

The FLEXible PARTicle dispersion model (FLEXPART)

Rogert Sorí Gómez
rogert.sori@uvigo.es

FLEXPART: Introducción



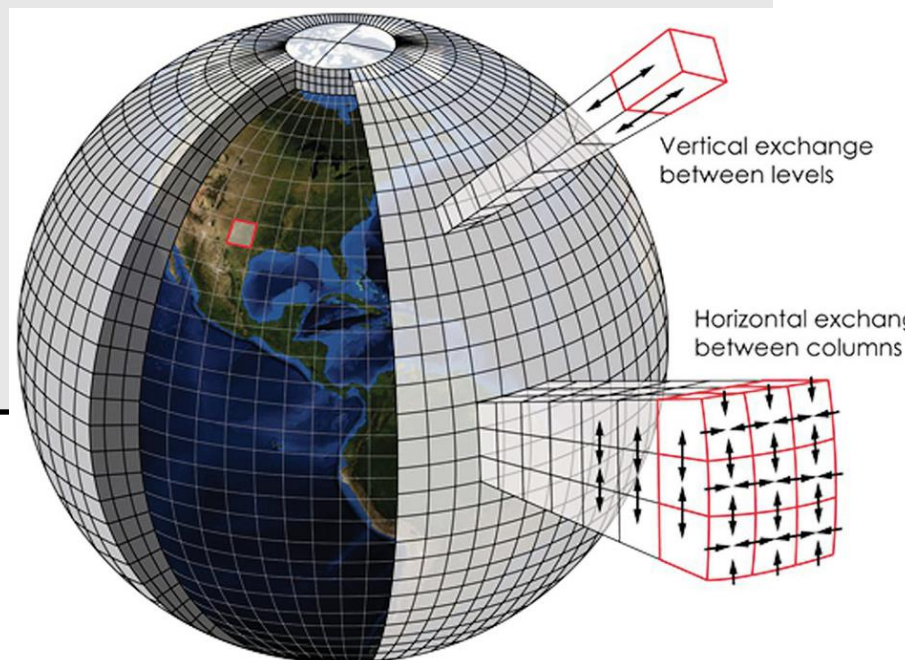
<https://www.flexpart.eu/>

1. Modelo lagrangiano de dispersión de partículas (parcelas)
2. Fue inicialmente desarrollado para el estudio de la dispersión de contaminantes
3. FLEXPART v.10, código fuente (desde su desarrollo inicial) disponible de manera gratuita bajo la Licencia Pública General de GNU
4. Escrito en un código estándar de Fortran 95
5. Ha sido probado con varios compiladores en distintos sistemas operativos.

FLEXPART: Datos de entrada

Datos de entrada (ECMWF): Cada 6h resolución $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 61 niveles en la vertical

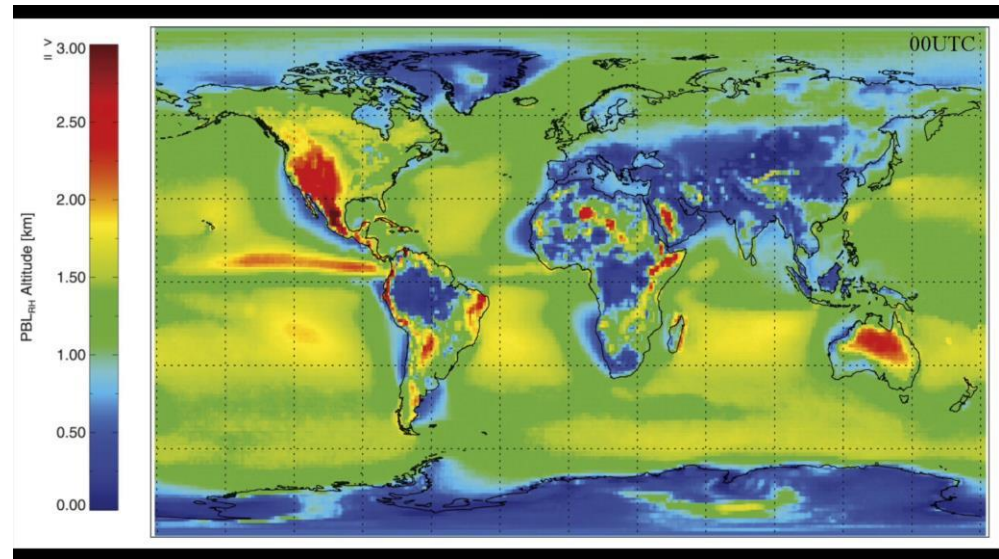
Datos bidimensionales	Datos tridimensionales
Presión en superficie	Componente horizontal y vertical del viento
Componentes horizontales de viento a 10m	Temperatura
T del pto de rocío	Humedad específica
Precipitación convectiva y a larga escala	
Flujo de calor sensible	
Topografía	
Tensión en superficie norte/sur y este/oeste	
Desviación estándar subgrid de la topografía	



FLEXPART: Parametrizaciones

Parametrizaciones de la PBL:

- La altura de la PBL se calcula usando el número crítico de Richardson
- Consideraciones de las variaciones espaciales inducidas por la topografía:



Variación diaria y geográfica de la altura de la PBL. Adaptado de Engeln y Teixeira (2013)*

- Diferencia entre condiciones convectivas y estable debida a la topografía subgrid

(Planetary Boundary Layer - PBL)

*Engeln AV, Teixeira J (2013) A planetary boundary layer height climatology derived from ECMWF reanalysis data. J Clim 26:6575–6590. doi:[10.1175/JCLI-D-12-00385.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00385.1)

FLEXPART: Enfoque lagrangiano

Transporte:

Ec. de transporte “aceleración cero”

$$\mathbf{X}(t + \Delta t) = \mathbf{X}(t) + \mathbf{v}(\mathbf{X}, t)\Delta t$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{v} + \mathbf{v}_t + \mathbf{v}_m$$

$\mathbf{v} \rightarrow$ viento escala grid

$\mathbf{v}_t \rightarrow$ fluctuaciones viento turbulentas

$\mathbf{v}_m \rightarrow$ fluctuaciones viento mesoescala

} Parametrizaciones
basadas en la ec. de
Langevin

Consultar este artículo para más detalles:

https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/5/4/1525-7541_2004_005_0656_alaoa2_0_co_2.xml

FLEXPART: Enfoque lagrangiano

Enfoque Lagrangiano

$$E - P = \frac{\sum_{k=1}^K (e-p)_k}{A}$$

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

vs Euleriana:

The principle of conservation of mass states that the rate of change of water storage W must be balanced by the vertically integrated moisture flux divergence $\nabla \cdot \Theta$ and the difference between evaporation "E" and precipitation "P" when the balance water residual is small, and is represented by:

$$E - P = \frac{\partial w}{\partial t} + \nabla \theta$$

when the averaging time period is large (several years), the water vapour storage term becomes small and can be neglected so that the vertically integrated moisture flux divergence balances the difference between evaporation and precipitation.

$$w = \frac{1}{g} \int_0^{p_s} q dp \quad \text{Agua precipitable}$$

$$\theta = \frac{1}{g} \int_0^{p_s} q \vec{v} dp \quad \text{Flujo de humedad integrado en la vertical}$$

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2012RG000389>

FLEXPART: Transporte de humedad

Datos de salida:

Variable	Símbolo	Unidad
<i>Latitud</i>	<i>lat</i>	
<i>Longitud</i>	<i>lon</i>	
<i>Altura</i>	<i>H</i>	<i>m</i>
<i>Altura topográfica</i>	<i>TH</i>	<i>m</i>
<i>Vorticidad potencial</i>	<i>PV</i>	$10^{-6}(m^2K/skg)$
<i>Humedad específica</i>	<i>q</i>	<i>g/kg</i>
<i>Densidad del aire</i>	ρ	<i>kg/m³</i>
<i>Altura de mezcla</i>	<i>hmixi</i>	<i>m</i>
<i>Temperatura</i>	<i>T</i>	<i>K</i>

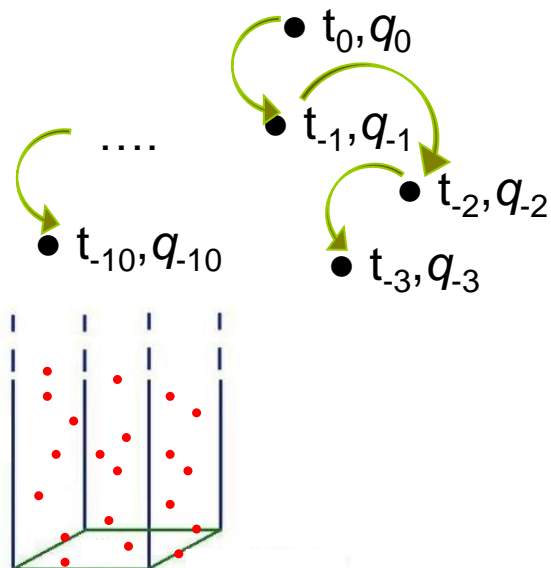
Almacenados
cada 6 horas (00,
06, 12, 18 UTC)
para cada
partícula

FLEXPART: Transporte de humedad

La masa total de la atmósfera (M) se divide en un número de partículas N con igual masa $m = M/N$ y cada partícula es advectada según la ecuación de movimiento.

En una partícula hipotética que es transportada, q se conserva a no ser que la evaporación o la precipitación provea o retire humedad.

El cambio de contenido de vapor de una partícula puede ser expresado como:



$$e - p = m (dq/dt)$$

$e \rightarrow$ ganancias de humedad

$p \rightarrow$ pérdidas de humedad

$k \rightarrow$ número de parcelas en la vertical

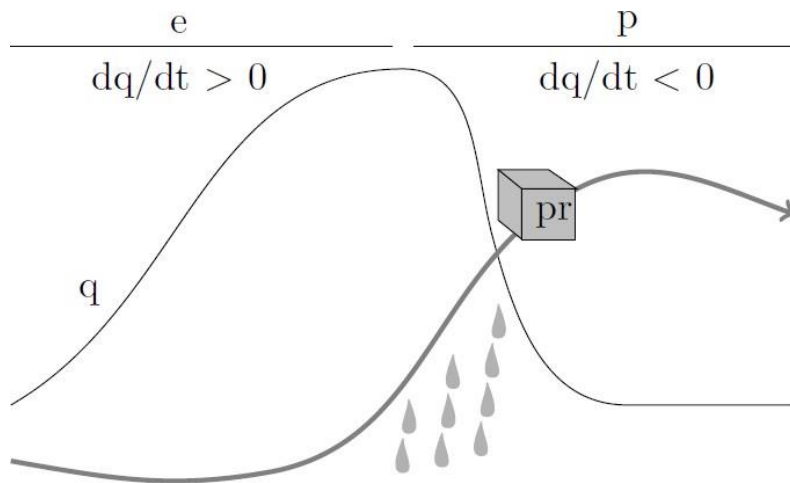
Integramos en la vertical

$$E - P \approx \frac{\sum_{k=1}^k (e - p)}{A},$$

$(E - P) > 0 \rightarrow E > P \rightarrow$ Fuentes de humedad

$(E - P) < 0 \rightarrow P > E \rightarrow$ Sumideros de humedad

FLEXPART: Transporte de humedad



Representación de una partícula sufriendo un ciclo de evaporación y precipitación. (Stohl and James, 2004)*

e y p no pueden ser analizadas independientemente

Se evalúa el balance $e - p$

Se puede considerar:

$$e \rightarrow \frac{dq}{d} > 0 \quad \text{evaporación neta}$$

$$p \rightarrow \frac{dq}{d} < 0 \quad \text{precipitación neta}$$

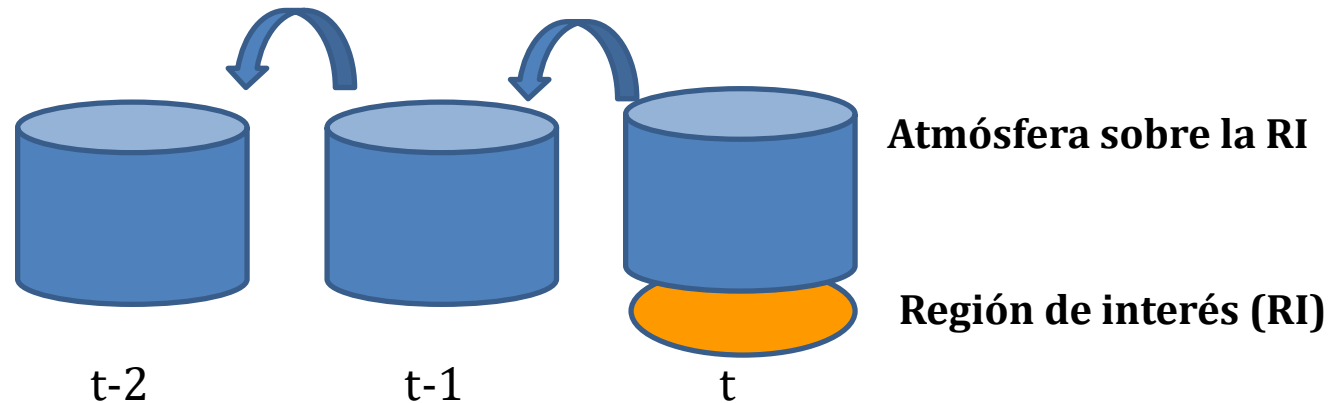
Phase changes in clouds are, therefore, also included in $(e - p)$ estimates.

*A. Stohl, P. James, A Lagrangian analysis of the atmospheric branch of the global water cycle. Part I: method description, validation and demonstration for the august 2002 flooding in Central Europe J. Hydrometeorol., 5 (2004), pp. 656-678

FLEXPART: Transporte de humedad

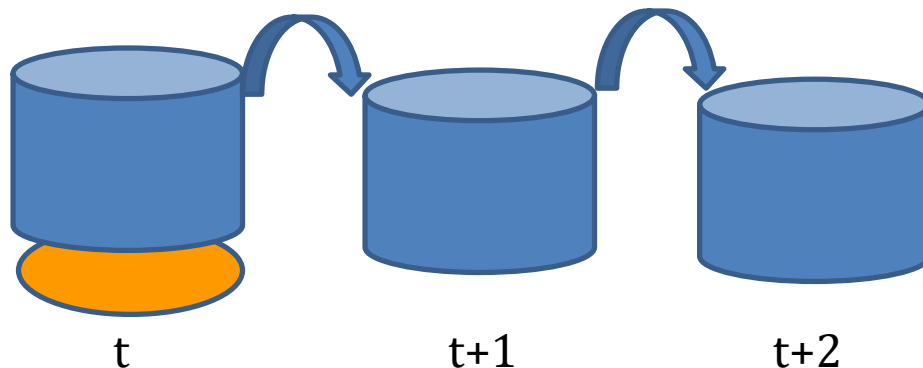
Modo Backward: Seguimiento de las parcelas hacia atrás en el tiempo

- Permite determinar desde dónde y cuánta humedad atmosférica ganó ($E-P > 0$) o perdió ($E-P < 0$) una masa de aire antes de llegar a una región de interés.



Modo Forward: Seguimiento de las partículas hacia adelante en el tiempo

- Permite analizar donde perdieron o ganaron humedad las parcelas en su trayectoria desde una región fuente



FLEXPART: Transporte de humedad

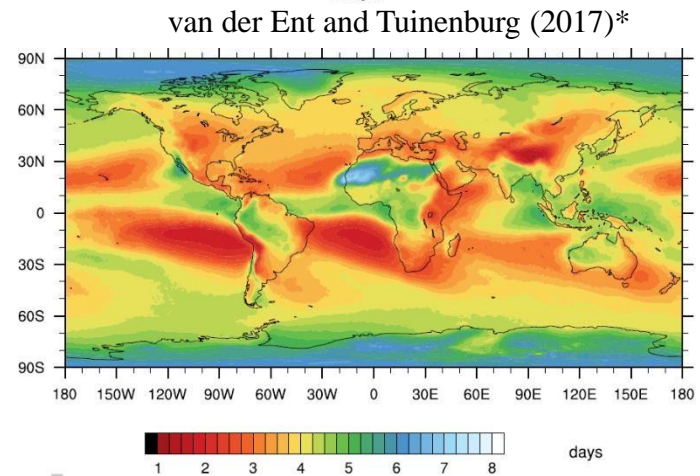
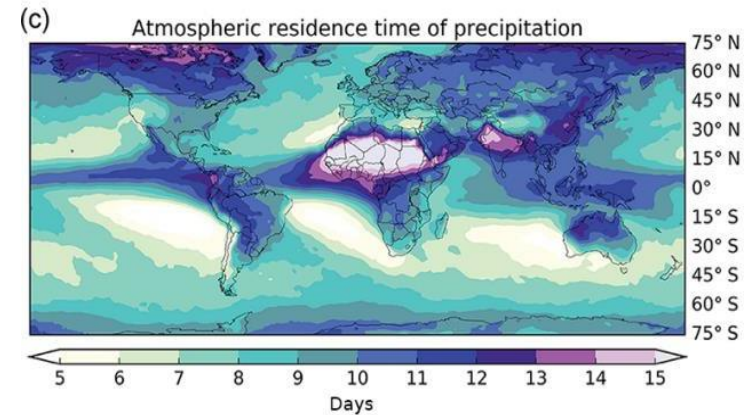
Tiempo de residencia: tiempo que la humedad permanece en la atmósfera entre la evaporación desde la superficie y la posterior precipitación. El tiempo de residencia depende de la localización geográfica

Tiempo tradicional medio global: 10 días
(Numaguti et al., 1999)

Nuevas aproximaciones del tiempo de residencia:

8-10 días

4-5 días



Läderach and Sodemann (2016)**

*van der Ent, R.J., and Tuinenburg, O.A. (2017), **The residence time of water in the atmosphere revisited**, Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 779-790, doi:10.5194/hess-21-779-2017

**Läderach, A., and H. Sodemann (2016), A revised picture of the atmospheric moisture residence time, Geophys. Res. Lett., 43, 924-933, doi:[10.1002/2015GL067449](https://doi.org/10.1002/2015GL067449).

FLEXPART: Transporte de humedad

Seguimiento partícula (tiempo de residencia) Salidas del modelo (q,t) , $(e-p)$
para cada partícula (cada 6 horas para cada día)

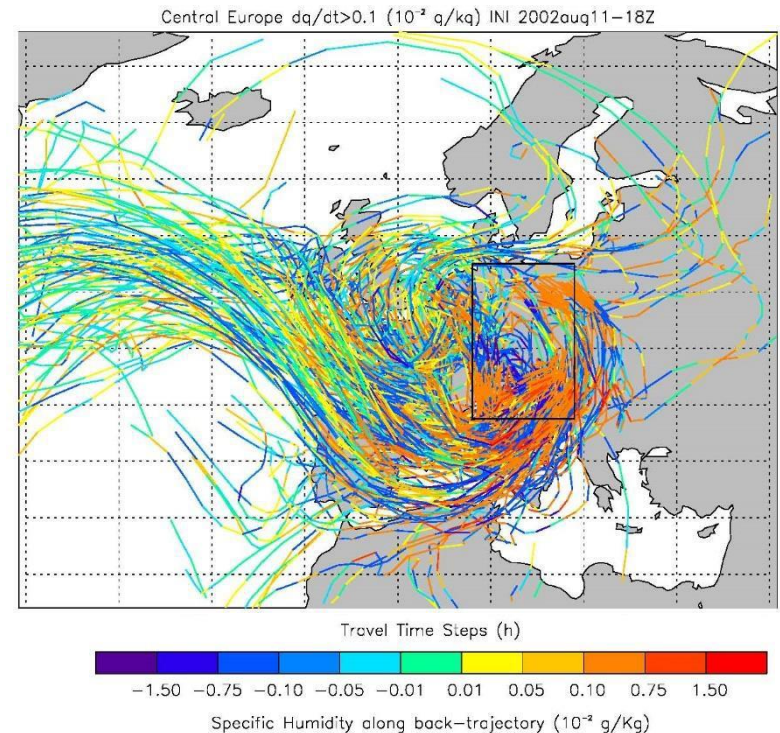
¿Cómo se presentar esta información?

1. Presentación directa de las trayectorias
2. Agrupamiento de las trayectorias y localización geográfica de las zonas de mayores cambios de humedad

FLEXPART: Transporte de humedad

Presentación directa:

Se trata de mostrar directamente la trayectoria de cada partícula y los cambios sufridos en ella.

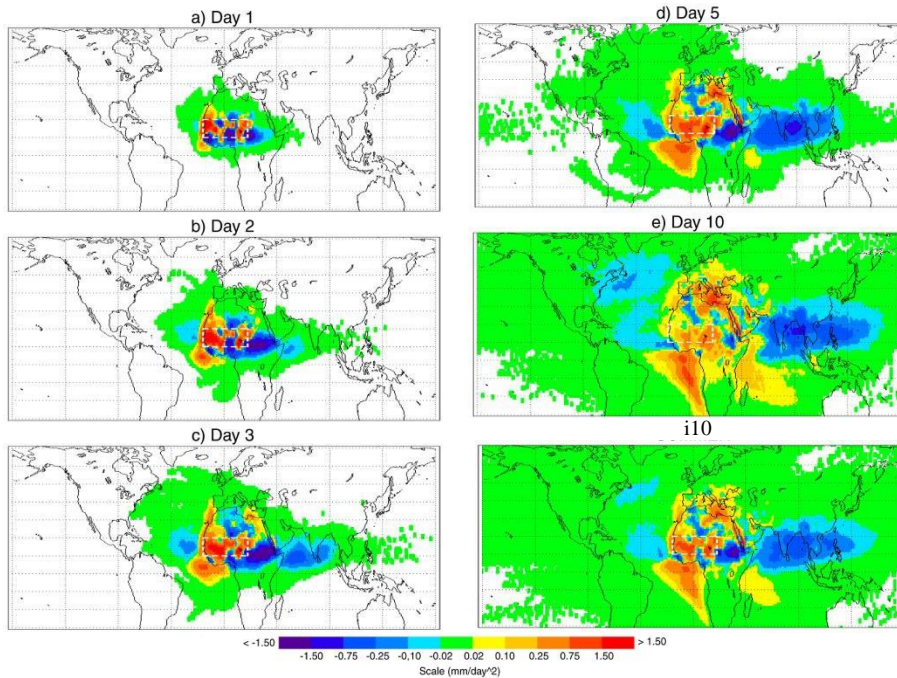


Representación backward de las trayectorias de las partículas que salen de Centro Europa.

FLEXPART: Transporte de humedad

Localización geográfica de fuentes y sumideros (periodos más largos):

Estacional:



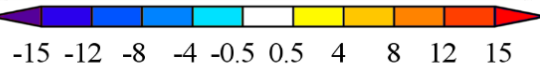
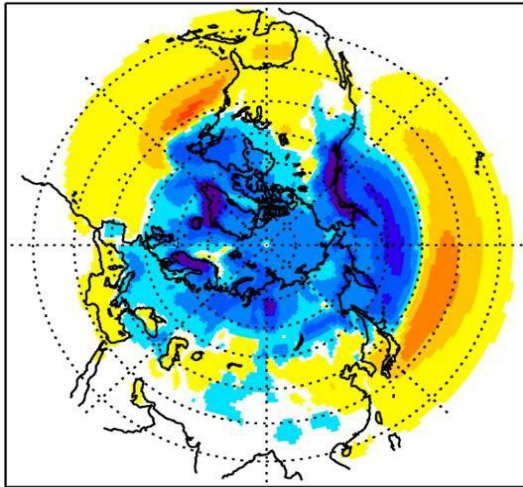
Medía estacional de las partículas de las trayectorias backward de las partículas que llegan al Sahel. Periodo 2000-2004 (Nieto et al., 2006)*

- Se hace el seguimiento para cada día del periodo de verano (Junio-Julio-Agosto).
- Para cada día se calcula E-P para cada pto de grid
- Se calcula la media de todos los días del periodo
- Se analiza E-P para cada uno de los días que se siguen las trayectorias o para el integrado

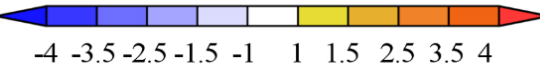
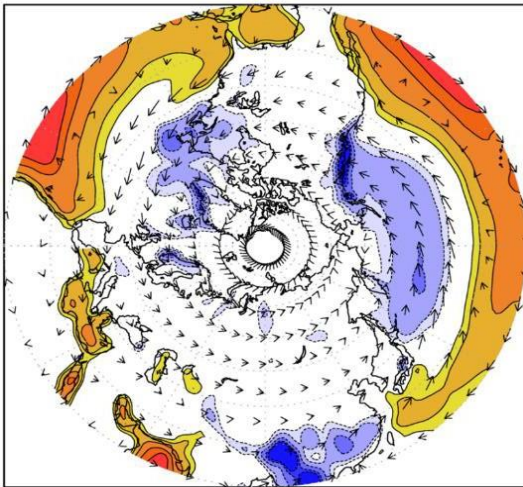
*Nieto, R., L. Gimeno, and R. M. Trigo (2006), A Lagrangian identification of major sources of Sahel moisture, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L18707, doi:[10.1029/2006GL027232](https://doi.org/10.1029/2006GL027232).

FLEXPART: Enfoque lagrangiano vs euleriano

Visión lagrangiana vs euleriana:



Lagrangiano: Flujo de humedad asociado a las partículas que en un momento determinado alcanzan una región objetivo

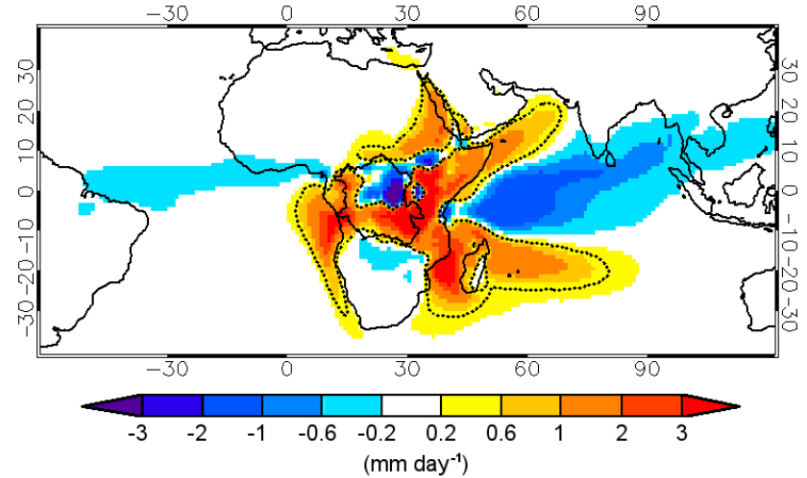


Euleriano: Flujo de humedad total en la columna atmosférica

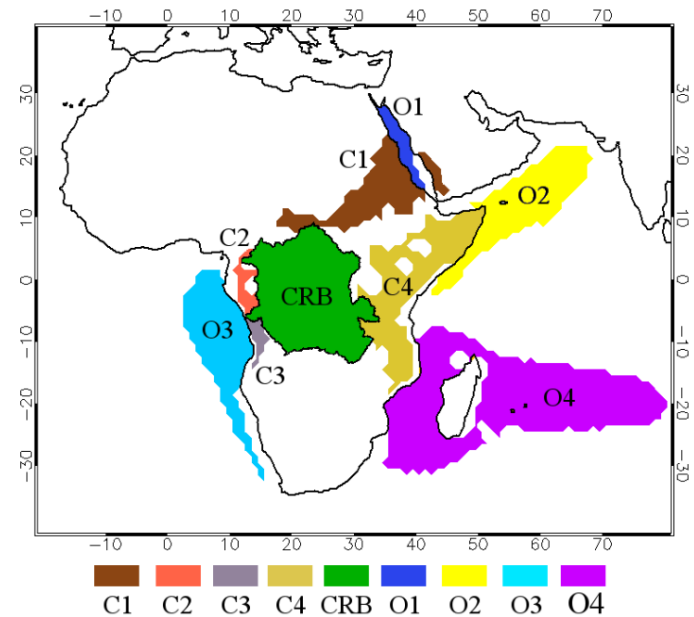
Vázquez et al., 2017.

FLEXPART: Relación fuente-sumidero (backward + forward)

1. Localizamos las fuentes de una región (análisis backward) de interés (Cuenca del Congo).



2. Analizamos la contribución de cada fuente a sobre la región (forward)



3. Determinación de la contribución a la precipitación desde cada cuenca

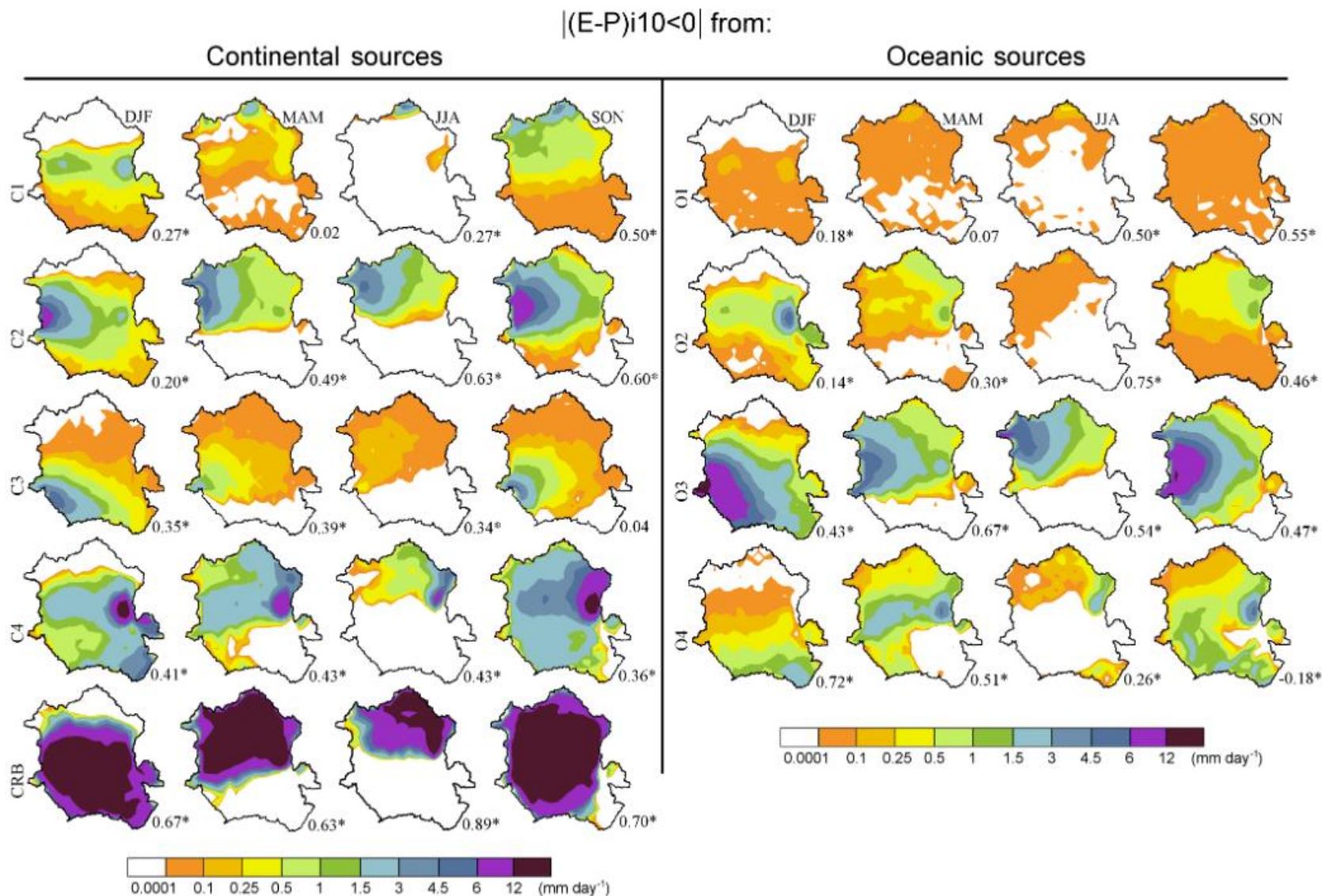


Figure 10. Seasonal mean $|(E - P)_{i10 < 0}|$ (mm day⁻¹) integrated forward from the moisture sources over the CRB for December–February (DJF), March–May (MAM), June–August (JJA), and September–November (SON). The number in the bottom-right corner of each plot indicates the correlation with the mean precipitation pattern (asterisks indicate significant values at $p < 0.05$). Period: 1980–2010.

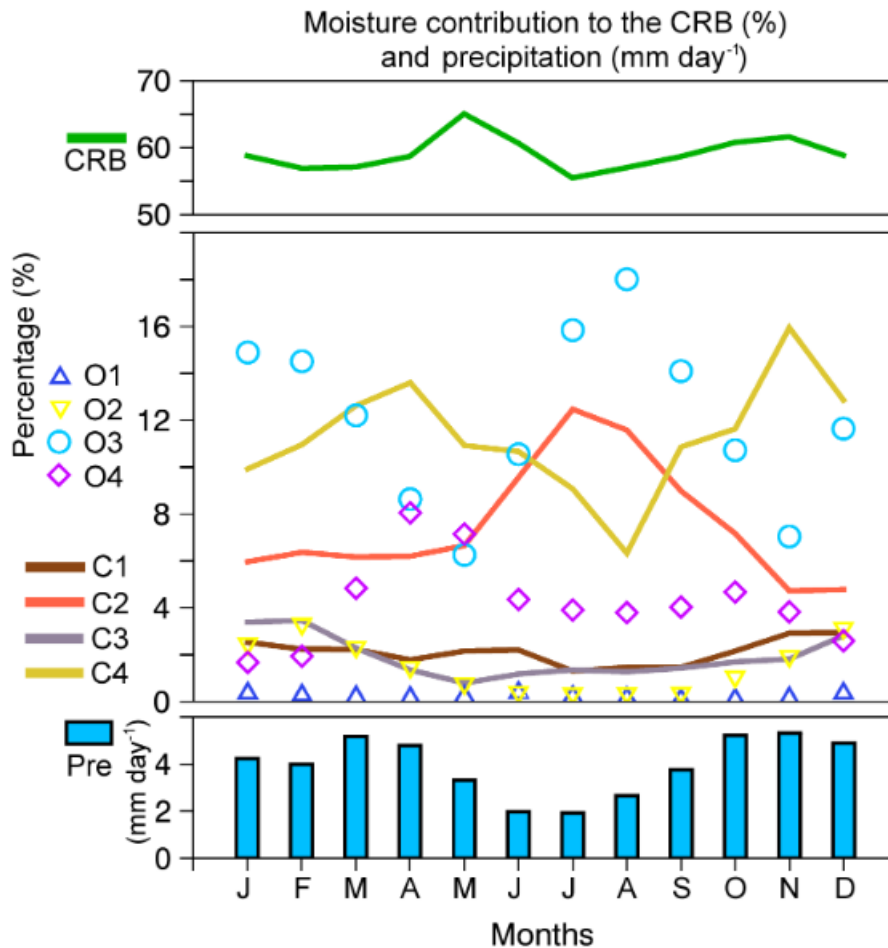


Figure 8. Monthly percent of moisture loss, which is calculated as $|(E - P) / 10|$ forward-integrated from each source over the CRB over 10 days of transport, and the monthly mean precipitation from the CRU datasets for the period 1980–2010.

FLEXPART: Aplicaciones al transporte de humedad

Distintas aplicaciones de FLEXPART para el análisis de transporte de humedad:

- Caracterización climática de las fuentes para una región
 - Sahel : Nieto et al. (2006)
 - Mediterraneo: Nieto et al. (2010)
 - Ártico: Vázquez et al. (2016)
- Analizar las zonas de influencia de la principales regiones evaporativas oceánicas: Gimeno et al. (2010)
- Estudio de inundaciones: Stohl and James (2004)
- Estudios de sequías: Drumond et al. (2017, etc.)
- Cuencas de ríos: Sorí et al., (2017, 2018; Ciric et al. (2016)
- Mecanismos de transporte atmosférico (LLJ y ARs): Ramos et al. (2016)

- Nieto, R., L. Gimeno, and R. M. Trigo (2006), A Lagrangian identification of major sources of Sahel moisture, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L18707, doi:10.1029/2006GL027232.
- Nieto, R., L. Gimeno, A. Drumond and E. Hernández (2010), A Lagrangian identification of the main moisture sources and sinks affecting the Mediterranean area, *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 5, vol. 6, 365-374
- Vázquez, M., R. Nieto, A. Drumond and L. Gimeno (2016), Moisture transport into the Arctic: Source-receptor relationships and the roles of atmospheric circulation and evaporation, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, doi:10.1002/2016JD025400
- Gimeno, L., A. Drumond, R. Nieto, R.M. Trigo and A. Stohl (2010), On the origin of continental precipitation, *Geophysical Research Letters*, 37, doi: 10.1029/2010GL043712
- Stohl A. and P. James (2004), A Lagrangian analysis of the atmospheric branch of the global water cycle. Part I: method description, validation and demonstration for the august 2002 flooding in Central Europe *J. Hydrometeorol.*, 5, pp. 656-678
- Drumond, A., L. Gimeno, R. Nieto, R.M. Trigo and S.M. Vicente-Serrano (2017), Drought episodes in the climatological sinks of the Mediterranean moisture source: The role of moisture transport, *Global and Planetary Change*, doi: 10.1016/j.gloplacha.2016.12.004
- Sorí, R., R. Nieto, S.M. Vicente-Serrano, A. Drumond and L. Gimeno (2017), A Lagrangian Perspective of the Hydrological Cycle in the Congo River Basin, *Earth System Dynamics*, doi:10.5194/esd-2017-21
- Ciric, D., M. Stojanovic, A. Drumond, R. Nieto, L. Gimeno (2016), Tracking the Origin of Moisture over the Danube River Basin Using a Lagrangian Approach, *Atmosphere*, 7(12), 162; doi:10.3390/atmos7120162
- Ramos, A.M., R. Nieto, R. Tomé, L. Gimeno, R.M. Trigo, M.L.R. Liberato, D.A. Lavers (2016), Atmospheric rivers moisture sources from a Lagrangian perspective, *Earth System Dynamics*, 7, 371-384, doi:10.5194/esd-7-371-2016