

MODELOS DE RED DE LAS DEMORAS ATFM EN VUELOS DOMÉSTICOS

Esther Calvo Fernández

Ingeniero I+D, CRIDA (Centro de Referencia I+D+i ATM), España

José Manuel Cordero García

Ingeniero Principal I+D, CRIDA (Centro de Referencia I+D+i ATM), España

RESUMEN

Las demoras AFTM (*Air Traffic Flow Management*) secundarias, de efectos de red o de rotación (más conocidas por el término inglés *reactionary delays*), constituyen un alto porcentaje (del orden del 50%) de las demoras totales en Europa, con el consiguiente coste para los distintos actores del sistema.

La dificultad actual de predecir y manejar estos efectos se debe en parte a la falta de correlación entre los distintos datos de rotación de las aeronaves a lo largo de un día de operación y la escasez de modelos al respecto.

Esta ponencia analiza los efectos en cadena de las demoras secundarias entre los aeropuertos domésticos españoles en base a datos reales, evaluando los puntos de mayor impacto en el sistema y presentando modelos de estimación y análisis de los mismos, tanto en base a demoras primarias como a otros parámetros del sistema ATM (*Air Traffic Management*). Los resultados presentados permiten un mejor conocimiento del tráfico aéreo local en España, y la determinación de un punto de mejora en la red a nivel local.

1. INTRODUCCIÓN

Las demoras son, históricamente, el efecto principal a evitar en el sistema ATM, consideradas el síntoma de una operación que no resultó de acuerdo a las expectativas de los usuarios del sistema. Son, en términos muy generalistas, un indicador de que algún punto del sistema de transporte aéreo ha fallado.

Las definiciones de demora, o de vuelo demorado son variadas. Una de las más recurrentes es que un vuelo puede considerarse demorado si su operación tiene lugar 15 minutos después de lo previsto (definición procedente de la FAA, *Federal Aviation Administration*). En el marco del análisis que aquí se presenta se analizan las demoras como efecto resultante de un desequilibrio entre la demanda de tráfico aéreo y la capacidad disponible. Este hecho implica que se impongan regulaciones que afectan a un conjunto de vuelos con el fin de asegurar el correcto funcionamiento del sistema respecto a su operativa prevista, lo que produce las denominadas demoras ATFM, que son las más relevantes en

términos de gestión del sistema y que serán analizadas en estas páginas. Formalmente, la demora ATFM de un vuelo es la diferencia entre la última hora de despegue solicitada por la aeronave y el slot o ventana de despegue otorgada por CFMU (*Central Flow Management Unit*), y se expresa en minutos.

Claramente, el total de demoras del sistema ATM no se debe exclusivamente a regulaciones. Diversos estudios de CODA (*Central Office for Delay Analysis*) arrojan que en torno al 20-15% (dependiendo del tráfico, entre otros factores) de demoras totales del sistema de transporte aéreo son achacables a este motivo, siendo otros efectos a considerar los propios de rotación del aeropuerto (del orden de un 30%), y, fundamentalmente, las demoras secundarias (más habitualmente referidas por el término inglés *reactionary delays*), que suponen del orden del 50% de las demoras totales del sistema.

Estas demoras secundarias se producen por efectos en cadena en el sistema: la llegada tardía de un vuelo produce la salida tardía de otro –el siguiente salto de la aeronave implicada. Si bien podría intuirse que una mejora en las demoras primarias redundará en una mejora en las demoras secundarias, estas últimas han aumentado progresivamente en los últimos años (de acuerdo a los informes *Performance Review Reports*, publicados anualmente por Eurocontrol, pasando de un 30% en 1999 a aproximadamente un 45% en 2012, mientras las demoras ATFM primarias han disminuido en el mismo periodo de un 30% al citado 20-15%). En estas cifras ha influido, por supuesto, un escenario con amplias fluctuaciones de tráfico (en ambos sentidos).

Por otro lado, en los últimos años existe un creciente interés en el estudio de los modelos de red ATM, principalmente entendidos como redes complejas que pueden modelarse y tratarse como tales. Estos modelos buscan predecir los efectos que se producirán en el global del sistema en determinadas condiciones, de forma que puedan predecir (entre otros efectos) las demoras secundarias a partir de modelos de propagación de demoras. En este sentido, existen notables aplicaciones en el espacio norteamericano.

1.1 Objetivo

Una de las principales limitaciones que estos modelos suelen encontrar es la dificultad para llevar a cabo una correlación entre los distintos datos de rotación de las aeronaves a lo largo de un día de operación. Esto requiere de un conjunto rico de datos y de la capacidad de análisis adecuada.

En esta dirección, CRIDA (Centro de Referencia I+D+i ATM, constituido por Aena, la Universidad Politécnica de Madrid e Ineco) dispone tanto del conjunto de datos necesarios en un volumen suficiente como de la capacidad técnica para su procesamiento automatizado, abordando la investigación de un modelo de red que, a partir del estudio de un amplio volumen de datos reales permita modelar el comportamiento de las distintas rutas que se encuentran en el espacio aéreo español, realizando un análisis de los distintos saltos. Esta aproximación, procedente del modelado a partir de los datos agregados, resulta

novedosa en este ámbito (y esencial en términos de validación y calibración del modelo, que es otra dificultad frecuente en los modelos de red).

De esta forma, esta ponencia presenta: i) un análisis de demoras ATFM, tanto primarias como secundarias, en vuelos domésticos (restringidos a vuelos que pasan por el espacio aéreo español, es decir despeguen, aterricen o sobrevuelen éste, como una primera fase del estudio, que en iteraciones futuras se plantea extender al espacio europeo), ii) la metodología de procesamiento de análisis y modelado fundamentado en datos reales que lo sustenta, y iii) conclusiones orientadas a un enfoque de modelo de red.

2. METODOLOGÍA

2.1 Estrategia

Un aspecto clave en este estudio consiste en el cruce de distintas fuentes de datos con el objetivo de tener un mayor conocimiento de la evolución de los estados de las aeronaves en todos los nodos de la red. La metodología consiste en el estudio de la red como un enlace de vuelos a partir de la matrícula de la aeronave, de forma que podamos tener consciencia de los factores que afectan a cada uno de los saltos que realiza una aeronave a lo largo de un día de operación.

Para el alcance de esta primera etapa del proyecto se parte de una muestra de un mes de datos, considerada suficientemente representativa (esta se aumentará en siguientes etapas).

2.2 Datos utilizados

Los datos utilizados en este estudio se han obtenido de dos fuentes distintas:

- *Información de CFMU (Central Flow Management Unit)*: Mensajes del ETFMS (*Enhanced Tactical Flow Management System*) de datos de vuelo cuando dicho vuelo pasa a estado terminado, conteniendo por lo tanto la información real del vuelo. El propósito de estos mensajes es informar a los usuarios, con las últimas actualizaciones, sobre el último estado de un vuelo en este sistema. La información utilizada para este estudio son los mensajes de vuelos terminados, es decir, la situación final del vuelo. Por lo tanto, estos mensajes recogen toda la información de regulaciones registradas por CFMU.
- *Información de PALESTRA (Plataforma de Análisis y Reproducción de Datos Radar)*: Mensajes de planes de vuelo, cuando el plan de vuelo pasa a estado terminado, grabados por sistema SACTA (Sistema Automatizado de Control del Tránsito Aéreo). Estos mensajes son grabados en ficheros que contienen información de plan de vuelo generada por el sistema de Tratamiento Local de Plan de Vuelo (TLPV) de cada uno de los 5 Centros de control SACTA (Madrid, Canarias, Barcelona, Sevilla y Palma de Mallorca) que es enviada al Sistema de grabación de SACTA (ARIS) y finalmente capturada por el sistema de explotación de datos de SACTA (PALESTRA).

2.3 Flujo de trabajo

Cada uno de los mensajes, tanto de CFMU como de PALESTRA, contiene una gran cantidad de información. Dentro del propósito de este estudio se consideran relevantes los siguientes campos:

<i>Campo</i>	<i>Descripción</i>
FLTID	Identificador del vuelo
ADEP	Aeropuerto de Origen
ADES	Aeropuerto de Destino
ACRTYP	Tipo de aeronave
ReguType	Tipo de la regulación
ReguId	Origen de regulación
REG	Matrícula
IOBT	Hora inicial de fuera de calzos
ATOT	Hora real de despegue
ETOT	Hora estimada de despegue
CTOT	Hora calculada de despegue (para vuelos regulados)
ALDT	Hora real de aterrizaje
ELDT	Hora estimada de aterrizaje
CLDT	Hora calculada de aterrizaje (para vuelos regulados)
ReguStart	Hora inicio de la regulación
ReguEnd	Hora fin de la regulación
ReguATO	Hora real de entrada del vuelo en zona regulada
ReguETO	Hora estimada de entrada del vuelo en zona regulada

Leyenda:

<input type="checkbox"/>	Campo cuyo dato de CFMU se ha utilizado en el estudio
<input checked="" type="checkbox"/>	Campo cuyo dato de PALESTRA se ha utilizado en el estudio
<input type="checkbox"/>	Campo de ambas fuentes para realizar el cruce

Tabla 1 – Campos utilizados en el estudio en función de la fuente de datos de origen

El primer paso del procedimiento consiste en cruzar los vuelos de ambas fuentes, para lo cual se realiza un cruce a partir de campos que identifican de forma única a cada vuelo en ambas fuentes (identificador del vuelo, aeropuerto de origen, aeropuerto de destino y hora inicial de fuera de calzos).

Considerando la fuente de datos de CFMU como la base para este estudio, puesto que contiene la información de las demoras ATFM, la matrícula se toma de PALESTRA dado que CFMU no contiene dicha información. Tras realizar el cruce obtenemos que un 96,3% de los vuelos de CFMU se ha conseguido cruzar con su correspondiente vuelo de PALESTRA. Tras este primer paso obtenemos una muestra de alta calidad para llevar a cabo el estudio, de la cual tomamos todos los campos nombrados en la *Tabla 1* de la fuente de datos de CFMU, excepto la matrícula tomada de PALESTRA.

El siguiente paso consiste en eliminar todos aquellos vuelos sin dato de matrícula, puesto que para poder llevar a cabo el análisis de efectos de red en cadena, es necesario identificar los saltos de cada aeronave a lo largo del día. Tras eliminar dichos vuelos, obtenemos que un 93,6% de los vuelos de CFMU son válidos para el análisis.

Una vez tenemos todos los vuelos con matrícula, se procede a la identificación de lo que se denominará en el resto del estudio como “trayecto”, es decir todos vuelos que cada día de operación tienen la misma matrícula. De esta forma se consiguen enlazar los vuelos, para poder realizar un análisis de los efectos en cadena que puedan darse.

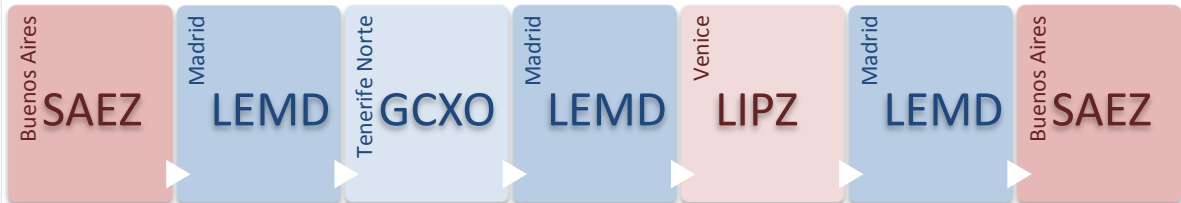


Figura 1 – Ejemplo de trayecto recorrido por una aeronave (identificada por su matrícula) durante un día de operación

Por último, en esta fase de “limpieza” de datos, se analiza el orden de los saltos de cada uno de los trayectos diarios. Para ello se consideran como válidos aquellos trayectos cuyo aeropuerto de destino coincide con el aeropuerto de origen del siguiente salto.

Tras realizar este cotejo de aeropuertos de origen y destino en cada uno de los saltos de cada trayecto, se obtiene que el 3,6% de los trayectos es erróneo (lo cual implica que finalmente tengamos un 88,9% de los vuelos de CFMU con trayectos correctos para realizar el estudio). Esto puede deberse a dos causas: i) la primera y más evidente es que se haya perdido algún salto en el proceso de cruce con los datos de PALESTRA, ii) la otra opción es que alguno de los saltos se realiza fuera del espacio aéreo español (como puede observarse en el ejemplo de la *Figura 2*, la flecha de color rojo indica que se realiza fuera del espacio aéreo español) y por lo tanto no tengamos información de dicho salto, dado que nuestras fuentes de datos sólo contienen información de vuelos que atraviesan/sobrevuelan el espacio aéreo español.



Figura 2 –Trayecto con salto fuera del espacio aéreo español



Figura 3 –Trayecto con parte de todos sus saltos dentro del espacio aéreo español

En la siguiente figura puede observarse la calidad de los datos de partida y el porcentaje de vuelos válidos para el presente estudio sobre el total de vuelos de CFMU: i) vuelos cruzados con planes de vuelos de PALESTRA, ii) vuelos con datos de matrícula para

poder realizar el enlace de los saltos de cada aeronave a lo largo del día, y iii) vuelos con trayectos correctos tras cotejar el aeropuerto de origen y destino en cada uno de los saltos.

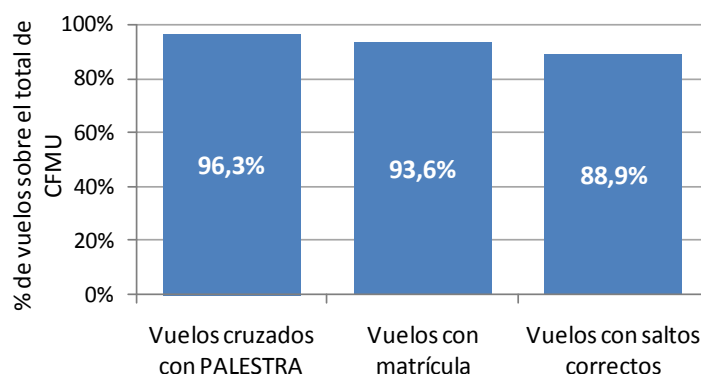


Figura 4 – Análisis de la calidad de los datos utilizados en el estudio

3. RESULTADOS

Los resultados del extenso análisis de datos realizado se dividen en tres partes, cada una de ellas añade una visión específica al estudio. En los dos primeros puntos se realiza un análisis de las demoras ATFM y de los saltos diarios que realiza cada aeronave. Mientras que en el tercer punto se aborda el análisis de propagación de demoras por rutas.

3.1 Análisis de demoras ATFM

En Europa, cuando la demanda de tráfico excede a la capacidad disponible en el espacio aéreo o en los aeropuertos, las unidades de Control de Tráfico Aéreo (ATC - *Air Traffic Control*) pueden pedir una regulación en la Gestión del Tránsito Aéreo (ATFM) en dicha región. Las aeronaves que se esperan en determinado período de tiempo de congestión se mantienen en el aeropuerto de salida inmediatamente anterior a la región regulada por la Unidad de control de Afluencia de EuroControl (CFMU), hasta que se despejan las restricciones de capacidad de la zona congestionada. De esta forma los retrasos ATFM resultantes se calculan en función de los tiempos presentados en el último plan de vuelo y la razón de la regulación es indicada por el responsable de Gestión de Afluencia de la Posición (FMP - *Flow Management Position*). El retraso se atribuye a la unidad ATC más restrictiva.

El retraso ATFM se define como la diferencia entre la última hora de despegue solicitada por el operador aéreo (ETOT) y el slot de despegue dado por CFMU (CTOT).

El campo ReguType, tipo de regulación, permite asociar si la regulación se debe a:

- Regulación en ruta (SP - Punto Especial o AS - Espacio Aéreo)
- Regulación en aeropuertos: (AZ - Conjunto de aeropuertos o AD - Aeropuerto)

En los siguientes gráficos se presentan los resultados del análisis de las demoras ATFM en función del tipo de zona causante de la demora, calculados a partir de la muestra de datos de CFMU de vuelos que atraviesan/sobrevuelan el espacio aéreo español. Como puede observarse las regulaciones en ruta son la causa del 78,3 % de los vuelos regulados y de 1,07 minutos de demora ATFM por vuelo, mientras que las regulaciones en aeropuertos solamente causan 0,29 minutos de demora ATFM. La demora ATFM total es de 1,36 minutos por vuelo para la muestra de datos utilizada en este estudio.

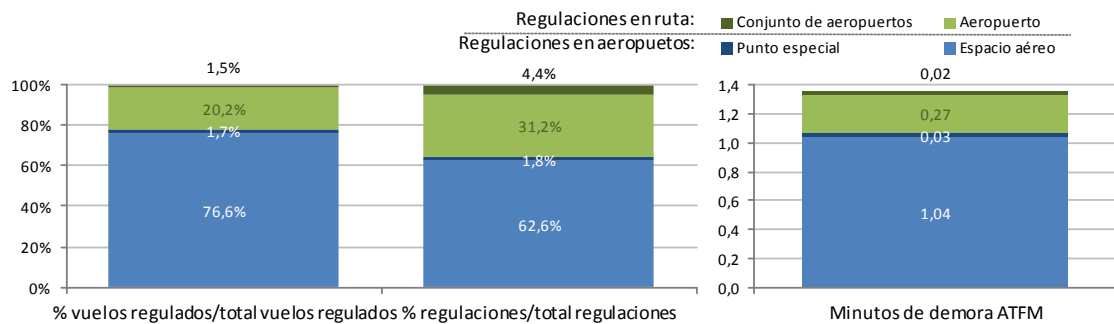


Figura 5 – Análisis de demoras ATFM en función del tipo de zona causante de la regulación

Además se ha analizado el promedio de vuelos afectados por cada regulación siendo este de 14 vuelos. Sin embargo si analizamos este valor por tipo de regulación, este aumenta a una media de 17 vuelos afectados por las regulaciones de espacio aéreo (ruta) mientras que en el caso de regulaciones debidas aeropuertos estas sólo provocan una media de 9 vuelos regulados.

Se han estudiado además las demoras ATFM en función del orden del salto y la hora de la regulación en el que se da, es decir, se ha calculado el porcentaje de regulaciones en función tanto del salto como de la hora estimada de entrada del vuelo en la región regulada.

En la *Figura 6* puede observar como el número de regulaciones disminuye a medida que incrementa el número de saltos en el que se da dicha regulación. Además puede observarse en la *Figura 7* como las horas con mayor afluencia de regulaciones están comprendidas entre las nueve y las doce de la mañana (hora UTC - *Universal Time Coordinated*).

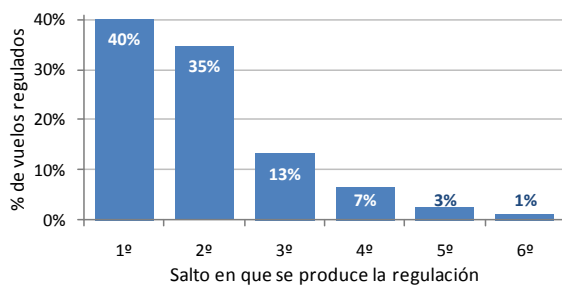


Figura 6 – Porcentaje de vuelos regulados en función del orden del salto en que se produce la regulación

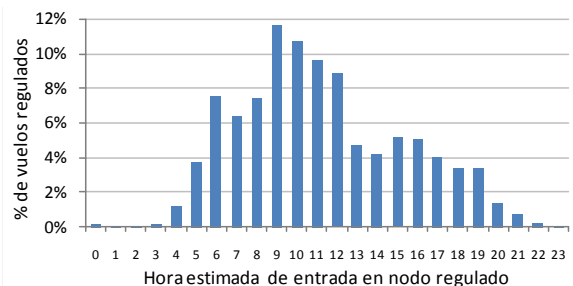


Figura 7 – Porcentaje de vuelos regulados en función de la hora en que se da la regulación

3.2 Análisis de saltos de cada trayecto

En el siguiente análisis se calculan el número de saltos diarios de cada trayecto, (recordemos que hemos definido trayecto al conjunto de vuelos que cada día de operación realiza una aeronave). En la *Figura 8* se representa el porcentaje de trayectos sobre el total en función del número de saltos diarios, además se ha diferenciado entre los trayectos cuya aeronave termina en el aeropuerto de partida del día (verde) o no (azul).

Como puede observarse el número de saltos pares siempre es superior a su impar anterior, este comportamiento puede explicarse observando que además en los saltos pares el porcentaje de trayectos cuya aeronave termina en el aeropuerto de partida es con diferencia superior al caso de saltos impares. Estas dos observaciones nos llevan a pensar que existe gran cantidad de trayectos cíclicos entre dos aeropuertos, de ahí la superioridad de las rutas pares, y que además dicha aeronave “duerme” en el mismo aeropuerto.

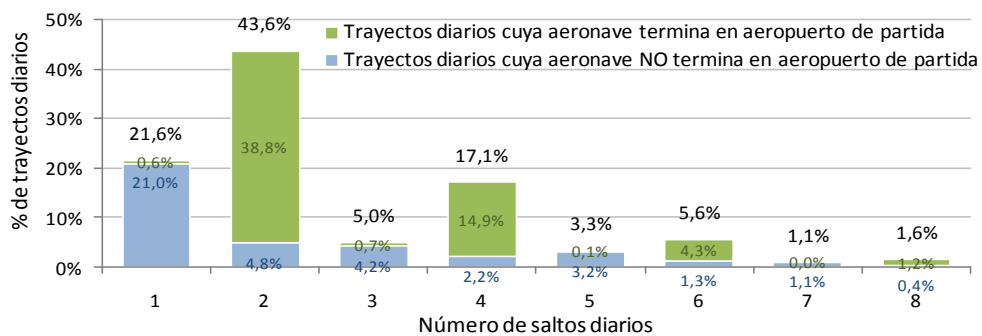


Figura 8 – Porcentaje de trayectos diarios en función del número de saltos

3.3 Análisis de propagación de demoras por rutas (origen - destino)

En el presente estudio de modelos de red se parte de un esquema de red basado en los aeropuertos como nodos de dicha red y las conexiones entre dichos nodos como los saltos que las aeronaves realizan entre cada aeropuerto. De esta forma al realizar la conexión entre los saltos diarios que da una aeronave entre los distintos nodos (aeropuertos), a través de la matrícula, podrá realizarse un análisis de efectos de red. Debido a la complejidad de la red de tráfico aéreo, se partirá del análisis de las rutas o “city pairs”, es decir itinerarios entre aeropuertos de origen y destino que comprenden un segmento de vuelo con mayor porcentaje de vuelos.

El objetivo de este análisis es buscar patrones de comportamiento en las rutas (punto a punto) y qué efectos tienen en dicha ruta los saltos previos a ésta. En la primera iteración del análisis que se recoge en este estudio se analizarán los dos saltos previos a la ruta, como se esquematiza en la *Figura 9*, donde los puntos representan aeropuertos y las flecha los saltos entre cada aeropuerto:

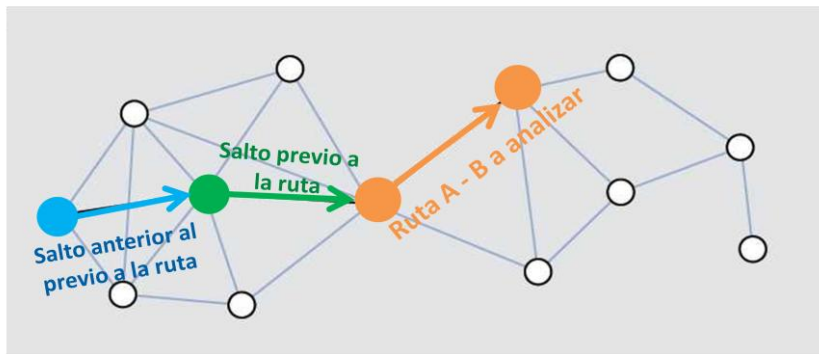


Figura 9 – Esquema del análisis de rutas punto a punto

3.3.1 Rutas significativas

El primer paso de este análisis consiste en buscar las rutas con mayor número de vuelos, para ello la *Figura 10* representa el porcentaje de vuelos de CFMU respecto del total considerado en el presente estudio, en función del porcentaje de rutas (ordenadas en función del total de vuelos de cada ruta). Como puede observarse, el 40% de los vuelos de CFMU totales considerado en el estudio está constituido solamente por el 5,4 % de las rutas con mayor número de vuelos, lo que se traduce en un total de aproximadamente 350 rutas que denominaremos “significativas”.

Dentro de las 350 rutas significativas anteriormente mencionadas, en la *Figura 11* se analiza el % de vuelos de cada ruta con regulación en salto previo, o en salto anterior al previo, de forma que se han ordenado de mayor a menor las rutas con mayor porcentaje de regulaciones en dichos saltos previos. Con este análisis se obtiene aquellas rutas significativas en las que la propagación de las demoras ATFM es mayor, es decir se localizan los nodos de la red con mayor peso de propagación de demoras.

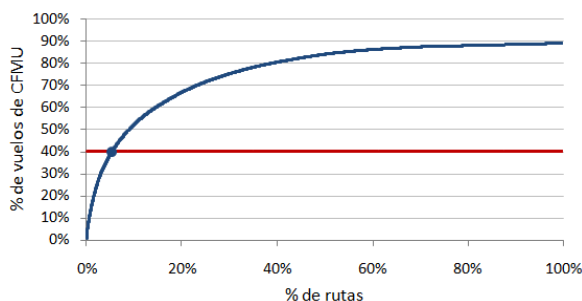


Figura 10 – % de vuelos de CFMU en función del % de rutas

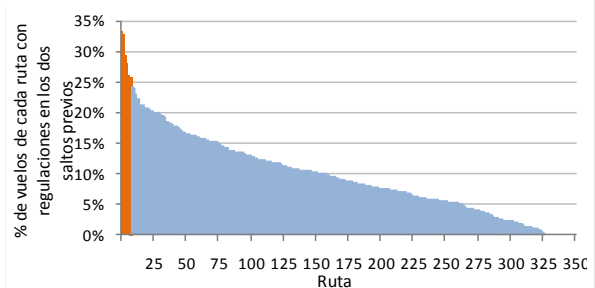


Figura 11 – % de vuelos de cada ruta con regulación en salto previo, o en salto anterior al previo

En la *Figura 11* se han marcado de color naranja las ocho rutas con mayor porcentaje de vuelos con regulaciones en los dos saltos previos, es decir las rutas con mayor propagación de las demoras ATFM. Estas rutas se muestran en la *Tabla 2*:

		Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3	Ruta 4	Ruta 5	Ruta 6	Ruta 7	Ruta 8
Origen	Todas las rutas	Palma de Mallorca LEPA	Madrid LEMD	Zürich Suiza LSZH	Barcelona LEBL	Dortmun Alemania EDLW	Madrid LEMD	Lisboa Portugal LPPT	Barcelona LEBL
Destino		Dortmun Alemania EDLW	Ben Gurion Israel LLBG	Barcelona LEBL	Düsseldorf Alemania EDDL	Palma de Mallorca LEPA	Schiphol Países Bajos EHAM	Ginebra Suiza LSGG	Schiphol Países Bajos EHAM
% de vuelos con regulación en salto previo, o en salto anterior al previo	10,1%	33,3%	32,9%	32,8%	29,5%	28,3%	26,3%	26,0%	25,9%

Tabla 2 –Rutas con mayor porcentaje de vuelos con regulaciones en el salto previo, o en el salto anterior al previo

3.3.2 Análisis de rutas con mayor porcentaje de regulaciones en saltos previos

A continuación se analizan las rutas con mayor posibilidad de propagación de demoras ATFM, es decir, aquellas con mayor porcentaje de regulaciones en los dos saltos previos.

En la *Figura 12* se realiza un primer análisis de estas rutas a partir del porcentaje de vuelos de cada una de ellas en función del salto diario en el que se da el vuelo. Como puede observarse en tonos azules se representan los saltos impares mientras que en tonos verdes se representan los saltos pares. A partir de esta regla puede observarse como las rutas Palma de Mallorca - Dortmund, Barcelona - Düsseldorf y Barcelona - Schiphol presentan una amplia mayoría de saltos pares, lo cual podría interpretarse que se tratan de vuelos pertenecientes a rutas cíclicas entre dichos aeropuertos y cuyo salto inicial es la ruta inversa. Mientras que en las rutas Zürich – Barcelona, Dortmund - Palma de Mallorca y Lisboa – Ginebra, sucede lo contrario: presentan una mayoría de saltos impares lo cual se podría interpretar de forma análoga como vuelos pertenecientes a rutas cíclicas entre dichos aeropuertos y cuya salto inicial se corresponde a la propia ruta.

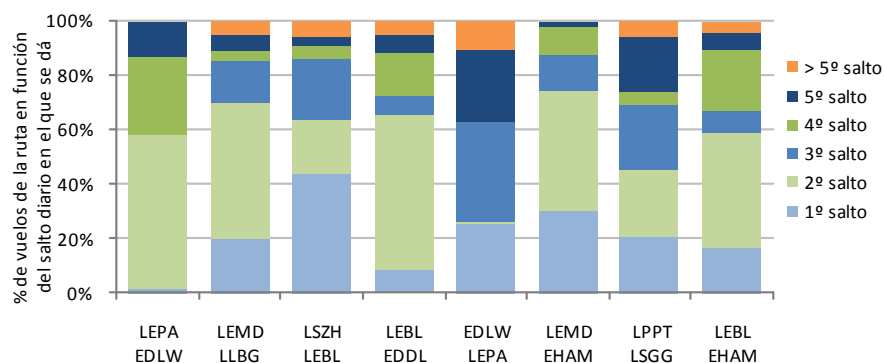


Figura 12 – Porcentaje de vuelos de cada ruta en función

En la *Tabla 3* se recoge un análisis de las demoras: i) demoras ATFM, ii) demora total en despegues (calculada como la diferencia entre la última hora de despegue solicitada por el operador aéreo, ETOT, y la hora real de despegue, ATOT), y iii) demora total en aterrizajes (calculada como la diferencia entre la última hora de aterrizaje solicitada por el operador aéreo, ELDT, y la hora real de aterrizaje, ALDT).

Ruta	Todas las rutas	LEPA EDLW	LEMD LLBG	LSZH LEBL	LEBL EDDL	EDLW LEPA	LEMD EHAM	LPPT LSGG	LEBL EHAM	
Vuelos diarios	4236	4	3	5	5	4	7	5	11	
Minutos de demora ATFM	1,35	2,05	7,39	1,97	4,23	4,22	2,82	3,42	3,07	
Minutos de demora media en despegues (ATOT-ETOT)	Total	2,48	0,59	7,30	6,53	2,99	8,52	1,43	6,02	3,36
	Vuelos sin regular en salto previo	2,14	-0,73	4,91	5,77	1,80	7,70	2,10	3,95	2,56
	Vuelos sin regular en los dos saltos previos	2,15	-0,60	5,24	5,72	1,86	8,11	2,09	3,69	2,60
Minutos de demora media en aterrizajes (ALDT-ELDT)	Total	2,00	-2,03	8,39	5,95	-0,13	4,41	7,55	0,66	9,02
	Vuelos sin regular	0,62	-4,05	1,60	3,54	-4,90	2,42	4,28	-2,89	5,51
	Vuelos sin regular el propio vuelo y el salto previo	0,56	-4,04	0,54	3,45	-4,97	1,69	4,43	-3,51	5,35

Tabla 3 – Resumen de demoras en función de la ruta (rutas con mayor propagación de las demoras ATFM)

Además del análisis de las demoras totales tanto en despegues como en aterrizajes, se analiza la influencia de las demoras ATFM en saltos previos a la ruta que se está analizando:

- Análisis de demora total en despegues: i) de todos los vuelos de una determinada ruta, ii) sin considerar los vuelos regulados en el salto previo de dicha ruta, y iii) sin considerar tanto los vuelos regulados en el salto previo como en el salto anterior al previo de la ruta que se está analizando. De esta forma se consigue analizar la propagación de la demora ATFM de uno y dos saltos.
- Análisis de demora total en aterrizajes: i) de todos los vuelos de una determinada ruta, ii) sin considerar los vuelos regulados en dicha ruta, iii) sin considerar los vuelos regulados tanto en dicha ruta como en el salto previo de la ruta que se está analizando. De esta forma se consigue no solo analizar la propagación de las demoras ATFM en un aterrizaje en un salto posterior, sino como se propaga una regulación en la hora de llegada al siguiente aeropuerto.

En la *Figura 13* puede observarse como, en la mayoría de los casos, la demora en despegues disminuye si no se consideran los vuelos con regulaciones en saltos previos. De la misma forma en la *Figura 14* puede apreciarse como sucede lo mismo con las demoras en aterrizajes. Cabe destacar que este efecto es mucho más apreciable en aterrizajes.

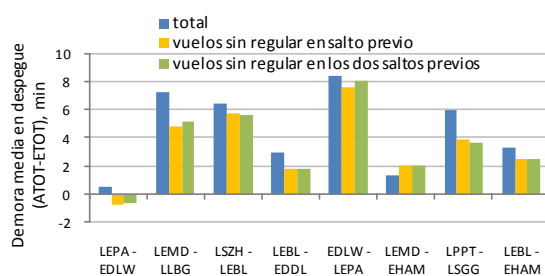


Figura 13 – Promedio de demora real en despegues para cada ruta. Análisis de propagación de demoras

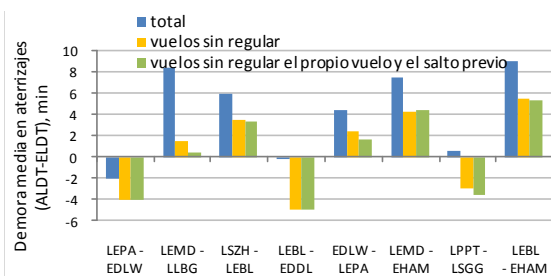


Figura 14 – Promedio de demora real en aterrizajes para cada ruta. Análisis de propagación de demoras

A continuación se realiza un análisis más detallado de la propagación de las demoras ATFM de las ocho rutas que se están analizando y que corresponden a aquellas con mayor porcentaje de regulaciones en los dos saltos previos. Para ello se representa la distribución de demoras totales en despegue y aterrizaje, para todos los vuelos de cada ruta y aquellos vuelos sin regulaciones en los saltos previos en los que este estudio se ha centrado.

En el caso de la ruta Palma de Mallorca – Dortmund, puede observarse en la *Figura 15(A)* como el área bajo la curva azul correspondiente a todos los vuelos es mayor que la correspondiente a las distribuciones sin propagación de demoras ATFM en valores positivos demora total, lo cual significa que la demora total disminuye eliminando estas propagaciones. En el caso de demoras en aterrizajes sucede lo mismo, además en la *Figura 15 (B)* puede apreciarse como esta está desplazada a valores negativos de demora, lo cual se debe a la absorción de demoras de despegues durante el vuelo, lo cual puede verse además en el promedio de demoras de la *Tabla 3* en el que las demoras en aterrizajes son negativas, es decir, las llegadas se adelantan.

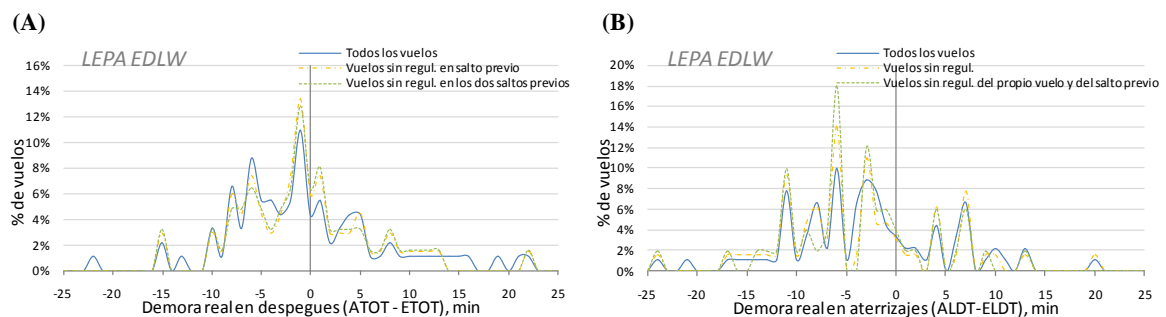


Figura 15 – Distribución de demoras, (A) Despegues (B) Aterrizajes, en la ruta Palma de Mallorca – Dortmund.

En la ruta Madrid – Ben Gurion, la demora total disminuye eliminando las propagaciones, lo cual se refleja en la *Figura 16(A)* y en el promedio de demoras en despegues que pasa de 7,3 minutos de todos los vuelos a 4,91 minutos eliminando vuelos con regulaciones en saltos previos. En el caso de demoras en aterrizajes, los retrasos que añade la propagación de las regulaciones es superior que en despegues, además en la *Figura 15 (B)* puede apreciarse como en esta ruta la gráfica de demora de aterrizajes está desplazada hacia la derecha, lo cual lleva a que la demora en aterrizajes es positiva, es decir, las llegadas se retrasan de forma que las demoras de despegues no se absorben durante el vuelo.

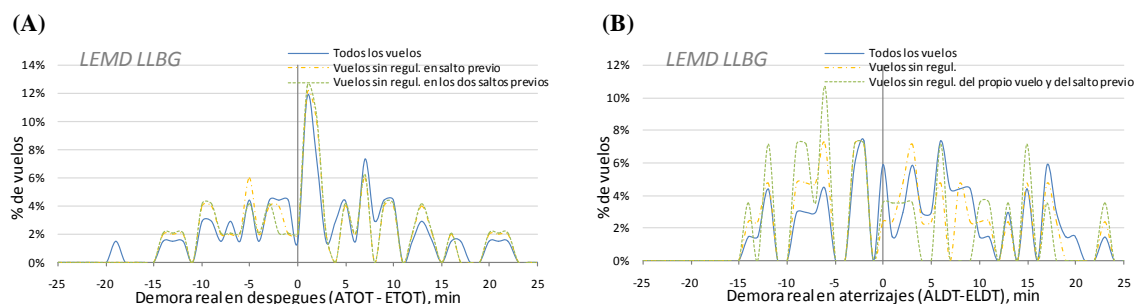


Figura 16 – Distribución de demoras, (A) Despegues (B) Aterrizajes, en la ruta Madrid – Ben Gurion.

En la ruta Zürich – Barcelona, la demora total disminuye eliminando las propagaciones, tanto en despegues como en aterrizajes, sin embargo el efecto es muy pequeño como puede observarse en la proximidad de las curvas en ambos gráficos. Además, ambos gráficos están considerablemente desplazados a la derecha, lo que representa un promedio de demoras positivo y elevado tanto en salidas como en llegadas.

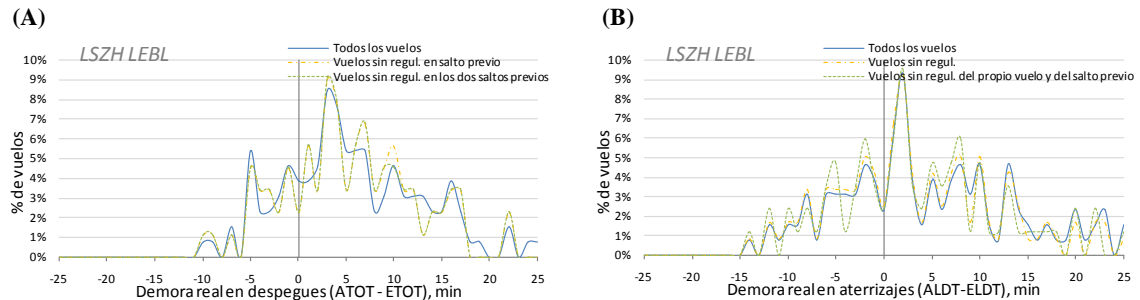


Figura 17 – Distribución de demoras, (A) Despegues (B) Aterrizajes, en la ruta Zürich – Barcelona.

En la ruta Barcelona - Düsseldorf, la demora total vuelve a disminuir eliminando las propagaciones, de forma más significativa en aterrizajes. En cuanto a las demoras en aterrizajes puede verse como el gráfico está desplazado a la izquierda lo cual supone que las demoras en salidas se absorben durante el vuelo.

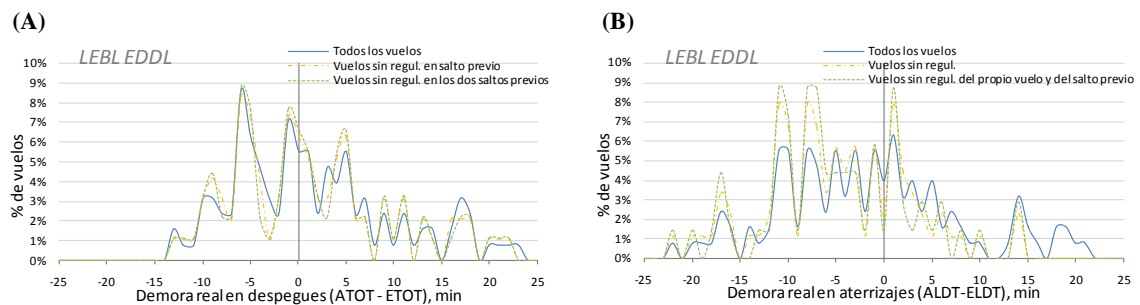


Figura 18 – Distribución de demoras, (A) Despegues (B) Aterrizajes, en la ruta Barcelona - Düsseldorf.

En la ruta Dortmund - Palma de Mallorca, la demora total también disminuye eliminando las propagaciones, de forma más significativa en aterrizajes. Ambos gráficos están desplazados a la derecha, lo que representa un promedio de demoras positivo tanto en salidas como en llegadas, el cual es significativamente elevado en el caso de los despegues.

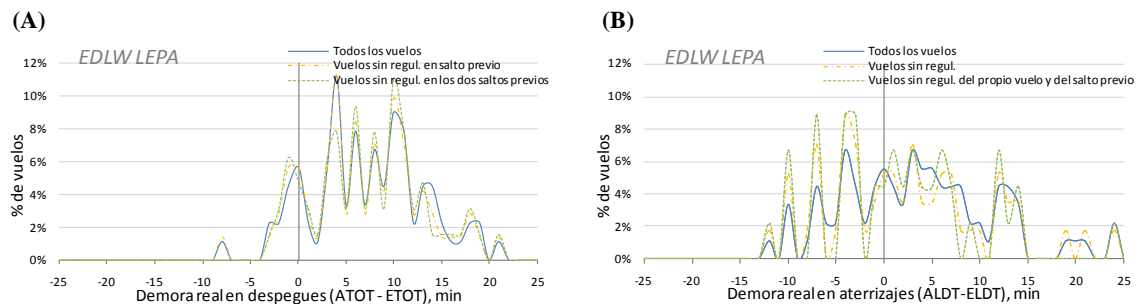


Figura 19 – Distribución de demoras, (A) Despegues (B) Aterrizajes, en la ruta Dortmund - Palma de Mallorca.

En la ruta Madrid – Schiphol, en el caso de despegues la demora total aumenta eliminando las propagaciones, lo cual supone que las demoras ATFM de los saltos previos son absorbidas por los nodos de la red. Sin embargo, las demoras en aterrizajes son superiores a las demoras en despegues, lo cual se traduce en una demora que está introduciendo la propia ruta, al margen de la propagación de las demoras ATFM.

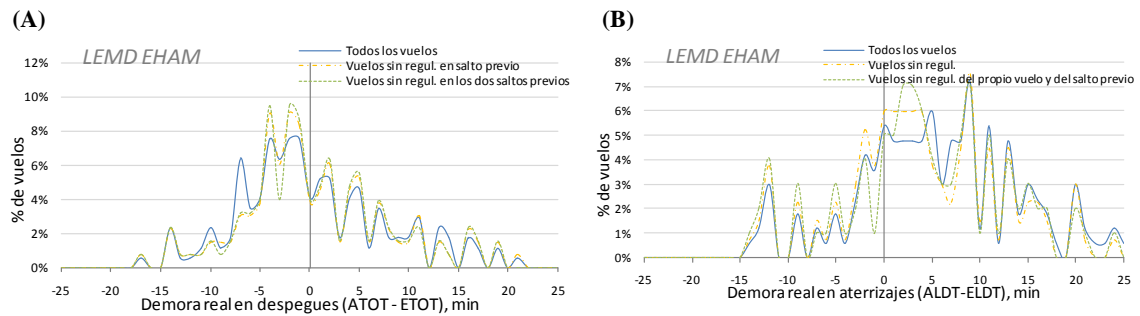


Figura 20 – Distribución de demoras, (A) Despegues (B) Aterrizajes, en la ruta Madrid – Schiphol.

En la ruta Lisboa – Ginebra, la demora total vuelve a disminuir eliminando las propagaciones, tanto en despegues como en aterrizajes. En cuanto a las demoras en aterrizajes puede verse como el gráfico está desplazado a la izquierda lo cual supone que las demoras en salidas se absorben durante el vuelo.

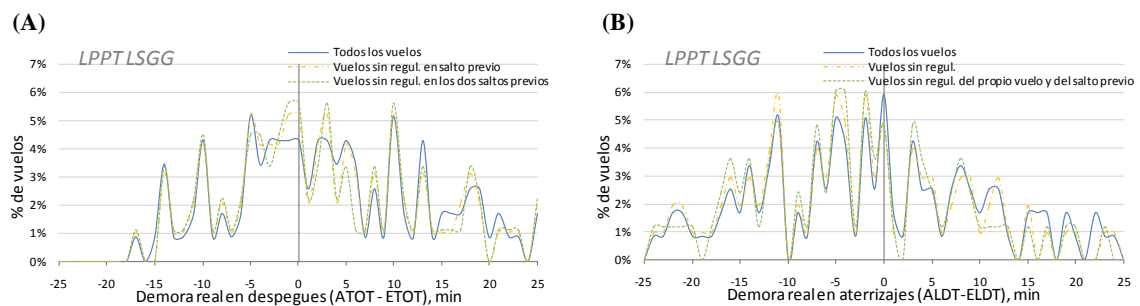


Figura 21 – Distribución de demoras, (A) Despegues (B) Aterrizajes, en la ruta Lisboa – Ginebra.

En la ruta Barcelona - Schiphol, la demora total disminuye eliminando las propagaciones, de forma más significativa en aterrizajes. Las demoras en aterrizajes son superiores a las demoras en despegues, lo cual se traduce en una demora que está introduciendo la propia ruta, al margen de la propagación de las demoras ATFM.

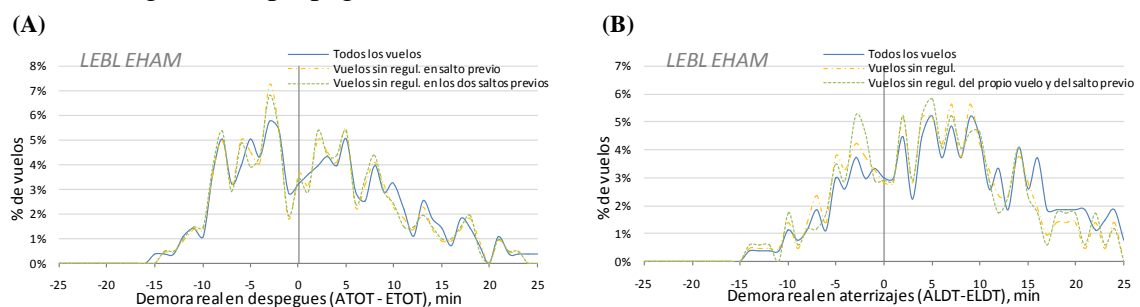


Figura 22 – Distribución de demoras, (A) Despegues (B) Aterrizajes, en la ruta Barcelona - Schiphol.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se aborda el estudio de datos de vuelo que pasan por el espacio aéreo español procedentes de CFMU (*Central Flow Management Unit*) que contiene información de regulaciones, y PALESTRA (sistema de explotación de datos de SACTA, Sistema Automatizado de Control del Tránsito Aéreo) que contiene información de planes de vuelo en los que se registra la matrícula de cada vuelo; con el objetivo de analizar las demoras ATFM, primarias, y la propagación de éstas, demoras secundarias. Un aspecto clave en dicho análisis consiste en el cruce de estas fuentes de información y la identificación de los saltos de cada aeronave a lo largo del día, lo cual se realiza a partir de la matrícula de cada aeronave.

Se ha analizado toda una serie de datos operacionales de demoras ATFM en que se ha observado que las regulaciones causadas por el espacio aéreo son cuatro veces superiores a las regulaciones originadas por restricciones en aeropuertos. Además, las regulaciones en aeropuerto afectan a un menor número de vuelos que las regulaciones en ruta. En este análisis también se ha observado que más del 40% de las regulaciones se dan en el primer salto de la aeronave a lo largo del día, siendo este salto en él que se dan más regulaciones, las cuales, además, tienen mayor afluencia entre las nueve y las doce de la mañana.

En el análisis de saltos diarios de cada aeronave se han observado resultados relevantes para el modelado de red. Se ha comprobado que el número de saltos pares siempre es superior a su impar anterior, y que además en los saltos pares el porcentaje de trayectos cuya aeronave termina en el aeropuerto de partida es con diferencia superior al caso de saltos impares. Por lo tanto, puede identificarse que existen trayectos diarios reiterativos entre dos aeropuertos, con aeronaves que vuelven al aeropuerto de partida.

El modelo de red que se presenta en el estudio se basa en considerar los aeropuertos como nodos de la red y las conexiones como los saltos diarios que realizan las aeronaves a lo largo del día de operación, pudiendo examinar los efectos de red tras enlazar los vuelos a partir de la matrícula de estos. Dada la complejidad que tiene la red de tráfico aéreo, en esta primera iteración, se parte del análisis de las rutas (punto a punto) con mayor porcentaje de vuelos, estudiando el efecto que tiene en cada ruta los saltos previos a ésta.

Del estudio de las rutas con mayor porcentaje de vuelos regulados en el salto previo, o en el salto anterior al previo, se observan comportamientos característicos de cada ruta que pueden ser utilizados para el modelado dichos aeropuertos (nodos) de la red. Entre los comportamientos se ha observado que a pesar de que típicamente la demora total disminuye eliminando las propagaciones de demoras ATFM de saltos previos, existen rutas en las cuales esto no sucede lo cual supone que no hay propagación de demoras ATFM sino que son absorbidas por los nodos de dicha ruta. Además, en determinadas rutas las demoras en salidas se absorben durante el vuelo, sin embargo en otras las demoras en aterrizajes son superiores a las demoras en despegues, lo cual se traduce en una demora que está introduciendo la propia ruta, al margen de la propagación de las demoras ATFM.

Los resultados obtenidos asientan la base para la actividad de investigación en curso, que en los siguientes pasos avanzará analizando propagaciones de otros indicadores, nuevas conexiones de los nodos de la red con el objeto de buscar nuevas características que permita modelar la red, así como en el estudio de más aspectos de los datos estudiados.

REFERENCIAS

- [1] FLEURQUIN, P., RAMASCO, J.J. y EGUILUZ, V.M. (2013), *Data-driven modeling of systemic delay propagation under severe meteorological conditions*. 10th USA/Europe ATM R&D Seminar
- [2] FLEURQUIN, P., RAMASCO, J.J. y EGUILUZ, V.M. (2013), *Systemic Delay propagation in the US airport network*, Scientific Reports, vol.3, p.1159.
- [3] FRICKE, H. y SCHULTZ, M. (2009), *Delay impacts onto turnaround performance: optimal time buffering for minimizing delay propagation*. 8th USA/Europe ATM R&D Seminar
- [4] BEATTY, R., HSU R., BERRY, L. y ROME, J. (1998), *Preliminary evaluation of flight delay propagation through an airline schedule*, 2nd USA/Europe ATM R&D Seminar
- [5] MAYER, C. y SINAI, T. (2003), *Network effects, congestion externalities, and air traffic delays: or why not all delays are evil*. American Economics Review, vol.93.
- [6] XU, N., DONOHUE, K. y otros (2005), *Estimation of delay propagation in the national aviation system using Bayesian networks*, 6th USA/Europe ATM R&D Seminar
- [7] SCHAEFER, L. y MILLNER, D. (2001), *Flight delay propagation analysis with the detailed policy assessment tool*, 2001 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics.
- [8] SRIDHAR, B, WANG, Y y otros (2009), *Modeling flight delays and cancellations at the national, regional and airport levels in the United States*, 8th USA/Europe ATM R&D Seminar.
- [9] PERFORMANCE REVIEW COMISSION (1999), *First Performance Review Report*.
- [10] PERFORMANCE REVIEW COMISSION (2013), *Performance Review Report 2012*.
- [11] CENTRAL OFFICE FOR DELAY ANALYSIS (2011), *Digest-Delays to Air Transport in Europe*.