

Predicción estacional de las lluvias en África Occidental bajo un modelo estadístico de predictores no estacionarios

Roberto Suárez⁽¹⁾, Belén Rodríguez-Fonseca^(2,3), Teresa Losada⁽⁴⁾, Elsa Mohino⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I, Geofísica y Meteorología, UCM, Av. Complutense s/n, 28040 Madrid, roberto.suarez@fis.ucm.es

⁽²⁾ Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I, Geofísica y Meteorología, UCM, Av. Complutense s/n, 28040 Madrid, brfonsec@gmail.com

⁽³⁾ Instituto de Geociencias (CSIC-UCM), facultad de CC. Físicas, Plaza de Ciencias 1, 28040 Madrid, brfonsec@gmail.com

⁽⁴⁾ Instituto de Ciencias Ambientales (ICAM), Universidad de Castilla-La Mancha, Toledo, tldoval@gmail.com

⁽⁵⁾ Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I, Geofísica y Meteorología, UCM, Av. Complutense s/n, 28040 Madrid, emohino@fis.ucm.es

1. Resumen

El estudio de los impactos derivados de la variabilidad climática tropical ha adquirido cada vez más importancia durante las últimas décadas, ya sea a escala regional o global. En este sentido, existen modelos estadísticos y dinámicos enfocados en el estudio de las anomalías estacionales de precipitación relativas al Monzón de África Occidental (MAO). Sin embargo, el estudio de la variabilidad climática es complejo y reciente, y a pesar de los grandes avances realizados por la comunidad científica, sigue siendo muy difícil poder realizar una predicción acertada del régimen de precipitaciones asociado al MAO.

En el presente estudio se desarrolla y aplica un modelo estadístico de predicción de la precipitación en África Occidental considerando el carácter de estacionariedad de los predictores. En este sentido, la temperatura superficial del mar (TSM) representa una importante fuente de predictabilidad (Mohino et al., 2011a; Skinner et al., 2012), siendo la variable en la que reside el mayor potencial de predicción cuando se habla de escalas estacionales a multidecadales. Los intentos por implementar nuevos modelos estadísticos constituyen un aporte fundamental dirigido a paliar los impactos producidos por el monzón.

Con este trabajo se pretende añadir una nueva contribución a la mejora de la predicción de las anomalías estacionales de precipitación en África Occidental mediante un modelo estadístico innovador, centrado en el análisis y caracterización de la TSM como principal factor de predictabilidad de dichas anomalías, e introduciendo el carácter de estacionariedad de los predictores como variable añadida del modelo respecto a otros trabajos anteriores en el estado del arte.

2. Introducción

El Sahel es una región geográfica que ocupa una franja situada en torno a 15°N entre la zona ecuatorial, de abundantes precipitaciones, próxima al Golfo de Guinea y la región desértica del Sáhara. El Sahel alterna cada año una estación seca, con ausencia total de precipitaciones, y una estación muy húmeda, durante los meses de junio a septiembre, relacionada con el ascenso de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Los recursos hídricos disponibles durante la larga estación seca dependen casi en su totalidad de la intensidad de las precipitaciones durante la temporada de lluvias, también conocida como Monzón de África Occidental (MAO).

La ubicación de la ZCIT varía con el ciclo estacional, alcanzando su posición más septentrional, en torno a 10°N (Mohino et al., 2011a), durante el verano boreal; y su posición más meridional, sobre 1°N, durante el mes de abril. De esta manera, el ciclo estacional de las lluvias en la región de África Occidental se caracteriza por presentar dos máximos de precipitación al sur de 8°N, uno en mayo y otro a finales de septiembre; mientras que en la región del Sahel (15°N), tiene lugar un máximo durante el mes de agosto.

El monzón es un fenómeno que se produce en latitudes tropicales, determinando el régimen de precipitaciones fuertemente estacional que reciben muchas regiones dentro de la banda tropical. La vulnerabilidad que presentan las sociedades de África Occidental ante la variabilidad climática se estima en aumento para las próximas décadas conforme va incrementándose la demanda de los recursos bajo una población en constante crecimiento. El considerable descenso de las precipitaciones durante la estación monzónica a lo

largo de las últimas décadas del siglo XX (Hulme et al., 2001; Dai et al., 2003; Held et al., 2005; Greene et al., 2009) está provocando un verdadero drama humano en una región cuya economía y subsistencia está determinada por la agricultura (Mortimore and Adams, 2001; Batterbury and Warren, 2001), y esta a su vez presenta una extrema dependencia del régimen de precipitaciones.

Existen modelos estadísticos y dinámicos que intentan predecir estas anomalías en la lluvia estacional. Sin embargo, el estudio de la variabilidad climática es complejo y reciente, y a pesar de los grandes avances realizados por la comunidad científica, sigue siendo muy difícil poder realizar una predicción acertada.

Al igual que en otros trabajos, en el caso que nos ocupa, la predicción estacional de la lluvia en el Sahel se basa en el estado previo de las anomalías en la temperatura de la superficie del mar en regiones cercanas, como el Atlántico Ecuatorial (Losada et al., 2010), pero también en zonas alejadas como el Pacífico (Mohino et al., 2011b), el Mediterráneo (Fontaine et al., 2011) y el Índico (Bader and Latif, 2003). Debido a la persistencia que muestran las anomalías de TSM, las alteraciones que se producen en los océanos son más lentas que los cambios que tienen lugar en la atmósfera. Una serie de anomalías en la temperatura superficial del mar puede generar alteraciones en la circulación atmosférica durante varios meses antes de dispersarse.

Estudios recientes han encontrado como la influencia de estos predictores fundamentales oceánicos sobre la precipitación anómala en África occidental no ha sido homogénea a lo largo del siglo XX, con décadas en las que la influencia de El Niño o el Mediterráneo era evidente y décadas en las que había una clara ausencia de señal de estas cuencas (Rodríguez-Fonseca et al., 2010).

La TSM de una determinada cuenca oceánica no contribuye de igual manera a la tendencia de las anomalías de precipitación asociadas al MAO según se atiende a un determinado período (Mohino et al., 2011b).

Esta contribución limitada a diferentes intervalos dentro de un mismo período de estudio determina el carácter de estacionariedad referido a la TSM como campo predictor de las anomalías de precipitación.

La creación de un modelo de predicción estacional del MAO que ofrezca garantías constituye el tema central de varios estudios. Algunos de estos trabajos exponen una tipología de los distintos modelos (Garric et al., 2002), distinguiendo entre modelos estadísticos y modelos de circulación general (GCM) entendidos como modelos dinámicos de

predicción numérica. Otros trabajos se centran en predicción estacional mediante modelos estadísticos (Ward, 1998; Fontaine et al., 1998, 1999; Philippon and Fontaine, 2000), mientras que algunos más están enfocados en el uso de GCMs (Giannini et al., 2003; Tippett and Giannini, 2006; Hoerling et al., 2006; Biasutti et al., 2008; Philippon et al., 2010; Ndiaye et al., 2011).

En un intento por materializar todo el conocimiento existente sobre la influencia de la variabilidad de la temperatura de la superficie del mar en el océano sobre la variabilidad de la precipitación en África Occidental, se está elaborando un modelo estadístico de predicción que, basándose principalmente en herramientas estadísticas, permita predecir de forma cualitativa pero con suficiente antelación la consecución de años anormalmente secos o húmedos en esta región.

En este estudio se presentan resultados preliminares en los que se incluye la influencia del Atlántico y Pacífico en la predicción de las lluvias anómalas en la región de África Occidental.

3. Objetivos

Mediante el presente trabajo se profundiza en el estudio de la variabilidad interanual de las lluvias que tienen lugar durante el Monzón de África Occidental mediante la creación de un modelo estadístico de predicción estacional. Este régimen fuertemente estacional de precipitaciones afecta fundamentalmente a la zona del Golfo de Guinea y más al norte a la región del Sahel, donde la variabilidad del ciclo estacional de precipitaciones ha mostrado una tendencia a la sequía durante las últimas décadas del siglo XX, lo que ha provocado un notable incremento de los estudios enfocados a la predictabilidad de este fenómeno.

Uno de los objetivos principales consiste en dotar al modelo de una estructura que permita su adaptabilidad ante diferentes bases de datos, variables y regiones de estudio, de manera que se le ha conferido un amplio abanico de posibilidades para su uso en el estudio de la variabilidad climática por parte de diferentes grupos de investigación.

En este trabajo se analiza la capacidad predictiva derivada del primer modo de covariabilidad entre los campos anómalos de TSM en las cuencas de Atlántico y Pacífico y de precipitación en África Occidental. Este análisis de la capacidad predictiva se plantea a partir de un nuevo enfoque que se centra en la consideración del carácter de estacionariedad referido a las anomalías de TSM como campo predictor.

Partiendo de las consideraciones anteriores pueden introducirse una serie de objetivos planteados durante la consecución del presente trabajo:

- Estudio del régimen de precipitaciones asociado al MAO en las regiones del Sahel y Golfo de Guinea.
- Planteamiento y desarrollo del método de covarianza máxima MCA para su posterior aplicación sobre las anomalías de los campos propuestos.
- Estructuración de la metodología planteada en un algoritmo matemático como núcleo principal del modelo estadístico.
- Exposición de los resultados derivados del modelo caracterizando los modos principales de covariabilidad empleados en el estudio de predictabilidad del MAO en las regiones de Sahel y Golfo de Guinea para los casos estacionario y no-estacionario introducidos por las anomalías de TSM propios de las diferentes cuencas oceánicas tratadas como predictores.
- Validación de resultados por medio de un análisis de correlación entre las observaciones y las simulaciones generadas por el modelo.

4. Metodología y datos

Para precipitación se ha recurrido a la base de datos GPCC (del inglés Global Precipitation Climatology Center, Rudolf et al., 2010; Rudolf and Schneider, 2005) en promedio mensual en superficie para el período 1901 – 2007 con una resolución espacial $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ resultando una malla global de dimensiones 360×180 para el dominio $90^{\circ}N - 90^{\circ}S$, $0^{\circ}E - 360^{\circ}E$. Estos datos se han obtenido desde la base de datos original a través del enlace <http://gpcc.dwd.de/>.

La TSM corresponde a la base de datos ERSST-V3b (Extended Reconstructed Sea Surface Temperature V3b, Smith and Reynolds, 2003, 2004; Smith et al., 2008). Contiene datos de TSM para el período 1854 – 2010, con una resolución espacial de $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ y promedio mensual. Los datos se han construido a partir de valores de TSM recogidos en ICOADS (International Comprehensive Ocean – Atmosphere Data Set). Pueden obtenerse a través de la dirección web <http://www.ncdc.noaa.gov/ersst/> y en <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>.

Uno de los métodos estadísticos empleados con frecuencia es el denominado Análisis de Covarianza Máxima (MCA). Este método de análisis es similar al análisis de funciones empíricas ortogonales (EOF), de manera que ambos se centran en el análisis de la matriz de covarianza. La diferencia se encuentra en que el análisis EOF se basa en una matriz de covarianza derivada de un mismo campo espacio-temporal, mientras que en MCA se realiza la descomposición de una matriz de covarianza “cruzada” derivada de dos campos distintos.

En el cálculo de la matriz de covarianza “cruzada”, los campos utilizados no precisan presentar el mismo número de puntos en la dimensión espacial, mientras que la dimensión temporal debe ser la misma. La matriz de covarianza resultante no es necesariamente cuadrada, de esta manera resulta apropiado el uso del método de Descomposición en Valores Singulares (SVD). Algunos autores exponen el método SVD indistintamente para referirse a MCA (Björnsson and Venegas, 1997).

El análisis SVD responde al nombre de una operación matemática del álgebra matricial para matrices no cuadradas que puede encontrarse en todos los textos de álgebra (Green, 1976). En el contexto de la climatología esta descomposición se realiza sobre la matriz de covarianza obtenida mediante datos correspondientes a observaciones (Bretherthon et al., 1992; Wallace et al., 1992; Cherry, 1996), por lo que, al tratarse de una aplicación concreta de la técnica general de descomposición matricial, el nombre correcto en climatología debería ser Descomposición en Valores Singulares de la Matriz de Covarianza (SVDCOV) o, como lo denomina Muller (1982) Canonical Covariance Analysis, ya que el objetivo es aislar aquellas combinaciones lineales (modos canónicos) de dos campos A y B que presenten covarianza máxima entre ellos.

En el caso que nos ocupa, el método descrito se aplica atendiendo a la relación existente entre la SST de las diferentes cuencas oceánicas y la precipitación en la región del Golfo de Guinea y el Sahel.

La utilización de técnicas de correlación móvil permite estudiar el carácter de estacionariedad que presentan las relaciones entre las series temporales de los campos anómalos de TSM y precipitación. A partir de estos resultados se pueden determinar los períodos en los cuales la temperatura superficial del mar presenta una mayor influencia en la variabilidad de la precipitación durante la estación monzónica en África Occidental.

Se habla de carácter estacionario cuando se considera la influencia de la TSM como campo predictor a lo largo de todo el período de estudio;

mientras que se considera relación con carácter no estacionario cuando se toman los intervalos para los cuales la influencia es significativa según correlaciones móviles dentro del período de estudio completo. De esta manera es posible estudiar las posibles ventajas derivadas del uso del campo anómalo de TSM teniendo en cuenta su carácter no estacionario.

Partiendo de trabajos recientes (Losada et al., 2012), se ha recurrido a correlaciones en ventanas móviles de veinte años con el fin de establecer las relaciones de estacionariedad entre las anomalías de TSM de las cuencas oceánicas de Atlántico y Pacífico entendidas como predictores y la precipitación anómala en las regiones de estudio de África Occidental: Sahel y Golfo de Guinea. Con este objetivo se ha definido el dominio espacial que limita cada cuenca oceánica como predictor, de manera que los campos de TSM anómala quedan acotados de la siguiente manera:

- Atlántico (60°S – 10°N, 60°W – 20°E)
- Pacífico (30°S – 20°N, 120°E – 60°W)

Considerando las regiones de estudio, los campos anómalos de precipitación se han restringido a las regiones del Sahel y Golfo de Guinea como sigue:

- Sahel (10.5°N – 18.5°N, 19.5°W – 10.5°E)
- GG (0.5°N – 8.5°N, 19.5°W – 10.5°E)

La precipitación anómala queda restringida a los meses de julio a septiembre (JAS), correspondientes a la estación monzónica en África Occidental, mientras que las anomalías de TSM se seleccionan en primer lugar para la temporada AMJ (abril-junio) para después asignar los desfases o retrasos temporales mensuales dependiendo de la significación de la correlación en ventanas móviles. De este modo, el conjunto de desfases queda definido como se especifica a continuación:

- Precipitación en desfase 0 (JAS)
- TSM en desfase 3 (AMJ), desfase 4 (MAM), desfase 5 (FMA)

5. Resultados

5.1. Primer modo de variabilidad. Estudio de estacionariedad.

En el presente estudio se ha seleccionado el primer modo o modo principal de covariabilidad (n=1), que en cada caso explica el mayor porcentaje de varianza temporal de la serie.

En este trabajo se ha realizado una caracterización del modo principal de covariabilidad relativo a la predictabilidad de la precipitación anómala asociada al MAO para los casos estacionario y no estacionario considerando TSM de las cuencas de Atlántico y Pacífico.

5.1.1. Atlántico

En primer lugar se consideran los campos anómalos de TSM y precipitación para Atlántico y Sahel. En la figura 1 se presentan los coeficientes de expansión de TSM (línea azul) y precipitación (línea roja).

El modo principal considerando el caso estacionario (Figura 1) explica un 32% de covariabilidad. La correlación significativa entre el coeficiente de expansión de la TSM y la precipitación definida como promedio para la estación JAS en el Sahel (Figura 2), delimita el período temporal de influencia que marca la serie temporal de los coeficientes de expansión para el caso no estacionario (Figura 3).

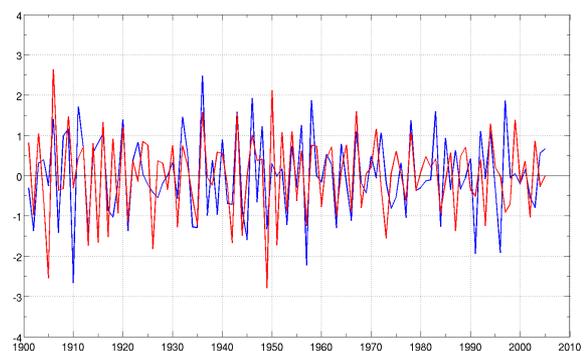


Fig. 1. Serie temporal estandarizada de los coeficientes de expansión para precipitación (línea roja) y TSM (línea azul) correspondientes al modo principal de covariabilidad para el análisis MCA entre TSM(Atl) - pcp(Sahel) para todo el período 1901 - 2007. Número de modos (n=1). Varianza explicada por el primer modo (32%).

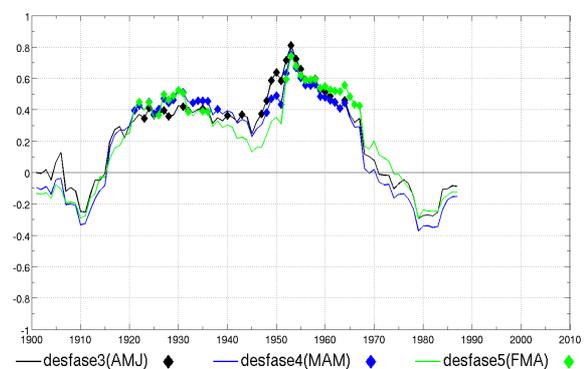


Fig. 2. Correlación móvil en ventanas de 20 años entre la serie temporal del coeficiente de expansión U para la TSM y la precipitación en Sahel. El coeficiente de expansión corresponde al modo principal de variabilidad procedente del análisis MCA para TSM(Atl) - pcp(Sahel). Cada color corresponde a un desfase o retraso temporal.

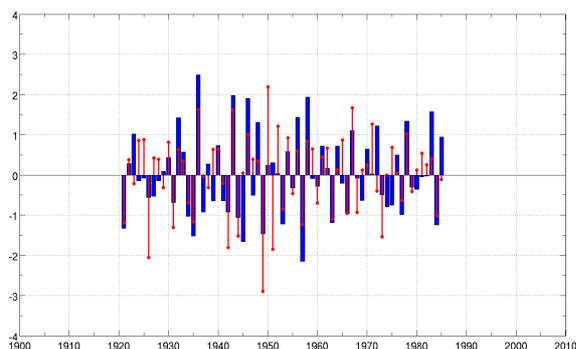


Fig. 3. Serie temporal estandarizada de los coeficientes de expansión para precipitación (línea roja) y TSM (línea azul) correspondientes al modo principal de covariabilidad para el análisis MCA entre TSM(atl) - pcp(Sahel) durante el período determinado como no estacionario por correlación

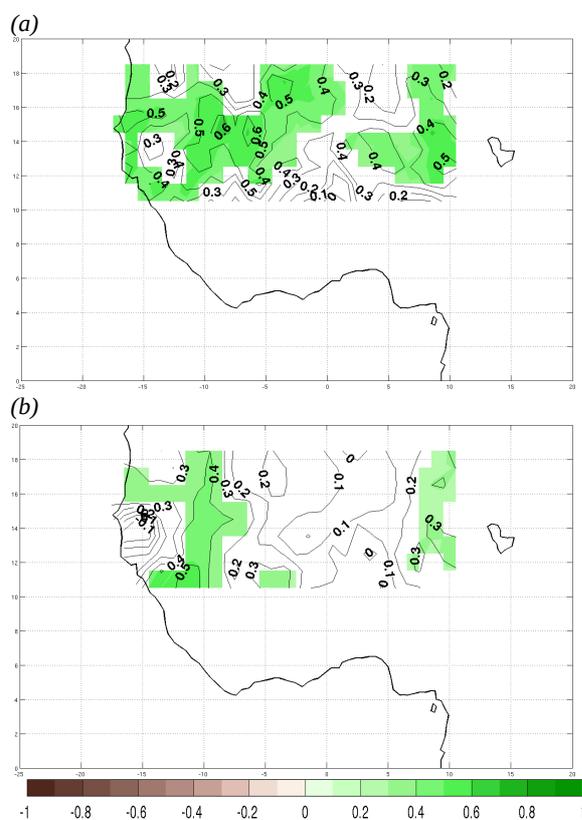


Fig. 4. Mapas de regresión (contornos) y correlación (sombreado) entre el modo principal de covariabilidad MCA entre TSM(Atl) - pcp(Sahel) y la pcp en desfase 0 (JAS) para (a) caso no-estacionario y (b) caso estacionario. Los contornos indican anomalías de precipitación (en desviaciones estándar) asociadas a cambios de 1std en el coeficiente de expansión de la TSM del primer modo MCA. La correlación se representa para valores significativos >99% bajo un test-t.

El primer modo de covariabilidad para el caso no-estacionario entre la lluvia en el Sahel y las variaciones de TSM en el Atlántico tropical durante las estaciones previas (AMJ - MAM - FMA) explica un 33% de covariabilidad entre los dos campos. Este modo relaciona anomalías negativas en la TSM del Atlántico con anomalías positivas para la

precipitación en algunas regiones del este y de la mitad oeste del Sahel (Figura 4) y viceversa.

En el caso concreto del modo principal de covariabilidad entre las anomalías de TSM en el Atlántico y la precipitación anómala en la región del Sahel, los resultados muestran la ventaja en la utilización del predictor con carácter no-estacionario (Figura 4a) respecto al caso estacionario (Figura 4b), presentando una mayor significación estadística extendida a un número más elevado de regiones a lo largo del territorio del Sahel, principalmente su área central (Figura 4).

En el siguiente caso se ha considerado el modo principal de covariabilidad entre los campos anómalos de temperatura de la superficie del mar en el Atlántico y de precipitación en la región del Golfo de Guinea. La Figura 5 muestra los coeficientes de expansión de los campos de TSM (línea azul) y precipitación (línea roja). La correlación móvil entre el coeficiente de expansión de la TSM en el Atlántico y el promedio de precipitación para la estación lluviosa (JAS) en la región del Golfo de Guinea es significativa para todo el período de estudio (Figura 6), determinando el carácter estacionario en la relación entre los campos anómalos de TSM y de precipitación en dichas regiones, como se establece en el trabajo de Losada et al (2012), sin la posibilidad de caso no-estacionario. Para el caso del modo principal de covariabilidad entre los campos anómalos de TSM en el Atlántico y precipitación en la región del Golfo de Guinea, los resultados son significativos en la parte central de dicha región (Figura 7), lo que determina la predictabilidad del modelo restringida a un único modo.

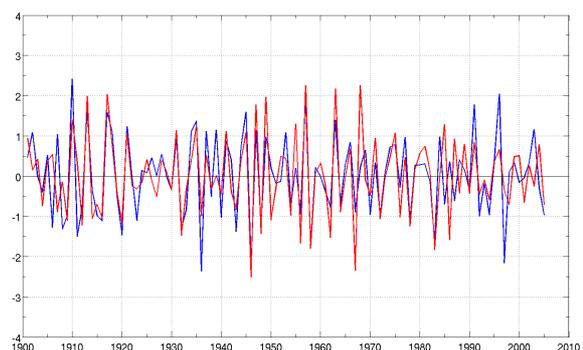


Fig. 5. Serie temporal estandarizada de los coeficientes de expansión para precipitación (línea roja) y TSM (línea azul) correspondientes al modo principal de covariabilidad para el análisis MCA entre TSM(Atl) - pcp(GG) para todo el período 1901 - 2007. Número de modos (n=1). Varianza explicada por el primer modo (30%).

En este caso, el primer modo explica un 30% de covariabilidad entre ambos campos y relaciona anomalías negativas de TSM con anomalías negativas de la precipitación en la región centro-este del Golfo de Guinea (Figura 7). El caso contrario

corresponde a un aumento de las precipitaciones sobre la región del Golfo de Guinea como resultado de un calentamiento anómalo de la TSM en la cuenca atlántica.

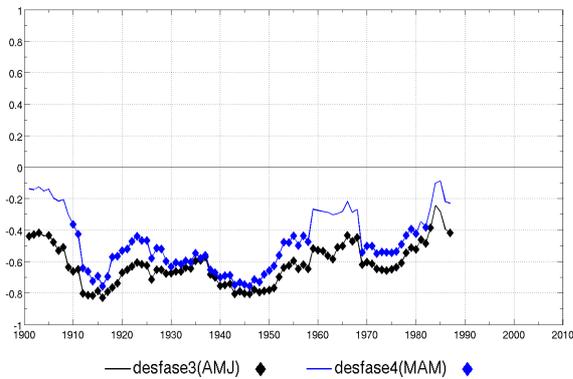


Fig. 6. Correlación móvil en ventanas de 20 años entre la serie temporal del coeficiente de expansión U para la TSM y el índice de la precipitación en GG. El coeficiente de expansión corresponde al modo principal de variabilidad procedente del análisis MCA para TSM(Atl) – pcp(GG). Cada color corresponde a un desfase o retraso temporal.

Los resultados obtenidos para el modo principal de covariabilidad entre la temperatura superficial del mar correspondiente a la cuenca atlántica y la precipitación anómala en África Occidental, son acordes a los encontrados en otros trabajos. En este sentido, se observa el dipolo en las anomalías de precipitación entre el Sahel y el Golfo de Guinea para el período 1920 – 1970 (Rodríguez-Fonseca et al., 2010; Mohino et al 2011b; Losada et al., 2012), con un enfriamiento de las aguas superficiales en el Atlántico asociado a un aumento de la precipitación en el Sahel y un descenso en la región del Golfo de Guinea.

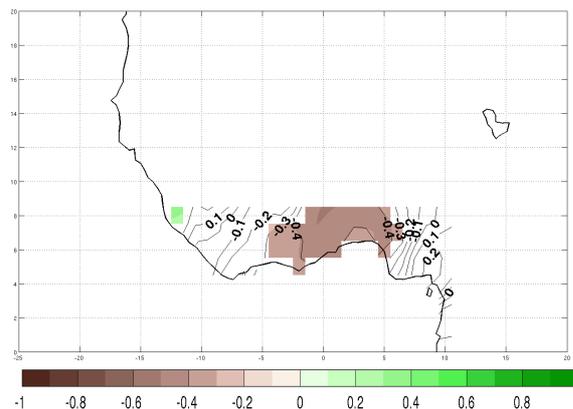


Fig. 7. Mapas de regresión (contornos) y correlación (colores) correspondientes al modo principal de covariabilidad MCA entre TSM(Atl) - pcp(GG) para pcp en desfase 0 (JAS). Los valores en los contornos indican anomalías de precipitación (en desviaciones estándar, ya que la precipitación se estandariza) asociados a cambios de 1std en el coeficiente de expansión de la SST del primer modo MCA. La correlación se representa para valores significativos >99% bajo un test-t.

5.1.2. Pacífico

La anomalías de TSM en el Océano Pacífico constituyen una importante fuente de predictabilidad de la precipitación anómala a escala global. El modo principal de covariabilidad entre el campo anómalo de TSM en el Pacífico y el campo anómalo de precipitación en el Sahel considerando todo el período de estudio (caso estacionario), explica un 32% de covariabilidad. Los coeficientes de expansión derivados de este modo se presentan en la Figura 8.

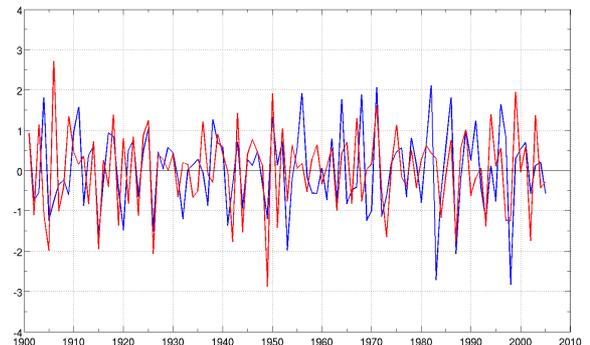


Fig. 8. Serie temporal estandarizada de los coeficientes de expansión para precipitación (línea roja) y TSM (línea azul) correspondientes al modo principal de covariabilidad para el análisis MCA entre TSM(Pac) – pcp(Sahel) para todo el período 1901 – 2007. Número de modos (n=1). Varianza explicada por el primer modo (32%).

Aplicando el filtro de no-estacionariedad derivado de la correlación móvil entre el coeficiente de expansión U para la TSM y el promedio de precipitación para la estación monzónica (JAS) en el Sahel (Figura 9), se establece la serie temporal para los coeficientes de expansión correspondientes al caso no-estacionario (Figura 10), cuyo modo principal explica un 33% de covariabilidad.

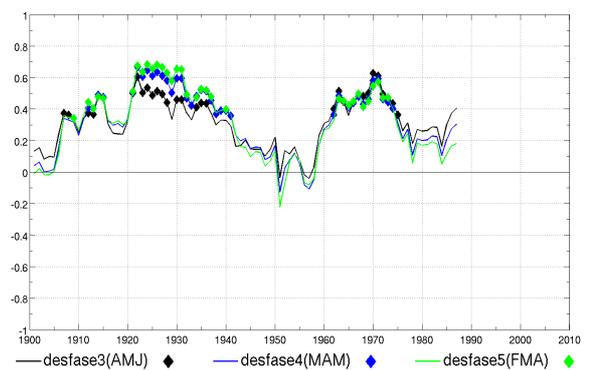


Fig. 9. Correlación móvil en ventanas de 20 años entre la serie temporal del coeficiente de expansión U para la TSM y la precipitación en el Sahel. El coeficiente de expansión corresponde al modo principal de variabilidad procedente del análisis MCA para TSM(Pac) – pcp(Sahel). Cada color corresponde a un desfase o retraso temporal.

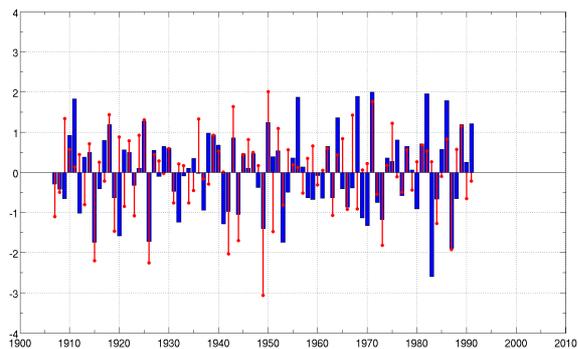


Fig. 10. Serie temporal estandarizada de los coeficientes de expansión para precipitación (línea roja) y TSM (línea azul) correspondientes al modo principal de covariabilidad TSM(Pac) - pcp(Sahel). Número de modos ($n=1$). Varianza explicada por el primer modo (33%).

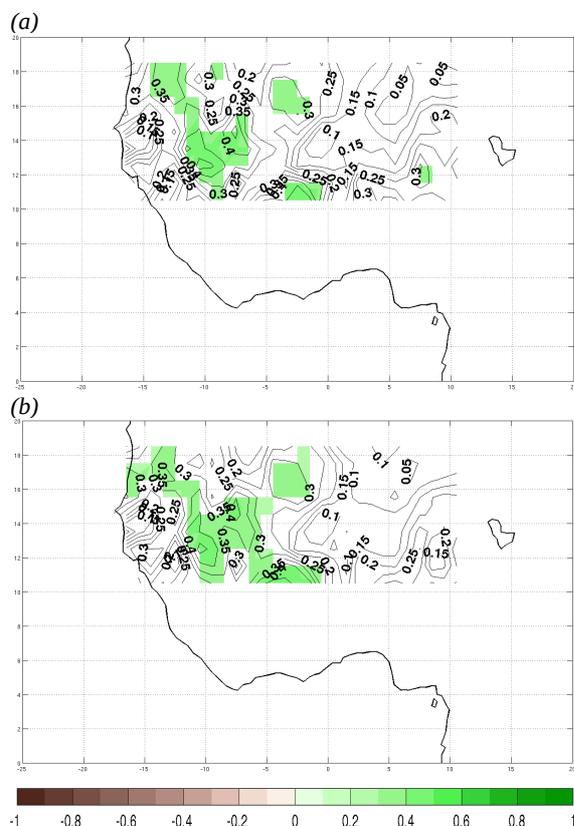


Fig. 11. Mapas de regresión (contornos) y correlación (colores) correspondientes al modo principal de covariabilidad MCA entre TSM(Pac) - pcp(Sahel) para pcp en desfase 0 (JAS) para (a) caso no-estacionario y (b) caso estacionario. Los contornos indican anomalías de precipitación (en desviaciones estándar) asociadas a cambios de 1std en el coeficiente de expansión de la TSM del primer modo MCA. La correlación se representa para valores significativos >99% bajo un test-t.

El modo principal de covariabilidad para los casos estacionario y no-estacionario muestra una estructura espacial definida por un patrón de anomalías negativas de la TSM asociado a un patrón de signo contrario para el campo anómalo de precipitación (Figura 11). De esta manera, un

enfriamiento de la temperatura superficial del Pacífico ecuatorial está asociado a un aumento de las precipitaciones en la región del Sahel, mientras que un descenso en las lluvias está ligado al calentamiento anómalo de la TSM en el Pacífico ecuatorial. Rowell et al. (2001) proponen un mecanismo de teleconexión ecuatorial como aspecto clave en el estudio de la predicción estacional en las regiones tropicales. En este sentido, plantean el estudio de las anomalías de la temperatura superficial del Pacífico como un factor influyente en las fluctuaciones sobre la región del Sahel. En concreto, presentan las anomalías de TSM asociadas a la ocurrencia de episodios ENSO en las regiones central y este del Pacífico como causa de un aumento de la probabilidad de sequía en el Sahel a través de mecanismos de teleconexión atmosférica directa.

La temperatura superficial del Pacífico tropical también presenta influencia en la precipitación ligada a la región del Golfo de Guinea. El modo principal de covariabilidad entre los campos anómalos de TSM en el Pacífico y precipitación en la región del Golfo de Guinea para el caso estacionario (Figura 12) explica un 26% de la variabilidad temporal, mientras que en el caso no-estacionario (Figura 14), determinado mediante correlación móvil (Figura 13), el primer modo explica un 30% de variabilidad. Tanto para Sahel como para el Golfo de Guinea se observa un período de influencia significativa hacia finales de 1970 y principios de 1980. Esta influencia difiere en el caso de la primera mitad del siglo XX, cuando la correlación es significativa durante los primeros años para el Golfo de Guinea apareciendo más tarde en el caso del Sahel (Figura 9).

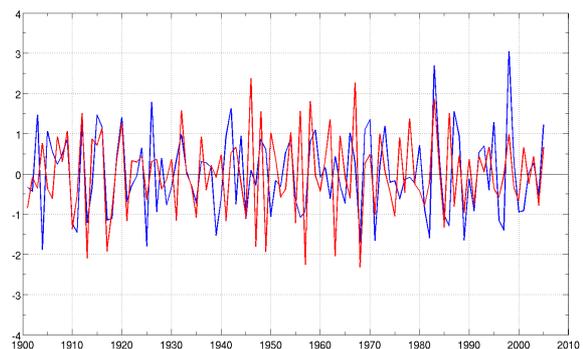


Fig. 12. Serie temporal estandarizada de los coeficientes de expansión para precipitación (línea roja) y TSM (línea azul) correspondientes al modo principal de covariabilidad para el análisis MCA entre TSM(Pac) - pcp(GG) para todo el período 1901 - 2007. Número de modos ($n=1$). Varianza explicada por el primer modo (26%).

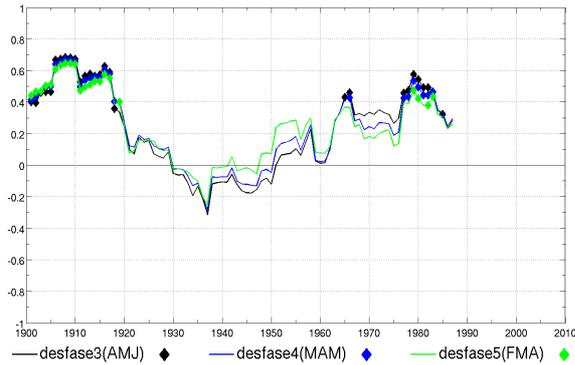


Fig. 13. Correlación móvil en ventanas de 20 años entre la serie temporal del coeficiente de expansión U para la TSM y el índice de la precipitación en GG. El coeficiente de expansión corresponde al modo principal de variabilidad procedente del análisis MCA para TSM(Pac) – pcp(GG). Cada color corresponde a un desfase o retraso temporal.

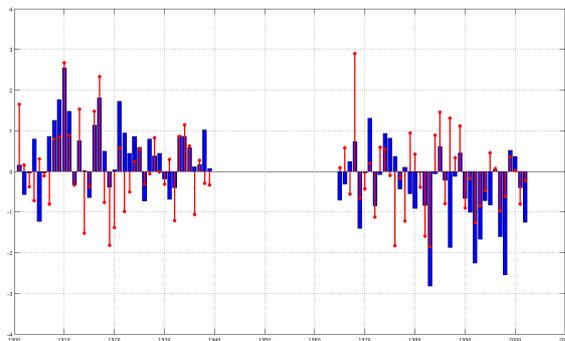


Fig. 14. Serie temporal estandarizada de los coeficientes de expansión para precipitación (línea roja) y TSM (línea azul) correspondientes al modo principal de covariabilidad TSM(Pac) – pcp(GG). Número de modos (n=1). Varianza explicada por el primer modo (30%).

La influencia del Pacífico en la precipitación asociada al MAO está marcada por anomalías del mismo signo en la precipitación de Sahel y Golfo de Guinea determinadas por anomalías de signo contrario en la TSM de centro y este del Pacífico. De esta manera, anomalías negativas en la temperatura superficial del Pacífico ecuatorial están asociadas a un patrón de signo contrario en el campo anómalo de precipitación referido a la región del Golfo de Guinea (Figura 15).

En su trabajo, Joly y Voldoire (2009) plantean que una parte importante de la variabilidad interanual del MAO puede ser explicada por la influencia del ENSO. En este sentido, exponen una mayor influencia de la TSM anómala en el Pacífico o bien durante la fase de desarrollo del ENSO, o durante el decaimiento de largos episodios de Niña.

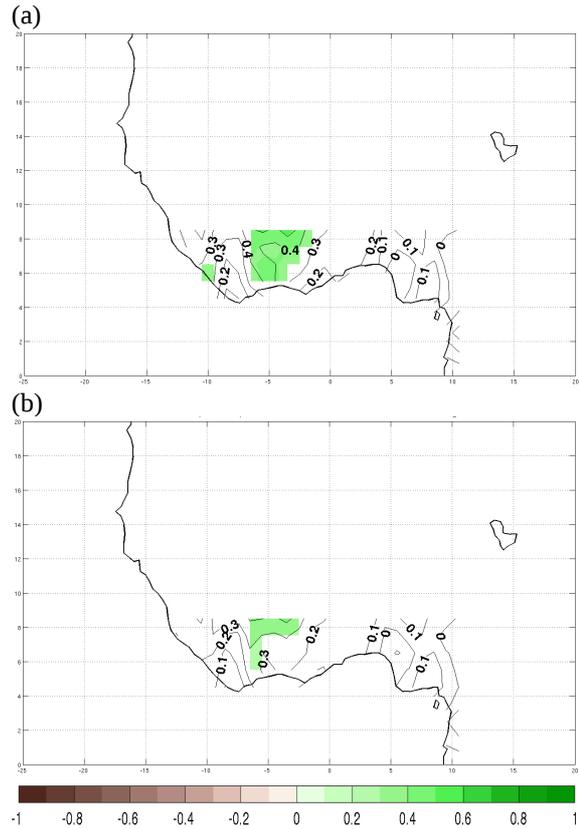


Fig. 15. Mapas de regresión (contornos) y correlación (colores) correspondientes al modo principal de covariabilidad MCA entre TSM(Pac) - pcp(GG) para pcp en desfase 0 (JAS) para (a) caso no-estacionario y (b) caso estacionario. Los contornos indican anomalías de precipitación (en desviaciones estándar) asociadas a cambios de 1std en el coeficiente de expansión de la TSM del primer modo MCA. La correlación se representa para valores significativos >99% bajo un test-t.

El modo principal de covariabilidad de los campos anómalos de TSM en el Pacífico y precipitación en el Golfo de Guinea muestra la bondad del modelo en la consideración del caso no-estacionario frente al estacionario para las anomalías de precipitación (Figura 15).

6. Conclusiones y trabajo futuro

1. El uso de un sistema de predictores no-estacionarios se plantea como un importante avance en la mejora de los modelos estadísticos de predicción estacional y como un complemento a los modelos de circulación general atmosférica.
2. Pueden introducirse mejoras en la calidad del modelo mediante la consideración de conceptos como la división del área de estudio en subregiones: Sahel este, Sahelcentral, etc.
3. El aumento en el número de modos de covariabilidad puede conducir a una

notable mejora de los resultados, si bien es necesario la aplicación de la correlación móvil entre índices con el fin de establecer los periodos de influencia de los modos secundarios.

4. Actualmente se está trabajando en la creación de un modelo estadístico basado en los mismos principios que el modelo expuesto en este trabajo, pero que aúne las contribuciones de cada cuenca en una sola matriz de datos, simplificando así el número de operaciones relacionadas con el método estadístico y aumentando al mismo tiempo la calidad de los resultados.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación proporcionada por los proyectos CGL2009-10285 y V.R. 101/11: CREACIÓN Y DONACIÓN DE UN MODELO ESTADÍSTICO DE PREDICCIÓN DE LLUVIAS EN EL SAHEL.

Referencias

- Bader J. and M. Latif (2003): The impact of decadal-scale Indian Ocean sea surface temperature on Sahelian rainfall and the North Atlantic Oscillation, *Geophys. Res. Lett.*, 30, doi:10.1029/2003GL018426, 200
- Batterbury S. and A. Warren (2001): The African Sahel 25 years after the great drought: assessing progress and moving towards new agendas and approaches, *Global Environment Change*, 11, 1-8
- Biasutti M., Held I. M., Sobel A. H. and Giannini A. (2008): SST Forcings and Sahel Rainfall Variability in Simulations of the Twentieth and Twenty-First Centuries, *J Climate*, 21, 3471-3486
- Dai A., Lamb P.J., Trenberth K.E., Hulme M., Jones P.D., Xie P. (2003): The recent Sahel drought is real, *Int. J. Climatol.* 24: 1323-1331, doi: 10.1002/joc.1083
- Fontaine B., S. Trzaska and S. Janicot (1998) Evolution of the relationship between near global Atlantic SST modes and the rainy season in West Africa: Statistical analyses and sensitivity experiments, *Clim. Dyn.*, 14:353-368, 1998
- Fontaine B., N. Philippon and P. Camberlin (1999): An improvement of June-September rainfall forecasting in the Sahel based upon region April-May moist static energy content (1968-1997), *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2041-2044
- Fontaine, B., P.-A. Monerie, M. Gaetani, and P. Roucou (2011). Climate adjustments over the African-Indian monsoon regions accompanying Mediterranean Sea thermal variability, *J. Geophys. Res.*, 116, D23122, doi:10.1029/2011JD016273
- Garric G., H. Douville and M. Déqué (2002): Prospects for Improved Seasonal Predictions of Monsoon precipitation over the Sahel, *Int. J. Clim.*, 22, 331-345
- Giannini A., R. Saravanan and P. Chang (2003): Oceanic Forcing of Sahel Rainfall on Interannual to Interdecadal Time Scales, *Science*, 302, 1027-1030
- Greene A.M., Giannini A. and Zebiak S.E. (2009): Drought return times in the Sahel: A question of attribution, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L12701, doi:10.1029/2009GL038868
- Held I.M., T.L. Delworth, J. Lu, K.L. Findell and T.T. Knutson (2005): Simulation of Sahel Drought in the 20th and 21st centuries, *PNAS*, 102, 50, 17891-17896
- Hoerling M., Hurrell J.W., Eischeid J., Phillips A.S. (2006): Detection and attribution of twentieth-century Northern and Southern African rainfall change, *J. Clim.*, 19, 3989-4008
- Hulme M. (2001): Climatic perspectives on Sahelian desiccation: 1973-1998, *Global Environmental Change*, 11, 19-29
- Joly, M., and A. Voltaire (2009): Influence of ENSO on the West African Monsoon (WAM): Temporal aspects and atmospheric processes, *J. Clim.*, 22, 3193-3210, doi:10.1175/2008JCLI2450.1
- Losada T., Rodríguez-Fonseca B., Janicot S., Gervois S., Chauvin F., Ruti P. (2010): A multimodel approach to the Atlantic equatorial mode. Impact on the West African monsoon, *Clim. Dyn.*, 35, 29-43
- Losada, T., B. Rodríguez-Fonseca, E. Mohino, J. Bader, S. Janicot, and C. R. Mechoso (2012) Tropical SST and Sahel rainfall: A non-stationary relationship, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2012GL052423, in press
- Mohino E., B. Rodríguez-Fonseca, T. Losada, S. Gervois, S. Janicot, J. Bader, P. Ruti and F. Chauvin (2011a) Changes in the interannual SST-forced signals on West African rainfall. AGCM intercomparison. *Clim. Dyn.* doi:10.1007/s00382-011-1093-2
- Mohino E., Janicot S., Bader J. (2011b): Sahel rainfall and decadal to multi-decadal sea surface temperature variability, *Clim. Dyn.*, 37, 419-440, doi 10.1007/s00382-010-0867-2
- Mortimore M.J., W. M. Adams (2001): Farmer adaptation, change and 'crisis' in the Sahel, *Global Environmental Change*, 11, 49-57
- Ndiaye O., Ward M.N., Thiaw W.N. (2011): Predictability of Seasonal Sahel Rainfall Using GCMs and Lead-Time Improvements Through the Use of a Coupled Model, *J. Climate*, 24, 1931-1949, doi: 10.1175/2010JCLI3557.1
- Philippon N. and B. Fontaine (2000): Un nouveau schéma de prévision statistique des précipitations sahéliennes de juillet-septembre (1968-1994). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences.*

- Series 2a, Sciences de la Terre et des Planetes., 329, 1-6
- Philippon N., Doblas-Reyes F.J., Ruti P.M. (2010): Skill, reproducibility and potential predictability of the West African monsoon in coupled GCMs. *Clim. Dyn.* 35: 53–74. doi: 10.1007/s00382-010-0856-5
- Rodríguez-Fonseca B., S. Janicot, E. Mohino, T. Losada, J. Bader, C. Caminade, F. Chauvin, B. Fontaine, J. Garcia-Serrano, S. Gervois, M. Joly, I. Polo, P. Ruti, P. Roucou, A. Voldoire. (2010) : Interannual and decadal SST forced responses of the West African monsoon. *Atmos. Sci. Lett.*,12,Issue 1,67-74, doi: 10.1002/ASL.308
- Rowell D. P. (2001): Teleconnections between the tropical Pacific and the Sahel, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 127,1683-1706
- Skinner C.B., Ashfaq M., Diffenbaugh N.S. (2012): Influence of Twenty-First-Century Atmospheric and Sea Surface Temperature Forcing on West African Climate, *J. Climate*, 25, 527-542, doi: 10.1175/2011JCLI4183.1
- Tippett M. K., and A. Giannini (2006): Potentially predictable components of African summer rainfall in a SST-forced GCM simulation, *J. Clim.*, 19,3133-3144
- Ward M.N. (1998): Diagnosis and Short-Lead Time Predictio of Summer Rainfall in Tropical North Africa at Interannual and Multidecadal Timescales, *J.Climate*,11,3167-3191