

CANVI CLIMÀTIC, CANVI GLOBAL I METEOROLOGIA LOCAL: EL CAS DE LA CONCA DE LA MUGA (CONQUES INTERNES DE CATALUNYA)

Jordi Salat^{*}, **Josep Pascual**^{**}, **Gabriel Borràs**^{***}

**Institut de Ciències del Mar (ICM) salat@icm.csic.es*

***Metoestartit jpascual@meteolestartit.cat*

****Oficina Catalana del Canvi Climàtic (OCCC) gborras@gencat.cat*

CANVI CLIMÀTIC, CANVI GLOBAL I METEOROLOGIA LOCAL: EL CAS DE LA CONCA DE LA MUGA (CONQUES INTERNES DE CATALUNYA)

Jordi Salat^{*}, **Josep Pascual**^{**}, **Gabriel Borràs**^{***}

**Institut de Ciències del Mar (ICM) salat@icm.csic.es*

***Metoestartit jpascual@meteolestartit.cat*

****Oficina Catalana del Canvi Climàtic (OCCC) gborras@gencat.cat*

Resum:

El projecte LIFE MEDACC ("Mediterranean Adaptation to Climate Change") ha estudiat l'evolució recent dels cabals a les capçaleres del Segre, el Ter i la Muga amb l'objectiu d'avaluar l'impacte dels forçaments climàtics i els canvis d'usos del sòl. En aquesta comunicació ens centrarem en la Muga, on els cabals s'han reduït a la capçalera i han augmentat a la plana litoral. Mentre a la capçalera hi ha hagut un procés d'aforestació per abandonament de conreus i disminució de la precipitació, a la part baixa s'hauria incrementat la precipitació. Això planteja la possible influència de l'evaporació marina i vents litorals en la precipitació. L'evolució d'aquests dos factors, relacionats amb intercanvis entre el mar i l'aire, obtinguts en base a les observacions de l'Estartit (Empordà), prop de la conca del riu, es podrien associar a la reducció de precipitacions primaverals, però sobretot estivals, mentre es reforçarien prop de la costa durant la tardor.

Paraules clau: riu Muga, reducció de cabals, canvis d'usos del sòl, tendències climàtiques, intercanvis aire-mar

Abstract:

The recent evolution of the headwaters flows of the Segre, Ter and Muga rivers, has been studied through the LIFE MEDACC project (Mediterranean Adaptation to Climate Change) to assess the impact of climate forcings and changes in land use. In this paper we focus on the Muga basin, whose flows decreased in the head but rose to the low coastal plain. While in the head there was a process of afforestation due to abandonment of crops and climatic precipitation decrease, in its lower part there would have been a precipitation increase. This behaviour raises the influence of marine evaporation and coastal sea winds enhancing precipitation in the low part of the basin. The evolution of these two factors, related to air-sea exchanges, is presented based on observations at l'Estartit (Empordà), close to the river basin, could be associated with reduced rainfall in spring and mainly in summer, and the autumn increase near the coast.

Keywords: Muga river, Flow reduction, land use changes, climatic trends, air-sea exchanges

Resumen:

Dentro del proyecto LIFE MEDACC ("Mediterranean Adaptation to Climate Change") se ha estudiado la reciente evolución de los caudales en cabecera del Segre, el Ter y Muga con objeto de evaluar el impacto de forzamientos climáticos y cambios en los usos del suelo. En esta comunicación nos centraremos en la Muga, cuyos caudales se han reducido en cabecera y aumentado en la llanura litoral. Mientras la cabecera ha sufrido una disminución de precipitación, unida al proceso de aforestación por abandono de cultivos, en la parte baja habría aumentado la precipitación. Ello plantea la posible contribución de la evaporación marina y los vientos

de componente marítima en la precipitación litoral. La evolución de estos dos factores, ambos relacionados con intercambios aire-mar, en base a las observaciones de l'Estartit (Empordà), cerca de la cuenca, se podrían asociar a una reducción de precipitaciones primaverales y sobretodo estivales, y un reforzamiento costero en otoño.

Palabras clave: Río Muga, reducción de caudales, cambios de uso del suelo, tendencias climáticas, intercambios aire-mar

1. Introducció

En un context de canvi climàtic i canvi global, la gestió de l'aigua i la disponibilitat del recurs són elements força vulnerables. El projecte [LIFE MEDACC](#) (acrònim en anglès de "Mediterranean Adaptation to Climate Change") ha analitzat els cabals circulants en capçalera des del 1950 fins al 2013 a les conques de tres rius: Muga, Ter i Segre, d'est a oest. Les capçaleres d'aquests tres rius cobreixen la part més oriental del Pirineu català, pràcticament des de la costa mediterrània fins a l'Aragó. L'objectiu del projecte és, entre d'altres, determinar com els forçaments d'origen climàtic i els canvis d'úsos del sòl haurien influenciat en l'evolució dels cabals esmentats. Els resultats més significatius podrien resumir-se de la següent manera: en totes tres conques s'observa una reducció significativa de cabals circulants en capçalera. Ara bé, mentre que a la conca del Segre aquesta reducció s'explica per la disminució de precipitacions i l'increment de l'evapotranspiració com a conseqüència de l'increment de la temperatura, és a dir, per factors climàtics, a les capçaleres de la Muga i el Ter la reducció de cabals ha estat més important de la que hom podria esperar per l'evolució dels paràmetres climàtics esmentats. La raó d'aquest decrement addicional cal atribuir-lo a un procés progressiu i constant d'aforestació per pèrdua de sòl agrícola, com a conseqüència de l'abandonament rural i una deficient gestió forestal en les capçaleres d'aquests rius.

Un dels problemes més oberts en l'estudi del clima i la seva evolució és el comportament de la precipitació. Tant a escala global com local, les incerteses en aquest paràmetre són molt importants fins el punt que hi ha discrepàncies notables entre els models en les prediccions del règim de precipitacions (Gonçalves *et al*, 2014). Així, si bé hi ha un acord clar en què augmenta l'aridesa i la intensitat de precipitació en base al fet que l'augment de temperatura de l'aire fa que admeti més quantitat de vapor d'aigua, ni la distribució en l'espai d'aquests fenòmens ni llur evolució estan prou ben establerts via els models en ús. Part del problema rau en les estimacions del component marítim del cicle de l'aigua (Schmitt, 1995). S'estima que, globalment, 2/3 de l'aigua que precipita sobre els continents prové d'evapotranspiració i, per tant, aquest component podria lligar-se perfectament amb el comportament de l'aire més calent esmentat més amunt. Ara bé, el terç restant d'aquesta precipitació cal explicar-la en l'oceà. Concretament, cal tenir bona informació sobre l'evaporació de l'aigua superficial i el transport de vapor i núvols des de l'oceà cap al continent. Els vents són perfectament mesurables, no només de manera directa (anemòmetres) sinó també a través de radars i altres tipus de sensors allotjats en satèl·lits; però l'evaporació no és mesurable directament sinó que cal estimar-la a través d'altres paràmetres com la temperatura de l'aigua, de l'aire, la humitat i el vent en superfície. Aquest procediment comporta errors d'ajust i requereix molta informació, no sempre disponible de manera general.

En aquesta comunicació intentarem esbrinar si amb les dades de més de 40 anys de seguiment meteorològic i oceanogràfic a l'Estartit (Empordà-Costa Brava) podem trobar alguna relació que lligui el comportament de la pluviometria, l'evaporació marina estimada i el règim de vents a la costa. Per això ens centrarem en els resultats del projecte LIFE-MEDACC obtinguts a la conca de la Muga, aprofitant que és la més propera a la costa de les tres estudiades i amb el punt més llunyà situat a menys de 50 km de l'Estartit (Fig. 1).

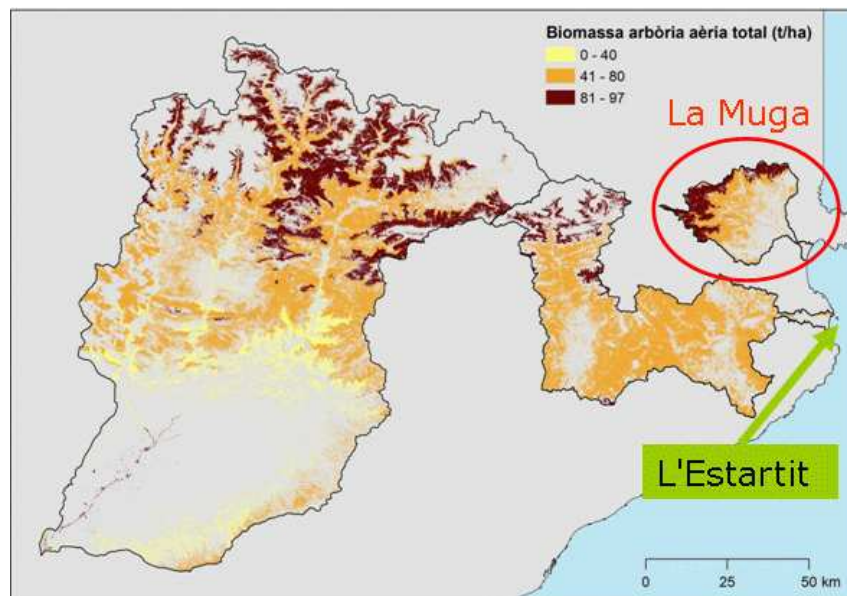


Figura 1. Mapa de les conques del projecte Life MEDACC, de la conca de la Muga i localització de l'Estartit

Es tracta, doncs, d'una gran oportunitat per posar a prova possibles lligams entre processos d'intercanvi oceà-atmosfera i la hidrografia. Tal com s'ha esmentat, aquesta conca ha sofert una reducció de cabals de capçalera atribuïble a la tendència climàtica de disminució de precipitació i a l'augment de l'evapotranspiració degut no només al clima sinó també, i en part molt significativa, a l'aforestació. Per contra s'ha observat un augment de cabals a la part baixa de la conca que respondrien a un augment relatiu -tot i que no significatiu- de la precipitació (a excepció de l'estiu), i a l'alteració del règim natural del riu com a conseqüència de la construcció de l'embassament de Darnius-Boadella l'any 1973, que allibera el màxim de cabals en època estival coincidint amb les campanyes de reg (vegeu Taula 2 a la secció de resultats).

2. Dades i mètodes

2.1 Conca de la Muga

L'informe que recull les fonts i els mètodes per desenvolupar el conjunt necessari de dades ambientals per a les diferents tasques i objectius del projecte MEDACC (climatologia, hidrologia, usos del sòl), amb detall de tota la informació alfanumèrica i cartogràfica, així com el control de qualitat i homogeneïtzació dels diferents conjunts de dades, està disponible en aquest enllaç (<http://medacc-life.eu/ca/document/deliverable-4-protocol-database-quality-and-homogeneity>). Les tendències en el clima, la hidrologia i l'ús del sòl dins de les tres conques, Segre, Ter i Muga, al llarg de les últimes dècades es detallen en aquest altre enllaç (<http://medacc-life.eu/ca/document/deliverable-12-les-tendencies->

[historiques-en-el-clima-la-hidrologia-i-lus-del-sol](#)). Les estacions d'aforament referits a la Taula 2 (secció de resultats) es mostren al mapa de la Figura 2.

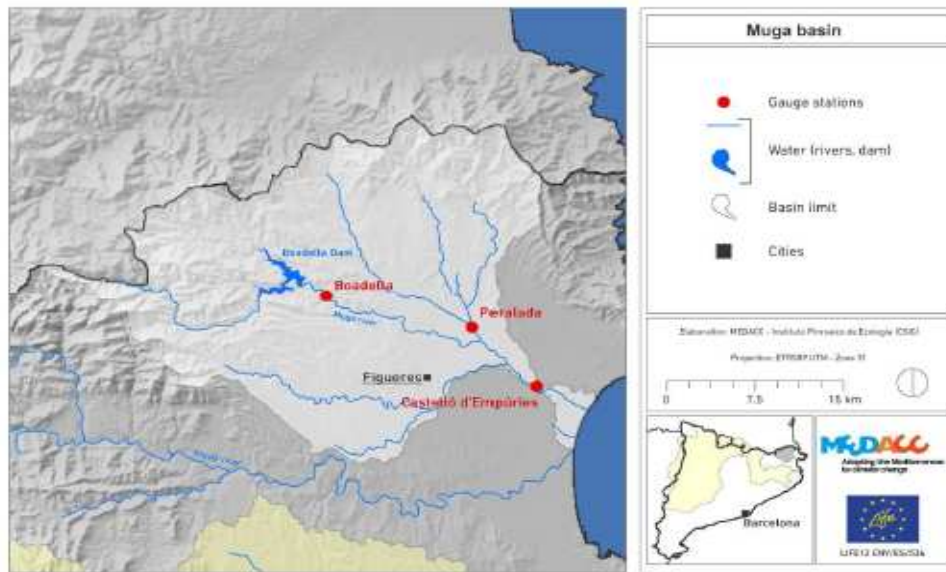


Figura 2. La conca de la Muga amb les estacions d'aforament utilitzades al Life MEDACC

2.2. Dades oceanogràfiques i meteorològiques a l'Estartit

Les dades de temperatura de l'aire i de la superfície del mar, humitat relativa, evaporació i vents, provenen de les sèries obtingudes a l'estació oceanogràfica i meteorològica de l'Estartit. Les característiques d'aquestes observacions i el mètode seguit es resumeixen en la Taula 1.

Variable	Mètode	Posició	Inici
Temperatura de l'aire	termòmetre	P. Marítim (caseta meteo)	1971
Temperatura de superfície del mar	termòmetre	42°03'N, 03°15'15"E	1974
Humitat relativa	termòmetres sec i humit	P. Marítim (caseta meteo)	1971 (1976)
Evaporació	evaporímetre de Piché	P. Marítim (caseta meteo)	1976
Vent	anemòmetre	cim de Roca Maura (221 msnm)	1988 (1996)

Taula 1. Característiques de les dades de l'Estartit emprades en aquesta comunicació: variable, mètode, posició, inici de la sèrie (entre parèntesi l'inici de les dades emprades aquí)

2.2.1 Evaporació al mar

Per fer una estimació de l'evaporació marina s'ha partit de la informació de l'evaporímetre de Piché, que mesura els mm d'aigua evaporats en les condicions de dins la caseta meteorològica. És a dir, poc vent, a la humitat mesurada i amb l'aigua a temperatura ambient. Si s'assumeix que la humitat no varia significativament, només caldrà corregir l'efecte de la temperatura de l'aigua de superfície del mar i el del vent. A partir d'observacions en diverses situacions de règim de vents, es pot assumir que el vent a mar

obert és molt similar al mesurat al cim de Roca Maura. D'altra banda, el vent dins la caseta és sobre un 10% del de Roca Maura (pot arribar a un 25% amb vents molt forts). Per tant, per poder fer les correccions a les condicions de mar, haurem de calcular les humitats específica de l'aire (q_a), la de saturació (q_s) i la de saturació a la temperatura de la superfície del mar (q_w) necessàries per aplicar les *bulk formulae* (Zhang, 1997) que donen l'evaporació:

$$E = K \cdot V \cdot (q_s - q_a),$$

on E és l'evaporació, V és la velocitat del vent i K és una constant desconeguda. Ara bé, com que disposem de la mesura de l'evaporímetre de Piché, i que el vent on hi ha l'evaporímetre és un 10 % del vent a mar, podem estimar l'evaporació en el mar, EM , amb la següent proporció, on EP és la mesura de l'evaporímetre de Piché:

$$EM / EP = 100 / 10 \cdot (q_w - q_a) / (q_s - q_a).$$

Per tant,

$$EM = 10 \cdot EP \cdot (q_w - q_a) / (q_s - q_a),$$

Aquesta fórmula podria sobreestimar l'evaporació amb vents forts, però en general podem considerar-la com un límit superior raonable de l'evaporació.

2.2.2 Vents de mar

Les dades de vent originals estan agrupades en sectors de 1/16 de cercle i en tres categories: fluixos (< 10 km/h), forts (de 10 a 25 km/h) i molt forts (> 25 km/h). Segons es pot veure a la Fig. 1 (localització Estartit i conca de la Muga), els vents que poden aportar núvols i transportar aigua evaporada des del mar cap a la conca de la Muga seran essencialment del segon quadrant. És a dir, entre Llevant i Migjorn. Per tant, dels vents totals, prendrem només aquells que vinguin dels sectors inclosos en aquest quadrant. La resta suposarem que no són capaços d'aportar precipitació a la conca. Per altra banda, agruparem les tres categories en dues: menys o més de 10 km/h, considerant que els vents forts o molt forts podran arribar a la capçalera de la conca però els fluixos només abastaran la part més baixa.

2.3 Promitjos i tendències

Els resultats es presenten en forma de promitjos mensuals a partir de les dades primàries o les estimades. Les dades anuals s'obtiniran promitjant les mensuals i les tendències que es mostren són sempre lineals.

3. Resultats

3.1 Balanç hídric de la conca

Les dades de cabals, precipitació i evapotranspiració estan resumides a la Taula 2 on s'observa que tant en la part alta (Boadella) com baixa de la conca (Castelló d'Empúries), la precipitació no dona senyals clars de tendència, amb excepció de l'estiu on s'ha reduït significativament. Per contra, en l'evapotranspiració sí que hi ha una tendència clara, estadísticament positiva llevat de l'hivern, en totes les estacions de l'any, i anualment, tant a la part alta com baixa de la conca.

Cabals	1951-2013	1973-2013		
	Boadella (estació)	Boadella (estació)	Castelló d'Empúries	Boadella (entrada)
Anual	-48.9	-16.6	39.1	-19.6
Hivern	-54.4	-35.8	-15.0	-34.1
Primavera	-55.0	8.3	83.2	7.9
Estiu	63.6	5.5	13.4	-66.9
Tardor	-95.2	57.4	95.0	-0.4
Precipitació				
Anual	-12.0	-1.6	4.5	
Hivern	29.4	22.8	33.2	
Primavera	-7.4	4.0	11.0	
Estiu	-46.7	-57.7	-60.5	
Tardor	-11.0	38.8	44.3	
ETo				
Anual	9.4	8.8	8.6	
Hivern	10.4	7.1	7.1	
Primavera	8.3	12.0	12.1	
Estiu	10.9	8.4	8.1	
Tardor	7.5	6.0	5.5	

Taula 2: Percentatges anuals i estacionals, de tendència de cabals, precipitació i evapotranspiració de referència a la conca de la Muga (període 1951-2013 i 1973-2013). En negreta, percentatges estadísticament significatius.

Pel que fa als cabals, cal assenyalar d'antuvi que la construcció i posada en marxa de l'embassament de Boadella l'any 1973 alterà el règim hidrològic de la conca, tal i com pot observar-se a la Fig. 3 corresponent a l'estació d'aforament de Boadella; així, abans de la construcció, els cabals màxims es produïen a la tardor i a l'inici de la primavera. En canvi, una vegada construït l'embassament, aquest màxim esdevé als mesos d'estiu.

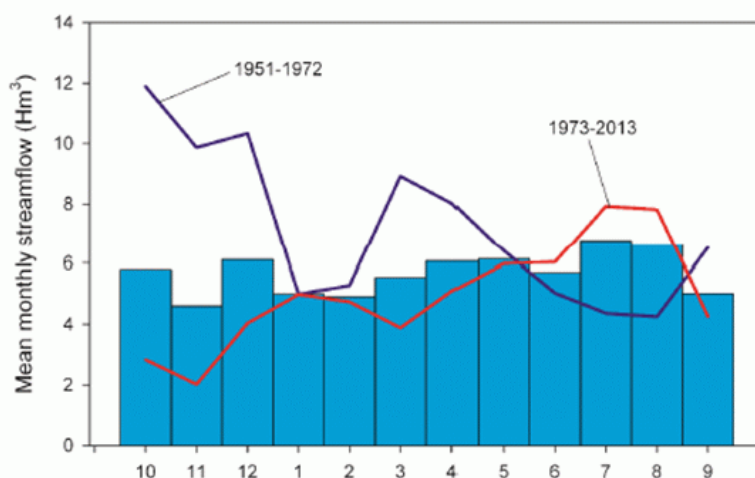


Figura 3. Mitjana dels cabals mensuals a l'estació d'aforament de Boadella: línia blava (1951-1972) i línia vermella (1973-2013).

A la Fig. 4 es mostra clarament la tendència negativa de la relació cabal versus precipitació en capçalera de la conca, tant a l'embassament de Darnius-Boadella com a l'estació d'aforament de Boadella, mentre que la tendència d'aquesta mateixa relació a la part baixa de la conca a l'estació de Castelló d'Empúries és positiva. A partir d'aquests resultats, així com de l'anàlisi de l'informe esmentat a la secció 2.1, hom pot avaluar que mentre a capçalera de la conca hi ha una tendència negativa significativa d'uns 3 Hm^3 per dècada, a la part baixa aquesta tendència és positiva i avaluada en uns $3,2 \text{ Hm}^3$ per dècada; podríem parlar d'una conca amb una doble personalitat o, en el cas que ens ocupa, amb un comportament radicalment distint en capçalera respecte la part baixa. Els valors mensuals dels cabals estan totalment esbiaixats per les demandes i la precipitació té una gran variabilitat també a escala mensual, atès que es tracta d'una conca molt petita.

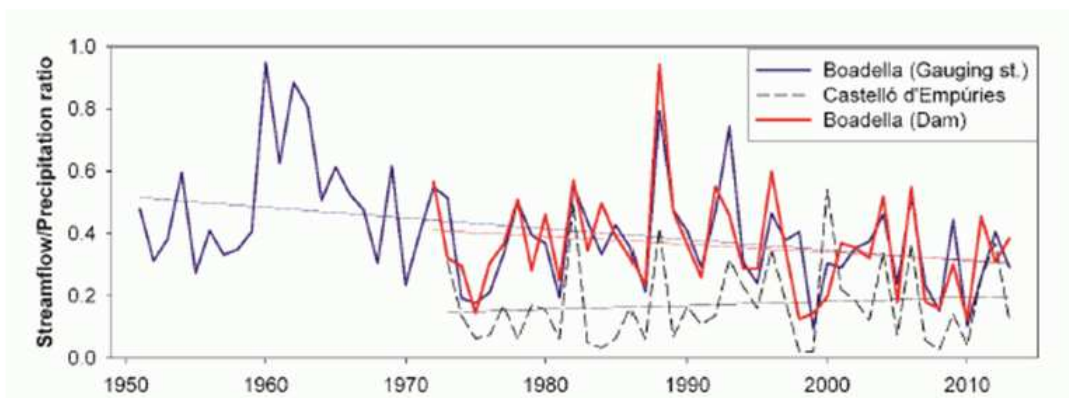


Figura 4. Evolució de la ràtio entre cabals i precipitació a l'estació d'aforament de Boadella (línia blava), a l'embassament de Darnius-Boadella (línia vermella) i a l'estació d'aforament de Castelló d'Empúries (línia negra puntejada)

3.2 Evaporació marina i vents de mar

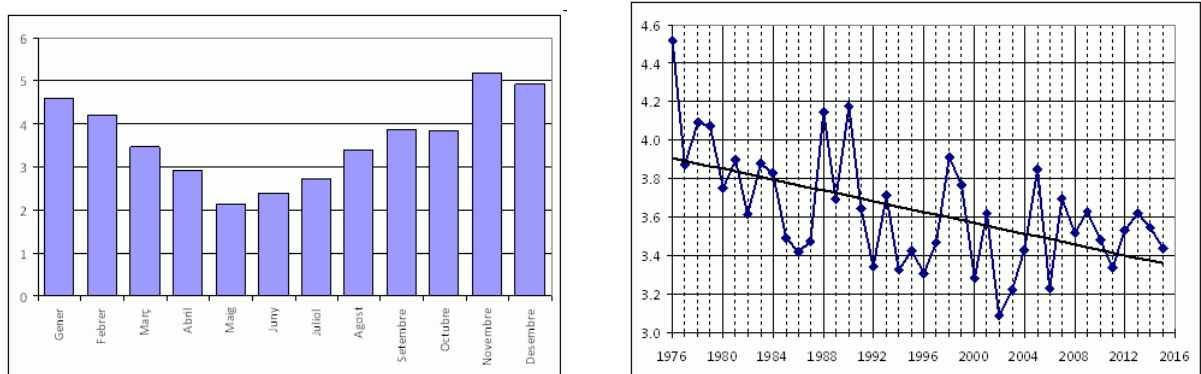


Figura 5. Evaporació marina, expressada en mm/dia: a) cicle anual (mitjana mensual) i evolució de les mitjanes anuals

La figura 5 mostra els valors d'evaporació marina del cicle anual mitjà i l'evolució de la mitjana anual, expressats en mm/dia. S'observa que els valors màxims d'evaporació es produeixen a la tardor i hivern mentre que a l'estiu, i especialment a la primavera, són més baixos. L'evolució en el temps (1976-2015) presenta una tendència negativa d'uns $0,15 \text{ mm}$ diaris per dècada, significativa.

Les dades del recorregut mitjà diari del total de vents del segon quadrant, des del 1996 (Fig. 6) no mostren cap tendència significativa però si separem els vents fluixos (<10 km/h) dels forts (>10 km/h), observem que mentre els forts tenen una tendència negativa de 13 km/dia per dècada, els fluixos mostren una tendència positiva de 12 km/dia per dècada, totes dues significatives. Per mesos, els patrons de vent fort i vent fluix són similars amb el màxim a la primavera i a l'octubre, i un mínim a l'hivern.

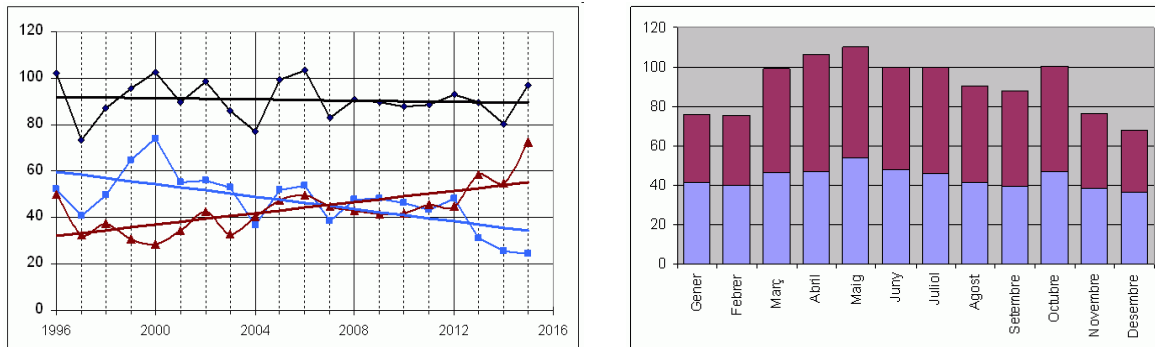


Figura 6. Recorregut mitjà diari dels vents del segon quadrant. A l'esquerra: evolució anual i a la dreta distribució per mesos. Vent fort (>10 km/h; blau) i vent fluix (<10 km/h; grana), vent total (negre).

Si comparem l'evolució dels darrers 20 anys del vent fort en relació al vent total (Fig. 7), sempre del segon quadrant, s'observa una tendència negativa d'un 14% per dècada, significativa. Per mesos, tots presenten tendències negatives (Taula 3) per bé que amb força variabilitat interanual. El març, setembre, octubre i novembre són inferiors al 10%, mentre que al desembre se supera el 20% per dècada.

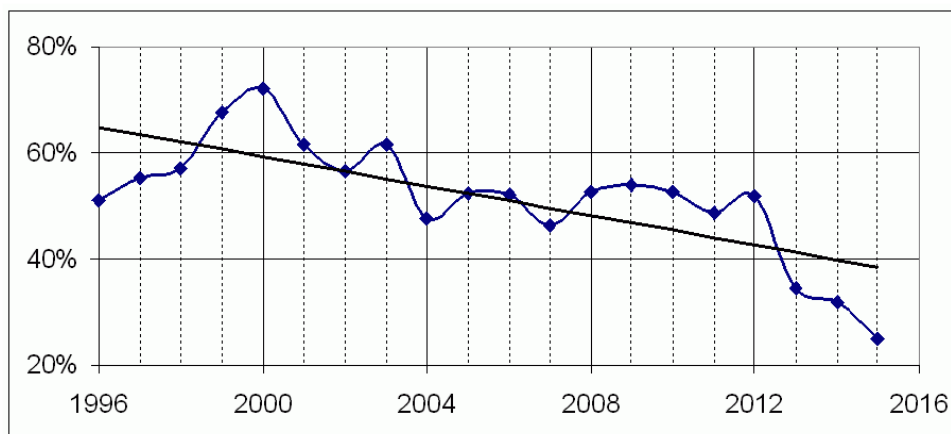


Figura 7. Vents del segon quadrant. Evolució del percentatge de vents forts respecte el total.

Gen.	Feb.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Des.
15,4	15,0	7,8	17,5	17,4	18,1	16,8	14,0	7,6	9,9	0,2	22,1

Taula 3. Vents del segon quadrant. Tendències mensuals de decreixement (en percentatge) per dècada dels vents forts, respecte el total. Atès que els vents totals no mostren cap tendència, el decreixement dels vents forts porta associat un increment equivalent dels vents febles.

4. Discussió i conclusions

Els resultats de l'evolució hidrològica de la conca de la Muga en els darrers anys mostren una tendència clara a una reducció de cabals circulants a la capçalera causats per l'augment d'evapotranspiració i la reducció de precipitació. Tal com s'identifica a (<http://medacc-life.eu/ca/document/deliverable-12-les-tendencies-historiques-en-el-clima-la-hidrologia-i-lus-del-sol>), la conca de la Muga està subjecta a la tendència climàtica general, que provoca un augment de l'aridesa causat per l'escalfament i la reducció de precipitació. A aquest efecte se li superposa un increment addicional de transpiració causat per l'aforestació deguda a l'abandonament dels conreus i a una deficient gestió forestal a la part alta del riu. Si bé les dades disponibles (Taula 2) posen de manifest que l'evapotranspiració augmenta, la reducció de precipitació a la capçalera no és significativa –a excepció de l'estiu-, degut a una gran variabilitat interanual i el caràcter dispers de la pròpia precipitació. Per altra banda, els cabals a la part baixa mostren una tendència a augmentar malgrat l'evapotranspiració a l'alça i, una vegada més, amb unes precipitacions molt variables i sense tendència significativa, llevat de l'estiu on s'hi observa també una reducció significativa.

La tendència climàtica general a escala més àmplia és clarament negativa. D'acord amb l'anàlisi climatològica a nivell de Catalunya (Martin-Vide *et al*, 2016), la reducció de precipitacions (tot i que en molt pocs llocs es pot considerar significativa), és general llevat de dues petites regions on s'incrementa: una, a cavall entre la Conca de Barberà i la part oriental de les Garrigues, i l'altra a la zona costanera de l'Empordà, precisament a la part baixa de la conca de la Muga. Cap d'aquestes dues excepcions però és prou significativa i, aquest és el "drama" de les dades de precipitació, ja que el caràcter dispers d'aquest meteor fa que les mesures puntuals siguin molt variables i, per tant, és difícil que se'n puguin treure tendències significatives. Per compensar aquest problema, es podria "integrar" la precipitació en una àmplia superfície, per exemple, la capçalera d'una conca hidrogràfica, però per tenir unes dades fiables caldria compensar les pèrdues per evapotranspiració i infiltració. És a dir, si bé per una banda augmentem la significació, per una altra s'augmenta la incertesa i això és el que precisament s'observa amb les mesures de cabals a les estacions d'aforament de la Muga -Boadella i Castelló d'Empúries-, amb l'agreujant de la regulació artificial que altera considerablement el comportament de la conca (Fig. 3). Com pot apreciar-se en els resultats (Taula 2) aquesta informació no ens acaba de tancar el balanç i, una vegada més, la variable precipitació és la més incontrolada.

Les dades d'evaporació marina mostren un cicle anual amb valors mínims a la primavera i principis d'estiu (Fig. 5) a causa de la inèrcia tèrmica de l'aigua que porta un retard en l'escalfament primaveral respecte l'aire. L'aire en contacte amb l'aigua es refreda i admet menys vapor. La situació, a més, s'agreuja amb la tendència global a l'escalfament del canvi climàtic, que fa que s'allargui el període on l'aire és més càlid que l'aigua (Salat y Pascual, 2008). Aquest efecte, però, és compensat en part pel relatiu augment dels vents de component marítim durant aquesta època de l'any (Fig. 6). Des del punt de vista de la conca, s'observa un decreixement dels vents forts (Fig. 7) que podrien abastar la capçalera del riu a costa de la tendència a l'augment dels vents febles, que afavoririen la precipitació a la part baixa del riu. Globalment, però, la tendència a la baixa de l'evaporació marina (Fig. 5) afavoriria la disminució global de la precipitació.

En resum, en època d'evaporació marina baixa (primavera-estiu) hi ha un decreixement de vents marins que podria explicar la disminució de precipitacions en aquest període a tota la conca. La baixada de vents forts de component marítim respecte al total, explicaria la tendència de disminució de precipitació a la capçalera a costa de l'augment dels vents febles a la part baixa, ja que el vent total no mostra cap tendència.

5. Referències

Gonçalves, M., A. Barrera-Escoda, D. Guerreiro [et al.] (2014). Seasonal to yearly assessment of temperature and precipitation trends in the North Western Mediterranean Basin by dynamical downscaling of climate scenarios at high resolution (1971-2050). *Climatic Change*, 122, 1-2: 243-256.

Martín-Vide, J.M., M. Prohom and M. Busto (2016). Canvis observats en el clima de Catalunya. IEC i GECC (en premsa)

Salat J., J. Pascual (2008) ¿Volverán las lluvias de primavera? o ¿Cómo puede afectar el calentamiento global al régimen primaveral de precipitaciones en la cuenca mediterránea? <http://www.fnca.eu/biblioteca-del-agua/documentos/documentos/1306271426-como-afecta-el-calentamiento-global-a-las-precipitaciones-en-la-cuenca-mediterranea-jordi-salat.pdf>

Schmitt, R. W., 1995. The ocean component of the global water cycle. *U.S. National Report to International Union of Geodesy and Geophysics, 1991–1994, Supplement to Reviews of Geophysics*: 1395–1409.

Zhang G. J. (1997) A Further Study on Estimating Surface Evaporation Using Monthly Mean Data: Comparison of Bulk Formulations. *J. Climate*, 10: 1592-1600.