tendencia de 0.5 C en el mismo período. La temperatura máxima tiene mayor tendencia positiva también en el norte del país, con un aumento cercano a 0.7 C en todo el período; en el sur es del orden de 0.5 C.

La distribución de temperaturas mínimas medias mensuales en el norte y sur del país es casi simétrica con medianas cerca de los 12 C durante 1961-1989 (figura 27). En acuerdo con un aumento en las temperaturas la mediana adquiere valores mayores durante 1990-2017, particularmente en el norte. Por el contrario, no se observa cambios significativos en el ancho de la distribución entre los dos períodos.

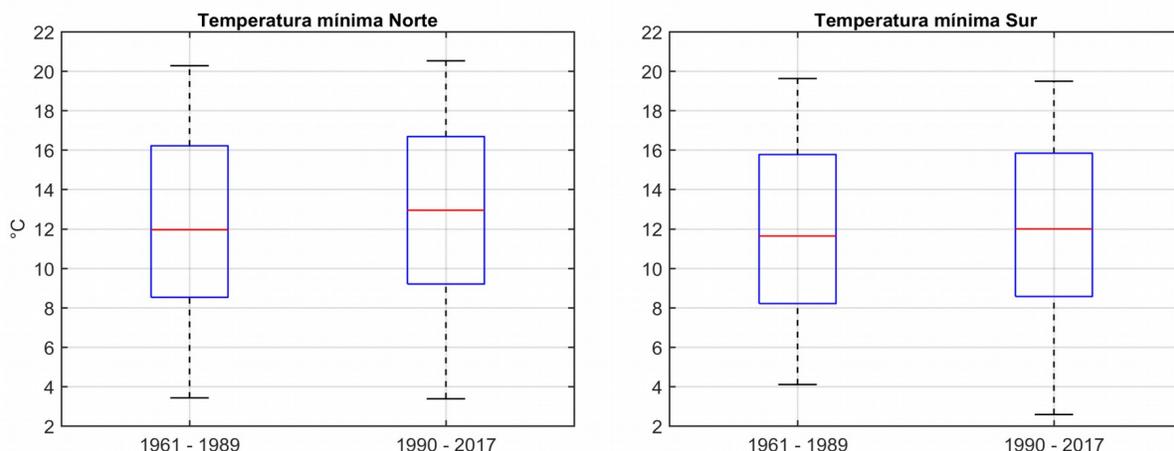


Figura 27 – Diagrama de cajas para la temperatura mínima media mensual para dos períodos en las regiones norte y sur del país.

En el caso de la temperatura máxima media mensual se observa tanto para el norte como para el sur del país una pequeña reducción en el ancho de la distribución durante el período 1990-2017 comparado con el período 1961-1989 (figura 28). Esto indicaría una reducción en la variabilidad mensual de la temperatura máxima en las últimas décadas.

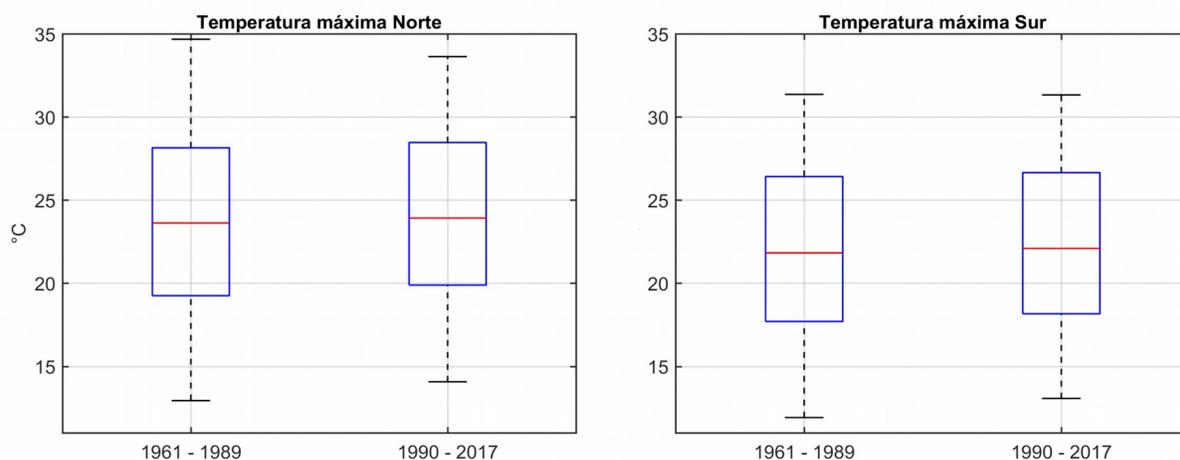


Figura 28 – Diagrama de cajas para la temperatura máxima media mensual para dos períodos en las regiones norte y sur del país.

En cuanto a las temperaturas medias se observa que aumentó cerca de 0.8 C comparando las décadas 1961-1980 y 1995-2015 (figura 29). La tendencia observada es comparable a la variabilidad año a año en la temperatura media de Uruguay lo cual facilita su detección.

A nivel estacional se observa un aumento de la temperatura media en todas las temporadas (figura 30). La región este del país muestra un calentamiento de entre 1.2 y 1.6 C, mientras que el litoral oeste y sur tienen un calentamiento mas moderado. El área metropolitana muestra un calentamiento cercano a 0.7 C.

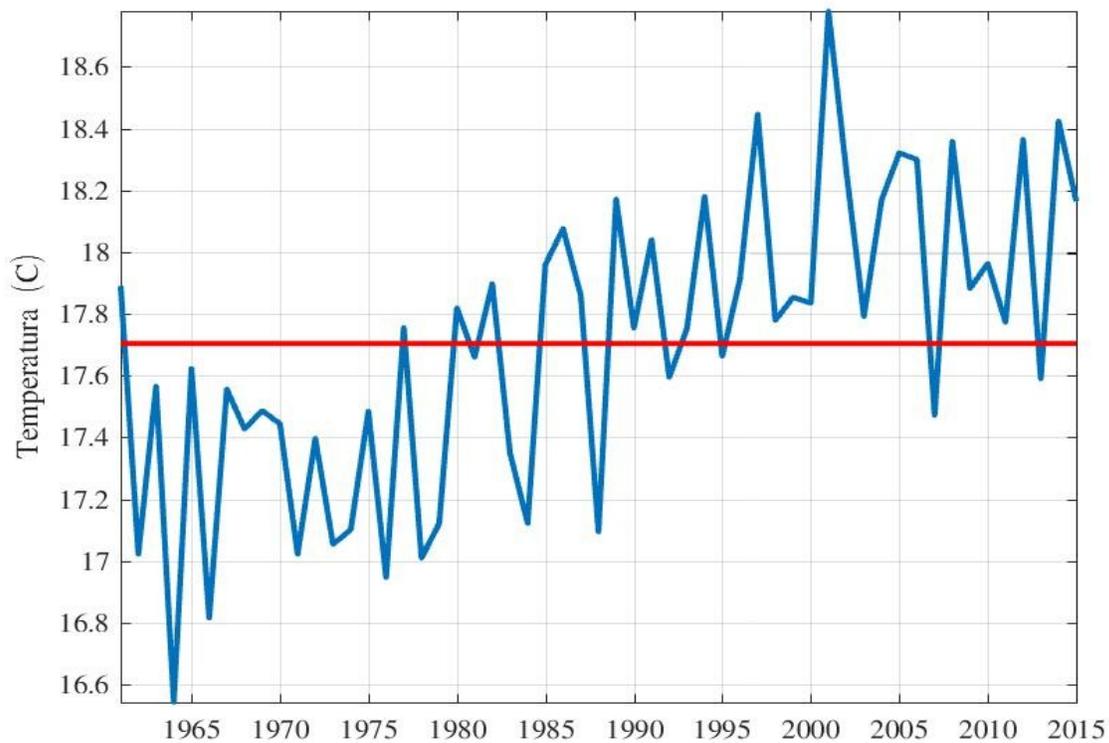


Figura 29 – Evolución y tendencia de la temperatura media anual en Uruguay.

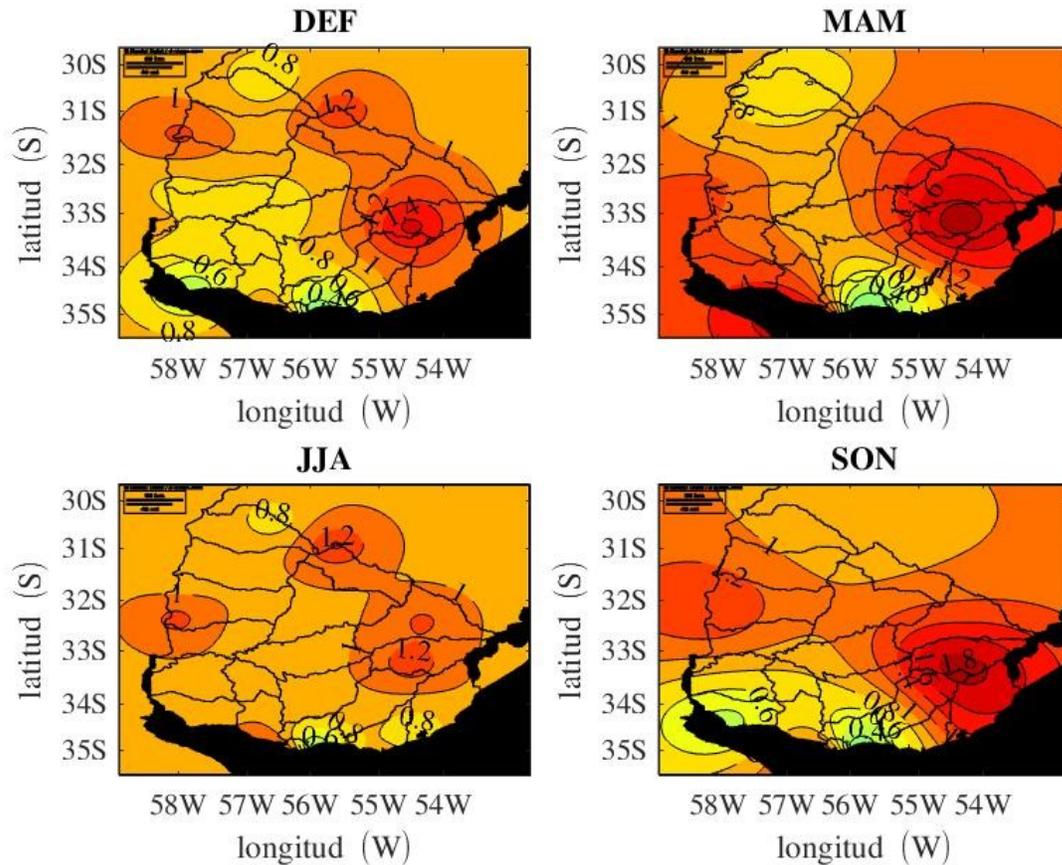


Figura 30 – Tendencia en la temperatura media para las temporadas DEF, MAM, JJA y SON para el período 1961-2015.

5.2.2.1 Extremos de temperatura

La figura 31 muestra una distribución típica de temperaturas medias diarias; distribuciones similares se encuentra para las temperaturas mínimas y máximas. A diferencia de la distribución para las lluvias, esta tiene forma aproximada de campana y en este caso se pueden definir extremos a ambos lados de la distribución. En el lado derecho extremo de la distribución se encuentran los días mas cálidos, mientras que en el lado izquierdo se encuentran los días mas fríos. Índices típicos para caracterizar cambios en los eventos extremos son TN10p, TN90p, TX10p, TX90p, que indican el número de días con temperatura mínima menor al percentil 10, mayor al percentil 90, y el número de días con temperatura máxima menor al percentil 10 y mayor al percentil 90, respectivamente.

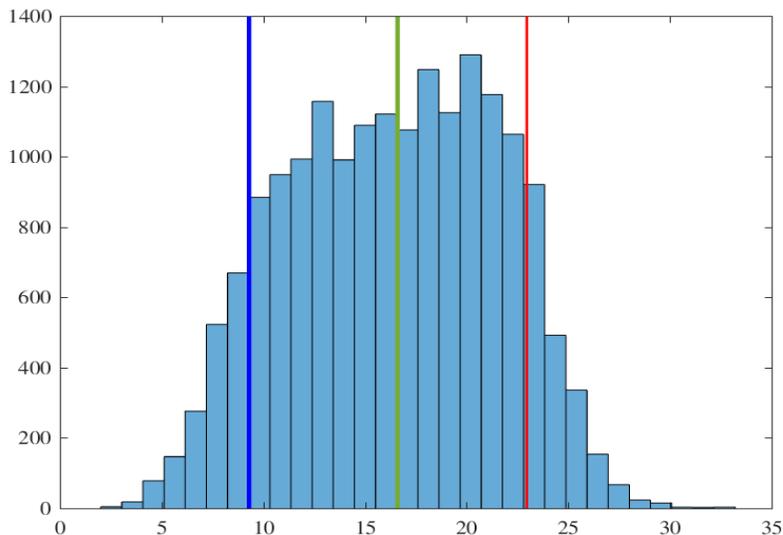


Figura 31 – Distribución típica de temperatura media diaria. El eje de las abscisas indica el valor medio diario y el de las ordenadas el número de veces que ocurrió cada valor. La línea verde indica la mediana (cerca a la media), la línea azul el percentil 10 y la línea roja el percentil 90.

Como las temperaturas mínimas ocurren típicamente durante la noche o primeras horas de la mañana, TN10p caracteriza a las noches frías y TN90p a las noches cálidas. Asimismo, TX10p caracteriza a los días fríos y TX90p a los días cálidos, ya que las temperaturas máximas ocurren durante el día.

La figura 32 muestra la tendencia en los índices de extremos para la temperatura mínima anual. Se observa que a nivel anual, en las últimas décadas hubo una tendencia a una menor ocurrencia en el número de noches frías y un aumento del número de noches cálidas sobre todo el país y la región. Asimismo, hay una tendencia negativa pero no significativa en la ocurrencia de días cálidos, sobre todo al sur del país (figura 33), pero sí se observó una disminución en la ocurrencia de días fríos en todo el país. En consecuencia, el calentamiento medio observado se relaciona principalmente con un aumento en las temperaturas mínimas (Renom 2009, Ruasticucci et al 2010). En lo respectivo a heladas existe gran variación decadal y no hay una tendencia clara en la ocurrencia, pero sí hay una disminución del período del año en que existen (de Mello 2014). A nivel estacional, las tendencias más importantes son: menor número de noches frías en verano y otoño, menor ocurrencia de días fríos en invierno (Renom 2009). En la primavera no hay tendencias claras.

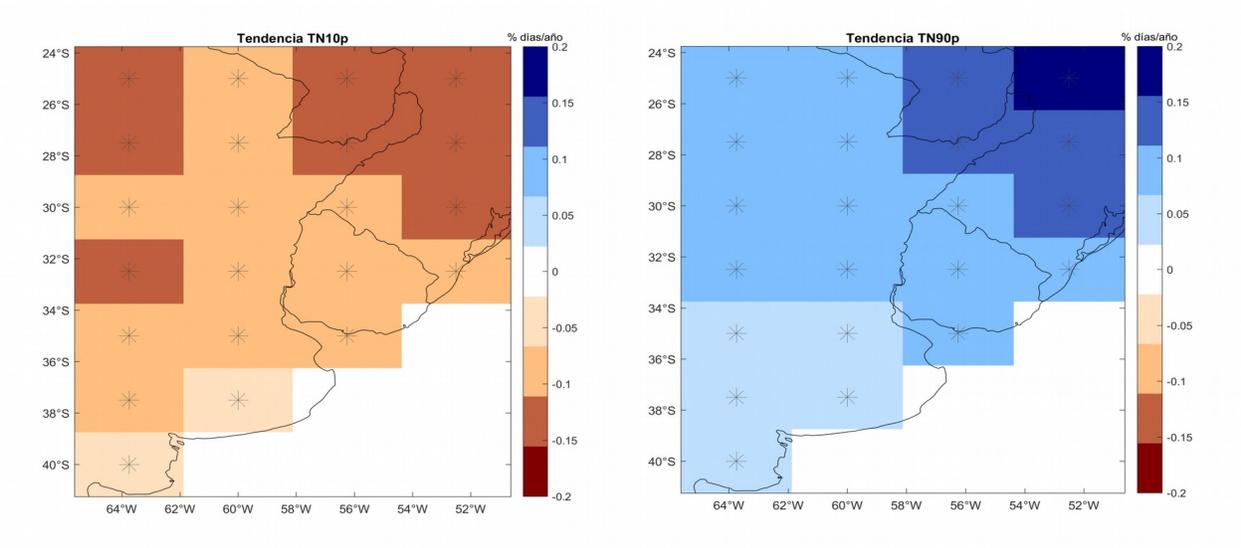


Figura 32 – Tendencias para TN10p (izquierda) y TN90p (derecha) anuales. Los “*” indican regiones que son estadísticamente significativas.

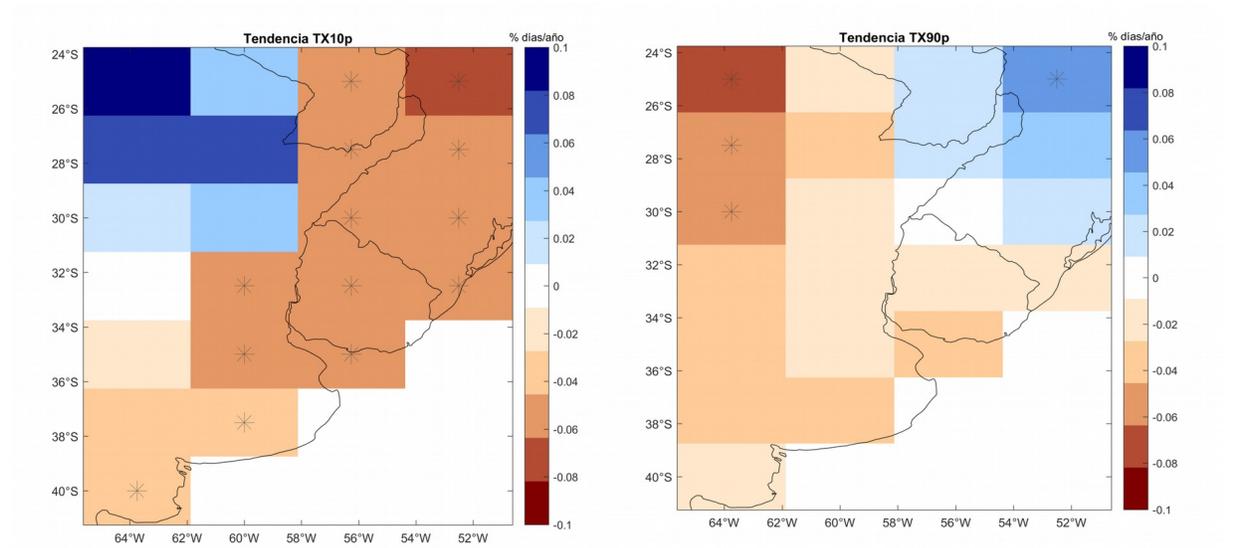


Figura 33 – Tendencias para TX10p (izquierda) y TX90p (derecha) anuales. Los “*” indican regiones que son estadísticamente significativas.

Para ejemplificar las tendencias observadas en la temperatura mínima se muestran en la figura 34 la evolución de TN10p y TN90p anual para algunas estaciones del país. Se observa una

clara tendencia a la disminución en la ocurrencia de noches frías y una tendencia al aumento en la ocurrencia de noches cálidas, tal cual fue mencionado mas arriba.

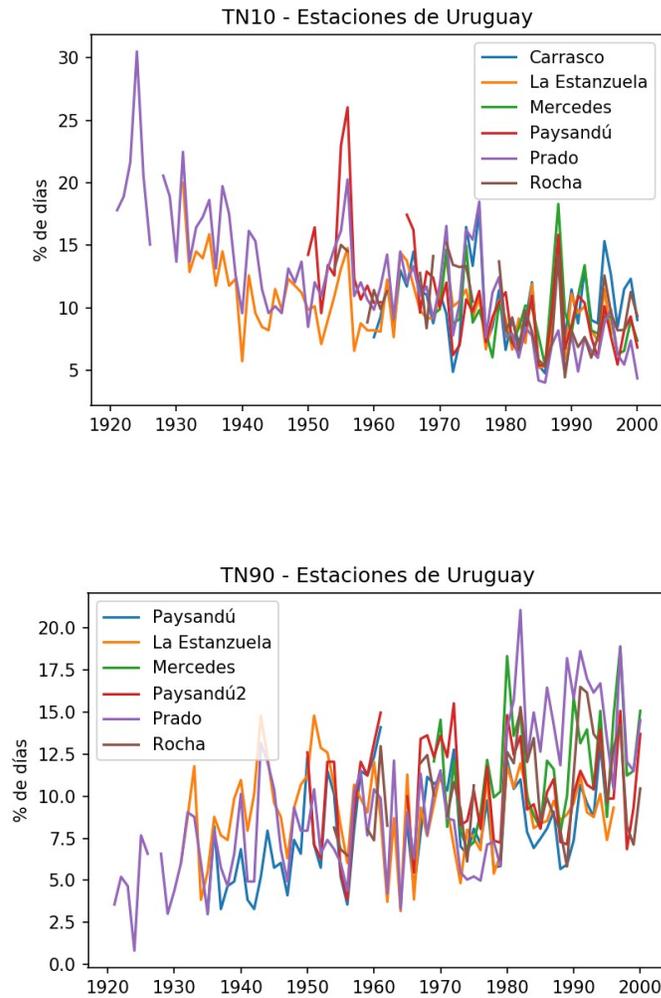


Figura 34 – Evolución temporal de TN10p y TN90p anual para estaciones en Uruguay.

El cambio en los índices anteriores es consistente con el aumento en la temperatura media. No obstante, esos índices no dicen nada sobre un posible aumento en la frecuencia de ocurrencia de días consecutivos cálidos. Para ello se define el índice que representa la ocurrencia de rachas de días cálidos (WSDI, por su sigla en inglés) que es el número anual de días con al menos 6 días consecutivos con la temperatura máxima mayor al percentil 90. La tendencia

observada para este índice sobre Uruguay es similar a la de TX90p, siendo negativa en el sur del país, pero no estadísticamente significativa (figura 35). Notar que Uruguay se encuentra en una región de transición entre el sur de Brasil donde se observó un aumento en WSDI y Argentina donde se observó una disminución en WSDI.

Es bueno resaltar que si bien nuestra comprensión sobre los procesos físicos causantes de los cambios climáticos globales es adecuada, los procesos involucrados en los cambios a nivel regional recién están comenzando a entenderse.

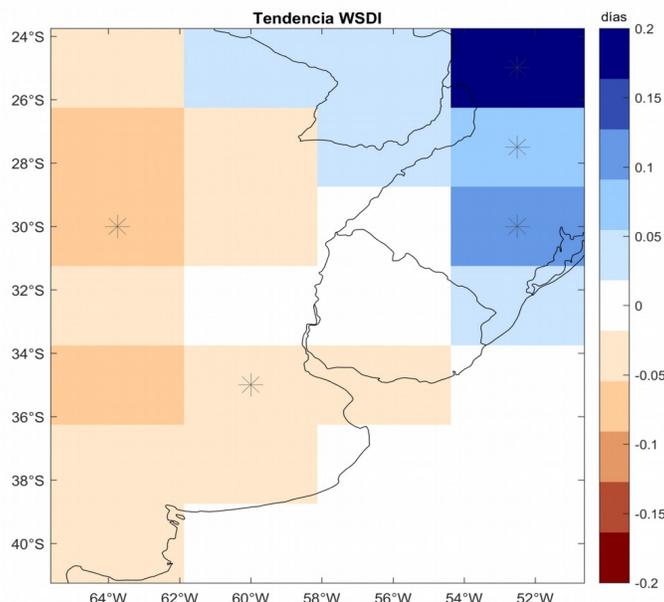


Figura 35 – Tendencias para WSDI anual. Los “*” indican regiones que son estadísticamente significativas.

6. Variabilidad en los caudales del río de la Plata y tributarios

La variabilidad y el cambio climático tienen impacto directo en el caudal de los ríos, particularmente a través de cambios en las precipitaciones. Dada la gran variabilidad y los cambios observados en las lluvias en todo el sudeste de Sudamérica es esperable que el caudal de los ríos varíe en forma acorde. Aquí nos concentraremos en el caudal o descarga del río de la Plata y sus tributarios, los ríos Uruguay, Paraná Palmas y Paraná Guazú.

La figura 36 muestra los tributarios y el Río de la Plata tiene un caudal medio cercano a los 25.000 m³/s pero es muy variable en el tiempo, consecuencia de la variabilidad de los caudales

del río Uruguay y Paraná Guazú. El Parana Las Palmas muestra un caudal con pocas variaciones temporales.

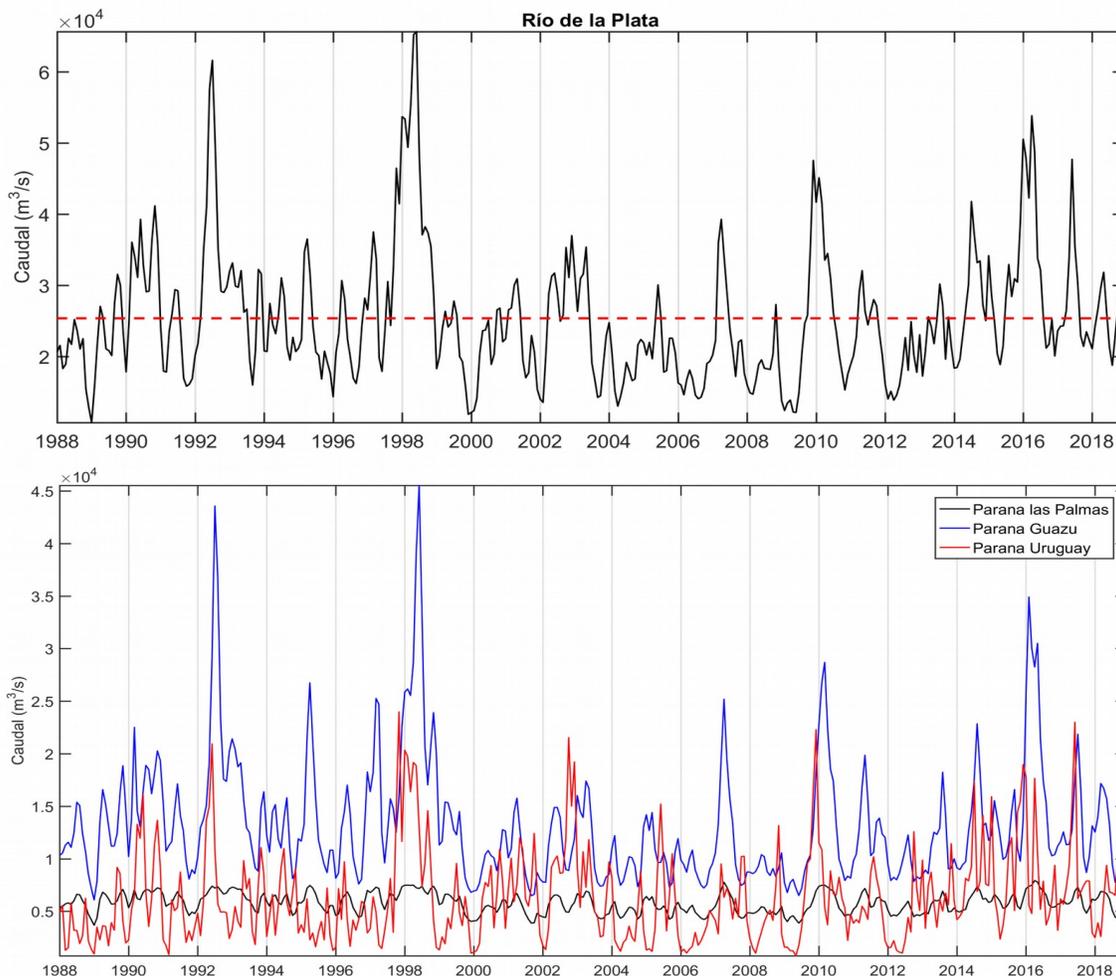


Figura 36 – Caudales del río de la Plata y sus tributarios.

El río Uruguay tiene un caudal medio cercano a $6.000 \text{ m}^3/\text{s}$ (figura 37), pero en ciertos años, como en 1997-1998 su caudal puede llegar a ser 4 veces mayor debido a las intensas lluvias inducidas por el fenómeno de El Niño (figura 38). Por el contrario, en 1988-89 el caudal fue muy bajo coincidiendo con uno de los eventos La Niña mas intensos que generó una sequía muy importante en toda la cuenca. La distribución es asimétrica con muchos valores atípicos.

El río Parana Guazú tiene un caudal medio de $12.000 \text{ m}^3/\text{s}$, pero existen años como el 1998, cuando su caudal fue casi 4 veces este valor, también asociado al Niño. Su distribución es

asimétrica con muchos valores atípicos de gran caudal. Por el contrario el río Parana Palmas muestra una distribución simétrica alrededor de una mediana cercana a 5.700 m³/s.

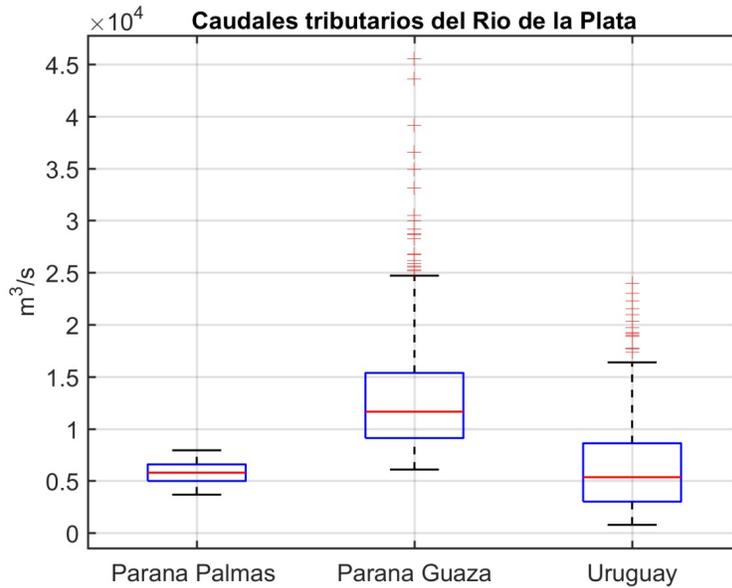


Figura 37 – Diagrama de caja para los tributarios del río dela Plata.

Como consecuencia, la descarga del Río de la Plata tiene gran dependencia con ENOS, principalmente durante verano y otoño donde se observa un claro aumento con eventos El Niño y una disminución con La Niña. Se observa asimismo un notable aumento de la varianza durante el verano de años Niño con respecto a los años neutros y La Niña (figura 39).

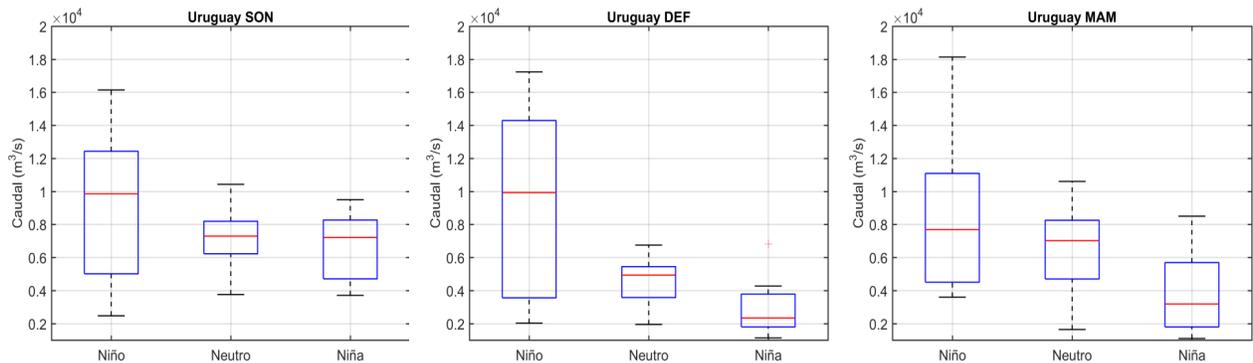


Figura 38 - Diagrama de cajas para el caudal del río Uruguay en diferentes estaciones del año separados para años El Niño, neutros y La Niña.

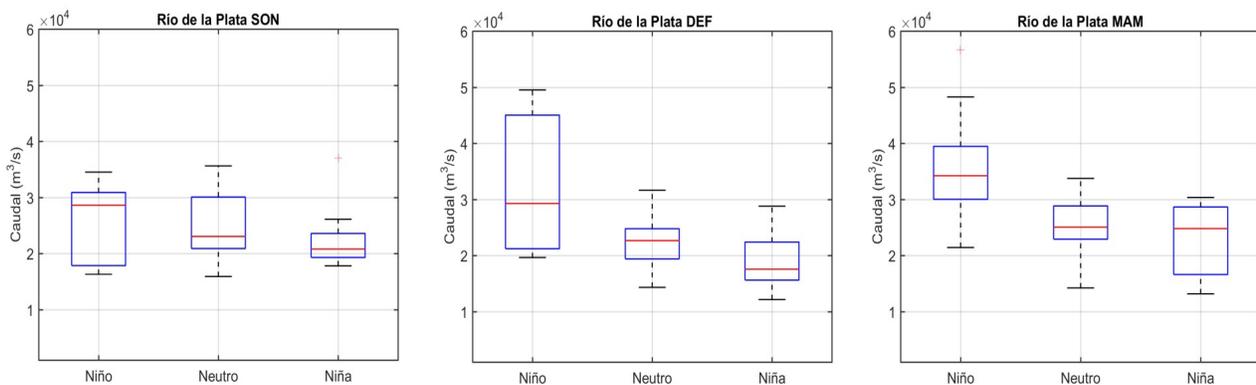


Figura 39 - Diagrama de cajas para el caudal del río dela Plata en diferentes estaciones del año separados para años El Niño, neutros y La Niña.

Las series de caudales tienen 31 años por lo que son demasiado cortas para estudiar cambios climáticos. Igualmente se muestra la serie de caudal medio anual y la tendencia para el río Uruguay y Río de la Plata (figura 40). El río Uruguay muestra una tendencia positiva en los últimos 30 años consistente con el aumento en las lluvias mostrado en la figura 22, mientras que el caudal del Río de la Plata no tiene tendencia debido a que el Paraná Guazú (su mayor tributario) muestra una tendencia hacia caudales menores en los últimos 30 años.

Variabilidad observada del clima en Uruguay (E2)

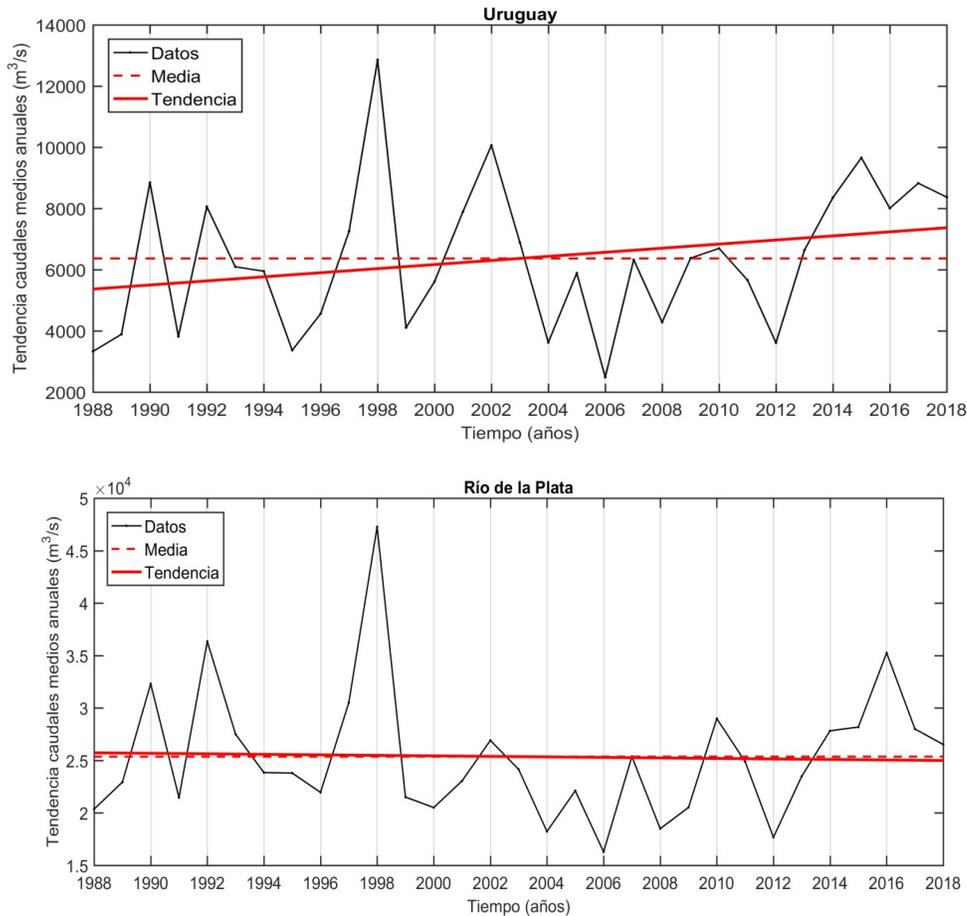


Figura 40 – Caudal medio anual de los ríos Uruguay y de la Plata.

7. Océano circundante

Las aguas del Río de la Plata y del océano Atlántico circundante moderan el clima del sur de Uruguay fundamentalmente a través de la evaporación que aumenta el contenido de humedad disminuyendo la amplitud de las variaciones de temperatura en la región costera.

Asimismo, debido a su gran inercia térmica el agua responde mas despacio a la radiación solar generando un gradiente térmico entre la tierra y el agua que induce la brisa marina costera, o virazón. La brisa consiste en una celda de circulación de mesoescala entre el mar y la tierra con vientos en superficie viniendo desde mar y en altura desde la tierra durante el día (brisa de mar) debido a un mayor calentamiento relativo del continente. En la tarde la brisa de mar recede y puede formarse una brisa de tierra que circula en sentido opuesto. Por ejemplo, en la

costa oceánica la brisa comienza en promedio a las 11:00 hs con dirección SE, el máximo ocurre a las 17:00 hs y termina próximo al atardecer (figura 41). La brisa puede ocurrir todo el año pero es mas frecuente en verano (Manta 2018).

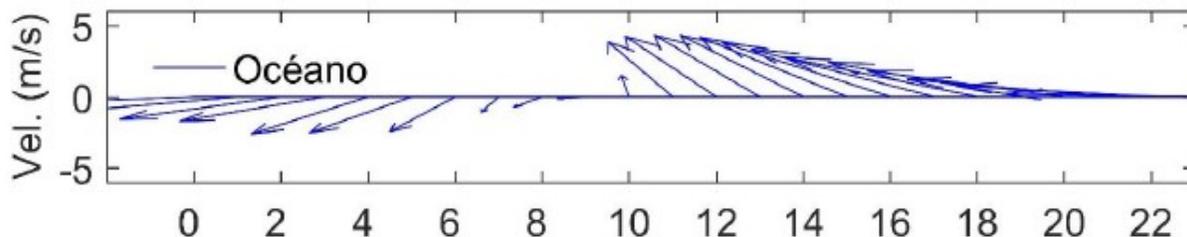


Figura 41 – Ciclo diario promedio de los vientos para los días de brisa marina en la costa oceánica (Manta 2018).

Uruguay está situado en una región donde la circulación oceánica está dominada por la corriente de Brasil y su encuentro con la corriente de Malvinas. La corriente de Brasil fluye a lo largo del quiebre de la plataforma y transporta aguas cálidas y salinas desde regiones tropicales hacia el sur, donde se encuentra con la corriente de Malvinas que fluye hacia el norte transportando aguas frías y diluídas desde el sur de Argentina. La confluencia entre estas dos corrientes se encuentra en las inmediaciones de 37-38 S, un poco al sur de las latitudes de Uruguay, pero tiene una gran variabilidad espacio-temporal que cubre la ZEE uruguaya. Además de estas corrientes, las características del agua en nuestra costas están dominadas por la descarga del Río de la Plata, que como vimos presenta gran variabilidad. La pluma de descarga puede quedar restringida en el estuario o extenderse hacia el norte a lo largo de la costa bajo condiciones de alta descarga y viento del suroeste.

La figura 42 muestra la climatología de la temperatura de superficie en la ZEE y aledaña. Durante verano las aguas cálidas se extienden mas hacia el sur que durante invierno y tienen valores cercanos a los 20 C. En otoño estas aguas cálidas retroceden hacia el norte y en JJA se observa la intrusión de aguas frías sobre la plataforma alcanzando valores de temperatura características en la costa atlántica de 12 C. Debido a la inercia térmica en la primavera las aguas son mas frías que en otoño.

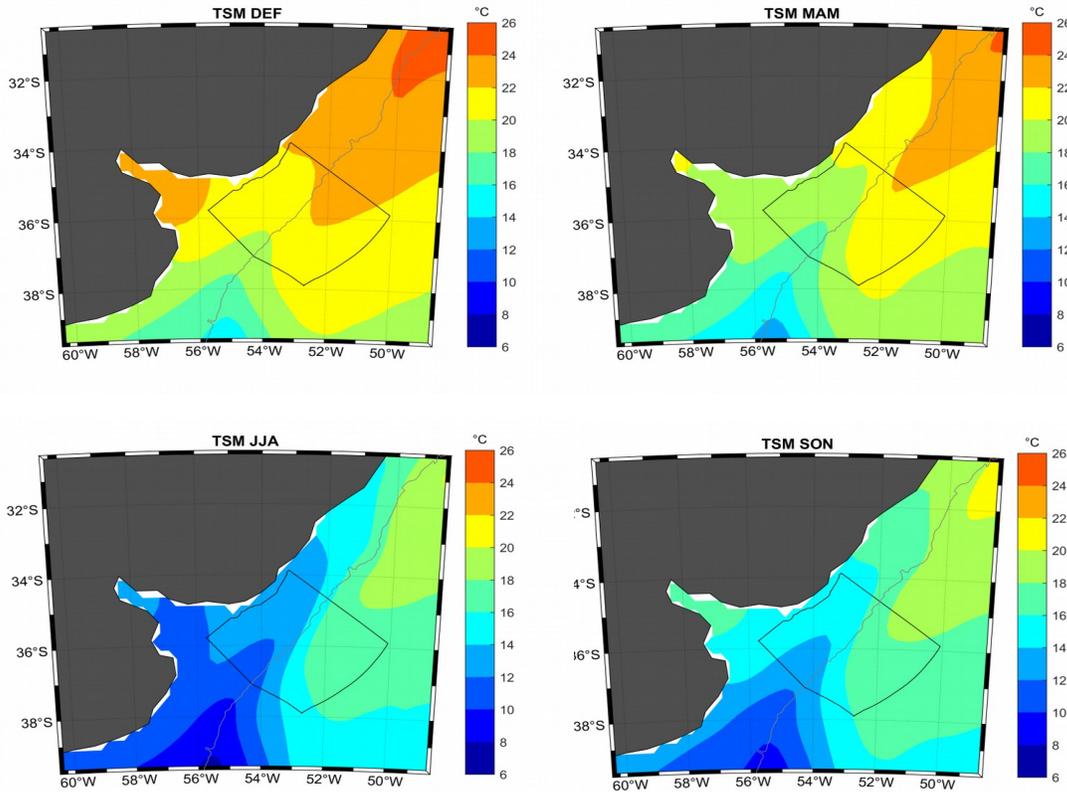


Figura 42 – Climatología trimestral de temperatura de superficie del mar. La línea negra delimita la zona económica exclusiva (ZEE).

La temperatura de superficie del mar de la región está caracterizada por variaciones desde la escala sinóptica a la interanual y de mas largo plazo. A nivel interanual se observa un máximo de variabilidad en todas las estaciones asociada a variaciones en la posición de la confluencia Brasil-Malvinas que caracteriza el sur de nuestra ZEE (figura 43). La variabilidad es máxima en invierno cuando estas corrientes son mas energéticas y muestran mayor actividad de mesoescala, caracterizada por remolinos con diámetros característicos de 50-100 km.

A nivel global esta región es una de las que ha mostrado mayor tendencia hacia el aumento en las temperaturas de superficie del mar en las últimas décadas (figura 44). La tendencia es consistente con una intensificación y mayor extensión hacia el sur de la corriente de Brasil posiblemente indicando un desplazamiento hacia el sur de todo el giro subtropical oceánico, que caracteriza la circulación oceánica en estas latitudes. Este desplazamiento sería consecuencia del corrimiento hacia el sur de los vientos zonales en superficie y de un

aumento/disminución de la presión a nivel del mar en latitudes medias/bajas. El patrón de cambios observados en superficie es consistente con la fase positiva del Modo Anular del Sur (SAM), y se ha propuesto que la tendencia observada en la ocurrencia de la fase positiva del SAM es uno de los mecanismos principales que fuerza los cambios oceánicos observados (Yang et al 2016). Por otro lado, Combes y Matano (2014) proponen que el corrimiento hacia el sur de la confluencia Brasil-Malvinas se debe a un debilitamiento de la corriente de Malvinas, consecuencia de un debilitamiento de la rama norte de la corriente Circumpolar Antártica.

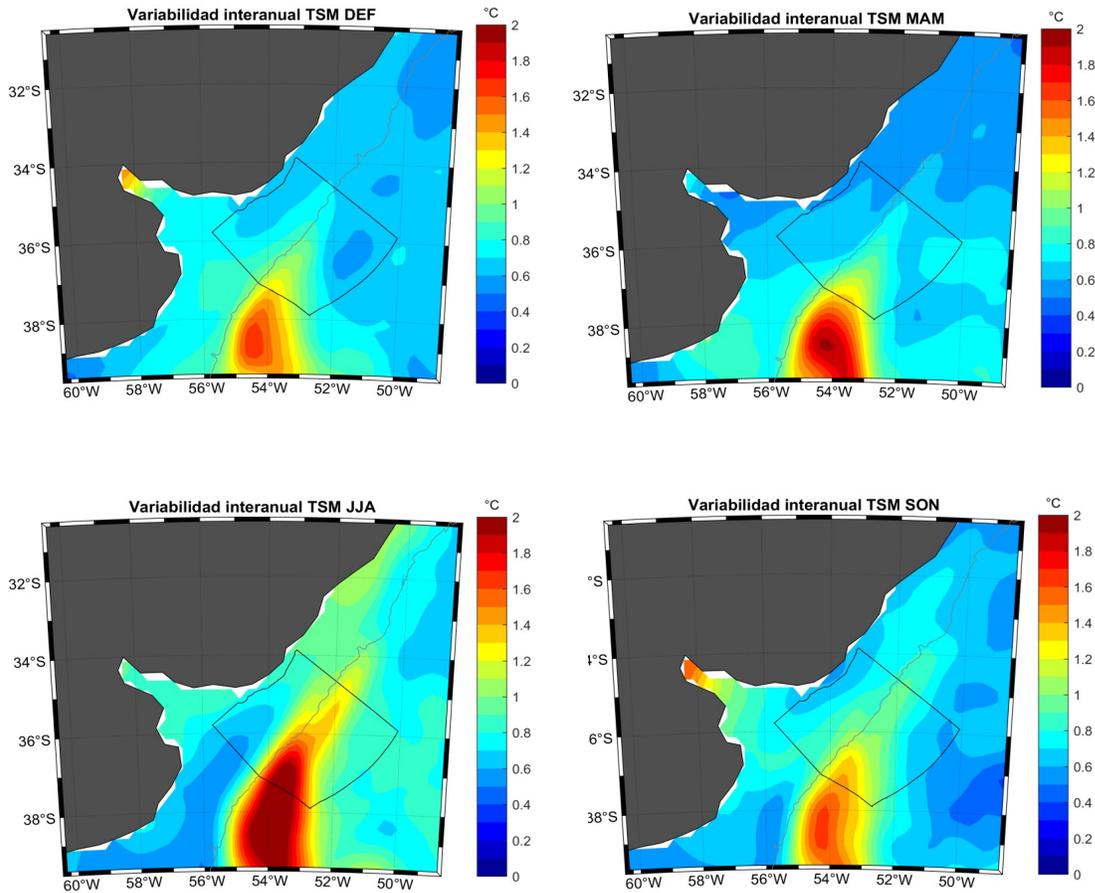


Figura 43 – Desviación estándar interanual por trimestres de la temperatura de superficie del mar. La línea negra delimita la zona económica exclusiva (ZEE).

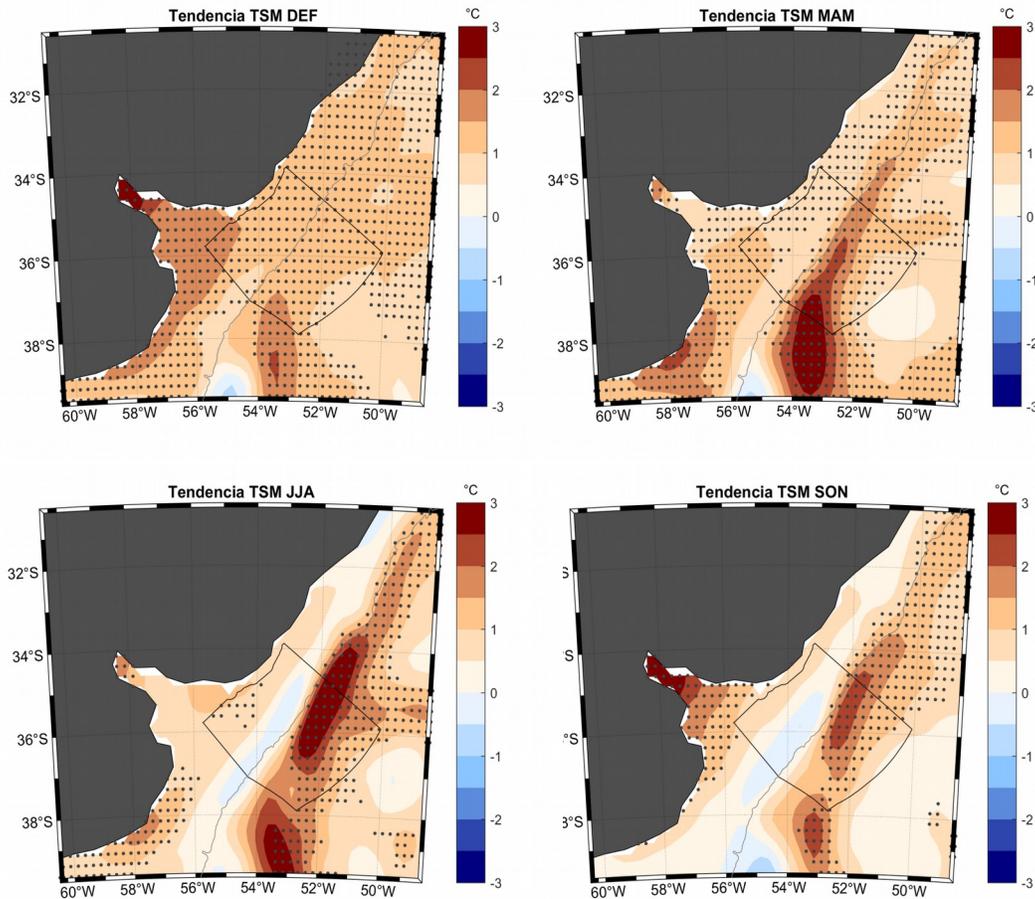


Figura 44 – Tendencia por trimestres de la temperatura de superficie del mar. La línea negra delimita la zona económica exclusiva (ZEE).

Así como es posible definir olas de calor en el continente es posible hacerlo en el océano. Trabajos recientes muestran que en acuerdo con el aumento en las temperaturas medias se detectó un aumento en el número de olas de calor marinas en nuestra región en los últimos años (Manta et al 2018).

8. Consideraciones finales

El objetivo de este trabajo fue realizar una síntesis sobre el clima medio y su variabilidad en varias escalas de tiempo en Uruguay. Para ello se describió el ciclo estacional climatológico, la variabilidad interanual con énfasis en el fenómeno de El Niño (pues es el factor dominante que

genera predictibilidad en el clima de la región) la variabilidad inter-decaderial y las tendencias observadas.

Nuestro país se encuentra en una situación geográfica muy particular en una zona de transición entre los cálidos trópicos y las frías altas latitudes. Su posición en el margen subtropical este del continente hace que su clima esté dominado por la corriente en chorro subtropical, el anticiclón semi-permanente del Atlántico y la baja presión continental. Es una de las únicas regiones del continente con lluvias todo el año de fenomenología cambiante, de naturaleza frontal en el invierno y convectiva en el verano, y además es influenciada remotamente por el estado de las aguas de los océanos tropicales a través de teleconexiones atmosféricas.

Estas características hacen que el clima de Uruguay y en particular las lluvias tengan una variabilidad muy grande año a año, década a década y en escalas aún mas largas. Por lo tanto, las condiciones climáticas deben ser un insumo fundamental a la hora de diseñar políticas para el bienestar de nuestra sociedad y el manejo sustentable de los recursos en el país.

Referencias

- Barreiro M., 2017: Interannual variability of extratropical transient wave activity and its influence on rainfall over Uruguay. *Int. J. Climatology*, doi:10.1002/joc.5082.
- Barreiro, M., N. Diaz, M. Renom, 2014: Role of the global oceans and land-atmosphere interaction on summertime interdecadal variability over northern Argentina. *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-014-2088-6.
- Barreiro, M., N. Diaz, 2011: Land-atmosphere coupling in El Niño influence over South America *Atmos. Sci. Lett.*, 12, 351-355, doi: 10.1002/asl.348.
- Barreiro, M., 2010: Influence of ENSO and the south Atlantic ocean on climate predictability over Southeastern South America. *Clim. Dyn.*, 35, 1493-1508, DOI: 10.1007/s00382-009-0666-9.
- Barreiro, M., A. Tippmann, 2008: Atlantic modulation of El Niño influence on summertime rainfall over Southeastern South America. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L16704, doi:10.1029/2008GL035019.
- Barros V. R., A.M. Grimm, M.E. Doyle, 2002: Relationship between temperature and circulation in Southeastern South America and its influence from El Niño and La Niña events. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 80 (1): 21–32.
- Chan, S. C. S. Behera, T. Yamagata, 2008: Indian ocean dipole influence on South American rainfall. *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2008GL034204.
- Chen, M., P. Xie, J. E. Janowiak, and P. A. Arkin, 2002: Global Land Precipitation: A 50-yr Monthly Analysis Based on Gauge Observations, *J. of Hydrometeorology*, 3, 249-266.

- Combes, V., R. Matano, 2014: Trends in the Brazil/Malvinas Confluence region. *Geophys. Res. Lett* 41, 24.
- Gan, M. A.; Seluchi, M. E. Parte I - Sistemas meteorológicos que afetam o tempo na ACLIMDEX América do Sul: Ciclones e ciclogênese. En: Cavalcanti, Iracema Fonseca de Albuquerque; Ferreira, Nelson Jesus; Silva, Maria Gertrudes Alvarez Justi da; Silva Dias, Maria Assunção Faus da (Ed.). Para entender tempo e clima. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 111--125. ISBN 978-85-86238-92-5. (INPE--/).
- Grimm, A. Parte II - Sistemas meteorológicos que afetam o tempo na América do Sul: Clima da região sul do Brasil. En: Cavalcanti, Iracema Fonseca de Albuquerque; Ferreira, Nelson Jesus; Silva, Maria Gertrudes Alvarez Justi da; Silva Dias, Maria Assunção Faus da (Ed.). Para entender tempo e clima. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 259-275. ISBN 978-85-86238-92-5. (INPE--/).
- Grimm, A.M. and Ambrizzi, T., 2009: Teleconnections into South America from the Tropics and Extratropics on Interannual and Intraseasonal Timescales. En: Vimeux, F., Sylvestre, F. and Khodri, M., Eds., Past Climate Variability in South America and Surrounding Regions: From the Last Glacial Maximum to the Holocene, Springer, Apeldoorn, 159-191. http://dx.doi.org/10.1007/978-90-481-2672-9_7.
- Grimm, A.M. And R. Tedeschi, 2009: ENSO and extreme rainfall events in South America. *J. Climate* 22: 1589-1609.
- IPCC Special Report Global Warming of 1.5C, 2018, <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- Manta G., S. de Mello, R. Trinchin, J. Badagian, M. Barreiro, 2018: The 2017 record marine heat wave in the southwestern Atlantic shelf. *Geophys. Res. Lett.* <https://doi.org/10.1029/2018GL081070>.
- Mantua, N.J. and S.R. Hare, Y. Zhang, J.M. Wallace, and R.C. Francis 1997: A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, pp. 1069-1079.
- Marengo J; Rusticucci M; Penalba O; Renom M
An intercomparison of model-simulated in extreme rainfall and temperature events during the last half of the XX century: Part 2: Historical trends. *Climatic Change*, v.: 98 3, p.: 509 - 529, 2010, doi: 10.1007/s10584-009-9743-7

- Martin V., M. Barreiro, 2015: Analysis of oceans' influence on spring time rainfall variability over southeastern south america during the 20th century. *Int. J. Climatology*, 36, 1344-1358. doi:10.1002/joc.4428.
- Pisciotano, G., A. Díaz, G. Cazes and C.R. Mechoso, 1994: El Nino-Southern Oscillation impact on rainfall in Uruguay. *J. Climate*, 7, 1286-1302.
- Renom M., 2009: "Temperaturas extremas en Uruguay. Análisis de la variabilidad temporal de baja frecuencia y su relacion con la circulación de gran escala" . Tesis de Doctorado, Universidad de Buenos Aires.
- Ropelewski, C. F. and Halpert, M. S., 1987: Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 115(8), 1606-1626.
- Rusticucci M; Renom M; Penalba O; Marengo J, 2010: An intercomparison of model-simulated in extreme rainfall and temperature events during the last half of the XX century: Part 1: Mean Values and variability. *Climatic Change* 98: 493 - 508, doi: 10.1007/s10584-009-9742-8
- Satyamurty, P.; Nobre C. A., Silva Dias P. L. South America. *Meteorology of the Southern Hemisphere*, v 27, n. 49, 119-139, 1998.
- Seager, R., N. Naik, W. Baethgen, A. Robertson, Y. Kushnir, J. Nakamura, S. Jurburg, 2010: Tropical oceanic causes of interannual to multidecadal variability in southeast South America over the past century, *J. Climate*, 23, 5517–5539, doi:10.1175/2010JCLI3578.1.
- Yang, H., G. Lohmann, W. Wei, M. Dima, M. Ionita, J. Liu, 2016: Intensification and poleward shift of subtropical western boundary currents in a warming climate. *J. Geophys. Res.* DOI: 10.1002/2015JC011513.
- Wang, B., 1995: Interdecadal changes in El Nino onset in the last four decades. *J. Climate*, 8, 267–285