Universidade Vigo

Environmental | Physics | Laboratory
EPhysLab

Modelos de transporte lagrangiano - FLEXPART

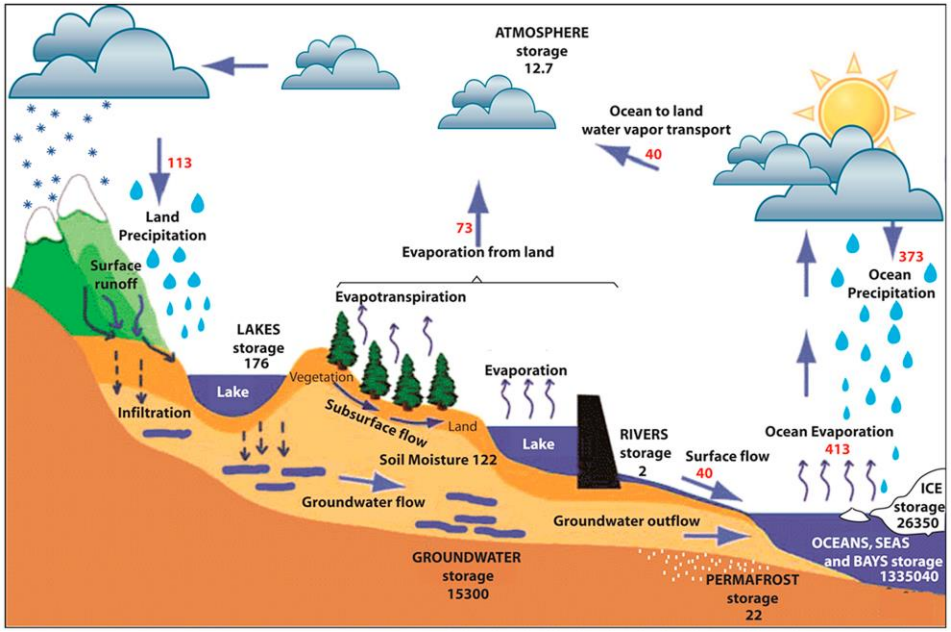
Marta Vázquez Domínguez

Contenidos

1. Importancia de los modelos de transporte de humedad
2. Metodologías para el análisis del transporte de humedad
3. Modelo Lagrangiano FLEXPART
    1. Principales consideraciones físicas del modelo
    2. FLEXPART como herramienta para el transporte de humedad
        1. Principios básicos
        2. ¿Cómo presentar lo resultados?
        3. Eulerian vs Lagrangiana
        4. Ejemplos de aplicaciones
4. Conclusiones

Introducción

Importancia de los modelos de transporte de humedad



Representación del ciclo hidrológico (Gimeno et al., 2012*)

Ciclo hidrológico ->

- evaporación
- Precipitación
- Conectadas a través del transporte atmosférico, oceánico e hidrológico

Océanos -> Fuentes netas de humedad -> E>P -> Transporte atmosférico hacia continente

Continentes -> sumideros netos de humedad -> P>E -> agua superficial alimenta ríos, agua subterráneas … -> descarga en el océano.

*L. Gimeno, A. Stohl, R.M. Trigo, F. Domínguez, K. Yoshimura, L. Yu, A. Drumond, A.M. Durán-Quesada, R. Nieto (2012) Oceanic and Terrestrial Sources of Continental Precipitation. Reviews of Geophysics, 50, RG4003, doi:10.1029/2012RG000389

Importancia de los modelos de transporte de humedad

- Atmósfera → solo un pequeña proporción del contenido global de agua
  → Rol principal conectando océano, lagos, ríos, zonas continentales…
  A través de transporte de humedad, evapotranspiración y precipitación

- Vapor de agua → 0.25% de la masa total atmosférica. Gran importancia regulando el clima y los patrones del tiempo.

- Debido a la amenaza del cambio climático es necesario entender el ciclo hidrológico y sus cambios en el tiempo. Especialmente su rama atmosférica

Metodologías para el análisis del transporte de humedad

Metodologías

Tres metodologías principales para analizar el transporte de humedad:

- Modelos analíticos o de caja
- Trazadores numéricos de vapor de agua
  - Euleriano
  - Lagrangiano
- Trazadores físicos de vapor de agua

Metodologías

Tres metodologías principales para analizar el transporte de humedad:

- Modelos analíticos o de caja: Permiten la identificación de la entrada y salida de humedad a través de límites laterales

Ventajas	Desventajas
Simplicidad. Utilizan pocos parámetros	No ofrecen información sobre los procesos que tienen lugar dentro de la propia caja. Desprecia procesos de frontera

Metodologías

Tres metodologías principales para analizar el transporte de humedad:

- Trazadores físicos de vapor de agua: Se basan en el uso de isotopos. Útiles para validación

Ventajas	Desventajas
Simplicidad. Cobertura global	Tiempo de cálculo
Incluye procesos verticales	Disponibilidad de datos para validación
Datos de entrada de reanálisis	
Combinación con GCM	No considera convección

Metodologías

Tres metodologías principales para analizar el transporte de humedad:

- Trazadores numéricos de vapor de agua(Euleriano): Se centran en regiones específicas del espacio a través de las cuales el fluido pasa a medida que transcurre el tiempo

Ventajas	Desventajas
Procesos atmosféricos detallados Circulación atmosférica realista	Dependen del sesgo del modelo Pobre respresentación parámetros ciclo hidrológico (escalas tiempo cortas) No incluye fuentes de humedad remotas

Metodologías

Tres metodologías principales para analizar el transporte de humedad:

- Trazadores numéricos de vapor de agua(Lagrangiano): Sigue las partículas a lo largo de sus trayectorias

Ventajas	Desventajas
Alta resolución espacial	Sensibilidad computacional en periodos cortos de tiempo y regiones pequeñas
Interpetación cuantitativa del origen de humedad	No son sencillos
No limitados por un dominio específico	Evaporación y precipitación no son fácilmente separables
Relación fuente-sumidero sencilla	Tasa de evaporación basada en cálculos en lugar de observaciones
Flujo de agua backward o forward	
Seguimiento realista de parcelas de aire	
Uso paralelo de información euleriana	

Modelo Lagrangiano FLEXPART

FLEXPART: Introducción

- Modelo lagrangiano de dispersión de partículas
- Inicialmente desarrollado para el estudio de la dispersión de contaminantes
- Se ha convertido en una poderosa herramienta en el estudio del transporte de humedad entre fuentes y sumideros
- FLEXPART v.10, código fuente (desde su desarrollo inicial) disponible de manera gratuita bajo la Licencia Pública General de GNU
- Usado por numerosos grupos de investigación de distintos países que son usuarios del modelo
- Escrito en un código estándar de Fortran 95
- Ha sido probado con varios compiladores en distintos sistemas operativos.

FLEXPART:
Consideraciones del modelo

FLEXPART: Consideraciones generales

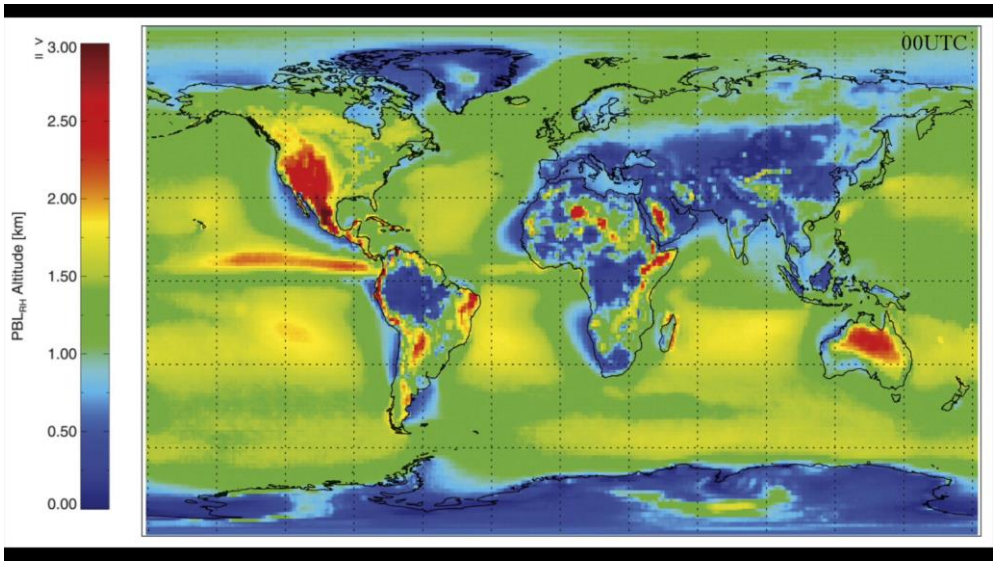
Datos de entrado (ECMWF): Cada 6h resolución 1ºx1º 61 niveles en la vertical

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: Consideraciones generales

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

*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

FLEXPART: Consideraciones generales

Transporte:

Ec. de transporte “aceleración cero”

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

$$v = \bar{v} + v_t + v_m$$

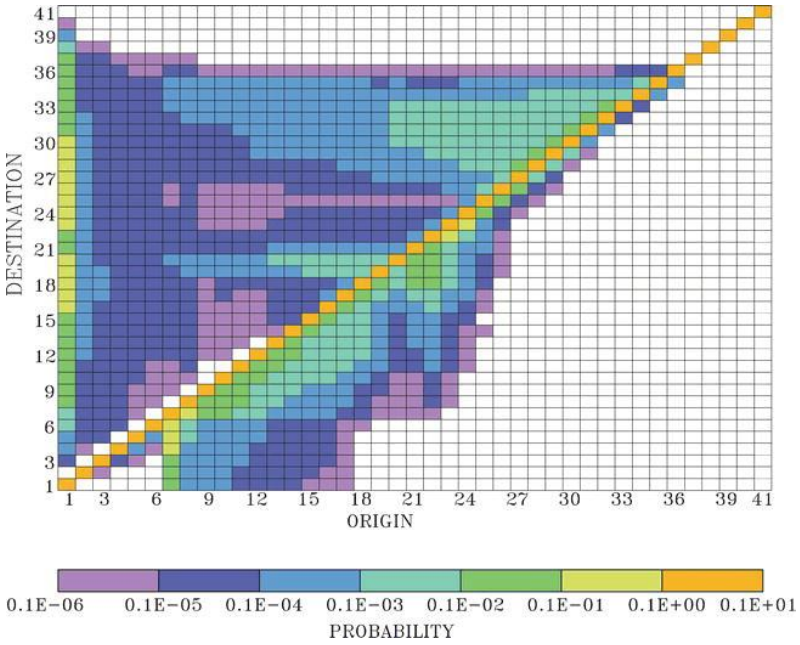
$\bar{v} \rightarrow viento\ escala\ grid$
$v_t \rightarrow fluctuacione\ viento\ turbulentas$
$v_m \rightarrow fluctuaciones\ viento\ mesoescala$

} Paramentrizaciones basadas en la ec. de Langevin

FLEXPART: Consideraciones generales

Convección de humedad:

- Utiliza los campos de temperatura y humedad
- Calcula una matriz de desplazamiento que provee información del flujo de masa para redistribuir las partículas



Ejemplo de matriz de redistribución (Forster et al., 2007)*

- Se utiliza un numero aleatoria entre [0,1] para establecer el desplazamiento de la partícula

*Forster, C., Stohl, A., and Seibert, P.: Parameterization of convective transport in a Lagrangian particle dispersion model and its evaluation, J. Appl. Meteorol. Climatol., 46, 403–422, https://doi.org/10.1175/JAM2470.1, 2007.

FLEXPART: Consideraciones generales

Datos de salida:

Variable	Símbolo	Unidad
Latitud	lat	
Longitud	lon	
Altura	H	m
Altura topográfica	TH	m
Vorticidad potencial	PV	10-6(m2K/skg)
Humedad específica	q	g/kg
Densidad del aire	ρ	kg/m3
Altura de mezcla	hmixi	m
Temperatura	T	K

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

FLEXPART:
Transporte de humedad

FLEXPART: Transporte de humedad

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

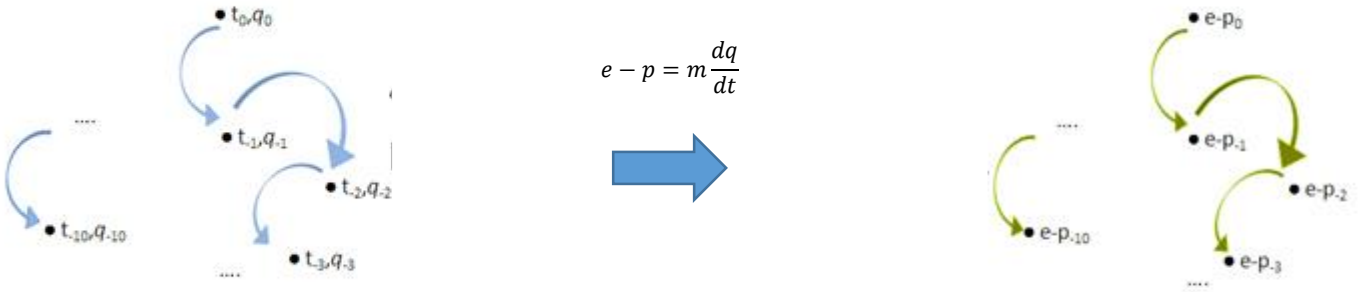
En una partícula hipotética que es transportada, q se conserva a no ser que la evaporación o la precipitación provea o retire humedad.

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

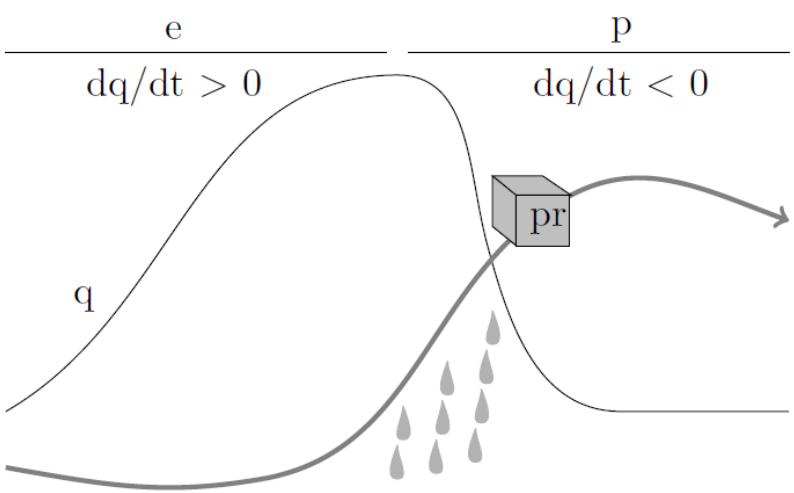
$$e - p = m\frac{dq}{dt}$$

e → ganancias de humedad

p → pérdidas de humedad



FLEXPART: Transporte de humedad



Representación de una partícula sufrindo 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:

$e \rightarrow \frac{dq}{dt} > 0$ evaporación neta

$p \rightarrow \frac{dq}{dt} < 0$ precipitación neta

*A. Stohl, P. James, A Lagrangian analysis of the atmospheric branch of the global water 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 partículas hacía atrás en el tiempo

- Permite analizar dónde las partículas que llegaron a una determinada región tomaron humedad

Modo Forward: Seguimiento de las partículas hace delante en el tiempo

- Permite analizar donde perdieron humedad las partículas 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

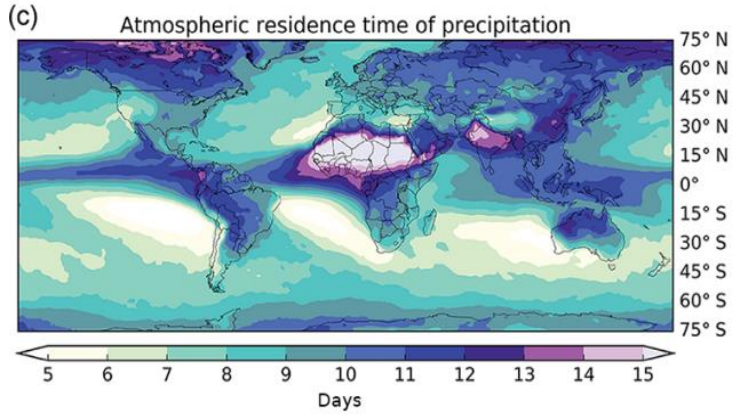
Tiempo tradicional medio global: 10 días

(Numaguti et al.,

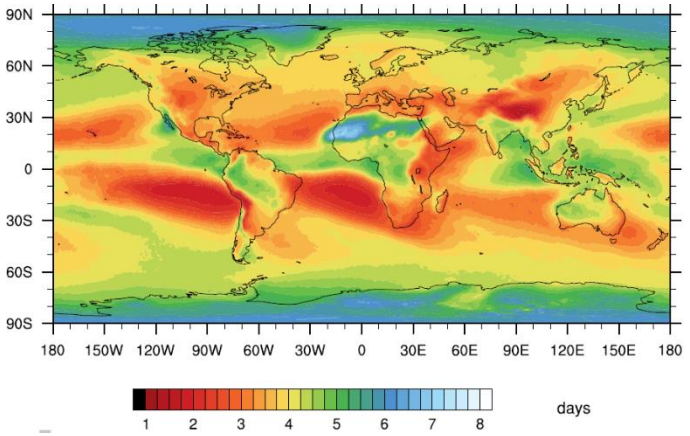
Nuevas aproximaciones del tiempo de residencia:

8-10 días

4-5 días



van der Ent and Tuinenburg (2017)*



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.

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 utiliza esta información?

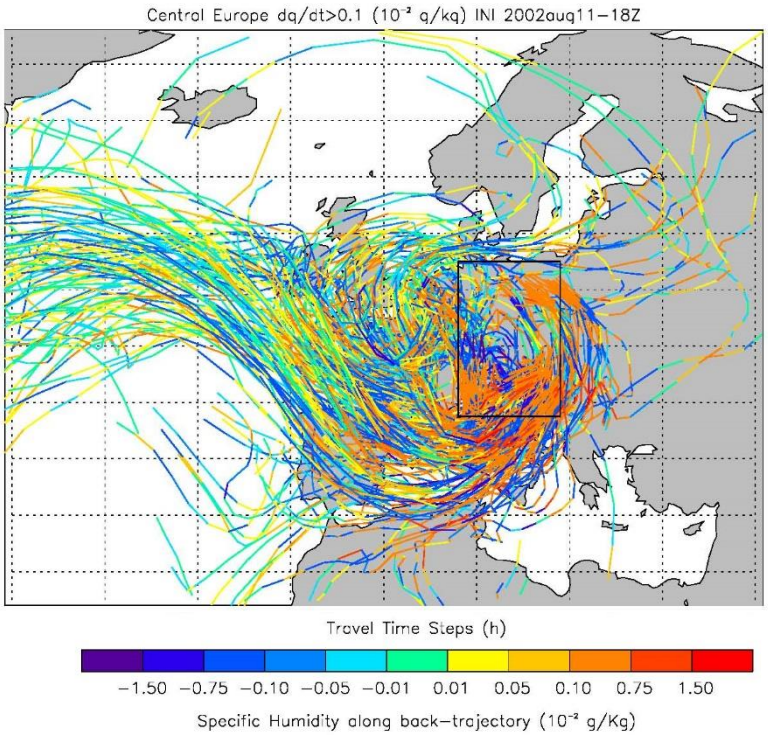
1. Presentación directa de las trayectorias
2. Agrupamiento de las trayectorias
3. Localización geográfica de las zonas de mayores cambios de humedad

FLEXPART: Transporte de humedad

Presentación directa:

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

Desventajas: solo se puede aplicar a eventos concretos y con poca cantidad de partículas consideradas.

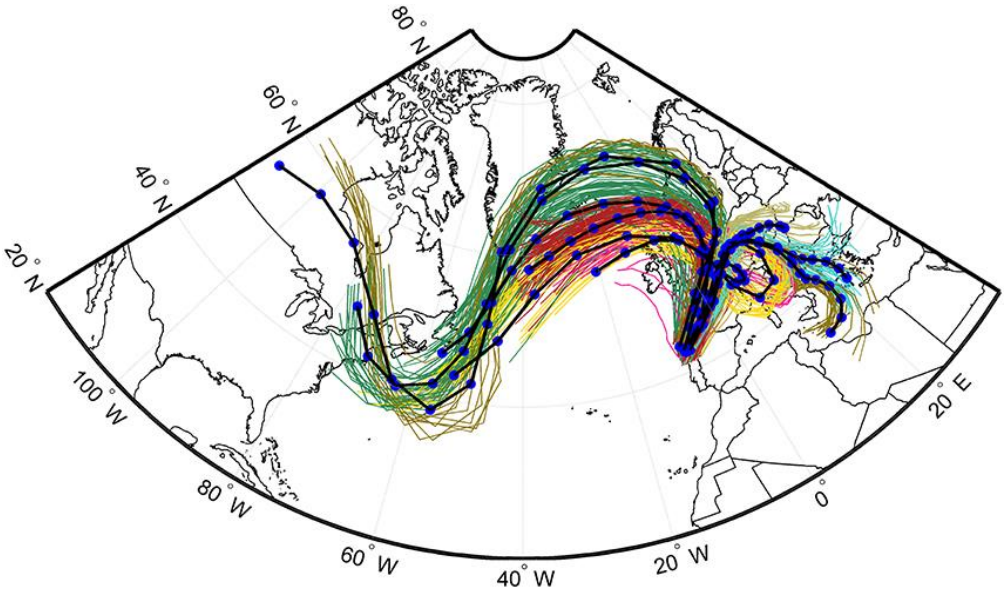


Representación backward de las trayectorias de las partículas que salen de Centro Europa.

FLEXPART: Transporte de humedad

Agrupación de trayectorias (clustering):

Idea similar a la anterior agrupando trayectorias similares (considerando su distancia).



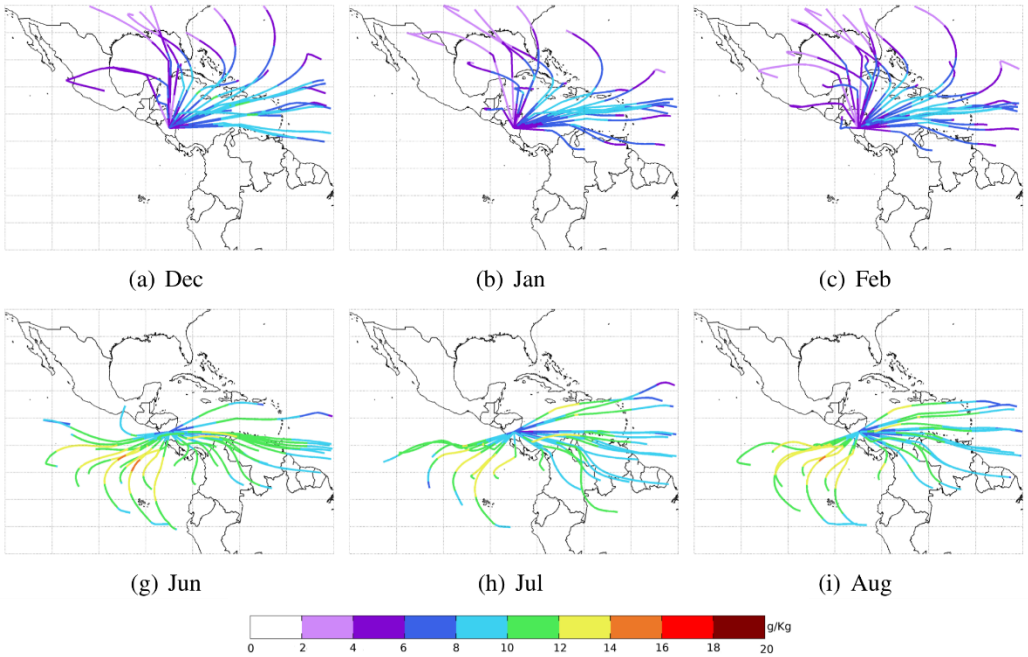
Trayectorias backward para las partículas que llegan al noroeste peninsular un día concreto (Ramos et al., 2014)*

*Ramos, A.M.; Sprenger; M., Wernli, H.; Durán-Quesada, A.M.; Lorenzo, M.N. and Gimeno, L. (2014) A new circulation type classification based upon Lagrangian air trajectories. Frontiers in Earth Science, 2, doi:10.3389/feart.2014.00029

FLEXPART: Transporte de humedad

Agrupación de trayectorias (clustering):

Idea similar a la anterior agrupando trayectorias similares (considerando su distancia).



Trayectorias climatológicas medias mensuales para las partículas que llegan a Centro América. Periodo 1980-1999. (Durán-Quesada, 2012)*

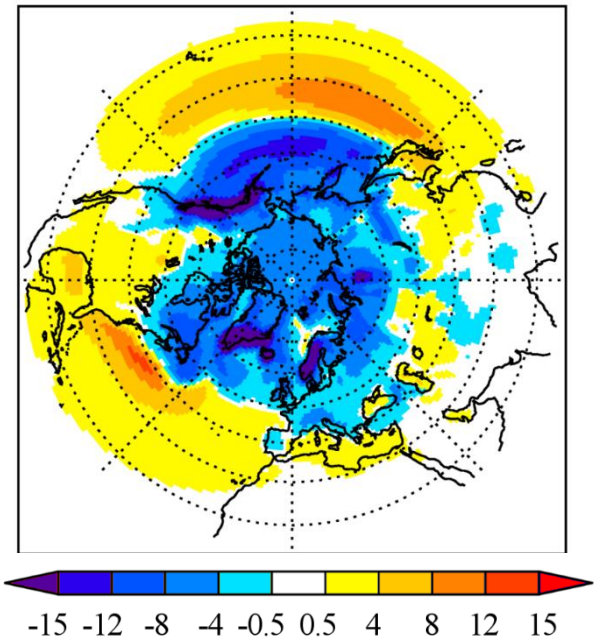
Permite reducir el número de trayectorias. Se pueden realizar análisis par periodos largos de tiempo

*Durán-Quesada (2012). Sources of moisture for Central America and transport based on a Lagrangian aprroach: variability, contributions to precipitation and transport mechanism. University of Vigo, Spain.

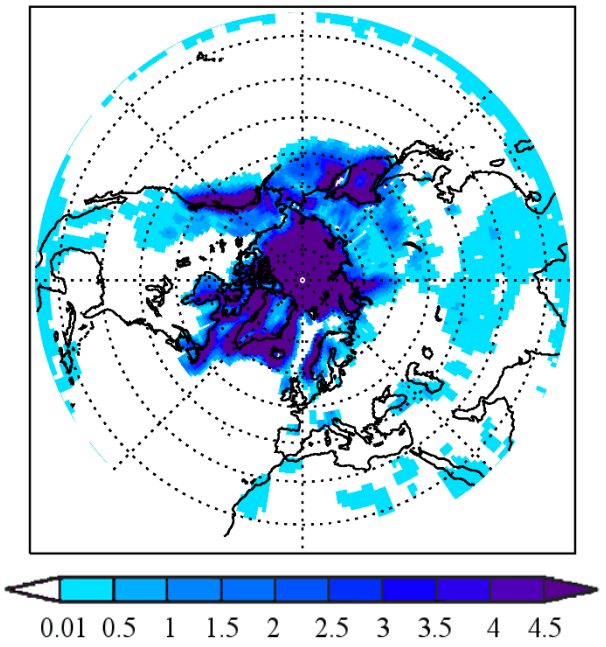
FLEXPART: Transporte de humedad

Localización geográfica de fuentes y sumideros:

Fuentes (backward)



Sumideros (forward)

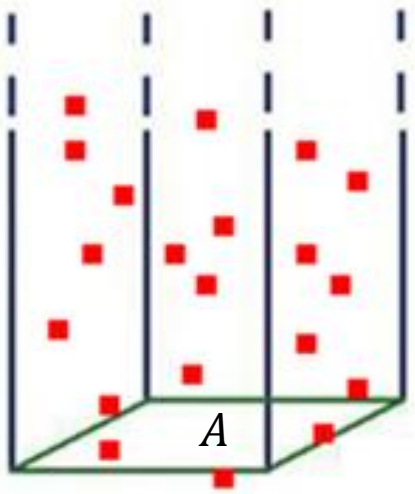


Permite identificar fuentes y sumideros climatológicos para una determinada región

FLEXPART: Transporte de humedad

Localización geográfica de fuentes y sumideros:

Flujo de humedad en superficie



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

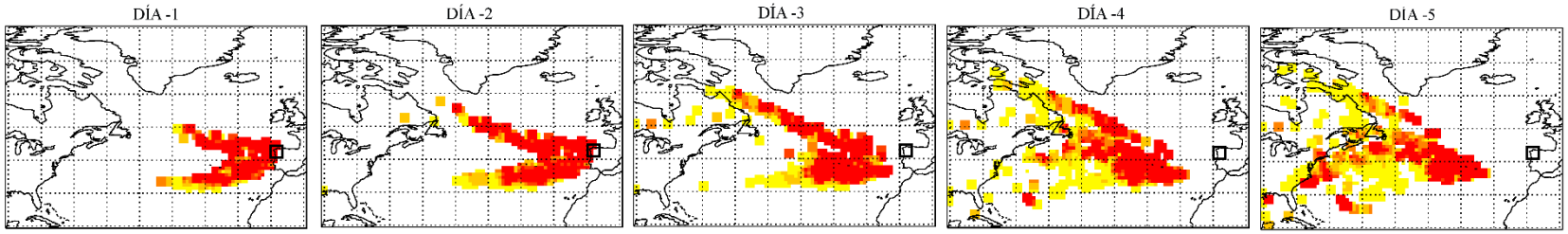
E → Evaporación
P → Precipitación
K → nº de partículas

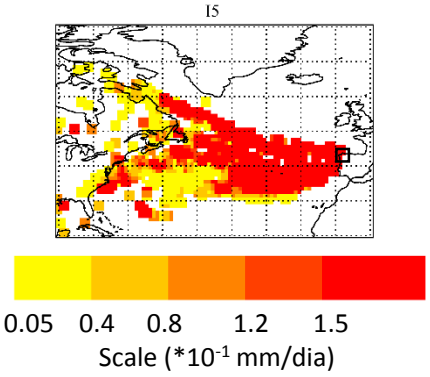
$E - P > 0 \rightarrow E > P \rightarrow$ Fuentes de humedad
$E - P < 0 \rightarrow P > E \rightarrow$ Sumideros de humedad

FLEXPART: Transporte de humedad

Localización geográfica de fuentes y sumideros:

Ejemplo Galicia 30 de marzo 2016:



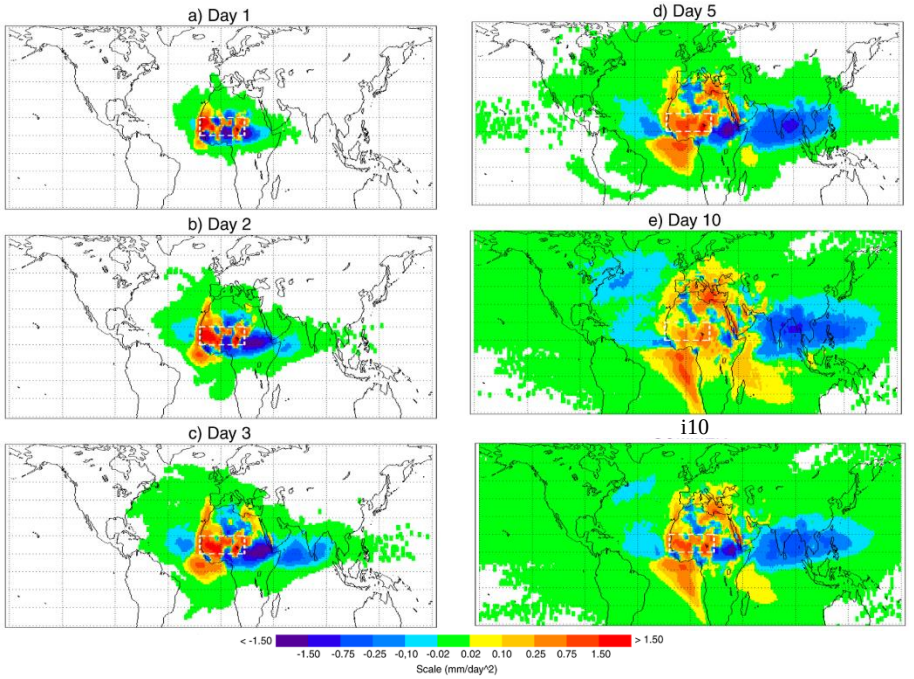


- Se siguen las trayectorias de las partículas durante 5 días
- Para cada uno de los 5 días para cada pto de rejilla → Se calcula E-P teniendo en cuenta la contribución de todas las partículas

FLEXPART: Transporte de humedad

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

Estacional:



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

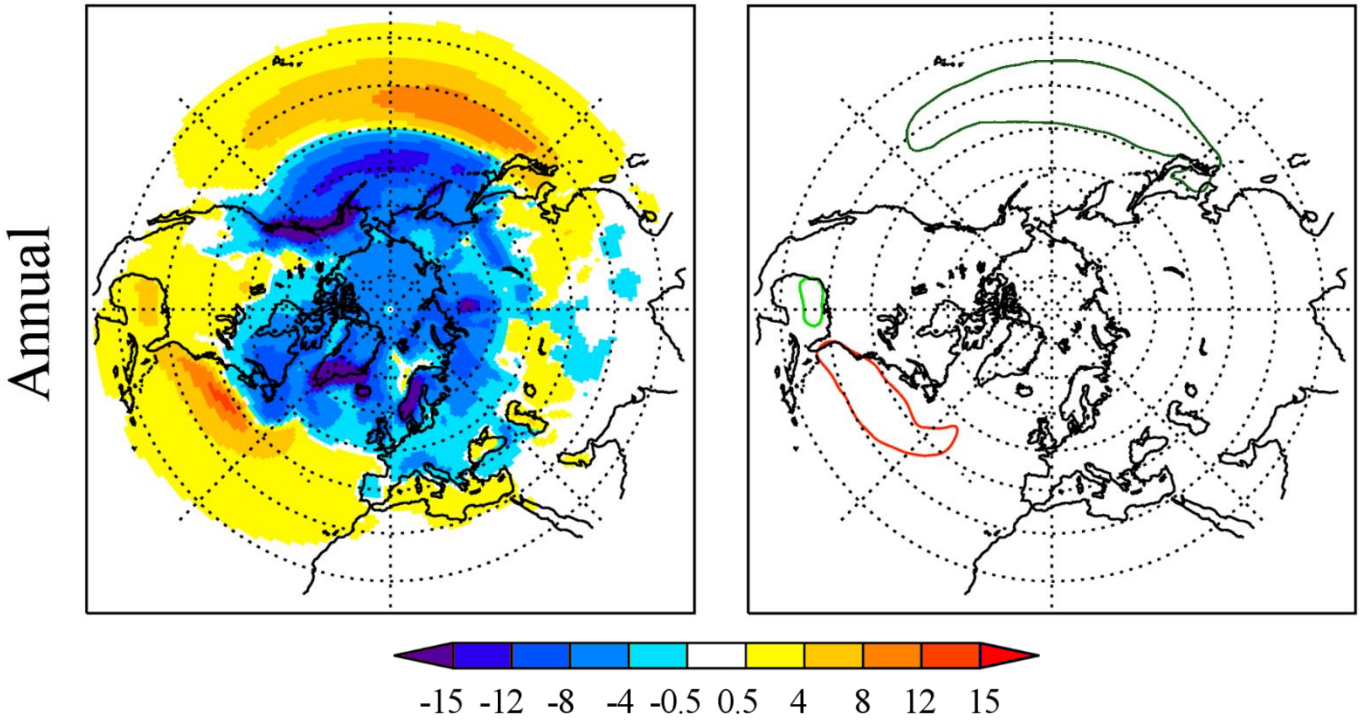
- Se hace el seguimiento para cada día del periodo de verano (Junio-Julio-Agosto).
- Para cada día se calcula E-P para cada pto de grid
- Se calcula la media de todos los días del periodo
- Se analiza E-P para cada uno de los días que se siguen las trayectorias o para el integrado

*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.

FLEXPART: Transporte de humedad

Localización geográfica de fuentes y sumideros (climatologías):

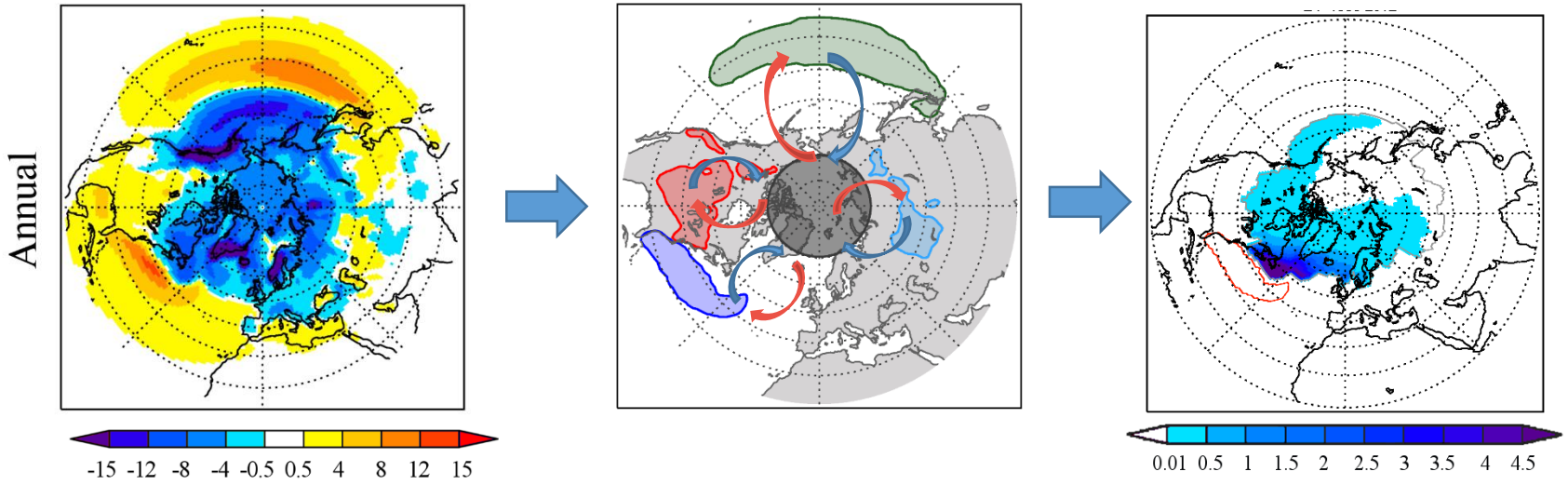
Climatología anual:



FLEXPART: Transporte de humedad

Relación fuente-sumidero (backward + forward)

1. Localizamos las fuentes de una región sumidero (backward)
2. Analizamos la contribución de cada fuente a sobre la región (forward)



FLEXPART: Transporte de humedad

Visión lagrangiana vs euleriana:

Representación lagrangiana:

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

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

Representación euleriana:

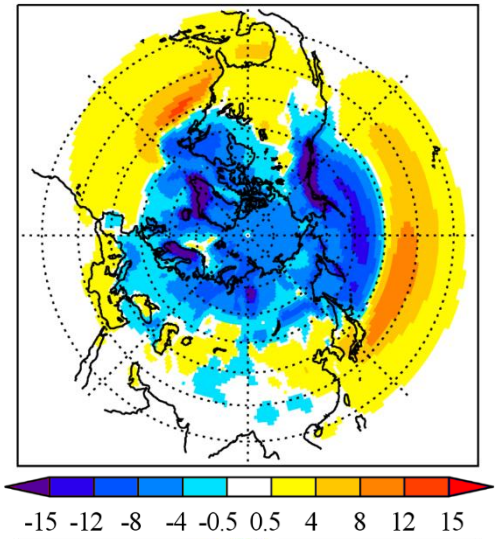
$$E - P = \frac{\partial w}{\partial t} + \nabla\theta$$

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

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

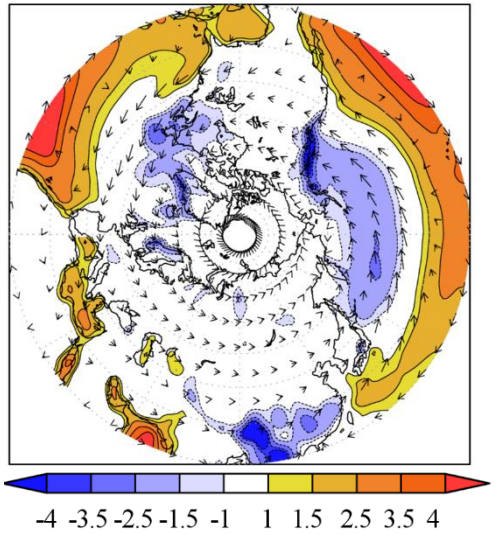
FLEXPART: Transporte de humedad

Visión lagrangiana vs euleriana:



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

Si se consideran todas las partículas → Lagrangiano=Euleriano



Euleriano: Flujo de humedad total en la columna atmosférica

FLEXPART:
Aplicaciones del modelo

FLEXPART: 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 sequias: Drumond et al. (2017)
- Cuencas de ríos: Sorí et al., (2017), Ciric et al. (2016)
- Mecanismos de transporte atmosférico (LLJ y ARs): Ramos et al. (2016)

Conclusiones

- Principal ventaja metodología lagrangiana → Permite analizar las características de las partículas a lo largo de sus trayectorias
- FLEXPART es una herramienta útil para el análisis del transporte de humedad
- Sigue la trayectoria de las partículas hacia adelante o hacia atrás en el tiempo
- Permite la localización de las principales fuentes y sumideros de una región a través de los cambios en la humedad específica de las partículas
- Permite establecer la relación entre fuentes y sumideros.
- Ofrece información complementaria a los modelos eulerianos (pero los resultados no son directamente comparables)
- Tiene múltiples aplicaciones

Referencias

Modelos de transporte de humedad:

- Gimeno, L., Stohl, A. , Trigo, R.M., Domínguez, F., Yoshimura, K., Yu, L., Drumond, A., Durán-Quesada, A.M., and Nieto, R.: Oceanic and Terrestrial Sources of Continental Precipitation, Reviews of Geophysics, 50, RG4003, doi:10.1029/2012RG000389

Funcionamiento del modelo:

- Stohl, A., Forster, C., Frank, A., Seibert, P., and Wotawa, G.: **Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2**, Atmos. Chem. Phys., 5, 2461-2474, https://doi.org/10.5194/acp-5-2461-2005, 2005.
- www.flexpart.eu

Muchas Gracias

Referencias

- 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 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