

Fuentes de humedad en el Sahel a partir de un método 3D Lagrangiano

I. ALGARRA, R. NIETO*, M. VAZQUEZ

**rnieto@uvigo.es*

*EPhysLab (Environmental Physics Laboratory), Facultade de Ciencias,
Universidade de Vigo,
Campus As Lagoas s/n, Ourense, Spain*

RESUMEN

La región de El Sahel está considerada como una de las regiones del planeta donde los impactos climáticos están siendo más severos en las últimas décadas, encadenando periodos de sequías importantes durante periodos largos de tiempo. Por ello es importante analizar los motivos de las variaciones en su precipitación. En este trabajo se identifican y analizan las principales fuentes de humedad de El Sahel de forma anual y estacional para un período de 33 años (1980-2012), así como la variabilidad interanual de estas y su relación principales patrones de teleconexión que afectan a la región (ENSO, NAO y WASMI). Para la identificación de las fuentes de humedad se ha utilizado el modelo de dispersión lagrangiano FLEXPART (Stohl y James, 2004; 2005) alimentado con datos del reanálisis ERA-Interim del ECMWF cada seis horas. El método computa el balance de la evaporación menos precipitación mediante el cálculo del cambio de la humedad específica a través de trayectorias de partículas de aire. El estudio de las fuentes muestra que la principal fuente de humedad para la región del Sahel son los propios procesos de evaporación local (recycling). Además se identifican las siguientes fuentes de humedad: i) el Golfo de Guinea, ii) el Atlántico Norte cercano a la costa africana hasta la Península Ibérica, iii) el Mediterráneo, incluyendo el Mar Rojo, iv) el noreste del continente africano y v) el centro-este de África. En un análisis estacional más detallado durante los meses cálidos se detecta como fuente menor el océano Índico. La estacionalidad se encuentra muy marcada por la influencia de la temporada del Monzón, cuando el Golfo de Guinea actúa como fuente dominante sobre la región del Sahel. El largo periodo temporal analizado permite análisis de la variabilidad y relaciones con los principales modos de variabilidad que afectan a la región, como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) o el monzón Africano (WASMI).

Palabras Clave: Sahel, Transporte de humedad, FLEXPART, Precipitación, modos de variabilidad climática

1. Introducción

La región de El Sahel se trata de una franja localizada al Norte de África que se extiende de Oeste a Este entre el océano Atlántico y el Mar Rojo. Se trata de una de transición entre el desierto del

Sáhara al Norte y la sabana africana al Sur. Aunque el término Sahel se aplica a toda la franja latitudinal, en este trabajo se analiza su región más occidental, que la zona más vulnerable a la variabilidad climática. El máximo de precipitaciones en El Sahel se concentra durante los meses del verano boreal,

con un pico de lluvias en agosto. Las precipitaciones están íntimamente asociadas a la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ), la cual se encuentra situada más al Norte durante el verano boreal. El flujo de vientos predominante en la región del Sahel son los vientos Alisios, flujo del NE, conocidos como vientos del Harmattan, que se caracterizan por ser vientos muy fríos y secos, con alto contenido en polvo. Durante los meses de verano boreal, que coinciden con la temporada de monzón, el intenso calentamiento de la superficie terrestre provoca la formación de una baja térmica que modifica el régimen de vientos favoreciendo la entrada de masas de aire procedentes del Golfo de Guinea, masas de aire con alto contenido en humedad que aportan vapor de agua a la región del Sahel (Nicholson, 2013). Estudios previos realizados para 5 años, 2000-2004 (Nieto *et al.*, 2006), revelan que la principal fuente de humedad son los propios procesos de evaporación local (recycling), además del Golfo de Guinea, el Atlántico norte y el Mediterráneo.

El objetivo de este trabajo es ampliar el periodo de estudio a 33 años (1980-2012) para la identificación y caracterización de las fuentes de humedad para la región de El Sahel tanto a escala anual como estacional. Este periodo largo de tiempo permitirá realizar análisis de variabilidad que no se han llevado a cabo hasta el momento, y evaluar la relación existente entre las fuentes y los principales modos de variabilidad climática (NAO, ENSO y WASM).

2. Datos y procedimiento

El método empleado en este trabajo es el modelo lagrangiano de dispersión de partículas FLEXPART que fue desarrollado por Stohl *et al.* (1998)

originalmente para la dispersión de contaminantes en la atmósfera y adaptado posteriormente para diagnosticar el flujo de agua en superficie (Stohl and James, 2004, 2005). El modelo se alimentó cada 6 horas con datos de reanálisis ERA-Interim del Centro Europeo de Predicción a Corto y Medio Plazo (ECMWF) con una resolución horizontal de 1° x 1° en latitud y longitud. Este reanálisis está considerado como el mejor para el estudio de la rama atmosférica del ciclo hidrológico.

FLEXPART divide la atmósfera en un gran número de partículas, cerca de 2 millones. Conociendo la velocidad tridimensional del viento, es posible reconstruir la trayectoria de las partículas que llegan a una posición dada. Los cambios de humedad en cada momento se monitorizan calculando las variaciones de humedad específica (q). Estos valores se registran cada 6 horas. A través de los cambios de q en el tiempo, se pueden registrar aumentos y disminuciones de la humedad en la partícula a lo largo de su trayectoria a través de la siguiente ecuación:

$$(e - p)_k = m \frac{dq}{dt}$$

donde m es la masa de la partícula, e la evaporación y p la precipitación, que representan el aumento y disminución de humedad en la partícula respectivamente.

Para conocer el flujo total de agua dulce en superficie para un área determinada A se realiza el sumatorio del campo de $(e - p)$ para todas y cada una de las partículas que residen en la columna atmosférica de dicha área. De esta forma obtenemos el flujo total de agua dulce (E-P).

Donde el campo de $(E - P)$ es positivo ($E-P > 0$) define las regiones

consideradas fuente de humedad, en ellas las partículas adquieren humedad. Mientras que las zonas donde los valores sean negativos ($E-P < 0$) representan las zonas sumidero de humedad, es decir, en ellas las partículas pierden humedad. Este método se puede desarrollar hacia adelante (modo forward) o hacia atrás en el tiempo (modo backward), que es el modo que se emplea en este trabajo. Así pues donde se calculan las retro trayectorias para un periodo de tiempo de 10 días (tiempo de vida promedio del vapor de agua en la atmósfera) de las partículas que llegan a la región de El Sahel.

3. Resultados

3.1. Identificación climática de las fuentes de humedad

El balance de $E-P$ se calcula para las retro trayectorias de las partículas que llegan a la región de El Sahel, definida entre 10° - 20° N y 16° W- 20° E (línea negra en la Figura 1). Con este cálculo se verá dónde se origina la humedad que llega a la región sumidero de interés. En la Figura 1 se muestra el análisis anual del campo de $(E-P)$ para cada día (D) hacia atrás en el tiempo (donde D varía de 1 hasta 10). Así el día $D=1$ significa un día hacia atrás en el tiempo, por lo que el campo de $(E-P)$ indica su variación para las partículas un día antes de llegar a la región destino. El mapa D-2 representa los

valores de $(E-P)$ dos días antes de llegar al Sahel, y así hasta el día 10. Los colores cálidos representan zonas donde $(E-P) > 0$, es decir, regiones fuente de humedad, mientras que los colores fríos representan aquellas regiones donde $(E-P) < 0$, y por lo tanto son las regiones consideradas como sumideros de humedad.

En el primer día (D-1) hacia atrás en el tiempo, la mayoría de las partículas se encuentran concentradas sobre la propia región destino y sus alrededores, indicando que son los mecanismos de evaporación local (*recycling*) los que actúan como fuente de humedad. Aparece como sumidero el océano Atlántico cercano al Sahel, incluyendo al Golfo de Guinea, lo que indica que en esta región la precipitación es de tipo convectiva, lo que ocurre típicamente con las masas de aire en tránsito al Sahel; esta área corresponde a la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ). El valor negativo en la zona continental al SE del Sahel en África central revela una zona de precipitación de masas de aire con origen al Este del Sahel. De forma similar al primer día, en el segundo (D-2) se observan las mismas fuentes pero con una expansión hacia el Norte sobre la costa atlántica de África. Esta expansión continúa en el tercer día (D-3) en el que la cuenca del Mediterráneo (Med) y el Noreste de África (NEAf) aparecen como nuevas fuentes de humedad para el Sahel. Los vientos de Harmattan, flujo del NE, provoca la aparición de estas

Promedio anual (1980-2012) del campo (E - P) diario

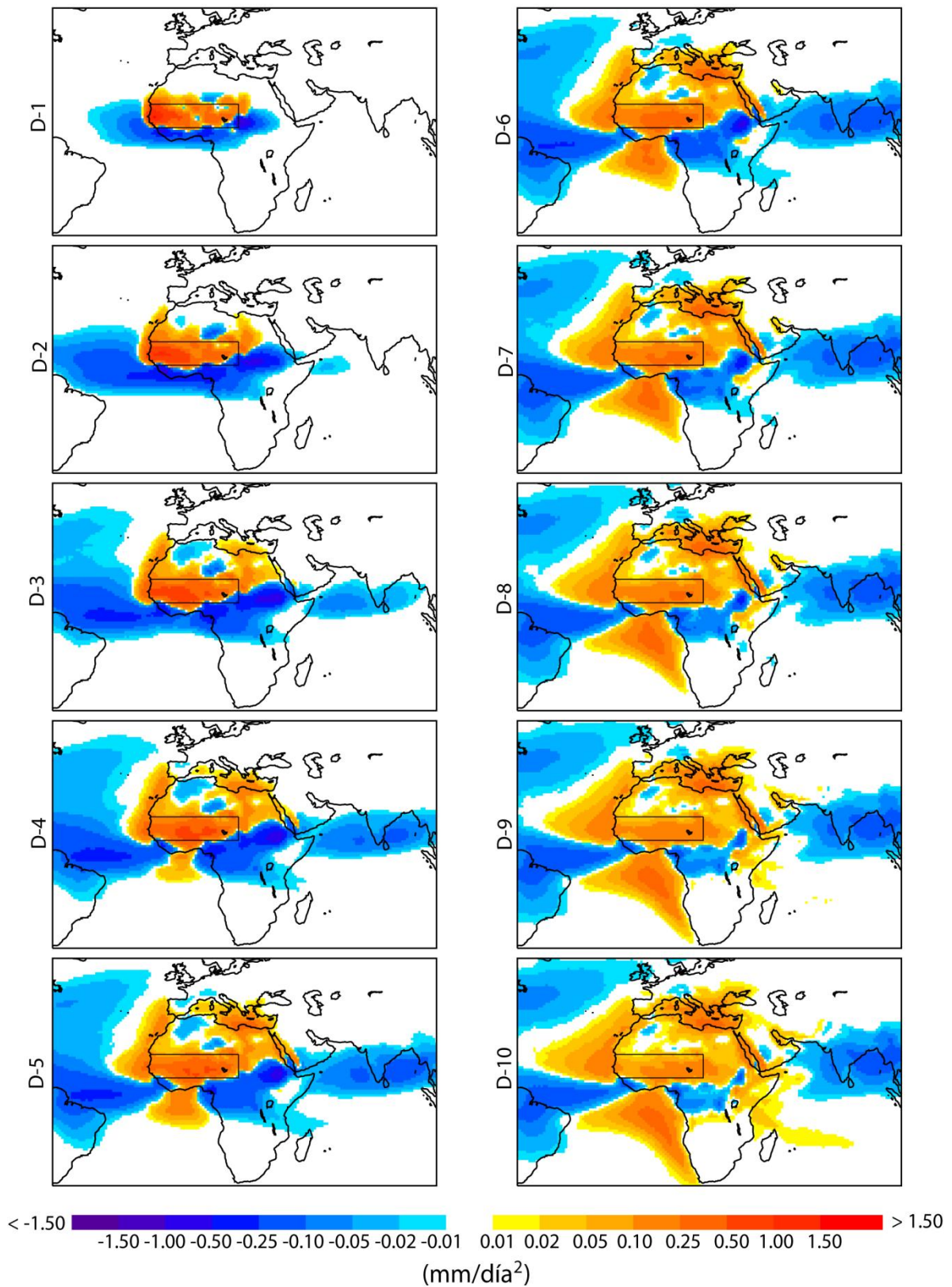


Fig. 1. Valores medios anuales del campo de (E - P) durante diez días hacia atrás en el tiempo (retrotraectorias) para el período 1980-2012 para la región del Sahel: 10°N-20°N; 16°W-20° E (recuadrada con la línea negra).

Promedio anual (1980-2012) del campo (E - P) integrado 10 días

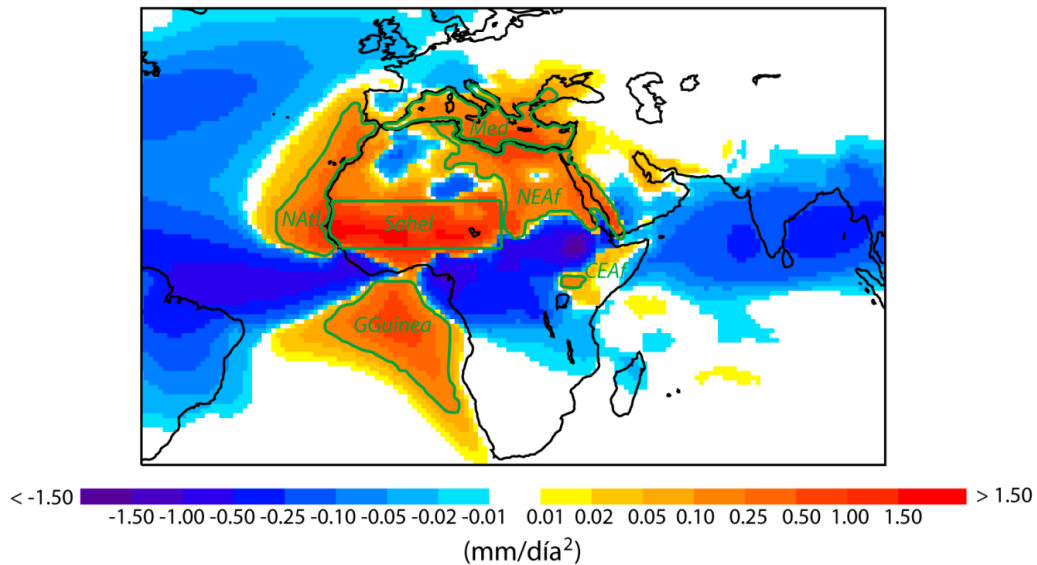


Fig. 2. Valores medios anuales del campo de (E-P) integrados diez días hacia atrás (retro trayectorias) para el período 1980-2012 para la región del Sahel. La línea verde indica el umbral utilizado para definir cada una de las fuentes de humedad. Cuatro de las fuentes de humedad se definen con el límite de 0.10 mm/día: NATl, GGuinea, CEAF y NEAf. El Mediterráneo se define por su cuenca geográfica y la fuente del Sahel por su propia definición como caja destino.

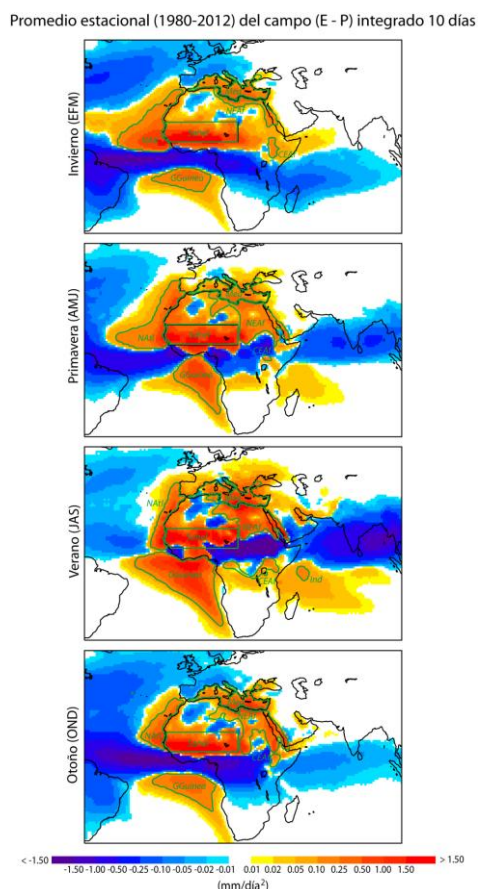
dos nuevas fuentes de humedad. En el cuarto día (D-4) se produce un desplazamiento hacia el Sur y aparece como fuente de humedad el Golfo de Guinea (GGuinea), que al igual que el resto de las regiones fuente, se intensifica y expande conforme transcurren los días. Al sexto día (D-6) aparece una región fuente situada en el Centro Este de África (CEAF) que al igual que las anteriores regiones fuente se expande durante los días posteriores. Al décimo día (D-10) aparece un área con evaporación positiva en la costa Este de África sobre el océano Índico. Este análisis se realiza hasta diez días hacia atrás en el tiempo, pues como se comentó en la introducción, el tiempo de vida promedio del vapor de agua en la atmósfera tiene este valor.

En la Figura 2 se muestran los valores de (E-P) integrados durante los diez días de retro trayectorias para el período de 33 años. Se pueden observar las diferentes fuentes de humedad para la región del Sahel. Las contribuciones están representadas en términos

absolutos y dan información de la contribución total integrada anual de la humedad. Así, se distinguen 6 fuentes principales de humedad: el Atlántico Norte (NATl), el Golfo de Guinea (GGuinea), el Mediterráneo (Med), el Noreste de África (NEAf), el centro Este de África (CEAF) y la propia región del Sahel (Sahel) que actúa como fuente de humedad a través de mecanismos de evaporación local (*recycling*). Cuatro de las fuentes de humedad se delimitan en este trabajo, de aquí en adelante, con un umbral de 0.10 mm/día (línea de color verde en Figura 2): NATl, GGuinea, CEAF y NEAf. La fuente Med se define por sus límites geográficos, y la fuente Sahel por su propia definición como caja destino entre 10°-20°N y 16°W-20°E (recuadrada con la línea negra en la Figura 1).

Estos patrones del campo de (E - P) son muy robustos y constantes mostrando en general la misma distribución cuando se realiza un análisis estacional.

Fig. 3. Valores estacionales del campo de (E-P) integrados diez días hacia atrás en el tiempo para la región del Sahel para el período 1980-



2012.

La Figura 3 muestra los campos de (E-P) estacionales integrados durante los 10 días de transporte hacia atrás en el tiempo. Las estaciones fueron definidas en función de los meses centrales del régimen del Monzón Africano, que tiene su máximo durante el mes de agosto. Así, se define la época monzónica para julio, agosto y septiembre (JAS), que coincide con el verano boreal. El resto de los meses se agrupan en grupos de tres en tres. De esta forma el invierno corresponde con enero-febrero-marzo (EFM), la época pre-monzón (primavera) con abril-mayo-junio (AMJ) y la

época post-monzón (otoño) con octubre-noviembre-diciembre (OND).

Aunque como se comentó anteriormente la estructura del patrón de las fuentes es bastante consistente, existen diferencias estacionales relacionadas sobre todo con respecto a la posición de la ITCZ (Figura 3). Las diferencias estacionales están relacionadas por la pérdida de humedad en la ITCZ, que se limitan principalmente al océano Atlántico y África durante el otoño, con una leve expansión hacia el Pacífico durante el invierno. En primavera la ITCZ se expande hacia el océano Índico e Indonesia mientras que en el Atlántico está ausente, pero está incluida en parte en la región del Sahel durante verano, cuando la ITCZ es más intensa en Asia. El comportamiento está en buen acuerdo con el ciclo de temporada del monzón del África Occidental.

Los mecanismos de evaporación local (*recycling*) en el Sahel constituyen la fuente de humedad más importante durante las cuatro estaciones. En invierno junto a estos mecanismos de evaporación local, la fuente NATl y Med son muy influyentes, y en menor medida lo es GGuinea. En la época premonzónica (primavera) la fuente del Noreste de África (NEAf), en la que está incluida la cuenca del Mar Rojo, intensifica su importancia, y la fuente GGuinea adquiere mayor protagonismo. En verano, durante la temporada del monzón y cuando las precipitaciones sobre la región son más abundantes, ocurren las mayores discrepancias. En la Figura 4 en la que se muestra el comportamiento día a día del campo (E-P) durante el verano se observa que sus valores no son completamente positivos sobre la región del Sahel durante los tres primeros días de transporte.

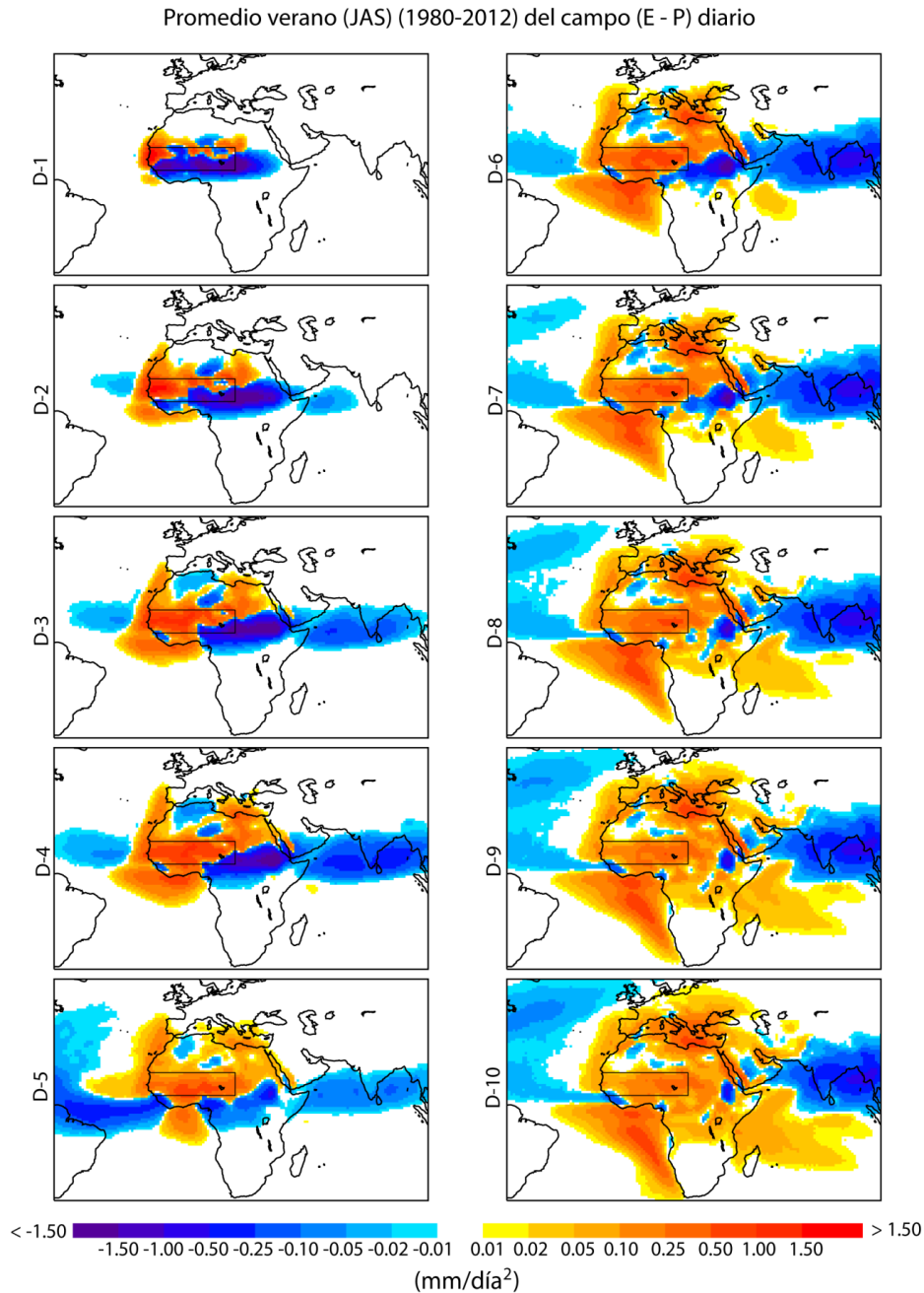


Fig. 4. Igual que Figura 1 pero para la época monzónica (JAS).

Esto indica la existencia de regiones dentro de la región del Sahel donde se producen ganancias de humedad en la atmósfera (la mayoría en la mitad occidental) y en otras regiones (sobre todo la parte oriental, colores en rojo) donde se producen pérdidas de humedad (zonas de precipitación convectiva, en azul). Estas zonas de precipitación convectiva son concordantes con la máxima frecuencia de los complejos convectivos a

mesoescala en torno a 10°E (Lebel *et al.*, 2003). Durante el verano, la fuente de Guinea junto con los mecanismos de evaporación local (*recycling*) son las fuentes de humedad dominantes, además también aparece una nueva fuente sobre el océano Índico (Ind). En otoño, la importancia de las fuentes es similar al invierno.

3.2. Contribución de las fuentes de humedad

El método lagrangiano utilizado en este trabajo permite la posibilidad de cuantificar día a día el transporte de vapor de agua desde cada una de las fuentes de humedad. Se calcula pues, la contribución de cada una de las fuentes de humedad para los diez días hacia atrás en el tiempo. De este modo, se verá la importancia de cada fuente en función del tiempo. Es decir, es posible con este método evaluar la importancia de las principales fuentes de humedad detectadas para la región. En la Figura 5 se muestra la serie temporal de la contribución integrada de las series $(E-P)_n$ para cada una de las fuentes determinadas en base anual en la Figura 2 con el límite de 0.10 mm/día. Las fuentes de humedad analizadas son: NAtl, GGuinea, la propia fuente del Sahel (Sahel), Med, NEAf y CEAF. No se calcularon los valores de la fuente del Índico (Ind) porque sólo aparece durante la época de los meses del monzón. En la Figura 5 se representa en las abscisas, los n días ($n = 1, 2 \dots 10$) para los cuales se calcula la contribución integrada de cada fuente para la región del Sahel y en el eje de ordenadas se representa el valor del campo de $(E-P)$ en mm/día para cada región fuente. Los valores de $(E - P)_n$ representados no están relativizados al área de cada fuente.

Así, la fuente que aporta mayor cantidad de humedad a la región es el propio Sahel (línea azul oscuro), a través de los procesos de evaporación local (*recycling*) domina claramente desde el primer al séptimo día, con un máximo en el segundo día (131.8 mm/día). A partir del séptimo día la fuente dominante en el aporte de humedad para la región del Sahel es el Golfo de Guinea (línea roja). Es importante destacar que la fuente GGuinea no contribuye como tal hasta el tercer día, es decir, actúa como sumidero de humedad durante los primeros días, y es a partir del cuarto día cuando se convierte en fuente, dominando, co-

mo ya se comentó, a partir del séptimo día.

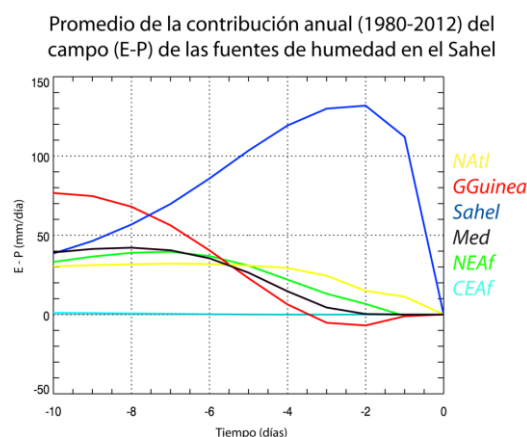


Fig. 5. Series temporales de $(E - P)_n$ calculadas n días hacia atrás en el tiempo ($n=1-10$) para la región del Sahel e integrados sobre cada región fuente anualmente para el período de 1980-2012.

La fuente del Atlántico Norte (NAtl—línea amarilla) también contribuye desde el primer día, con un aporte de humedad casi constante a partir del cuarto día, alcanzando el máximo el séptimo (32.1 mm/día). Med (línea negra) y NEAf (línea verde) aportan humedad a partir del segundo día, ambas lo hacen de forma similar, siendo máxima su contribución el octavo día en el caso de Med y el séptimo en el caso de NEAf (42.2 y 39.6 mm/día, respectivamente). Desde la fuente CEAF (línea azul claro) el aporte de humedad es muy inferior a las demás debido a su menor tamaño. Su contribución es positiva a partir del quinto día y aumenta conforme transcurren los días de transporte.

En la Tabla 1 se muestra el valor acumulado de $(E-P)$ sobre cada una de las fuentes del Sahel para los 10 días de retrotrayectorias. Las fuentes de humedad se definieron en base anual, según la Figura 2. Así, se puede ver como anualmente la fuente de humedad dominante para la región del Sahel es ella misma a través de los procesos de evaporación local (*recycling*). La segunda fuente de humedad en importancia es el Golfo de Guinea,

debido en gran medida a su aporte de durante la temporada del monzón. Las fuentes del Atlántico Norte (NAtl), Noreste de África (NEAf) y la cuenca del Mediterráneo (Med) tienen una contribución anual similar comprendida entre 240-270 mm/día. Por último la fuente de centro Este de África (CEAf) tiene una contribución muy inferior al resto de las demás fuentes de humedad debido a su área más reducida.

(E-P) acumulado diario (mm/día)	
Sahel	889,6
GGuinea	332,2
NAtl	268,1
NEAf	257,8
Med	244,2
CEAf	3,3

TABLA 1. Valores de (E – P) acumulados para los 10 días de retro trayectorias para el periodo de 1980-2012 para cada fuente de humedad del Sahel.

En la Figura 6 se muestran las series temporales estacionales de (E-P) de la contribución integrada a 10 días hacia atrás de cada una de las fuentes definidas en la Figura 3. Las fuentes de humedad en este caso, están definidas estacionalmente, es decir, los límites, y por tanto el tamaño de las fuentes, varía en función de la estación. La contribución se representa en una escala ajustada para cada estación.

Promedio de la contribución estacional (1980-2012) del campo (E-P) de las fuentes de humedad en el Sahel

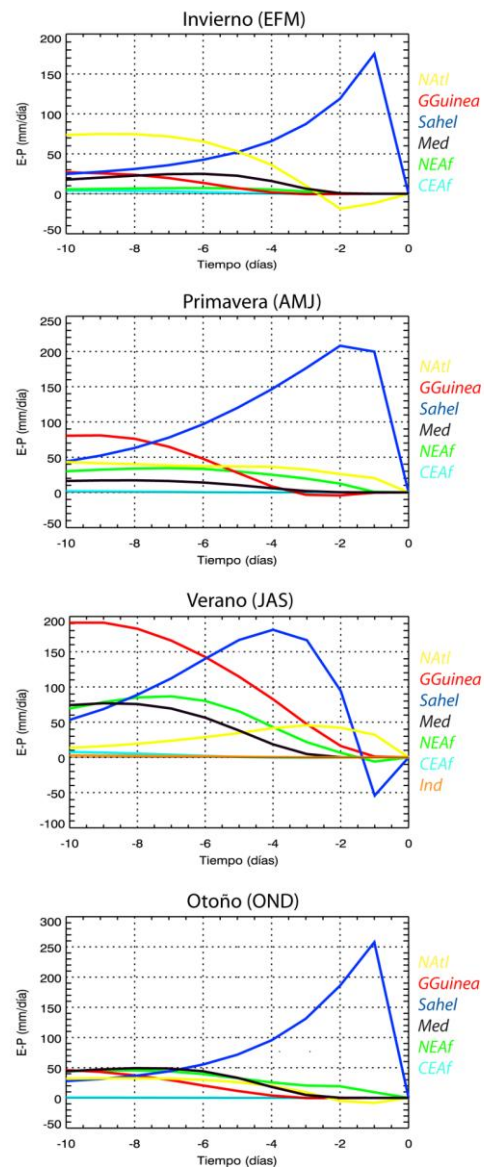


Fig. 6. Series temporales de (E – P)_n calculadas n días hacia atrás en el tiempo (n=1-10) para la región del Sahel e integrados sobre cada región fuente estacionalmente para el periodo de 1980-2012.

(E-P) acumulado diario (mm/día)							
Invierno (EFM)		Primavera (AMJ)		Verano (JAS)		Otoño (OND)	
Sahel	660,9	Sahel	1184071	GGuinea	1134927	Sahel	936,3
NAtl	429,3	GGuinea	379,0	Sahel	1017252	NEAf	325,3
Med	155,0	NAtl	352,0	NEAf	530,2	Med	289,6
GGuinea	118,4	NEAf	250,7	Med	413,9	NAtl	200,2
NEAf	47,2	Med	98,9	NAtl	297,2	GGuinea	192,3
CEAf	17,1	CEAf	4,4	CEAf	26,0	CEAf	1,8
				Ind	10,9		

TABLA 2. Valores de (E – P) acumulados para los 10 días de retro trayectorias para el periodo de 1980 a 2012 para cada fuente de humedad del Sahel.

La fuente del Sahel (línea azul oscuro) es la principal fuente de humedad durante las cuatro estaciones, presentando un patrón algo diferente durante la temporada del monzón (JAS). En general el Sahel aporta humedad a través de los procesos de evaporación local (*recycling*) dominando durante los primeros días de transporte. La fuente CEAF (línea azul claro) apenas contribuye al aporte de humedad a la región del Sahel y tiene muy poca variación a lo largo de los diez días. El resto de fuentes, NATl (línea amarilla), Med (línea negra) y NEAF (línea verde) tienen una mayor variabilidad estacional.

Durante la temporada del monzón aparece una nueva fuente de humedad sobre el océano Índico (línea naranja), además es durante la temporada del monzón (JAS), cuando las fuentes de humedad presentan una mayor variabilidad. La fuente dominante, de nuevo, desde el segundo hasta el sexto día es la propia región del Sahel. El primer día debido a las altas precipitaciones, el Sahel actúa como sumidero de humedad. Como consecuencia del cambio en el régimen de viento durante el monzón se produce un flujo del Sur-Suroeste que favorece la entrada de humedad procedente de la fuente GGuinea y que hace que esta fuente se convierta en la dominante a partir del sexto día, con un aporte que va en aumento conforme transcurren los días. NATl tiene una contribución positiva los diez días de transporte, con un máximo el tercer día, disminuyendo posteriormente. Las fuentes NEAF y Med siguen una distribución similar, con un aporte de humedad que comienza a ser relevante en el caso de NEAF el segundo día, y en el caso de Med a partir del tercer día. La fuente CEAF aporta humedad a la región con una contribución que aumenta conformen avanzan los días. La fuente del Índico tiene un aporte de humedad

positivo, sin embargo su contribución en comparación con el resto de fuentes de humedad es muy pequeña.

En la Tabla 2 se muestra el valor acumulado estacional del campo (E-P) durante los 10 días de las retrotrayectorias promediadas para cada estación del año. Las fuentes de humedad en este caso se definen de modo estacional, es decir, para cada estación del año se toma el umbral de 0.10 mm/día (línea verde en la Figura 3). El propio Sahel a través de los mecanismos de evaporación local (*recycling*) es la fuente de humedad dominante durante todas las estaciones, a excepción de la temporada del monzón (JAS), cuando la fuente del Golfo de Guinea (GGuinea) toma mayor relevancia. Esta última fuente es la segunda fuente en importancia durante la época premonzón (primavera). En el resto de las estaciones GGuinea tiene una contribución menor dado que la fuente se encuentra separada de la región destino por la banda de precipitaciones asociadas a la ITCZ, donde parte del vapor de agua evaporada precipitará (valores negativos en la Figura 3). Las fuentes de NEAF y Med tienen una contribución significativa durante la temporada del monzón, constituyendo la tercera y cuarta fuente de humedad, respectivamente. Estas dos regiones fuente son absolutamente coherentes con el transporte hacia el Sahel a través de los vientos del NE durante el monzón. Durante la temporada de monzón se forma una baja térmica en la región del Sahel debido al fuerte calentamiento de la superficie terrestre. La formación de la baja térmica crea un flujo S-SE y N-NE favoreciendo la entrada de humedad en Sahel desde las fuentes del GGuinea, y Med y NEAF. Durante la etapa de postmonzón, en otoño, NEAF y Med constituyen la segunda y tercera fuentes dominantes. NATl tiene un aporte que disminuye

estacionalmente, siendo máximo en invierno (429.3 mm/día) y mínimo en otoño (200.2 mm/día). La fuente CEAf constituye la sexta fuente de humedad en importancia durante las cuatro estaciones, con un aporte de humedad máximo en la temporada del monzón (25.96 mm/día) y muy inferior durante las etapas de premonzón y postmonzón. El aporte de humedad desde la fuente del Índico (Ind), que aparece sólo durante la época monzónica, es muy inferior al resto y conforma la séptima fuente en importancia.

3.3. Ciclo anual de las fuentes de humedad

En la Figura 7 se representa la contribución media interanual de las seis fuentes de humedad integrada para la región del Sahel. Además se representa también la desviación estándar (línea continua) y el valor máximo y mínimo mensual (asteriscos) para cada fuente. Las fuentes fueron definidas con los límites en base anual según la Figura 3.

El ciclo anual en la fuente de humedad del Sahel tiene una contribución media máxima entorno a 120 mm/día durante los meses de premonzón (abril–junio) y postmonzón (octubre–noviembre), con un mínimo detectado agosto de 55.5 mm/día. Este mínimo coincide con el pico de lluvias de la temporada del monzón.

Como se comentó en la introducción, durante la temporada del monzón se produce un cambio en el régimen de vientos y la humedad procede fundamentalmente de la fuente sobre el Golfo de Guinea por lo que los vientos del Sur transportan la humedad desde fuente hasta el Sahel desde julio a septiembre. Una de las condiciones importantes para que la evaporación se

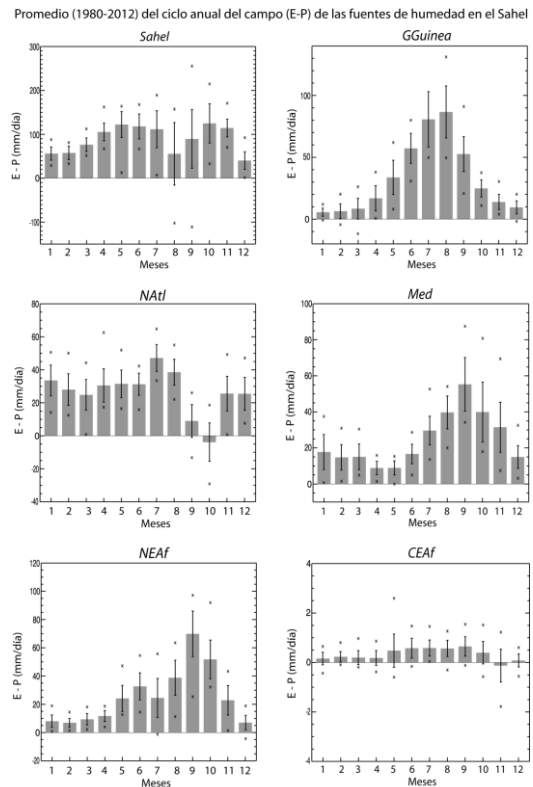


Fig. 7. Contribución media mensual de las fuentes de humedad integradas para el Sahel durante los 10 días de retro trayectorias para el período de 1980-2012.

produzca es exista viento sobre la región fuente, y además a mayor intensidad de éste, mayor capacidad evaporativa habrá. Así pues, GGuinea presenta un máximo de (E-P) en agosto (86.7 mm/día) que coincide con el máximo de lluvias en el Sahel. Es también durante el mes de agosto cuando la variabilidad es mayor (mayor desviación estándar). Fuera de la temporada del monzón, la fuente GGuinea disminuye su contribución de humedad a la región destino. Recordemos que el Golfo de Guinea constituye la segunda fuente más importante para la región del Sahel después de los procesos de evaporación local.

La fuente del Atlántico Norte presenta una contribución constante a lo largo del año con máximos de (E - P) durante los meses del monzón (julio, 47.2 mm/día), época monzónica, y un descenso muy acusado hasta los meses de invierno, cuando se llega a valores

incluso negativos en octubre. Estos valores negativos se deben a la definición del área fuente en base anual, que para los meses de septiembre y octubre engloba regiones con balance negativo de (E – P) debido al desarrollo de la ITCZ al Sur del Sahel, entre la fuente estacional y la caja destino.

La fuente del Mediterráneo muestra un ciclo estacional muy marcado, con los máximos durante los meses de agosto y octubre y los mínimos durante abril y mayo. Este ciclo de (E–P) es absolutamente coherente con resultados calculados con otras medidas (Mariotti, 2002), lo que valida el método empleado en este trabajo.

La fuente del Noreste de África tiene un ciclo estacional de (E–P) con valores máximos de mayo a octubre, con un máximo de humedad que se produce el mes de septiembre.

La fuente del Centro Este de África tiene una contribución muy pequeña en la región del Sahel como se aprecia en la Figura 7. Su contribución apenas supera los 0.5 mm/día los meses en los que mayor es su aporte, de mayo a octubre. El resto del año su aporte es inferior a este valor, alcanzando su mínimo en el mes de noviembre con valores negativos, cuando actúa como sumidero de humedad.

3.4. Relación con patrones de teleconexión

En el siguiente apartado se realiza un análisis de correlaciones lineales (Pearson) entre los patrones de teleconexión climática como la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), el fenómeno de El Niño- Oscilación del Sur (ENSO), y el Monzón de África Occidental (WASM) con las series de (E-P) de las fuentes de humedad para la región del Sahel. Simplemente se apuntará a los resultados obtenidos sin entrar en interpretaciones climáticas.

En el caso NAO se emplean los datos *National Center of Atmospheric Research* (NCAR) obtenidos de https://climatedataguide.ucar.edu/sites/default/files/climate_index_files/nao_pc_monthly_0.txt. NAO tiene influencia durante todo el año, pero es en la estación de invierno donde presenta una señal más intensa. Es por esto que el cálculo de la correlación se realizó durante esta estación, definida por los meses de enero a marzo (EFM).

ENSO es un patrón de teleconexión en el que existe un fuerte acoplamiento océano-atmósfera, de forma que el índice de ENSO tiene una componente oceánica (EN) basada en la SST y una componente atmosférica (SOI) basada en diferencia de presiones entre dos puntos del océano Pacífico. Los cálculos en este caso se realizan en base anual ya que ENSO tiene influencia durante todo el año a escala global. Los datos de ambos índice se obtuvieron de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA); EN en el enlace

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml para la región Niño3.4 y SOI en

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/soi>.

El índice del WASM está calculado para los meses de mayor influencia del fenómeno, de julio a septiembre (JAS; Li y Zeng, 2002, 2003 y 2005).

Se obtuvieron correlaciones significativas con NAO negativas al 95% con la fuente del GGuinea y positivas al 99% con las fuentes de NEAf y Med. Con el índice se obtuvo una correlación negativa al 99% con el Med y con SOI una correlación negativa al 90% con NEAf y positiva al 90% con Med. Por último se evaluó el Monzón de África Occidental (WASMI) y se obtuvieron correlaciones significativas negativas al 99% con la fuente NEAf y al 95% con la fuentes del CEAF y Med.

Estos resultados requieren de una interpretación a fondo que se llevará a cabo en un trabajo posterior.

4. Conclusiones

Se identificaron las principales fuentes de humedad para la región del Sahel para el periodo de estudio de 33 años. El estudio anual muestra que la principal fuente de humedad para la región del Sahel son los propios mecanismos de evaporación local (recycling), seguidos de la fuente de humedad del Golfo de Guinea que aparece como segunda fuente dominante debido a su influencia durante la temporada de monzón. El resto de las fuentes de humedad el Atlántico Norte, el Noreste de África y la cuenca del Mediterráneo tienen una contribución similar. Finalmente la última fuente de humedad en importancia para la región del Sahel es la fuente del centro Este de África que apenas aporta humedad a la región del Sahel debido a su menor área.

Se realizó un análisis de retrotrayectorias que revela que los propios mecanismos de evaporación local (recycling) de la región del Sahel constituyen la fuente de humedad dominante los primeros días de transporte y son desplazados por la fuente de humedad del Golfo de Guinea al séptimo día, donde la fuente del Golfo de Guinea pasa a ser la fuente de humedad dominante los días finales de transporte.

De forma estacional la fuente de humedad dominante en el región del Sahel son los procesos de evaporación local (recycling) durante el invierno (EFM), primavera (AMJ) y otoño (OND); en verano (JAS), que coincide con la temporada de monzón, los propios procesos de evaporación local de la región del Sahel son desplazados por la fuente de humedad del Golfo de Guinea.

Se realizó un estudio del ciclo anual de las 6 fuentes de humedad para ver la

(1980-2012), las cuales son a escala anual: el propio Sahel, a través de los procesos de evaporación local, el Golfo de Guinea, el Atlántico Norte, la zona del Noreste de África, la cuenca del mar Mediterráneo y la zona del Centro Este de África. A escala estacional aparece una nueva fuente de humedad sobre el océano Índico durante el verano (JAS – temporada del Monzón).

La variabilidad de estas durante el año para el período de estudio (1980-2012). La fuente de humedad del Sahel, a través de los propios procesos de evaporación local constituye la fuente de humedad que tiene un mayor aporte de humedad a la región de estudio durante todos los meses, con un mínimo en agosto que coincide con el máximo de acción del monzón. La fuente del Golfo de Guinea tiene un aporte máximo los meses de monzón, con un pico en el mes de agosto. La fuente de Atlántico Norte tiene una contribución similar durante todo el año a excepción del septiembre y octubre donde tiene una contribución inferior debido a la posición de la ZCIT. Las fuentes de humedad de la cuenca del Mediterráneo y Noreste de África tienen una contribución similar en la región del Sahel con un máximo ambas al final de la temporada del monzón debido al flujo de NE a través de los vientos de Harmattan.

Debido al amplio período de estudio que se ha considerado en este trabajo (1980-2012), se ha podido estudiar la relación existente entre los principales patrones de teleconexión climática y las fuentes de humedad a través de un análisis de correlación lineal mediante el coeficiente de Pearson. Se encontró que existe una relación lineal durante el invierno (EFM) entre la NAO y las fuentes del Golfo de Guinea (95%), Noreste de África (99%) y la cuenca del Mediterráneo (99%). También se obtienen correlaciones significativas entre El Niño y la fuente de la cuenca del Mediterráneo (99%). El Monzón de África

Occidental muestra correlaciones significativas en las fuentes del centro Este de África (95%), Noreste de África (99%) y la cuenca del Mediterráneo (95%).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el MINECO a través de proyecto TRAMO ("TRANsport of MOisture"), y cofinanciado por FEDER.

Referencias

- Lebel, T., Diedhiou, A., Laurent, H. (2003). Seasonal cycle and interannual variability of the Sahelian rainfall at hydrological scales. *Journal of Geophysical Research D*, vol. 108, no. 8, pp. 14–11.
- Li, J., and Zeng Q. (2002) A unified monsoon index, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 1-4.
- Li, J. P., and Zeng Q. C. (2003) A new monsoon index and the geographical distribution of the global monsoons, *Adv. Atmos. Sci.*, 20, 299-302.
- Li, J. P., and Zeng Q. C. (2005) A new monsoon index, its interannual variability and relation with monsoon precipitation, *Climatic and Environmental Research*, 10, 351-365.
- Nieto, R., Gimeno, L., Trigo, R. M. (2006). A Lagrangian identification of major sources of Sahel moisture, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L18707, doi:10.1029/2006GL027232.
- Nicholson, S.E. (2013), *The West African Sahel: A Review of Recent Studies on the Rainfall Regime and Its Interannual Variability*, ISRN Meteorology, 1-32.
- Mariotti A., Struglia, M. V., Zeng, N., Lau, K.M. (2002). The hydrological cycle in the Mediterranean region and implications for the water budget of the Mediterranean Sea. *Journal of Climate*, 15 (13): 1674-1690.
- Stohl, A., Hittenberger, M., and Wotawa, G. (1998). Validation of the Lagrangian particle dispersion model FLEXPART against large scale tracer experiment data, *Atmos. Environ.*, 32, 4245–4264.
- Stohl, A., and James P. (2004). A Lagrangian analysis of the atmospheric branch of the global water cycle: Part 1: Method description, validation, and demonstration for the August 2002 flooding in central Europe, *J. Hydrometeor.*, 5, 656-678.
- Stohl, A., and James P. (2005). A Lagrangian analysis of the atmospheric branch of the global water cycle. Part II: Earth's river catchments, ocean basins, and moisture transports between them, *J. Hydrometeorol.*, 6, 961–984, doi:10.1175/JHM470.1.