



**CONAMA10**  
CONGRESO NACIONAL  
DEL MEDIO AMBIENTE

COMUNICACIÓN TÉCNICA

## **Análisis de impactos del cambio climático en sequías monzónicas en la Cuenca del Río Senegal (Africa Occidental)**

Autor: Juan Diego Giraldo Osorio

Institución: Universidad Politécnica de Cartagena, Grupo de I+D Gestión de  
Recursos Hídricos

e-mail: [juan.giraldo@upct.es](mailto:juan.giraldo@upct.es)

Otros Autores: Sandra G. García Galiano (Universidad Politécnica de Cartagena,  
Grupo de I+D Gestión de Recursos Hídricos)

## RESUMEN

La Cuenca del río Senegal, en el África Occidental, se ha visto afectada por severos periodos secos desde 1970. La actividad agrícola que se desarrolla en su valle es el soporte de una región densamente poblada, muy vulnerable a la variabilidad climática y a la disponibilidad hídrica. Debido a esto, es de gran importancia aumentar el conocimiento acerca de las tendencias de los eventos de sequía, para mejorar las medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático. Este trabajo presenta una novedosa metodología de análisis no estacionario, que permite el pronóstico regional de las tendencias de la longitud de rachas secas asociadas a distintos períodos de retorno. Este carácter no estacionario que, en general, presentan las series hidrometeorológicas, es la principal crítica que reciben los análisis de frecuencia tradicionales, incapaces de pronosticar tendencias en las series asociadas al cambio climático y actuaciones antrópicas. Este trabajo justifica el tratamiento no estacionario debido a que, de manera particular, las series anuales de máxima longitud de rachas secas (AMLRS) monzónicas para la cuenca del río Senegal, obtenidas desde los Modelos Climáticos Regionales (RCMs) provistos por el proyecto Europeo ENSEMBLES, presentan cambios temporales evidentes en la media y la varianza. La herramienta estadística GAMLSS (Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape), es aplicada para el ajuste de funciones de densidad probabilidad (pdf) regionales a las AMLRS monzónicas en la Cuenca del Río Senegal. Inicialmente, se evalúa la habilidad de los RCMs para representar la distribución de la longitud de las rachas secas observadas en el período 1970-1990. Estos resultados permiten una primera selección de los RCMs para la aplicación del análisis GAMLSS a las series de AMLSR, para el periodo temporal 1970-2050. Se detectaron diferencias de escala y signo en las predicciones presentadas por los distintos modelos. Por lo tanto, en una segunda etapa del trabajo, se ha refinado la selección de los RCMs para la construcción de pdf regionales aplicando técnicas de bootstrapping en base a las distribuciones de los modelos probabilísticos ajustados con GAMLSS. Se concluye que, en general, se predice un aumento de la media y la varianza de las pdf de las AMLSR a escala regional, lo que supondrá un aumento de las longitudes de las rachas asociadas con diferentes probabilidades de excedencia.

**Palabras Clave:** cambio climático, sequías, Africa Occidental, análisis no estacionario, Modelos Climáticos Regionales

## 1 Introducción

Las actividades humanas, el desarrollo social y económico, las políticas públicas y la variabilidad climática debido al calentamiento global compiten con el desarrollo sostenible, ejerciendo presiones cada vez mayores sobre los recursos hídricos (WWWR3, 2009). Existe evidencia experimental que relaciona el calentamiento global con la intensificación del ciclo hidrológico, lo que apoya los argumentos teóricos y las predicciones de los GCMs y RCMs (Modelos Climáticos Globales y Regionales, respectivamente), los cuales están pronosticando tendencias crecientes de la temperatura, lo que implica un incremento de la tasa de evapotranspiración potencial y, en consecuencia, de la tasa de precipitación. El aumento de estas tasas llevará teóricamente a una intensificación del ciclo hidrológico, convirtiéndose en una amenaza real para la población, dada la mayor frecuencia de los eventos extremos de precipitación -sequías y avenidas- (Barring & Persson, 2006). Además, la tendencia creciente de la sequía pronosticada para África Occidental por Paeth *et al.* (2009) parece confirmar que estas amenazas afectarán de manera desigual a los países en vías de desarrollo, donde los recursos son limitados.

La cuantificación precisa de las sequías se dificulta por la diferente definición de este tipo de evento (Barring & Persson, 2006; WMO, 2006), y por la existencia de diferentes criterios que definen el comienzo o el final de las rachas secas. Barring & Persson (2006) apuntan que definir la sequía es complejo porque involucra factores como la demanda, la vulnerabilidad de la población y su capacidad de adaptación al nuevo escenario, siendo entonces muy importante el entendimiento del cambio climático y sus consecuencias. Un mayor conocimiento de las tendencias de la sequía permitirá desarrollar “capacidad adaptativa”, una condición necesaria para instaurar estrategias efectivas frente a las consecuencias de este tipo de evento (EC, 2009). Las políticas públicas, usualmente dominadas por medidas de mitigación, podrían beneficiarse de un mejor balance entre las medidas de mitigación y adaptación (WWDR3, 2009). Sin embargo, existen profundos desacuerdos sobre cómo alcanzar el máximo desarrollo de África Occidental de manera sostenible: para Cour (2001), se debería densificar y urbanizar para que se transformen los sistemas de producción; mientras Batterbury & Warren (2001) defienden la capacidad de las soluciones autóctonas que permitan mantener un estilo de vida rural. Se espera un fuerte crecimiento poblacional en la región que, unido a las tendencias esperadas del clima, obligan a que los cambios deberán realizarse de forma rápida y radical, cualquiera sea la decisión adoptada para acometer el desarrollo.

En una región densamente poblada como el Sahel de África Occidental, la sequía generalizada en las décadas de 1970s y 1980s tuvo efectos devastadores debido a su extensión espacial y temporal: hambrunas, migraciones y lento crecimiento económico; poniendo de manifiesto la gran vulnerabilidad de la población a las fluctuaciones climáticas, y exponiendo la necesidad de avanzar en el entendimiento de este tipo de eventos (Paeth *et al.*, 2005; Lebel *et al.*, 2009; Paeth *et al.*, 2009). De acuerdo con Lebel *et al.* (2009), el déficit de precipitación fue cercano a los 200 mm/año, comparado con el periodo 1950-1969, y el patrón espacial de este déficit no presentó el gradiente latitudinal característico de la lluvia en la región. El déficit de lluvias debilitó aún más la frágil estabilidad política de la región, como consecuencia del desplazamiento del límite agrícola y la disminución de la calidad de las cosechas, amenazando la seguridad alimentaria y el bienestar humano de la población (Paeth *et al.*, 2005; Paeth *et al.*, 2009).

Por estas razones, parece evidente que las condiciones de estacionariedad del clima y la hidrología en la región no pueden ser garantizadas. La presunción de estacionariedad de una serie temporal implica que presenta una función de densidad de probabilidad (pdf) invariante con el tiempo, cuyas propiedades pueden ser estimadas desde un registro instrumental (Milly *et al.*, 2008). Si esta presunción no puede ser garantizada, se deberían utilizar modelos estadísticos no estacionarios capaces de reproducir la variación, lineal o no lineal con el tiempo, de los parámetros de las pdf seleccionadas (Milly *et al.*, 2008; Villarini *et al.*, 2010). Considerando lo anterior, el potencial de la herramienta de modelización GAMLSS (Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape), ha sido aplicado para el desarrollo de pdf regionales ajustadas a series anuales de máxima longitud de rachas secas (AMLSR) monzónicas en la Cuenca del Río Senegal.

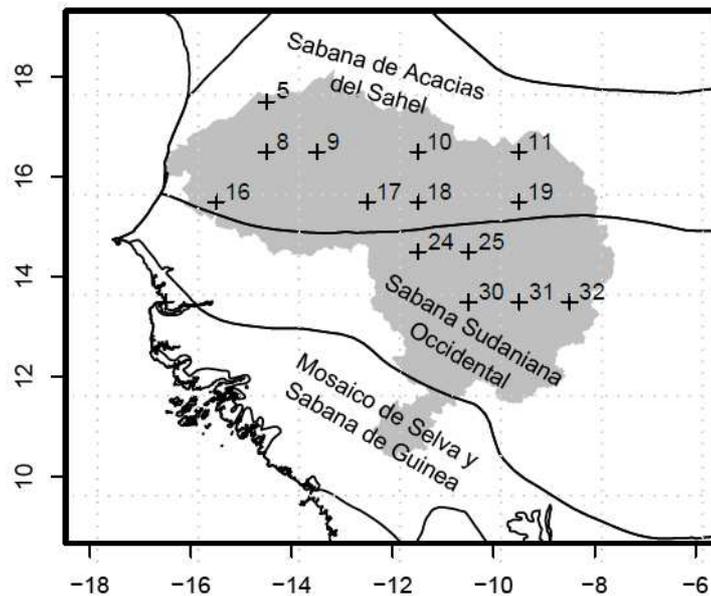
Teniendo en cuenta estas premisas, el artículo se estructura en cuatro secciones. En la segunda sección se presenta la zona de estudio, que corresponde a la Cuenca del Río Senegal analizada a escala de eco-regiones, y se discuten las características de las bases de datos de precipitación utilizadas, tanto las simulaciones de los RCMs como los datos observados del IRD. La sección tercera corresponde al núcleo del trabajo, en ella se describen las metodologías desarrolladas y se analizan los principales resultados. La identificación de rachas secas en la estación monzónica, y el análisis del sesgo en la representación de máximas longitudes de rachas secas para el período 1970-1990, considerando todos los RCMs disponibles y los datos observados de precipitación diaria. En base a los resultados obtenidos, se realizó una primera selección de RCMs para la zona de estudio. Para luego, acometer la modelización no estacionaria, aplicando GAMLSS, de las series de AMLRS identificadas desde los RCMs seleccionados. Las tendencias predichas hasta el horizonte 2050, son presentadas. Al final de esta sección, se discute y justifica la metodología aplicada para el desarrollo de pdf regionales, considerando las eco-regiones (Olson *et al.*, 2001) al interior de la cuenca del río Senegal. Conclusiones y discusión, son recogidas al final del artículo.

## **2 Materiales y métodos**

### **2.1 Características de la cuenca**

La Cuenca del Río Senegal presenta un gradiente decreciente de precipitación en dirección sur-norte, que corresponde con las eco-regiones Mosaico de Selva y Sabana de Guinea (*Guinean Forest Savanna -GFS-*), Sabana Sudanesa Occidental (*West Sudanian Savanna -WSS-*) y la Sabana de Acacias del Sahel (*Sahel Acacia Savanna -SAS-*). La principal fuente de recursos para la cuenca son las montañas del Fouta Djallon (Guinea), donde la precipitación excede los 2000 mm/año; sin embargo la zona del Sahel tiene zonas con menos de 200 mm/año.

En la zona de estudio se han seleccionado 43 sitios de análisis (considerando las restricciones de cobertura presentadas por la malla de datos IRD) entre las coordenadas 12N - 18N y -18W - -12W. El análisis del desvío se efectuó en todos estos puntos, pero para la construcción de las pdf regionales se restringió el análisis a los puntos ubicados al interior de la cuenca. De esta manera, nueve sitios han sido seleccionados en la eco-región SAS (puntos 5, 8, 9, 10, 11 y 16-19), y cinco en la eco-región WSS (puntos 24, 25 y 30-32), de acuerdo con la Figura 1. Se han considerado las eco-regiones definidas por Olson *et al.* (2001), para el análisis de rachas secas a escala regional. La Figura 1 presenta también el límite de la cuenca (polígono gris), junto con las eco-regiones más importantes en su interior y la ubicación de los sitios seleccionados.



**Figura 1.** Zona de estudio.

## 2.2 Datos utilizados

Se utilizaron los datos observados de precipitación diaria en el periodo 1970-1990, recopilados por el IRD (*Institut de Recherche pour le Developpement*, anteriormente ORSTOM, Francia). Esta base de datos ampliamente utilizada en investigaciones sobre los ciclos de alta frecuencia de la precipitación en África Occidental (Diedhiou *et al.*, 1999; Janicot & Sultan, 2001; Paeth *et al.*, 2005), presenta una resolución espacial de 1°, pero con cierta discontinuidad espacial lo que supone una restricción a los análisis. Por esta razón, los sitios seleccionados para el análisis de AMLSR no presentan regularidad espacial en la Figura 1.

Se han usado también las mallas de precipitación diaria para África Occidental, construidas con los RCM del Proyecto ENSEMBLES RT3 (Christensen *et al.*, 2009) en colaboración con el proyecto UE-AMMA, con resolución espacial de 50x50 km<sup>2</sup>. Se han seleccionado los RCM que presentan periodos de precipitación simulada coincidente temporalmente con los campos observados de precipitación del IRD (1970-1990). En la Tabla 1, se recoge un resumen de las características principales de los RCM seleccionados.

## 2.3 Definición de las rachas secas en el periodo monzónico

Se ha considerado la temporada monzónica entre el 1 de mayo al 30 de septiembre. La Longitud de las Rachas Secas (LRS) se definió como el número consecutivo de días con una cantidad de precipitación menor a un umbral (1 mm/día) para la temporada monzónica. Las rachas secas seleccionadas pertenecen a la temporada monzónica, con algunos casos especiales de rachas que no estaban totalmente contenidas dentro de este periodo. Incluso las rachas secas más largas podían abarcar varios años, pero de acuerdo con la definición, sólo los días dentro de la temporada monzónica se agregaban para contabilizar la longitud total de la racha seca.

**Tabla 1.** Modelos climáticos regionales seleccionados para el estudio.

Modelo	Cobertura temporal
GKSS-CLM	1961-2050
METO-HC-HAD	1951-2099
INM-RCA	1951-2099
KNMI-RACMO	1970-2050
MPI-M-REMO	1950-2050
SMHI-RCA	1951-2100

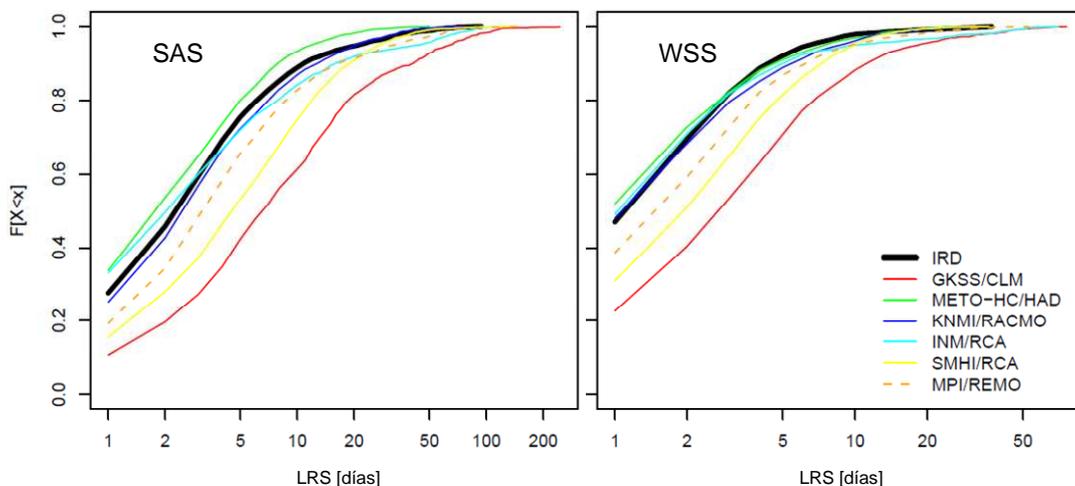
### 3 Análisis de resultados

#### 3.1 Análisis del desvío

De acuerdo con la definición de rachas secas monzónicas, las series temporales de LRS monzónicas se obtuvieron para los seis RCM seleccionados y de los datos IRD. El análisis del desvío se realizó en los 43 sitios seleccionados en la zona de estudio, con series diarias de precipitación entre 01/01/1970-31/12/1990. Este periodo de análisis está restringido por los datos IRD.

En cada uno de los 43 sitios de análisis se construyeron las funciones de distribución acumulada empíricas (cdf) de las LRS. El análisis de desvío se llevó a cabo calculando el *valor p* de la prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov para dos muestras, entre la serie de LRS obtenidas con el IRD y con los RCM seleccionados (Sheskin, 2000). Un ejemplo del resultado del análisis de desvío se presenta en la Figura 2, donde se han representado las cdf empíricas construidas en cada eco-región para las series de LRS.

El ajuste de las series de LRS no es óptimo en todos los sitios. Los RCM que mejor lo hacen son KNMI-RACMO (se calcularon  $\alpha > 0.05$  en 22 sitios), METO-HC-HAD (19 sitios), INM-RCA y MPI-REMO (16 sitios para ambos). Finalmente, las series de LRS construidas con los modelos GKSS-CLM y SMHI-RCA son las que peor ajustan con las cdf construidas desde las mallas IRD para el umbral de precipitación considerado. Debido a ello, las series de LRS de estos dos últimos RCM no se han considerado en el resto de los análisis.



**Figura 2.** Funciones de distribución acumulada empíricas (cdf) construidas para las series de LRS, con los datos IRD y los RCM seleccionados para el umbral  $P < 1$  mm/día.

### 3.2 Análisis de las series temporales de AMLRS

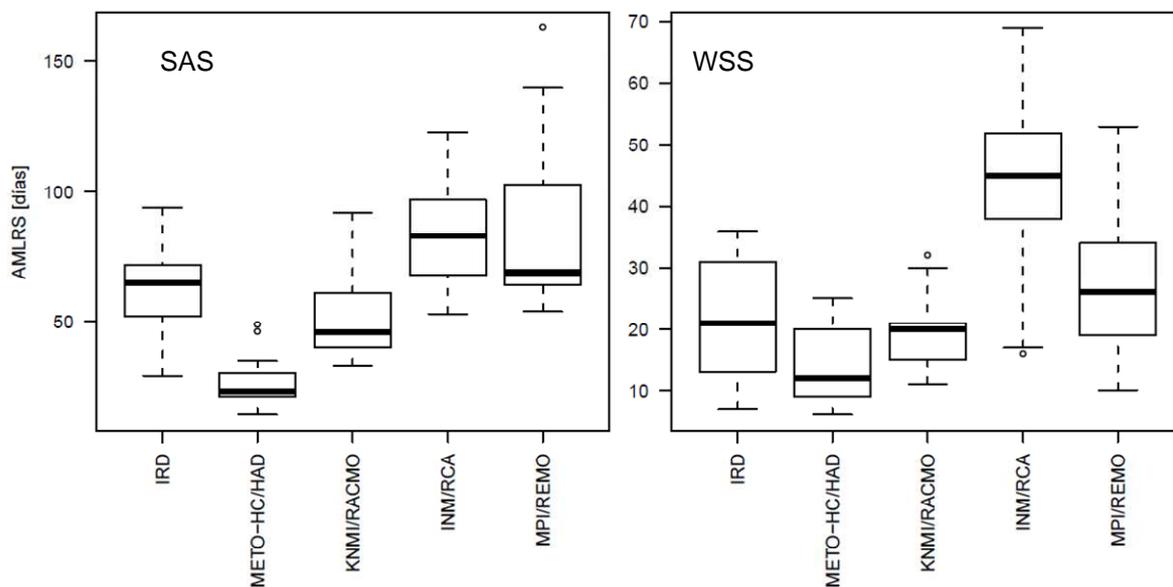
Los análisis de las rachas secas se han acometido a escala de eco-regiones, puesto que se observan diferentes patrones de precipitación, según la zona analizada de la cuenca. Las series regionales de máxima longitud anual de racha seca (AMLRS) se construyeron considerando la racha más larga del año a partir de las series de LRS en cada eco-región. Las principales características estadísticas de las series de AMLRS se presentan en conjunto en la Tabla 2 y en el box-plot de la Figura 3.

Considerando sólo los valores reales de rachas secas suministrados por los datos IRD, se observa que la media y desviación estándar de las AMLRS en la eco-región SAS superan ampliamente los valores calculados en la eco-región WSS. Estas características estadísticas de las series de AMLRS del IRD serán consideradas posteriormente en la selección de los RCM para la construcción de las pdf regionales.

**Tabla 2.** Estadísticos de las series de AMLRS monzónicas en el periodo 1970-1990 (21 años), para el umbral de precipitación  $P < 1$  mm/día..

	SAS		WSS	
	Media	DS*	Media	DS*
IRD	61.5	17.3	22.3	9.5
METO-HC-HAD	26.0	9.0	14.4	6.0
KNMI-RACMO	51.4	15.0	19.6	6.0
INM-RCA	82.6	19.5	43.7	14.0
MPI-M-REMO	83.5	30.2	28.1	12.7

DS\* = Desviación estándar.

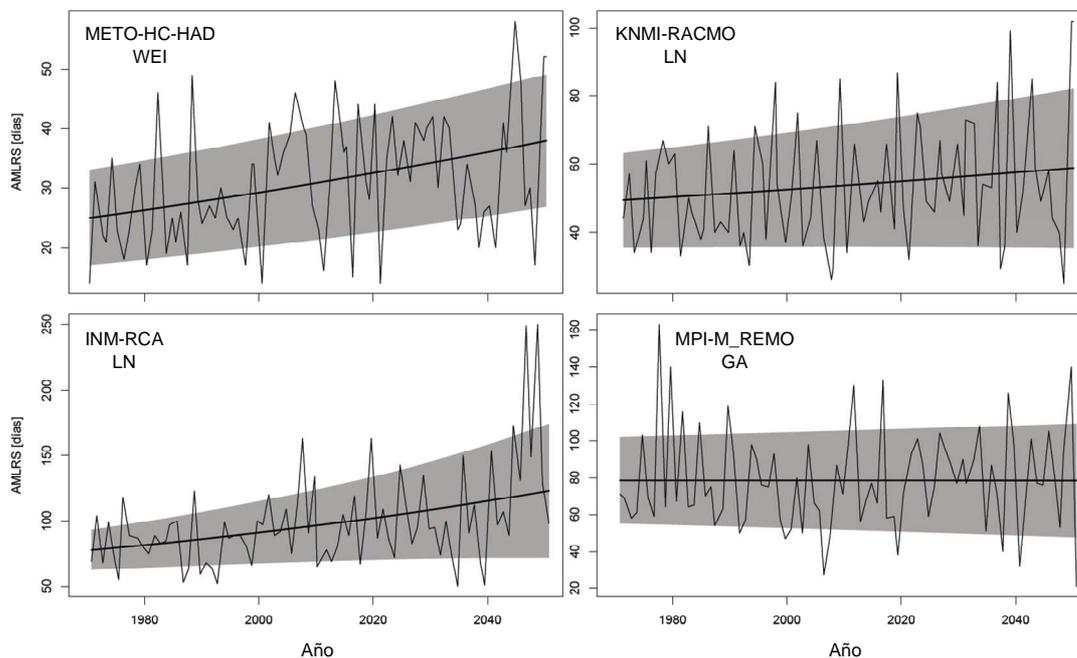


**Figura 3.** Boxplot contruidos para las series de AMLRS monzónicas en el periodo 1970-1990 (21 años), para el umbral de precipitación  $P < 1$  mm/día.

Para el análisis de tendencias predichas de AMLRS, se han aplicado GAMLSS (Generalized Additive Models for Location, Scale & Shape). Según Stasinopoulos & Rigby (2007), GAMLSS permiten relacionar los parámetros de una función de densidad probabilidad (pdf) como función de una variable explicativa, a través de funciones de suavizado no paramétricas. GAMLSS es una valiosa herramienta para el análisis de series que presentan comportamientos no estacionarios, por lo que ha sido utilizado para modelar la evolución de la distribución de probabilidad de series hidrológicas (Villarini *et al.*, 2009; Villarini *et al.*, 2010).

En el presente trabajo, cuatro modelos estadísticos GAMLSS de dos parámetros se han considerado: Gumbel (GU), Gamma (GA), Lognormal (LN), y Weibull (WEI). El mejor modelo se ha escogido de acuerdo con el Schwarz Bayesian Criterion (SBC). El análisis GAMLSS se ejecutó con las series regionales de AMLRS obtenidas de los cuatro RCM seleccionados. La Figura 4 presenta el ajuste obtenido en la eco-región SAS. Se observa la variación temporal de las pdf a través de la evolución temporal de sus parámetros: el valor medio, más/menos una desviación estándar. Para todos los RCM se verificó la normalidad de los residuales para evaluar el ajuste de los datos al modelo estadístico.

De la Figura 3 y la Tabla 2 se observa una menor variabilidad en las AMLRS en la eco-región WSS para ambos umbrales de precipitación, como ya se ha comentado. Unido a lo anterior, las tendencias en las AMLRS predichas por cada RCM difieren en magnitud y signo, como se puede observar en la Figura 4: mientras tres RCMs predicen un aumento de la AMLRS media, el MPI-M-REMO no pronostica cambios de este parámetro; además, la desviación estándar de las AMLRS no presenta cambios apreciables para METO-HC-HAD y MPI-M-REMO, mientras que el KNMI-RACMO y el INM-RCA pronostican una tendencia creciente de la variabilidad. Esta situación plantea la necesidad de calcular las pdf regionales de las AMLRS futuras seleccionando los RCM que mejor se ajusten a las series históricas de rachas secas obtenidas con los datos históricos del IRD (de acuerdo con los resultados en la Tabla 2 y la Figura 3); además, se ha procurado seleccionar los mismos RCM para ambas eco-regiones. De esta manera se ha concluido que los RCM más convenientes a utilizar para construir las pdf regionales son el MPI-M-REMO, KNMI-RACMO y el METO-HC-HAD.

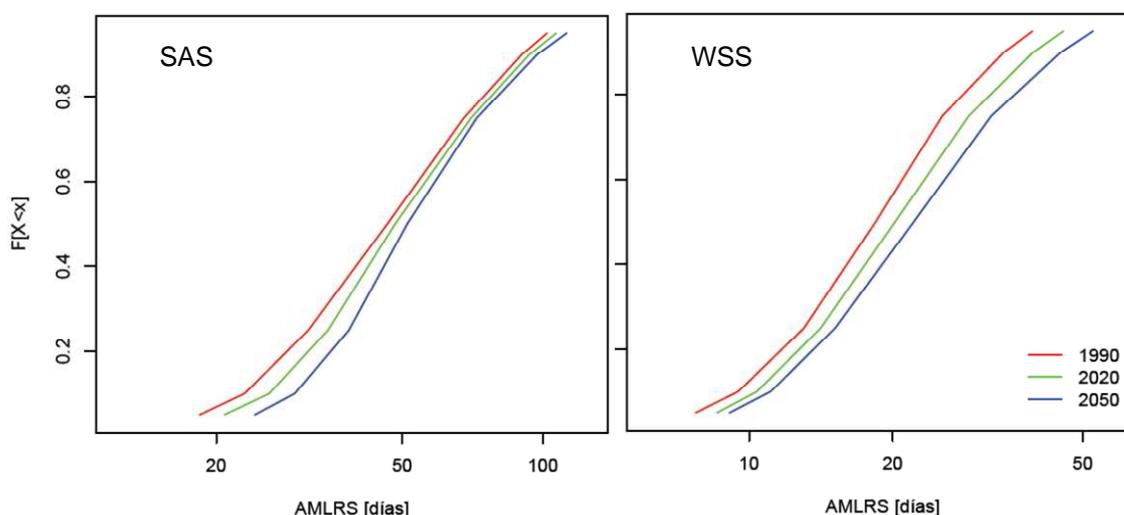


**Figura 4.** Análisis GAMLSS de las series regionales de AMLRS en la eco-región SAS. La evolución de la pdf es representada por su valor medio (línea negra) más/menos una desviación estándar (polígono gris). La escala de las ordenadas es automática. Se indica el modelo GAMLSS que mejor ajusta a la serie (LN, WEI ó GA).

### 3.3 Construcción de las pdf regionales

Para la construcción de las pdf regionales se han utilizado técnicas de bootstrapping. Las técnicas de bootstrapping son una aproximación de la inferencia estadística basada en construir una distribución muestral con el objetivo de calcular un estadístico utilizando muestreos con reemplazo de los datos (Efron & Tibshirani, 1993). Si existe una función distribución de probabilidad ajustada a los datos, las muestras podrían ser números aleatorios obtenidos de estas pdf.

Del análisis GAMLSS se ha calculado la evolución temporal de los parámetros de las distribuciones de probabilidad para los RCM seleccionados. Las pdf regionales se han construido utilizando muestras aleatorias obtenidas de las distribuciones de los RCM en cada eco-región. Por lo tanto en ambas eco-regiones, las muestras aleatorias fueron construidas a partir de sub-muestras de igual tamaño, de las distribuciones WEI, LN y GA (correspondientes a los RCM METO-HC-HAD, KNMI-RACMO y MPI-M-REMO, respectivamente). Luego, utilizando bootstrapping, se estimaron los estadísticos básicos (media y desviación estándar), junto con los intervalos de confianza (IC 95%). Las pdf regionales construidas para 1990, 2020 y 2050 se presentan en la Figura 5. Se observa que las tendencias predichas de incremento de AMLRS para la eco-región WSS, son proporcionalmente mayores que en la eco-región SAS.



**Figura 5.** pdf regionales construidas con bootstrapping, a partir del ajuste GAMLSS a las series de AMLRS.

La Tabla 3 presenta los estadísticos básicos, media y desviación estándar (DS), calculados para 1990, 2020 y 2050, para las pdf regionales, junto con un intervalo de confianza del 95%. Respecto a la media de las AMLRS y considerando como referencia el año de 1990, se observa que se estiman siempre valores significativamente mayores para el horizonte 2050 (del orden de 22-24%). En el caso de la DS, desde la Tabla 3 se observan incrementos significativos para ambas pdf regionales. Los aumentos relativos van desde el 21% (eco-región SAS) al 55% (eco-región WSS).

**Tabla 3.** Evolución temporal de la media y la desviación estándar (DS) de las pdf regionales de AMLRS (en días) para cada eco-región.

Año	SAS					WSS				
	Media	IC <sub>95%</sub>		DS	IC <sub>95%</sub>	Media	IC <sub>95%</sub>		DS	IC <sub>95%</sub>
1990	39.7	37.2	42.2	17.3	14.4 20.5	16.8	15.6	18.1	7.1	5.8 8.7
2020	43.7	40.9	46.7	18.9	15.4 23.3	18.7	17.2	20.3	8.7	6.9 10.8
2050	48.5	44.8	52.5	21.0	16.6 26.7	20.9	18.9	23.0	11.1	8.4 14.3

Construidas las pdf regionales (Figura 5), es posible calcular el valor de las AMLRS asociadas a diferentes periodos de retorno para diferentes años. Tomando como ejemplo un periodo de retorno  $Tr = 10$  años (o lo que es igual,  $P[X < x] = 0.9$  en el gráfico), se observa en la eco-región WSS cambios más notables que en SAS. Mientras en la eco-región SAS se espera que la racha asociada con  $Tr = 10$  años pase de 90 a 97 días entre 1990-2050 (diferencia de 7 días, 8% de aumento), para la eco-región WSS se pronostica que el aumento será de 34 a 44 días (diferencia de 10 días, 30% de incremento). Este aumento tan pronunciado en las rachas de la eco-región WSS está relacionado con el incremento de la variabilidad presentado en la Tabla 3.

#### 4 Conclusiones

A lo largo del trabajo, se ha presentado una metodología que permite tener en consideración la no-estacionariedad que presenta el clima y la hidrología en la cuenca del río Senegal. La dinámica poblacional, los cambios del uso del suelo, la contaminación, etc, aumentan las demandas hídricas, que junto a la variabilidad climática de la región, ejercen presiones sobre los recursos hídricos con importantes impactos sobre la población. Aumentar el conocimiento sobre las consecuencias del cambio climático en los extremos hidrológicos a escala de cuenca, permitirá una mejor adaptación ante estos cambios, y servirá como soporte a la decisión en el desarrollo de políticas públicas de mitigación y adaptación.

Con el objeto de discernir los cambios predichos en la severidad y frecuencia de rachas secas de precipitación, se ha trabajado con RCM. Considerando mallas de datos de precipitación observada, se efectuó un análisis del desvío de las series de LRS obtenidas desde los RCM, que permitió evaluar el desempeño de los modelos climáticos. De esta manera se concluyó que los RCM que mejor ajustaron las LRS a los datos reales fueron KNMI-RACMO, METO-HC-HAD, INM-RCA y MPI-REMO.

En base a los resultados del análisis del desvío de las series temporales de LRS, se seleccionaron cuatro RCM para continuar con el análisis no estacionario con GAMLSS. Se ha demostrado que la metodología GAMLSS es una herramienta apropiada para caracterizar la no-estacionariedad de las pdf de las series hidrometeorológicas, como las AMLRS. Los RCM considerados predicen incrementos en distinto grado del valor medio de las AMLRS, excepto el RCM MPI-M-REMO donde no predice cambios significativos en la eco-región SAS. El buen ajuste del modelo estadístico GAMLSS a las series temporales de AMLRS, no implica un acople apropiado a la serie observada de AMLRS desde la base de datos IRD. Con el análisis no estacionario, se detectan sobreestimaciones en las longitudes de racha desde el RCM INM-RCA, dados los datos IRD en el periodo 1970-1990 para el umbral de precipitación considerado. Esto se tuvo en cuenta para seleccionar los RCM para la construcción de las pdf regionales.

Las técnicas de bootstrapping han permitido construir pdf regionales, utilizando las distribuciones de probabilidad asociadas con los RCM seleccionados. Esta metodología se eligió para estimar la pdf regional, que es desconocida, a partir de las sub-muestras para cada RCM. Dada la independencia de la metodología de la distribución de probabilidad de las sub-muestras, es posible calcular las propiedades de la pdf regional subyacente y los parámetros de interés derivados de esta. De acuerdo con los parámetros calculados para las pdf regionales, se predice que la longitud media de las AMLRS se incremente en ambas eco-regiones. Este comportamiento estará acompañado por aumentos importantes en la DS de la distribución, especialmente en la eco-región WSS. Este comportamiento de los parámetros de las pdf regionales justifica que para un periodo de retorno relativamente bajo (10 años), las rachas secas aumentarán de forma más drástica en la eco-región WSS.

## 5 Agradecimientos

Se agradece la financiación recibida del Proyecto Europeo AMMA (FP6-004089), así como el soporte de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) y del Proyecto del Plan Nacional de I+D CGL2008-02530/BTE del Ministerio de Ciencia e Innovación (España).

## 6 Referencias

- Bärring, L. & Persson, G., 2006. Influence of climate change on natural hazards in Europe. Natural and technological hazards and risks affecting the spatial development of European regions. *Geological Survey of Finland, Special Paper*, 42, 93–107.
- Batterbury, S. & Warren, A., 2001. Viewpoint: The African Sahel 25 años after the great drought: assessing progress and moving towards new agendas and approaches. *Global Environmental Change*, 11, 1-8.
- Christensen, J. H., Rummukainen, M., & Lenderink, G., 2009. Formulation of very-high-resolution regional climate model ensembles for Europe. In van der Linden, P. & J. F. B. Mitchell (Eds): *ENSEMBLES: Climate change and its impacts at seasonal, decadal and centennial timescales: Summary of research and results from the ENSEMBLES project* (pp. 47-58). Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK.
- Cour, J. M., 2001. The Sahel in West Africa: countries in transition to a full market economy. *Global Environmental Change*, 11, 31-47.
- Diedhiou, A., Janicot, S., Viltard, A., P. de Félice, Laurent, H., 1999. Easterly waves regimes and associated convection over West Africa and the tropical Atlantic: Results from the NCEP/NCAR and ECMWF reanalyses. *Clim. Dyn.*, 15: 795-822.
- EC, 2009. *Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC)*. Technical Report – 2009 – 040, European Communities, (<http://ec.europa.eu>).
- Efron, B. & Thishirani R. J. *An introduction to the bootstrap*. New York: Chapman & Hall, 1993.
- Janicot, S., Sultan, B., 2001. Intra-seasonal modulation of convection in the West African monsoon. *Geophysical Research Letters*, 28 (3): 523-526.
- Lebel, T., Cappelaere, C., Galle, S., Hanan, N., Kergoat, L., Levis, S., Vieux, B., Descroix, L., Gosset, M., Mougin, E., Peugeot, C. & Seguis, L., 2009. AMMA-CATCH studies in the Sahelian region of West-Africa: an overview. *J. Hydrol.*, 375, 3-13.
- Milly, P.C.D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R.M., Kundzewicz, Z.W., Lettenmaier, D.P., Stoufler, R.J., 2008. Stationarity is dead: Whiter water management? *Science*, 319: 573-574.
- Olson D. M., Dinerstein E., Wikramanayake E. D., Burgess N. D. , Powell G. V. N., Underwood E. C., D'amico J. A., Itoua I., Strand H. E., Morrison J. C., Loucks C. J., Allnutt T. F., Ricketts T. H., Kura Y., Lamoreux J. F., Wettengel W. W., Hedao

- P. & Kassem K.R., 2001. Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth. *BioScience*, 51 (11), 933-938.
- Paeth, H., Born, K., Podzun, R. & Jacob, D., 2005. Regional dynamical downscaling over West Africa: model evaluation and comparison of wet and dry años. *Meteor. Z.*, 14 (3), 349-367.
- Paeth, H., Born, K., Girmes, R., Podzun, R. & Jacob, D., 2009. Regional climate change in tropical and northern Africa due to greenhouse forcing and land use changes. *J. Clim.*, 22, 114-132.
- Sheskin, D.J., 2000. *Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures*, 2nd ed. Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC.
- Stasinopoulos D. M. & Rigby R. A., 2007. Generalized additive models for location scale and shape (GAMLSS) in R. *J. Statistical Software*, 23 (7), 1-46.
- Villarini, G., Smith, J. A., Serinaldi, F., Bales, J., Bates, P. D. & Krajewski, W. F., 2009. Flood frequency analysis for nonstationary annual peak records in an urban drainage basin. *Advances in Water Resources*, 32 (8), 1255-1266.
- Villarini, G., Smith, J. A. & Napolitano, F., 2010. Nonstationary modeling of a long record of rainfall and temperature over Rome. *Advances in Water Resources*, in press. doi:10.1016/j.advwatres.2010.03.013.
- WMO, 2006. *Drought monitoring and early warning: concepts, progress and future challenges*. World Meteorological Organization, Publication No. 1006, pp. 24.
- WWDR3, 2009. *Water in a changing world*. The United Nations World Water Development Report 3. World Water Assessment Program, UNESCO Publishing, pp. 318.